

2008年 8月
博士學位論文

강우재현 모형실험에 의한 불포화
무한사면의 간극수압 특성

朝鮮大學校 大學院

土木工學科

金善學

강우재현 모형실험에 의한 불포화
무한사면의 간극수압 특성

*Pore Water Pressure Characteristics of Unsaturated
Infinite Slopes through Simulated Rainfall System*

2008年 8月 25日

朝鮮大學校 大學院

土木工學科

金善學

강우재현 모형실험에 의한 불포화
무한사면의 간극수압 특성

指導教授 沈 泰 燮

이 論文을 工學博士學位 論文으로 提出함.

2008年 4月

朝鮮大學校 大學院

土木工學科

金 善 學

金善學의 博士學位論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 _____ (印)

委員 朝鮮大學校 教授 _____ (印)

委員 東新大學校 教授 _____ (印)

委員 湖南大學校 教授 _____ (印)

委員 朝鮮大學校 教授 _____ (印)

2008年 6月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
1.1 연구목적 및 배경	1
1.2 연구동향	3
1.3 연구방법 및 범위	6
제2장 불포화 지반과 침투거동	9
2.1 불포화 지반의 이론	9
2.1.1 불포화토의 토질역학	9
2.1.2 함수특성곡선	17
2.1.3 불포화토의 투수계수	33
2.2 강우시 지반의 침투거동	43
2.2.1 1차원 침투이론	43
2.2.2 습윤전선의 변화	46
2.3 불포화토의 침투해석	50
2.3.1 체적함수비 및 투수함수	51
2.3.2 흐름법칙	53
2.3.3 지배방정식	53

제3장 실내모형실험	56
3.1 강우재현 모형실험 사례	56
3.1.1 국외사례	56
3.1.2 국내사례	58
3.2 강우재현 모형실험 계획	60
3.2.1 고려할 영향인자	61
3.2.2 강우재현 실험계획	63
3.3 대상 화강암질 풍화토의 특성	64
3.3.1 대상 화강암질 풍화토의 물리·역학적 특성	64
3.3.2 대상 화강암질 풍화토의 불포화 함수특성곡선	67
3.4 강우재현 모형실험	68
3.4.1 실험장치	68
3.4.2 실험방법	75
3.5 함수특성곡선실험	79
3.5.1 실험장치	79
3.5.2 실험방법	80
제4장 모형실험에 의한 침투해석	83
4.1 강우재현 모형실험의 결과	83
4.1.1 체적함수비와 모관흡인력의 정상상태	83
4.1.2 강우강도 변화에 따른 결과	91
4.1.3 사면경사 변화에 따른 결과	105
4.1.4 강우지속시간 변화에 따른 결과	119
4.2 함수특성곡선실험의 결과 및 분석	130
4.2.1 함수특성곡선실험의 결과	130

4.2.2 추정법과 실험에 의한 함수특성곡선 비교	135
4.2.3 불포화토의 추정 투수특성곡선	137
4.3 모형실험 결과에 의한 불포화토의 침투특성 분석	140
4.3.1 습윤전선의 깊이	140
4.3.2 불포화된 화강암질 풍화토의 이력현상	146
4.3.3 모형실험에 의한 함수특성곡선	149
제5장 수치해석과 강우재현 모형실험의 비교	154
5.1 수치해석의 개요	154
5.2 해석조건 및 경계조건	154
5.3 수치해석의 결과 비교검토	157
5.3.1 해석조건 NA-1의 결과비교	157
5.3.2 해석조건 NA-2의 결과비교	160
5.3.3 해석조건 NA-3의 결과비교	163
5.3.4 해석조건 NA-4의 결과비교	166
5.4 모형실험과 수치해석 결과의 분석	169
제6장 결 론	170
참 고 문 헌	172

표 목 차

표 3.1	강우재현 모형실험 국외사례(Miyazaki)	56
표 3.2	강우재현 모형실험 국외사례(Rahardjo)	57
표 3.3	강우재현 모형실험 국외사례(Meiketsu)	57
표 3.4	강우재현 모형실험 국내사례(김영묵)	59
표 3.5	강우재현 모형실험 국내사례(김홍택)	59
표 3.6	영향인자들의 조건에 따른 강우재현 모형실험	63
표 3.7	대상 화강암질 풍화토의 물성시험 결과	66
표 3.8	입도분포를 이용한 함수특성곡선의 추정(건조과정)	68
표 4.1	함수특성곡선 모델에 따른 계수	134
표 4.2	함수특성곡선 모델별 공기함입값(AEV)과 습윤전면흡인력(WFS)	134
표 4.3	함수특성곡선에서 얻어진 불포화토의 특성값(건조과정)	135
표 4.4	모형실험과 함수특성곡선실험에 의한 Fredlund & Xing의 계수	149
표 4.5	불포화 특성값의 비교(Fredlund & Xing의 모델)	152
표 5.1	영향인자들에 따른 수치해석 조건	155

그 립 목 차

그림 1.1 연구진행 절차	8
그림 2.1 포화·불포화 토질역학의 구분	9
그림 2.2 불포화토의 구성요소	11
그림 2.3 불포화토의 3상과 4상	11
그림 2.4 물-공기 경계면에서의 표면장력	12
그림 2.5 3차원 곡면에서의 표면장력	14
그림 2.6 전형적인 흙의 함수특성곡선	18
그림 2.7 전형적인 흙의 함수특성의 불포화영역	19
그림 2.8 함수특성곡선의 이력현상을 설명하는 모관현상	20
그림 2.9 Fredlund & Xing의 계수(a, n, m)에 따른 함수특성곡선 형상의 변화(I)	28
그림 2.9 Fredlund & Xing의 계수(a, n, m)에 따른 함수특성곡선 형상의 변화(II)	29
그림 2.10 Soil-Vision 프로그램을 이용한 함수특성곡선	32
그림 2.11 투수계수 함수	33
그림 2.12 함수특성곡선과 투수특성곡선의 이력현상	35
그림 2.13 불포화토의 정수위 투수시험 장치의 모식도	37
그림 2.14 Brooks & Corey 추정식에 의한 투수특성곡선	40
그림 2.15 깊이에 따른 함수비 분포	44
그림 2.16 강우시 습윤대의 형성	46
그림 2.17 포화조건외 강우강도와 지속시간	49
그림 2.18 체적함수비의 일반적인 분포형태	51
그림 2.19 모래질, 실트질, 점토질 토사의 체적함수비 분포형태	52
그림 3.1 산사태 발생지점의 사면경사	61
그림 3.2 대상 화강암질 풍화토의 입도분포곡선	65

그림 3.3	입도분포를 이용한 추정 함수특성곡선	67
그림 3.4	강우재현 모형실험장치 모식도	69
그림 3.5	모형토조와 모형사면	70
그림 3.6	모형토조의 상세도	71
그림 3.7	강우재현장치	72
그림 3.8	강사장치 및 경사조절장치	73
그림 3.9	AQUA-TEL-TDR 함수량계	74
그림 3.10	Tensiometer와 TDR의 계측기 설치평면도	76
그림 3.11	Tensiometer와 TDR의 계측기 설치단면도	77
그림 3.12	강우재현 모형실험 수행과정	78
그림 3.13	함수특성곡선실험(SWCC Cell Test) 장치	80
그림 3.14	함수특성곡선실험(SWCC Cell Test) 순서	81
그림 4.1	체적함수비의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-1)	84
그림 4.2	체적함수비의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-2)	85
그림 4.3	체적함수비의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-3)	86
그림 4.4	체적함수비의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-4)	87
그림 4.5	모관흡인력의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-1)	88
그림 4.6	모관흡인력의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-2)	89
그림 4.7	모관흡인력의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-3)	89
그림 4.8	모관흡인력의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-4)	90
그림 4.9	강우강도에 따른 경과시간과 체적함수비의 관계(사면상부)	93
그림 4.10	강우강도에 따른 경과시간과 체적함수비의 관계(사면하부)	94
그림 4.11	강우지속시간(습윤과정)에 따른 사면깊이와 체적함수비의 관계	95
그림 4.12	방치시간(건조과정)에 따른 사면깊이와 체적함수비의 관계	96
그림 4.13	강우강도에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(사면상부)	99
그림 4.14	강우강도에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(사면중부)	100

그림 4.15	강우강도에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(사면하부)	101
그림 4.16	강우지속시간(습윤과정)에 따른 사면깊이와 모관흡인력의 관계 ..	103
그림 4.17	방치시간(건조과정)에 따른 사면깊이와 모관흡인력의 관계	104
그림 4.18	사면경사에 따른 경과시간과 체적함수비의 관계(사면상부)	107
그림 4.19	사면경사에 따른 경과시간과 체적함수비의 관계(사면하부)	108
그림 4.20	강우지속시간(습윤과정)에 따른 사면깊이와 체적함수비의 관계	109
그림 4.21	방치시간(건조과정)에 따른 사면깊이와 체적함수비의 관계	110
그림 4.22	강우강도에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(사면상부)	113
그림 4.23	강우강도에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(사면중부)	114
그림 4.24	강우강도에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(사면하부)	115
그림 4.25	강우지속시간(습윤과정)에 따른 사면깊이와 모관흡인력의 관계 ..	117
그림 4.26	방치시간(건조과정)에 따른 사면깊이와 모관흡인력의 관계	118
그림 4.27	강우지속시간에 따른 경과시간과 체적함수비의 관계(사면상부) ..	121
그림 4.28	강우지속시간에 따른 경과시간과 체적함수비의 관계(사면하부) ..	122
그림 4.29	강우지속시간(습윤, 건조과정)에 따른 사면깊이와 체적함수비의 관계	123
그림 4.30	강우지속 및 방치시간에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(상부) ·	125
그림 4.31	강우지속 및 방치시간에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(중부) ·	126
그림 4.32	강우지속 및 방치시간에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(하부) ·	127
그림 4.33	강우지속시간(습윤, 건조과정)에 따른 사면깊이와 모관흡인력의 관계	129
그림 4.34	함수특성곡선실험(SWCC Cell Test) 결과	130
그림 4.35	함수특성곡선실험(SWCC Cell Test) 결과와 모델별 함수특성곡선 ·	131
그림 4.36	실험결과를 이용한 Brooks & Corey 모델의 함수특성곡선	132
그림 4.37	실험결과를 이용한 Van Genuchten 모델의 함수특성곡선	132
그림 4.38	실험결과를 이용한 Fredlund & Xing 모델의 함수특성곡선	133
그림 4.39	추정(PTF)법과 실험결과(Brooks & Corey)에 의한 함수특성곡선	136
그림 4.40	추정(PTF)법과 실험결과(van Genuchten)에 의한 함수특성곡선 ·	136

그림 4.41 추정(PTF)법과 실험결과(Fredlund & Xing)에 의한 함수특성곡선	137
그림 4.42 추정(PTF)법에 의한 투수특성곡선	138
그림 4.43 투수계수곡선의 이력현상	139
그림 4.44 경과시간에 따른 습윤전선 깊이의 변화	141
그림 4.45 강우재현실험에 의한 습윤대의 진행과정(MT-1)	142
그림 4.46 강우재현 후 경과시간에 따른 습윤전선의 깊이(예측식별)	144
그림 4.47 강우재현 후 경과시간에 따른 습윤전선의 깊이(입력변수 산정방법)	145
그림 4.48 강우재현 모형실험에서의 이력거동(체적함수비)	146
그림 4.49 강우재현 모형실험에서의 이력거동(모관흡인력)	148
그림 4.50 실내모형실험 결과로 얻어진 함수특성곡선	150
그림 4.51 실내모형실험과 SWCC Cell Test의 결과로 얻어진 함수특성곡선	151
그림 5.1 불포화 무한사면의 유한 요소망과 경계조건	156
그림 5.2 해석조건 NA-1의 침투해석 결과	157
그림 5.3 해석조건 NA-1의 시간에 따른 간극수압의 변화	158
그림 5.4 해석조건 NA-1의 깊이에 따른 체적함수비의 변화	159
그림 5.5 해석조건 NA-2의 침투해석 결과	160
그림 5.6 해석조건 NA-2의 시간에 따른 간극수압의 변화	161
그림 5.7 해석조건 NA-2의 깊이에 따른 체적함수비의 변화	162
그림 5.8 해석조건 NA-3의 침투해석 결과	163
그림 5.9 해석조건 NA-3의 시간에 따른 간극수압의 변화	164
그림 5.10 해석조건 NA-3의 깊이에 따른 체적함수비의 변화	165
그림 5.11 해석조건 NA-4의 침투해석 결과	166
그림 5.12 해석조건 NA-4의 시간에 따른 간극수압의 변화	167
그림 5.13 해석조건 NA-4의 깊이에 따른 체적함수비의 변화	168

기 호 해 설

- V : 흙의 전체 체적
 V_a : 간극 속에 있는 공기의 체적
 V_c : 수축막의 체적
 V_w : 간극 속에 있는 물의 전체 체적
 V_s : 토립자의 체적
 M : 흙의 전체 질량
 M_a : 간극 속에 있는 공기의 질량
 M_c : 수축막의 질량
 M_w : 간극 속에 있는 물의 질량
 M_s : 토립자의 질량
 T_s : 표면장력
 Δu : 간극수압과 공기압의 차이, $(u_a - u_w)$
 R_G : 곡률반경
 β : 표면장력과 수평면이 이루는 각
 u_a : 간극공기압
 $u_a - u_w$: 모관흡인력
 R : 기체상수
 Ψ : 흡인력
 T : 절대온도
 t° : 섭씨온도
 v_{wo} : 물의 비체적
 ρ_w : 물의 밀도
 w_v : 수증기의 분자량

- u_v : 간극의 부분 증기압
- u_{vo} : 같은 온도에서 순수한 물의 포화 증기압
- u_w : 간극수압(pore water pressure)
- π : 삼투흡인력(osmotic suction)
- Θ : 체적함수비(volumetric water content)
- Θ_r : 잔류체적함수비(residual water content)
- Θ_s : 포화체적함수비
- Ψ_r : 잔류 함수비에 대응하는 모관흡인력
- ω : 중량함수비
- a : 공기함입치와 관련된 계수
- n : 함수특성곡선의 변곡점에서의 기울기와 관련된 계수
- e : 자연지수(2.71828)
- λ : 간극크기 분포지수
- m : 높은 모관흡인력 범위에서의 곡선기울기와 관련된 계수
- $\Theta(R)$: 간극반경이 R 이하인 흙의 포화 체적함수비
- R_{\max} : 흙의 최대 간극 반경
- R_{\min} : 흙의 최소 간극 반경
- ϕ : 간극수와 흙 입자의 접촉각
- Ψ_{aev} : 공기함입값(air-entry value)
- Ψ_{\max} : 최소 간극반경에 해당하는 흡인력
- h : 흡인력에 대한 적분을 위한 임의의 변수
- $f(h)$: 흡인력으로 표현되는 간극의 분포함수
- q : 비유량
- k : 투수계수
- i : 동수경사

- K_w : 불포화투수계수
 k_{uw} : 측정된 불포화계수(cm/s)
 Q : 유량
 A_t : 시료면적
 h_m : 기압계내의 압력의 높이
 $k(\Psi), k(\Theta)_i$: 함수비 혹은 부의 간극수압 조건에서 계산된 투수계수
 k_s : 포화투수계수
 k_{sc} : 계산한 포화투수계수
 g : 중력가속도
 η : 물의 점성
 ξ : 포화간극률
 i : 구간번호
 j : i~m사이의 값
 p : 다양한 간극사이즈에 따른 계수
 Ψ_j : j구간의 중점에 상응하는 부(-)의 간극수압
 y : 적분을 위한 임의의 변수
 N : 최대 부(-)의 간극수압
 C : 모관흡인력에 관련된 함수
 $C(\Psi)$: 함수특성곡선 보정계수
 C_r : 잔류 함수비에서의 흡인력과 관련된 상수
 Ψ_f : 습윤전면 흡인력(Wetting front suction, cm)
 f : 침투능
 z_w : 습윤전선의 깊이
 $\Delta\Theta_i$: 포화 전, 후의 체적함수비 차
 t : 강우지속시간

- T_w : 지반을 포화시키기 위해 필요한 강우지속시간
 S_0 : 초기 포화도
 S_f : 최종 포화도
 I : 강우강도
 I_{lim} : 초기강우강도
 k_{lim} : 초기한계투수계수
 m_w : 저류곡선의 기울기
 H : 전수두
 k_x : x 방향의 투수계수
 k_y : y 방향의 투수계수
 σ : 전응력
MT : 모형실험(Model Test)
 G_s : 흙의 비중
 γ_{dmax} : 최대건조단위밀도
 C_u : 균등계수
 C_g : 곡률계수
 D_{10} : 입도분석 중 통과중량의 10%에 해당하는 입경
 D_{30} : 입도분석 중 통과중량의 30%에 해당하는 입경
 D_{60} : 입도분석 중 통과중량의 60%에 해당하는 입경
 C : 점착력
 C_{sat} : 포화점착력
 Φ : 내부마찰각
 Φ_{sat} : 포화내부마찰각
NA : 수치해석(Numerical Analysis)

ABSTRACT

Pore Water Pressure Characteristics of Unsaturated Infinite Slopes through Simulated Rainfall System

Kim, Sun-Hak

Advisor : Prof. Shim, Tae-Sup, Ph.D.

Department of Civil Engineering,

Graduate School of Chosun University

In infinite slope stability problems, most of soils near surface in an unsaturated state in the beginning of rainfall and they are getting saturated with rainfall from top to depth. Their soil mechanical concepts or behavior characteristics are quite different from those of saturated soils. There are many difficulties in theoretical analysis, interpretation and application to practice, etc. so they were handled as saturated ones in most of designs and engineering decisions, but such an interpretation cannot lead to the rational conclusions in the analysis of the phenomena and behaviors of the considering soils. and consequently it may cause economic inefficiency resulting from excessively safe design. Therefore, for more rational study on the behavior of natural soil, we need to have the understandings of the properties of unsaturated soils and to investigate the soil water characteristics and permeability characteristics considering of negative pore water pressure.

In this study, a simulated rainfall system was built, and the unsaturated characteristics were examined by execution of computer simulation and experiment on the soil water characteristic curves under the various rainfall and slope conditions. With the results, the applicability of infiltration behavior under rainfall and soil water characteristic curve models to the unsaturated granitic sedentary deposit slopes was examined. Furthermore, the results of infiltration

analysis from numerical model test were compared with those from indoor simulation. Conclusions taken out from this study are as follows.

At the results of simulated rainfall system test, the more the intensity of rainfall was high, and the more the slope was steep and the more rainfall lasted long, the more the volumetric water content began to increase earlier and the more the matric suction decreased faster in the wetting process, the more the restoration of matric suction was delayed in the drying process. Consequently, the stability of the unsaturated infinite may be deteriorated by the fast decrease and slow restoration of matric suction.

At the results of comparison the volumetric water content and matric suction measured in the wetting process (under rainfall) with those in the drying process (leaving as it was) of the simulated rainfall system, the volumetric water content showed a difference of 2~5% and matric suction of about 3~10kPa, indicating the occurrence of hysteresis. In addition, the difference was relatively larger in matric suction than in the volumetric water content, and this tells that the hysteretical behavior is larger in matric suction.

The value of unsaturated characteristic of a soil water characteristic curve obtained from SWCC Cell experiment was significantly different from that calculated from a soil water characteristic curve only derived from the physical properties of the soil under consideration. This tells that it is unreasonable to determine the soil water characteristic curve only based on the physical properties of soil and apply it to the analysis of unsaturated soil.

When the soil water characteristic curve derived from measurements in the wetting process and the drying process of simulated rainfall system were compared with those from the soil water characteristic curve experiment, both methods produced soil water characteristic curves close each other in the wetting process and the drying process, but in both, there was a difference between results obtained from in the wetting process and those from in the drying process. Thus, when soil water and infiltration characteristic curves are rationally applied to the design and stability analysis considering of the

properties of unsaturated soil, it is considered desirable to apply the soil water characteristic curve of the wetting process to the wetting process, and that of the drying process to the drying process.

When the infiltration analysis was performed using a verified program under the same state and conditions with the simulated rainfall system, the distributions of hydrostatic pressure and volumetric water content were similar and fell within the range of allowable error. However, there were differences in the values, probably because it was impossible to model perfectly various ground conditions including initial water content, compactness and permeable porous layer under the slope in the program, and because the model slope applied to infiltration analysis was too small in size and therefore any small variation could result in a big difference.

제1장 서 론

1.1 연구목적 및 배경

우리나라에서는 6~9월에 연강우량의 2/3이상이 집중적으로 발생한다. 강우로 인한 사면붕괴도 거의 이 시기에 집중적으로 발생되며, 이로 인한 인적·물적 손실은 무시할 수 없을 정도이다. 따라서 지반관련 공학자들은 강우시 사면의 안정성을 확보하여 인적·물적 손실을 줄이기 위해 끊임없이 연구하고 있다. 하지만 이러한 노력에도 불구하고 강우로 인한 사면붕괴는 해마다 발생되고 있으며, 이로 인한 인적·물적 손실도 계속해서 증가하고 있는 실정이다. 특히, 최근 이상기후에 따른 단기간 집중호우로 인한 무한사면의 붕괴가 증가하고 있으며, 이와 더불어 경제적 손실도 계속 증가되고 있는 상황이다.

화강암질 풍화토는 우리나라 표토의 대부분을 차지하고 있으며, 강우초기에는 불포화 상태로 존재하다가, 강우강도와 강우지속시간이 충분할 경우 포화상태로 된다. 지금까지 포화상태에 대한 연구는 활발하였으나, 불포화 상태의 이론적·해석적 어려움 등 여러 가지 이유로 불포화 지반에 대한 연구는 미흡하였다. 최근 지반공학에서는 복잡한 불포화영역을 다룰 수 있는 계측장비 개발 등으로 연구 여건이 조성되어 불포화 지반의 특성에 대한 관심이 급증하고 있다. 불포화 지반은 포화토와 비교할 때 역학적 개념이나 거동특성에서 많은 차이점이 있다. 그러나 지금까지는 사면의 설계나 공학적 판단이 필요한 경우에 이론적·해석적 문제 등 여러 가지 이유로 대상지반을 완전포화 또는 건조한 상태로 해석하였다. 이와 같은 방법으로는 실제지반에서 발생하는 현상과 거동을 제대로 해석할 수 없고, 지나치게 안정적으로 설계하게 되어 경제성이 떨어질 우려가 있다.

간극이 물로 완전히 채워져 있지 않고, 일부가 물과 공기로 채워진 것을 불포화 지반이라 한다. 불포화 지반에서는 물과 공기의 압력차에 의한 흡인력으로 부(-)의 간극수압이 발생된다. 강우초기에 사면에서는 지표부근이 충분히 포화되지 않아 부(-)의 간극수압을 보이다가 강우가 지속되면서 습윤대가 점차 확대되어 정(+)의 간

극수압을 나타내고, 지하수위 부근은 모관현상에 의해 부(-)의 간극수압을 나타낸다. 이러한 부(-)의 간극수압이 증가하면 유효응력을 증가시키고, 부(-)의 간극수압이 감소하면 유효응력이 감소되어 사면의 안정성이 저하된다. 이처럼 부(-)의 간극수압은 불포화 사면의 역학적 거동을 지배하는 아주 중요한 인자로서 이로 인해 강도와 침투특성 등이 변화된다. 불포화토에서 침투거동의 영향요인으로는 강우강도, 강우지속시간, 선행강우, 포화투수계수, 함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC), 토사의 저류능력, 지반응력, 토사의 이질성, 초기 지하수위, 사면의 기하학적 특성 등 여러 가지가 있는데, 이 중에서 강우는 지표 근처 흙의 함수량변화에 큰 영향을 주어 간극수압의 변화를 유발하고 또한, 체적과 강도를 변화시킨다. 그러므로 강우에 따른 불포화 지반에서 보다 합리적인 실제 지반거동을 파악하기 위해서는 강우시 불포화토의 특성에 대한 기본적인 이해와 부(-)의 간극수압을 고려한 함수특성 및 투수특성에 관한 연구가 매우 필요하다.

본 연구에서는 우리나라에 가장 많이 분포하고 있는 화강암질 풍화토를 대상으로 선정 후, 먼저 물리·역학적 실험을 실시하였다. 다음으로 불포화토의 거동을 규명하는데 있어 가장 큰 요인인 부(-)의 간극수압 즉, 모관흡인력(matric suction)에 관련된 불포화토의 특성들을 파악하고자 모형실험과 함수특성곡선실험(SWCC Cell Test)을 실시하였다. 강우재현 모형실험장치와 모형사면 토조를 제작하여, 선행연구 자료를 토대로 결정된 사면경사(1:1.5, 1:2.0), 강우강도(15mm/hr, 30mm/hr), 강우지속시간(8hr, 16hr)의 조건에 따라 불포화 특성(체적함수비, 모관흡인력 등)과 이력거동(습윤과정, 건조과정)에 중점을 두고 모형실험을 실시하였다. 마지막으로 실내실험에서 얻어진 화강암질 풍화토의 함수특성과 투수특성을 고려하여 수치해석을 실시하였다. 모형실험을 통하여 강우와 사면경사 조건에 따라 측정된 체적함수비(volumetric water content), 모관흡인력, 침투깊이 등의 불포화 침투거동특성을 살펴보고, 조건에 따라 변화특성을 분석하였다. 화강암질 풍화토의 물리적 값과 함수특성곡선실험에서 얻어진 체적함수비와 모관흡인력을 Soil-vision에 입력하여 모델식에 따라 최적의 함수특성곡선을 산정하고, 이들을 비교·분석하여 효율적인 적용을 검토하였다. 또한, 함수특성곡선실험과 모형실험의 결과로 얻어진 불포화 특

성값을 비교·분석하여 추정식들의 실제 적용성을 검토하였다.

실험으로 얻어진 함수특성과 투수특성을 적용한 수치해석과 모형실험의 결과를 비교·분석하고, 불포화토의 침투거동에 큰 영향을 주는 간극수압의 변화를 예측하여 실제에 근접한 해석을 통해 안정적이고 경제적인 설계를 도모하고자 하는데 목적이 있다.

1.2 연구동향

우리나라에서 발생하는 사면붕괴는 대부분 강우가 집중하는 6~9월에 발생하는 것으로 나타나, 사면의 불안정은 강우와 깊은 관련이 있는 것으로 여겨진다. 강우가 지반 내로 침투하면 사면 흙의 함수비와 포화깊이가 증가하게 된다. 이로 인해 지반의 전단응력 증가와 전단강도 저하가 발생되면서 사면이 불안정하게 된다. 특히, 무한사면에서는 강우초기에 불포화 상태이며 강우가 지속됨에 따라 부(-)의 간극수압이 감소하여 유효응력이 감소되면서 사면의 안정성이 저하된다.

강우를 고려한 불포화 특성에 대한 연구와 강우재현 모형실험을 통해 수행되어진 연구사례를 살펴보면 다음과 같다.

먼저 국외에서 많은 연구자들은 강우시 사면의 거동에 영향을 미치는 원지반의 침투, 불포화토의 모관흡인력과 흐름 및 강도특성에 대한 연구를 수행하여 강우시 사면의 거동특성을 평가하고자 하였다(Buckingham, 1907; Garder & Widtsoe, 1921; Richards, 1931; Childs & Collis-George, 1950; Brooks & Corey, 1964; Hodge & Freeze, 1977; Fredlund & Morgenstern, 1977).

Rolon & Freeze(1984)가 불포화토에서의 흐름에 대한 수치해석으로 강우시 사면에 분포하는 간극수압을 예측하고 인공강우재현장치를 이용한 모형실험과 비교·분석하였다.

Miyazaki(1988)가 강우재현장치를 이용한 실내 및 현장에서 2차원 침투시험을 실시하여 침투특성과 침윤전선의 발달에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 침윤전선이 사면경사와 나란하게 발달되며, 세립토에서 조립토로 침투되는 강우의 흐름방향

은 세립토와 조립토의 접촉면을 따라 횡방향으로 바뀐다는 것을 규명하였다.

Rahardjo(1994)는 강우재현장치를 설치한 실내모형토조실험을 통한 강우재현과 방지에 따른 이력거동의 영향에 대한 연구를 수행하여 모관흡인력과 체적함수비를 비교·분석하였다. 그 결과 불포화토에서 습윤과정과 건조과정의 이력거동(hysteresis behavior)은 모관흡인력과 체적함수비에 영향을 주는 것을 밝혔으며 또한, 체적함수비에 미치는 영향보다 모관흡인력에 미치는 영향이 훨씬 크게 나타남을 밝혔다.

Meiketsu(1999)는 모형토조를 제작한 후 인공강우를 재현하여 강우시 사면내의 침투에 대한 실험을 실시하고, 그 결과를 이용하여 강우시 사면붕괴의 이론모델을 제시하였다. 습윤전선의 발달과정을 밝히고, 사면은 투수계수가 크고 표층토가 얇을수록 단기간의 호우에 약하고, 투수계수가 작고 표층토가 두꺼울수록 장기간의 호우에 약하다는 것을 밝혔다.

Ng 등(1999)은 강우시 사면의 안정성평가에 이용되는 불포화 특성에 불포화 응력상태를 도입하였으며, Wang & Sassa(2001)는 강우재현장치를 이용한 모형실험으로 간극비와 입도분포에 따른 간극수압의 형성 및 토석류 발생유형에 대한 연구를 수행하였다. Tsaparas 등(2002)은 수치해석과 한계평형해석을 통한 매개변수 연구를 통해 강우시 사면의 안정성에 영향을 미치는 영향인자를 분석하고 사면의 안정성평가는 지반의 불포화 특성과 기후특성을 함께 고려하여야함을 제시하였다. Cai 등(2004)은 수치해석과 한계평형해석을 통해 한계강우강도 산정식을 제안하였으며 강우강도와 지속시간에 따른 사면안정성을 평가하였다. 또한, Collins 등(2004)은 침투류 해석과 이론식을 통해 사면붕괴가 발생하는 한계 침투깊이를 제안하였다.

국내에서는 김상규 등(1991)이 모형사면과 강우재현장치를 이용한 실험을 통해 습윤전선의 진행과정과 강우지속시간에 따른 간극수압의 변화 및 지표유출의 영향을 분석하여 이러한 요인들이 사면의 안정성에 미치는 영향을 연구하였다. 사질토와 화강 풍화토에서 강우재현장치 실험결과, 포화투수계수의 4~5배 강우강도까지만 침윤전선 진행속도가 빨라짐을 밝혔으며, 간극수압은 작은 강우에서는 서서히 증가하나 한계강우 이상의 호우에서는 어느 시간 이후에는 갑자기 증가함을 확인하였다. 또한, 부(-)의 간극수압을 측정할 수 있는 새로운 장치를 개발하였다. 장치개발에 대한 많은 노

력에도 불구하고 부(-)의 간극수압 측정을 위해 개발한 간극수압측정 장치로 모관흡인력의 측정이 원활하지 않아 수치해석으로 추이를 예측하는 문제점이 있었다.

홍원표 등(1996)은 강우로 인해 침윤선이 하강하는 깊이 및 분포를 가정하고 한계평형해석에 의한 사면안정해석법을 제안하였다. 김문겸 등(1997)이 지하수 흐름을 고려한 유한요소해석 후 각 시간단계에서 산출된 간극수압을 구조계의 하중항에 포함시켜 다시 탄소성 유한요소해석을 수행하는 단계적 해석방법을 제안한 바 있다. 또한, 조성은 등(2001)은 토사사면의 불포화 거동특성을 규명하고자 시간의존적 침투-응력해석기법을 적용하여 수치해석기법과 침투에 대한 수정간략법을 제안하였으며, 강우강도와 지속시간을 고려한 사면의 표면파괴 가능성 평가에 대한 연구도 수행하였다. 이승래 등(2001)은 한계평형해석법에 의한 사면 안정해석 프로그램 보완하여 불포화토의 비선형적 강도변화특성을 고려할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 강우시 사면안정성 평가에 모관흡인력의 변화에 따른 투수특성과 강도특성을 고려할 수 있는 안정해석법을 제안하였다.

김홍택 등(2001)은 강우재현장치 실험을 통해 무한사면의 간극수압 변화에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 사면의 안정성평가에 간극수압비를 도입하여 강우강도에 따른 간극수압비의 범위를 제시하였으나, 다공석을 사용하여 간극수압을 측정함으로써 실험 시 발생하는 부(-)의 간극수압을 고려하지 못한 한계를 가지고 있었다.

국내연구 중 홍원표 등(1996), 김문겸 등(1997), 조성은 등(2001), 이승래 등(2001), 김홍택 등(2001)의 연구는 불포화토의 복잡성 때문에 수치해석적인 관점으로만 연구를 수행하였거나 불포화토의 특성을 좌우하는 부(-)의 간극수압을 고려하지 않는 연구의 한계를 지니고 있었다.

김재홍 등(2002)은 강우로 인한 사면의 포화깊이가 사면의 안정성에 미치는 영향을 분석하고, 포화깊이 추정식과 침투류 해석결과를 비교하여 추정식의 적용성을 파악하고자 하였다. 또한, 불포화특성을 고려한 사면안정해석을 통해 안정성 검토시 지반의 불포화특성을 고려해야 함을 지적하였다.

류지협(2003)은 강우시 침투로 인한 사면의 파괴 메커니즘을 규명하기 위하여 현장계측을 통해 모관흡인력과 지하수위의 변화를 관찰하고 수치해석을 실시하여 계

측결과와 비교하였다. 또한, 이인모 등(2003)은 화강풍화토 사면에서 모관흡인력 및 체적함수비를 현장계측하고 이를 이용하여 현장 함수특성곡선을 얻었으며, 투수해석을 실시하여 계측결과와 비교하였다.

최근 국내에서는 불포화토에 대한 실내시험을 통한 함수특성곡선과 사면안정성을 평가한 연구들이 수행되고 있다. 이승래 등(2005)은 국내 화강풍화토에 관해 불포화토에 관한 실내시험인 압력판 추출시험, 데시게이터시험, 간극분포시험을 통해 새로운 화강풍화토 함수특성곡선 유추법을 제시하기도 하였다. 박성완 등(2005)은 강우시 불포화 풍화토사면의 파괴과정이 함수특성곡선의 습윤과정 거동과 유사하다는 기존연구를 토대로 SWCC Cell장치를 이용하여 함수특성곡선을 구하고 이를 이용 투수계수를 구하여 침투해석과 사면안정해석을 실시하였다. 이 밖에도 송영석 등(2005), 이광모 등(2005), 이상경(2006), 박성완 등(2006)이 강우시 영향인자들의 대해 연구를 수행한 바 있다.

1.3 연구방법 및 범위

화강암질 풍화토는 우리나라에 분포하는 표토의 대부분을 차지하고 있으며, 대부분의 경우 강우초기와 지하수위 상부에 위치할 때 불포화상태로 존재한다. 그러므로 우리나라에서는 화강암질 풍화토에서의 침투거동은 불포화토의 침투거동특성을 대표한다고 할 수 있다. 불포화토의 역학적 특성과 침투거동 규명을 위해서는 각각의 흙이 갖는 고유한 특성을 나타내는 함수특성곡선과 투수특성곡선에 대한 규명이 선행되어야 한다. 이러한 불포화토의 특성을 좌우하는 가장 큰 요인은 모관흡인력이라 불리는 불포화토의 간극수압 변화이다.

따라서, 본 연구에서는 우리나라에 가장 많이 분포하고 있는 화강암질 풍화토를 대상으로 선정한 후, 불포화토의 거동을 규명하는데 있어 가장 큰 요인인 부(-)의 간극수압 즉, 모관흡인력에 관련된 불포화토의 특성들을 파악하고자, 화강암질 풍화토의 물리·역학적 실험, 또한 강우재현 모형실험과 함수특성곡선실험 등 다양한 실내실험과 수치해석을 실시하였다.

먼저 대상으로 광주근교의 무한사면 붕괴현장에서 화강암질 풍화토를 채취하여 물리·역학적 실내실험을 실시하였다. 다음으로 선행연구 자료를 분석하여 사면붕괴의 빈도가 높은 강우특성과 사면의 기하학적 특성을 파악한 후, 불포화토의 간극수압 변화특성을 실험적으로 규명하는데 필요한 강우재현 모형실험의 실험조건을 결정하였다.

강우재현 실험장치와 모형사면 토조를 제작하고, 사면하부를 투수조건으로 조성하여 불포화 침투특성에 대한 실험을 할 수 있도록 하였다. 다양한 간극수압 변화의 요인 중 비교적 큰 영향을 미치는 강우강도, 사면경사, 강우지속시간을 달리하여 강우재현 모형 실험을 실시하였다. 첫 번째로 강우강도의 영향을 검토하고자 사면경사와 강우지속시간은 동일조건(사면경사, 1:2.0; 강우지속시간, 16hr)으로 하고 강우강도를 15mm/hr(MT-1)와 30mm/hr(MT-2)로 달리하여 실험을 실시하였다. 두 번째로 사면경사의 영향을 검토하고자 강우강도와 강우지속시간은 동일조건(강우강도, 15mm/hr; 강우지속시간, 16hr)으로 하고 사면경사를 1:2.0(MT-1)과 1:1.5(MT-3)로 달리하여 실험을 실시하였다. 세 번째로 강우지속시간의 영향을 검토하고자 강우강도와 사면경사는 동일조건(강우강도, 30mm/hr; 사면경사, 1:2.0)으로 하고 강우지속시간을 16hr(MT-2)과 8hr(MT-4)로 달리하여 실험을 실시하였다. 각 실험조건에서 사면내의 상·중·하부와 상·중·하단에 매설된 계측기를 통해 체적함수비 변화에 따른 간극수압의 변화와 습윤전선의 깊이 등을 측정하여 각 조건에 따른 특성값을 비교·분석하였다.

다음으로 연구대상 화강암질 풍화토에 대해 SWCC Cell장치를 이용하여 습윤과정, 건조과정의 함수특성곡선과 불포화 특성값을 구하였다. 이 결과를 강우재현 모형실험 결과와 비교·분석하여 불포화 특성값을 산정하는 추정식들의 실제 적용성을 검토하였다. 또한, 대상토의 기초 물성치를 활용하여 간접적으로 함수특성곡선을 예측할 수 있는 쏘일 비전(Soil-Vision) 프로그램으로 추정된 함수특성곡선과 불포화 특성값을 비교·분석하여 그 적용성을 검토하였다. 이와 같은 방법으로 얻어진 화강암질 풍화토의 함수특성과 투수특성을 고려한 수치해석(SEEP/W)을 실시하여 강우재현 모형실험의 결과와 비교·분석하고, 강우시 불포화 화강암질 풍화토 사면의 침투거동을 좌우하는 간극수압의 변화특성을 검토하였다.

그림 1.1은 강우에 따른 화강암질 풍화토의 불포화 거동특성을 규명하기 위해 실시한 본 연구의 전반적인 진행과정을 나타낸 것이다.

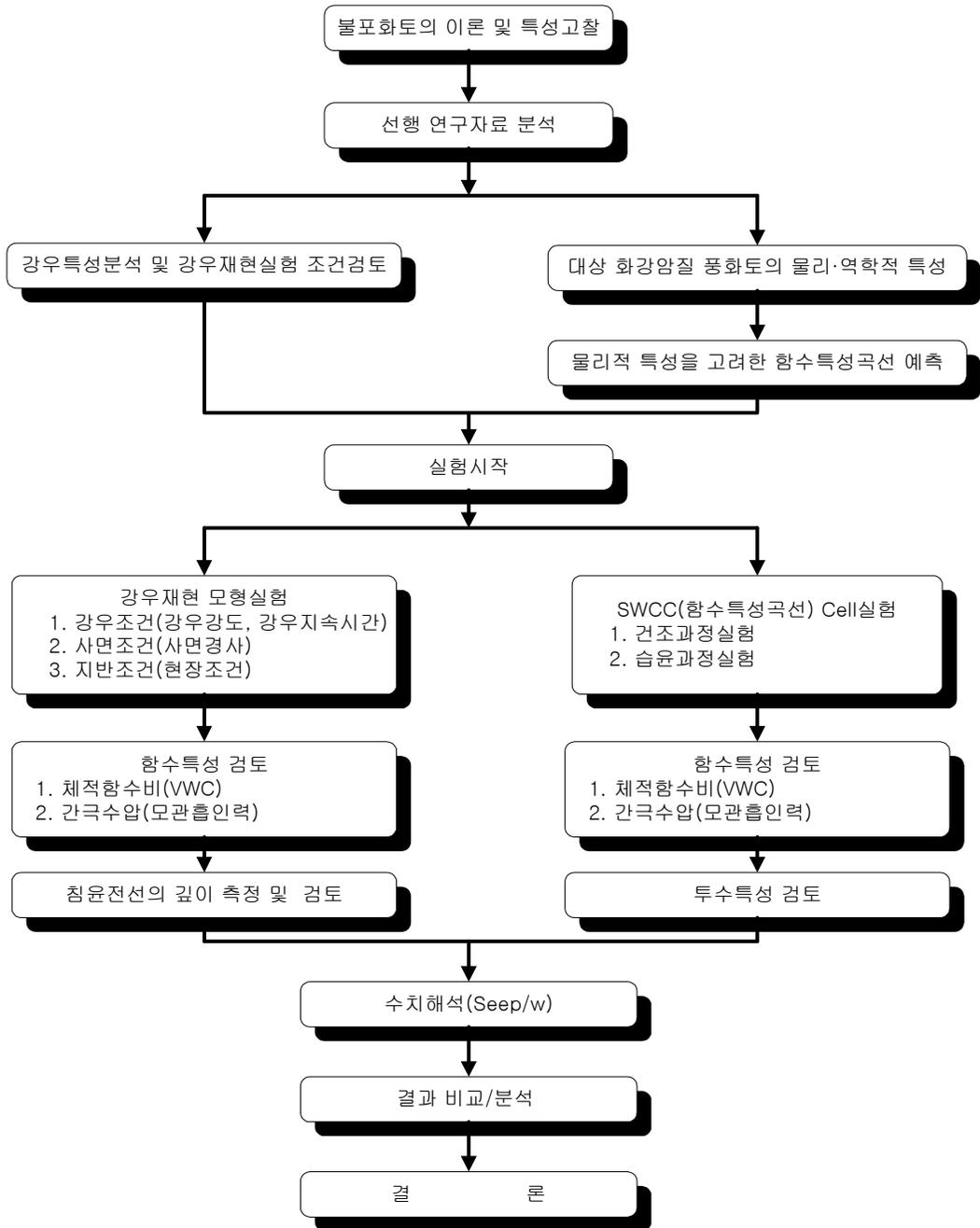


그림 1.1 연구진행 절차

제2장 불포화 지반과 침투거동

2.1 불포화 지반의 이론

2.1.1 불포화토의 토질역학

흙속의 간극은 물로 포화될 수도 있고 공기나 다른 유체를 함유할 수도 있다. 이에 따라 흙의 물리·역학적 특성이 매우 다양하다. 그러나 고전토질역학에서는 포화모래, 실트, 점토 및 건조한 모래와 같이 흙의 특수한 상태에 대하여 연구하였다. 일반적인 토질역학에서는 이러한 특수한 상태의 토질에 대해 서술하고 있으므로 물리·역학적으로 다양한 다른 상태의 토질조건에 적용함에 있어서는 매우 주의해야 한다. 현실적으로 고전토질역학과 포화 토질역학 특성에 맞지 않는 많은 문제가 발생하고 있으며 그 대표적인 경우가 불포화토의 물리·역학적 특성이다. 따라서 불포화토의 기본적인 물리·역학적 특성에 대해 살펴보고자 한다.

일반적으로 토질역학은 그림 2.1과 같이 포화도에 따라 포화토질역학(saturated soil mechanics)과 불포화토질역학(unsaturated soil mechanics)으로 구분 할 수 있다.

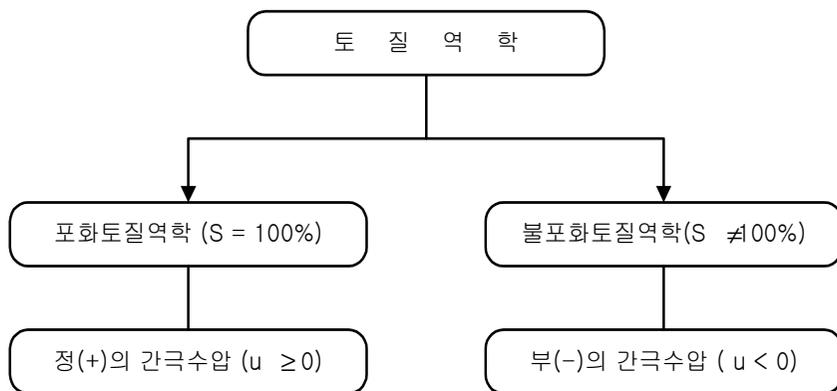


그림 2.1 포화·불포화 토질역학의 구분

현장에서 일상적으로 접하는 대부분의 지반은 100% 포화상태도 아니고 완전한 건조상태도 아닌 불포화상태에 놓여있다. 그럼에도 불구하고 대부분의 지반공학이나 구조물을 설계할 때 지반을 포화상태로 간주하는 것은 해석 시 간편함과 안정성 때문이다.

포화토와 불포화토의 거동이 크게 차이가 나는 것은 그림 2.2와 그림 2.3에서와 같이 불포화토에서는 포화토와는 달리 공기상태가 하나 더 존재하며, 이로 인해 공기와 물의 접촉면인 수축막(contractile skin)이 발생하여 4상의 관계가 되기 때문이다. 발생한 수축막은 공기압과 수압의 평형상태를 유지하는 역할을 하는 것으로 물의 표면장력에 의해 인장력을 발휘하게 된다. 일반적으로 불포화토는 흙 입자와 물-공기의 접촉면에서 포화토와 매우 다른 거동특성을 나타내므로 흙 속에 포함된 공기를 고려하면 포화토와는 달리 거동예측이 매우 복잡해진다. 포화토에서는 실내시험을 통해서 설계대상 지반의 거동특성을 파악할 수 있는 지반정수를 비교적 쉽게 구할 수 있고, 이를 이용하여 지반의 응력상태나 조건의 변화에 따른 지반의 거동을 예측하기가 용이하다. 그러나 불포화토에서는 흙 속에 포함되어 있는 공기의 큰 압축성과 공기함량에 따른 간극수압의 변화 및 공기압 유지 등의 문제로 인해, 실내시험을 통해 필요한 지반정수를 획득하기가 매우 어렵다. 또한, 어렵게 구한 불포화토의 지반정수들이 고정된 값이 아니라 지반의 함수비 변화에 따라 비선형적으로 변화되기 때문에 강우나 증발 등으로 인해 변화되는 불포화 지반의 거동을 예측하는 것은 매우 복잡하고 어려운 일이다. 결과적으로, 실험을 통해 함수비에 따라 변화되는 불포화토의 지반정수를 구하고 이를 설계에 적용하는 데에는 많은 시간과 비용이 소요되어 비경제적일 것이다. 앞서서와 같은 이유로 불포화 토질역학에서는 간단한 시험을 통해 구할 수 있는 매개체를 이용하여 함수비에 따라 변화하는 각종 지반정수를 예측하는 방법 및 모델에 대한 연구가 심도 있게 이루어져 오고 있다. 대개 예측에 사용되는 매개체로는 구하고자 하는 지반정수의 포화상태의 값과 함수특성곡선이 주류를 이루고 있다. 특히, 함수특성곡선은 불포화 지반의 공학적 특성을 가장 잘 대변해 주는 것으로, 지반의 함수비나 포화도에 따른 흙 속의 공기압과 수압의 차 측, 모관흡인력을 나타낸 것이다.

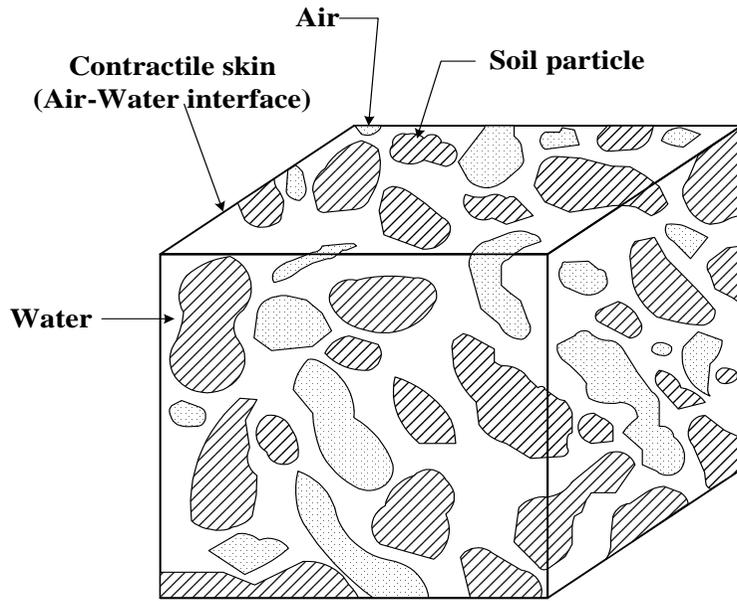
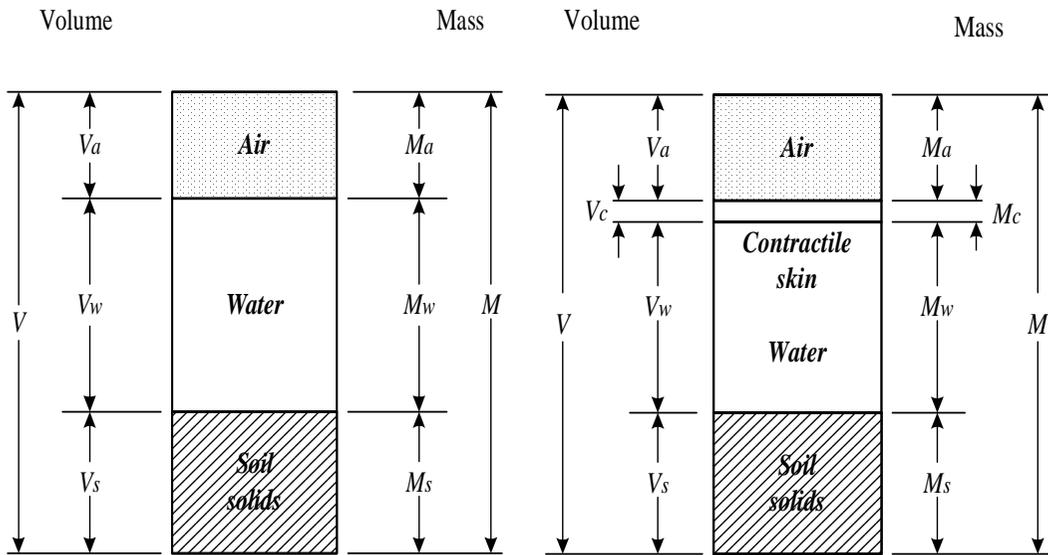


그림 2.2 불포화토의 구성요소

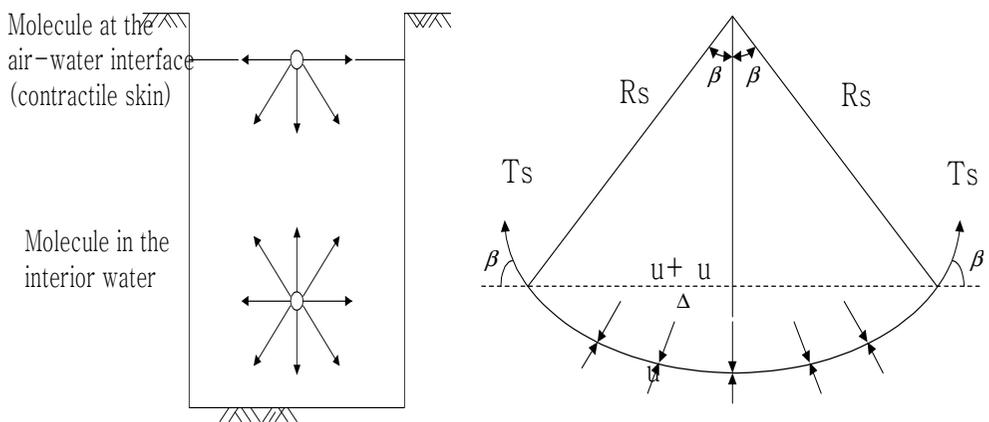


(a) 3상 관계

(b) 4상 관계

그림 2.3 불포화토의 3상과 4상

불포화상태의 흙 입자 사이에 간극수가 존재할 경우 간극수의 표면장력으로 인해 입자 사이에 인력이 발생하게 되는데 그 크기는 일반적인 모세관현상과 동일하게 입자 사이의 간극크기가 작을수록 커지게 된다. 즉, 같은 입도분포를 가진 동일한 시료인 경우에는 함수비가 작을수록 공기와 접촉면의 표면적이 작으므로 큰 인력이 발생하며, 같은 함수비일 경우에는 입자의 크기가 작아서 입자간의 간극의 크기가 작을수록 발생하는 인력의 크기가 커지게 된다. 그러므로 모래와 같은 조립토 보다는 점토와 같이 입자의 크기가 작은 세립토가 포화도의 영향을 크게 받는다. 그림 2.4를 보면 물 내부입자에 작용하는 분자상호간의 힘은 모든 방향으로 동일한 힘을 받아 균형을 이루고 있는 반면, 물-공기 접촉면내에 있는 물 분자는 물 내부방향으로 차등적인 힘을 받게 된다. 물-공기 접촉면을 따라 인장력이 작용하여 평형을 이룬다. 물-공기 접촉면에서 인장력을 일으키는 분자상호간의 작용력을 표면장력이라 한다. 간극수에서 발생하는 물의 표면장력은 접하고 있는 공기압과 수압의 차이인 모관압력과 동일하며, 일반적으로 자연 상태의 지반에서는 공기압이 대기압($u_a=0$)상태이므로 부(-)의 간극수압이 발생하여 모관현상이 발생하게 된다. 이와 같은 표면장력은 수축막내에 존재하는 분자간의 힘에 기인하는 것으로 수축막에 대해 접선방향으로 작용하여, 수축막을 마치 하나의 고무막과 같이 거동하게 한다(Fredlund와 Rahardjo, 1993).



(a) 수축막과 물에 작용하는 분자력 (b) 2차원 곡면에 작용하는 압력과 표면장력

그림 2.4 물-공기 경계면에서의 표면장력

곡면을 가로 지르는 압력의 차이는 표면장력과 곡률반경과 관련이 있으며, 평형 상태가 유지되므로 식(2.1)의 관계가 성립된다.

$$2T_s \sin\beta = 2\Delta u R_s \sin\beta \quad (2.1)$$

여기서, T_s : 표면장력

Δu : 공기압과 수압의 차이

R_s : 곡률반경

β : 표면장력과 수평면이 이루는 각

식(2.1)을 다시 정리하면 식(2.2)와 같이 된다.

$$\Delta u = \frac{T_s}{R_s} \quad (2.2)$$

식(2.2)는 곡률반경(R_s)과 표면장력(T_s)을 가진 곡면을 가로지르는 2차원의 압력 차를 나타내는 식이며, 라플라스방정식(Laplace equation)을 사용하여 그림 2.5와 같이 3차원 고무막의 형태로 확장할 수 있다.

$$\Delta u = T_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.3)$$

여기서, R_1, R_2 : 휘어진 곡면의 직각방향의 곡률반경

식(2.3)에서 직각방향의 곡률반경이 모든 방향에 대해서 동일하다고 가정(즉, $R_1 = R_2 = R_s$)하면 식(2.4)와 같이 된다.

$$\Delta u = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.4)$$

불포화토의 4상 중 하나인 수축막은 공기압과 수압을 동시에 받으며, 둘 중 공기압이 수압보다 크게 작용한다. 이러한 공기압과 수압의 압력차이($u_a - u_w$)를 모관흡인력이라고 하며, 이와 같은 압력의 차이가 수축막을 굽어지게 하는 원인을 제공한다.

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.5)$$

여기서, ($u_a - u_w$) : 모관흡인력

T_s : 표면장력

R_s : 곡률반경

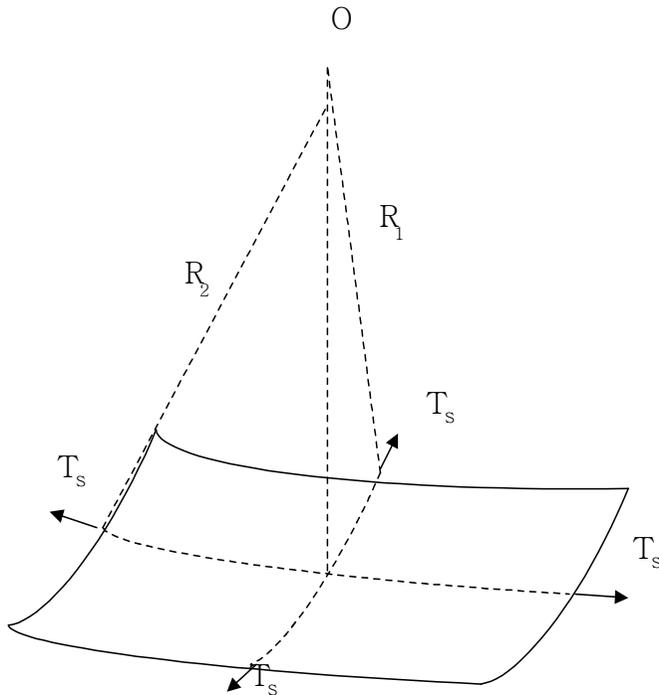


그림 2.5 3차원 곡면에서의 표면장력

식(2.5)를 Kelvin의 모세관모델 방정식이라고 하며, 흙에서 모관흡인력이 감소할

수록 수축막의 곡률은 감소하게 된다. 이 수축막은 메니스커스라 불리기도 한다. 공기압과 수압의 차가 없다면 곡률반경이 무한대가 된다. 따라서 흡인력이 0이 되면 수축막은 평평하게 된다.

불포화토의 거동특성을 설명하기 위해서 가장 중요한 요소인 흙의 흡인력은 영국의 도로 연구소(The Road Research Laboratory)에서 처음으로 소개하였다 (Croney & Coleman, 1948 ; Croney et al., 1950). Aitchison(1965)이 발표한 논문 “Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils”에서 흡인력을 정량적인 개념과 열역학적인 구성요소로 규명하면서 지반공학에 도입하였다(Krahn & Fredlund, 1972; Wray, 1984; Fredlund & Rahardjo, 1988). 흙의 흡인력은 흙 입자 사이에 존재하는 물의 자유에너지 상태(free energy state of soil water)로 정의되며(Edlefsen & Anderson, 1943), 이 자유에너지는 흙 입자 사이에 존재하는 물의 부분 증기압의 형태로 측정되어질 수 있다. 이러한 관계를 수식으로 나타내면 식(2.6)과 같다.

$$\Psi = - \frac{RT}{v_{w0}w_v} \ln\left(\frac{u_v}{u_{v0}}\right) \quad (2.6)$$

여기서, Ψ : 전 흡인력(kPa)

R : 기체상수[8.31432J/(mol · K)]

T : 절대온도[T=(273.16+t°)(K)]

t° : 섭씨온도(°C)

v_{w0} : 물의 비체적[1/ρ_w(m³/kg)]

ρ_w : 물의 밀도(t°=20°C일 때, 998kg/m³)

w_v : 수증기의 분자량(18.016kg/kmol)

u_v : 간극수의 부분 증기압(kPa)

u_{v0} : 같은 온도에서 순수한 물의 포화증기압(kPa)

식(2.6)에서 나타낸 Ψ 는 흙의 전 흡인력이며, 이 전 흡인력은 모관흡인력과 삼투

흡인력(osmotic suction)으로 나눌 수 있다. 즉, 전 흡인력은 흡입자 사이의 존재하는 물의 자유에너지를 뜻하며 모관흡인력과 삼투흡인력은 이 자유에너지의 두 가지 요소이다. 이러한 관계를 식(2.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2.7)$$

여기서, Ψ : 전 흡인력(total suction)

$(u_a - u_w)$: 모관흡인력(matric suction)

u_a : 간극공기압(pore air pressure)

u_w : 간극수압(pore water pressure)

π : 삼투흡인력(osmotic suction)

일반적으로, $(u_a - u_w)$ 에 해당하는 모관흡인력은 물의 표면장력으로 인한 모세관 상승현상에 관련되어 있으며, 입자들 사이의 틈 즉, 간극이 좁은 지하수면 위의 흙은 중력의 반대 방향의 흡인력으로 된다. 모관흡인력은 보통 현장에서 대기압($u_a = 0$)으로 해석되는 간극공기압에 대하여 부(-)의 압력을 갖는다. 반면에, 용해된 염분이나 철분 같은 농도에 따른 현상을 삼투흡인력이라 한다. 흙 속의 간극수가 용해된 염분을 포함하고 있는 경우 용매위의 수증기 압력은 순수한 물위의 수증기 압력보다 작아져 간극수의 염분도가 증가하면 수증기가 염분이 용해된 간극수로 이동하려한다. 상대습도는 감소하게 되어 결과적으로 삼투흡인력이 증가하게 된다. 일반적으로, 주변 환경과 하중의 변화는 지반내의 함수비변화를 가져오는데, 이러한 지반의 초기함수비는 모관흡인력과 직접적인 관계가 있지만 삼투흡인력은 농도와 온도변화에 대해서는 민감하지만 흙의 함수비 변화에는 민감하지 않아 거의 영향을 받지 않는다. 따라서, 전 흡인력의 변화는 대부분 모관흡인력에 대한 변화량으로 보아도 될 것이다. 특히, 모래질 흙에 관한 전 흡인력은 모관흡인력의 변화량에 좌우된다.

2.1.2 함수특성곡선

가. 함수특성곡선의 개요 및 이력현상

함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)은 함수량에 따른 모관흡인력의 변화를 나타내는 곡선으로 불포화 지반의 고유한 특성이며, 지반의 강도와 거동특성을 결정하는 매우 중요한 기본물성이라 할 수 있다. 일반적으로 함수특성곡선은 흙이 갖고 있는 물의 양과 모관흡인력과의 관계로 정의된다. 흙 속의 수분의 양은 흙의 무게에 대한 간극수의 무게의 비로 나타내는 중량함수비(ω) 또는 흙의 체적에 대한 간극수의 체적의 비로 표현되는 체적함수비(Θ) 그리고 포화도(S)로 표현할 수 있다. 지반공학에서는 대부분의 경우 중량함수비를 사용하지만 불포화도의 침투해석을 위해서는 전체 간극 중 물이 흐를 수 있는 가용 공간을 나타내는 지표인 체적함수비를 사용하는 것이 일반적이다. 왜냐하면 불포화 지반의 구성요소인 흙 입자, 물, 공기의 세 가지 구성성분을 동시에 고려되어야 하기 때문이다. 이러한 특징 때문에 포화지반 해석에서 사용되는 중량함수비(ω)보다는 간극공기를 고려하는 체적함수비(Θ)의 개념으로 설명된다. 그러므로 불포화 지반의 함수특성곡선은 체적함수비와 모관흡인력의 관계곡선으로 나타낸다.

전형적인 함수특성곡선의 모양은 그림 2.6과 같이 표현된다. 초기상태인 포화된 지반의 간극은 모관흡인력이 증가하여도 지반특성의 고유수치인 공기함입값(Air-entry value, AEV)을 초과할 때까지는 흙 속의 간극 밖으로 물이 유출되지 않는다. 여기에 나타나는 공기함입값은 포화된 지반에 처음으로 공기가 간극으로 유입되기 시작하는 모관흡인력으로 정의된다. 흙속의 간극으로 공기가 계속 유입되면서 물이 유출되어 지반의 모관흡인력은 증가한다. 함수특성곡선에서 가장 중요한 요소이며, 지반의 고유한 특징인 곡선의 경사가 정해진다(전이영역, transition zone). 곡선의 경사는 공기함입값과 잔류함수비(residual water content, Θ_r)를 결정짓는 중요한 요소가 된다. 흙 속으로 공기의 흡입이 계속되면 모관흡인력이 지속적으로 증가한다. 그러나 어느 정도의 모관흡인력이 증가하여도 더 이상의 물이 추출되지 않는 함수비가 존재하게 된다. 이때의 함수비를 잔류함수비라 한다(잔류영역, residual

zone). 이 잔류함수비는 자연 상태에서는 제거되지 않으며 열에 의해서만 제거될 수 있다. 포화체적함수비(θ_s)는 흙의 최대 체적함수비를 의미하고 이 값이 흙의 간극률과 일치하지는 않는다. 실제 포화체적함수비는 일반적으로 간극률보다 5~10% 더 작은 값을 갖기 때문이다.

일반적인 경우에, 지반의 수분 함량은 비교적 낮은 모관흡인력(0~1기압)에서 공기 함입과 물의 유출이 이루어진다. 흙 속에 유지되는 물의 함량은 흙 입자에 따른 간극의 크기와 그 간극에서 이루어지는 모관흡인력에 많은 영향을 받는다. 또한, 비교적 큰 모관흡인력 범위에서는 흙의 비표면적과 흙입자 표면의 이중층에 따라 좌우되는 수분의 흡착작용에 의존한다. 이런 수분의 흡착작용은 모관흡인력 범위가 큰 지반내의 수분의 이동과 보유에 관해 영향을 미친다.

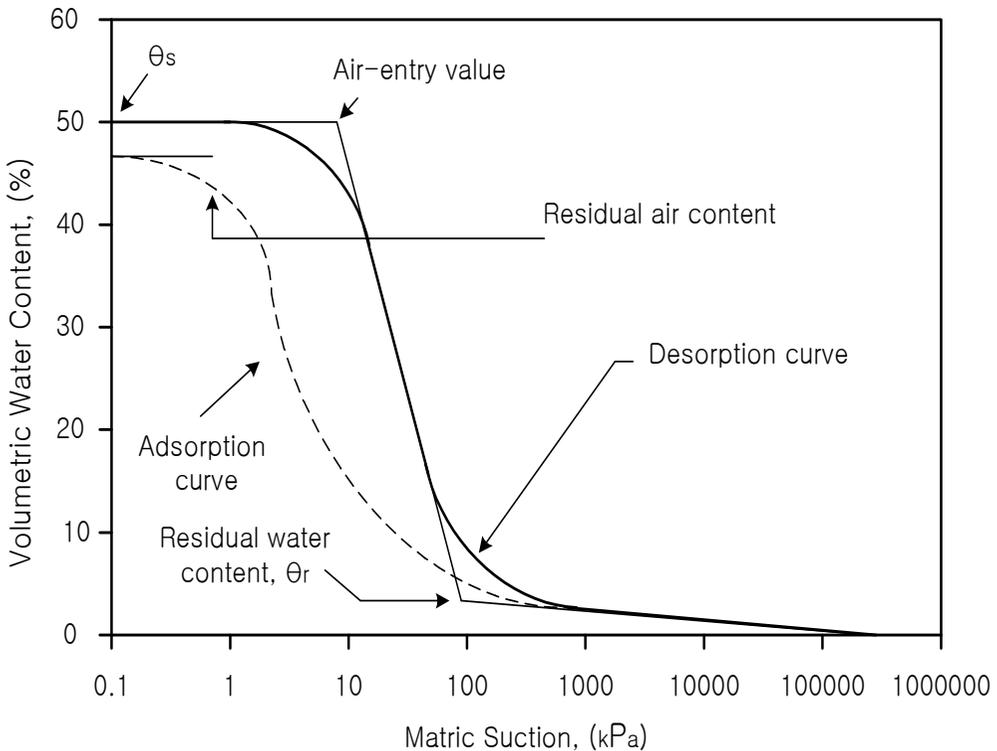


그림 2.6 전형적인 흙의 함수특성곡선

함수특성곡선을 표현할 때, 건조과정과 습윤과정의 두 과정으로 분리하여 함수특성 곡선을 나타낼 수 있다. 그림 2.7은 함수특성곡선의 건조과정에서 각 영역별로 물의 면적 변화를 설명한 것이다. 경계효과영역(boundary effect zone)에서는 흙 입자 사이의 메니스커스가 연속적이고 모든 간극이 물로 차 있는 포화상태로써 물의 면적 감소가 없다. 여기서 공기함입값은 가장 큰 간극 속에 공기가 들어가기 시작하는 점의 모관흡인력으로 경계효과영역과 전이영역의 경계가 된다. 전이영역에서는 모관흡인력이 증가함에 따라 함수비가 급격히 감소하게 된다. 지반내의 물이 유출되면서 입자사이의 메니스커스가 줄어들어 곡선의 형태가 불연속적으로 변한다. 모관흡인력이 계속 증가하면 함수비가 거의 변하지 않는 잔류영역에 도달한다.

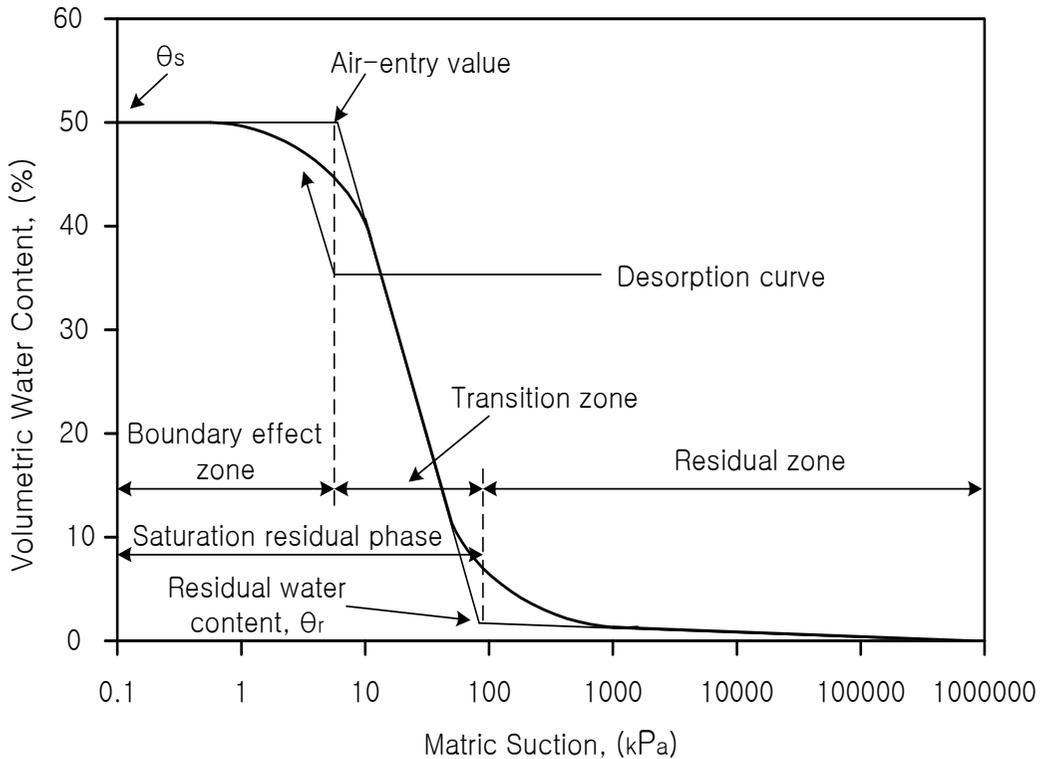


그림 2.7 전형적인 흙의 함수특성의 불포화영역

일반적으로 흙의 종류나 특성에 따라 정도의 차이는 있으나, 함수특성곡선은 그림 2.6과 같이 이력현상(hysteresis)을 표현할 수 있다. 지반 내에서 수분의 흡수(습윤과정)와 배수(건조과정)를 표현하는 이력현상에 대한 원인이 명확하게 규명되진 않았으나 현재까지 많은 사람들이 인정하는 것은 잉크병효과(ink-bottle effect)이다(Guy-mon, 1994). 흙 속에는 다양한 크기의 간극이 존재하는데, 이러한 간극들이 서로 연결되어 모관상승이 일어나면서 습윤 또는 건조과정에 따라 그 모관상승고가 달라지는 것이다. 이러한 현상을 “잉크병 효과”라고 한다. 모관상승현상은 건조과정에서는 작은 간극에 영향을 받고 습윤과정에서는 큰 간극의 영향이 절대적이므로, 물의 이동에 대한 물리적인 과정에 차이가 생긴다고 보는 것이다.

그림 2.8에서와 같이 작은 반지름 r 의 통로와 큰 반지름 r_1 의 통로로 간극이 구성되어 있다고 가정하고 모관법칙을 적용하면, r 에 상응하는 흡인력(ψ_r)이 r_1 에 상응하는 흡인력(ψ_{r_1})보다 큰 값이 된다.

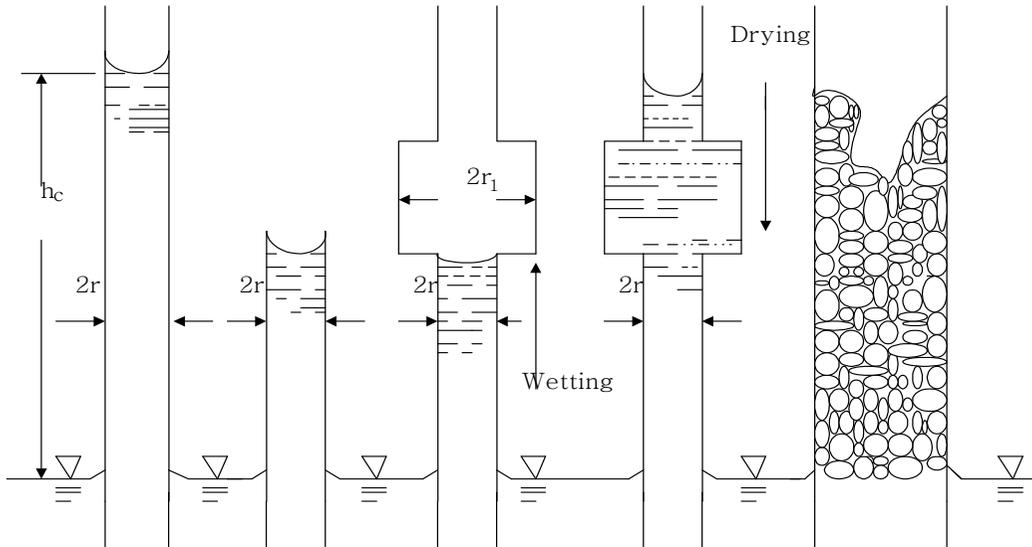


그림 2.8 함수특성곡선의 이력현상을 설명하는 모관현상

만일, 처음부터 포화도가 있다가 흡인력이 작용하는 건조 증발과정의 경우 이 간극은 흡인력이 ψ_{r_1} 을 초과하는 순간 빠르게 배수될 것이다. 반대로 습윤 침투과정

의 경우 흡인력이 ψ_{r_1} 이 되면 r_1 의 간극으로 수분이 흡수된다. 즉, 탈수작용은 작은 간극에 의존하는 반면, 흡수작용은 큰 간극에 의존하므로 동일한 간극이 보유하는 동일한 함수비에서도 건조 증발과정의 경우는 큰 흡인력 ψ_{r_1} 이, 습윤 침투과정의 경우는 작은 흡인력 ψ_r 에 좌우되는 것이다. 이러한 이력현상은 모세관현상이 지배적인 영역에서 크게 발생하고 화학적인 힘이나 표면력이 지배적인 영역에서는 이력현상이 뚜렷이 나타나지 않는다. 이러한 현상은 흙의 특성에 따라 좌우되지만, 지반 내부의 모관흡인력이 낮은 영역에서 이력현상이 두드러지게 나타나며 큰 모관흡인력에서는 이력현상이 거의 나타나지 않는다.

나. 함수특성곡선 모델

불포화토의 함수특성곡선을 구하기 위해서는 오랜 시간과 많은 비용이 소요되기 때문에 간단한 시험을 통해 구할 수 있는 매개체를 이용하여 함수비에 따라 변화하는 함수특성곡선을 예측하는 방법 및 모델에 대한 연구가 심도 있게 이루어져 왔다. 많은 연구자들이 함수특성곡선 함수를 제시하였는데, 대부분 실내실험을 통해 얻은 모관흡인력과 함수비 자료로부터 회귀분석과정을 통해 얻은 계수들을 이용하여 함수를 표현하였다. 그 후, 계속적인 실험으로 근래에는 일반적인 함수특성곡선의 형태는 S자 모양을 이루고 있다고 알려져 있다.

초창기에 제안되었던 식들 중 Gardner(1958), Brooks & Corey(1964), Farrel & Larson(1972), Williams et al.(1984), McKee & Bumb(1983)들이 제안한 식들은 S자 형태의 곡선을 이루지 않지만, 근래에 발표된 McKee & Bumb(1987), van Genuchten(1980), Fredlund & Xing(1994) 등이 제안한 식들은 S자 형태의 함수특성곡선 방정식을 보여주고 있다. 더욱이 Fredlund & Xing(1994)은 흙의 입도분포 곡선을 고려하여 함수특성곡선 방정식의 이론적인 기초를 세웠다.

다양한 흙에 대한 함수특성곡선의 유형을 방정식으로 표현하는데 있어서, van Genuchten(1980)과 Fredlund & Xing(1994)의 제안식이 널리 이용되며 방정식의 검증용으로 이용되고 있다. 근래에 와서 Fredlund & Xing(1994)을 비롯한 여러 연구자들에 의해 상단 부위의 공기함입값의 굴곡과 하단부위의 잔류함수비(θ_r)를 결정

하는 부분을 보완할 수 있도록 보정계수를 사용하였으며 모관흡인력 전범위에 적용 가능한 함수특성곡선을 표현할 수 있는 이론식이 제안되었다. 다음은 초창기 모델들과 근래에 적용하고 있는 함수특성곡선들의 개략적인 특성을 기술하였다.

(1) 기존 함수특성곡선 모델

Gardner(1958)는 최초로 투수계수함수를 구하기 위한 함수특성곡선을 식(2.8)과 같이 제안하였는데, 그 형태는 van Genuchten(1980)이 나중에 제안한 식과 유사함을 보이고 있다.

$$\theta = \frac{1}{1 + (a\psi)^n} \tag{2.8}$$

여기서, a : 공기함입값과 관련된 계수

ψ : 흙의 흡인력

n : 함수특성곡선의 변곡점에서의 기울기와 관련된 계수

이 식에서 Seber & Wild(1989)는 logistic curve라 하여 a 를 공기함입값과 같은 단위를 가지도록 하고 n 을 단위에 관련 없는 변수로 하여 식(2.9)와 같이 정리하였다.

$$\theta = \frac{1}{1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n} \tag{2.9}$$

여기서, $a : (\theta_s + \theta_r)/2$ 에 해당하는 모관흡인력

n : 기울기 변수

Brooks & Corey(1964)은 최초로 식(2.10)과 같은 함수특성곡선 모델을 제안하였는데, 이는 간극크기 분포지수를 지수로 하는 함수특성곡선식이다. 간극크기분포지수(λ)는 함수특성곡선의 기울기로 정의되는데, 다양한 크기의 간극을 가지는 흙에서는 간극크기분포지수가 작고 간극크기가 일정한 경우에는 간극크기분포지수가 커지게 된다.

$$\begin{aligned} \Theta &= 1 \quad \text{for } \Psi \leq \Psi_{aev} \\ \Theta &= \left(\frac{\Psi_b}{\Psi}\right)^\lambda \quad \text{for } \Psi > \Psi_{aev} \end{aligned} \quad (2.10)$$

여기서, Θ : 임의의 모관흡인력에서의 정규체적함수비

$$= (\Theta - \Theta_r) / (\Theta_s - \Theta_r)$$

Θ_s : 포화시 체적함수비

Θ_r : 잔류 체적함수비

Ψ : 흡인력

Ψ_{aev} : 공기함입값(AEV)

λ : 간극크기분포지수

식(2.10)은 포화상태 부근에서 흡인력의 불연속점이 나타나므로 조립 모래의 경우 낮은 범위의 흡인력 범위에서 흡인력에 급격한 변화가 발생하며 대부분의 흙, 특히 보통 또는 세립 모래에서는 공기함입값 부근에서 흡인력이 완만한 변화를 나타내는 것으로 알려져 있다. 공기함입값의 정의가 어려운 현장지반이나 입자가 가는 흙보다는 낮은 공기함입값을 갖는 입자가 큰 흙에 비교적 잘 맞는 경향을 보인다.

Williams 등(1983)은 오스트레일리아의 여러 흙에 대한 연구를 실시하고 로그(log) 스케일의 체적함수비와 로그 스케일의 흡인력이 직선관계가 있음을 확인하고 식(2.11)과 같은 함수특성곡선의 모델을 제안하였다.

$$\ln \Theta = a_1 + b_1 \ln \Psi \quad (2.11)$$

여기서, Θ : 체적함수비

a_1, b_1 : 회귀분석의 계수(curve-fitting parameters)

Ψ : 흡인력

McKee & Bumb(1984)는 정규화된 체적함수비와 흡인력 사이에 지수관계가 있음을 확인하고 다음 식(2.12)과 같은 모델을 제안하였다.

$$\Theta = e^{-(\Psi - a_2)/b_2} \quad (2.12)$$

여기서, Ψ : 흡인력
 a_2, b_2 : 회귀분석의 계수

식(2.12)은 공기함입값(AEV)보다 큰 모관흡인력 범위에서는 유용한 결과를 보이지만, 함수비가 최소인 건조상태나 함수비가 최대인 포화상태 부근에서는 적용성이 저하되는 것으로 나타났다(Fredlund & Xing, 1994). 이러한 문제를 개선하여 McKee & Bumb(1987)은 새로운 모델을 식(2.13)과 같이 제시하였다.

$$\Theta = \frac{1}{1 + e^{(\Psi - a_3)/b_3}} \quad (2.13)$$

여기서, Ψ : 흡인력
 a_3, b_3 : 회귀분석의 계수

식(2.13)은 흡인력이 높은 값에서는 곡선이 지수형태로 0에 근접하므로 흡인력이 낮은 범위에서는 적용성이 우수하지만, 흡인력이 높은 범위에서는 적용성이 저하되는 것으로 밝혀졌다(Leong, 1997).

이외에도 van Genuchten(1980)은 세 가지 변수를 사용하여 정규화된 체적함수비와 흡인력사이에 다음과 같은 관계가 있음을 제안하였는데, 위에서 언급한 제안식들에 비하여 적용성이 상당히 뛰어난 것으로 나타났다(Leong, 1997).

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (a\Psi)^n} \right]^m \quad (2.14)$$

여기서, Ψ : 흡인력
 a : 공기함입치와 관련된 계수
 n : 함수특성곡선의 변곡점에서의 기울기와 관련된 계수
 m : 높은 모관흡인력 범위에서의 곡선기울기와 관련된 계수

3개의 계수가 필요한 식(2.14)는 앞서 제안된 함수특성곡선들보다 좀 더 유연한 경향을 보여준다. 제안된 계수 n, m 은 서로 연관된 상태로 제안되었지만 이는 함수의 유연성을 감소시키는 작용을 한다. 함수의 유연성을 증가시키기 위해서는 계수를 연관시키지 않는 것이 더 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그러나 제한된 범위의 자료만이 이용 가능한 경우(습윤과정)에 독립적인 n, m 을 사용하면 계수를 추정하는 과정에서 수렴에 문제가 발생할 수 있으므로, 불완전한 결과 값들을 이용해서 계수들 사이에 제한 조건을 부여하면 보다 안정적인 결과를 얻을 수 있다. $\lambda = mn$ 으로 일정하게 하면, Brooks & Corey의 제안식과 동일하고 $m = 1$ 인 형태에 대해서도 많은 학자들에 의해 제안식이 제시되었다.

(2) 근래의 함수특성곡선(*Fredlund & Xing*)

함수특성곡선에 대한 기존의 연구는 자연 상태에서 경험적으로 구한 것으로, 특정 흙에서, 특정 흡인력 범위에서는, 우수한 적용성을 나타내지만 일반적인 흙에서는 그 적용성이 저하되어 개선이 필요했다.

흙은 간극이 불규칙적으로 연결되어있는 집합체로 가정할 수 있으며, 간극의 반경이 r 이라면 이러한 간극의 분포는 함수 $f(r)$ 을 이용하여 표현할 수 있다. 여기서, $f(r)dr$ 은 반경이 r 에서 $r+dr$ 인 간극의 상대체적(relative volume)을 나타낸다. $f(r)dr$ 은 반경이 r 에서 $r+dr$ 인 간극분포를 나타내며, 간극이 간극수로 채워졌으며 체적함수비는 식(2.15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Theta(R) = \int_{R_{\min}}^R f(r)dr \quad (2.15)$$

여기서, $\Theta(R)$: 간극반경이 R 이하인 흙의 포화 체적함수비

R_{\min} : 흙의 최소 간극반경

간극의 최대 반경이 R_{\max} 라면, 포화시는 식(2.16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Theta(R_{\max}) = \Theta_s \quad (2.16)$$

모관흡인력과 공기-물 접촉면의 곡률반경은 반비례의 관계가 있으므로 식(2.17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r = \frac{C}{\Psi} \quad (2.17)$$

여기서, Ψ : 흡인력

C : $2T\cos\theta$

θ : 간극수와 흡입자의 접촉각

식(2.17)을 근거로 두 개의 특정한 흡인력 조건을 나타낼 수 있다.

$$\Psi_{\max} = \frac{C}{R_{\min}} \quad (2.18)$$

$$\Psi_{\text{aev}} = \frac{C}{R_{\max}} \quad (2.19)$$

여기서, Ψ_{\max} : 최소 간극반경에 해당하는 흡인력

Ψ_{aev} : 공기함입값에서의 흡인력

위와 같은 관계를 이용하여 체적함수비는 다음과 같이 흡인력의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\Theta(\Psi) = \int_{\Psi}^{\Psi_{\max}} f\left(\frac{c}{h}\right) d\left(\frac{c}{h}\right) = \int_{\Psi}^{\Psi_{\max}} f\left(\frac{c}{h}\right) \frac{c}{h^2} dh \quad (2.20)$$

여기서, h : 흡인력에 대한 적분을 위한 임의의 변수(dummy variable)

식(2.20)은 흡인력과 체적함수비의 관계를 나타내는 일반식이며 간극의 분포함수

$f(r)$ 를 알면 함수특성곡선을 결정할 수 있다. 흡인력의 범위가 0에서 1,000,000 kPa인 전체 영역을 포함하는 함수특성곡선을 표현하기 위해 잔류 체적함수비(Θ_r)가 0인 상태를 가정하면 정규화 된 체적함수비(Θ)는 Θ/Θ_s 이 되고, 흡인력과 체적함수비의 관계를 나타내는 일반식은 식(2.21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Theta(\Psi) = \Theta_s \int_{\Psi}^{\infty} f(h) dh \quad (2.21)$$

여기서, $f(h)$: 흡인력으로 표현되는 간극의 분포함수

기존 연구자들이 제시한 여러 함수특성곡선 모델은 특정 흙에서 특정 흡인력 범위에서만 유효하므로(Leong, 1977), 이러한 단점을 개선하기 위하여 Fredlund & Xing(1994)은 $f(h)$ 의 형태를 새로이 가정하고 van Genuchten(1980)의 식을 변형하여 모관흡인력의 최대 제한 값(10^6 kPa)을 고려하여 전체 모관흡인력 범위를 적용할 수 있는 함수특성곡선을 식(2.22)와 같이 제안하였다.

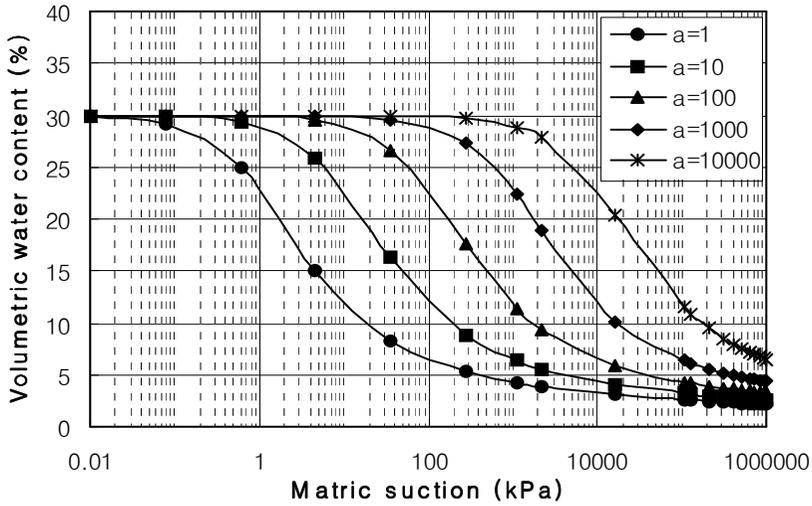
$$\Theta = \Theta_s \left[\frac{1}{\ln[e + (\Psi/a)^n]} \right]^m \quad (2.22)$$

여기서, a, n, m : 함수 특성곡선의 형태를 결정하는 계수

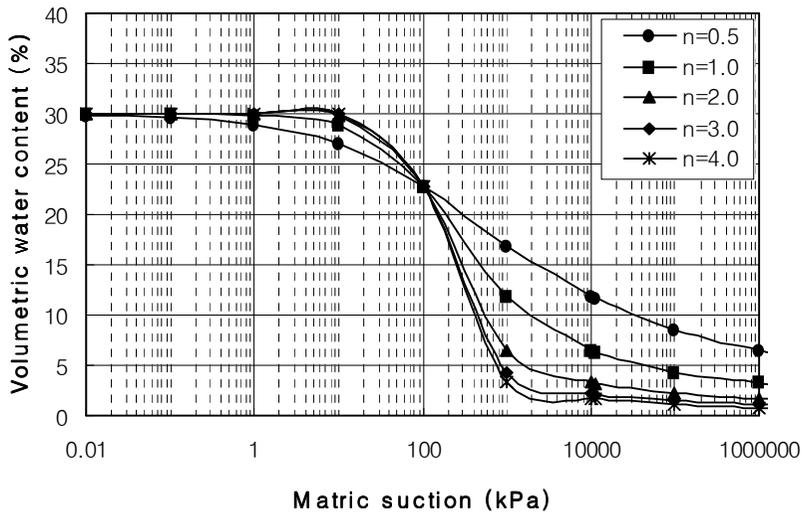
Fredlund & Xing(1994)이 제안한 함수특성곡선의 형상을 결정하는 각각의 계수들에 대한 의미는 다음과 같다. 계수 a 는 공기함입값과 관계를 갖는 계수로서 변곡점에서의 흡인력에 해당하는 계수이며, 계수 n 은 곡선 직선부의 기울기에, 그리고 m 은 높은 흡인력단계에서 그래프 형상에 관계를 갖는 계수이다.

그림 2.9는 각각의 계수가 변화할 때 함수 특성곡선의 변화를 나타낸 것이다. 먼저 그림 2.9(a)는 n, m 이 일정한 값을 가지고, a 에 따른 모델의 변화를 나타내는 그림이다. 계수 a 는 흡인력과 같은 단위를 가지며 공기함입값에 비해 크지만 공기함입값과 관련이 있는 값으로서 곡선의 변곡점에 해당하는 값을 가지게 된다. 이 계수는 곡선의 전체적인 모양에는 영향을 주지 않으며 위치만 변화시키는 특성을

갖는다. 즉, a 값이 증가할 때 곡선은 전체적으로 보다 높은 흡인력 쪽으로 이동하게 된다.

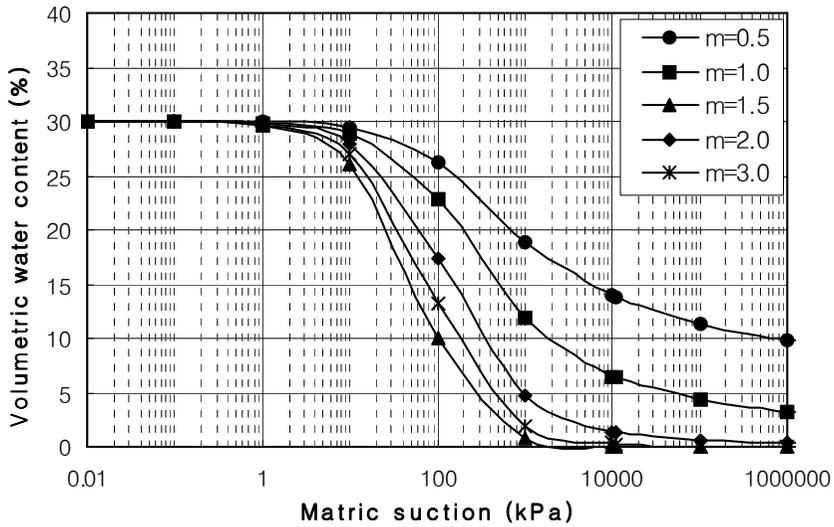


(a) a 계수의 변화에 따른 함수특성곡선의 형상($n=1, m=1$)



(b) n 계수의 변화에 따른 함수특성곡선의 형상($a=100, m=1$)

그림 2.9 Fredlund & Xing의 계수(a, n, m)에 따른 함수특성곡선 형상(I)



(c) m 계수의 변화에 따른 함수특성곡선의 형상($a=100, n=1$)

그림 2.9 Fredlund & Xing의 계수(a, n, m)에 따른 함수특성곡선 형상(II)

그림 2.9(b)는 a, m 이 일정한 값을 가질 때, n 에 따른 모델의 변화를 나타내고 있으며 함수특성곡선 중간부분의 기울기를 표현한다. 그림 2.9(c)는 a, n 이 일정한 값을 가질 때, m 에 따른 모델의 변화를 나타내며 높은 흡인력 부분에서의 그래프 모양을 보여준다.

Fredlund & Xing(1994) 모델의 장점으로서는 넓은 범위에서 실험 자료를 표현 할 수 있는 유연성을 가지고 있고, 모델에 포함된 계수들이 각각의 의미를 가지는 것이다. 3개의 계수를 가진 다른 모델인 van Genuchten(1980)의 모델에 비해 적합한 계수를 찾기 위해 수렴하는 효율도 높은 것으로 평가되고 있다.

다. 물성을 이용한 함수특성곡선 추정법

불포화토의 특성을 파악할 수 있는 함수특성곡선이나 투수특성곡선과 같은 자료를 실험을 통해 확보하는데 발생하는 시간적, 경제적, 기타 많은 어려움 때문에 불포화토에 관한 연구가 활발히 진행될 수 없었다. 이러한 이유로, 최근 몇 년간 많

은 연구자들에 의해 불포화 특성함수를 입도분포곡선과 같이 비교적 간단하고 기본적인 지반물성으로부터 구하는 것이 시도되어 왔는데, 이러한 추정법을 Pedo-Transfer Function(PTF)이라 한다.

함수특성곡선을 유추하기 위해 사용되는 PTF는 크게 3가지로 나뉘는데, 회귀분석을 통해 함수비와 입도분포곡선의 변수들 간의 관계로부터 결과를 얻는 점 회귀 방법(point regression method), 함수특성곡선식의 공기함입값을 비롯한 변수들과 간극률이나 모래함유율 같은 흙의 기본물성 간의 연계성을 이용하는 함수의 매개 변수 회귀방법(functional parameter regression method), 흙의 물리적, 구조적 특성을 기반으로 함수특성곡선을 도출하는 물리적 모델방법(physical model method)이 있다. 함수특성곡선 추정법은 다양한 방법이 있으나 본 논문에서는 대표적인 Fredlund & Wilson의 추정법과 Arya & Paris의 추정법만 제시하고자 한다.

(1) Fredlund & Wilson의 추정법

Fredlund & Wilson(1977)은 함수특성곡선이론과 모세관현상에 기반을 둔 물리, 경험적 방법(physio-empirical method)으로 체적-질량에 관계되는 물성값과 입도분포곡선형태를 이용하여 함수특성곡선을 유추하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 기존의 방법으로 예측된 함수특성곡선에서 모관흡인력이 증가함에 따라 비정상적인 흐름을 보이는 부분이 발생하는 등의 문제점들을 보완하여 제시된 새로운 이론으로 구체적인 내용은 다음 3가지이다. 첫 번째, 전반적으로 단일의 균질한 입자크기를 가지고 있는 흙은 단일한 건조 함수특성곡선을 갖는다. 둘째, 모세관 모델은 각각의 유일하고 균질한 입자크기의 공기함입값의 측정에 잘 부합된다. 셋째, 한 가지 이상의 입자크기로 구성된 흙의 함수특성곡선은 각각의 입자크기에 대한 함수특성곡선의 조합으로 이루어진다. 이 방법은 각각의 개별적인 입자크기에서의 함수특성곡선을 묘사하기 위해서 모관흡인력의 전범위에서 적용이 가능한 Fredlund & Xing(1994) 모델식을 이용하였다.

(2) Arya & Paris의 추정법

Arya & Paris(1981)는 함수특성곡선의 유추에 처음으로 물리, 경험적 방법

(physio-empirical method)을 이용하여 적용하였다. 이 방법은 입도분포를 이용하여 간극분포를 구하고 그 결과로부터 함수특성곡선을 구하는 방법이다.

입도분포곡선을 입자크기별로 n 개 부분으로 나누어 각 부분의 흙을 일정한 크기의 구형 입자들로 구성된 정육면체 구조로 이루어져 있다고 가정한다. 각 구조의 간극부피는 흙구조로 측정된 전체밀도와 흙입자 밀도로부터 계산된다. 첫 번째 부분부터 계산된 간극부피는 점차적으로 누적되어 물로 채워진다고 간주한다. 물로 채워진 간극부피의 합은 전체부피로 나누어지고 이 값으로부터 체적함수비(θ)를 계산한다. 그리고 모세관이론을 바탕으로 각각의 부분에서 구해진 간극지름으로부터 모관흡인력이 구해진다.

라. 실험장치를 통한 함수특성곡선의 산정

불포화토의 흙 입자 사이 간극에는 공기와 물이 존재하며 간극에 물이 찰수록 흡인력은 줄어들고 간극속의 물이 빠져나갈수록 흡인력은 커지게 된다. 이러한 원리로 흙 입자와 물, 공기간의 에너지 평형이 이루어지게 된다. 실험을 통하여 함수 특성곡선을 산정하는 대표적인 방법이 SWCC Cell 장치를 이용한 방법이다.

SWCC Cell 장치의 기본개념은 축 변환기법으로 이는 불포화토에서 간극수압을 고정하고 간극공기압을 변화시켜 모관흡인력의 변화를 알 수 있도록 하는 것이다. 축 변환이란 용어는 모관흡인력을 기준, 즉 축으로 보고 이 값이 대기압과 부(-)의 간극수압 상태에서 양(+)의 공기압과 대기 수압상태로 변환된다는 것을 의미하는 것이다.

SWCC Cell 장치는 Fredlund & Xing (1994)의 이론을 이용하여 Fredlund가 직접 고안한 토질의 함수특성곡선을 얻는 장비로 직경 75mm의 몰드에 다진 시료를 미리 포화시킨 다음, 공기압을 주어 공기압이 간극수를 밀어내는 원리로 함수비와 흡인력을 조절하는 것이다. 흙의 모관흡인력으로 인하여 유입구로부터 물이 흡수될 때 물의 유입량을 측정함으로써 체적함수비를 알 수 있고 유입된 물의 양만큼 유출을 시키는데 필요한 가압 로드에서 가해지는 힘이 이때의 흡인력이 된다.

본 물성시험을 통하여 구해진 포화도, 함수비, 체적함수비, 간극비, 건조단위중량, 습윤단위중량, 비중이며 이 7가지 중에서 3가지 이상을 입력하면 나머지는 자동으로 산정이 된다. 추가로 흙의 액성한계를 입력하면 흙의 분류가 되며, 입도분포 시험결과를 입력하면 여러 추정식을 이용한 건조상태 함수특성곡선을 얻을 수 있다. 또한, Soil-Vision은 사용자가 시행한 여러 가지 실험으로부터 얻어진 모관흡인력과 체적함수비를 입력하여 최적의 함수특성곡선을 얻을 수도 있다.

2.1.3 불포화토의 투수계수

가. 기본개념

액체상태인 물은 간극사이에 생성된 유로를 따라 흐르는데, 함수비가 감소할수록 간극수가 흐르는 유로가 줄어들기 때문에 간극수의 흐름은 점차 저하된다. 흙이 완전 건조상태가 되면 간극수의 유로는 사라져 버리고, 반대로 흙이 완전 포화상태가 될 경우 모든 간극은 유로가 됨으로 간극수의 흐름은 최대가 된다.

그림 2.11은 투수계수와 간극수압과의 전형적인 관계를 보여준다.

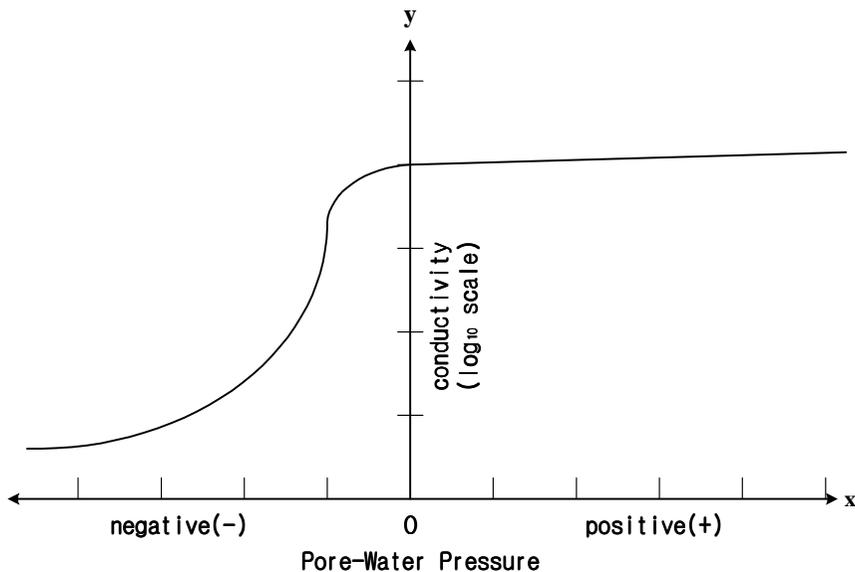


그림 2.11 투수계수 함수

간극수의 흐름은 투수계수로 표현될 수 있고, 투수계수는 함수비에 따라 다른 값을 갖는다. 함수비는 간극수압의 함수이며 투수계수는 함수비의 함수이므로 투수계수 또한 간극수압의 함수로 정의될 수 있다. 즉, 불포화토에서의 물의 흐름을 나타내는 투수계수는 함수비와 간극수압의 함수로 표현할 수 있다는 것이다.

나. 흐름법칙

다공질체내의 물의 이동속도는 전수두의 기울기인 동수경사에 비례한다는 Darcy의 법칙은 원래 포화토에서의 물의 흐름을 대상으로 하지만, 이 후의 연구결과에 의해 불포화토에서도 적용이 가능한 것으로 나타났다(Richards, 1931; Childs & Collis-George, 1950).

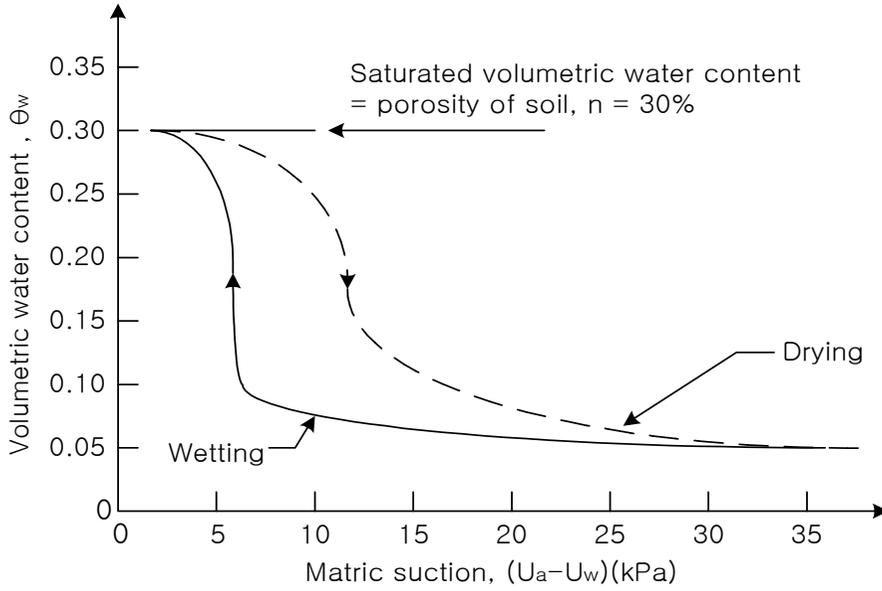
$$q = ki \tag{2.23}$$

여기서, q : 비 유량
 k : 투수계수
 i : 동수경사

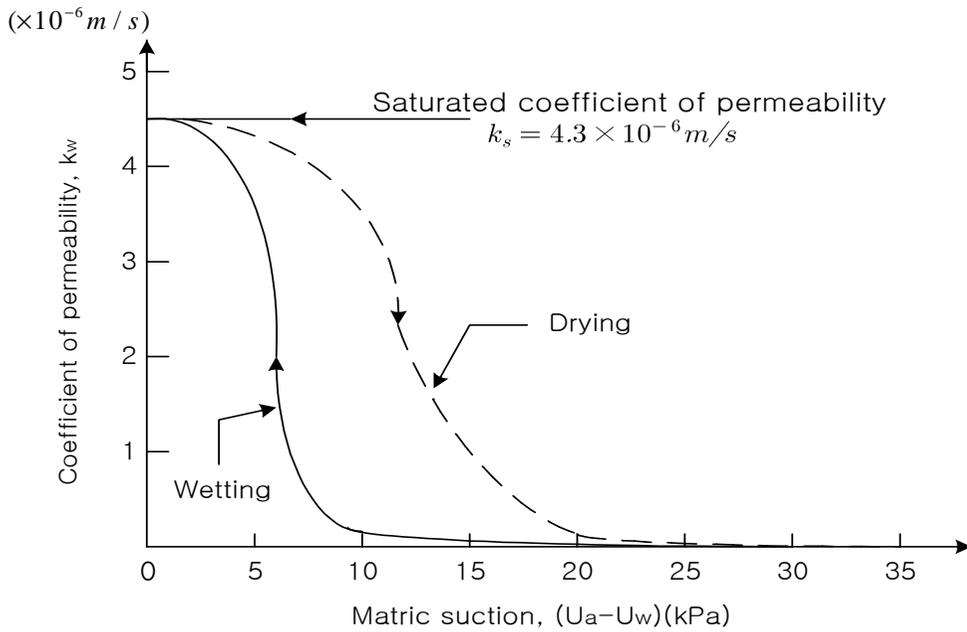
불포화토의 흐름이 포화토와 다른 점은 불포화토의 흐름에서는 투수계수가 일정하지 않고 함수비와 간극수압의 변화에 따라 변화된다는 것이다. 포화지반에서처럼 상수로 정의할 수 없고 함수비와 모관흡인력에 관한 함수로 표현하여야 한다.

다. 이력현상

투수계수를 간단히 말하면, 물이 흙을 통하여 흐를 수 있는 공간을 측정하는 것으로 유체의 성질이나 흙에 따라 다른 값을 나타낸다. 불포화 영역의 투수성은 간극내의 물과 공기의 함수 즉, 포화도의 함수로서 포화도가 감소하면 간극이 입자쪽 물이 먼저 흐르게 되고 점점 작은 간극속의 흐름으로 발전한다. 이는 흐름의 단면적을 감소시키고, 또한 유선의 복잡성을 증대시킨다. 이러한 두 가지의 조합된 효과는 함수비가 감소함에 따라 투수성이 급격하게 감소하는 원인이 된다(Shashi, 1984). 그리고 이러한 관계는 그림 2.12에 제시된 것과 같이 단순한 선형관계가 아니라, 함수특성곡선과 마찬가지로 이력현상을 나타낸다(Liakopolous, 1965).



(a) 함수특성곡선의 이력현상



(b) 투수특성곡선의 이력현상

그림 2.12 함수특성곡선과 투수특성곡선의 이력현상

불포화시의 투수계수는 모관흡인력 즉, 부(-)간극수압이 점점 커짐에 따라 급격한 감소를 보이는데, 지반 내 포화도의 증감에 따라 달라진다. 불포화 지반의 투수계수에 대한 시험은 Richards(1931)에 의해 처음 행하여 졌는데, 포화시의 투수계수가 간극비만의 함수인데 반해 불포화토의 투수계수는 간극비(e), 포화도(S), 함수비(w)의 함수로 표현할 수 있다. 이를 나타내면 식(2.24)와 같다.

$$K_w = f(S, e, w) \quad (2.24)$$

라. 불포화토의 투수계수 산정

포화토와 불포화토의 침투류 해석은 투수계수와 간극수압의 관계가 입력변수로 작용하며 특히, 불포화토에 대한 침투류 해석은 함수특성곡선이 정의 되어야 한다. 간극수압에 따른 투수계수는 실험을 통해 직접 구할 수도 있지만 해석대상 지반의 함수특성곡선과 포화투수계수, 입도분포곡선을 알고 있다면 간극수압에 따른 투수계수의 예측이 가능하다. 다음으로 직접투수계수시험법과 간접적으로 예측하는 방법에 대해 기술한다.

(1) 직접 투수계수 산정방법

포화된 지반의 투수계수 측정을 위한 실내시험법은 정수위 시험법과 변수위 시험법이 있고, 두 시험법의 기본적인 전제조건은 대상 시료가 완전히 포화되어 있어야 한다. 그러나 불포화 지반의 경우 시료가 포화되지 않은 상태의 투수계수를 측정해야하므로 이러한 방법을 적용하기는 곤란하다. 불포화 지반은 포화지반에 비해 투수계수가 매우 작고 실험 중 불포화상태에서의 포화도 유지가 어려워 값을 제대로 구하기가 매우 어렵다. 이러한 애로점들을 고려하여 불포화투수계수를 구하는 직접 또는 간접적인 몇 가지 시험법이 개발되었다.

우선, 직접적인 방법으로는 그림 2.13에서와 같은 원리로 적용되는 불포화토의 정수위 투수시험방법이다. 이 시험방법은 불포화 시료의 전수두차, 모관흡인력과 함수비 역시 일정하게 유지시킨 상태에서 Darcy의 법칙이 적용된다고 가정하고 실

시하는 것이다. 포화토의 정수위 투수시험법과의 차이점은 적용된 모관흡인력과 함수비에 따라 하나의 투수계수가 계산되므로 여러 번 반복시험을 해야 한다는 것이다.

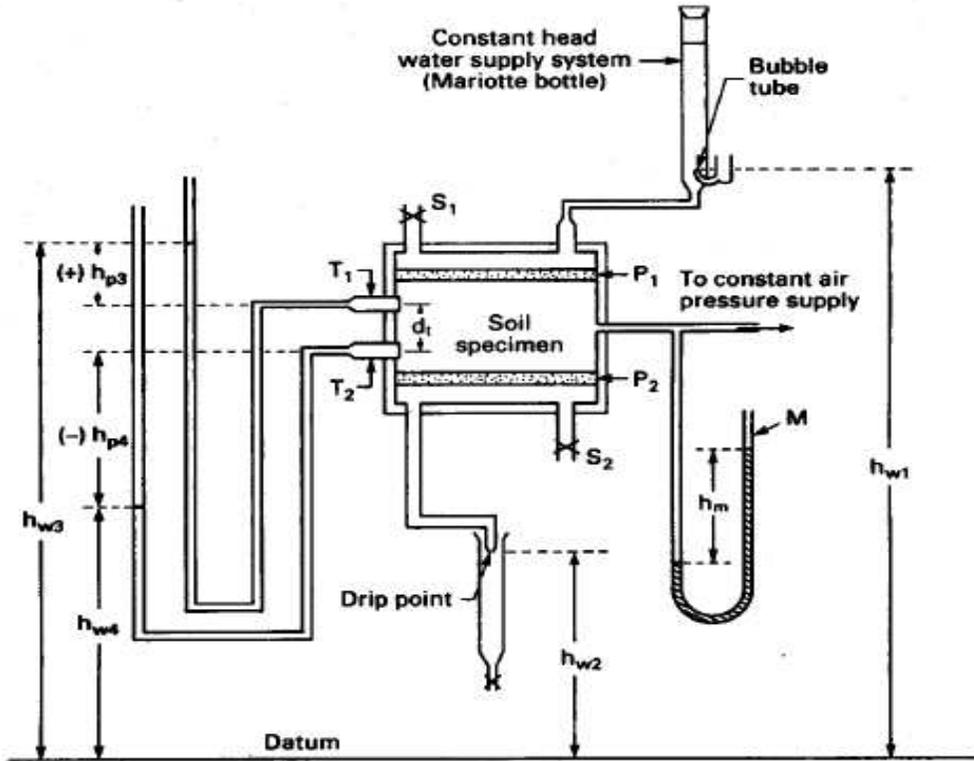


그림 2.13 불포화토의 정수위 투수시험 장치의 모식도

그림 2.13에서 T1과 T2는 Tensiometer로 시료 내부의 상, 하단에 설치하여 간극수압을 측정하고 P1, P2는 세라믹판으로 시료의 상부와 하부를 밀착하여 높은 공기압입값을 갖게 한다. 또한, M은 기압계로 일정한 간극공기압을 유지하는데 이용한다(Klute, 1965).

식(2.25)은 불포화토의 정수위 투수시험으로부터 얻어지는 투수계수 계산식이다.

$$k_{uw} = \left(\frac{Q}{A_t}\right)\left(\frac{d_t}{h_{w3} - h_{w4}}\right) \quad (2.25)$$

여기서, k_{uw} : 측정된 불포화 투수계수(cm/s)

Q : 시료 내부에 들어간 물의 체적(cm^3)

A_t : 시료면적(cm^2)

d_t : tensiometer 사이의 거리(cm)

h_{w3} : T₁에 해당하는 수두(cm)

h_{w4} : T₂에 해당하는 수두(cm)

각각의 투수계수에 따른 평균 모관흡인력을 구하는 식은 식(2.26)과 같다.

$$(u_a - u_w)_{ave} = \rho_m g h_m - \left(\frac{h_{p3} + h_{p4}}{2} \right) \rho_m g \quad (2.26)$$

여기서, $(u_a - u_w)_{ave}$: 평균 모관흡인력

ρ_m : 기압계 내 액체의 밀도

g : 중력가속도

h_m : 기압계 내 액체의 높이

이러한 직접적인 투수계수 실험들은 실제 적용에 다음과 같은 어려움이 있다. 첫째, 모관흡인력이 커짐에 따라 투수계수가 낮아지므로 소요되는 시간이 길어지고 둘째, 시료로부터의 유출량이 적어서 물의 부피를 정확하게 측정하기 어렵다는 점이다. 셋째, 장기간에 걸쳐 적은 양의 물의 부피변화를 측정하면서 실험장치의 각 요소에서 물의 손실을 최소화해야하고 물속으로 공기가 녹아 들어가는 문제 등이 발생할 수 있으며 이로 인한 큰 오차가 생길 수도 있다.

(2) 간접 투수계수 산정방법

불포화토의 투수계수는 실험을 통해 직접 구할 수도 있지만 해석대상 지반의 함수특성곡선과 포화투수계수, 입도분포곡선을 알고 있다면 간접적인 투수계수의 예측이 가능하다. 간접적인 방법들은 함수특성곡선으로부터 투수계수를 계산하므로

함수특성곡선을 정확하게 구하는 것이 불포화 지반의 투수계수를 구하는데 매우 중요하다. 이렇게 함수특성곡선으로 산정하는 불포화 지반의 투수계수 역시 모관흡인력의 함수로 나타낸다(Marshall, 1958; Millington & Quirk, 1961).

불포화토의 투수계수 예측을 위한 제안모델은 크게 세 가지로 구분되어 발전하였다. 첫 번째 모델은 간극크기의 분포함수를 근거로 투수계수를 예측하는 모델로서 Childs, Collis-George(1950)이 최초로 제안하였고, Kunze et al.(1968), Green & Corey(1971)등에 의해 발전되었다. 두 번째 모델은 상대투수계수의 크기를 유효포화도의 함수로 표시하는 방법이다. 세 번째 모델은 모관흡인력-포화도 곡선으로부터 투수계수를 유도하는 방법이다. 여기서는 많은 불포화 투수계수 간접 추정법 중 대표적인 추정모델인 Brooks & Corey(1964), Green & Corey(1971), Mualem (1976), van Genuchten(1980)의 모델과 본 연구에 적용된 Fredlund & Xing(1994)의 추정모델에 대해 제시하였다.

· Brooks & Corey 추정식

Brooks & Corey(1964)의 추정식은 본인들이 제안한 함수특성곡선 모델을 토대로 불포화 투수계수를 제안하는 추정식을 식(2.27)과 같이 제시하였다. 다른 추정식들에 비해 형태도 간단하고 비교적 정확한 투수계수를 얻을 수 있으며 특히, 모래나 자갈과 같은 조립으로 구성된 지반에 적합한 것으로 알려져 있다.

$$k(\Psi) = k_s \begin{cases} \left(\frac{\Psi_{aev}}{\Psi}\right)^{2+\left(\frac{5\lambda}{2}\right)} & (\Psi > \Psi_{aev}) \\ 1 & (\Psi \leq \Psi_{aev}) \end{cases} \quad (2.27)$$

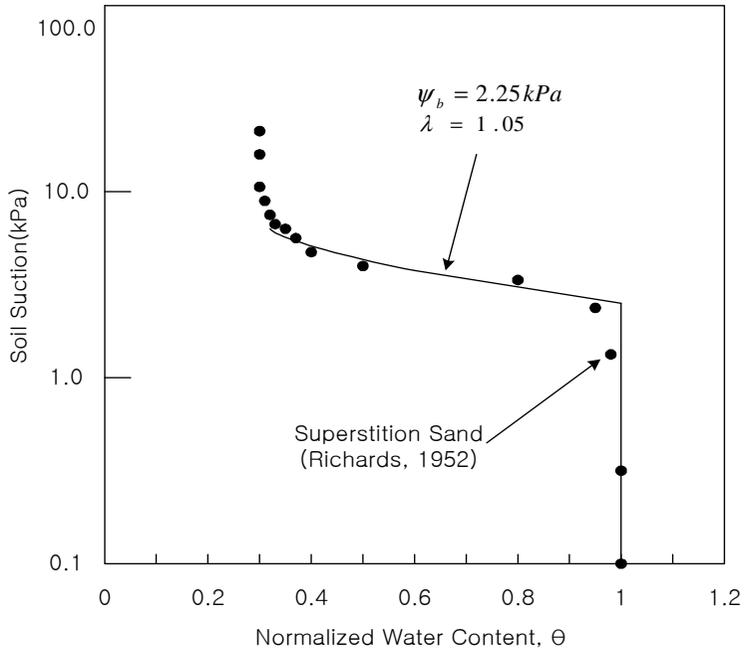
여기서, $k(\Psi)$: 함수비 혹은 부의 간극수압 조건에서 계산된 포화투수계수

k_s : 포화투수계수

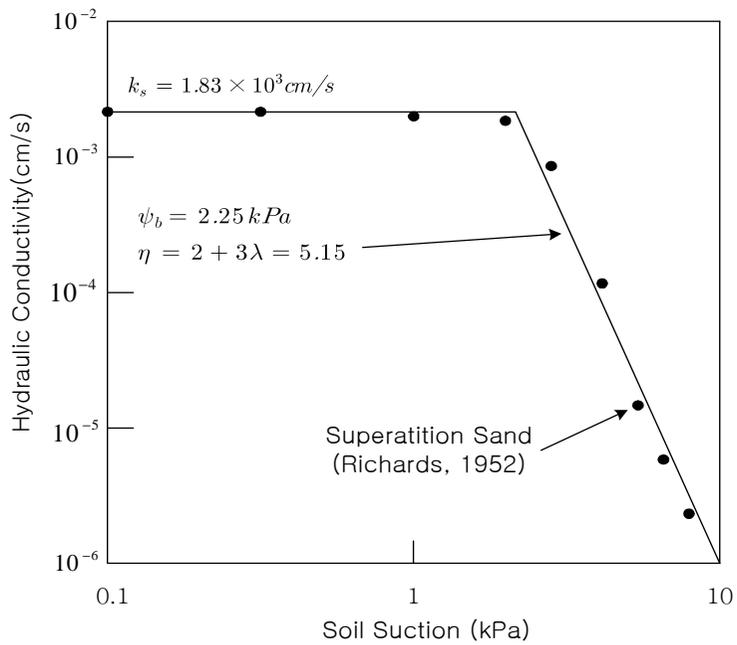
Ψ_{aev} : Brooks & Corey 함수특성곡선의 공기함입값

λ : 함수특성곡선의 계수

Ψ : 흡인력



(a) 함수특성곡선



(b) 투수특성곡선

그림 2.14 Brooks & Corey 추정식에 의한 투수특성곡선

· Green & Corey의 추정식

Green & Corey(1971)는 함수특성곡선으로부터 불포화토의 투수계수를 식(2.28)과 같은 추정식으로 제시하였다.

$$k(\Theta)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} \frac{30 T_s^2}{2 \rho_w g \eta} \frac{\xi_s^p}{n^2} \sum_{j=i}^m [(2j+1-2i)\Psi_j^{-2}] \quad (2.28)$$

여기서, $k(\Theta)_i$: 함수비 혹은 부의 간극수압 조건에서 계산된 포화투수계수

Θ : 체적함수비

k_s : 포화투수계수

k_{sc} : 계산한 포화투수계수

ρ_w : 물의 밀도

T_s : 물의 표면장력

g : 중력가속도

η : 물의 점성

ξ : 포화 간극률

i : 구간번호

j : $i-m$ 사이의 값

p : 다양한 간극사이즈에 따른 상수

m, n : 전체 구간관련 수

Ψ_j : j 구간의 중점에 상응하는 흡인력(부의 간극수압)

· Mualem 추정식

Mualem(1976)은 Brooks & Corey의 함수특성곡선과 포화투수계수로부터 불포화토의 투수계수를 구하는 방법을 제안하였으며, 이 방법은 수식이 비교적 간단하고 적용성이 뛰어난 것으로 알려져 있다.

$$k(\Psi) = k_s \left[\left(\frac{n}{\Psi} \right)^\lambda \right]^{n+2+2/\lambda} \quad (2.29)$$

여기서, $k(\Psi)$: 함수비 혹은 부의 간극수압 조건에서 계산된 투수계수

Ψ : 흡인력(부의 간극수압)

k_s : 포화투수계수

n, λ : Brooks & Corey 계수

· van Genuchten 추정식

van Genuchten(1980)은 투수계수를 흡인력의 함수로 식(2.30)과 같이 제안하였는데 이 추정식은 포화토와 불포화토의 흐름 모두에 적용 가능하다. 이 추정식에서 잔류함수비는 1,500kPa를 사용하도록 하고 있고, 점성토 지반을 제외한 대부분의 지반에서 적절한 값을 갖는 것으로 입증되었다. 국내 연구에서도 김상규 등(1996)과 강종범, 이봉직 등(2002)은 실내시험을 통하여 van Genechten 투수함수가 실험결과와 잘 부합됨을 보여주었다.

$$k(\Psi) = \frac{k_s [1 - (a\Psi^{n-1})(1 + (a\Psi)^n)^{-m}]^2}{((1 + a\Psi)^n)^{\frac{m}{2}}} \quad (2.30)$$

여기서, k_s : 포화시 투수계수

a, n, m : 함수특성곡선의 계수

Ψ : 흡인력(부의 간극수압)

· Fredlund & Xing 추정식

Fredlund & Xing(1994)은 체적함수비의 함수에 대한 적분을 통해 불포화토의 투수함수를 구하는 방법을 제안하였다. 포화투수계수와 Fredlund & Xing이 제안한 방법에 의해 구한 함수특성곡선을 이용하여 흡인력의 작용하는 전 범위인 0~1,000,000kPa에서의 투수함수에 대한 예측이 가능하다. Fredlund의 투수함수 추정식은 점토와 같은 세립토보다는 사질토에 적합하고 부(-)의 간극수압이 큰 경우에 적합한 방법이다.

$$k(\Psi) = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\Theta(e^y) - \Theta(\Psi)}{e^{yi}} \Theta'(e^{yi})}{\sum_{i=j}^N \frac{\Theta(e^y) - \Theta_s}{e^{yi}} \Theta'(e^{yi})} \quad (2.31)$$

여기서, $k(\Psi)$: 함수비 혹은 부의 간극수압 조건에서 계산된 포화투수계수

k_s : 포화시 투수계수

e : 자연지수(2.71828)

Ψ : 흡인력

Θ' : 체적함수비 Θ 의 1계 도함수

Θ : 체적함수비

y : 적분을 위한 임의의 수

N : 최대 부(-)의 간극수압

$$\Theta = C(\Psi) \frac{\Theta_s}{\ln[e + (\Psi/a)^n]^m}$$

a, n, m : 함수특성곡선 형상 결정 계수

$$C(\Psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\Psi}{C_r})}{\ln(1 + 1,000,000/C_r)}$$

C_r : 잔류함수비에서의 흡인력과 관련된 상수(1500kPa)

2.2 강우시 지반의 침투거동

2.2.1 1차원 침투이론

지반 내 임의의 면을 통해 강우 등이 지표면에서부터 흡수되어 들어가는 것을 침투(infiltration)라 하고, 이러한 과정을 거쳐 침투할 수 있는 최대치를 침투능력(infiltration capacity)이라 한다. 침투가 진행됨에 따라 그 값은 시간에 따라 변화하며 최소값에 접근할 때까지 감소하게 되는데, 그 최소값은 대략 포화투수계수와 유사하다. 이 때 침투능 곡선 아래의 면적을 흙의 누적침투능이라 하며 임의의 시간동안 주어진 흙이 흡수할 수 있는 단위면적당 최대 부피를 의미한다. 침투는 지표면을 통해 물이 흙 속으로 들어가는 물리적인 과정을 말하며 침투량은 불포화 지

반의 함수량조건, 간극수압, 투수계수 등에 따른 물의 재분포에 의해 결정된다 (Esponzoza, 1999). 일차원 연직침투는 가장 보편적인 침투과정이며 불포화영역을 통한 침투율을 산정하기 위한 많은 방법들이 연구되어져 왔다. 이들 여러 방법들은 Richard식, Green-Ampt식, 경험식에 관련된 모델들로 크게 나눌 수 있다.

본 논문에서는 가장 보편적으로 사용되고 있는 Green-Ampt식에 대해 설명하기로 한다. 지표를 통해 침투할 수 있는 물의 양은 흙의 함수특성, 불균질성, 포화도 등에 연관되어 있으며 균질한 흙을 통한 일차원 연직침투에 대한 많은 해석적, 경험적 식들이 제안되었다(Green-Ampt, 1911; Horton, 1940; Mein & Larson, 1973).

Green-Ampt는 해석적인 방법에 의해 침투능을 구하기 위해 1차원 연직흐름에 기초를 둔 간략 해를 최초로 제안하였다. 그들은 그림 2.15와 같이 명확한 습윤전선이 존재하는 피스톤 모양의 함수량분포를 가정하였다.

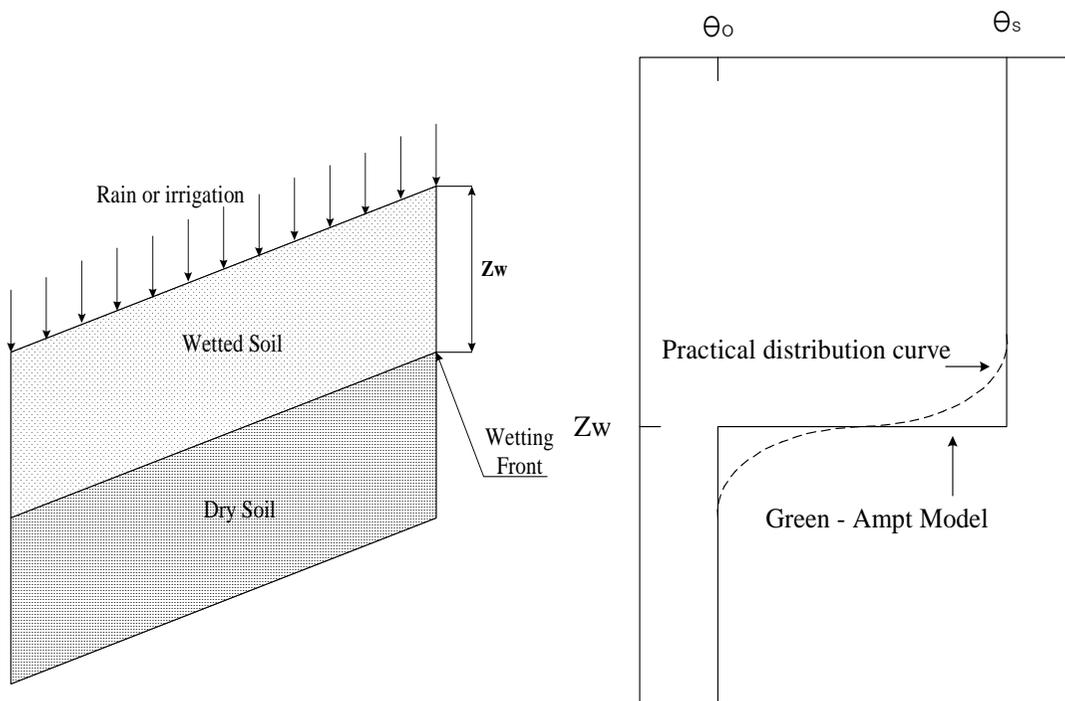


그림 2.15 깊이 에 따른 함수비 분포

이 모델은 1차원 연직흐름, 습윤전선에 일정한 습윤 전면흡인력(Ψ_f), 습윤전선 윗 부분에서의 함수량 결손($\Delta\theta_i$)과 투수계수(k_s)가 일정하다는 가정을 바탕으로 하고 있다. 습윤 전면흡인력(Ψ_f)은 지반이 포화되기 직전에 나타나는 최소 흡인력 값이며 사면의 자연함수비인 초기 값에 따라 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 습윤전선의 깊이(z_w)까지는 완전히 포화되어 있고 습윤전선의 깊이 하부는 초기상태의 포화도를 유지한다는 가정 하에 임의 시간에서의 침투능을 Darcy의 법칙을 적용하여 다음의 식(2.32)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f = k_s \frac{(z_w + \Psi_f)}{z_w} = \frac{d(z_w \Delta\theta_i)}{dt} = \frac{dF}{dt} \quad (2.32)$$

침투능은 시간(t)이 증가할수록 감소하여 포화투수계수(k_s)값에 점차 수렴하게 된다. 이 때 누적 침투능은 상기 식(2.32)을 적분하여 식(2.33)과 같이 구할 수 있다.

$$F = z_w \Delta\theta_i = k_s t + \Delta\theta_i \Psi_f \ln\left(1 + \frac{F}{\Delta\theta_i \Psi_f}\right) \quad (2.33)$$

깊이 z_w 까지 지반을 포화시키기 위해 필요한 시간은 다음 식(2.34)와 같다.

$$T_w = \frac{\Delta\theta_i}{k_s} \left[z_w - \Psi_f \ln\left(\frac{\Psi_f + z_w}{\Psi_f}\right) \right] \quad (2.34)$$

여기서, T_w : 지반을 포화시키기 위해 필요한 강우지속시간(hr)

z_w : 습윤전선의 깊이(cm)

Ψ_f : 습윤전선의 흡인력(Wetting front suction, cm)

$\Delta\theta_i$: 포화 전, 후의 체적함수비 차

k_s : 포화투수계수(cm/hr)

Darcy법칙에 기초한 Green-Ampt모델은 간단하면서도 연직침투과정의 기본적인 특성을 잘 나타내며 모델 변수들은 측정 가능한 흙의 물리적인 특성 값들로 구성

되어 있다. 이 모델은 불포화 흐름을 고려한 보다 엄밀한 방법과 비교해도 매우 합리적인 예측결과를 주는 것으로 알려져 있다(Wallac, 1975).

2.2.2 습윤전선의 변화

강우시 지표면으로부터 침투가 발생되면 지반 내 포화 및 비포화 흐름으로 인해 그림 2.16과 같이 포화대의 변화과정을 경험하게 된다. 지반이 무한히 깊은 경우 지표면으로부터 포화영역(saturation zone)이 형성된다. 전이영역(transmission zone)은 함수비가 거의 일정한 크기로 존재하여 완전포화 상태는 아니지만 거의 완전포화에 가까운 영역이다. 강우로 인해 지표부근은 완전히 포화되어 포화도가 1.0에 접근하나 중력의 영향으로 깊이가 깊어짐에 따라 점차 감소하다가 일정깊이 이상에서는 일정한 포화도를 나타내며 습윤대(wetting zone)를 형성한다.

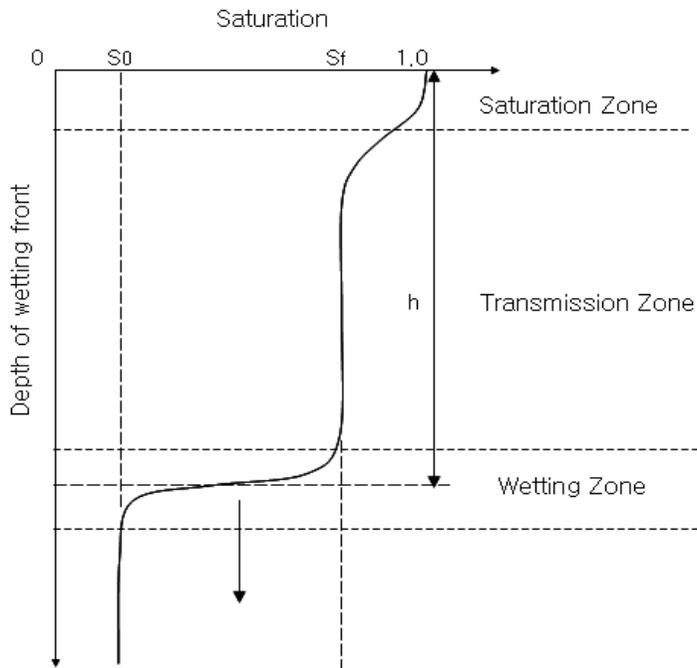


그림 2.16 강우시 습윤대의 형성

습윤대는 모관흡인력과 함수비의 사이에서 급작스런 변화가 있는 영역으로 이는 강우강도와 강우지속시간과 밀접한 관계를 갖고 있어, 습윤영역이 확대됨에 따라 지반의 모관흡인력이 상실되어 사면의 안정을 해치게 된다(Wallace, 1975; Freeze & Cherry, 1979). 습윤영역의 전면(前面)부분을 습윤전선(wetting front)이라 하는데, 강우가 계속됨에 따라 습윤전선이 지반내로 확산되고 이로 인해 부(-)의 간극수압은 급격히 감소하게 된다. 이때 지표면으로부터 습윤전선까지의 깊이를 ‘습윤전선의 깊이’라 한다.

강우시 습윤전선의 깊이를 예측하기 위한 방법으로는 Lumb(1962)에 의해 제안된 최소 침투능에 따른 침투깊이를 산정하는 방법과 Pradel & Radd(1993)에 의해 제안된 최대 침투능에 따른 습윤전선의 깊이를 산정하는 방법 등이 있다.

가. Lumb의 방법

Lumb(1975)는 홍콩의 강우를 분석하여 습윤전선의 깊이를 결정할 수 있는 간편식을 식(2.35)과 같이 제안한 바 있다.

$$z_w = \frac{kt}{n(S_f - S_0)} = \frac{kt}{\Delta\theta_i} \quad (2.35)$$

여기서, z_w : 습윤전선의 깊이	k : 토층의 투수계수
n : 간극률	S_0 : 초기 포화도
S_f : 최종 포화도	t : 강우 지속시간
$\Delta\theta_i$: 포화 전, 후의 체적함수비 차	

평평한 지표면에서 포화투수계수 값보다 큰 강우가 작용하면 포화된 지반의 침투율은 포화투수계수의 값과 같다고 볼 수 있다. 이때, 포화된 지반과 아래 부분의 불포화된 부분사이에 명확한 습윤전선을 가정하면 습윤전선의 깊이는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이때 지표에 작용하는 강우강도는 포화투수계수의 값 이상이어야

한다. 또한, Lumb의 방법은 연직방향의 흐름을 전제조건으로 하여 강우종료 후의 물의 흐름을 무시한 것이다. 일정한 값인 최소 침투율, 즉 포화투수계수에 의해 습윤대 깊이가 예측되기 때문에 직선 형태로 나타나고 시간(t)에 비례하는 양상을 보인다. 그러나 불포화상태의 실제지반에서 침투능은 초기조건과 강우강도에 따라 다르지만, 포화투수계수(k_s)보다는 항상 크고 한계 값인 포화투수계수(k_s)값으로 수렴하기까지 상당한 시간이 소요됨을 알 수 있다. 따라서 Lumb의 방법은 Pradel & Radd(1993)방법에 비해 적은 침투량과 얇은 습윤전선의 예측결과를 나타낸다. Lumb의 방법은 장기간의 강우로 지반이 거의 포화된 상태에서 포화투수계수(k_s)값보다 큰 강우가 작용하는 경우에 적용가능하나 강우강도를 고려하지는 못하는 한계를 가지고 있다.

나. Pradel & Radd의 방법

Pradel & Radd(1993)은 사면의 안정성 검토를 위하여 강우강도, 강우지속시간, 강우재현기간을 고려할 수 있는 방법을 Green-Ampt모형을 이용하여 제안하였다. 이 방법은 사면에서 습윤전선의 깊이(z_w)까지 포화되기 위해서는 다음과 같은 두 가지 조건이 만족되어야 한다. 첫 번째 조건은 강우가 지반의 침투능을 초과해야 하고, 둘째는 강우지속시간이 습윤전선의 깊이(z_w)까지 포화될 수 있도록 충분히 오래 동안 지속되어야 한다. 이 때, Green-Ampt모형로부터 지반을 z_w 까지 포화시키기 위해 필요한 시간은 식(2.34)와 같음을 알 수 있다. 이러한 조건들은 $T \geq T_w$ 와 $I \geq f$ 를 요구한다. 일정깊이(z_w)까지 포화되기 위해 식(2.36)과 식(2.37)의 최소조건을 만족해야한다. 여기서 T_{\min} 은 일정깊이(z_w)까지 포화되기 위한 최소의 강우지속시간이며, I_{\min} 은 최소의 강우지속시간(T_{\min})동안에 일정깊이(z_w)까지 포화시킬 수 있는 강우강도를 의미한다.

$$T_{\min} = T_w \quad (2.36)$$

$$I_{\min} = f = \frac{\Delta\theta_i}{T_{\min}} \left[z_w - \Psi_f \ln \left(\frac{\Psi_f + z_w}{\Psi_f} \right) \right] \left(\frac{z_w + \Psi_f}{z_w} \right) \quad (2.37)$$

앞에 언급한 강우강도와 지속시간을 산정할 때 유출과 증발산을 고려하지 않았으므로, 일정깊이(z_w)까지 포화시키는데 I_{min} 보다 더 큰 강우강도가 요구될 것이다. 포화에 대한 조건들은 그림 2.17의 그래프로 설명될 수 있다.

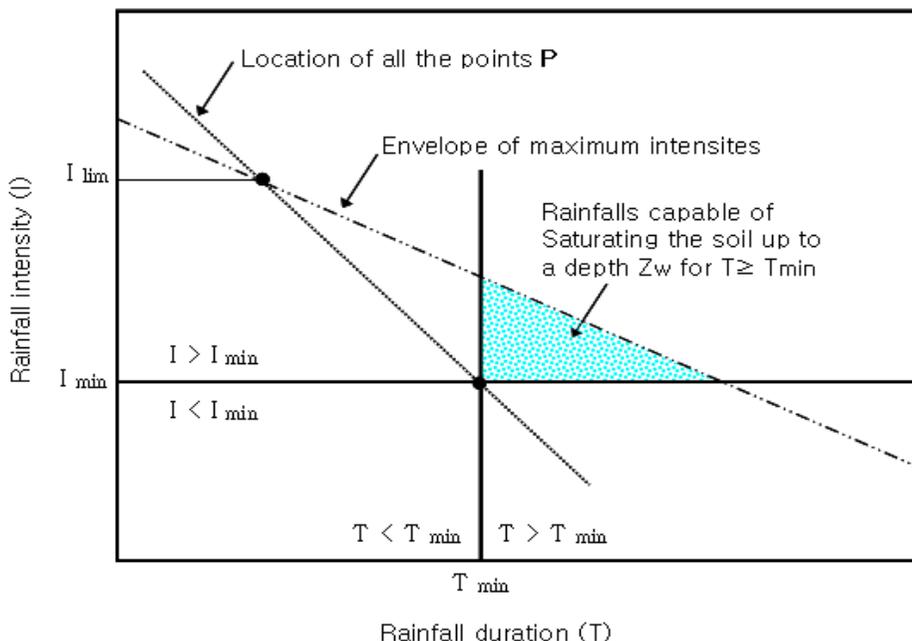


그림 2.17 포화조건외 강우강도와 지속시간

일정깊이(z_w)를 포화시키기 위한 최소의 강우지속시간과 그 시점의 강우강도 (T_{min}, I_{min})의 좌표를 P점이라고 가정하면 그림 2.17에서 포화되기 위한 조건들은 최대강우강도 포락선 위에 위치할 것이다. 그 위치는 비가 오지 않더라도 일정깊이(z_w)까지 포화 될 수 있을 것이다. 식(2.34)의 조건의 점과 최대강우강도 포락선은 그림 2.17에서와 같이 만나는 점에서 초기 강우강도(I_{lim})와 초기 한계투수계수(k_{lim})를 정할 수 있다. 즉, 한계투수계수는 최대 투수계수로 다음 식(2.38)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{lim} = I_{lim} \left(\frac{z_w}{z_w + \Psi_f} \right) = \frac{\Delta\theta_i}{T_{min}} \left[z_w - \Psi_f \cdot \ln \left(\frac{\Psi_f + z_w}{\Psi_f} \right) \right] \quad (2.38)$$

여기에서, k_{lim} 는 일정깊이(z_w)까지 포화할 수 있는 최대 투수계수이며, 앞에서 언급한 방정식들은 유출과 증발산에 대해 고려하지 않았으므로 k_{lim} 보다 큰 투수계수를 갖는 흙에서는 강우시 포화되지 않을 것이다.

식(2.38)은 일정깊이(z_w)까지 포화되기 위한 최소조건을 나타낸다. 그림 2.17에서와 같이 최대 강우강도의 선과 포화하기 위한 최소 조건의 선이 만나는 위치는 사면 토체에서 일정깊이(z_w)까지 포화시킬 수 있는 최소 강우시간을 정한다. 예를 들어, 체적함수비 변화량($\Delta\theta_i$)값을 알고 포화깊이(z_w)값을 가정한다면 어떤 흙에서 빈도기간을 고려해 강우가 지반을 일정깊이(z_w)까지 포화하기 위해 얼마만큼의 지속시간(T)을 유지해야 되는지 알 수 있다. 이 지속시간 동안에 해당하는 강우강도(I_{lim})와 초기 투수계수(k_{lim})를 예측할 수 있다.

Pradel & Radd(1993)법은 침투량이 강우강도의 크기에 영향을 받지 않고 습윤전선의 깊이가 발달하기 위한 시간도 강우강도의 크기에 독립적이다. 기 시행된 국내의 여러 연구에 의하면 일정한 범위 내에서 습윤 전면흡인력이 작을수록 습윤전선의 깊이가 깊어지고, 반대로 습윤 전면흡인력이 클수록 습윤전선의 깊이가 얕아지는 경향을 보인다고 한다(김재홍 등, 2004). 그리고 Pradel & Radd(1993)방법에 따라 풍화토의 습윤 전면흡인력을 계산한 결과 약 4kPa(=40cm)이하를 보인다고 발표한바 있다. Pradel & Radd(1993)의 습윤전선의 깊이 추정식은 대입되는 투수계수가 포화 투수계수임으로 불포화상태인 실제 지반에서와 뚜렷한 차이를 보인다. 특히, 강우강도와 강우지속시간의 관계에서 실제로 적용되는 값들을 비교할 때 수정식에 의한 습윤전선이 실제보다 과대 추정될 수 있음도 밝혀졌다.

2.3 불포화토의 침투해석

본 연구의 침투해석에 이용된 수치해석 프로그램인 GEO-SLOPE사의 SEEP/W는 포화토 및 불포화토에 대한 해석이 가능한 침투류 해석의 프로그램이며, 본 수치해석 프로그램에 사용된 함수와 지배방정식은 아래 기술한 바와 같다.

2.3.1 체적함수비 및 투수함수

일반적인 침투류 해석의 기본은 간극수압과 함수비의 관계를 이해하는 것이다. 간극수가 흙 속을 통과하여 흐를 때 간극수의 일부분은 흙에 잔류하게 된다. 흙 속에 억류되거나 혹은 저류된 간극수의 양은 간극수압과 흙 구조의 특성에 따라 달라진다. 침투류 해석에서는 저류된 간극수의 양을 전체 체적에 대한 간극수의 체적의 비로 정의하고 있다. 이와 같이 정의되는 체적의 비를 체적함수비라고 하며 식 (2.39)과 같이 정의된다.

$$\theta = \frac{V_w}{V} \tag{2.39}$$

여기서, θ : 체적함수비

V_w : 간극속에 있는 물의 체적

V : 전체 체적

체적함수비(Volumetric water content)는 간극수압에 따라 변화되며, 그림 2.18은 이러한 관계와 함수특성 함수(Soil-Water Characteristic Function)를 나타내고 있다.

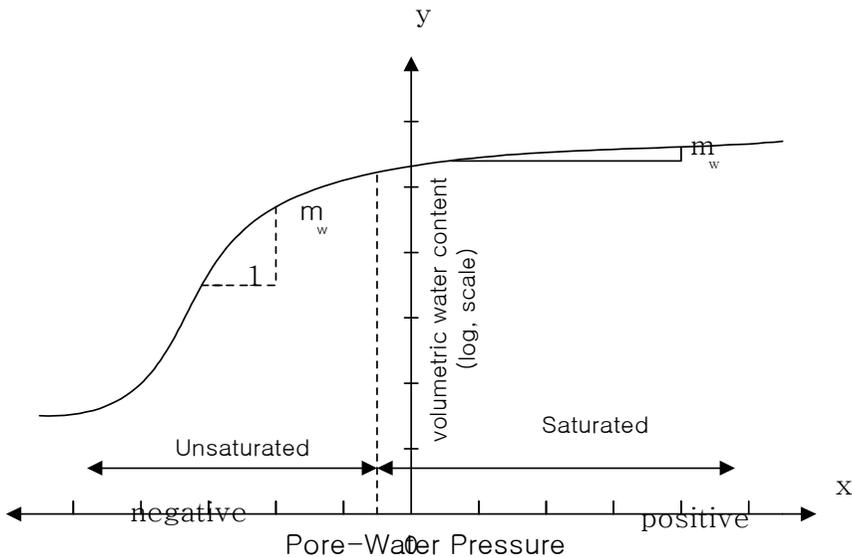


그림 2.18 체적함수비의 일반적인 분포형태

흙이 완전포화(Saturation) 되었을 경우 체적함수비는 흙의 간극과 동일하게 되며 전 체적에 대한 간극의 체적과 같아진다. 간극수압이 거의 0인 완전포화 된 흙에 외력이 일정한 경우, 간극수압이 양(+)의 값으로 커지게 되면 흙의 유효응력은 감소한다. 이러한 이유로 흙은 팽창되고 체적함수비는 증가하게 된다. 반대로 간극수압이 부(-)의 값으로 커지게 되면 흙은 불포화(Unsaturation)상태가 되며 체적함수비는 감소한다. 극단적으로, 흙이 완전히 건조되었을 경우 간극수압이 감소한다고 하여도 함수비는 더 이상 변화되지 않는다. 함수특성곡선의 기울기는 간극수압의 변화에 따른 함수비의 변화율을 나타내며 간극수압이 정(+)의 값이라면 m_w 는 압밀시험의 압축계수와 동일한 값을 나타낸다. 세립토의 함수특성곡선은 상대적으로 평평하지만, 조립토는 경사가 매우 급한 형태를 가진다.

그림 2.19는 모래질, 실트질, 점토질 토사의 체적함수비를 나타내고 있으며 그림에서 보는 바와 같이 체적함수비 곡선의 형태변화는 흙의 특성에 따라 변화됨을 알 수 있다.

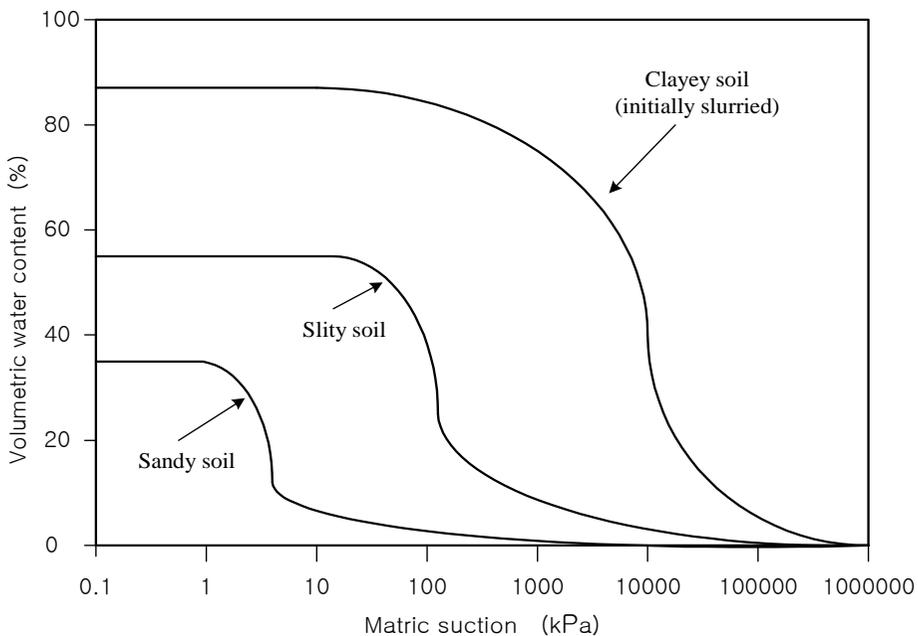


그림 2.19 모래질, 실트질, 점토질 토사의 체적함수비 분포형태

액체상태의 물은 간극사이에 생성된 유로를 따라 흐르며, 함수비가 감소할수록 간극수가 흐를 수 있는 유로가 줄어들기 때문에 간극수의 흐름은 점차 저하된다. 흙이 완전 건조상태가 되면 간극수의 유로는 사라져 버리지만, 반대로 흙이 완전 포화상태가 될 경우 모든 간극은 유로가 될 수 있으므로 간극수의 흐름은 최대가 된다. 간극수의 흐름은 투수계수로 표현될 수 있으며, 투수계수는 함수비에 따라 변화된다. 함수비는 간극수압의 함수이며, 투수계수는 함수비의 함수이므로 투수계수 또한 간극수압의 함수로 정의될 수 있다.

2.3.2 흐름법칙

본 연구에 이용된 SEEP/W는 포화토, 불포화토 침투류 해석에 Darcy의 법칙을 적용한다.

$$q = ki \tag{2.40}$$

여기서, q : 비 유량
 k : 투수계수
 i : 동수경사

Darcy의 법칙은 원래 포화토의 흐름을 대상으로 하였지만, 이 후의 연구결과에 의해 불포화토에서도 적용이 가능한 것으로 나타났다(Richards,1931; Childs & Collins-George, 1950). 불포화토의 흐름이 포화토의 흐름과 다른 것은 불포화토의 흐름에서는 함수비와 간극수압의 변화에 따라 투수계수가 변화된다는 것이다.

2.3.3 지배방정식

침투류 해석에 적용한 지배방정식은 다음과 같다. 식(2.41)은 체적함수비 변화시점에 한 요소에 들어오고 나가는 유량의 차이를 나타낸다. 정상류 조건하에서는 요

소로 들어오고 나가는 유량이 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (2.41)$$

여기서, H : 전수두

k_x : x 방향의 투수계수

Θ : 체적함수비

k_y : y방향의 투수계수

Q : 유량

t : 시간

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (2.42)$$

체적함수비는 응력상태와 흙의 특성에 따라 변화한다. 포화조건이나 불포화조건
의 응력상태는 두 개의 상태 변수로 표현할 수 있다. 이 응력상태변수는 $(\sigma - u_a)$,
 $(u_a - u_w)$ 이며, 여기서, σ 는 전응력, u_a 는 공기압, u_w 는 간극수압을 나타낸다.
SEEP/W에서는 지반의 응력은 일정하다고 가정한다. 즉 하중의 변화가 없는 상태
로 가정한다. 또한, 공기압은 대기압 하에서 계산과정 중 일정하다고 가정한다. 이
는 $(\sigma - u_a)$ 은 항상 일정하며, 체적함수비 변화에 영향을 미치지 않는다는 뜻이다.
체적함수비의 변화는 오직 $(u_a - u_w)$ 의 영향을 받으나 u_a 가 항상 일정하므로 체적함
수비의 변화는 오직 u_w 만의 함수이다. 체적함수비의 변화는 간극수압의 변화와 관
련이 있으며 다음 식(2.43)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\partial \Theta = m_w \partial u_w \quad (2.43)$$

여기서, m_w : 함수특성곡선의 기울기

전 수두는 다음 식(2.45)와 같이 정의된다.

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (2.45)$$

여기서, u_w : 간극수압

γ_w : 물의 단위중량

y : 위치

식(2.45)를 다시 정리하면 다음 식(2.46)과 같다.

$$u_w = (H - y) \cdot \gamma_w \quad (2.46)$$

$$\partial\Theta = m_w r_w \partial(H - y) \quad (2.47)$$

따라서, 식(2.43)은 다음 식(2.48)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial(H - y)}{\partial t} \quad (2.48)$$

결과적으로 본 프로그램의 지배방정식은 y 가 시간에 대하여 일정하다면 다음 식(2.49)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.49)$$

제3장 실내 모형 실험

3.1 강우재현 모형 실험 사례

강우재현 모형 실험을 통한 불포화 사면에 대한 연구는 1980년대에 외국(일본, 싱가포르)에서부터 실시된 후 최근 국·내외에서 연구가 계속해서 진행되어 오고 있다. 지금까지 국·내외에서 강우재현 모형 실험 장치를 통해 수행된 연구 사례들 중 대표적인 사례에 대해 간략히 기술하면 다음과 같다.

3.1.1 국외 사례

최근에 국내와 마찬가지로 일본과 싱가포르 등 국외에서 강우재현 장치를 이용한 불포화 토에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 일본에서는 대표적으로 Miyazaki(1988)와 Meiketsu(1999)에 의해 많은 연구가 진행되어 왔으며, 싱가포르에서는 Rahardjo (1994)에 의해 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 각 실내 모형 실험에 사용된 실험 장치 및 연구 결과를 간략히 정리하면, 다음 표 3.1~3.3의 내용과 같다.

표 3.1 강우재현 모형 실험 국외 사례(Miyazaki)

연구자	실험 장치 구성 및 특징	연구 결과
Miyazaki (1988)	① 토조 규격(w×h×l) · 50×30×120cm ② 계측기 · 간극수압계(6EA) · 지표 변위계(1EA) · 지중 변형률계(2EA) ③ 특징 · 해사사용($k = 10^{-2} \text{cm/sec}$) · 강우강도 100mm/hr로 재현 · 토조 하단에만 계측기 설치 · 사면의 표층 붕괴를 연구대상	① 사질토사면의 표층 붕괴 발생 시기 예측은 지표 변위, 지중 변형률계에 의해 실시하는 것은 무리, 급격히 변화하는 정(+)의 간극수압을 이용하면 가능성이 있음 ② 사면 내 간극수압 변화를 관측한 결과 무(無)강우일수가 증가하면 모관흡인력도 증가하고, 강우시에는 모관흡인력의 저하가 명확하게 나타남. ③ 표층부에서 큰 모관흡인력을 나타내고, 심도가 깊어질수록 작은 모관흡인력을 나타냄

표 3.2 강우재현 모형실험 국외사례(Rahardjo)

연구자	실험장치 구성 및 특징	연구결과
Rahardjo (1994)	<ul style="list-style-type: none"> ① 토조규격(w×h×l) <ul style="list-style-type: none"> · 40×200×245cm · 아크릴판 제작 ② 계측기 <ul style="list-style-type: none"> · TDR(21EA) · Tensiometer(25EA) ③ 특징 <ul style="list-style-type: none"> · 투수계수가 다른 모래 2종류 사용 ($k = 10^{-2}, 10^{-4} \text{cm/sec}$) · 토조 상부에 세립질 모래, 하부에는 조립질 모래로 구성 · 강우강도 3~30mm/hr로 재현 · 불포화토의 이력거동을 연구대상 	<ul style="list-style-type: none"> ① 불포화토의 습윤과정과 건조과정의 이력거동은 모관흡인력과 체적함수비에 영향을 미치는 것을 모형실험으로 증명함 ② 불포화토의 이력거동은 모관흡수력에 미치는 영향이 체적함수비에 미치는 영향보다 매우 크게 나타남

표 3.3 강우재현 모형실험 국외사례(Meiketsu)

연구자	실험장치 구성 및 특징	연구결과
Meiketsu (1999)	<ul style="list-style-type: none"> ① 토조규격(w×h×l) <ul style="list-style-type: none"> · 30×30×140cm · 아크릴판 제작 ② 계측기 <ul style="list-style-type: none"> · 간극수압계(7EA) · manometer(6EA) ③ 특징 <ul style="list-style-type: none"> · 마사토, 사구모래 사용 ($k = 10^{-2} \text{cm/sec}$) · 토조 하단에만 계측기 설치 · 강우강도 10~300mm/hr로 재현 (강우실 조성, 스프링클러 이용) · 사면의 표층 붕괴를 연구대상 	<ul style="list-style-type: none"> ① 강우에 의한 사면의 표층붕괴는 사면표면으로부터 물이 침투하면 사면과 평행한 습윤전선(wetting front)이 형성되고, 기반암면에 평행한 방향으로 침투류가 발생함 ② 기반암부에서 간극수압의 상승으로 인하여 기반암부와 표토층의 경계면을 따라 활동하는 사면붕괴가 발생한다는 것을 실험으로 증명함

표 3.1~3.3에 제시한 강우재현 모형실험을 통한 연구사례와 본 연구를 위해 실시한 강우재현 모형실험을 비교하면 다음과 같다.

먼저 Rahardjo(1994)의 실내모형실험에서 사용한 계측기는 유사하며, 데이터로거(data logger)에 연결하여 자동계측이 가능하도록 한 것도 유사하다. 그러나 모형토조의 크기와 계측의 위치와 수가 다르며 또한, 실험대상토의 조건이 본 연구에서는 화강암질 풍화토(8.50×10^{-4} cm/s)의 단일토층의 사면하부 무한 배수조건인데 반해, Rahardjo의 연구는 하부에 조립질 모래를 포설하고 상부에 세립질 모래를 포설하여 배수가 용이하도록 하는 차이점이 있다.

다음으로 Miyazaki(1988)와 Meiketsu(1999)의 실내모형실험과 비교하면, 실험장치 유사하나 토조의 하단에만 계측기를 설치한 Meiketsu의 모형실험과 달리, 본 연구에서는 모형사면의 길이방향(상부, 중부, 하부), 사면의 표면에서 깊이방향(상단, 중단, 하단)으로 분할하여 사면의 전단면에 계측기를 매설하였다. 토층의 체적함수비를 측정할 수 있는 함수량계(Time-Domain Reflectometer, TDR) 6개, 간극수압을 측정할 수 있는 tensiometer 9개를 설치함으로써 사면전체에 대한 체적함수비 변화와 간극수압 변화 양상을 파악할 수 있도록 하였다. Miyazaki와 Meiketsu의 모형실험은 모두 포화투수계수 10^{-2} cm/s 정도의 사질토를 실험대상토로 사용한 반면, 본 연구에서는 국내에 널리 분포하는 화강암질 풍화토(8.50×10^{-4} cm/s)로 실험을 실시하였다. 특히, 일본에서 실시된 두 모형실험을 통한 연구는 사면파괴에 연구주안점을 두고 있으며, 불포화토의 가장 큰 특성인자인 부(-)의 간극수압 변화에 대한 세부적인 결과나 분석보다는 강우에 의한 정(+)의 간극수압의 증가에 따른 사면 표층 붕괴를 주로 다루고 있다. 그러나 본 연구에서는 불포화토의 특성인자인 부(-)의 간극수압특성을 파악하기 위해 체적함수비와 모관흡인력에 주안점 두는 것이 큰 차이점이다.

3.1.2 국내사례

국외와 마찬가지로 국내에서도 강우재현 모형실험을 통한 연구가 1980년대부터 시작되어, 최근에는 모형실험을 통한 불포화토의 연구가 활발하게 이루어지고 있

다. 대표적으로 김영목(1989)과 김홍택 등(2001)에 의해 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 각 실내모형실험에 사용된 실험장치 및 연구결과를 간략히 정리하면 다음 표 3.4~3.5의 내용과 같다.

표 3.4 강우재현 모형실험 국내사례(김영목)

연구자	실험장치 구성 및 특징	연구결과
김영목 (1989)	<ul style="list-style-type: none"> ① 토조규격(w×h×l) <ul style="list-style-type: none"> · 20×50×150cm · 아크릴판 제작 ② 계측기 <ul style="list-style-type: none"> · Piezometer · 모관흡인력 계측 tip(10EA) ③ 특징 <ul style="list-style-type: none"> · 모래, 풍화토 사용 ($k = 10^{-2}, 10^{-4}, 10^{-5} \text{ cm/sec}$) · 부(-)의 간극수압 측정을 위한 자체 개발 모관흡인력 계측 tip 이용 · 강우강도 5~100mm/hr로 재현 (강우재현 박스에서 분배) · 한계강우강도에 연구의 주안점을 둠 	<ul style="list-style-type: none"> ① 침윤전선의 이동은 강우크기에 영향을 받는데, 한계가 되는 강우의 크기는 포화투수계수의 약 4~5배 정도임을 실험 및 수치해석으로 제시 ② 강우가 계속되는 동안 포화영역은 주로 불투수 경계면으로부터 형성되어 상승하고, 유출은 한계강우 이상의 강우에서는 거의 일정한 성향을 보임 ③ 간극수압은 작은 강우에서는 서서히 증가하나, 한계강우 이상의 호우에서는 갑자기 증가하는 양상을 보임

표 3.5 강우재현 모형실험 국내사례(김홍택)

연구자	실험장치 구성 및 특징	연구결과
김홍택 (2001)	<ul style="list-style-type: none"> ① 토조규격(w×h×l) <ul style="list-style-type: none"> · 20×30×100cm · 아크릴판 제작 ② 계측기 <ul style="list-style-type: none"> · 간극수압 측정에 유공 cell(8EA) ③ 특징 <ul style="list-style-type: none"> · 화강풍화토와 표준사를 1대 1 배합 ($k = 10^{-4} \text{ cm/sec}$) · 토조 하단에만 계측기 설치 · 강우강도 50~150mm/hr로 재현 · 조건에 따른 간극수압변화 관계와 간극수압비에 주안점을 둠 	<ul style="list-style-type: none"> ① 강우강도가 증가할수록 최대 간극수압을 나타내는 사면경사가 점차 급해지는 경향을 보임 ② 강우강도가 증가할수록 간극수압비가 점차 증가하는 양상을 보임

표 3.4와 표 3.5의 국내에서 수행된 강우재현 모형실험 연구와 본 연구에서 수행한 강우재현 모형실험을 비교하면 다음과 같다.

먼저 김영목(1989)의 실내모형실험에서는 자체개발한 부(-)의 간극수압 계측 tip을 사용하여 한계를 드러냈으나, 본 연구에서 수행한 강우재현 모형실험에서는 공식적으로 신뢰성을 인정받은 tensiometer를 이용하여 데이터로거(data logger)에 연결하여 자동계측이 가능하도록 하였다. 또한, 모형토조의 크기가 다르며, 실험대상토가 본 연구에서는 화강풍화토($8.50 \times 10^{-4} \text{cm/s}$)의 단일 토층인데 반해 김영목(1989)의 연구에서는 포화투수계수가 10^{-2} , 10^{-4} , 10^{-5}cm/sec 의 모래와 풍화토를 사용하였다.

다음으로 본 연구에서 사용한 실험장치는 김홍택(2001)의 실험장치와 유사하나 토조 하단에만 정(+)의 간극수압을 측정할 수 있는 유공 cell를 설치한 김홍택(2001)의 모형실험과 달리 모형사면을 길이방향(상부, 중부, 하부), 사면 표면에서 깊이방향(상단, 중단, 하단)으로 분할하여 토층의 체적함수비를 측정할 수 있는 함수량계(TDR) 6개, 정(+)과 부(-)의 간극수압을 측정할 수 있는 tensiometer 9개를 설치함으로써 사면전체에 대한 체적함수비 변화와 간극수압 변화 양상을 파악할 수 있도록 하였다. 또한, 본 연구에서는 실험대상토는 국내에 널리 분포하는 포화투수계가 $8.50 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 인 화강암질 풍화토로 하였으나 김홍택(1999)의 실험대상토는 화강암질 풍화토와 표준사를 1:1로 섞은 10^{-4}cm/s 정도의 혼합토를 만들어 수행하였다.

특히, 위의 두 연구는 간극수압계를 모형사면 전반적으로 분포시키지 않아 강우강도에 따른 시간과 사면경사에 따른 간극수압의 변화관계의 결과만을 얻는 제한적인 연구였다. 그러나 본 연구에서는 불포화토의 특성인자인 부(-)의 간극수압특성을 파악하기 위해 모형사면을 길이 및 깊이 방향에 따라 분포시켜 체적함수비와 모관흡인력을 측정하는 것이 큰 차이점이다.

3.2 강우재현 모형실험 계획

3.2.1 고려할 영향인자

가. 무한사면 붕괴시 강우 및 사면의 기하학적 인자

지난 30년간의 우리나라의 산사태 기록을 분석한 결과, 대규모(동일 지역에서 20개소 이상 발생하는 규모) 붕괴의 경우 최대 시간강우강도가 35mm/hr를 초과하고, 2일간의 누적강우량이 140mm를 초과할 경우 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 24시간 내에 200mm 이상의 강우가 지속되거나, 강우가 하루이상 지속되면서 시간당 평균 강우량이 10mm/hr 이상일 경우에 산사태가 발생할 위험이 큰 것으로 나타났다(홍원표 등, 1990).

그림 3.1은 산사태 발생지점에서 경사각에 따른 산사태의 발생빈도와 전체 길이에 대한 평균경사를 나타낸 것이다(산림청, 2002년).

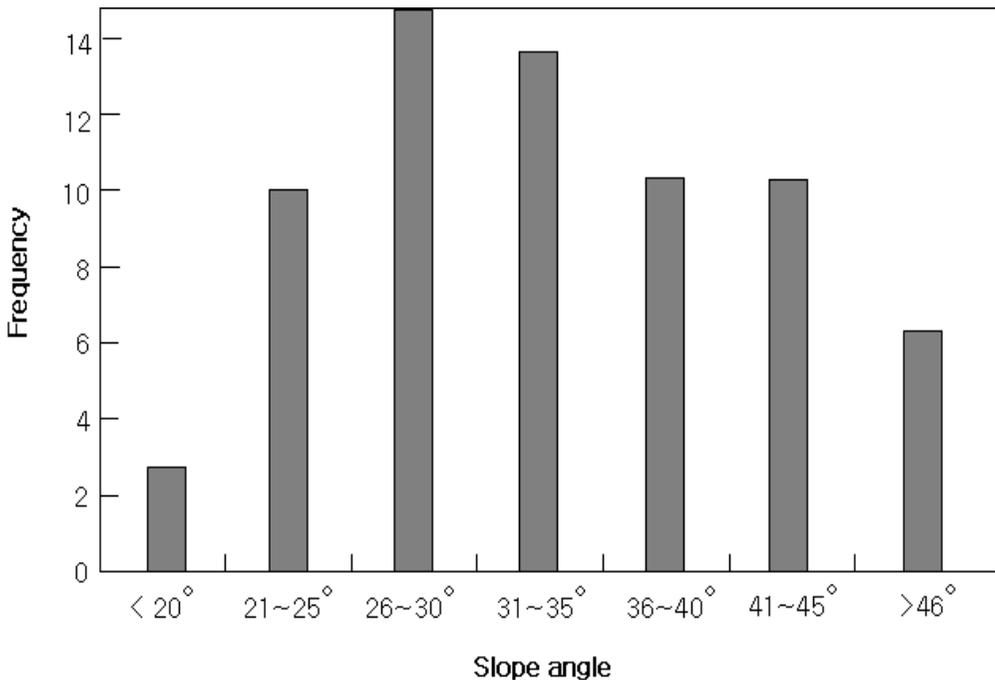


그림 3.1 산사태 발생지점의 사면경사

사면의 경사각을 기준으로 볼 때 산사태가 가장 많이 발생한 지역의 경사는 26~30°(1:2.0~1:1.7)이며 이 범위에서 전체 산사태의 32%가 일어난다. 다음으로 31~35°(1:1.7~1:1.5)의 범위에서 많이 일어나는 것으로 나타났다. 산사태 발생 지점에서 경사각이 20° 이하인 경우에는 산사태가 거의 발생하지 않으며, 사면 경사각이 20° 이상일 경우 산사태 발생이 급격히 증가함을 보여준다. 반면 경사각이 30° 보다 커지면 서서히 감소하는 경향을 보이고 있다. 산사태의 전체 길이에 대한 평균 경사와 산사태 발생 빈도를 비교하여도 유사한 경향을 보이고 있어 결국 30°(1:1.7)전후의 경사면에서 산사태가 가장 빈번히 일어남을 알 수 있다.

나. 실내모형실험에 고려할 영향인자의 결정

선행된 여러 연구들로부터 실험 시 고려할 영향인자는 강우강도, 강우지속시간, 선행강우, 포화투수계수, 함수특성곡선, 토사의 저류능력, 지반응력, 토사의 이질성, 초기 지하수위, 사면의 기하학적 특성 등임이 알려졌다(홍원표 등, 1990; 조성은 등, 2000; Tsaparas 등, 2002; Tami 등, 2004). 위에서 열거한 영향인자에 따라 강우 시 사면의 간극수압 분포가 변화되나 사면 설계단계에서 이러한 영향인자를 모두 고려하는 것은 많은 시간의 소요와 경제적인 측면에서 현실적으로 불가능하다.

따라서, 본 연구에서는 강우시 사면의 간극수압에 영향을 주는 대표적 인자로 강우조건(강우강도, 강우지속시간, 선행강우)과 지반의 함수특성조건(포화투수계수, 함수특성, 저류능력) 그리고 기타조건(지반응력, 토사의 이질성, 사면경사)을 큰 부류로 선정하였다. 선정된 영향인자들을 각각의 조건에 따라 변화시키며 침투류 해석을 수행하여 불포화 풍화토사면의 간극수압 분포에 보다 큰 영향을 미치는 강우강도, 사면경사, 강우지속시간을 강우재현 모형실험 영향인자로 선정하였다.

다음으로 지반상태에 따라 모형사면을 제작한 후 선정된 영향인자들의 조건을 달리하여 강우재현 모형실험을 실시하고, 모형사면 내에 설치된 계측기(TDR, Tensiometer)를 통해 체적함수비와 간극수압의 변화관계를 측정하여 불포화토의 함수특성 및 침투거동특성을 규명하고자 한다.

3.2.2 강우재현 실험계획

선행 연구자들이 제시한 실험에 영향을 미치는 영향인자들을 감안하여 설계단계에서 고려가 가능한 강우조건, 지반의 함수특성 및 함수조건, 사면의 기하학적 조건을 영향인자의 큰 부류로 선정하였다. 선정된 영향인자들의 조건에 따른 강우재현 실험계획을 수립하였고 그 내용을 정리하면 다음 표 3.6과 같다.

표 3.6 영향인자들의 조건에 따른 강우재현 모형실험

영향인자	모형실험(Model Test)			
	MT-1	MT-2	MT-3	MT-4
강우강도(mm/hr)	15	30	15	30
지속/방치시간(hr)	16/24	16/24	16/24	8/32
사면경사	1 : 2.0	1 : 2.0	1 : 1.5	1 : 2.0

실험계획에 의해 실시된 강우재현에 앞서 24시간 이상 노건조된 시료에 물을 적당량 섞어 함수비를 9~11% 정도에 맞추고, 사면 모형토조에 넣어 사각다짐대(12×20cm)를 활용하여 기준단위중량에 맞게 다짐을 실시하였다. 다짐이 완료된 모형사면을 24시간이상 그대로 실온에서 방치하여 정상상태에 도달되도록 구현하였다.

강우재현 모형실험은 표 3.6에 제시한 바와 같이, 다양한 간극수압 변화의 요인 중 설계단계에서 고려가 가능하고 비교적 큰 영향을 미치는 영향인자인 강우강도와 강우지속시간, 사면경사의 조건을 달리하여 강우재현 모형실험을 실시하였다. 또한, 강우지속과 방치시간은 실 강우자료와 수치해석을 통한 영향의 범위를 검토하여 40시간으로 결정하여 강우재현 모형실험에 적용하였다.

첫 번째로 강우강도의 변화에 따른 사면내의 체적함수비와 간극수압의 변화관계를 검토하기 위해, 사면경사와 강우지속시간은 동일조건(사면경사, 1:2.0; 강우지속시간, 16hr)으로 하고 강우강도를 15mm/hr(MT-1)와 30mm/hr(MT-2)로 달리하여

실험을 실시하였다. 여기서 강우강도는, 기존연구를 바탕으로 무한사면 붕괴의 위험성이 큰 누적강우량의 범위를 시간당 강우강도로 산정한 결과와 화강암질 풍화토의 포화투수계수를 환산하여 불포화토의 특성을 고려할 수 있는 30mm/hr의 이하의 강우강도를 결정하였다.

두 번째로 사면경사의 변화에 따른 사면내의 체적함수비와 간극수압의 변화관계를 검토하기 위해, 강우강도와 강우지속시간은 동일조건(강우강도, 15mm/hr; 강우지속시간, 16hr)으로 하고 사면경사를 1:2.0(MT-1)과 1:1.5(MT-3)로 달리하여 실험을 실시하였다. 여기서 사면경사는, 기존연구에서 무한사면의 붕괴가 가장 많이 발생한 사면경사 1:2.0~1:1.5의 범위에서 결정하였다.

세 번째로 강우지속시간의 변화에 따른 사면내의 체적함수비와 간극수압의 변화관계를 검토하기 위해, 강우강도와 사면경사는 동일조건(강우강도, 30mm/hr; 사면경사, 1:2.0)으로 하고 강우지속시간을 16hr(MT-2; 지속시간, 16hr; 방치시간, 24hr)과 8hr(MT-4; 지속시간, 8hr; 방치시간, 32hr)로 달리하여 실험을 실시하였다. 여기서 강우지속시간은, 무한사면 붕괴의 위험성이 큰 24시간 내에 200mm이상의 강우가 지속되는 경우와 MT-2에서 습윤과정실험시 정상상태에 도달하는 시간을 고려하여 16hr(방치시간; 24hr)과 8hr(방치시간; 32hr)으로 결정하였다.

특히, 실험에 적용된 강우강도는 불포화토의 거동특성을 검토할 수 있도록 대상 화강암질 풍화토의 포화투수계수를 고려하여 결정하였다. 대상 화강암질 풍화토의 포화투수계수 $8.50 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 를 환산하면 31mm/hr로 이보다 작은 값인 15mm/hr와 30mm/hr에 오차범위 $\pm 1 \text{ mm/hr}$ 고려한 값을 채택하여 불포화토의 함수특성 및 거동특성을 검토하는데 적용하였다.

3.3 대상 화강암질 풍화토의 특성

3.3.1 대상 화강암질 풍화토의 물리·역학적 특성

본 연구에 사용된 실험대상 토사는 우리나라 전역에 걸쳐 표토의 대부분을 차지하고 있는 화강암질 풍화토의 일종을 선정하여 활용하였다. 대상 화강암질 풍화토는 2004년 강우침투로 인한 무한사면의 붕괴가 발생된 토사로 전라남도 담양에서 채취하였다. 대상 화강암질 풍화토의 물리·역학적 특성파악을 위해 비중시험, 입도분석, 다짐시험, 삼축압축시험 등을 실시하였으며 또한, 포화투수계수를 구하기 위해 실내투수시험도 실시하였다.

실험결과를 보면 비중은 2.61로 일반적인 화강암질 풍화토의 비중을 나타내었으며 최적함수비는 11.40%, 최대건조밀도는 $1.92g/cm^3$ 를 나타냈다. 또한 입도시험결과 0.075mm체 통과율($P_{\#200}$)이 10% 정도로 비교적 세립분의 함량이 적고, 모래성분을 많이 함유한 통일분류법(USCS)상 입도분포가 양호한 모래(SW)로 나타났으며 포화투수계수는 $8.50 \times 10^{-6} m/sec$ 로 나타났다. 대상 화강암질 풍화토의 입도분포곡선과 물리·역학적 특성은 그림 3.2와 표 3.7에 나타낸 바와 같다.

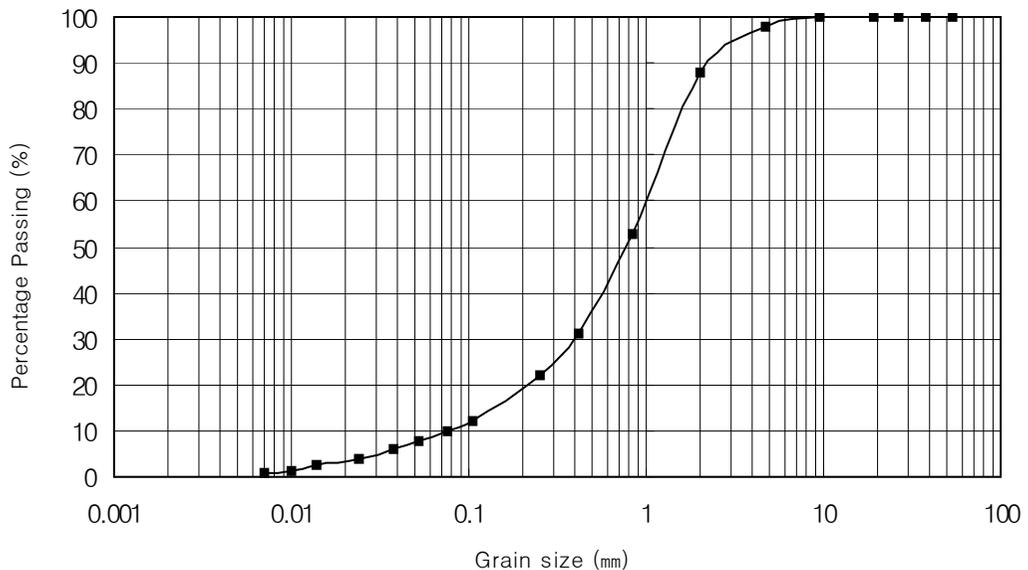


그림 3.2 대상 화강암질 풍화토의 입도분포곡선

표 3.7 대상 화강암질 풍화토의 물성시험 결과

구 분		화강암질 풍화토
비중(Gs)		2.61
애터버그 한계시험	액성한계(LL, %)	-
	소성한계(PL, %)	-
	소성지수(PI, %)	NP
다짐시험	최적함수비(OMC, %)	11.40
	최대건조단위밀도(γ_{dmax} , g/cm ³)	1.92
입도분석	균등계수(C _u)	13.33
	곡률계수(C _g)	2.13
	10% 통과입경(D ₁₀ , mm)	0.075
	30% 통과입경(D ₃₀ , mm)	0.40
	60% 통과입경(D ₆₀ , mm)	1.00
	0.075mm체 통과율(P _{#200} , %)	10.00
투수계수(K, m/sec)		8.50×10 ⁻⁶
삼축압축 시험	점착력(C, kg/cm ²)	0.21
	포화점착력(C _{sat} , kg/cm ²)	0.02
	내부마찰각(ϕ , °)	22.5
	포화내부마찰각(ϕ_{sat} , °)	8.0
통일분류법(U.S.C.S)		SW

3.3.2 대상 화강암질 풍화토의 불포화 함수특성곡선

실내모형실험과 함수특성곡선실험을 수행하기 전에, 화강암질 풍화토의 물리적 실험결과와 입도분포 실험결과를 쏘일 비전(Soil-Vision) 프로그램에 입력하여 추정식에 의한 건조과정의 함수특성곡선을 얻었다. 본 연구에서는 대표적으로 Fredlund & Wilson의 추정법, Arya & Paris의 추정법에 의한 함수특성곡선을 추정하였으며, 그 결과 함수특성곡선을 그림 3.3에 나타내었다.

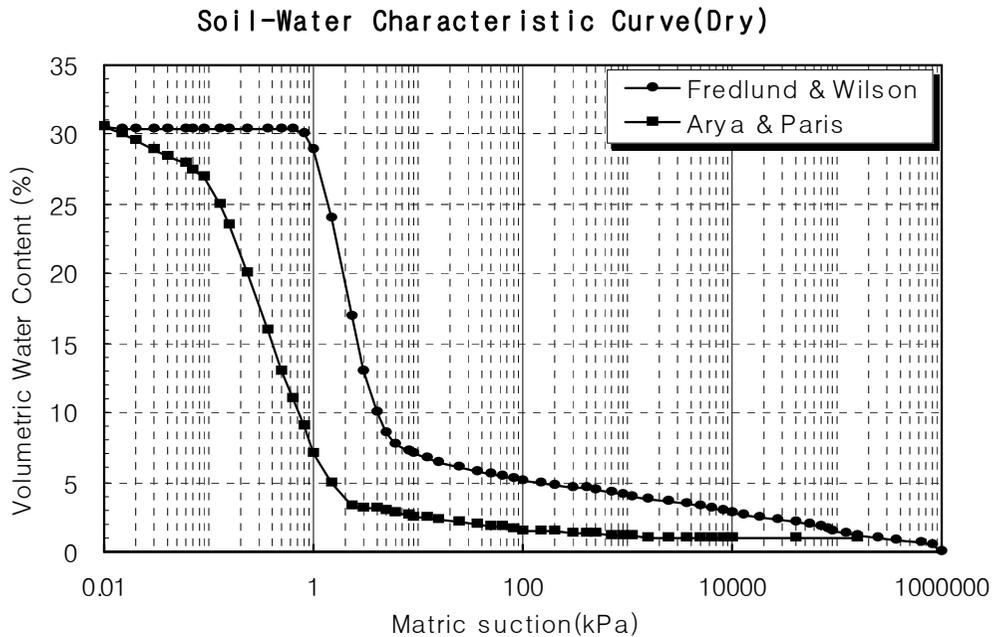


그림 3.3 입도분포를 이용한 추정 함수특성곡선

Fredlund & Wilson의 추정법, Arya & Paris의 추정법을 사용하여 불포화 특성값을 산정한 결과 포화 체적함수비는 각각 30.5%, 30.2% 정도로 유사하게 나타났다. 포화된 지반에 처음으로 공기가 간극으로 유입되는 시점의 모관흡인력인 공기 함유압(AEV)은 Fredlund & Wilson의 추정법에서는 0.96kPa, Arya & Paris의 추

정법에서는 0.10kPa로 다소 차이가 나타났다. 일반적인 함수특성곡선의 형태와 유사하게 지반의 고유 특성값인 공기함입값(AEV)을 초과하기 전까지는 간극 밖으로 물이 유출되지 않으며, 공기함입값을 초과하면 모관흡인력의 증가에 따라 상대적으로 많은 간극수의 유출로 체적함수비가 급격히 감소하는 형태로 나타났다.

Fredlund & Wilson의 추정법의 경우 모관흡인력의 증가에 따른 더 이상의 체적함수비 변화가 없는 잔류영역이 명확하게 구분되지는 않았지만, 대략 모관흡인력이 70kPa 정도에서 잔류체적함수비 4.5% 정도, Arya & Paris의 추정법은 모관흡인력 35kPa 정도에서 잔류체적함수비는 1.5% 정도로 산정되었다.

표 3.8 입도분포를 이용한 함수특성곡선의 추정(건조과정)

구 분		추정법	
		Fredlund & Wilson	Arya & Paris
공기함입값(AEV)	Θ (%)	30.50	30.20
	ψ (kPa)	0.96	0.10
잔류량	Θ_r (%)	4.50	1.50
	ψ_r (kPa)	70.00	35.00
최대경사(Max. Slope)		1.86	0.97

3.4 강우재현 모형실험

3.4.1 실험장치

강우재현 모형실험은 그림 3.4와 같은 실험장치를 제작하여 실시하였다. 실험장치는 크게 모형사면을 축조할 수 있는 모형토조와 강우강도에 따라 인공강우를 재현할 수 있는 강우재현장치, 그리고 토사의 상태와 사면의 경사를 재현할 수 있는 강사장치 및 경사조절장치, 간극수압과 함수량을 측정할 수 있는 계측기로 구성되어 있다. 그림 3.4는 강우재현장치의 개략적인 모식도를 나타낸 것이다.

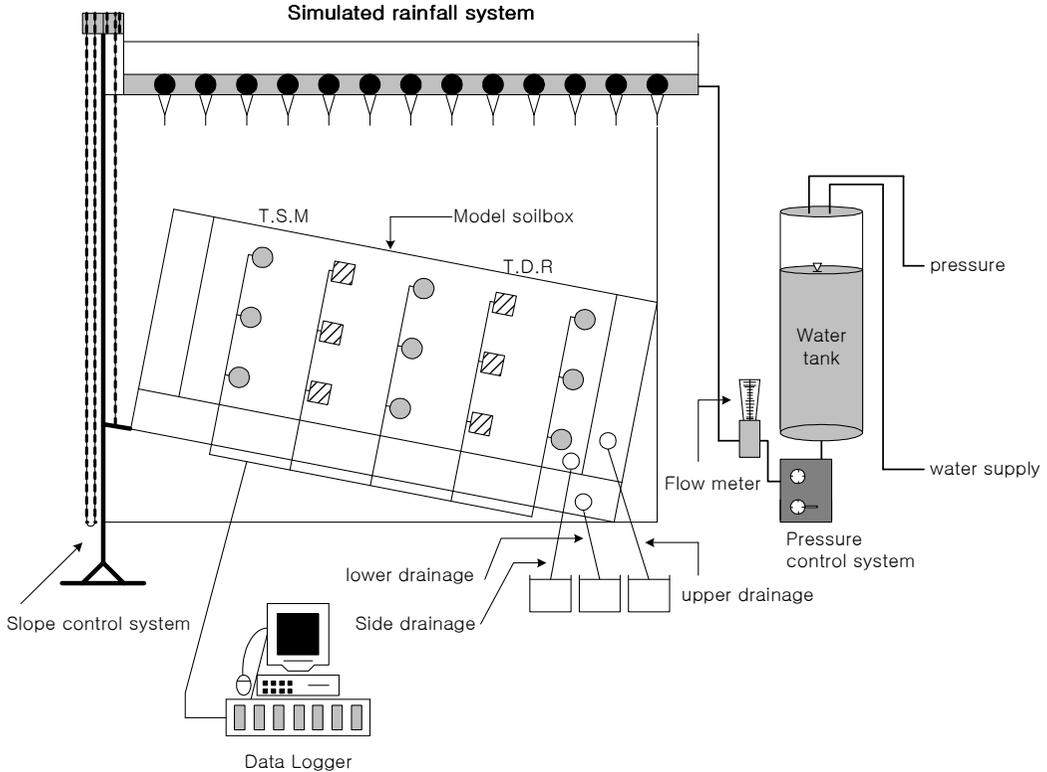


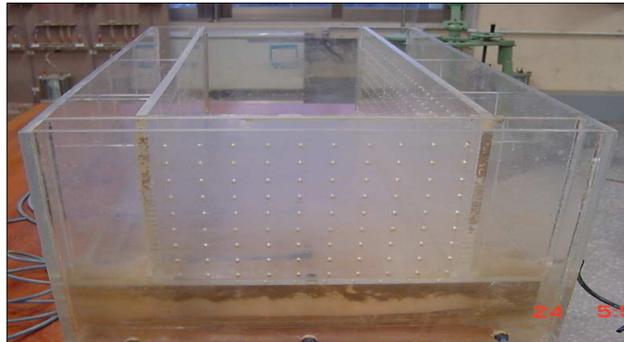
그림 3.4 강우재현 모형실험장치 모식도

모형사면(폭×깊이×길이=30×30×100cm)은 화강암질 풍화토의 단일토층으로 사면하부로 배수가 가능하게 구성하였다. 유량계에서 강우강도를 고정하면 공기압에 의해 해당 유량만큼 물이 저수조를 통해 강우재현장치로 이동, 인공강우를 재현하게 된다. 모형사면의 길이방향(상부, 중부, 하부), 사면의 표면에서 깊이방향(상단, 중단, 하단)에 설치된 tensiometer를 통해 강우에 의해 발생하는 간극수압이 측정되고, 모형사면의 길이방향(상부, 하부), 사면의 표면에서 깊이방향(상단, 중단, 하단)에 설치된 함수량계(TDR)를 통해 체적함수비가 측정된다. 압력변환기는 각각의 tensiometer와 함수량계(TDR)에 연결되어 측정값이 연속하여 계측이 가능하도록 데이터로거(data logger)에 연결, 컴퓨터로 실시간 계측이 가능하도록 구성하였다. 또한, 모형토조에서 유출량을 측정하기 위해 전면, 측면, 하면에 유출량 탱크를 설치하여 수동으로 측정하였다.

가. 모형토조

모형토조는 모형사면(폭×깊이×길이=30×30×100cm)을 모사할 수 있도록 두께 1.0~1.5cm의 투명한 아크릴 재질로 제작하여 실험 중 토조의 내부를 육안으로 관찰할 수 있도록 하였다. 또한, 모형토조 좌측 하단부에 경사조절장치를 두어 경사를 조절할 수 있게 제작하였다.

모형토조의 저면에 토사의 유실을 막고 배수가 가능하도록 부직포를 설치하였다. 또한, 모형토조의 전면과 하단부에 지름 0.3cm의 구멍을 2.5cm 간격으로 뚫어 강우에 따른 유출량과 사면 내 연직방향 및 경사방향의 침투유량을 6개의 유출밸브를 통해 측정할 수 있도록 제작하였다. 그리고 토조의 측면에 구멍을 뚫어 계측기를 거치할 수 있도록 하였다. 다음의 그림 3.5와 3.6은 본 연구를 위해 제작된 모형토조의 실물과 상세도를 나타낸 것이다.

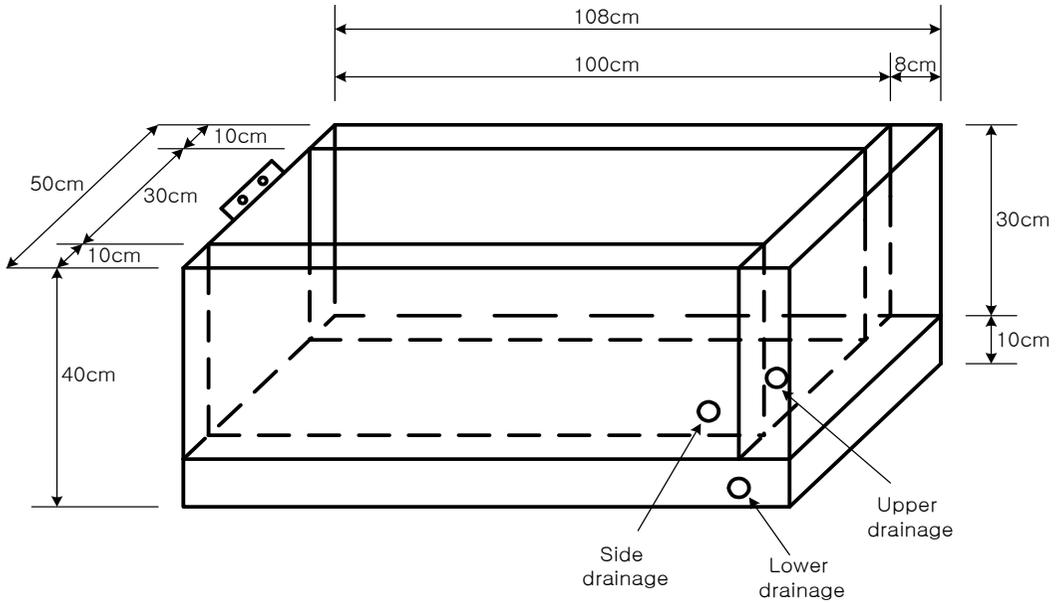


(a) 모형토조

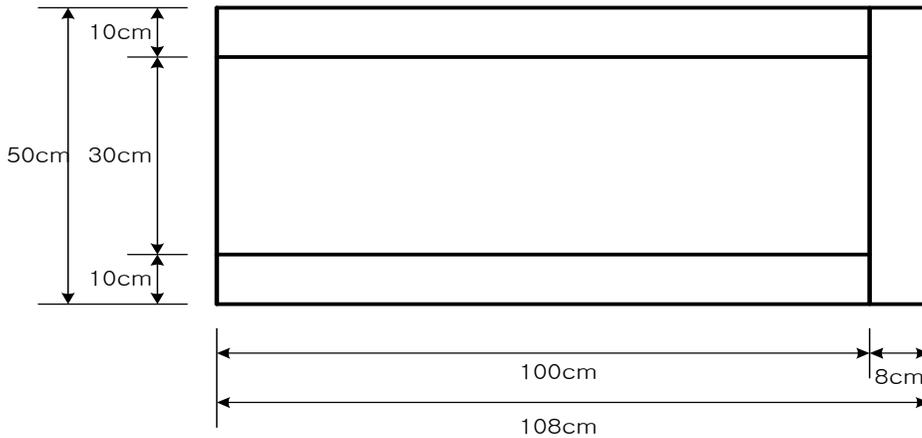


(b) 모형사면

그림 3.5 모형토조와 모형사면



(a) 입체 상세도



(b) 평면도

그림 3.6 모형토조의 상세도

나. 강우재현장치

강우재현장치는 크게 강우조절장치와 저수조, 강우핀과 수관밸브로 구성되어 있다. 수관은 폭 80cm, 길이 130cm에 총 15개의 강재로 제작되어 있으며 각 수관에

내경 20 μm 인 강우핀을 일정간격으로 10개씩 총 150개(폭:10EA×길이:15EA)를 설치하였다. 강우조절장치는 다양한 강우강도를 재현할 수 있도록 제작되었으며, 강우 저수조로부터 유량계를 통과한 강우는 수관을 거쳐 강우핀으로 분사되어 사면에 재현하게 된다. 또한, 사면경사에 따라 재현할 강우범위를 모형사면의 크기에 맞추기 위해 각 수관마다 밸브를 설치하여 강우가 재현되는 지점에만 강우를 공급할 수 있도록 하였다. 이와 더불어 강우재현장치에 상하조절장치를 설치하여 사면경사에 따라 높이를 조절할 수 있도록 제작하였다.

그림 3.7은 본 연구에 사용된 강우재현장치를 나타낸 것이다.



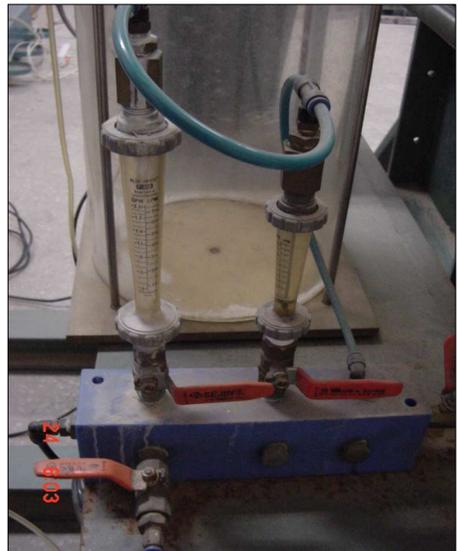
(a) 수관밸브



(b) 강우핀



(c) 강우조절장치 및 저수조



(d) 유량계

그림 3.7 강우재현장치

강우량을 보내는 저수조(지름×높이=30×100cm)는 두께 1cm의 투명한 아크릴 재질의 원통으로 제작하였으며, 저수조의 상부에는 급수를 위한 밸브, 하부에는 강우를 재현하기 위한 밸브를 설치하였다. 밸브의 개폐를 통해 수조 내의 수위를 조절할 수 있으며, 강우재현 시 고르게 강우를 재현하기 위해 공기압을 통해 강우강도를 조절할 수 있도록 제작하였다. 저수조에서 공급된 물을 강우재현장치에 보내기 전에 강우재현장치가 일정한 강우강도를 재현할 수 있도록 유량계를 설치하였다. 유량계는 일정한 유량을 강우재현장치에 보내게 되고 강우재현장치는 그 유량을 그대로 사면에 공급하게 되어 있다. 재현된 강우의 검증을 위해 토조의 저면을 이중으로 제작하여 강우를 받아 검측할 수 있도록 하였으며, 검측결과 오차는 $\pm 0.85\text{mm/hr}$ 범위 내에 나타나는 것으로 확인하였다.

다. 강사장치와 경사조절장치

토조 내 다짐도를 균등하게 맞추기 위해, 높이를 조절하면서 토사를 포설하는 강사장치를 제작하여 다짐대와 병행하여 활용하였다. 그리고 사면의 경사조절을 위해 경사조절장치를 제작하였다.

다음의 그림 3.8은 강사장치와 경사조절장치를 나타낸 것이다.



(a) 강사장치



(b) 경사조절장치

그림 3.8 강사장치 및 경사조절장치

라. 함수량 및 간극수압 계측기

(1) 함수량계(Time-Domain Reflectometer, TDR)

TDR은 물과 흙의 큰 유전율 차를 이용하도록 개발된 것이다. TDR은 전기적 불연속성을 지닌 물체로부터 전자기파(electromagnetic wave)의 이동시간(travel time)을 측정하는 것이다. 그림 3.9는 본 논문에 사용된 TDR방식의 함수량계 AQUA-TEL-TDR로, 설치와 사용이 매우 간단하며 토양의 형태, 재질 또는 성분에 관계없이 매우 안정적이고 신뢰할 수 있게 체적함수비를 계측할 수 있는 제품이다. AQUA-TEL-TDR은 직경 1.9cm의 원형의 단봉 형태이며, 총길이 68cm 중 수감부의 길이는 약 30~45cm의 평균수분을 측정할 수 있다.

수분함량 0~100%에 선형비례 대응하므로 데이터로거에서도 사용이 용이하며, TDR을 수직, 수평, 대각선으로 설치가 가능하다. 또한, 설치한 방향에 대해 설치된 길이의 평균 수분함량을 측정할 수 있는 장점이 있다.



(a) AQUA-TEL-TDR



(b) 수평설치

그림 3.9 AQUA-TEL-TDR 함수량계

일반적으로 TDR방식 함수량계는 흙의 종류, 다짐도, 온도 등에 의해 많은 오차가 발생하기 때문에 이에 대한 보정실험이 필요한 실정이나, 본 연구에 사용된 AQUA-TEL-TDR의 경우 별도의 보정시험이 필요 없이 신뢰성 있는 계측이 가능하다. 그러나 본 연구에서는 정확한 계측을 위해 온도와 다짐도에 따라 예비검측을 통해 계측값의 신뢰성을 미리 검증하였다. 그 결과 계측값을 바로 활용해도 비교적

안정적인 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

(2) Tensiometer

Tensiometer는 흙 속의 부(-)의 간극수압(negative pore-water pressure)을 측정하는 장치로 높은 공기함입값을 갖는 가느다란 튜브로 연결된 다공질 세라믹 컵으로 구성되어 있다. 흙 속으로 삽입한 tensiometer tube안에 있는 물을 흙이 빨아들임으로써 다공질 세라믹 컵 내에서 평형을 이루어 부(-)의 간극수압을 측정한다.

일반적으로 간극공기압은 대기압상태로 간주되기 때문에 측정값은 수치적으로 모관흡인력이 된다. 만약, 간극공기압이 대기압보다 크면 tensiometer 측정치에 주변의 간극공기압을 더해야 한다. 결국, 측정된 모관흡인력은 세라믹컵의 공기함입값을 초과하지 못한다.

본 연구에서 사용한 tensiometer는 Soil moisture사에서 자동로깅이 가능하도록 개발한 일반 tensiometer와 달리 세라믹이 실린더 끝이 아닌, 작은 튜브의 끝단에 장착되어 있는 small-tip타입으로, 현장계측보다는 실내실험에 보다 용이하게 사용할 수 있도록 한 계측기다. Tensiometer는 내부에서 물의 공동현상이 일어날 수 있기 때문에 측정할 수 있는 모관흡인력 범위는 최대 100kPa로 비교적 낮다. 튜브는 부식되지 않고 열전도율이 낮은 플라스틱으로 만들어졌으며 물 저장용기에서 튜브와 세라믹으로 물이 공급되는 체계로 되어 있다. Tensiometer의 설치 이전에 계측기와 세라믹의 포화가 먼저 이루어져야 하고, 진공펌프를 이용하여 계측기내의 공기를 제거하여야 한다. 데이터로거에 연결하여 간극수압의 변화를 계측한 결과, 즉각적인 계측이 가능하다.

3.4.2 실험방법

본 연구에서는 강우재현 모형실험을 실험조건 별로 다음의 제시한 순서에 따라 반복 실시하였다.

그림 3.12는 실시된 강우재현 모형실험의 전반적인 과정을 나타낸 것이다.

가. 실험조건에 따른 모형사면 재현 및 계측기 설치

토사유출을 방지하기 위해 모형토조 저면에 부직포를 설치하고, 화강암질 풍화토는 시험 전 미리 건조로에서 24시간 이상 건조시켰다. 건조된 시료에 함수비를 9~11% 정도로 제조한 후 강사장치를 통해 3층으로 나누어 모형토조에 평행하게 단계별로 포설하였다. 또한, 다짐도를 조절하기 위해 대상 시료의 무게를 잰 후, 사각다짐대(12×20cm)로 다짐을 실시하여 모형사면을 재현하였다.

모형사면을 길이방향(상부, 중부, 하부)과 깊이방향(상단, 중단, 하단)으로 구분하고, TDR과 Tensiometer, 토압계를 흙과의 밀착성을 좋게 하기 위하여 포설 중에 설치하였다. TDR은 모형사면의 길이방향(상부, 하부)과 깊이방향(상단, 중단, 하단)으로 구분하여 6개를 설치하였고, Tensiometer는 길이방향(상부, 중부, 하부)과 깊이방향(상단, 중단, 하단)에 9개를 설치하였다.

TDR과 Tensiometer의 상세 설치위치는 다음의 그림 3.10과 그림 3.11에 제시하였으며, 계측기 종류와 모형사면의 설치위치에 따라 구분하여 나타내었다.

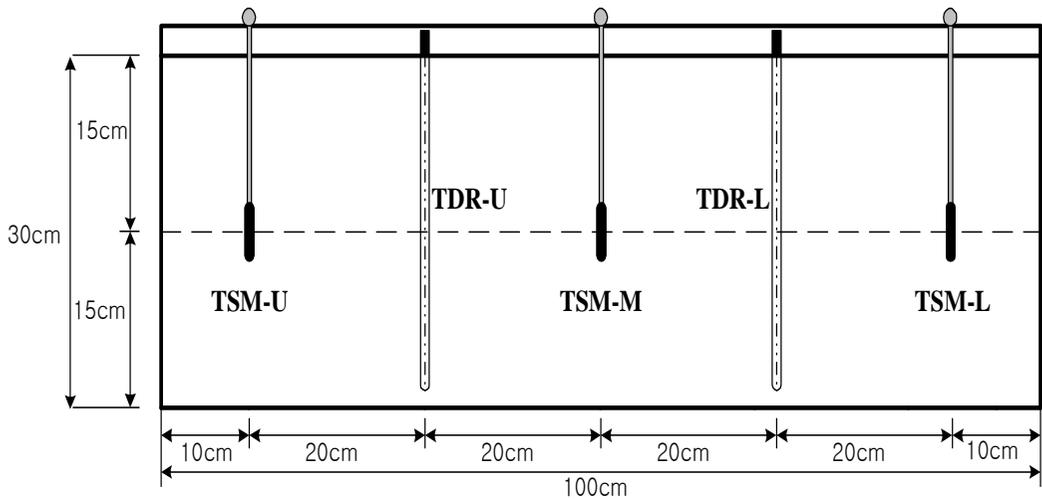


그림 3.10 Tensiometer와 TDR의 계측기 설치평면도

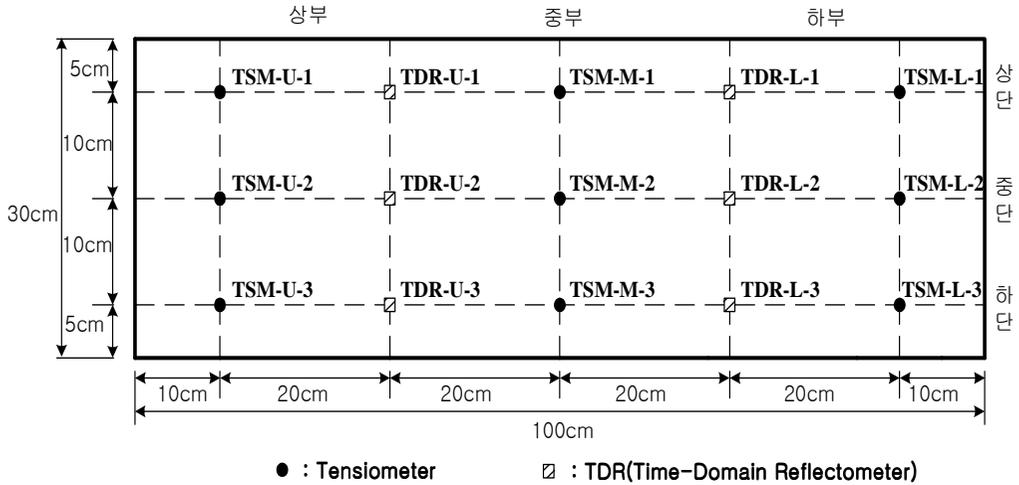


그림 3.11 Tensiometer와 TDR의 계측기 설치단면도

나. 경사조절과 정상상태

계측시스템 설치가 완료된 후, 실험계획에 따라 모형사면의 경사에 이르도록 경사조절장치를 이용하여 사면경사를 조절한다. 그 후 바로 인공강우를 재현하지 않고, 오랜 시간(24시간 이상) 동안 방치하여 계측치의 변화가 거의 없는 정상상태 (steady-state)를 구현하였다.

다. 강우재현

유량계를 조절하여 본 연구에 계획된 소정의 강우강도로 계획된 지속시간 동안 강우를 재현하였다. 강우재현 중에 사면이 불포화상태에서 점차적으로 습윤상태에 이르도록 하여 체적함수비와 모관흡인력의 계측을 실시하였다.

라. 방치

계획된 강우지속시간 동안 강우재현으로 습윤상태에 있는 화강암질 풍화토 사면을 계획된 방치시간 동안 유지시키면서 체적함수비와 모관흡인력의 계측을 실시하였다.



(a) 부직포 설치



(b) 강사장치로 토사 채움



(c) 1차 토사 포설



(d) 다지기



(e) 계측기 설치



(f) 모형사면 축조 완성



(g) 경사조절



(h) 강우재현 준비



(i) 강우재현



(j) 실시간 계측



(k) 습윤진행과정



(l) 강우종료 후 방치

그림 3.12 강우재현 모형실험 수행과정

3.5 함수특성곡선실험

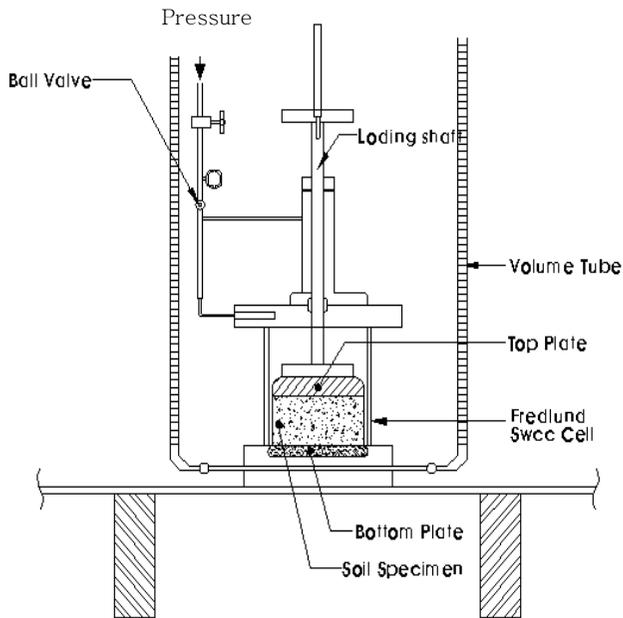
3.5.1 실험장치

불포화토의 간극에는 공기와 물이 존재하며, 간극에 물의 양이 많아질수록 흡인력은 줄어들고 간극속의 물이 빠져나갈수록 흡인력은 커지게 된다. 이러한 원리로 흙 입자와 물, 공기간의 에너지 평형이 이루어지게 되는데, 이와 같은 에너지 평형 원리를 활용하여 함수특성곡선을 산정하는 대표적인 방법이 SWCC Cell 장치 실험이다. 본 논문에서 사용한 SWCC Cell 장치는 Fredlund & Xing(1994)의 이론을 이용하여 Fredlund가 직접 고안한 토질의 함수특성곡선을 얻는 장비이다. 직경 75mm의 몰드에 다진 시료를 미리 포화시킨 다음, 공기압을 주어 공기압이 간극수를 밀어내는 원리로 함수비와 흡인력을 조절하는 것이다. 흙의 모관흡인력으로 인하여 유입구로부터 물이 흡수될 때 물의 유입량을 측정함으로써 체적함수비를 알 수 있고, 유입된 물의 양만큼 유출을 시키는데 필요한 가압 로드에서 가해지는 힘이 이때의 흡인력이 된다.

그림 3.13은 SWCC Cell 장치를 나타낸 것으로 압력을 제어하기 위한 패널부(pannel part)와 시료를 구속하는 셀부(cell part)로 크게 나뉘고 각각의 명칭은 그림 3.13(a)의 모식도에 나타나 있다.

본 장치는 흡인력에 따라 변화하는 함수량을 측정하기 위해 동일한 직경과 높이의 부피 측정관(volume tube)이 양쪽에 하나씩 설치되어 있는데, 이는 셀에서 빠져나온 물과 공기압의 에너지 평형을 육안으로 확인하기 위해서다. 가압 후 두개의 부피 측정관의 수위가 더 이상 변화가 없을 때에 평형조건을 판단하여 값을 측정하여야 한다.

기존의 압력판(pressure plate)장치는 시료 당 하나의 point만을 산정함으로써 함수특성곡선을 구하기가 매우 번거롭고 비효율적이었다. 그러나 본 논문에 사용한 장치는 하나의 시료로 여러 단계의 흡인력을 산정할 수 있고, 넓은 압력제어 범위로 다양한 종류의 시료에 대한 실험이 가능하다는 장점이 있다.



(a) 모식도



(b) 시험기

그림 3.13 함수특성곡선실험(SWCC Cell Test) 장치

3.5.2 실험방법

불포화토의 함수특성곡선을 구하기 위한 SWCC Cell 실험방법을 정리하면 다음과 같다. 함수특성곡선 중 건조과정을 재현한 SWCC Cell 실험은 가압을 단계별로 증가시키면서 상승하는 부피 측정관의 수위를 읽는 것이고, 습윤과정을 재현한 SWCC Cell 실험은 반대로 압력을 빼면서 하강하는 부피 측정관의 수위를 읽는 것이다.

다음 그림 3.14는 SWCC Cell 실험의 전반적인 진행과정을 나타낸 것이다.

가. 시료 준비

시료의 부피를 측정하기 위해 몰드(cutting ring)와 세라믹스톤의 무게를 측정하

고, 다짐시험을 통해 얻은 소정의 다짐도로 몰드 안에 시료를 다져 넣는다. 몰드를 세라믹 스톤의 정중앙에 위치시킨 후 24시간 동안 물속에 넣어 시료를 포화시킨다. 포화가 완료되면, 몰드와 세라믹 스톤의 무게를 측정한다.

나. 실험장치의 설정(Setting)

부피 측정관에 연결된 두개의 tube 끝을 각각 바닥판(bottom plate)에 연결시키고, 수밀성 향상을 위해 바닥판에 물을 약간 넣고 각각의 부피 측정관(volume tube)의 끝 부분에 있는 밸브를 개방한다. 바닥판의 홈에 맞춰 세라믹 스톤과 몰드를 눌러 밀착시키면, 바닥판에 넣었던 물이 누르는 압력에 의해 체적 측정관을 따라 올라가고, 양쪽 체적 측정관의 수위가 서로 수평이 되도록 맞춘다. Cell wall, disk ring retainer, top plate를 차례로 조립한다.

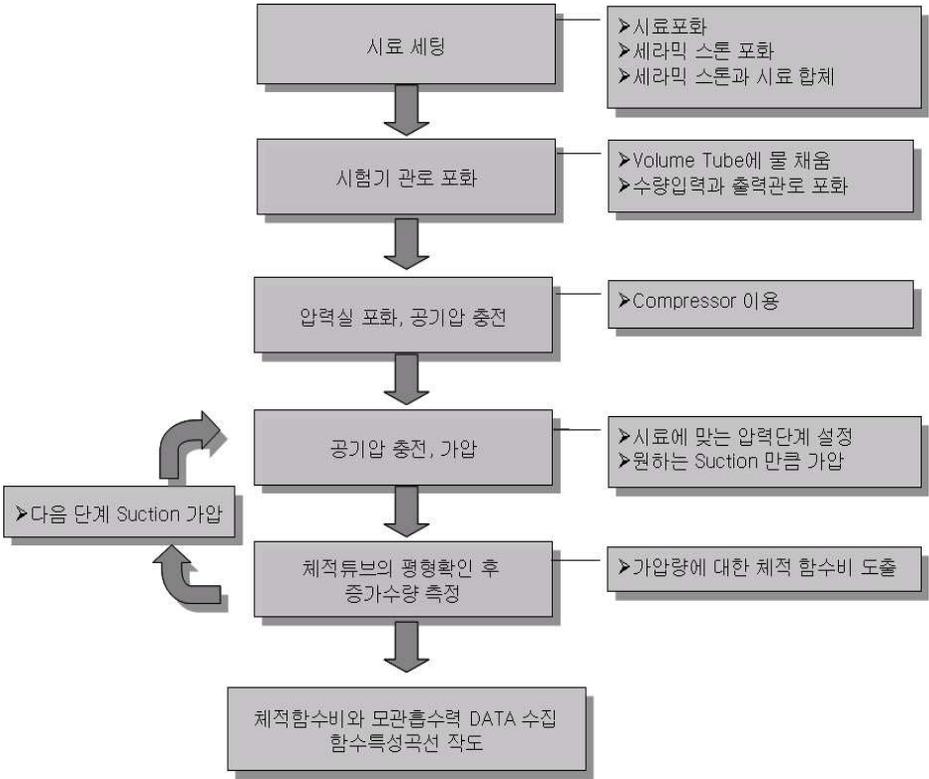


그림 3.14 함수특성곡선실험(SWCC Cell Test) 순서

다. 본 실험 실시

압력게이지(gauge)를 조절하여, air pressure tube를 통해 압력을 가한다. 이 때 압력에 의해 상승하는 부피 측정관의 수위를 읽는데, 일반적으로 가압하여 24시간이 경과된 후, 양쪽 부피 측정관의 수위변화가 없는 정상상태가 될 때 읽어야 한다.

제4장 모형실험에 의한 침투해석

4.1 강우재현 모형실험의 결과

모든 시험결과는 모형사면 내에 길이방향(상부, 중부, 하부), 깊이방향(상단, 중단, 하단)에 설치된 TDR과 Tensiometer의 계측결과로부터 체적함수비와 모관흡인력의 분포를 살펴보았다. 또한, 불포화 화강암질 풍화토의 이력현상을 검토하고자 실시한 습윤과정(강우재현)실험과 건조과정(방치)실험으로 구분하여 결과를 정리·분석하였다. 그리고 체적함수비와 모관흡인력을 모형사면의 길이방향(상부, 중부, 하부)으로 구분하여 지속시간과 모형사면의 깊이에 따른 변화양상의 관계를 나타내었다.

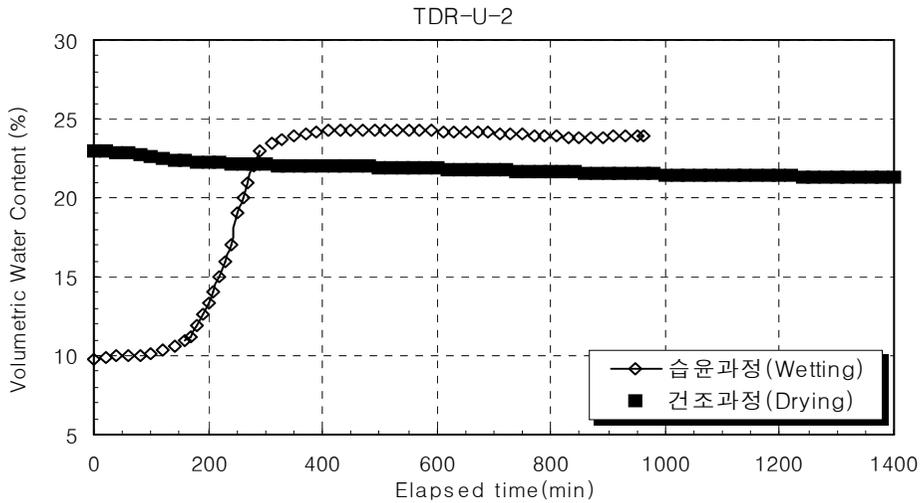
4.1.1 체적함수비와 모관흡인력의 정상상태

계측값을 통한 불포화토의 특성값을 결정하기 위해 계측값의 증가와 감소가 더 이상 발생되지 않는 한계값의 정의가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 계측된 체적함수비, 모관흡인력, 유출량 등의 변화가 거의 없는 상태를 정상상태로 간주한다.

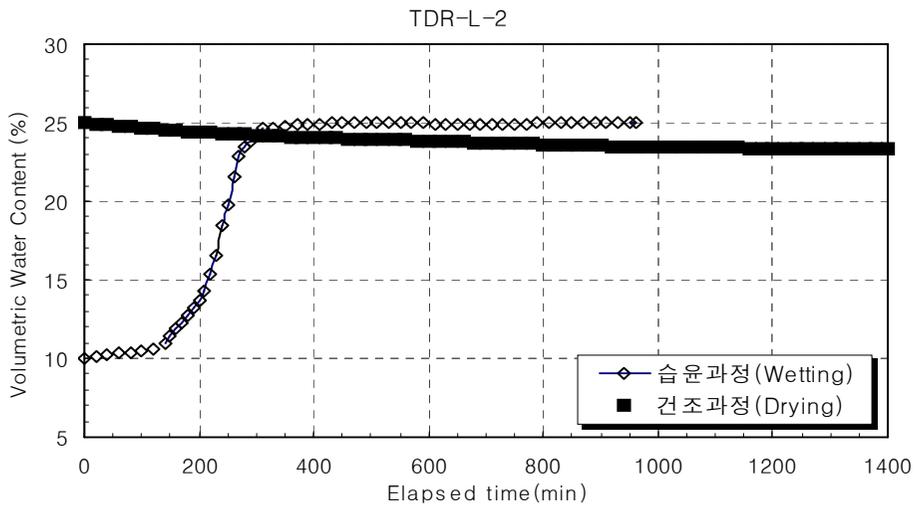
먼저 그림 4.1~4.4는 본 연구를 위해 실시된 모형실험에서 얻은 TDR의 계측결과 중, 대표적으로 사면의 상·하부에서 중단(TDR-U-2, TDR-L-2)깊이의 체적함수비가 시간의 경과에 따라 정상상태에 도달하는 과정을 나타낸 것이다.

습윤과정실험에서의 시간경과에 따른 체적함수비를 살펴보면, 강우재현 후 시간경과에 따라 계속 증가경향을 보이다가 증가폭이 점점 줄어들고 결국에 시간이 경과하더라도 더 이상 체적함수비의 변화가 없는 정상상태에 도달하게 된다. 이와 반대로 건조과정실험에서는 습윤과정의 정상상태 체적함수비에서 시작하여 시간경과에 따라 감소되나, 그 폭이 점점 줄어들고 한계시간을 지나서는 더 이상 체적함수비의 변화가 없는 정상상태를 보인다. 또한, 습윤과정실험에서의 체적함수비는 일

정시간이 경과된 후 급속히 증가하여 정상상태에 도달하는 양상을 볼 수 있다. 이와 반면, 건조과정실험에서의 체적함수비는 강우 종료 후 초기부터 감소하기 시작하나 그 변화양상은 정상상태에 도달될 때까지 천천히 변화되는 것을 볼 수 있다.



(a) 모형사면의 상부, 중단깊이

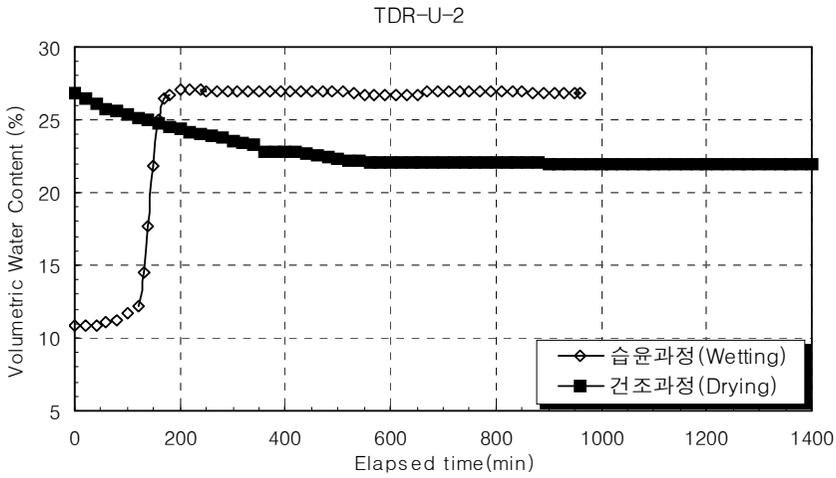


(b) 모형사면의 하부, 중단깊이

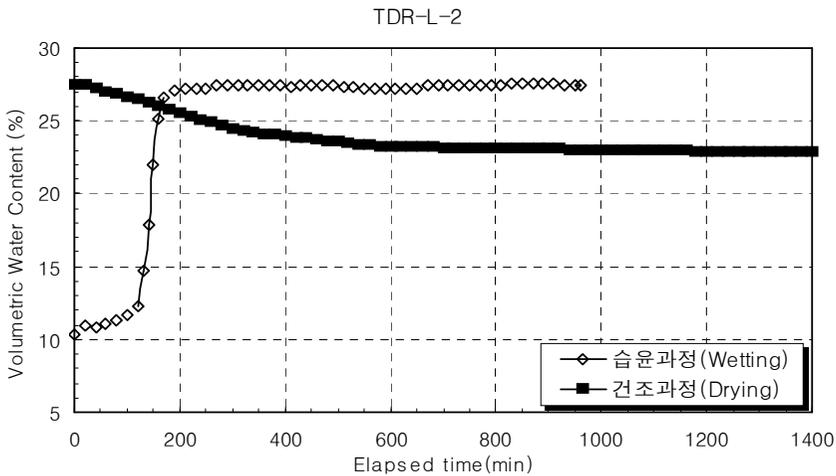
그림 4.1 체적함수비의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-1)

그림 4.1은 MT-1(강우강도15mm/hr, 강우지속/방치시간 16/24시간, 사면경사 1:2.0)의 실험시 사면 상·하부의 중단깊이에서 정상상태 도달과정을 나타낸 것이다.

습윤과정에서는 강우발생 후 6~7시간이 경과되면 체적함수비 24~25%로 정상상태를 유지하였으며, 건조과정에서는 강우종료 후 17~20시간이 경과되면 체적함수비가 21.5~23%로 감소되어 정상상태에 도달하였다.



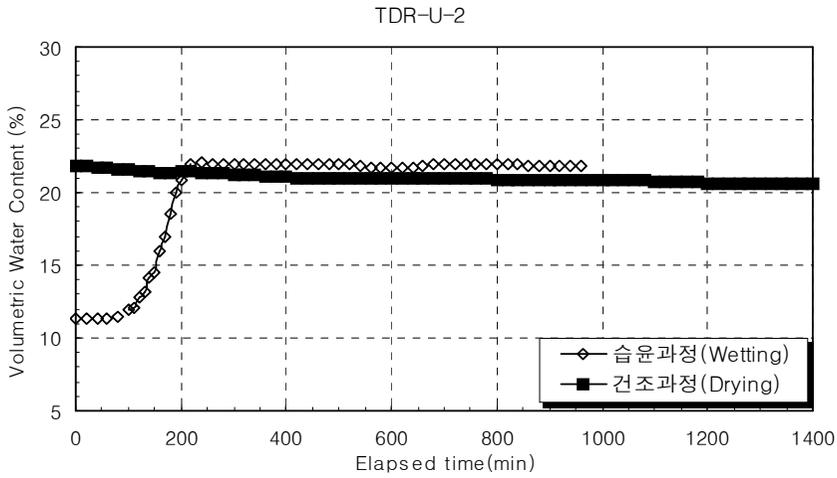
(a) 모형사면의 상부, 중단깊이



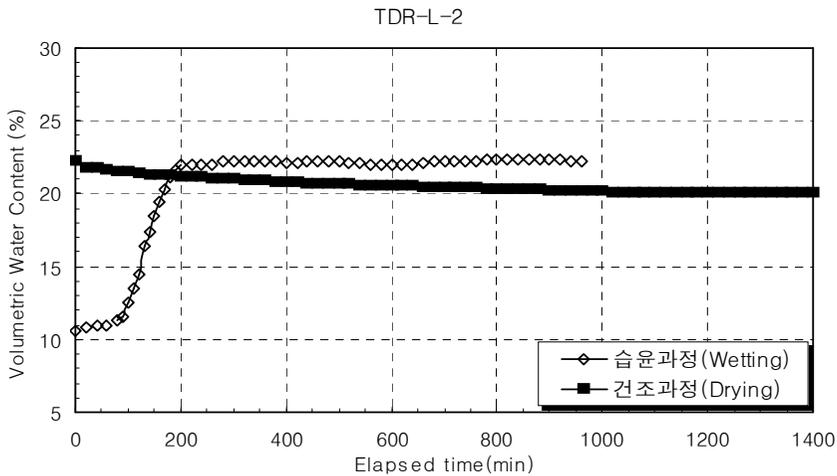
(b) 모형사면의 하부, 중단깊이

그림 4.2 체적함수비의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-2)

MT-2(강우강도30mm/hr, 강우지속/방치시간 16/24시간, 사면경사 1:2.0)조건에서 습윤과정의 경우 강우발생 후 3~4시간이 경과되면 체적함수비 27~28%로 정상상태를 유지하였다. 건조과정에서는 초기에 급격한 체적함수비의 변화가 나타났으며, 강우종료 후 18~20시간이 경과되면 체적함수비가 22~23%로 감소되어 정상상태에 도달하였다.



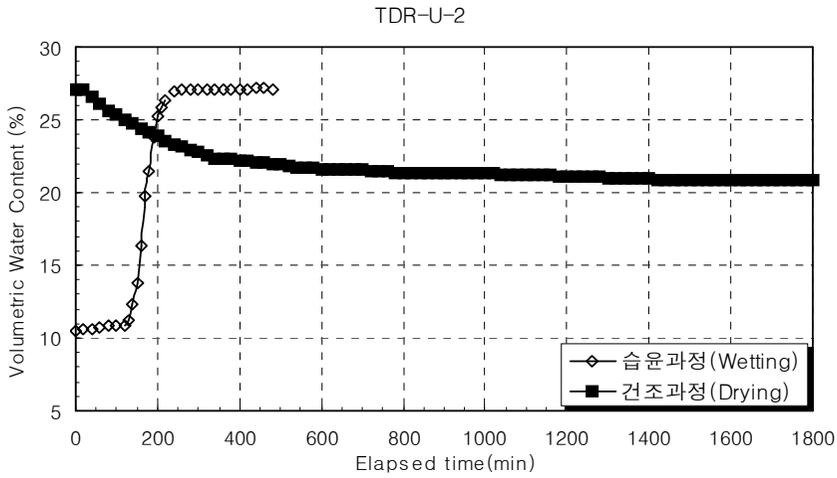
(a) 모형사면의 상부, 중단깊이



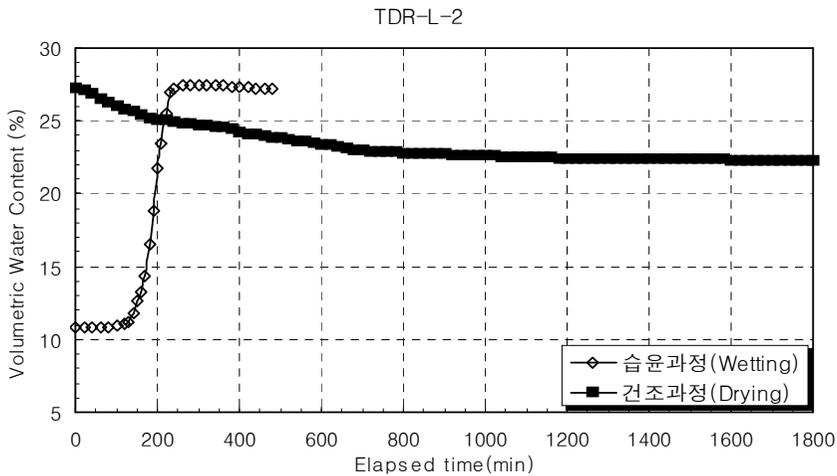
(b) 모형사면의 하부, 중단깊이

그림 4.3 체적함수비의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-3)

MT-3(강우강도15mm/hr, 강우지속/방치시간 16/24시간, 사면경사 1:1.5)조건에서 는 습윤과정의 경우 강우발생 후 4~5시간이 경과되면 체적함수비 22~23%로 정상상태를 유지하였으며, 건조과정에서는 강우종료 후 18~20시간이 경과되면 체적함수비가 20~21%로 감소되어 정상상태에 도달하였다.



(a) 모형사면의 상부, 중단깊이



(b) 모형사면의 하부, 중단깊이

그림 4.4 체적함수비의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-4)

MT-4(강우강도30mm/hr, 강우지속/방치시간 8/32시간, 사면경사 1:2.0)에서는 앞의 조건들과 달리 강우지속시간이 8시간이나 습윤과정의 경우 강우발생 후 4~5시간이 경과되면 체적함수비 27~28%로 정상상태를 유지하였다. 또한, 건조과정에서는 초기의 급격한 체적함수비의 변화가 나타나며 강우종료 후 22~24시간이 경과되면 체적함수비가 21~22.5%로 감소하여 정상상태에 도달하였다. 그리고 MT-4의 조건에서는 다른 실험조건들과 달리 강우지속시간이 짧아서 습윤정상상태의 유지시간도 상대적으로 짧다. 이러한 이유로 방치시간이 길어져 체적함수비의 감소량도 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보였다.

본 연구에서 실시된 모든 강우재현 모형실험에서 체적함수비의 변화는 그림 4.1~4.4와 같은 경향을 나타내었지만 변화량은 실험조건과 계측위치에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다.

그림 4.5~4.8은 본 연구에서 수행된 tensiometer의 계측결과 중 대표적으로 모형사면의 중부에서 중단의 결과를 바탕으로 모관흡인력이 시간경과에 따라 정상상태에 도달하는 과정을 나타낸 것이다.

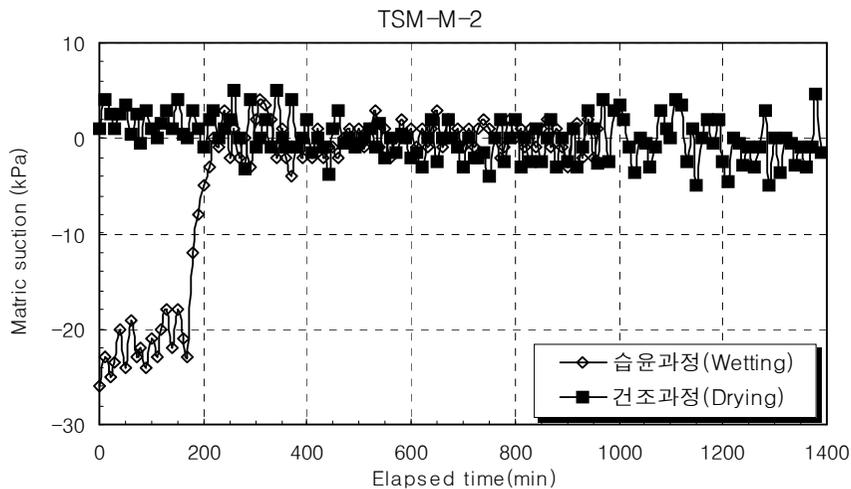


그림 4.5 모관흡인력의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-1)

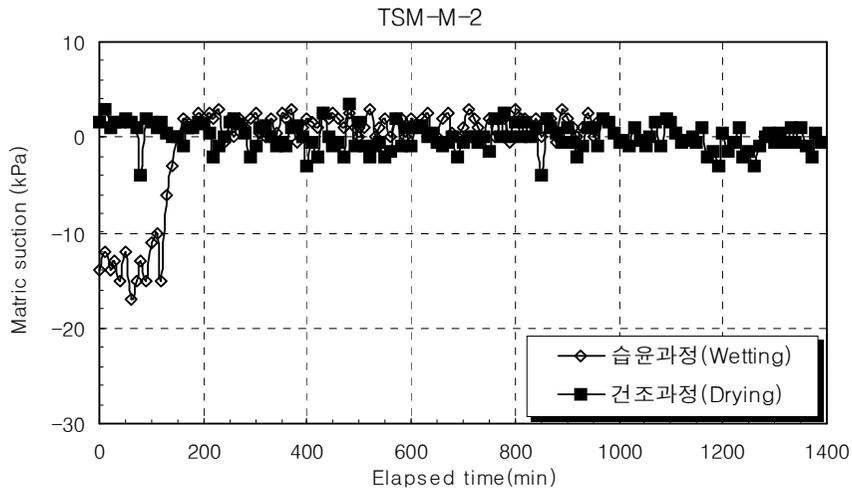


그림 4.6 모관흡인력의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-2)

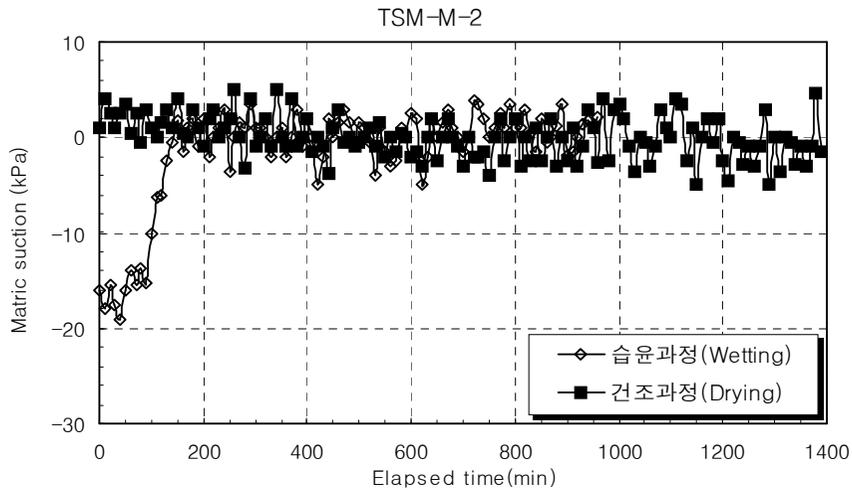


그림 4.7 모관흡인력의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-3)

MT-1, MT-2조건, MT-3조건에서 사면 중부의 중단의 경우 습윤과정에서는 강우 발생 후 3~8시간이 경과되면 정(+)의 간극수압은 0~2kPa로 정상상태에 유지하였으며, 건조과정에서는 강우종료 후 18~20시간이 경과되면 모관흡인력(부의간극수압)이 증가하여 2~3kPa로 정상상태에 도달하였다.

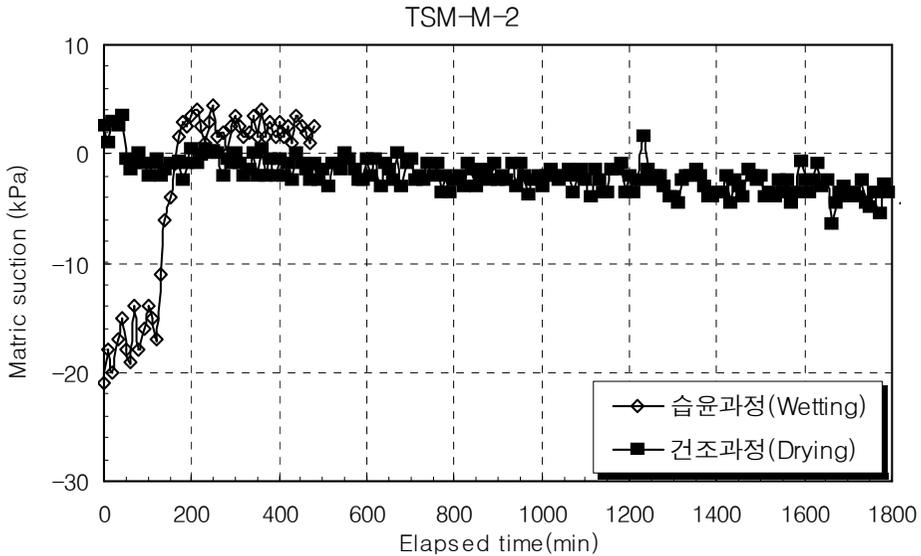


그림 4.8 모관흡인력의 강우재현 및 방치에 따른 정상상태(MT-4)

MT-4조건에서는 앞의 조건들과 달리 강우지속시간이 8시간이나 습윤과정의 경우 강우발생 후 4시간이 경과되면 정(+)의 간극수압이 1~2kPa로 정상상태에 유지하였으며, 건조과정에서는 초기의 급격한 모관흡인력의 회복이 나타났다. 강우종료 후 10시간 이상이 경과되면 모관흡인력이 2~3kPa로 정상상태에 도달하였다. MT-4조건의 경우 다른 실험조건들과 달리 강우지속시간이 짧아 습윤정상상태의 유지시간이 짧으며 방치시간이 길어져 간극수압의 변화량도 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보였다.

사면에서 강우재현으로 인해 변화되는 모관흡인력이 항상 감소하는 것은 아니다. 습윤과정에서는 체적함수비가 증가하고 모관흡인력은 감소하는 양상을 보이지만, 건조과정에서는 체적함수비가 감소하고 모관흡인력이 증가하는 양상을 보이기 때문이다. 건조과정에서의 모관흡인력은 강우재현 종료 후 초기부터 증가하기 시작하나 그 변화양상은 정상상태에 도달될 때까지 천천히 변화되는 것을 볼 수 있다. 이와 반면, 습윤과정실험에서의 모관흡인력은 일정시간이 경과된 후 급속히 감소하여 정상상태에 도달하는 양상을 볼 수 있다.

건조과정에서의 점진적, 습윤과정에서의 급격하게 변화하는 모관흡인력의 변화양상은 체적함수비 변화와 연관되어 있고, 이는 결과적으로 투수계수의 변화를 유발하게 됨을 알 수 있다. 습윤과정에서 간극에 물이 채워질수록 많은 유로가 형성되어 함수비가 증가되므로 투수계수가 증가한다. 또한, 투수계수 증가는 모형사면의 침투유속을 급속히 증가시킨다. 이와 반대로 건조과정에서는 간극에서 물이 빠져나가면서 유로가 소실되어 함수비가 감소되므로 투수계수도 감소하게 된다. 이로 인해 모형사면에서의 물의 흐름을 둔화시켜 모관흡인력의 변화가 점진적인 양상을 보이는 것으로 여겨진다.

본 연구에서 실시한 습윤과정실험에서 정상상태 도달시간이 모형사면의 상단에서 강우재현 후 0.5~1.0시간, 중단에서 2.5~7.0시간, 하단에서 6.0~14.0시간이 경과해야 하는 것으로 나타났다. 건조과정실험의 경우에는 상단, 중단, 하단에서 강우종료 후 짧게는 10시간, 길게는 20시간이 경과하면 정상상태에 도달하는 것으로 나타났다.

4.1.2 강우강도 변화에 따른 결과

강우강도에 따른 체적함수비와 모관흡인력의 변화양상을 살펴보기 위해, 3장의 실험계획에서 제시한 강우강도 조건에 따라 MT-1(강우강도 15mm/hr)과 MT-2(강우강도 30mm/hr)의 모형실험을 실시하였다. 모형사면 내에 설치된 TDR과 Tensiometer의 측정결과로부터 체적함수비와 모관흡인력의 분포를 비교·분석하였다.

가. 체적함수비의 변화

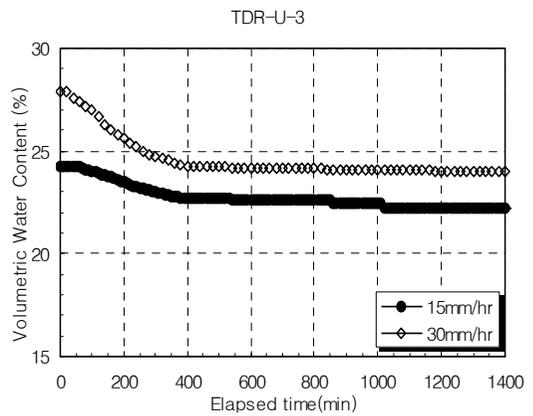
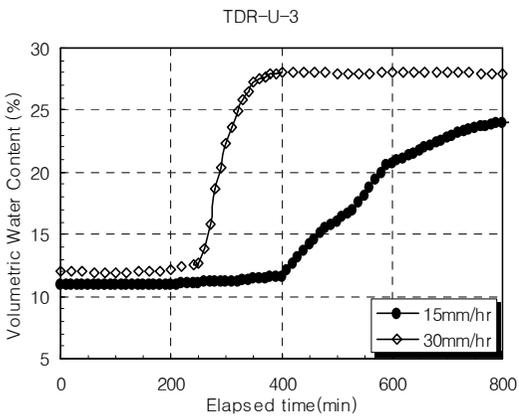
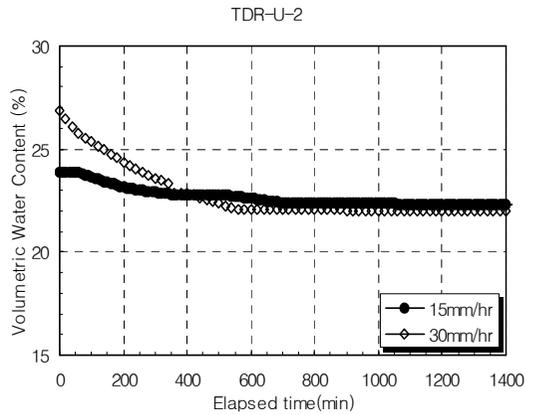
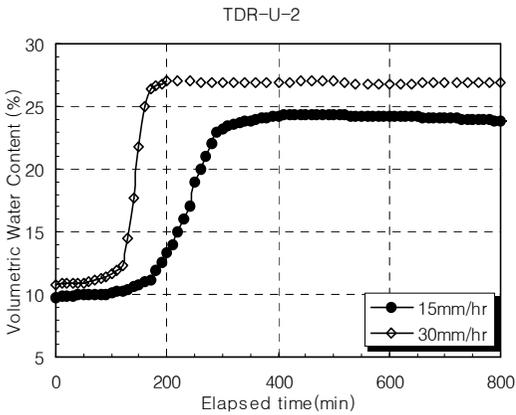
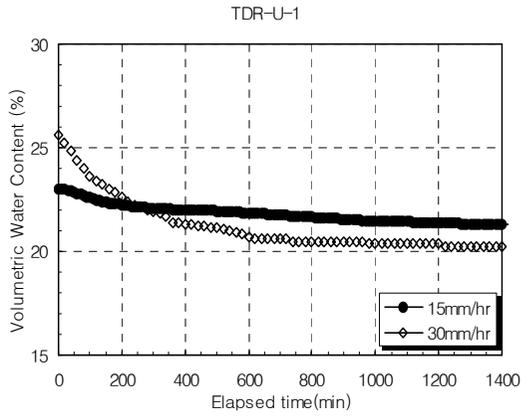
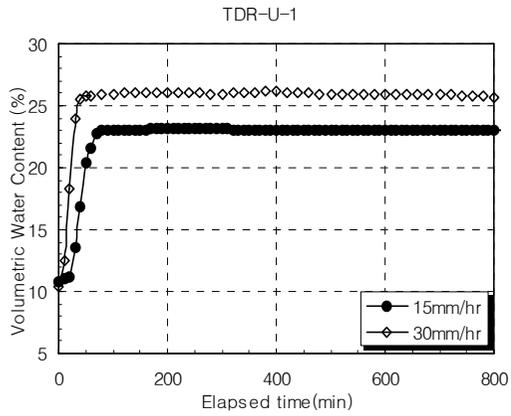
모형사면의 상부(TDR-U-1, TDR-U-2, TDR-U-3)와 하부(TDR-L-1, TDR-L-2, TDR-L-3)에 설치한 TDR로 측정된 체적함수비는 대체로 안정적인 결과를 보였다. TDR로 측정된 값을 경과시간에 따른 체적함수비의 분포상태로 나타내면 그림 4.9~4.12와 같다.

먼저 습윤과정 실험결과를 살펴보면, 강우강도가 클수록 정상상태의 체적함수비

가 더 크고 증가시점과 정상상태에 도달하는 시간도 빨라짐을 알 수 있다. 대표적으로 모형사면 상·하부의 하단에 설치된 TDR-U-3과 TDR-L-3의 변화양상을 보면 다음과 같다. 강우강도가 15mm/hr일 때 체적함수비의 상승시점은 400분과 350분, 정상상태 체적함수비 도달시점은 850분과 800분으로 나타났으며, 강우강도가 30mm/hr일 때 체적함수비의 상승시점은 250분과 200분, 정상상태의 체적함수비 도달시점은 동일하게 400분으로 나타났다.

그림 4.9(a)와 그림 4.10(a)를 보면 모형사면의 상단으로 갈수록 체적함수비의 상승시점과 정상상태 도달시간이 더 빨라지고 그 변화양상은 하단과 동일하게 나타났다. 또한, 하단으로 갈수록 강우강도에 따라 그래프의 변화폭이 커져 체적함수비의 상승시점 및 정상상태 도달시점의 차이가 큰 것으로 나타났다. 정상상태에 도달된 체적함수비를 보면 강우강도가 15mm/hr일 때 상단에서 23~24%, 중단과 하단에서는 24~25%로 나타났으며 강우강도가 30mm/hr일 때는 상단에서 26~27%, 중단과 하단에서는 27~29%로 나타났다. 강우강도가 30mm/hr일 때 3~4%정도 더 큰 값을 보이는데, 이와 같은 결과는 강우강도가 크면 동일 강우지속시간 동안의 강우량이 커지므로 당연한 결과인 것으로 여겨진다.

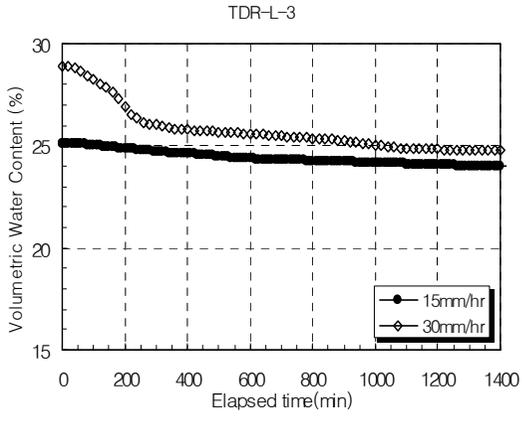
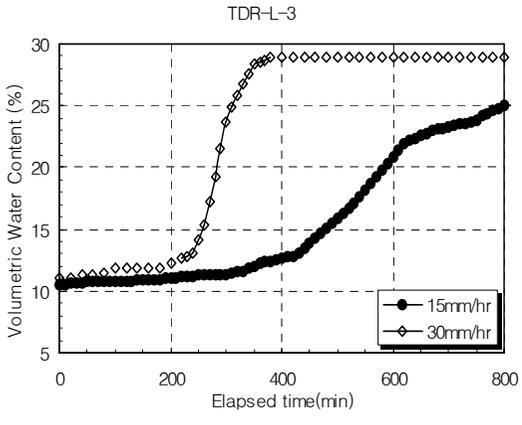
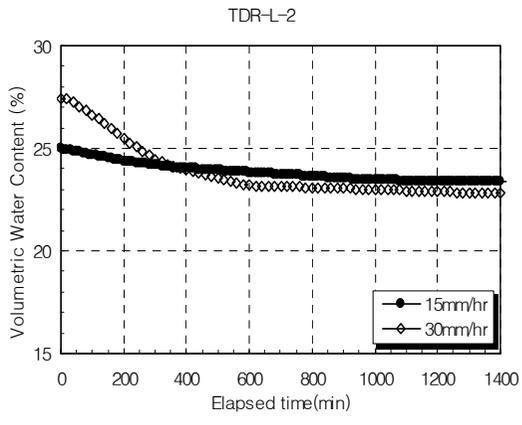
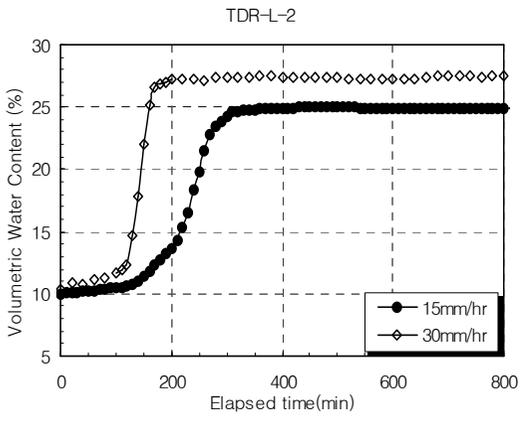
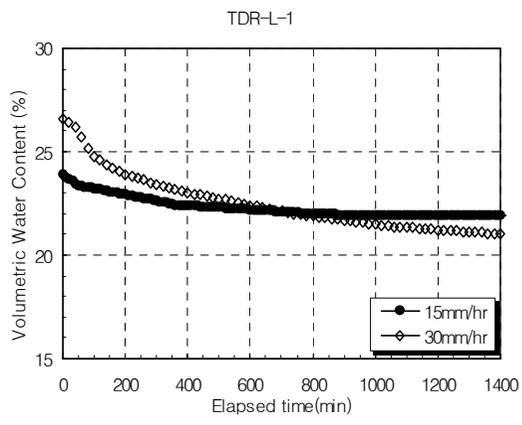
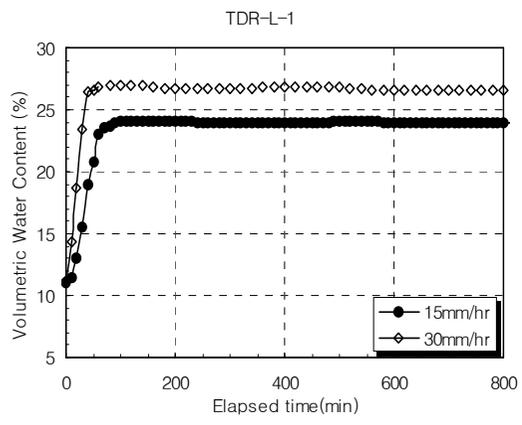
다음으로 그림 4.9(b)와 그림 4.10(b)의 건조과정 실험결과를 살펴보면, 방치시간이 지속될수록 체적함수비가 감소되어 정상상태에 도달하는데 대체로 강우강도가 클 경우에 정상상태의 체적함수비가 크며 또한, 체적함수비의 감소폭도 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 모형사면 상·하부의 설치된 TDR의 양상을 살펴보면 체적함수비는 강우강도가 15mm/hr일 때 상단의 경우 23%에서 21%로, 중단의 경우 24%에서 22%로, 하단의 경우 24.5%에서 22.5%로 약 2%정도 감소되지만, 30mm/hr일 때는 상단의 경우 26%에서 21%로, 중단의 경우 27%에서 23%로, 하단의 경우 28%에서 24%로 약 4~5%정도 감소된 것을 볼 수 있다. 이는 강우강도가 클수록 동일 강우지속시간에 강우량이 많으므로 습윤과정의 체적함수비가 커지고 모관흡인력은 감소되었기 때문이다. 모관흡인력의 감소로 인해 투수계수가 커지고 동일한 지속시간동안 투수가 활발히 진행되기 때문에 체적함수비의 감소폭도 크게 나타나는 것으로 여겨진다.



(a) 습윤과정(강우재현)

(b) 건조과정(방치)

그림 4.9 강우강도에 따른 경과시간과 체적함수비의 관계(사면상부)

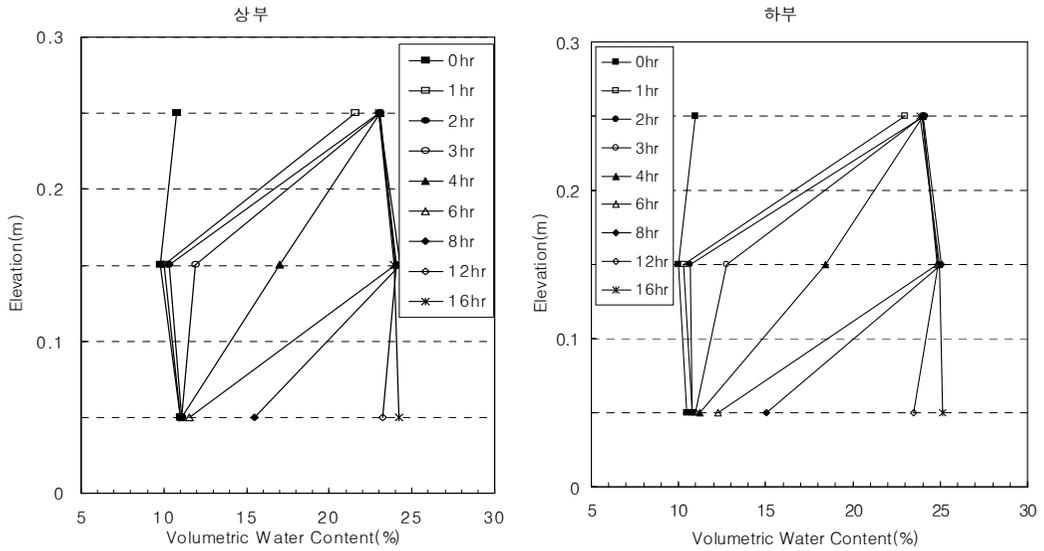


(a) 습윤과정(강우재현)

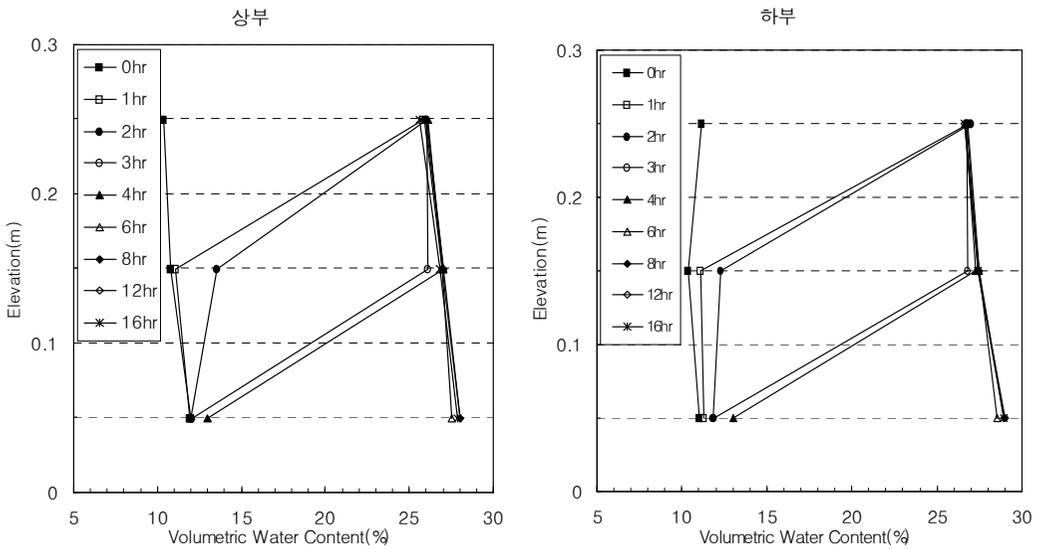
(b) 건조과정(방치)

그림 4.10 강우강도에 따른 경과시간과 체적함수비의 관계(사면하부)

모형사면의 상부(TDR-U-1, TDR-U-2, TDR-U-3)와 하부(TDR-L-1, TDR-L-2, TDR-L-3)에 설치된 TDR의 측정결과를 깊이와 경과시간에 따라 체적함수비의 변화관계를 습윤과 건조과정으로 구분하여 살펴보면 그림 4.11~4.12와 같다.

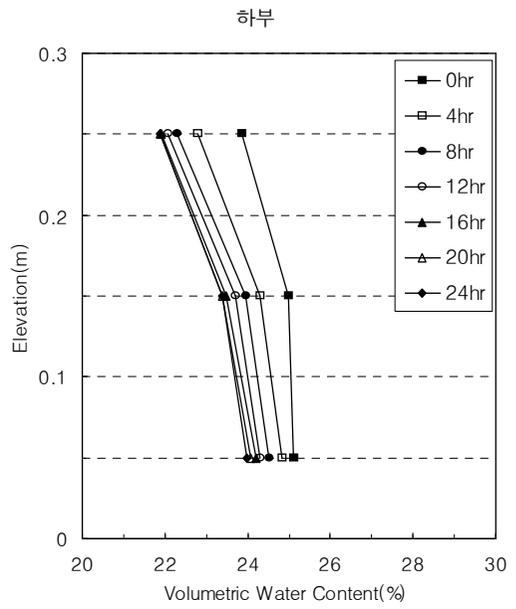
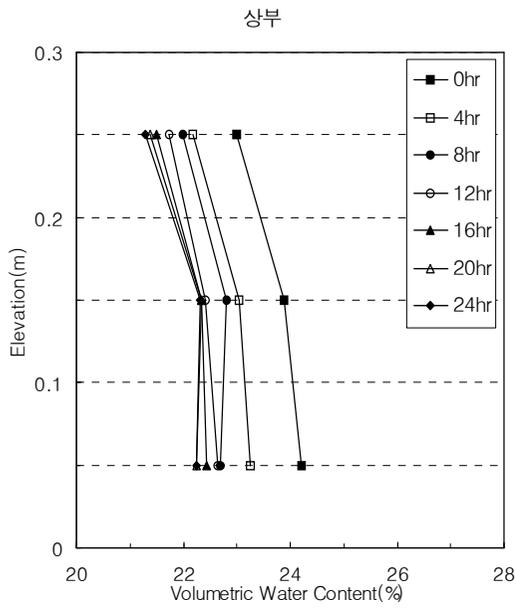


(a) 강우강도 15mm/hr

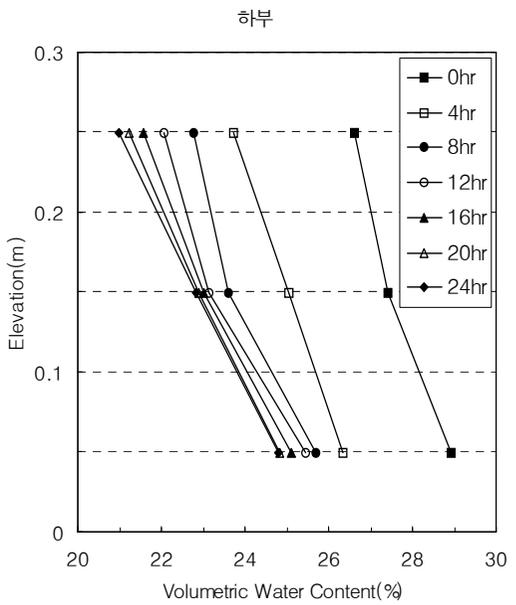
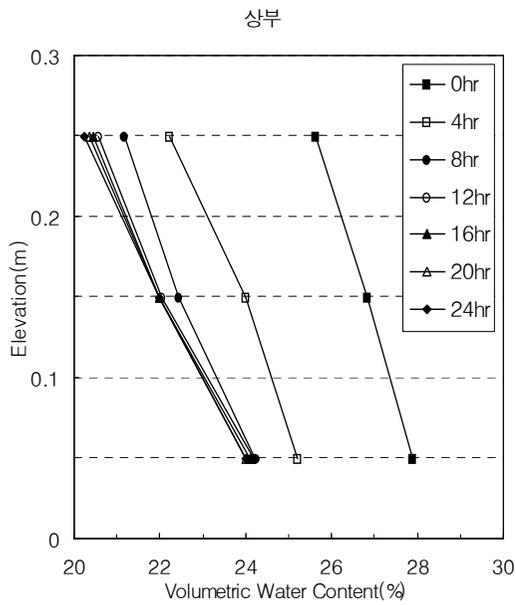


(b) 강우강도 30mm/hr

그림 4.11 강우지속시간(습윤과정)에 따른 사면깊이와 체적함수비의 관계



(a) 강우강도 15mm/hr



(b) 강우강도 30mm/hr

그림 4.12 방치시간(건조과정)에 따른 사면깊이와 체적함수비의 관계

모형사면의 상·하부의 깊이별 체적함수비를 지속시간에 따라 비교하면 습윤과정에서는 증가양상을 보이며, 건조과정에서는 감소양상을 보였다. 또한, 깊이별 체적함수비 증가양상은 초기강우의 흡수가 시작되는 상단부분에서는 체적함수비가 증가되고 점차적으로 중단, 하단으로 진행되어가면서 하단의 체적함수비가 증가될 때에 상단의 체적함수비가 줄어들면서 전체 깊이에 걸쳐 거의 일정해져 최종 정상상태에 도달하는 양상으로 나타났다.

먼저 그림 4.11를 보면, 습윤과정에서 깊이별 체적함수비 변화는 강우강도가 클 경우 체적함수비의 증가양상이 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 강우재현 후 지속 4시간일 때의 체적함수비 변화를 살펴보면 강우강도가 15mm/hr의 경우 강우재현 전인 0시간에 비해 중단은 매우 크고 중단은 보통, 하단은 거의 증가하지 않는 초기 체적함수비 상태를 보인다. 강우강도가 30mm/hr의 경우 강우재현 전인 0시간에 비해 중단, 중단의 변화는 매우 크고 하단의 변화는 거의 없는 양상을 보이고 있다. 이는 강우강도가 클수록 깊이에 따른 체적함수비의 증가양상이 빠르게 진행됨 보여준다.

건조과정에서 깊이별 체적함수비 변화는 방치시간 경과에 따라 깊이에 관계없이 모두 감소되는 경향을 보이고 있으며, 강우강도가 큰 경우에 초기 방치 4시간에 체적함수비의 감소가 큰 폭으로 진행되는 양상을 보인다. 강우종료 8시간 경과 후 강우강도 15mm/hr일 때는 전 깊이에 대해 약 1~2%씩 감소하는 경향을 보이는 반면, 강우강도가 30mm/hr일 때는 약 3~4%정도 체적함수비가 감소되는 것을 볼 수 있다.

깊이에 따른 체적함수비 분포양상은 강우강도에 따라 다른 양상을 보이는데 강우강도가 작은 경우에는 유출속도가 느려 중단과 하단에서 크게 나타났다. 이와 반면 강우강도가 큰 경우에는 상단과 중단에서는 거의 유사한 분포를 보이고 하단에서 비교적 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 강우강도가 작으면 투수계수가 작아 바닥 유출속도가 상대적으로 느려져 강우가 중간, 하부에 정체되는 현상을 보이기 때문인 것으로 여겨진다.

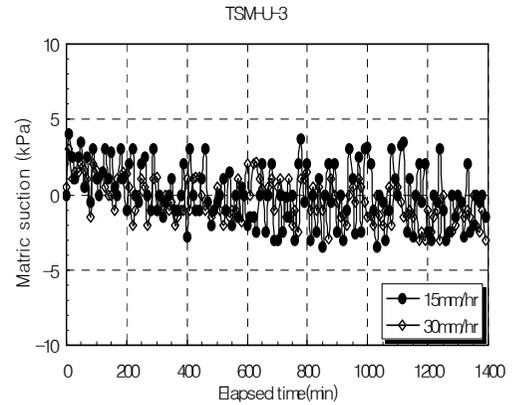
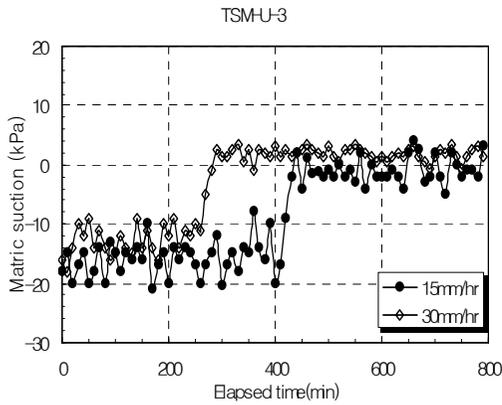
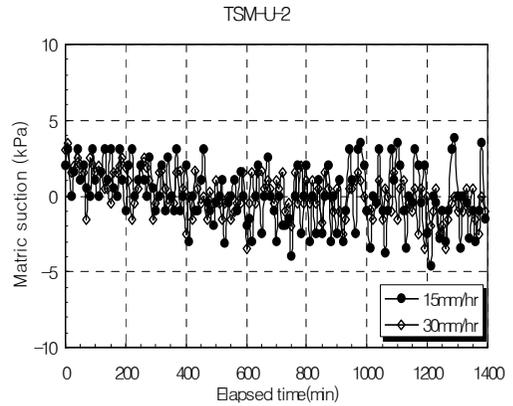
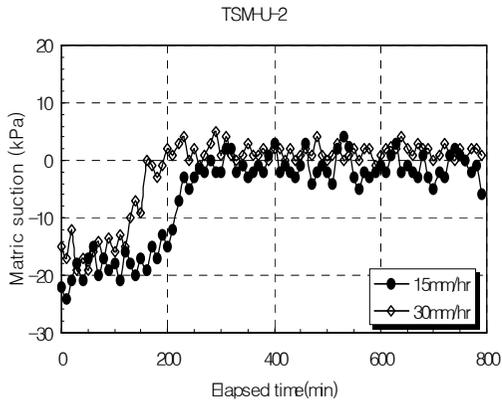
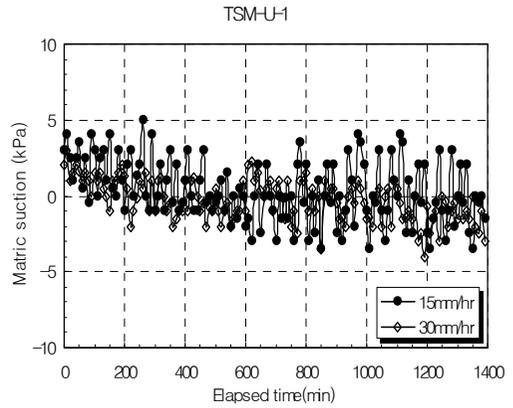
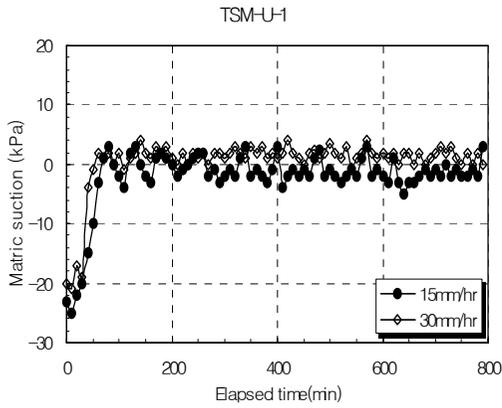
나. 모관흡인력의 변화

모형사면의 상부(TSM-U-1, TSM-U-2, TSM-U-3), 중부(TSM-M-1, TSM-M-2, TSM-M-3), 하부(TSM-L-1, TSM-L-2, TSM-L-3)에서 Tensiometer로 측정된 모관흡인력은 대체로 안정적인 결과를 보였다. 측정값을 경과시간에 따른 모관흡인력(부의 간극수압)의 분포상태로 나타내면 그림 4.13~4.15와 같다.

습윤과정에서의 모관흡인력은 강우조건에 관계없이 공통적으로 강우재현 시간이 지속될수록 감소하여 정(+)의 간극수압으로 변화하는 경향을 볼 수 있다. 또한, 모형사면의 상부, 중부, 하부의 모든 구간에서 강우강도에 따른 모관흡인력의 저하시점은 상단에서 하단으로 갈수록 더 지연됨을 알 수 있다. 사면의 상단에 설치되어 있는 TSM(TSM-U-1, TSM-M-1, TSM-L-1)에서 강우강도에 따른 모관흡인력의 저하시점 차이는 대략 10~20분, 중단에 설치되어 있는 TSM(TSM-U-2, TSM-M-2, TSM-L-2)에서는 대략 60~80분, 하단에 설치되어 있는 TSM(TSM-U-3, TSM-M-3, TSM-L-3)에서는 대략 120~150분으로 나타나, 하단으로 갈수록 모관흡인력 저하시점의 차이가 더 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 일정시간이 경과한 후의 간극수압의 크기는 강우강도와 관계없이 유사한 값으로 수렴하여 정상상태를 보이는데 이는 본 연구의 모형실험에서 사면 바닥면을 투수층 조건으로 두어 강우강도가 증가하더라도 바닥면으로 투수가 진행되기 때문이다.

건조과정에서의 모관흡인력 즉, 부(-)의 간극수압의 거동을 살펴보면, 강우강도조건에 관계없이 방치시간이 지속될수록 모관흡인력이 회복되어 정(+)의 간극수압이 감소하고 부(-)의 간극수압이 증가함을 보인다. 방치시간의 지속에 따른 모관흡인력의 회복상태를 살펴보면, 강우강도가 작은 경우(15mm/hr)에 강우 종료한 후 대략 100~200분이 경과하는 시점부터 작용하기 시작 했으며, 강우강도가 큰 경우(30mm/hr)에는 강우 종료 후 대략 500~700분 정도 흐른 뒤에 부(-)의 간극수압으로 떨어져 모관흡인력을 회복하는 양상을 보였다.

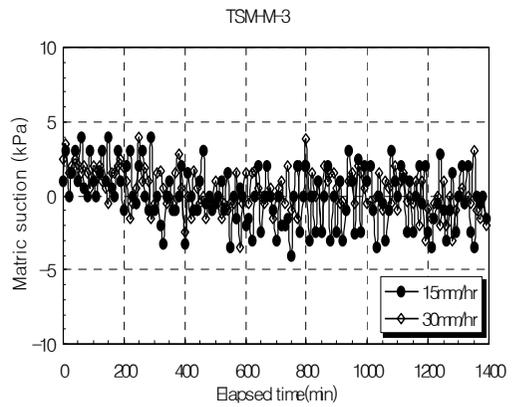
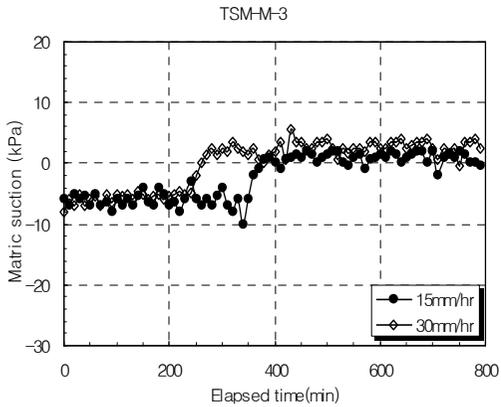
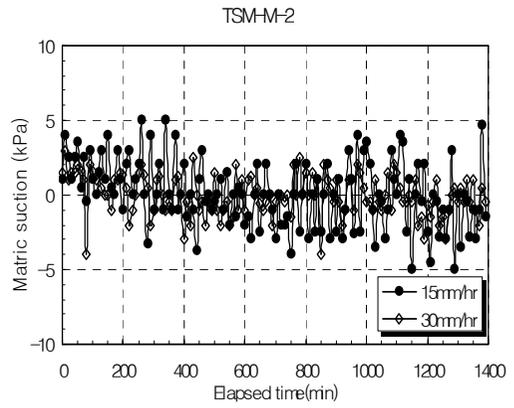
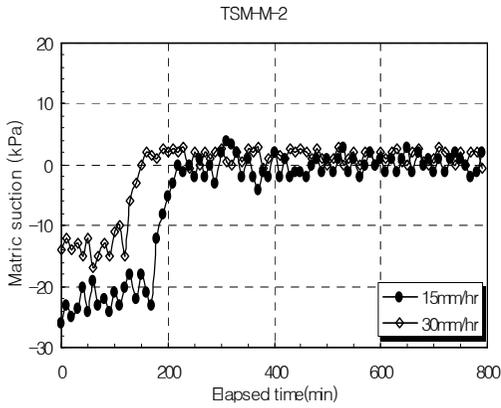
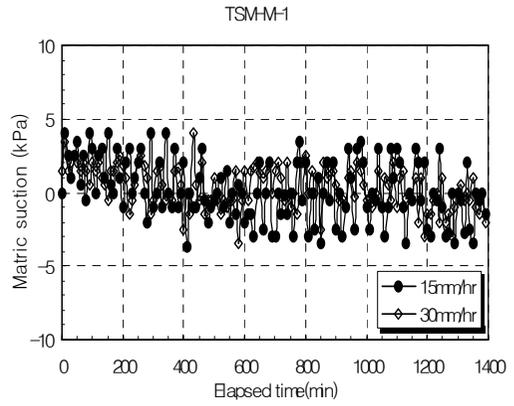
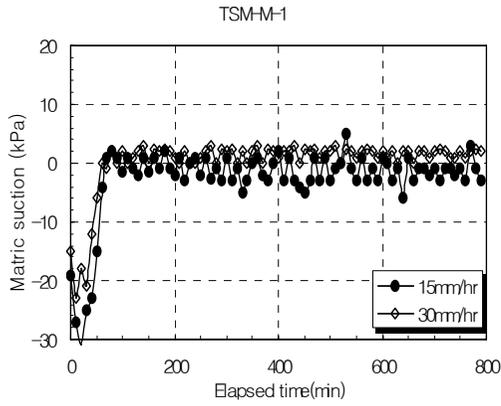
강우강도가 큰 경우에 모관흡인력의 변화량은 크게 나타났으나, 습윤과정에서 정상상태의 체적함수비가 더 높기 때문에 모관흡인력으로서의 회복되는데 많은 소요시간이 걸리게 되는 것이다.



(a) 습윤과정(강우재현)

(b) 건조과정(방치)

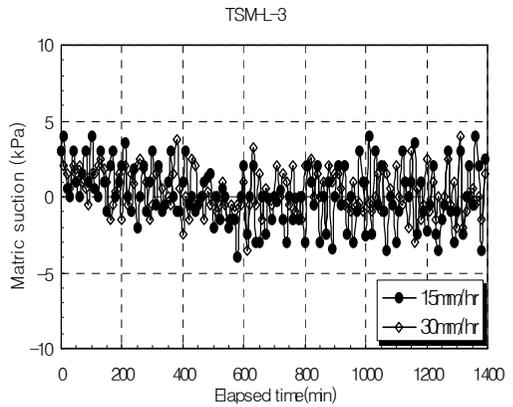
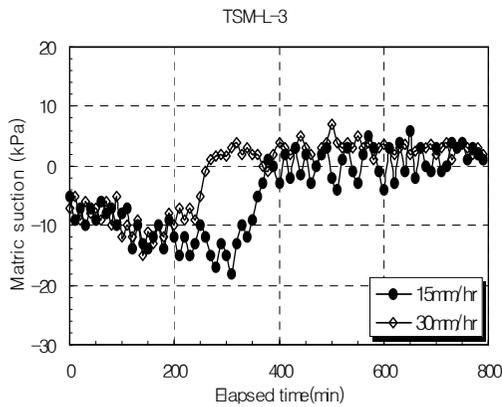
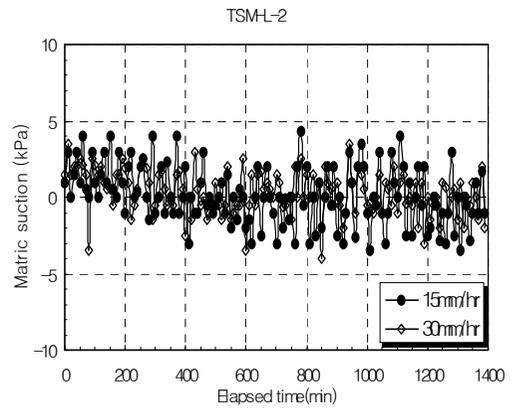
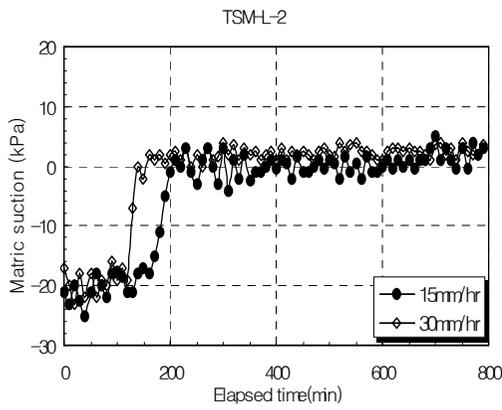
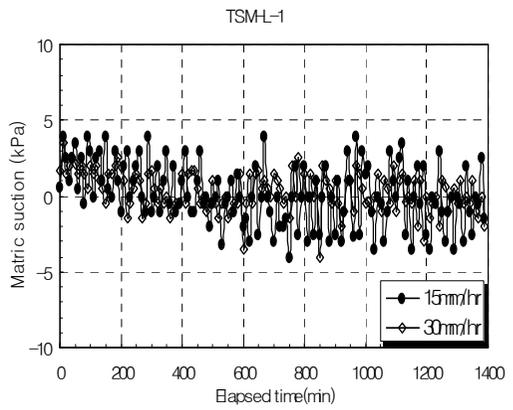
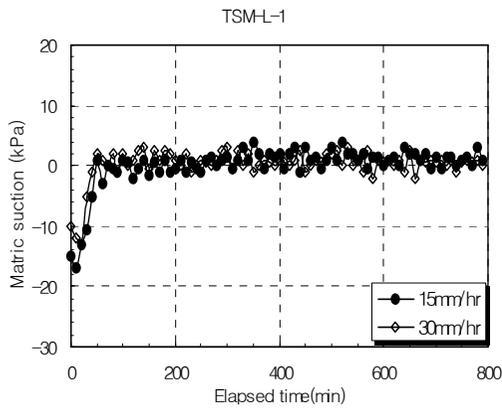
그림 4.13 강우강도에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(사면상부)



(a) 습윤과정(강우재현)

(b) 건조과정(방치)

그림 4.14 강우강도에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(사면중부)



(a) 습윤과정(강우재현)

(b) 건조과정(방치)

그림 4.15 강우강도에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(사면하부)

건조과정실험을 위해 24시간 방치한 후 회복된 모관흡인력은 강우강도와 무관하게 거의 유사한 값으로 나타났으며, 강우재현 전의 초기치보다 매우 작은 값으로 나타남을 알 수 있다.

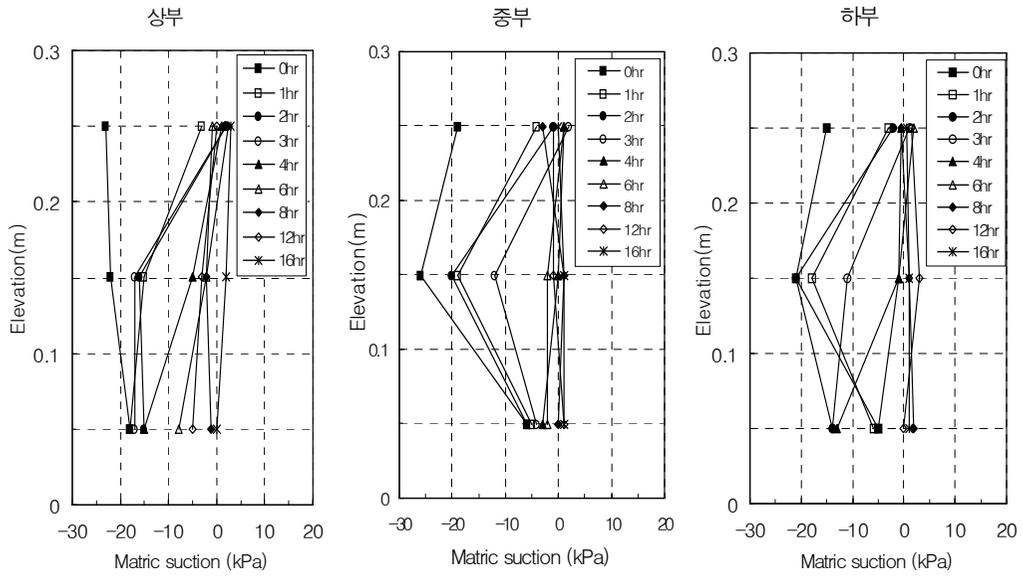
모형사면의 상·중·하부에 설치된 tensiometer의 계측으로부터 습윤과정, 건조과정실험에서의 구체적인 모관흡인력을 살펴보면 다음과 같다.

습윤과정의 초기상태인 강우재현전의 경우 강우강도가 15mm/hr인 조건에서 사면의 상단에 설치되어 있는 TSM(TSM-U-1, TSM-M-1, TSM-L-1)의 값은 15~22kPa, 중단에 설치되어 있는 TSM(TSM-U-2, TSM-M-2, TSM-L-2)의 값은 20~24kPa, 하단에 설치되어 있는 TSM(TSM-U-3, TSM-M-3, TSM-L-3)의 값은 8~18kPa이었으며, 강우강도가 30mm/hr인 조건에서 사면의 상단에 설치되어 있는 TSM의 값은 10~20kPa, 중단에 설치되어 있는 TSM의 값은 12~16kPa, 하단에 설치되어 있는 TSM의 값은 8~16kPa이었다.

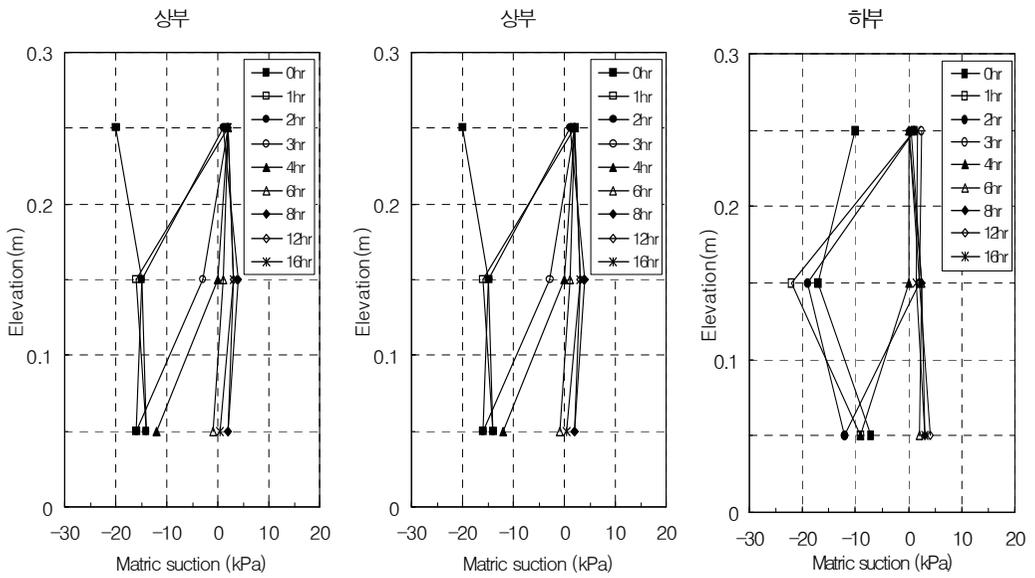
건조과정에서 24시간 방치후의 강우강도가 15mm/hr인 조건에서 사면의 상단, 중단, 하단에 설치되어 있는 TSM의 값은 2~3kPa, 강우강도가 30mm/hr인 조건에서 사면의 상·중·하단에 설치되어 있는 TSM의 값은 2~4kPa로 강우재현 전의 초기 모관흡인력보다 매우 작은 값의 분포로 나타났다. 이는 실제 사면에서 강우 침투시 모관흡인력의 감소로 인한 사면안정성의 저하는 강우 종료 후 짧은 시간에 회복되는 것이 아니라 매우 오랜 시간동안 조금씩 회복됨을 알 수 있다.

그림 4.16~4.17은 모관흡인력의 변화양상을 모형사면의 상부(TSM-U-1, TSM-U-2, TSM-U-3), 중부(TSM-M-1, TSM-M-2, TSM-M-3), 하부(TSM-L-1, TSM-L-2, TSM-L-3)의 계측결과로 깊이와 경과시간에 따라 습윤·건조과정으로 구분하여 나타낸 것이다.

모형사면의 상·중·하부의 깊이별 모관흡인력을 경과시간에 따라 비교하면, 습윤과정에서는 부(-)의 간극수압에서 정(+)의 간극수압으로 감소양상을 보이며, 건조과정에서는 방치시간이 경과함에 따라 부(-)의 간극수압으로 모관흡인력이 증가양상을 보였다. 또한, 깊이별 모관흡인력의 감소양상은 초기강우의 흡수가 시작되는 상단부분에서는 모관흡인력이 감소되고 점차적으로 중단, 하단으로 진행되어 간다.

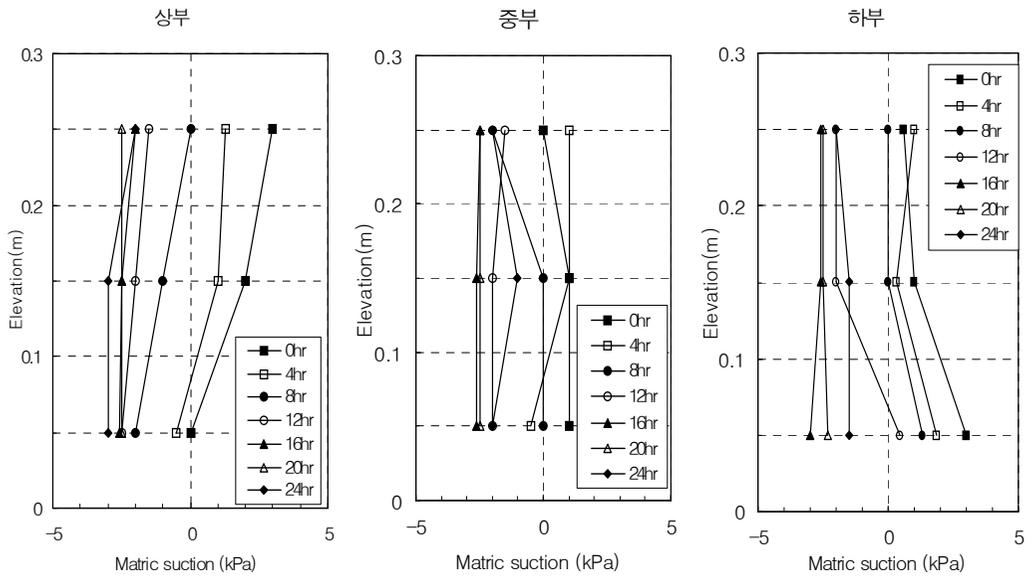


(a) 강우강도 15mm/hr

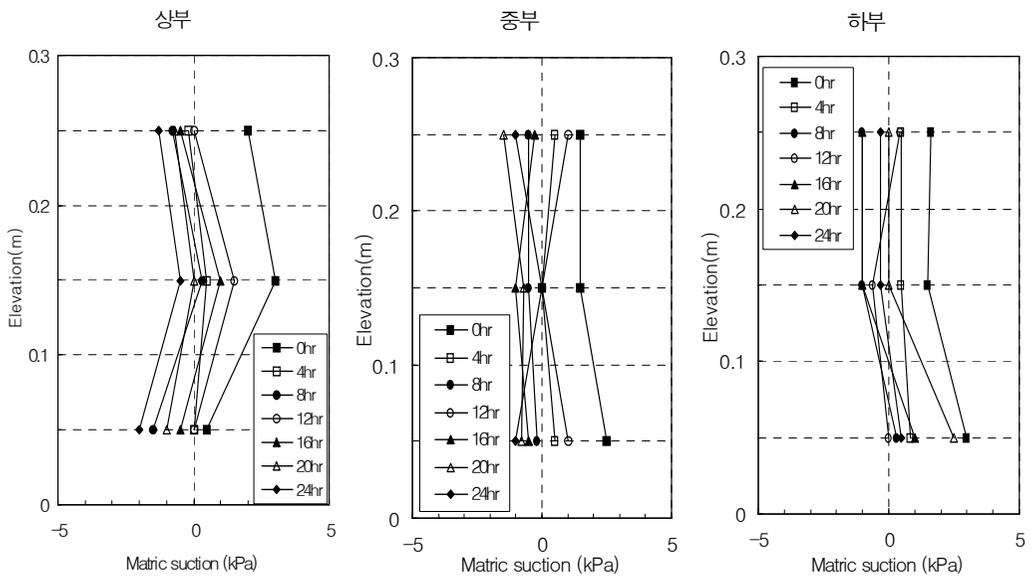


(b) 강우강도 30mm/hr

그림 4.16 강우지속시간(습윤과정)에 따른 사면깊이와 모관흡인력의 관계



(a) 강우강도 15mm/hr



(b) 강우강도 30mm/hr

그림 4.17 방치시간(건조과정)에 따른 사면깊이와 모관흡인력의 관계

강우가 지속될수록 전 깊이에 걸쳐 거의 일정해지면서 최종 정상상태에 도달하는 양상으로 나타났다.

습윤과정의 경우 상단에서부터 하단으로 모관흡인력의 감소가 진행되고, 강우강도가 클수록 모관흡인력이 감소하여 정(+)의 간극수압에 도달하는 시점이 빨라지는 것을 볼 수 있다. 강우강도가 15mm/hr의 경우 사면의 상·중·하부를 보면 8시간 이상 강우가 지속되면 모든 깊이에서 정상상태에 도달한 것을 볼 수 있고 강우강도가 30mm/hr의 경우에는 6시간 이상 지속되면 모든 깊이에서 정상상태에 도달하는 것을 볼 수 있다.

건조과정실험의 경우 상·중·하단에서 전반적으로 모관흡인력의 증가가 진행되고 강우강도가 작을수록 모관흡인력의 회복이 빨라짐을 알 수 있다. 강우강도가 15mm/hr의 경우 사면의 상·중·하부를 보면 방치시간이 8시간 이상이면 어느 정도 회복이 진행되고 강우강도가 30mm/hr의 경우에는 16시간 이상 방치되면 어느 정도 회복되는 것을 알 수 있다. 강우강도가 큰 경우의 최종 회복된 모관흡인력이 강우강도가 작은 경우보다 작은 값을 가지고 있어 강우강도가 큰 경우에는 습윤과정, 건조과정 모두에 사면의 안정성에 취약한 것을 알 수 있다.

4.1.3 사면경사 변화에 따른 결과

사면경사에 따른 체적함수비와 모관흡인력의 변화양상을 살펴보기 위해, 3장의 실험계획에서 제시한 사면경사 조건에 따라 MT-1(사면경사 1:2.0)과 MT-3(사면경사 1:1.5)의 모형실험을 실시하였다. 모형사면 내에 설치된 TDR과 Tensiometer의 계측결과로부터 체적함수비와 모관흡인력의 분포를 비교·분석하였다.

가. 체적함수비의 변화

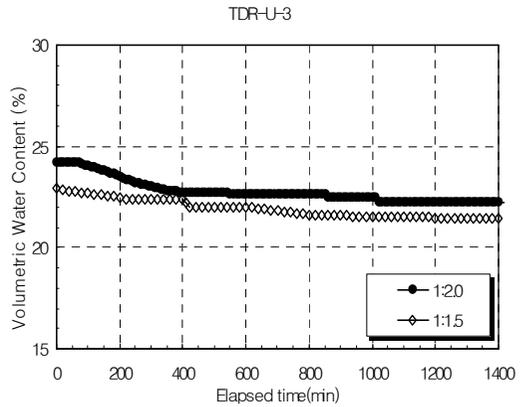
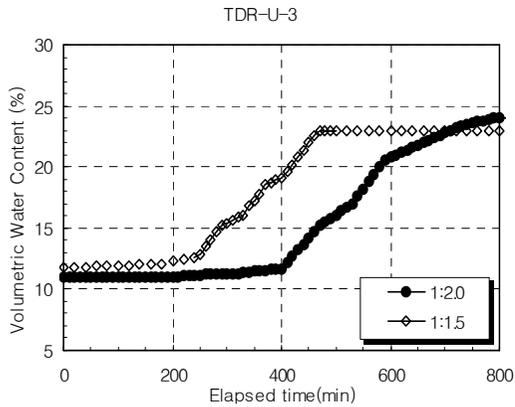
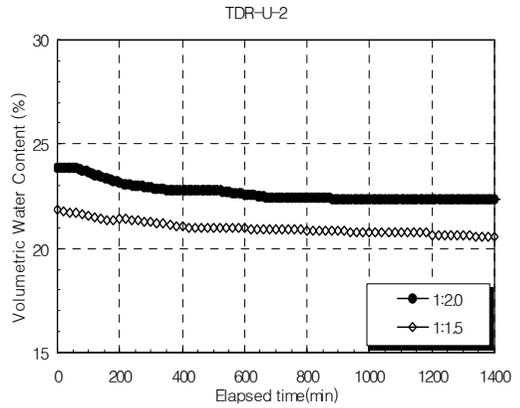
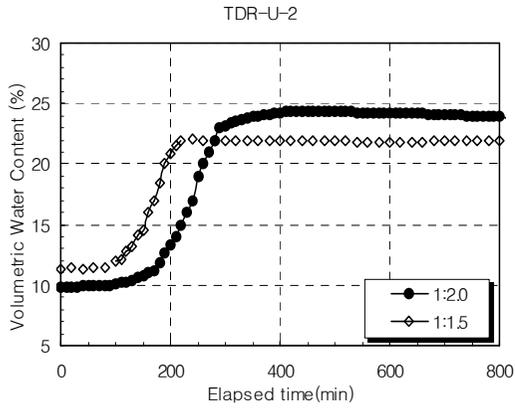
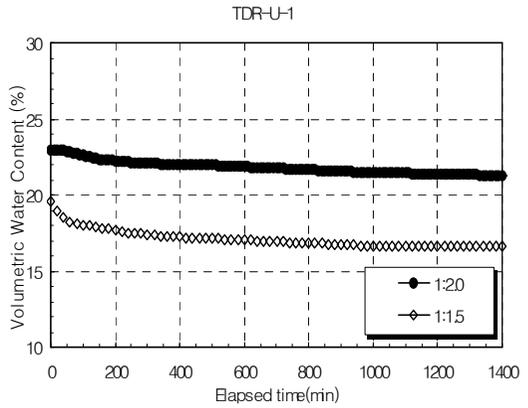
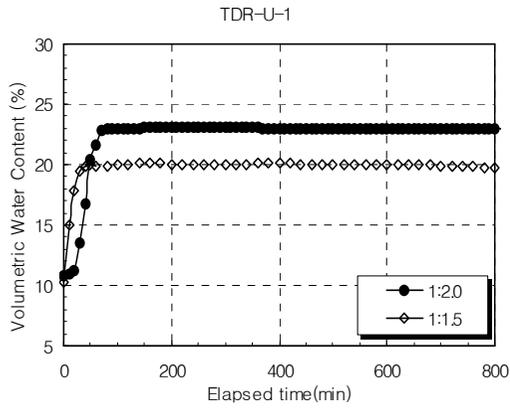
모형사면의 상부(TDR-U-1, TDR-U-2, TDR-U-3)와 하부(TDR-L-1, TDR-L-2, TDR-L-3)에 설치한 TDR로 계측된 체적함수비는 대체로 안정적인 결과를 보였다. TDR로 계측된 값을 경과시간에 따른 체적함수비의 분포상태로 나타내면 그림

4.18~4.20과 같다.

먼저 습윤과정 실험결과를 살펴보면, 사면경사가 급할수록 정상상태의 체적함수비가 더 크고 증가시점과 정상상태에 도달하는 시간도 빨라짐을 알 수 있다. 대표적으로 모형사면 상·하부의 하단에 설치된 TDR-U-3과 TDR-L-3의 변화양상을 보면 다음과 같다. 사면경사가 1:2.0일 때 체적함수비의 상승시점은 400분과 350분, 정상상태 체적함수비 도달시점은 850분과 800분으로 나타났으며, 사면경사가 1:1.5일 때 체적함수비의 상승시점은 230분과 150분, 정상상태의 체적함수비 도달시점은 500분과 450분으로 나타났다. 사면경사가 완만한 1:2.0의 경우가 정상상태에 도달하는데 소요시간이 약 1.5~2배 정도임을 알 수 있다.

그림 4.18(a)와 그림 4.19(a)를 보면 모형사면의 상단으로 갈수록 체적함수비의 상승시점과 정상상태 도달시간이 더 빨라지고 그 변화양상은 하단과 동일하게 나타났다. 또한, 하단으로 갈수록 강우강도에 따라 그래프의 변화폭이 커져 체적함수비의 상승시점 및 정상상태 도달시점의 차이가 큰 것으로 나타났다. 정상상태에 도달된 체적함수비를 보면 사면경사가 1:2.0일 때 상단에서 23~24%, 중단과 하단에서는 24~25%로 나타났으며 사면경사가 1:1.5일 때는 상단에서 20~23%, 중단과 하단에서는 22~23%로 나타났다. 사면경사가 1:1.5일 때 3~4%정도 더 작은 값을 보이는데, 이와 같은 결과는 사면경사가 급하면 강우를 사면내로 흡수되지 못하고 표층에서 흘러 유출되는 강우량이 발생되어 완만한 경우에 비해 상대적으로 작은 체적함수비를 갖는 것으로 여겨진다.

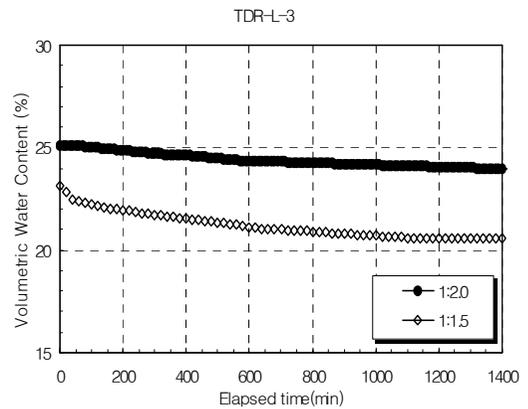
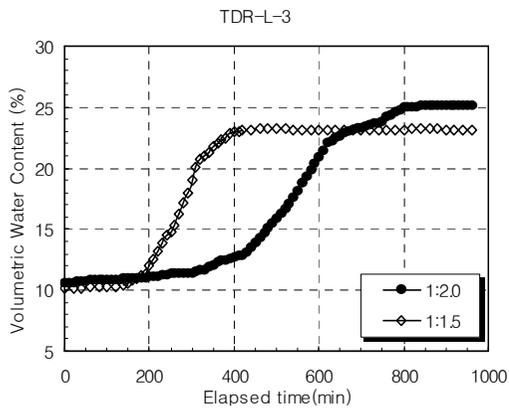
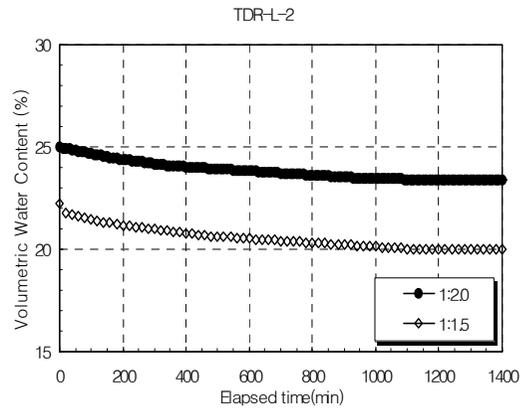
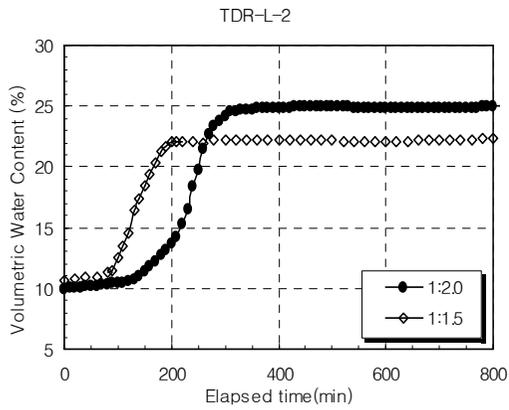
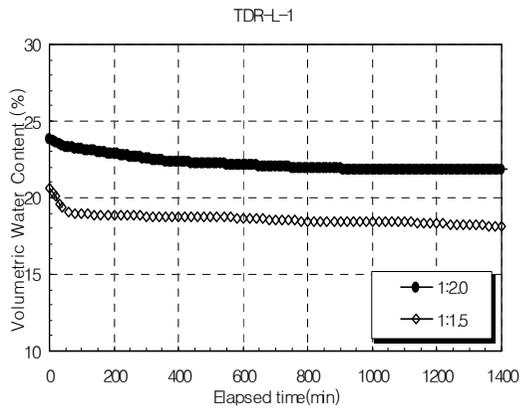
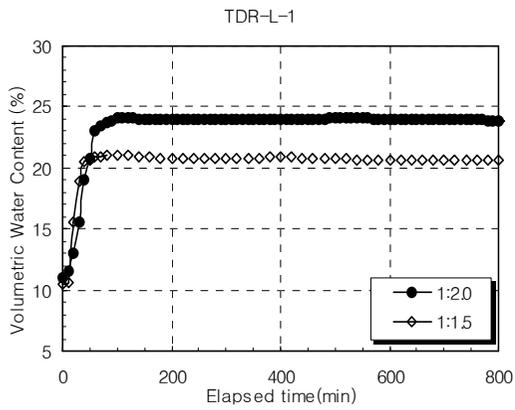
다음으로 건조과정 실험결과를 살펴보면 방치시간이 지속될수록 체적함수비가 감소되어 정상상태에 도달하는데 대체로 사면경사가 급한 경우에 초기감소율이 다소 크게 나타나지만 최종적인 감소율의 차이는 무시할 정도로 작은 것으로 나타났다. 이는 사면경사가 건조과정의 체적함수비 변화에 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 모형사면 상·하부의 설치된 TDR의 계측값을 통해 체적함수비의 감소량을 살펴보면 사면경사가 1:2.0일 때 상단, 중단, 하단에서 모두 약 2%정도를 보이고, 1:1.5일 때도 모두 약 2%정도 감소된 것을 볼 수 있다. 이는 사면경사의 관계 없이 체적함수비의 감소량은 거의 유사함을 알 수 있다.



(a) 습윤과정(강우재현)

(b) 건조과정(방치)

그림 4.18 사면경사에 따른 경과시간과 체적함수비의 관계(사면상부)

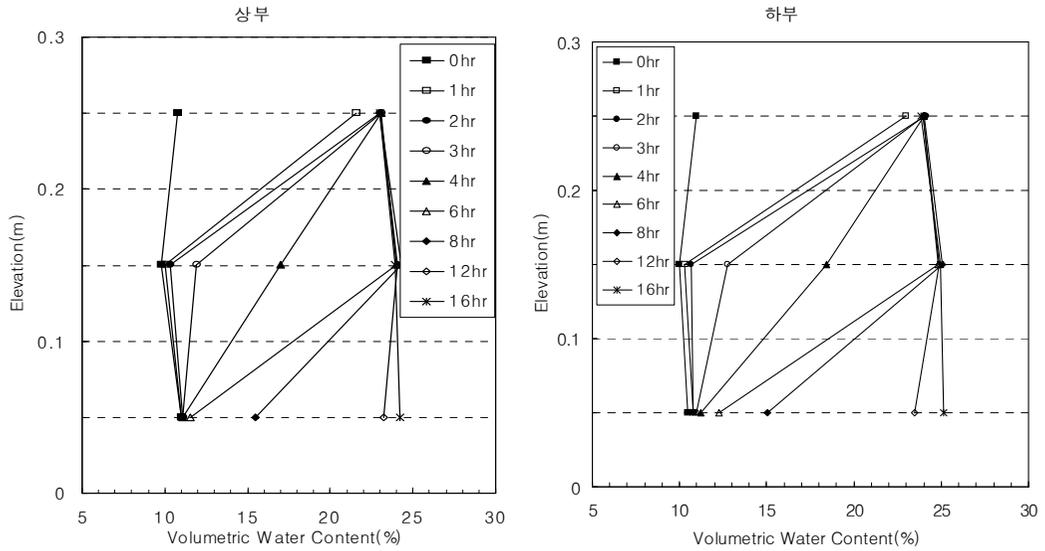


(a) 습윤과정(강우재현)

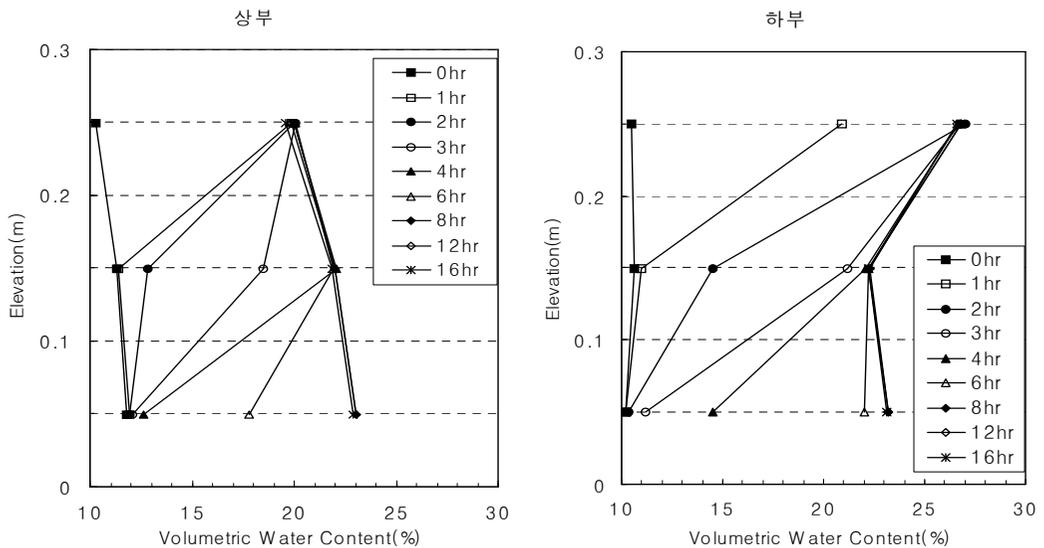
(b) 건조과정(방치)

그림 4.19 사면경사에 따른 경과시간과 체적함수비의 관계(사면하부)

모형사면의 상부(TDR-U-1, TDR-U-2, TDR-U-3)와 하부(TDR-L-1, TDR-L-2, TDR-L-3)에 설치된 TDR의 측정결과를 깊이와 경과시간에 따라 체적함수비의 변화관계를 습윤과 건조과정으로 구분하여 살펴보면 그림 4.20~4.21과 같다.

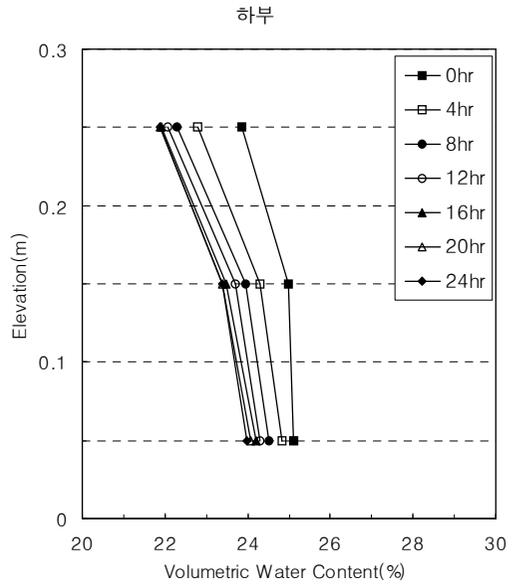
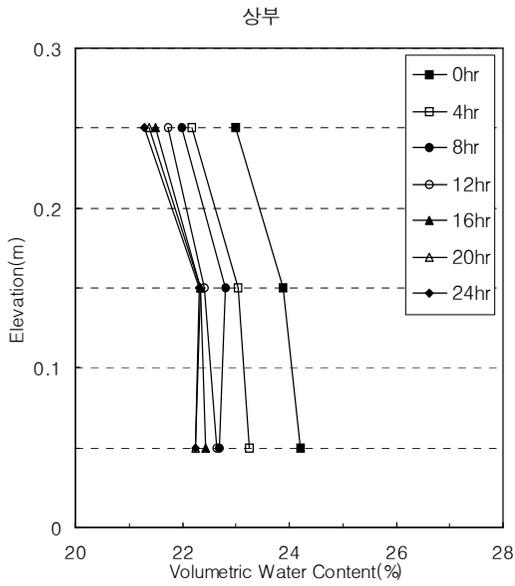


(a) 사면경사 1:2.0

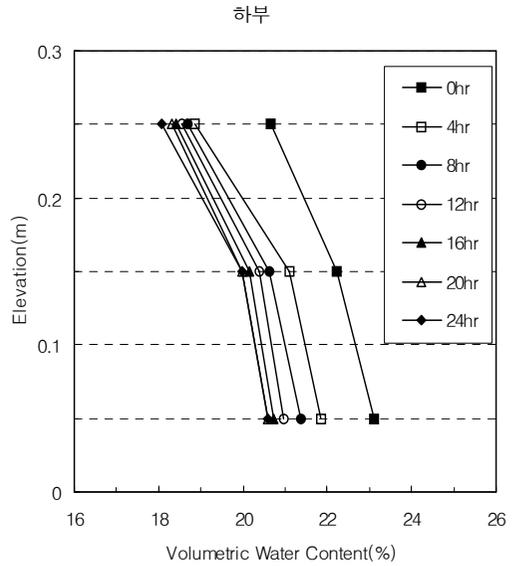
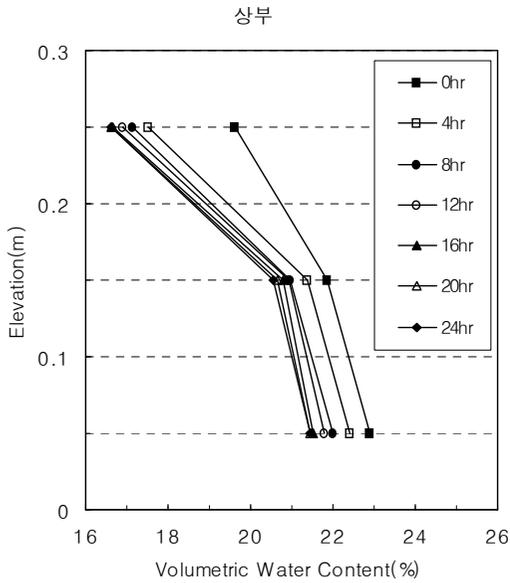


(b) 사면경사 1:1.5

그림 4.20 강우지속시간(습윤과정)에 따른 사면깊이와 체적함수비의 관계



(a) 사면경사 1:2.0



(b) 사면경사 1:1.5

그림 4.21 방치시간(건조과정)에 따른 사면깊이와 체적함수비의 관계

모형사면의 상·하부의 깊이별 체적함수비를 지속시간에 따라 비교하면 습윤과정에서는 증가양상을 보이며, 건조과정실험에서는 감소양상을 보였다. 또한, 깊이별 체적함수비 증가양상은 초기강우의 흡수가 시작되는 상단부분에서는 체적함수비가 증가되고 점차적으로 중단, 하단으로 진행되어가면서 하단의 체적함수비가 증가될 때에 상단의 체적함수비가 줄어들면서 전체 깊이에 걸쳐 거의 일정해지면서 최종 정상상태에 도달하는 양상으로 나타났다.

먼저 그림 4.20을 보면, 습윤과정에서 깊이별 체적함수비 변화는 사면경사가 급할 경우 체적함수비의 증가양상이 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 강우재현 후 지속 4시간일 때의 체적함수비 변화를 살펴보면 사면경사가 1:2.0의 경우 강우재현 전인 0시간에 비해 상단은 매우 크고 중단은 보통, 하단은 거의 증가하지 않는 초기 체적함수비 상태를 보인다. 사면경사가 1:1.5의 경우 강우재현 전인 0시간에 비해 상단, 중단의 변화는 매우 크고 하단의 변화는 조금 증가하는 양상을 보이고 있다. 이는 사면경사가 클수록 깊이에 따른 체적함수비의 증가양상이 빠르게 진행됨 보여준다.

건조과정실험에서 깊이별 체적함수비 변화는 방치시간 경과에 따라 깊이에 관계 없이 모두 감소되는 경향을 보이고 있으며 사면경사가 급할 경우에 초기 방치 4시간에 체적함수비의 감소가 큰 폭으로 진행되는 양상을 보인다. 강우종료 8시간 경과 후 사면경사 1:2.0일 때와 1:1.5일 때 모두 전 깊이에 대해 약 2~3%씩 감소하는 경향을 볼 수 있다.

깊이에 따른 체적함수비 분포양상은 사면경사에 따라 다른 양상을 보이는데, 사면경사가 완만한 경우에는 상·중·하단에서 모두 유사한 값으로 나타났다. 이와 반면 사면경사가 급한 경우에는 상단에서는 비교적 작은 값을 보이고 중단과 하단에서는 거의 유사한 값으로 나타났다.

모형사면 전반에 걸쳐 사면경사에 따른 체적함수비를 살펴보면 사면경사가 완만한 경우에는 정상상태에 도달시간이 16시간 정도인 반면, 사면경사가 급한 경우에는 정상상태 도달시간이 8시간 정도로 소요시간이 짧아짐을 알 수 있다. 또한, 경사가 급한 경우의 체적함수비는 사면 상부에서는 거의 일직선 형태를 보이다가 하부로 내려올수록 하단의 체적함수비가 큰 분포를 나타내고 있다. 이는 사면 내 강

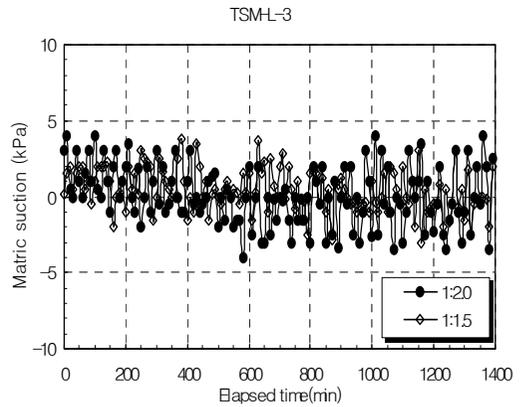
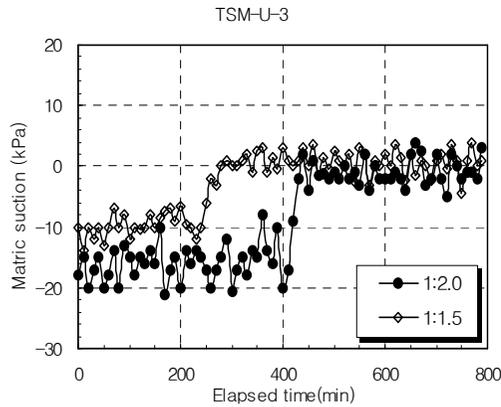
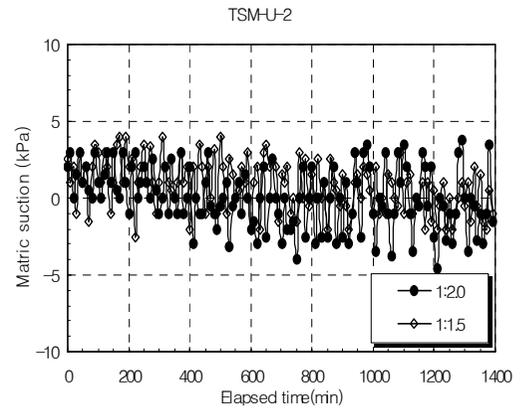
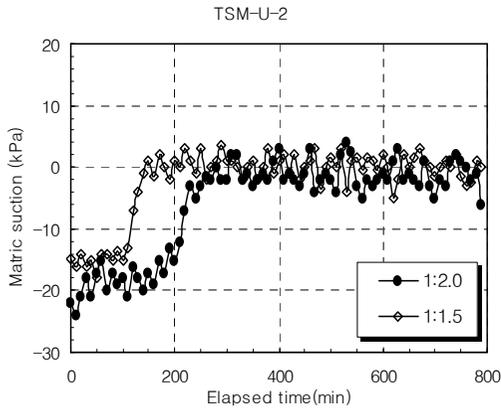
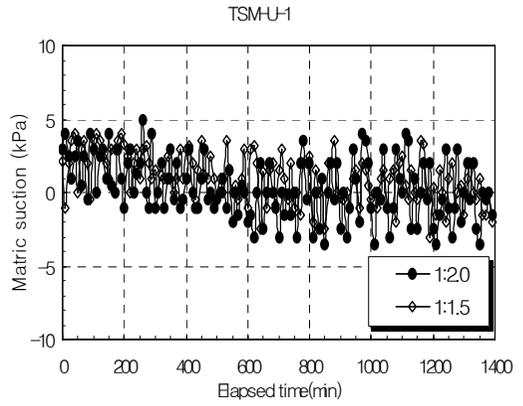
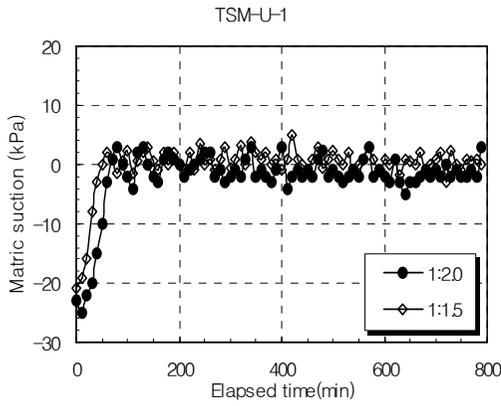
우의 흐름이 횡방향으로 바뀌어 사면하부의 하단에 집중되어 배출되기 때문인 것으로 판단된다.

나. 모관흡인력의 변화

모형사면의 상부(TSM-U-1, TSM-U-2, TSM-U-3), 중부(TSM-M-1, TSM-M-2, TSM-M-3), 하부(TSM-L-1, TSM-L-2, TSM-L-3)에 설치한 Tensiometer로 계측된 모관흡인력은 대체로 안정적인 결과를 보였다. 계측값을 경과시간에 따른 모관흡인력(부의 간극수압)의 분포상태로 나타내면 그림 4.22~4.24와 같다.

습윤과정에서의 모관흡인력은 사면경사조건에 관계없이 공통적으로 강우재현 시간이 지속될수록 감소하여 정(+)의 간극수압으로 변화하는 경향을 볼 수 있다. 또한, 모형사면의 상·중·하부의 모든 구간에서 사면경사에 따른 모관흡인력의 저하시점 차이는 상단에서 하단으로 갈수록 더 지연됨을 알 수 있다. 체적함수비와 마찬가지로 사면경사가 급할수록 간극수압 상승시점 즉, 모관흡인력의 저하시점이 빠르고 정상상태에도 빨리 도달하는 양상을 보인다. 사면의 상단에 설치되어 있는 TSM(TSM-U-1, TSM-M-1, TSM-L-1)에서 사면경사에 따른 모관흡인력의 저하시점 차이는 대략 10~30분, 중단에 설치되어 있는 TSM(TSM-U-2, TSM-M-2, TSM-L-2)에서 저하시점의 차이는 대략 70~100분, 하단에 설치되어 있는 TSM(TSM-U-3, TSM-M-3, TSM-L-3)에서 저하시점 차이는 대략 110~150분으로 나타나 하단으로 갈수록 모관흡인력 저하시점의 차이가 더 크게 나타남을 알 수 있다.

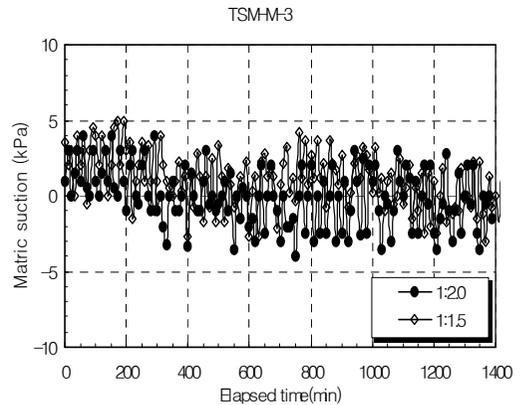
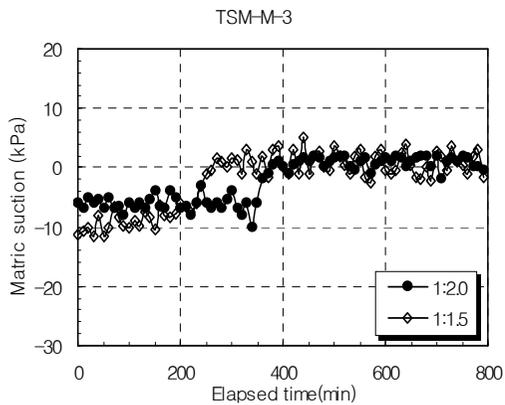
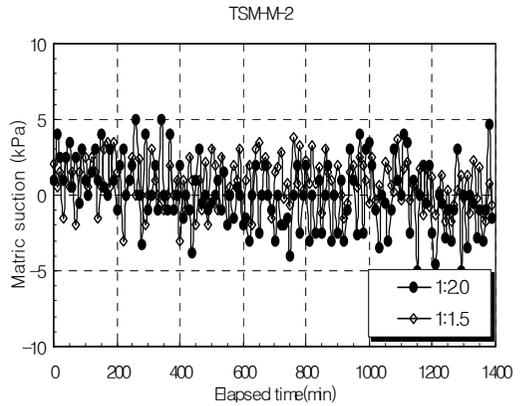
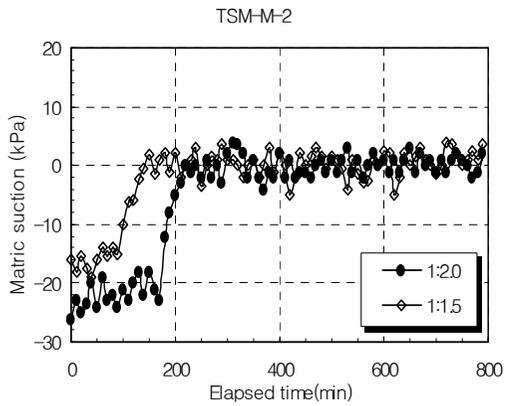
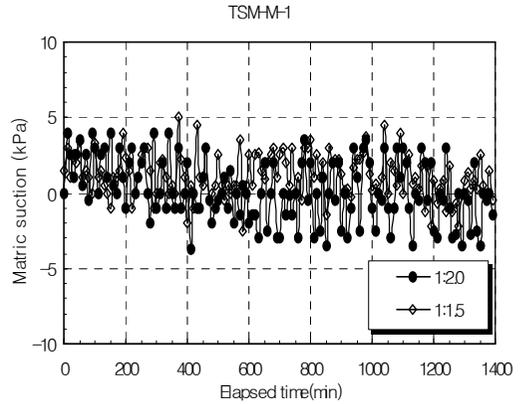
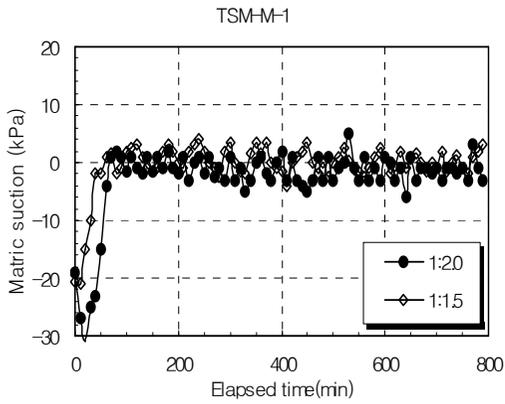
건조과정실험에서의 모관흡인력은 사면경사 조건에 관계없이 공통적으로 강우재현 종료 후 방치시간이 지속될수록 증가하여 정(+)의 간극수압에서 부(-)의 간극수압으로 변화하는 경향을 보인다. 방치시간의 지속에 따른 모관흡인력의 증가는 사면경사가 완만한 경우(1:2.0)에 조금 더 큰 것으로 나타났지만 그 영향은 습윤과정에 비해 매우 미소하다. 또한, 강우재현 종료 후 24시간을 방치한 결과 모관흡인력은 강우재현 이전의 값으로 완전히 회복되지 못하고 일부분만 회복되는 것으로 나타났으며 사면경사조건과는 관계가 없다.



(a) 습윤과정(강우재현)

(b) 건조과정(방치)

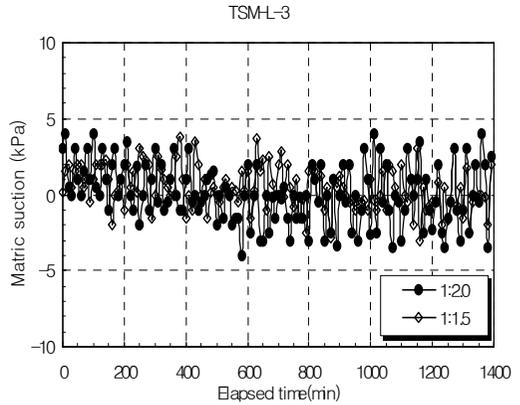
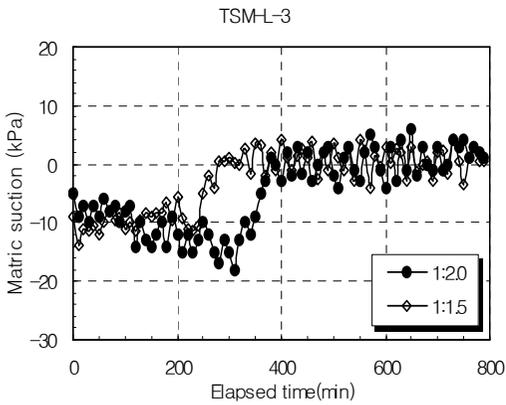
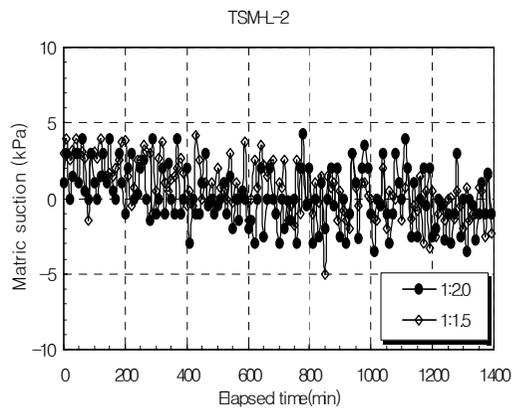
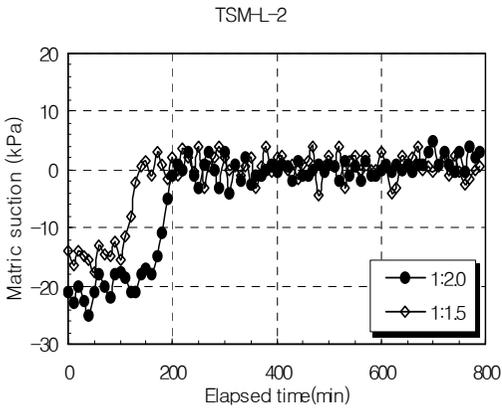
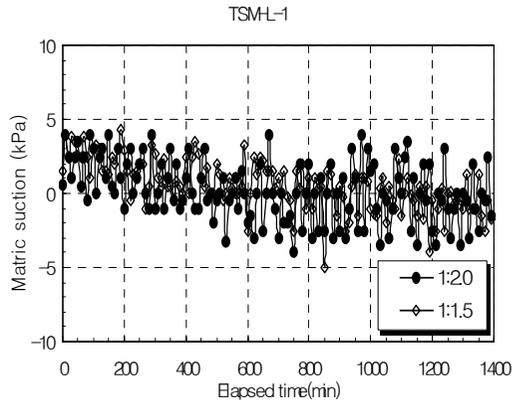
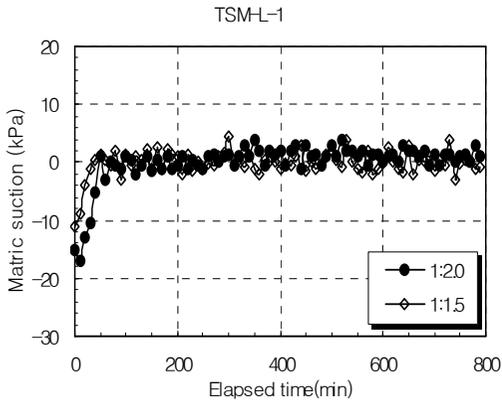
그림 4.22 강우강도에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(사면상부)



(a) 습윤과정(강우재현)

(b) 건조과정(방치)

그림 4.23 강우강도에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(사면중부)



(a) 습윤과정(강우재현)

(b) 건조과정(방치)

그림 4.24 강우강도에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(사면하부)

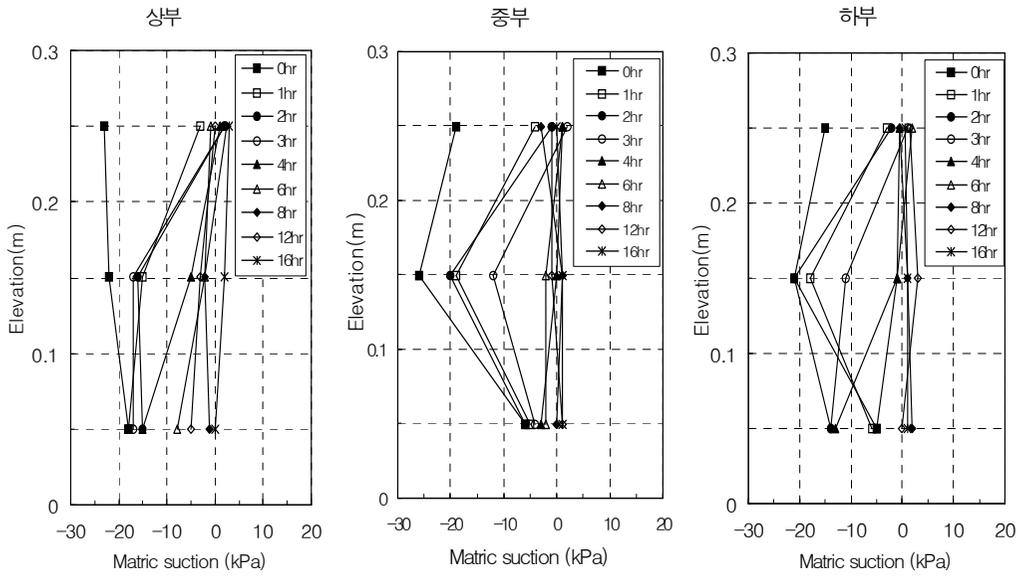
모형사면의 상·중·하부에 설치된 tensiometer의 계측으로부터 습윤과정, 건조과정실험에서의 구체적인 모관흡인력을 살펴보면 다음과 같다.

습윤과정의 초기상태인 강우재현전의 경우 사면경사가 1:2.0인 조건에서 사면의 상단에 설치되어 있는 TSM(TSM-U-1, TSM-M-1, TSM-L-1)의 값은 15~22kPa, 중단에 설치되어 있는 TSM(TSM-U-2, TSM-M-2, TSM-L-2)의 값은 20~24kPa, 하단에 설치되어 있는 TSM(TSM-U-3, TSM-M-3, TSM-L-3)의 값은 8~18kPa이었으며 사면경사가 1:1.5인 조건에서 사면의 상단에 설치되어 있는 TSM의 값은 11~20kPa, 중단에 설치되어 있는 TSM의 값은 15~18kPa, 하단에 설치되어 있는 TSM의 값은 10~11kPa이었다. 이와 같이 습윤과정에서 초기상태의 모관흡인력은 사면경사가 완만한 경우에 다소 큰 값을 가짐을 알 수 있다.

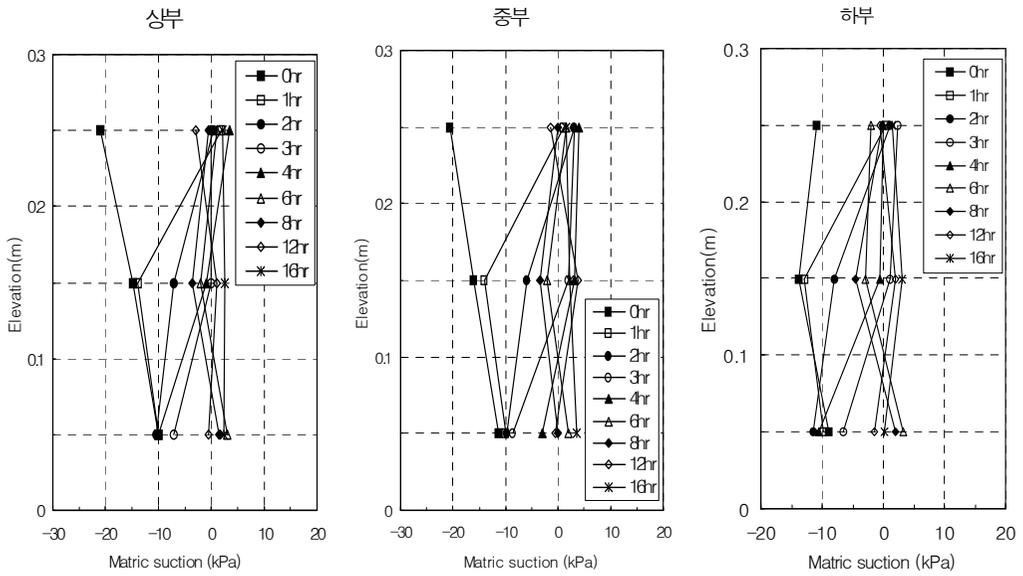
건조과정에서 24시간 방치후의 사면경사가 1:2.0인 사면의 상단, 중단, 하단에 설치되어 있는 TSM의 값은 3~4kPa, 사면경사가 1:1.5인 사면의 상단, 중단, 하단에 설치되어 있는 TSM의 값은 1~3kPa로 강우재현 전의 초기 모관흡인력보다 매우 작은 값의 분포로 나타났다. 이와 같이 건조과정에서 방치후의 회복된 모관흡인력의 값은 사면경사에 관계없이 거의 유사한 값을 갖게 된다.

모형사면의 상부(TSM-U-1, TSM-U-2, TSM-U-3), 중부(TSM-M-1, TSM-M-2, TSM-M-3), 하부(TSM-L-1, TSM-L-2, TSM-L-3)에 설치한 tensiometer의 전반적인 계측결과를 깊이와 경과시간에 따라 모관흡인력의 변화관계를 습윤과정과 건조과정으로 구분하여 살펴보면 다음 그림 4.25~4.26과 같다.

모형사면의 상부, 중부, 하부의 깊이별 모관흡인력을 경과시간에 따라 비교하면 습윤과정에서는 부(-)의 간극수압에서 정(+)의 간극수압으로 감소양상을 보이며, 건조과정에서는 방치시간이 경과함에 따라 부(-)의 간극수압으로 모관흡인력이 증가양상을 보였다. 또한, 깊이별 모관흡인력의 감소양상은 초기강우의 흡수가 시작되는 상단부분에서는 모관흡인력이 감소되고 점차적으로 중단, 하단으로 진행되어 간다. 강우재현이 계속 지속될수록 깊이에 걸쳐 거의 일정해지면서 최종 정상상태에 도달하는 양상을 보인다.

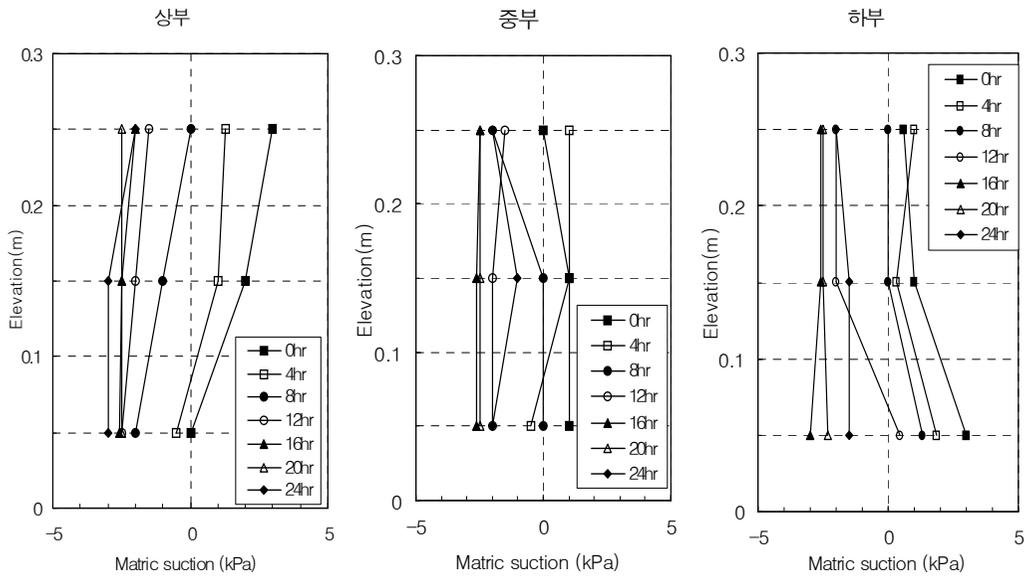


(a) 사면경사 1:2.0

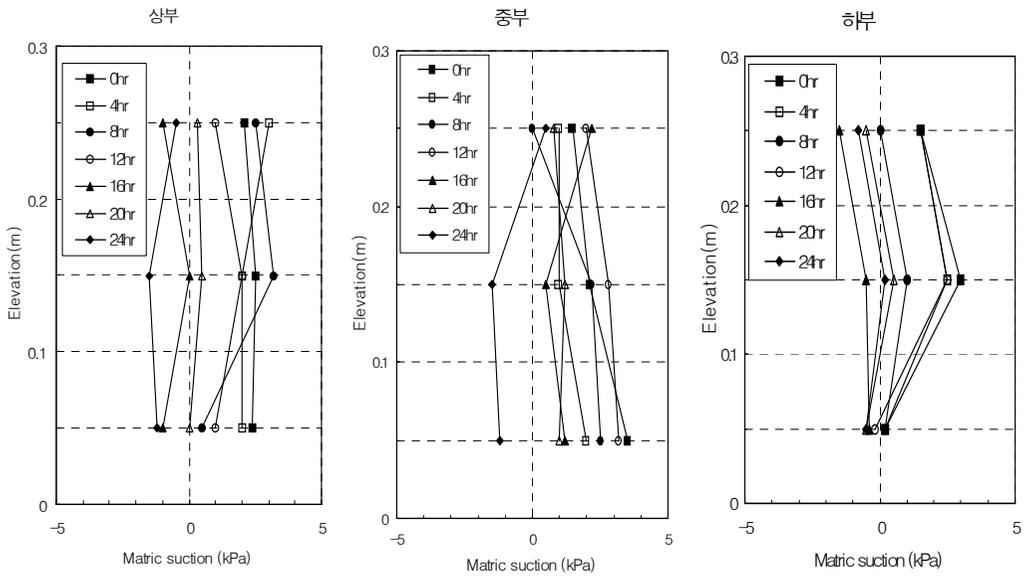


(b) 사면경사 1:1.5

그림 4.25 강우지속시간(습윤과정)에 따른 사면깊이와 모관흡인력의 관계



(a) 사면경사 1:2.0



(b) 사면경사 1:1.5

그림 4.26 방치시간(건조과정)에 따른 사면깊이와 모관흡인력의 관계

습윤과정의 경우 상단에서부터 하단으로 모관흡인력의 감소가 진행되고, 사면경사가 급할수록 모관흡인력이 감소하여 정(+)의 간극수압에 도달하는 시점이 빨라지는 것을 볼 수 있다. 사면경사가 1:2.0인 경우 사면의 상부, 중부, 하부를 보면 8시간 이상 강우가 지속되면 모든 깊이에서 정상상태에 도달한 것을 볼 수 있고 사면경사가 1:1.5인 경우에는 6시간 이상 지속되면 모든 깊이에서 정상상태에 도달하는 것을 볼 수 있다.

건조과정의 경우 상단, 중단, 하단에서 전반적으로 모관흡인력의 증가가 진행되고 사면경사가 완만할수록 모관흡인력의 회복이 더 빨라지는 양상을 보인다. 사면경사가 완만(1:2.0)한 경우 정(+)의 간극수압 4kPa에서 부(-)의 간극수압 4kPa의 범위로 나타나고, 사면경사가 급한 경우 정(+)의 간극수압 3kPa에서 부(-)의 간극수압 2kPa의 범위까지 변화하는 양상을 나타낸다. 사면경사가 완만할 때는 모관흡인력의 회복속도도 빠르고 더 큰 값으로 상승하였고 사면경사가 급한 경우의 모관흡인력의 상승은 상대적으로 미소하였다. 이는 사면경사가 습윤과정 및 건조과정실험에서 모관흡인력의 변화에 영향을 미치는 것이라 할 수 있다.

4.1.4 강우지속시간 변화에 따른 결과

강우지속시간에 따른 체적함수비와 모관흡인력의 변화양상을 살펴보기 위해, 3장의 실험계획에서 제시한 강우강도 조건에 따라 MT-2(지속시간 16시간)과 MT-4(지속시간 8시간)의 모형실험을 실시하였다. 모형사면 내에 설치된 TDR과 Tensiometer의 측정결과로부터 체적함수비와 모관흡인력의 분포를 비교·분석하였다.

가. 체적함수비의 변화

모형사면의 상부(TDR-U-1, TDR-U-2, TDR-U-3)와 하부(TDR-L-1, TDR-L-2, TDR-L-3)에 설치한 TDR로 측정된 체적함수비는 대체로 안정적인 결과를 보였다. 지속시간에 따른 영향은 습윤과정과 건조과정을 동시에 고려하여야 하므로 그림

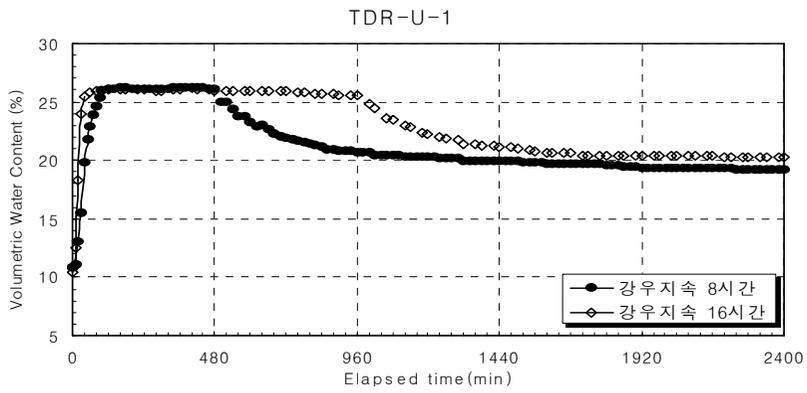
4.27~4.28에서와 같이 나타내었다.

MT-2에서 모형사면 상·하부의 하단에 설치된 TDR-U-3과 TDR-L-3이 정상상태에 도달시간이 약 400분임을 확인하고 정상상태에 도달시간보다 1시간 정도 강우를 지속시켜 강우지속시간(8시간, 16시간)에 따른 특성을 비교하였다. 모형사면의 상·하부 모든 지점에서 정상상태에 도달하였으며 강우재현 종료 후 상단에서부터 체적함수비가 감소하는 양상을 보였다.

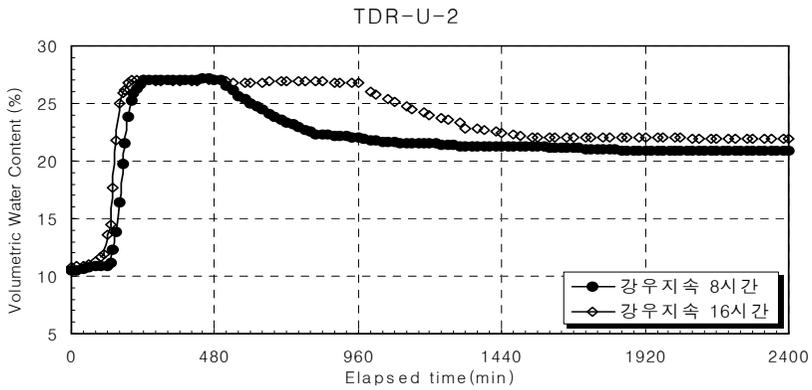
강우지속시간에 따른 실험결과를 살펴보면 체적함수비의 상승시점 및 정상상태의 체적함수비는 거의 유사한 값을 나타내었으며, 체적함수비의 감소시점은 달라짐을 알 수 있다. 그림 4.27과 그림 4.28을 보면 모형사면의 상단에서는 강우재현 후 바로, 중단에서는 80~120분, 하단에서는 240~320분이 경과하면 체적함수비의 증가가 발생하였으며 상단에서는 강우재현 종료 후 바로, 중단에서는 40~80분, 하단에서는 80~160분이 경과하면 체적함수비가 감소하는 경향을 보인다.

사면의 상·하부 상단에서 습윤과정의 정상상태 체적함수비는 강우지속시간에 관계없이 26%이고, 건조과정의 정상상태 체적함수비는 강우지속시간이 8시간인 경우 20%, 강우지속시간이 16시간인 경우 21.5~22%로 나타났다. 다음으로 습윤과정의 정상상태의 체적함수비는 중단의 경우 27%, 하단의 경우 28%로 나타났으며 건조과정의 정상상태의 체적함수비는 중단의 경우 강우지속시간이 8시간일 때 21~22.5%, 강우지속시간이 16시간일 때 22~23%, 하단의 경우 강우지속시간이 8시간일 때 23~24%, 강우지속시간이 16시간일 때 24~25%로 나타났다.

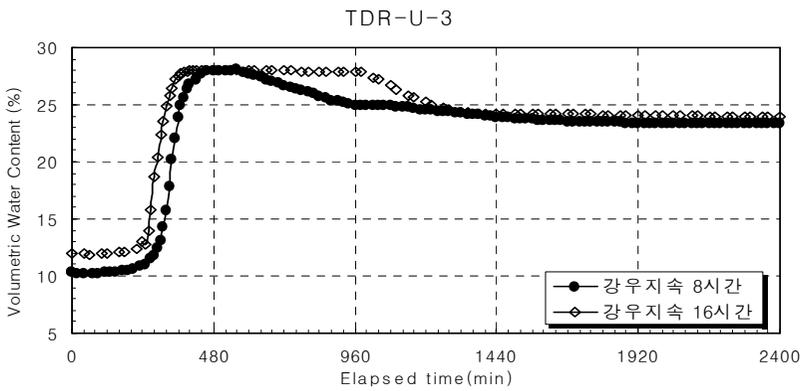
사면의 상·하부 모든 구간에서 강우종료 후 체적함수비는 서서히 감소하는 경향을 보이고, 강우종료 후 방치시간이 긴 강우지속시간 8시간(MT-4)의 체적함수비가 1~2%정도 작은 값으로 나타났다. 건조과정의 체적함수비 감소는 시간에 의존적이므로 방치시간이 긴 강우지속시간 8시간(MT-4)의 조건에서 체적함수비가 작은 값으로 나타난다.



(a) 모형사면의 상단

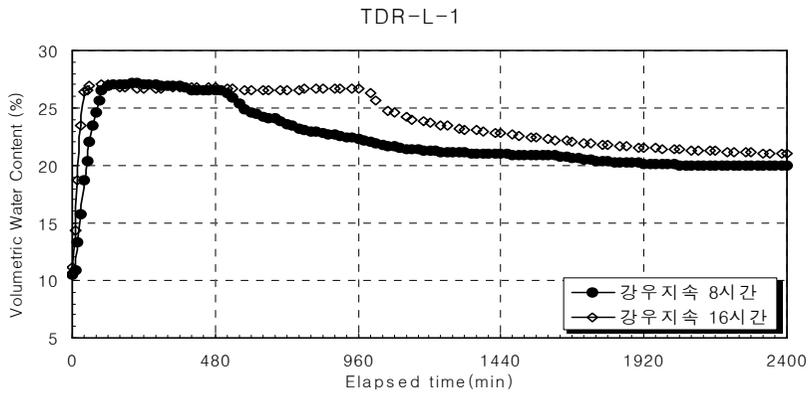


(b) 모형사면의 중단

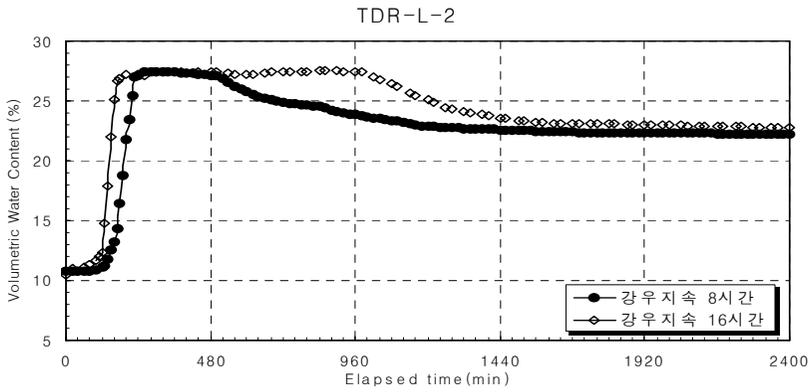


(c) 모형사면의 하단

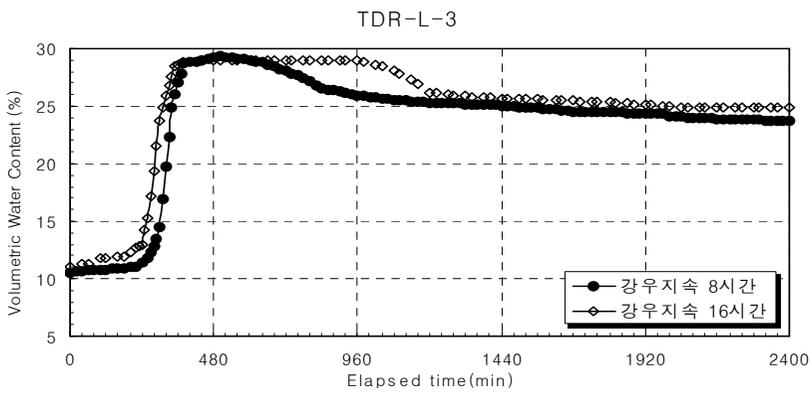
그림 4.27 강우지속시간에 따른 경과시간과 체적함수비의 관계(사면상부)



(a) 모형사면의 상단



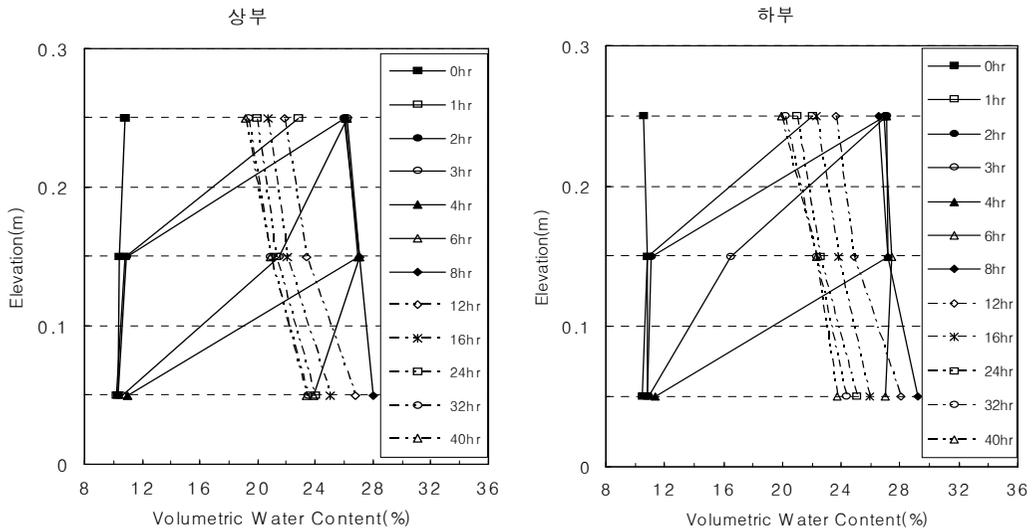
(b) 모형사면의 중단



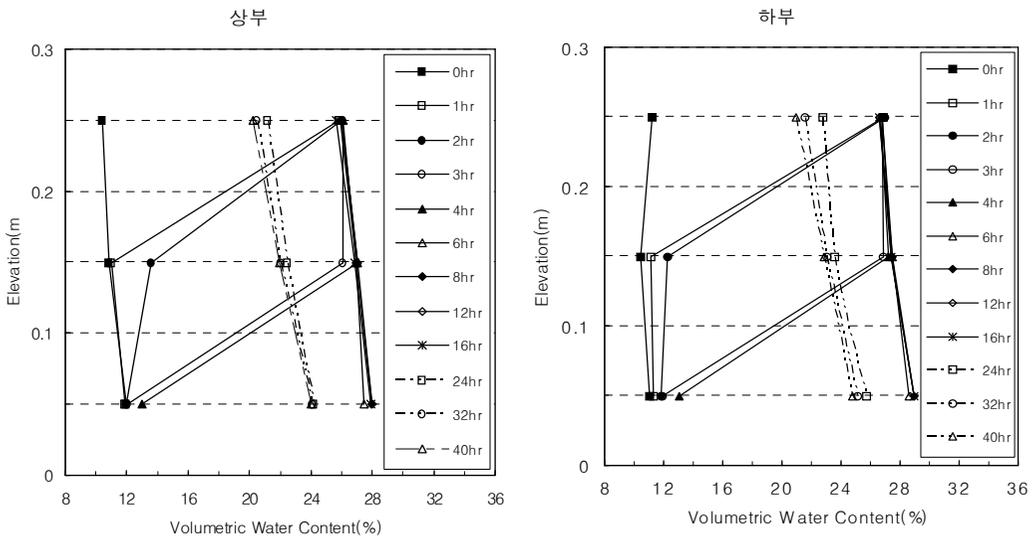
(c) 모형사면의 하단

그림 4.28 강우지속시간에 따른 경과시간과 체적함수비의 관계(사면하부)

모형사면의 상부(TDR-U-1, TDR-U-2, TDR-U-3)와 하부(TDR-L-1, TDR-L-2, TDR-L-3)에 설치된 TDR의 측정결과를 강우지속시간에 따른 사면깊이와 체적함수비의 변화관계로 나타내면 그림 4.29와 같다.



(a) 강우지속시간(8hr)



(b) 강우지속시간(16hr)

그림 4.29 강우지속시간(습윤, 건조과정)에 따른 사면깊이와 체적함수비의 관계

사면의 상·하부의 깊이별 체적함수비를 경과시간에 따라 비교하면 그림 4.29와 같다. 강우재현 지속시간동안은 체적함수비가 증가양상을 보이고, 강우 종료 후 방치시간에는 감소양상을 보였다. 강우지속시간에 따른 깊이별 체적함수비 증가양상은 초기강우의 흡수가 시작되는 상단부분에서는 체적함수비가 증가되고 점차적으로 중단, 하단으로 진행되어가면서 하단의 체적함수비가 증가될 때에 상단의 체적함수비가 줄어들면서 전체 깊이에 걸쳐 거의 일정해져 최종 정상상태에 도달하는 양상으로 나타났다. 또한, 강우 종료 후 방치에 따른 체적함수비의 감소는 상단에서부터 감소가 시작하여 중단, 하단으로 진행되는 것으로 나타났으며 감소량도 상단에서 하단보다 약간 큼을 알 수 있다.

강우지속시간이 다른 두 경우 모두 강우재현 후 약 400분이 지나면 정상상태에 도달하므로 16시간동안 강우를 재현하더라도 체적함수비의 상승이 계속되지는 않는다. 강우재현 종료 후 방치시간에 따른 체적함수비의 감소율은 강우지속시간 8시간(MT-4)인 경우에 더 크게 나타났다. 또한, 강우지속시간 8시간인 경우는 방치시간이 길어 깊이별 체적함수비 차이는 1~2%정도로 거의 발생하지 않고 일정한 값의 체적함수비를 나타내었다.

나. 모관흡인력의 변화

모형사면의 상부(TSM-U-1, TSM-U-2, TSM-U-3), 중부(TSM-M-1, TSM-M-2, TSM-M-3), 하부(TSM-L-1, TSM-L-2, TSM-L-3)에 설치한 tensiometer로 계측된 모관흡인력은 대체로 안정적인 결과를 보였다. 계측값을 경과시간에 따른 모관흡인력(부의 간극수압)의 분포상태로 나타내면 그림 4.30~4.32와 같다.

습윤과정에서의 모관흡인력은 강우가 지속되는 시간까지는 공통적으로 경과시간에 따라 감소하여 정(+)의 간극수압으로 변화하는 경향을 볼 수 있다. 또한, 모형사면의 상·중·하부의 모든 구간에서 강우강도에 따른 모관흡인력의 저하시점 차이는 상단에서 하단으로 갈수록 더 커지는 것을 볼 수 있으며 강우재현 종료 시점에서부터 간극수압이 감소하여 모관흡인력이 증가되는 것을 알 수 있다.

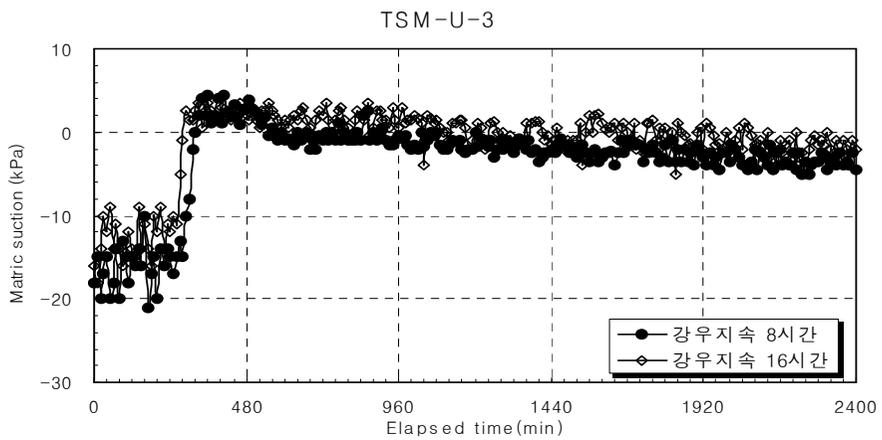
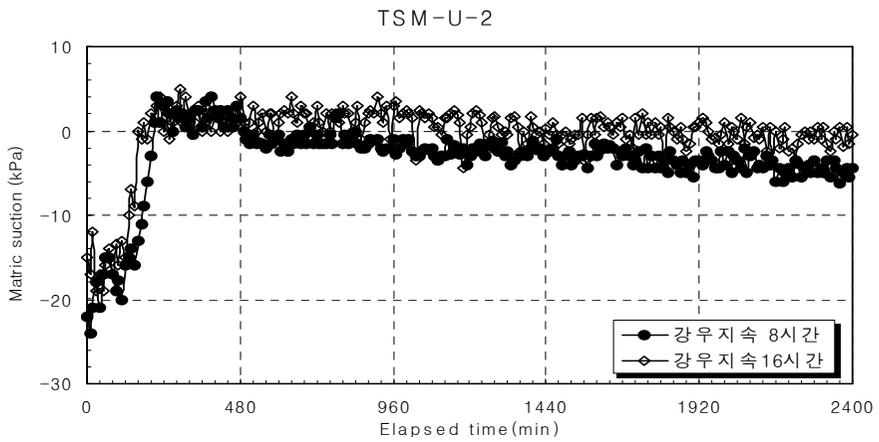
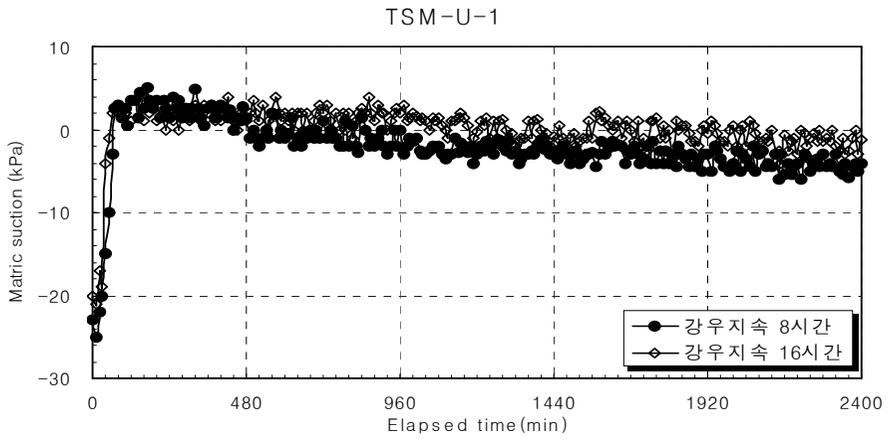


그림 4.30 강우지속 및 방치시간에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(상부)

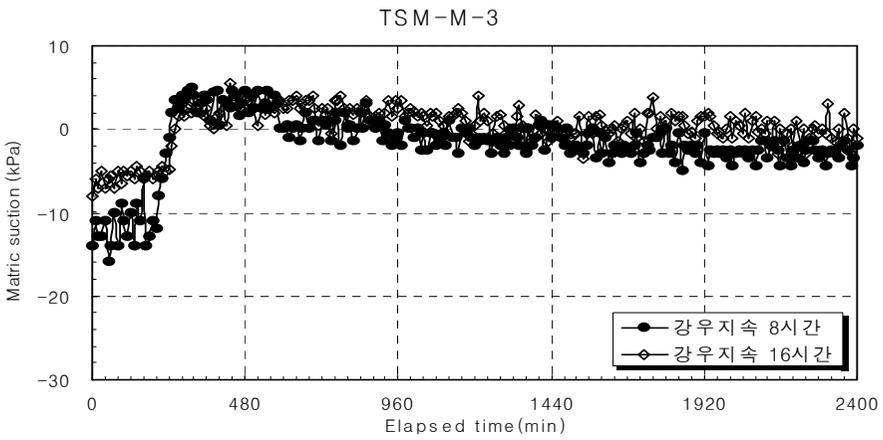
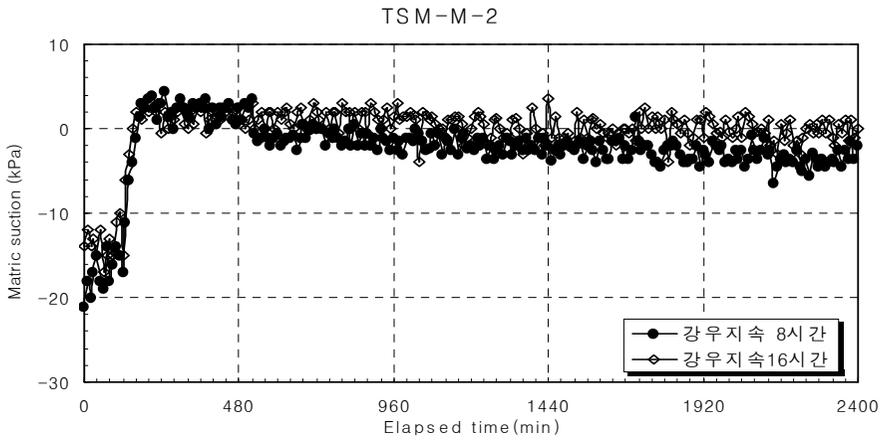
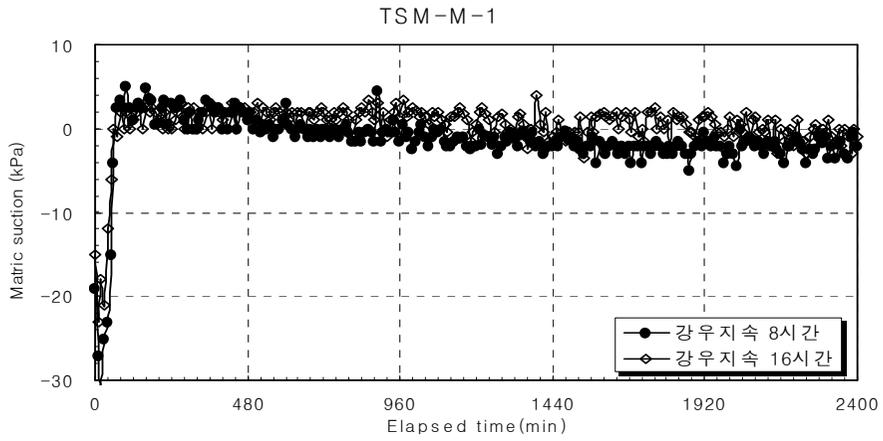


그림 4.31 강우지속 및 방치시간에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(중부)

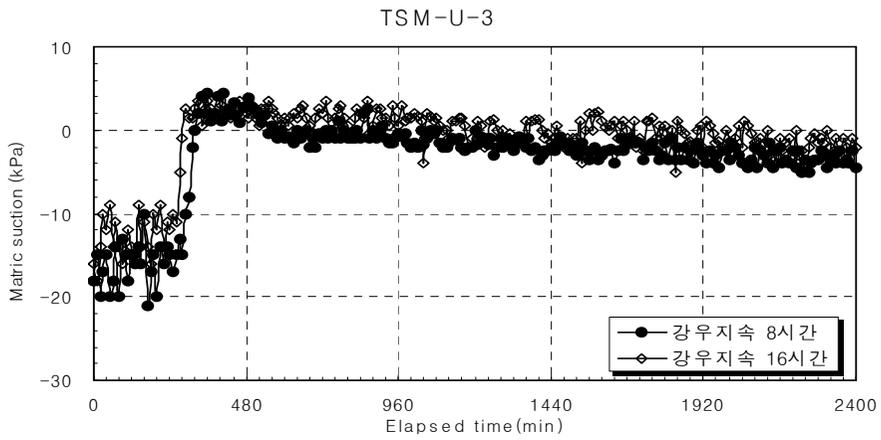
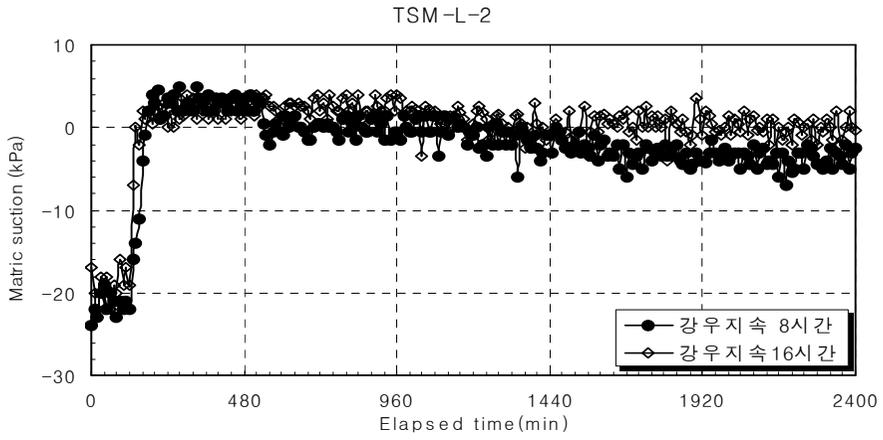
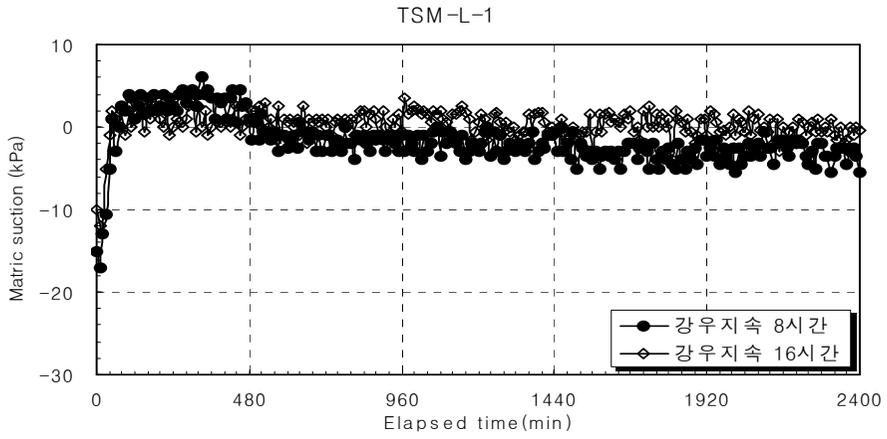


그림 4.32 강우지속 및 방치시간에 따른 경과시간과 모관흡인력의 관계(하부)

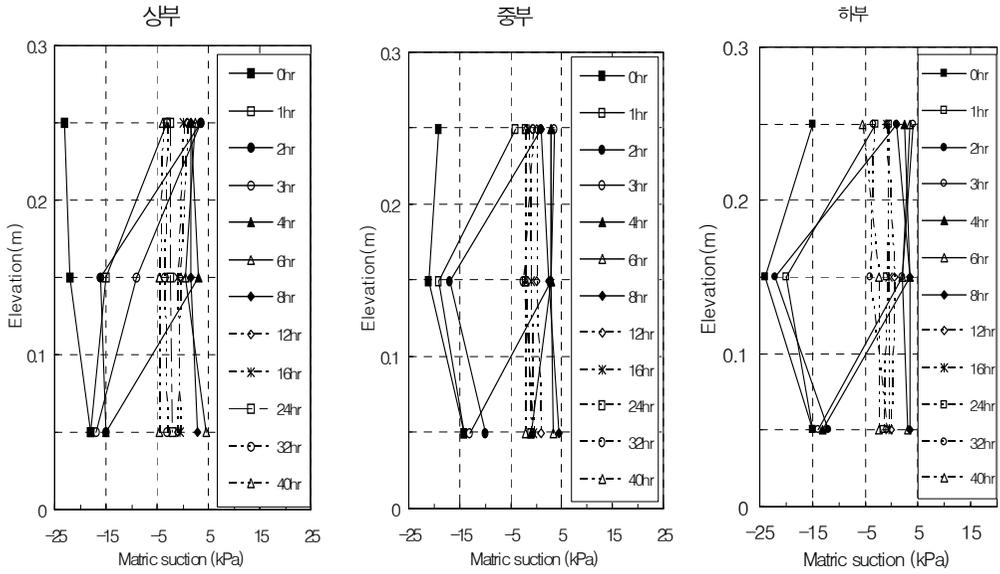
습윤과정의 모관흡인력은 체적함수비와 동일한 양상으로 나타났다. 강우지속시간이 8시간인 경우의 변화양상은 강우지속시간 16시간인 경우의 8시간에 양상과 거의 유사하게 나타났고, 8시간이 경과한 후에 모두 크게 감소하는 경향을 보인다.

강우지속시간 8시간(MT-4)의 경우는 8시간까지는 간극수압이 상승하다가 강우재현 종료 후에는 감소하는 양상을 보이며 강우지속시간 16시간(MT-2)의 경우 계속된 강우에 의한 부분적인 포화로 간극수압이 상승하는 모습을 보이고 강우재현 종료 후 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 또한, 간극수압의 상승시점 즉 모관흡인력의 감소시점은 강우지속조건에 관계없이 거의 동일하게 나타났다. 이처럼 강우지속시간이 모관흡인력에 미치는 영향은 강우종료 후 모관흡인력의 회복정도가 다르다. 강우지속시간이 짧으면 모관흡인력의 회복이 빠르고 강우지속시간이 길면 회복시간이 길어짐을 알 수 있다.

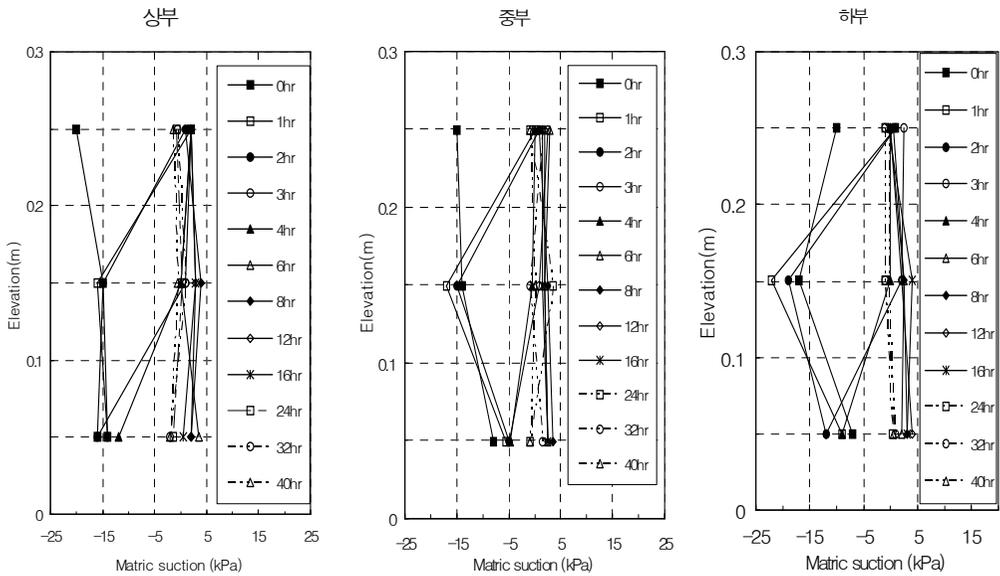
모형사면의 상부(TSM-U-1, TSM-U-2, TSM-U-3), 중부(TSM-M-1, TSM-M-2, TSM-M-3), 하부(TSM-L-1, TSM-L-2, TSM-L-3)에 설치한 tensiometer의 전반적인 측정결과를 깊이와 경과시간에 따라 모관흡인력의 변화관계를 살펴보면 다음 그림 4.33과 같다.

모형사면의 상·중·하부의 깊이별 모관흡인력을 경과시간에 따라 비교하면 강우가 지속될 때에는 부(-)의 간극수압에서 정(+)의 간극수압으로 감소양상을 보이며, 강우종료 후 방치시간이 경과함에 따라 부(-)의 간극수압으로 모관흡인력이 증가양상을 보였다. 또한, 깊이별 모관흡인력의 감소양상은 초기강우의 흡수가 시작되는 상단부분에서는 모관흡인력이 감소되고 점차적으로 중단, 하단으로 진행되어 간다. 강우재현이 계속 지속될수록 깊이에 걸쳐 거의 일정해지면서 최종 정상상태에 도달하는 양상을 보인다.

강우지속시간에 따른 깊이별 간극수압을 비교하면 강우지속시간이 길 때 보다 강우지속시간이 짧은 경우의 모관흡인력이 크게 나타나며 특히, 사면의 하부에서 큰 모관흡인력을 나타낸다.



(a) 강우지속시간(8hr)



(b) 강우지속시간(16hr)

그림 4.33 강우지속시간(습윤, 건조과정)에 따른 사면깊이와 모관흡인력의 관계

4.2 함수특성곡선실험의 결과 및 분석

함수특성곡선실험(SWCC Cell Test)에서 얻어진 실험결과를 Soil-Vision에 적용하여 함수특성곡선을 산정하였다. 각 모델에 따라 얻어진 함수특성곡선을 불포화토의 특성과 관련하여 비교, 분석을 실시하였다.

4.2.1 함수특성곡선실험의 결과

함수특성곡선실험(SWCC Cell Test) 장치를 이용하여 습윤과정과 건조과정의 실험을 수행하였으며 그 결과 값은 그림 4.34와 같다. 건조과정실험의 경우 가압범위 1~100kPa에서 17~30.5%의 체적함수비를 측정 할 수 있었으며, 습윤과정실험의 경우 압력하강범위 20~1kPa에서 2~27%의 체적함수비를 얻을 수 있었다.

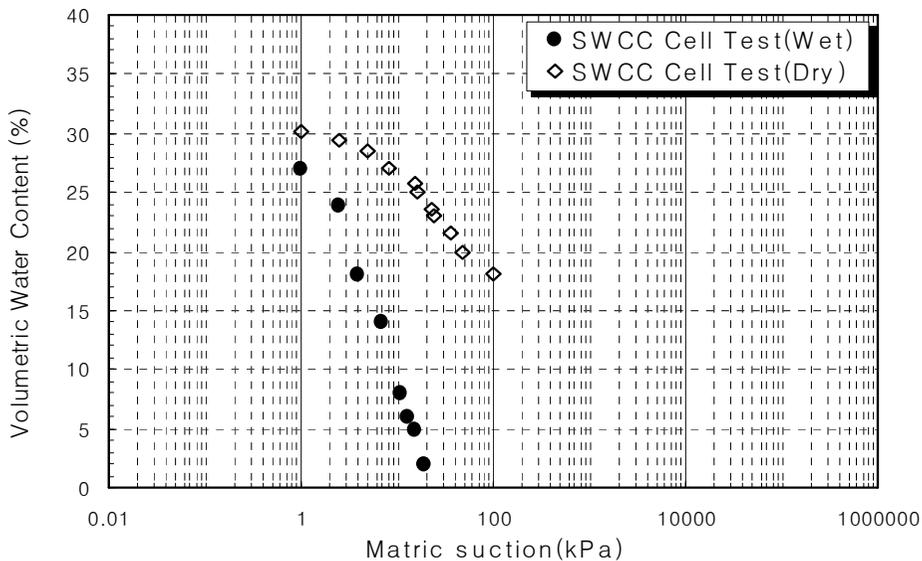
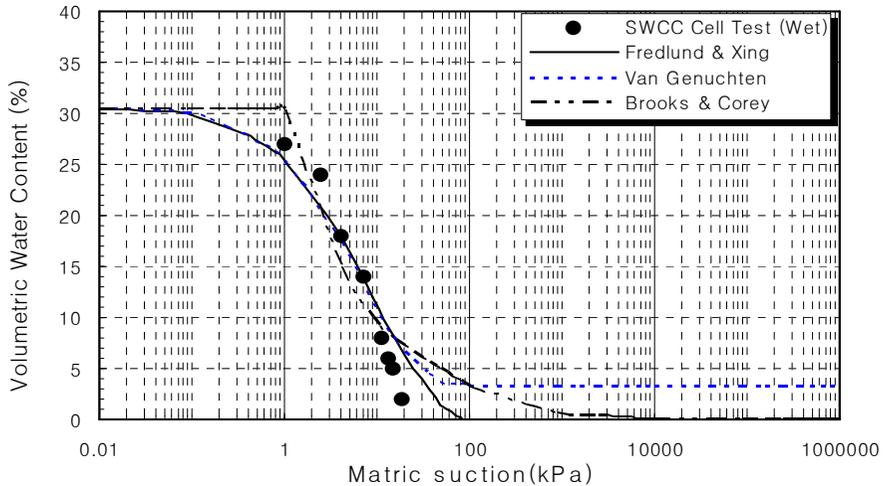
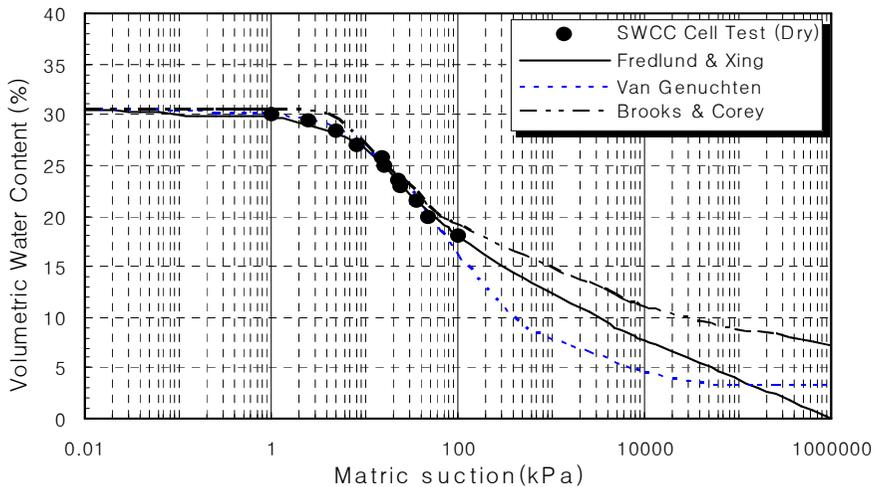


그림 4.34 함수특성곡선실험(SWCC Cell Test) 결과

습윤과정과 건조과정의 함수특성곡선 실험결과를 Soil-Vision 프로그램에 적용하여 Brooks & Corey, Van Genuchten, Fredlund & Xing의 3가지 모델식에 따른 함수특성곡선을 산출하였다. 다음 그림 4.35는 습윤과정과 건조과정실험으로 구분하여 함수특성곡선을 나타낸 것이며, 그림 4.36~4.38은 함수특성곡선 모델별로 구분하여 함수특성곡선의 형태를 나타낸 것이다.



(a) 습윤과정 실험



(b) 건조과정 실험

그림 4.35 함수특성곡선실험(SWCC Cell Test) 결과와 모델별 함수특성곡선

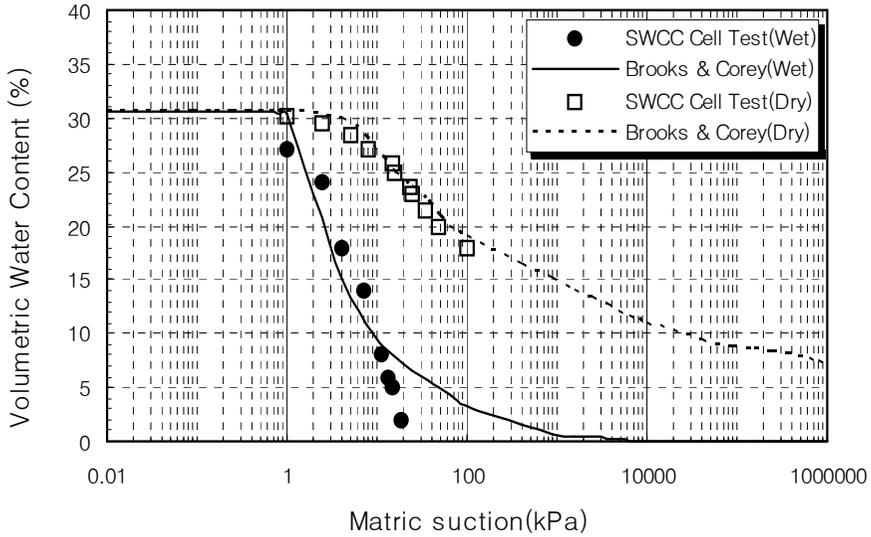


그림 4.36 실험결과를 이용한 *Brooks & Corey* 모델의 함수특성곡선

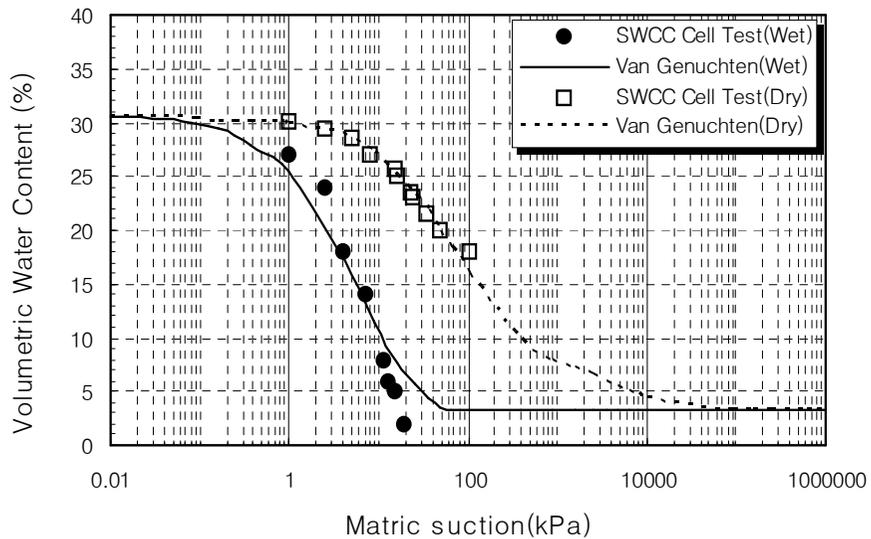


그림 4.37 실험결과를 이용한 *Van Genuchten* 모델의 함수특성곡선

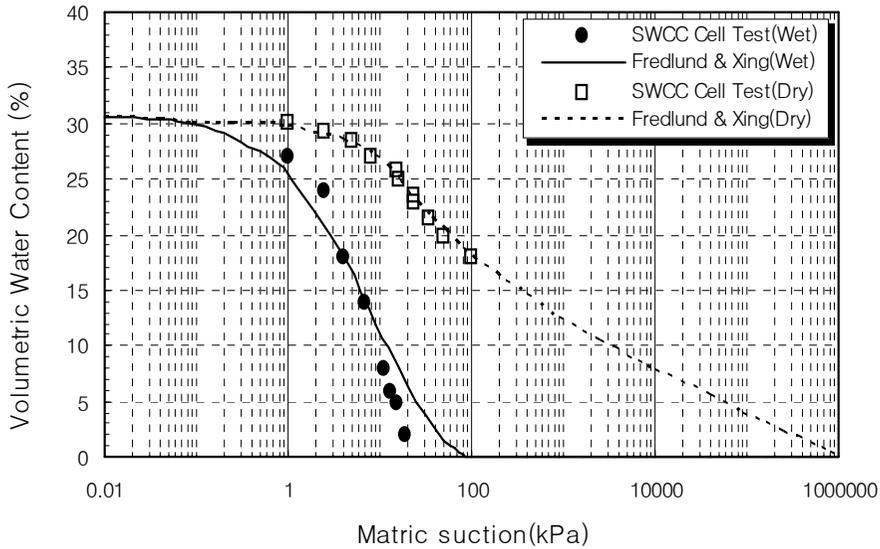


그림 4.38 실험결과를 이용한 *Fredlund & Xing* 모델의 함수특성곡선

Brooks & Corey, Van Genuchten, Fredlund & Xing의 3가지 모델식에 따른 함수특성곡선을 형상화하여 산출한 계수와 불포화토의 특성을 표 4.1과 표 4.2에 습윤과정과 건조과정으로 구분하여 나타내었다.

함수특성곡선 실험값을 이용하여 모델별 불포화 특성값을 산정한 결과 모델식에 따라 큰 차이는 없으나 비교적 단순한 모델인 Brooks & Corey식으로 건조과정에서 얻어진 잔류함수비와 모관흡인력이 Van Genuchten모델과 Fredlund & Xing모델에 비교하여 큰 차이를 나타내었다. 이는 Fredlund & Xing모델식과 Van Genuchten모델식의 정도가 Brooks & Corey의 모델에 비해 상대적으로 더 높은 것으로 나타났다.

표 4.2와 같이 습윤과정 함수특성곡선의 습윤 전면흡인력은 약 1kPa이하에서 나타나고 잔류범위는 Brooks & Corey모델의 경우 33.64kPa, Van Genuchten모델의 경우 40.53kPa, Fredlund & Xing모델의 경우 49.55kPa로 나타났다. 건조과정 함수특성곡선의 공기 함입값(AEV)은 Van Genuchten식을 제외하고는 5kPa이하에서 나

타나고 잔류영역의 범위는 500kPa이상의 높은 모관흡인력으로 나타났다. 함수특성 곡선상의 습윤과정과 건조과정의 경로가 서로 다르게 나타나는 것으로 보아 실제 지반에 강우로 인한 침투가 발생할 때 불안정의 가장 주요인인 불포화 투수계수도 서로 다른 변화양상을 보이게 될 것으로 생각된다.

표 4.1 함수특성곡선 모델에 따른 계수

구 분	Brooks & Corey		Van Genuchten		Fredlund & Xing	
습윤과정	λ	0.93	a	0.03	a	20.28
	ψ	0.52	n	1.02	n	1.45
	-	-	m	7.20	m	5.10
건조과정	λ	4.02	a	0.002	a	7.75
	ψ	0.13	n	0.84	n	0.84
	-	-	m	1.78	m	0.35

표 4.2 함수특성곡선 모델별 공기함입값(AEV)과 습윤전면흡인력(WFS)

구 분		Brooks & Corey	Van Genuchten	Fredlund & Xing	
습 윤 과 정	습윤전면 흡인력 (WFS)	$\Theta(\%)$	30.20	30.10	30.20
		$\psi(\text{kPa})$	0.95	0.58	0.65
	잔류량	$\Theta_r(\%)$	3.15	2.87	0.75
		$\psi_r(\text{kPa})$	33.64	40.53	49.55
건 조 과 정	공기함입값 (AEV)	$\Theta(\%)$	30.2	30.00	30.00
		$\psi(\text{kPa})$	3.86	9.37	4.24
	잔류량	$\Theta_r(\%)$	1.32	3.24	3.58
		$\psi_r(\text{kPa})$	25000	985.76	648.75
	최대경사 (Max. Slope)		0.24	0.39	0.27

4.2.2 추정법과 실험에 의한 함수특성곡선 비교

불포화토의 복잡한 일련의 실험을 수행하지 않고 기본물성으로부터 함수특성곡선을 구하는 추정(PTF)법 중 비교적 널리 사용되는 Fredlund & Wilson 추정법과 Arya & Paris 추정법으로 건조과정의 함수특성곡선을 구하였다. 또한, SWCC Cell 실험결과를 바탕으로 Brooks & Corey, van Genuchten, Fredlund & Xing의 3가지 모델로 함수특성곡선을 구하였다. 얻어진 함수특성곡선에서 불포화토의 특성값을 비교하면 다음의 표 4.3과 그림 4.39~4.41에 나타낸 바와 같다.

표 4.3 함수특성곡선에서 얻어진 불포화토의 특성값(건조과정)

구 분		추정법		SWCC Cell Test		
		Fredlund & Wilson	Arya & Paris	Brooks & Corey	Van Genuchten	Fredlund & Xing
공기함입값 (AEV)	θ (%)	30.50	30.20	30.20	30.00	30.00
	Ψ (kPa)	0.96	0.10	3.86	9.37	4.24
잔류량	θ_r (%)	4.50	1.50	1.32	3.24	3.58
	Ψ_r (kPa)	70.00	35.00	25000.00	985.76	648.75
최대경사 (Max. Slope)		1.86	0.97	0.24	0.39	0.27

추정법과 SWCC Cell 실험결과로 산정된 함수특성곡선은 공기함입시 체적함수비와 모관흡인력만 유사하게 나타내고 나머지는 거의 유사점을 찾을 수 없었다. 함수특성곡선의 형태를 비교하면 Brooks & Corey, van Genuchten, Fredlund & Xing의 3가지 모델 중 van Genuchten모델과 가장 유사한 형태를 보였지만 불포화 특성값은 많은 차이가 있는 것으로 나타났다.

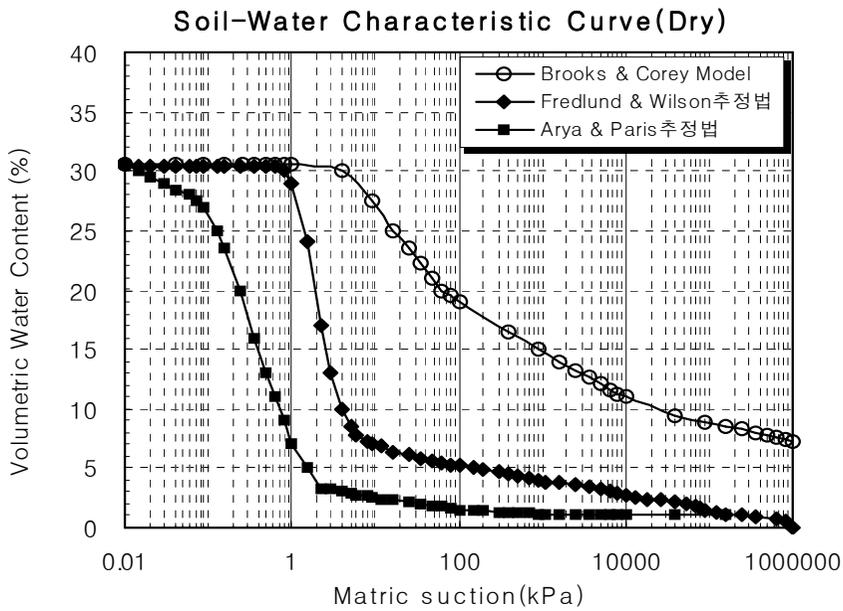


그림 4.39 추정(PTF)법과 실험결과(Brooks & Corey)에 의한 함수특성곡선

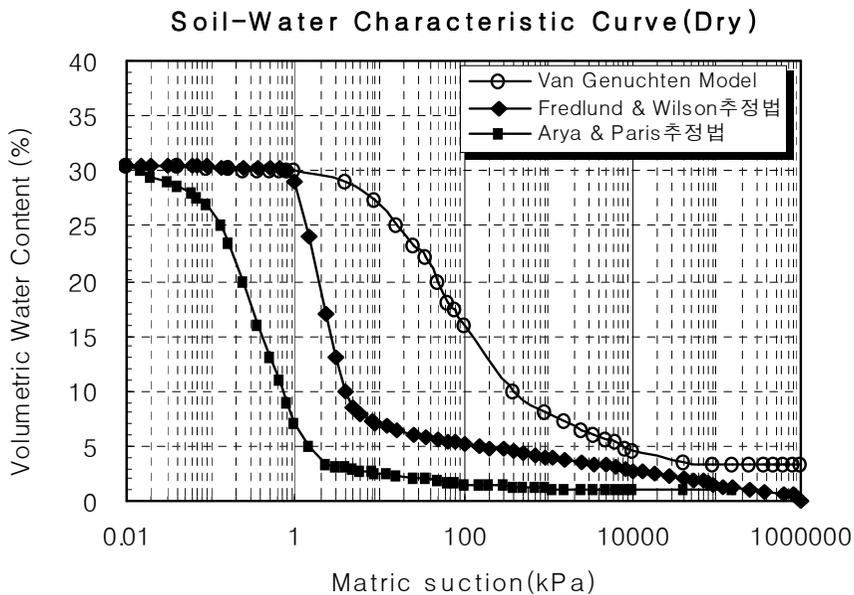


그림 4.40 추정(PTF)법과 실험결과(van Genuchten)에 의한 함수특성곡선

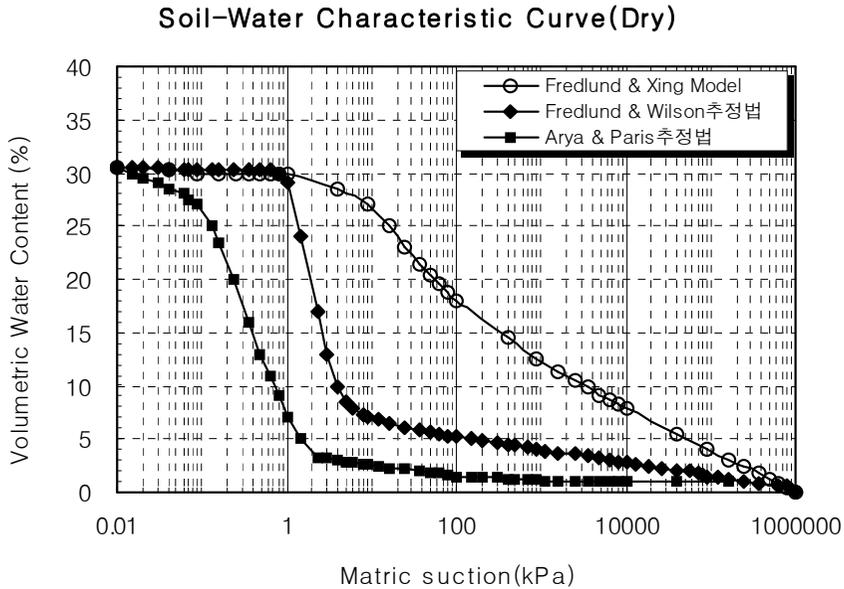


그림 4.41 추정(PTF)법과 실험결과(Fredlund & Xing)에 의한 함수특성곡선

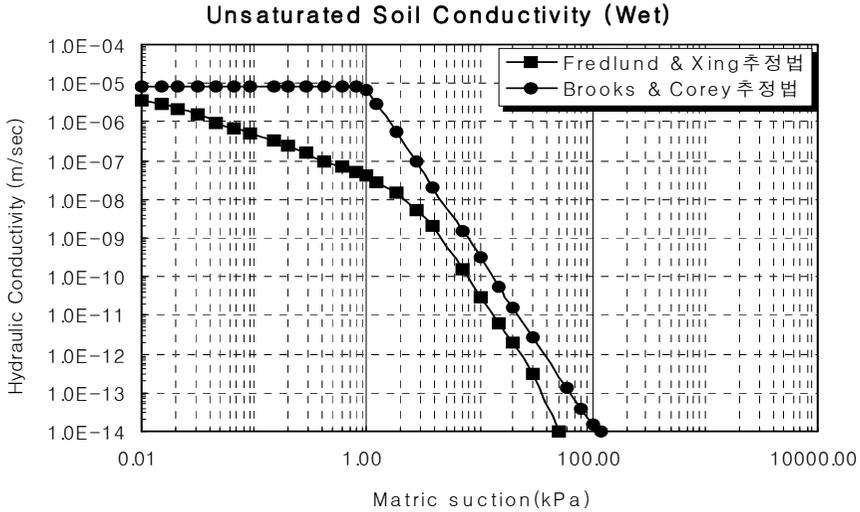
이러한 결과로부터 불포화토의 함수비와 입도분포곡선, 간극률이나 모래함유율, 물리·구조적 특성만으로 함수특성곡선을 추정하여 적용하는 것은 신뢰성에 큰 문제가 있음을 알 수 있다. 그러므로 보다 실제에 근접한 해석을 위해서는 SWCC Cell 실험을 수행하여 불포화 함수특성곡선 모델을 활용하는 것이 바람직 할 것으로 여겨진다.

4.2.3 불포화토의 추정 투수특성곡선

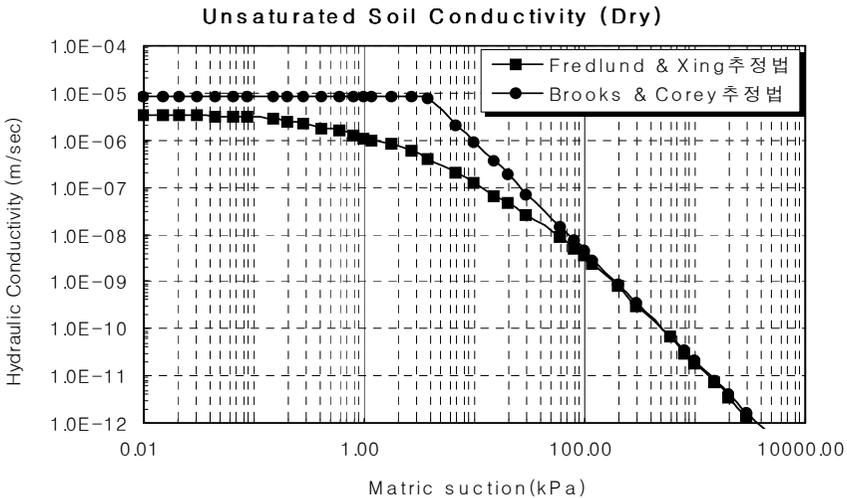
SWCC Cell 실험결과로부터 구한 함수특성곡선과 실내투수시험으로 얻어진 대상 화강 암질 풍화토의 포화투수계수를 기반으로 Fredlund & Xing, Brooks & Corey, Mualem의 불포화 투수계수 추정식에 적용하여 투수특성곡선을 구하면 그림 4.42와 같다.

습윤과정의 투수특성곡선을 Fredlund & Xing추정법과 Brooks & Corey추정법으로 추정한 결과 그림 4.42(a)와 같으며 투수특성곡선의 형상에 약간의 차이를 보이지

반 전반적으로 거의 동일한 형태로 추정되었다. 또한, 그림 4.42(b)에 나타난 바와 같이 건조과정의 투수특성곡선을 추정할 결과, Fredlund & Xing추정법과 Brooks & Corey추정법은 모관흡인력 100kPa이상에서는 매우 유사하고 100kPa이하에서는 약간의 차이를 보이지만 전반적으로 유사한 투수특성곡선의 형태를 나타내었다.

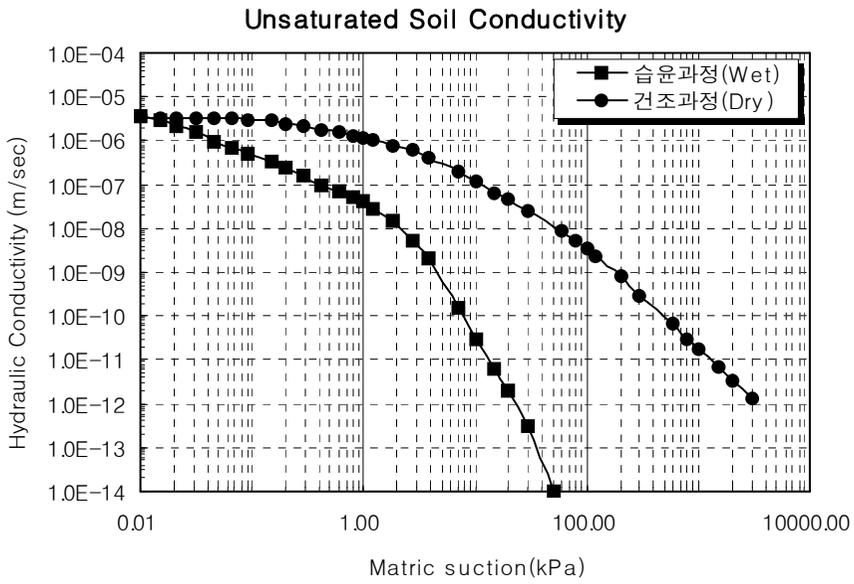


(a) 습윤과정

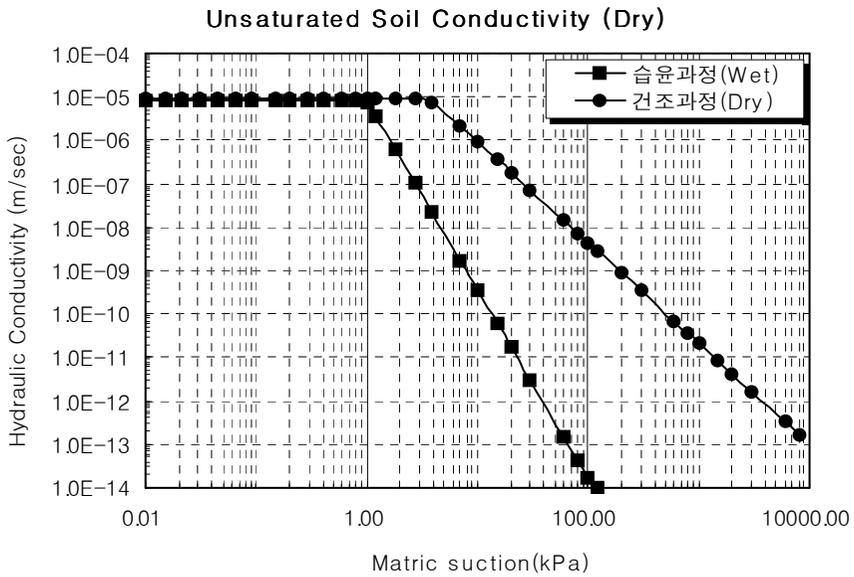


(b) 건조과정

그림 4.42 추정(PTF)법에 의한 투수특성곡선



(a) Fredlund & Xing 추정법



(b) Brooks & Corey 추정법

그림 4.43 투수계수곡선의 이력현상

그림 4.43은 Fredlund & Xing 추정법과 Brooks & Corey 추정법을 이용하여 얻은 습윤과정과 건조과정의 불포화 투수특성곡선을 나타내는데, 동일한 모관흡인력에서 습윤과정과 건조과정의 투수계수가 서로 다른 이력현상을 보인다. 이러한 이력현상은 같은 모관흡인력이라 할지라도 습윤과정에서는 작은 투수계수를 나타내고 건조과정에서는 큰 투수계수를 나타낸다. 또한, 함수특성곡선과 포화투수계수로부터 추정된 투수특성곡선 중 Fredlund & Xing 추정법으로 얻은 값은 모관흡인력이 약 2kPa 정도까지는 완만하게 감소하다가 그 이후에는 급격히 감소하는 경향을 보인다.

Brooks & Corey 추정법에 의한 투수계수는 습윤과정에서는 1kPa, 건조과정에서는 3kPa 정도일 때까지는 포화투수계수와 동일한 값을 가지다가 모관흡인력이 증가할수록 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 건조과정보다 습윤과정에서 모관흡인력의 감소에 따른 투수계수의 감소가 급격히 발생하는 것으로 나타났다.

4.3 모형실험결과에 의한 불포화토의 침투특성 분석

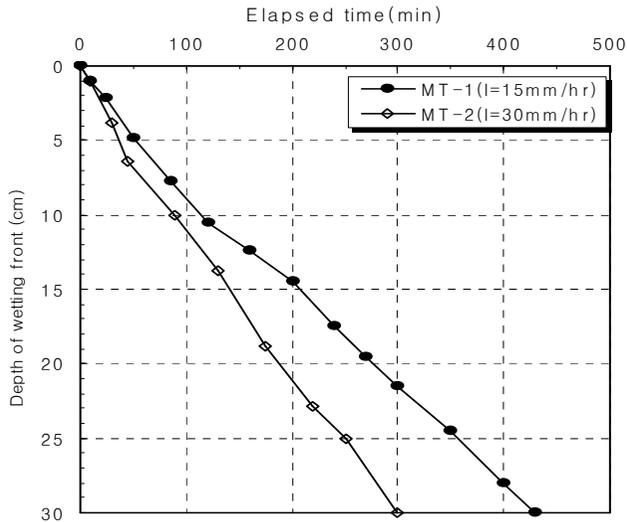
4.3.1 습윤전선의 깊이

가. 모형실험에 의해 측정된 습윤전선의 깊이

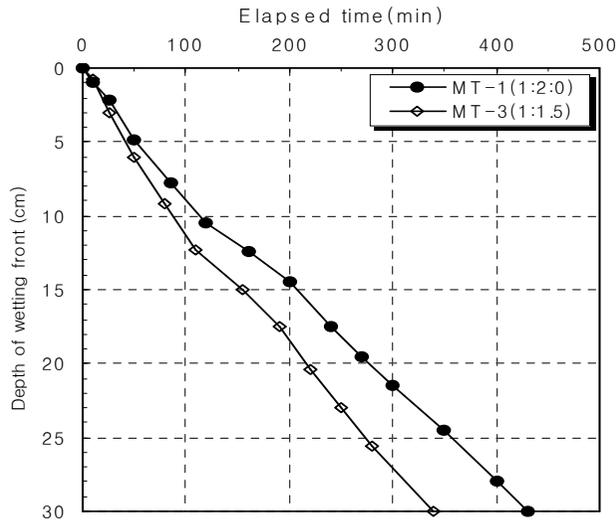
그림 4.44는 모든 강우재현 모형실험 전 노건조된 대상시료에 대해 강우조건(MT-1, MT-2)과 사면경사조건(MT-1, MT-3)으로 실험을 수행하여 측정된 습윤전선의 깊이 결과를 나타낸 것이며, 그림 4.45는 본 연구에서 수행한 MT-1의 강우재현 시 경과시간에 따른 습윤전선 깊이의 실제 변화양상을 나타낸 것이다.

먼저 강우조건(MT-1, MT-2)에 따른 측정결과를 살펴보면 시간경과에 따른 습윤전선의 진행은 거의 직선 형태로 증가되는 양상을 보이는데 MT-1은 430분, MT-2는 300분이 경과 후 모형사면 바닥면(30cm)까지 도달하는 것으로 나타났다. 강우조건에 따른 습윤전선의 깊이 변화를 비교해보면 강우강도가 클수록 습윤전선이 빨리 진행됨을 알 수 있다. 사면경사조건(MT-1, MT-3)에 따른 측정결과를 살

펴보면 강우조건에서와 유사하게 거의 직선 형태로 증가되는 양상을 보이며 MT-1은 430분, MT-3은 340분이 경과 후 모형사면 바닥면(30cm)까지 도달하는 것으로 나타났다. 또한, 사면경사가 급할수록 습윤전선이 빨리 진행됨을 알 수 있다.



(a) 강우강도

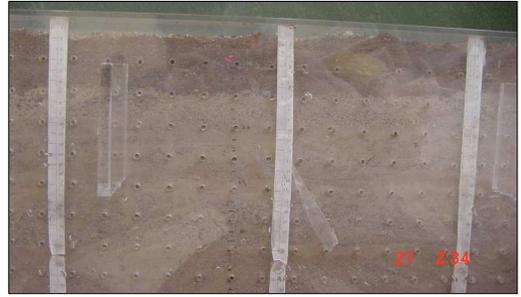


(b) 사면경사

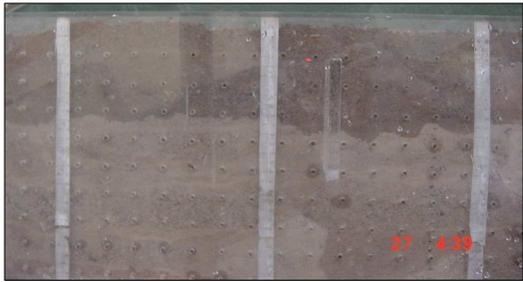
그림 4.44 경과시간에 따른 습윤전선 깊이의 변화



(a) 강우재현 시작



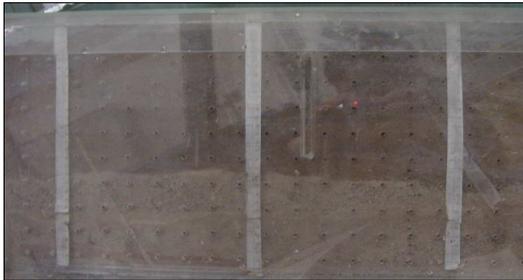
(b) 강우재현 후 60분 경과



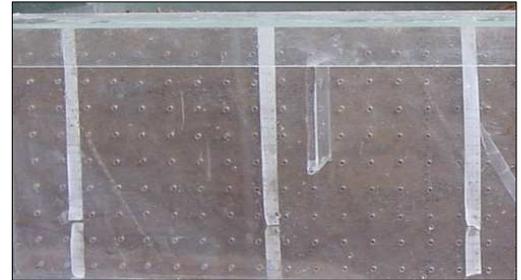
(c) 강우재현 후 120분 경과



(d) 강우재현 후 180분 경과



(e) 강우재현 후 240분 경과



(f) 강우재현 후 360분 경과



(g) 강우재현 후 420분 경과



(h) 강우재현 종료

그림 4.45 강우재현실험에 의한 습윤대의 진행과정(MT-1)

먼저 강우조건(MT-1, MT-2)에 따른 측정결과를 살펴보면 시간경과에 따른 습윤전선의 진행은 거의 직선 형태로 증가되는 양상을 보이는데 MT-1은 430분, MT-2는 300분이 경과 후 모형사면 바닥면(30cm)까지 도달하는 것으로 나타났다.

강우조건에 따른 습윤전선의 깊이 변화를 비교해보면 강우강도가 클수록 습윤전선이 빨리 진행됨을 알 수 있다. 사면경사조건(MT-1, MT-3)에 따른 측정결과를 살펴보면 강우조건에서와 유사하게 거의 직선 형태로 증가되는 양상을 보이며 MT-1은 430분, MT-3은 340분이 경과 후 모형사면 바닥면(30cm)까지 도달하는 것으로 나타났다. 또한, 사면경사가 급할수록 습윤전선이 빨리 진행됨을 알 수 있다.

나. 모델식과 모형실험에 의한 습윤전선의 깊이 검토

제작된 모형사면은 강우재현 초기에는 사면 내에 습윤대가 존재하지 않고 시간이 경과함에 따라 사면과 평행에 가까운 형태로 습윤대가 형성된다. 강우발생시 지표침투로 인한 사면 내에 형성된 습윤대는 대상 흙의 물리적 특성, 함수특성 등에 따른 달라지는 고유한 값이다.

그림 4.46~4.47은 습윤전선의 깊이를 앞서 제시한 모델식(Lumb방법, Pradel & Radd방법)으로 산정된 값을 모형실험에 의해 측정된 값과 비교하여 나타낸 것이다. 먼저, 그림 4.46에 모형실험(MT-2)에서 실측된 값과 세립질 함유량에 따라 얻어진 모관흡인력, 체적함수비의 차로 Lumb방법과 Pradel & Radd방법에 적용하여 산정된 결과를 나타내었다.

Lumb방법과 Pradel & Radd방법 모두 실측값에 비해 동일시간에 습윤전선의 깊이가 크게 나타나 과대평가되는 것으로 나타났으며, 특히 Pradel & Radd방법은 Lumb방법에 비해 상당히 과대평가 되는 것으로 나타났다. 습윤전선의 깊이가 사면 저부에 최종적으로 도달하는 시간을 기준으로 비교하면 Lumb방법은 실측값보다 16.67%, Pradel & Radd방법은 33.33%정도 과대평가되는 것으로 나타나 Lumb방법이 Pradel & Radd방법에 비해 상대적으로 잘 부합되는 경향을 보였다.

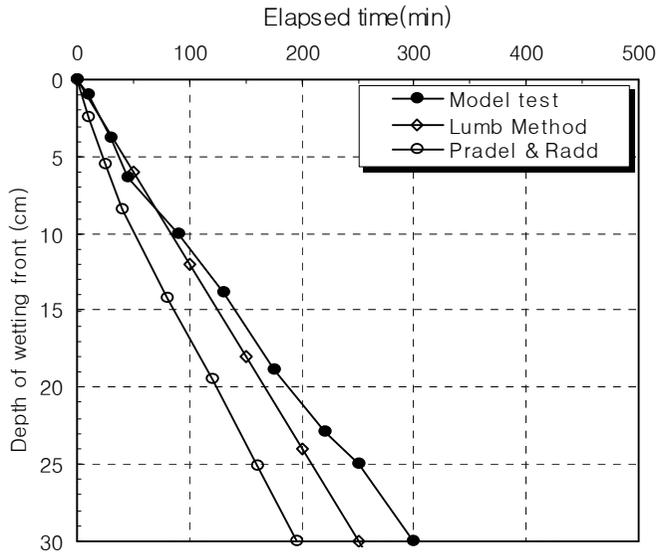
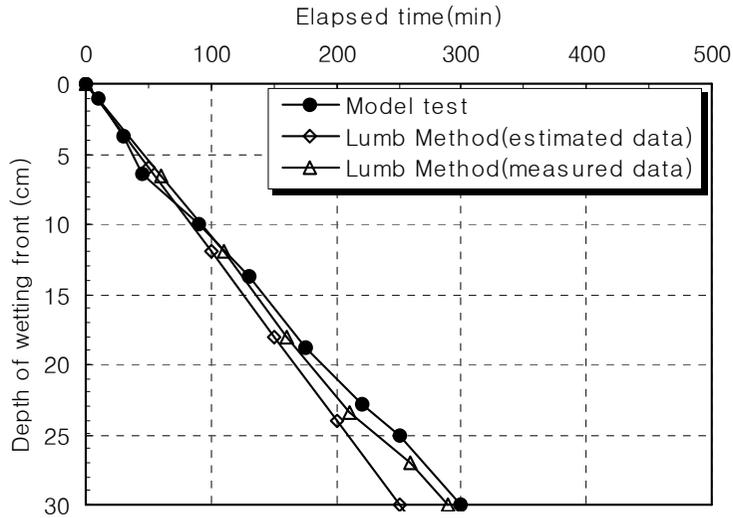


그림 4.46 강우재현 후 경과시간에 따른 습윤전선의 깊이(예측식별)

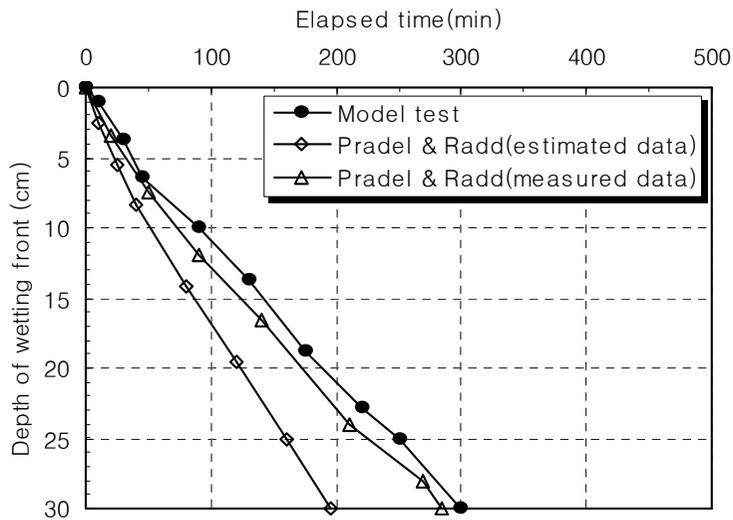
다음 그림 4.47은 습윤전선의 깊이를 산정하는 각각의 방법에 따라 세립질 함유량에 의해 얻은 모관흡인력과 체적함수비 차로 산정한 경우와 실내 강우모형실험에서 얻은 모관흡인력과 체적함수비 차로 산정한 값의 분포를 나타낸 것이다.

그림 4.47(a)에서 보는바와 같이 Lumb방법으로 구한 습윤전선의 깊이를 살펴보면, 세립질 함유량을 기준으로 모관흡인력과 체적함수비 차로 산정한 경우는 실측값에 비해 동일시간에 습윤전선의 깊이가 크게 나타나 과대평가됨을 알 수 있었다. 또한, 실제 실내모형실험에서 얻은 입력변수를 사용한 경우에는 실측값보다 조금 과대평가되나 상당히 근접한 값으로 나타남을 알 수 있었다. 그림 4.47(b)에서 보는바와 같이 Pradel & Radd방법으로 구한 습윤전선의 깊이를 살펴보면 세립질 함유량을 기준으로 얻은 모관흡인력과 체적함수비 차로 산정한 경우가 Lumb방법에서 보다 실측값에 비해 더 과대평가되는 양상을 보이고, 실제 실내모형실험에서 얻은 입력변수를 사용한 경우에는 Lumb방법에서와 마찬가지로 실측값과 거의 유사한 경향을 보였다. 습윤전선의 깊이가 사면저부에 최종적으로 도달하는 시간을 기준으로 비교하면 Lumb방법은 세립질 함유량에 의해 얻어진 값을 적용하여 산정할 경우 16.7%, 실

내모형실험에서 얻어진 값을 적용하여 산정할 경우 5.0%정도 빠르게 진행되는 것으로 나타났으며, Pradel & Radd방법은 각각의 경우에 대해 33.3%와 6.7%정도 빠르게 진행되는 것으로 나타났다.



(a) Lumb Method



(b) Pradel & Radd

그림 4.47 강우재현 후 경과시간에 따른 습윤전선의 깊이(입력변수 산정방법)

Pradel & Radd의 습윤전선깊이 예측식이 과대평가되는 것은 Lumb의 예측식에 사용되지 않은 모관흡인력에 의한 영향으로 판단되며, 모관흡인력은 세립질 함유량에 의해 얻어진 값이 실측값에 비교해서 과대하게 산정됨을 알 수 있다. 따라서 습윤전선의 깊이산정은 실제 모형실험을 통해 얻어진 입력변수로 구하는 것이 세립질 함유량에 의해 얻어진 입력변수로 계산하는 것보다 실측값에 더 근접하게 산정 할 수 있다.

4.3.2 불포화된 화강암질 풍화토의 이력현상

강우재현 모형실험을 통해 습윤과정과 건조과정에서 체적함수비와 간극수압의 분포를 알 수 있다. 그림 4.48~4.49는 본 연구에서 수행한 강우재현 모형실험(MT-1, MT-2, MT-3, MT-4)에서 계측된 습윤과정과 건조과정의 체적함수비, 간극수압 결과를 각각 모형사면의 상·하부와 상·중·하부로 구분하여 나타낸 것이다.

우선, 모형사면의 상·하부에 상·중·하단으로 구분하여 설치된 TDR로부터 측정된 체적함수비는 매우 안정적인 결과를 얻을 수 있었으며 그림 4.48은 모형실험에 따른 사면의 모든 단면에서 체적함수비의 분포를 나타낸 것이다.

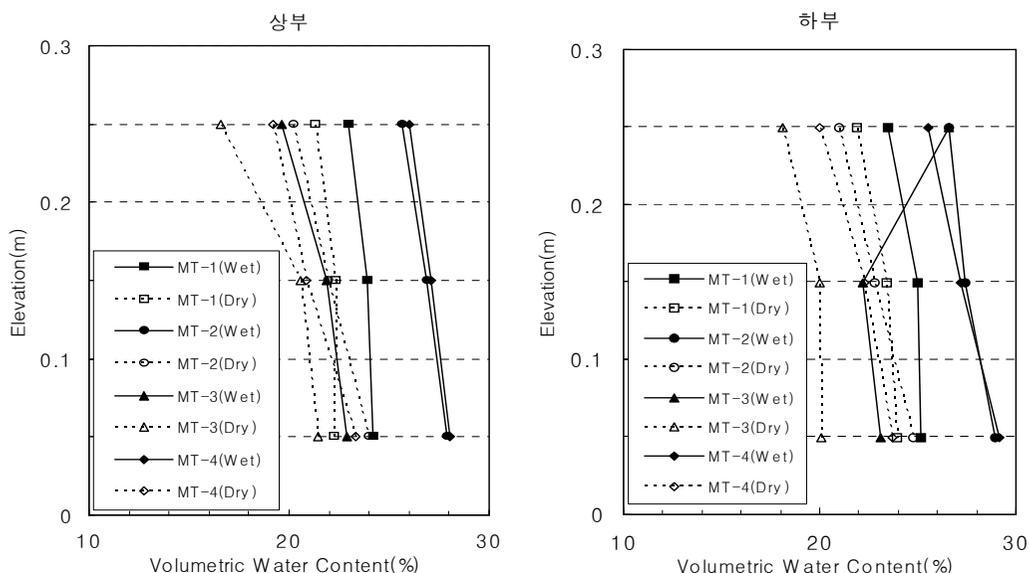


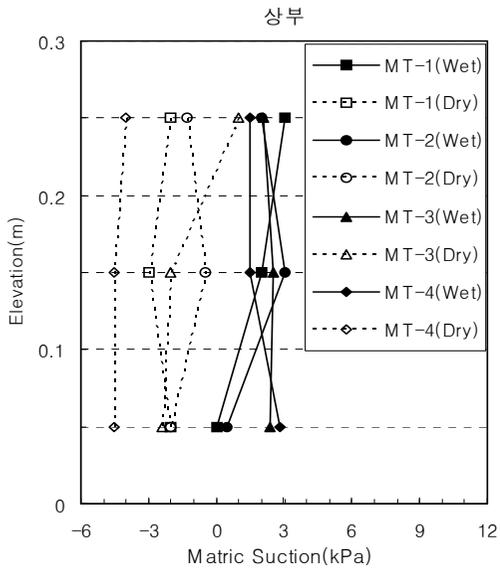
그림 4.48 강우재현 모형실험에서의 이력거동(체적함수비)

MT-3의 건조과정시 분포형태가 조금 차이가 있을 뿐 상·하부의 모든 단면에서 유사한 분포를 나타낸다. 이는 강우침투방향이 횡 방향으로 변화되어도 사면의 하단이 투수층임으로 강우의 축적이 일어나지 않고 원활히 배수되었음을 알 수 있다. 또한, 깊이에 따른 체적함수비의 분포가 습윤과정과 건조과정에서 2~5%정도의 차이를 보이지만 거의 유사하게 분포하였다. 이는 불포화된 화강암질 풍화토에서 체적함수비의 이력현상이 크지 않음을 보여준다.

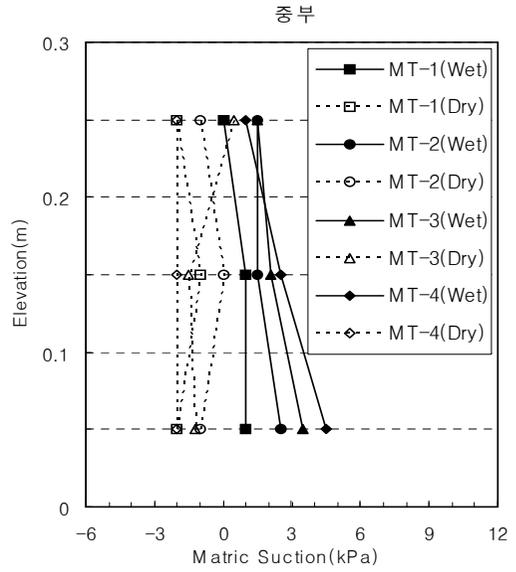
다음으로 모형사면의 상·중·하부에 상·중·하단으로 구분하여 설치된 tensio-meter로부터 측정된 간극수압분포는 안정적인 결과를 얻을 수 있었으며 그림 4.49는 모형실험에 따른 사면의 모든 단면에서 간극수압의 분포를 나타낸 것이다.

모형사면에 동일한 크기의 강우강도가 작용하더라도 건조과정과 습윤과정에서의 간극수압의 분포는 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 불포화된 화강암질 풍화토의 습윤과정에서 발생하는 모관흡인력은 건조과정에서 발생하는 모관흡인력보다 3~10kPa정도 작은 값을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 이력현상은 습윤과정과 건조과정에서 산정한 함수특성곡선에서도 확인할 수 있다. 즉, 동일한 강우강도에 의해 발생하는 같은 체적함수비에 대해 습윤과정의 함수특성곡선에서 구한 모관흡인력이 건조과정에서 구한 모관흡인력보다 작은 것으로 나타난다. 이러한 실험결과는 불포화된 화강암질 풍화토 내의 물의 흐름에 이력현상이 나타남을 보여주는 것이다. 이는 습윤과정에서의 모관흡인력의 변화는 습윤과정에서 산정한 함수특성곡선을 따르고 건조과정에서의 모관흡인력의 변화는 건조과정의 함수특성곡선을 따르는 것으로 나타났다.

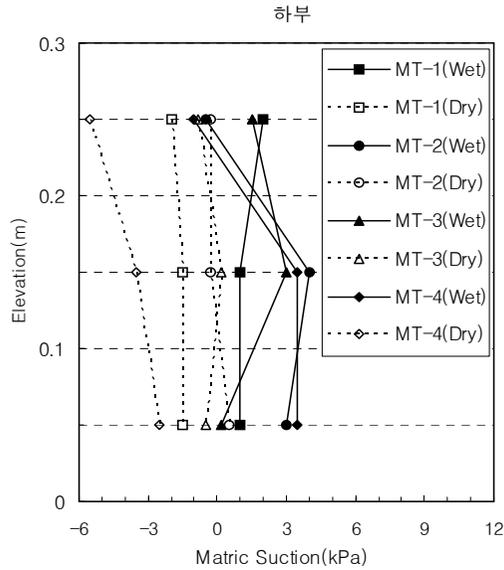
결론적으로 불포화된 화강암질 풍화토의 모관흡인력에 대한 침투거동 해석시 습윤과정에서는 습윤과정 함수특성곡선에서 얻은 모관흡인력을 적용하고 건조과정에서는 건조과정 함수특성곡선에서 얻은 모관흡인력을 적용하는 것이 보다 실제적이고 합당하리라 여겨진다.



(a) 사면의 상부



(b) 사면의 중부



(c) 사면의 하부

그림 4.49 강우재현 모형실험에서의 이력거동(모관흡인력)

4.3.3 강우재현 모형실험에 의한 함수특성곡선

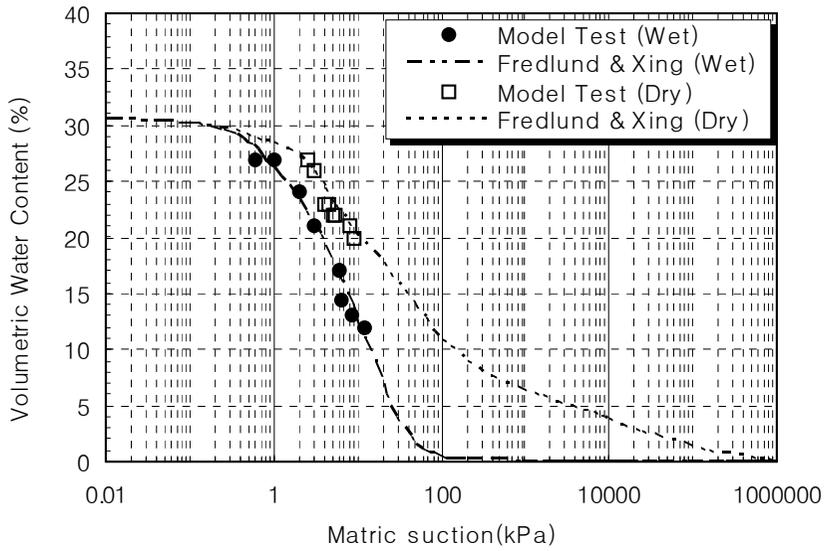
모형사면의 상·하부 중단에 설치된 TDR(TDR-U-2, TDR-L-2)과 Tensiometer (TSM-U-2, TSM-L-2)의 측정값에서 얻어진 체적함수비와 모관흡인력의 관계를 구하고, 함수특성곡선실험(SWCC Cell Test)에서 얻은 측정값을 Fredlund & Xing의 모델식 적용하여 얻은 함수특성곡선과 비교하고자 한다.

그림 4.50은 수행된 습윤과정과 건조과정의 실내모형실험(MT-1, MT-2, MT-3, MT-4)에서 얻어진 계측치와 Soil-Vision 프로그램을 활용하여 Fredlund & Xing의 모델식에 적용한 함수특성곡선을 나타낸 것이다. 모형사면 상·하부에서 얻어진 값은 습윤과정과 건조과정에서 이력거동을 보였으며, 상·하부의 습윤과정 또는 건조과정에서 각각 얻어진 결과는 거의 유사하게 나타났다.

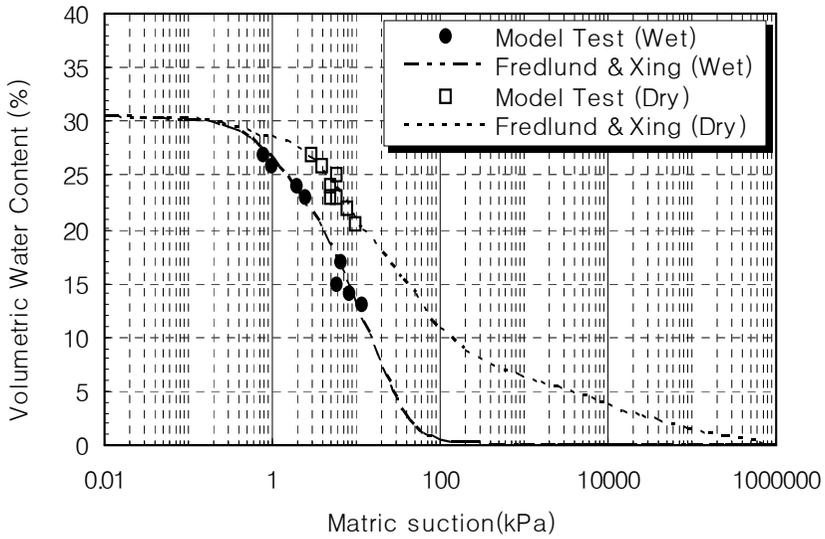
표 4.4와 그림 4.51은 함수특성곡선실험에서 얻은 측정값과 모형실험에서 얻은 계측값을 Fredlund & Xing의 모델식 적용하여 얻은 함수특성곡선을 비교하여 나타낸 것이다.

표 4.4 모형실험과 함수특성곡선실험에 의한 *Fredlund & Xing*의 계수

구 분		함수특성곡선실험 (SWCC Cell Test)	모형실험		
			상부	하부	평균
습윤과정	a	20.28	8.15	8.50	8.33
	n	1.45	1.68	1.72	1.70
	m	5.10	2.55	2.52	2.54
건조과정	a	7.75	6.97	6.34	6.66
	n	0.84	0.80	1.05	0.93
	m	0.35	1.32	1.80	1.56

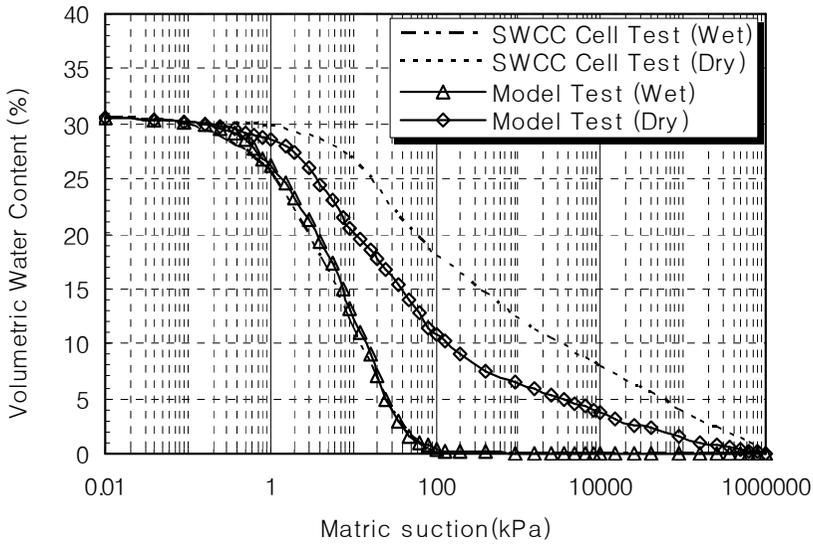


(a) 모형사면의 상부(TDR-U-2, TSM-U-2)

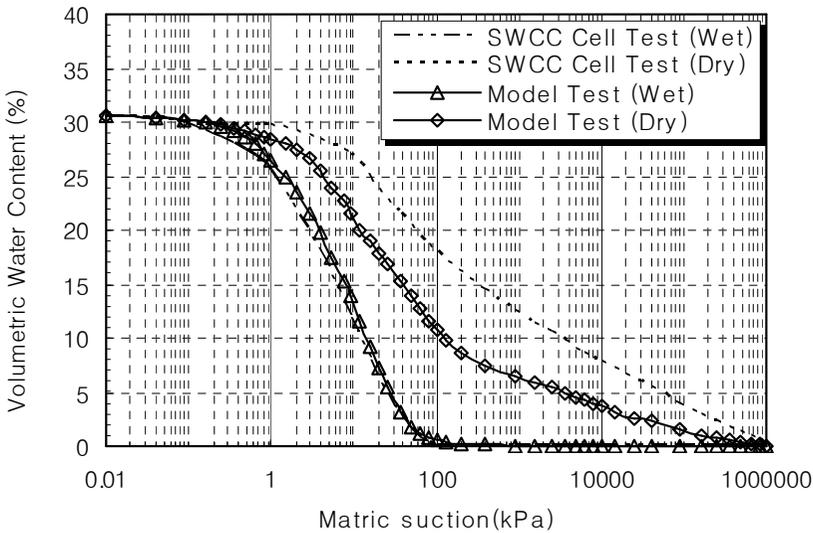


(b) 모형사면의 하부(TDR-L-2, TSM-L-2)

그림 4.50 실내모형실험 결과로 얻어진 함수특성곡선



(a) 모형사면의 상부(TDR-U-2, TSM-U-2)



(b) 모형사면의 하부(TDR-L-2, TSM-L-2)

그림 4.51 실내모형실험과 *SWCC Cell Test*의 결과로 얻어진 함수특성곡선

실내모형실험으로 얻어진 함수특성곡선은 함수특성곡선실험에서 얻어진 습윤 및 건조과정의 함수특성곡선 사이에 나타나는 것을 알 수 있고, 습윤과정에서 얻은 함수특성곡선은 습윤과정 함수특성곡선에 근접하게 분포하고 건조과정에서 얻은 함수특성곡선은 건조과정 함수특성곡선에 근접하게 분포하였다. 특히, 습윤과정의 함수특성곡선이 거의 일치하는 것을 볼 수 있고 건조과정의 함수특성곡선은 상이하게 나타남을 알 수 있다.

건조과정의 함수특성곡선은 함수특성곡선실험으로부터 구한 것이 실내모형실험으로부터 구한 것보다 동일한 체적함수비에서 더 큰 모관흡인력을 갖는 것으로 나타났다.

다음 표 4.5는 함수특성곡선실험에서 얻은 측정값과 실내모형실험에서 얻은 계측치로 얻어진 함수특성곡선으로부터 대상 화강암질 풍화토의 불포화특성값을 나타낸 것이다.

표 4.5 불포화 특성값의 비교(Fredlund & Xing의 모델)

구 분			함수특성곡선실험 (SWCC Cell Test)	실내 모형실험		
				상부	하부	평균
습 윤 과 정	습윤전면 흡인력 (WFS)	$\Theta(\%)$	30.20	30.10	30.10	30.10
		$\psi(\text{kPa})$	0.65	1.24	1.30	1.27
	잔류량	$\Theta_r(\%)$	0.74	0.95	1.02	0.99
		$\psi_r(\text{kPa})$	49.55	55.45	56.28	55.87
건 조 과 정	공기함입값 (AEV)	$\Theta(\%)$	30.00	30.2	30.1	30.15
		$\psi(\text{kPa})$	4.24	2.35	2.55	2.45
	잔류량	$\Theta_r(\%)$	3.58	2.55	3.20	2.88
		$\psi_r(\text{kPa})$	648.75	545.63	560.86	553.25
	최대경사 (Max. Slope)		0.27	0.35	0.38	0.37

먼저 습윤과정에서 습윤전면흡인력은 함수특성곡선실험과 실내모형실험으로부터 얻어진 값이 각각 0.65kPa과 1.27kPa로 유사하게 나타났으며 건조과정의 공기함입값은 각각 4.24kPa과 2.45kPa로 나타나 함수특성곡선실험에 의한 값이 더 크게 나타나 동일한 체적함수비에서 더 큰 모관흡인력을 갖는 것으로 나타났다. 전반적으로 불포화 특성값은 습윤과정과 건조과정에서 유사하게 나타났으며 특히, 습윤과정에서 보다 더 일치하는 것으로 나타났다.

제5장 수치해석과 강우재현 모형실험의 비교

5.1 수치해석의 개요

본 연구에서는 강우조건(강우강도, 강우지속시간)과 사면의 기하학적 조건에 따라 강우침투로 인한 불포화 화강암질 풍화토 사면 내에 분포하는 체적함수비와 간극수압의 변화를 알아보고, 강우재현 모형실험의 결과를 검증하기 위한 목적으로 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 불포화 침투해석이 가능한 GEO-SLOPE사의 유한요소 해석 프로그램인 SEEP/W를 활용하였으며 모델링한 사면은 607개의 Node와 480개의 Element로 구성하였으며 Element는 주로 사각형을 활용하였다. 또한, 강우로 인한 불포화 사면의 침투거동특성을 규명하기 위해서는 대상토의 불포화 특성인 모관흡인력에 대한 체적함수비 변화와 투수계수변화가 매우 중요하다. 따라서 본 연구에 사용된 화강암질 풍화토의 불포화특성인 모관흡인력에 대한 체적함수비의 변화와 투수계수의 변화를 입력해야 하는데, 본 연구에서는 함수특성곡선실험(SWCC Cell Test) 결과로부터 얻은 함수특성곡선과 투수계수곡선을 적용하였다. 또한, 대상 화강암질 풍화토의 기본물성 및 포화투수계수 등은 본 연구과정에서 수행된 실내실험 결과를 활용하였다.

5.2 해석조건 및 경계조건

본 연구에서 강우침투해석은 강우재현 모형실험에서와 같이 설계단계에서 고려가 가능한 강우강도와 강우지속시간, 사면경사로 크게 3가지 영향인자에 대해 4가지의 조건으로 결정하였으며 또한, 기타 해석시 필요한 조건은 강우재현 모형실험에서 사용한 동일 조건을 적용 하였다. 특히, 사면경사조건은 실내모형실험과 동일하게 사면경사를 1:1.5에서 1:2.0인 무한사면으로 변화를 주었으며, 사면의 높이와 길이 또한 강우재현 모형실험에서와 동일하게 모델링 하여 강우지속시간과 방치시간에 따른

깊이별 침투해석을 수행하였다.

표 5.1은 본 연구에서 수행된 수치해석 조건을 나타낸 것이다.

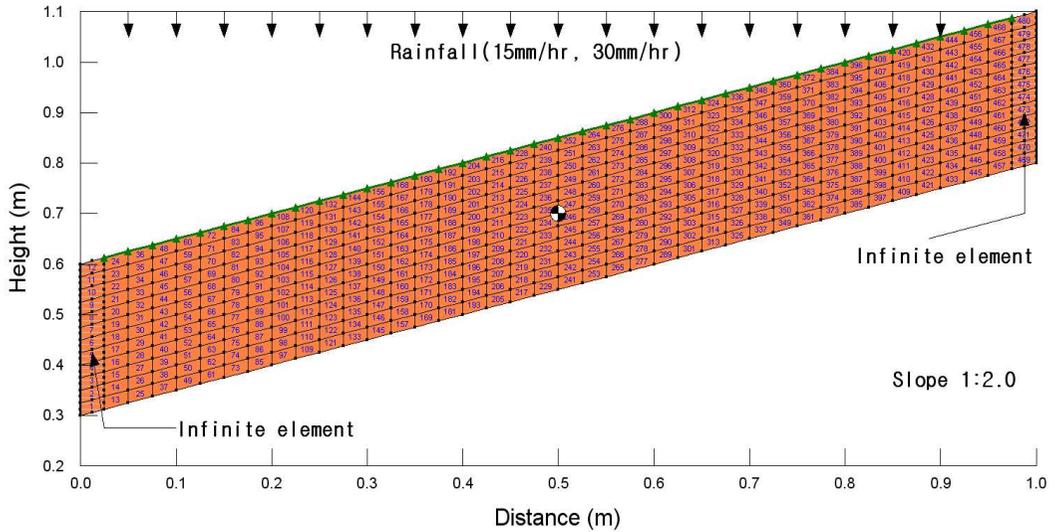
표 5.4 영향인자들에 따른 수치해석 조건

영향인자	수치해석(Numerical Analysis)			
	NA-1	NA-2	NA-3	NA-4
강우강도(mm/hr)	15	30	15	30
지속/방치시간(hr)	16/24	16/24	16/24	8/32
사면경사	1 : 2.0	1 : 2.0	1 : 1.5	1 : 2.0

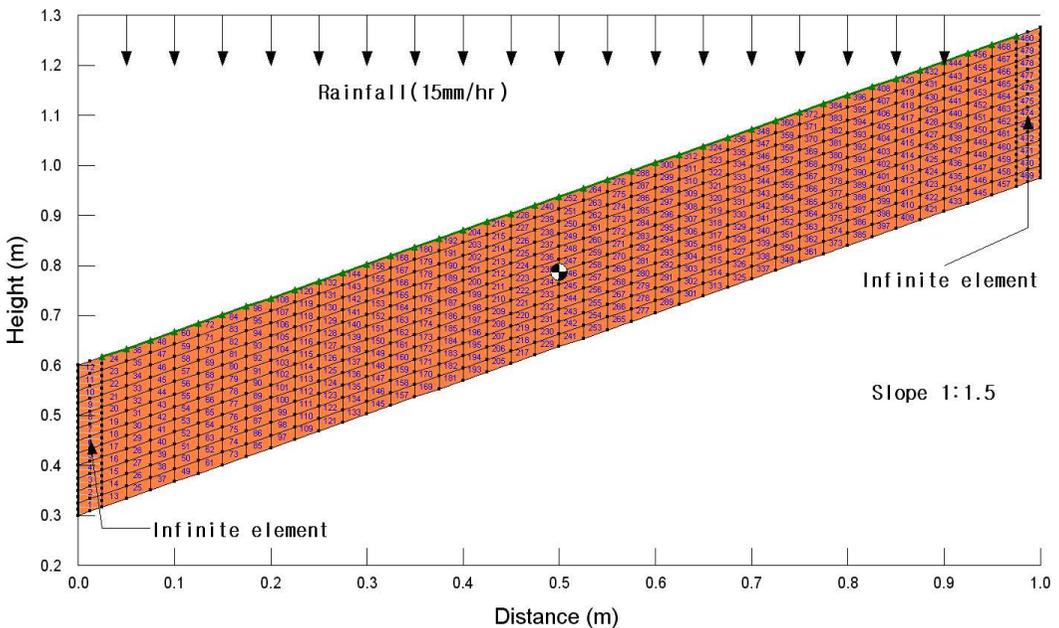
수치해석에 적용한 불포화 화강암질 풍화토사면은 강우재현 모형실험에 이용된 모형사면의 조건과 동일하게 사면의 높이와 길이를 각각 0.3m와 1.0m로 결정하였다. 불포화 사면의 경사는 1:1.5~1:2.0으로 변화시켰으며, 불포화 사면의 상부에 강우가 내리는 것으로 모델링하였다. 모형사면의 좌, 우 경계 및 하부경계는 투수성 다공질 판이 설치되어 있으므로 이를 수치해석에서 고려하기 위하여 좌, 우 경계요소는 무한요소(infinite element)로 처리하였다. 하부 경계의 경우에도 좌, 우 경계와 동일하게 투수성 다공질 판을 고려하기 위하여 무한요소로 처리하도록 하였으나 무한요소로 처리하는 경우에는 초기해석에서 무한요소에 부(-)의 간극수압이 형성되어 초기해석을 수행하지 못하기 때문에 하부는 무한요소로 처리하지 않았다. 단, 하부의 경계는 투수조건이므로 불투수경계로 주지 않아 하부로 침투수가 배출되도록 경계조건을 모델링하였다. 그리고 불포화 사면은 초기에 수위가 없는 조건이기 때문에 초기 경계는 모두 압력수두로 작용하게 모델링하였으며, 입력된 압력수두의 값은 강우재현 모형실험에서 계측된 초기 간극수압을 이용하여 결정하였다.

수치해석에 있어서 강우재현을 통해 시간에 따른 간극수압의 변화를 살펴보고자 해석타입을 Transient해석을 수행하였으며, 불포화 사면의 상부에 소정의 강우량을 단위 유량으로 유입되는 것으로 강우강도를 모델링하였다. 또한, 불포화 사면의 상부에 Review Boundary를 주어 시간에 따른 간극수압의 변화를 살펴볼 수 있도록 하였다.

그림 5.1은 본 연구의 수치해석에 적용된 사면조건을 모델링한 유한요소망과 경계조건 등을 나타낸 것이다.



(a) 사면경사 1:2.0(NA-1, NA-2, NA-4)



(b) 사면경사 1:1.5(NA-3)

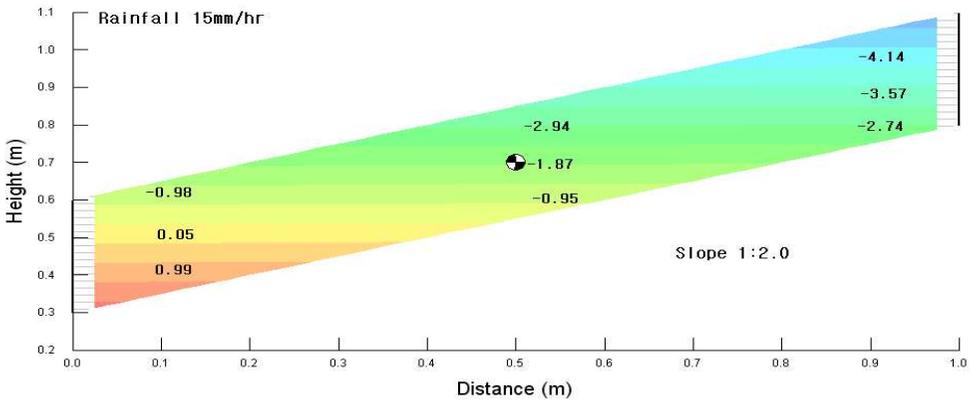
그림 5.1 불포화 무한사면의 유한 요소망과 경계조건

5.3 수치해석의 결과 비교검토

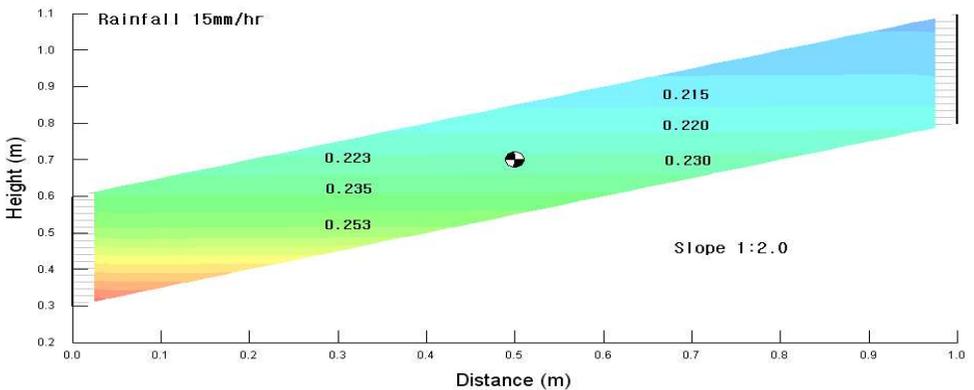
수치해석 결과비교는 간극수압 분포는 사면의 중부, 체적함수비는 사면의 상부와 하부를 대표단면으로 선정하여 검토하였다.

5.3.1 해석조건 NA-1의 결과 비교

그림 5.2는 수치해석조건 NA-1(강우강도 15mm/hr, 사면경사 1:2.0, 강우지속 및 방치 16/24)의 침투해석결과, 최종단계에서 간극수압과 체적함수비 분포를 나타낸 것이다.



(a) 간극수압 분포



(b) 체적함수비 분포

그림 5.2 해석조건 NA-1의 침투해석 결과

NA-1의 수치해석결과와 동일조건의 강우재현 모형실험 MT-1에서 얻어진 간극수압과 체적함수비의 분포를 비교하여 그림 5.3과 5.4에 나타내었다.

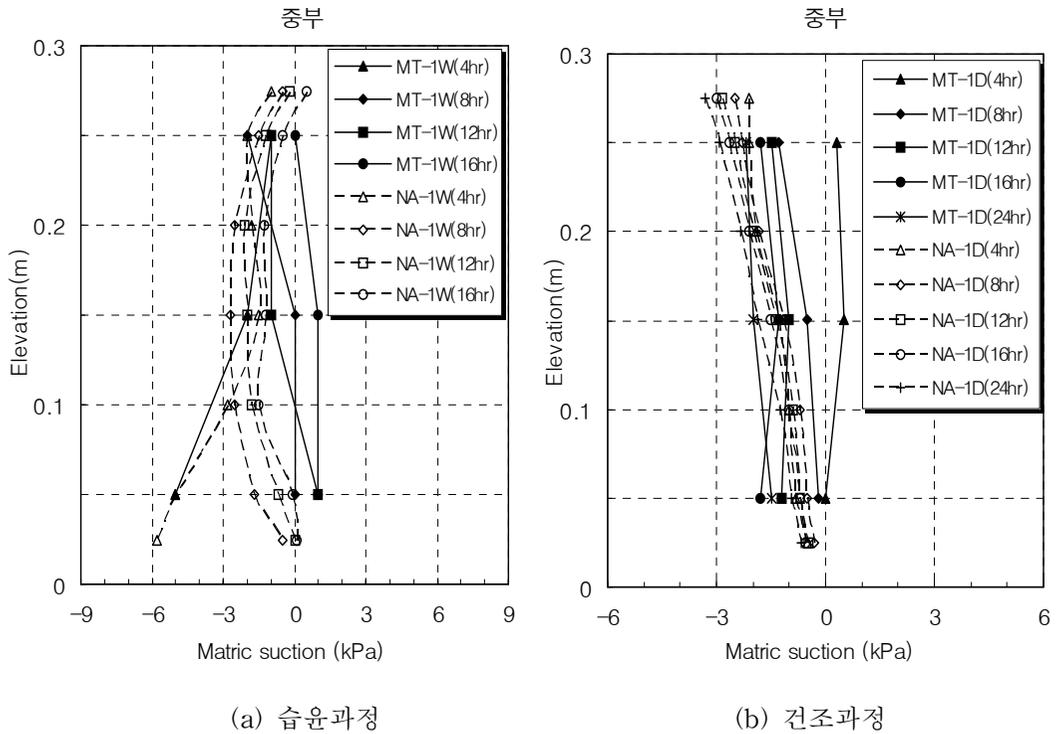


그림 5.3 해석조건 NA-1의 시간에 따른 간극수압의 변화

먼저 그림 5.3은 대표단면 사면의 중부에서 사면깊이와 강우재현 경과시간에 따라 간극수압(모관흡인력)의 변화관계를 나타낸 것으로 수치해석에서 얻어진 간극수압 분포는 강우재현 모형실험과 전반적으로 유사한 간극수압 분포를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 수치해석으로 얻은 간극수압의 값은 강우재현 모형실험결과와 최대 3kPa 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났는데 이는 초기함수비 조건 및 다짐, 사면하부의 투수성 다공관 등 기타조건이 수치해석 모델링과 완벽하게 일치하지 않은 이유에서 발생하는 것으로 여겨진다.

다음으로 그림 5.4는 사면의 상·하부에서 사면깊이와 강우재현 경과시간에 따라 체적함수비 변화를 나타낸 것이다. 불포화 사면의 체적함수비는 습윤 및 건조과정 모두에

서 수치해석 값과 모형실험 측정값의 차이를 보였으나, 변화하는 경향은 유사하게 나타났다. 수치해석 값과 측정값의 차이는 최대 5% 정도로 초기체적함수비의 차이로 인해 발생하는 것으로 여겨진다.

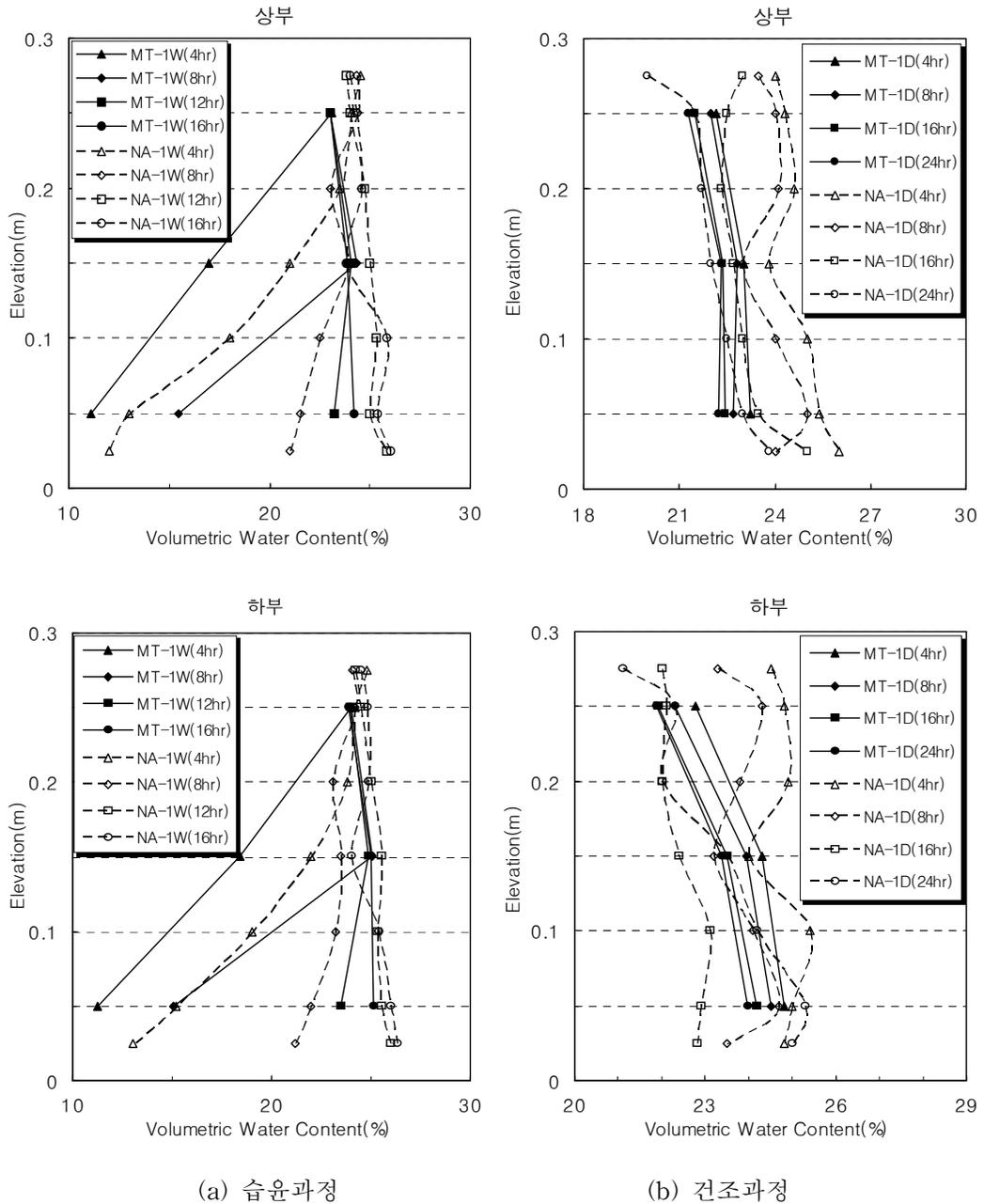
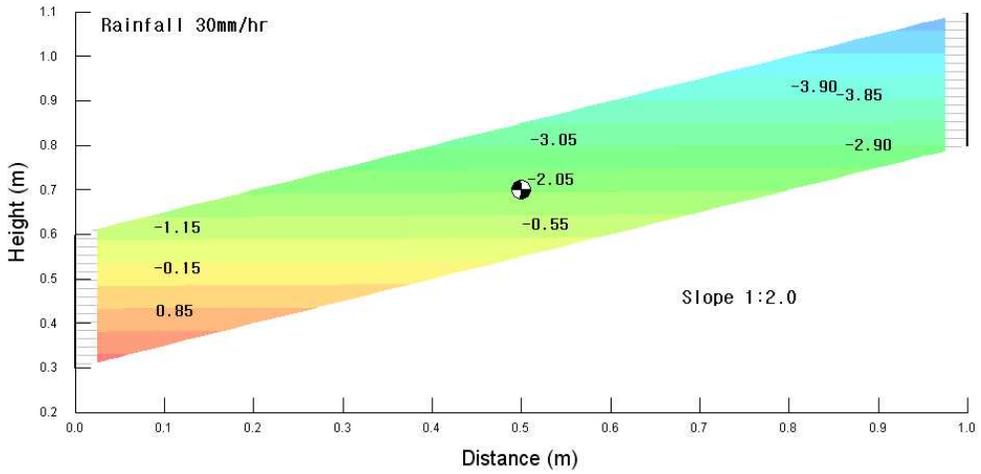


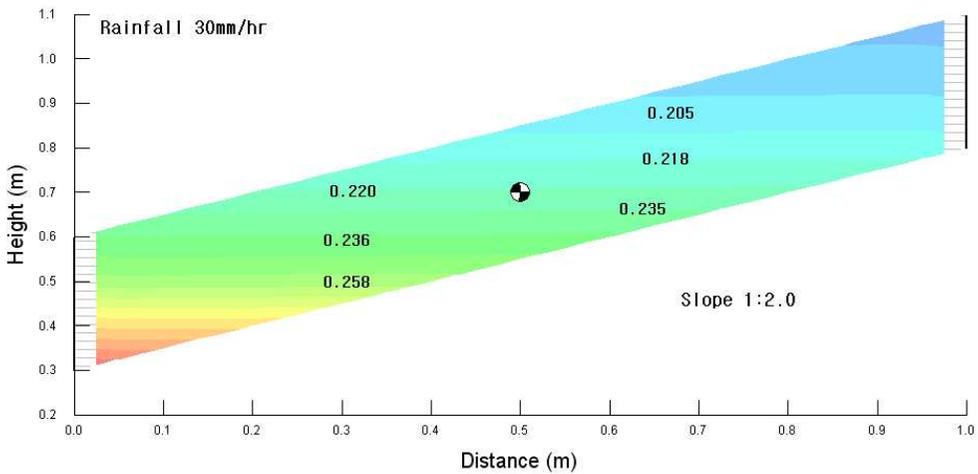
그림 5.4 해석조건 NA-1의 깊이에 따른 체적함수비의 변화

5.3.2 해석조건 NA-2의 결과 비교

그림 5.5는 수치해석조건 NA-2(강우강도 30mm/hr, 사면경사 1:2.0, 강우지속 및 방치 16/24)의 침투해석결과, 최종단계에서 간극수압과 체적함수비 분포를 나타낸 것이다.



(a) 간극수압 분포



(b) 체적함수비 분포

그림 5.5 해석조건 NA-2의 침투해석 결과

NA-2의 수치해석결과와 동일조건의 강우재현 모형실험 MT-2에서 얻어진 간극수압과 체적함수비의 분포를 비교하여 그림 5.6과 5.7에 나타내었다.

먼저 그림 5.6은 대표단면 사면의 중부에서 사면깊이와 경과시간에 따라 간극수압(모관흡인력)의 변화관계를 나타낸 것으로 수치해석에서 얻어진 간극수압 분포는 강우재현 모형실험과 전반적으로 유사한 간극수압 분포를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 건조과정에서 수치해석에 의한 간극수압의 값은 강우재현 모형실험결과와 최대 3kPa 정도로 다소 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이와 같이 결과 값의 차이를 보이는 것은 앞서 NA-1의 해석결과에서 언급한 것처럼 수치해석만으로 모형사면의 지반상태를 정확하게 모델링하는 것이 불가능하기 때문인 것으로 여겨진다.

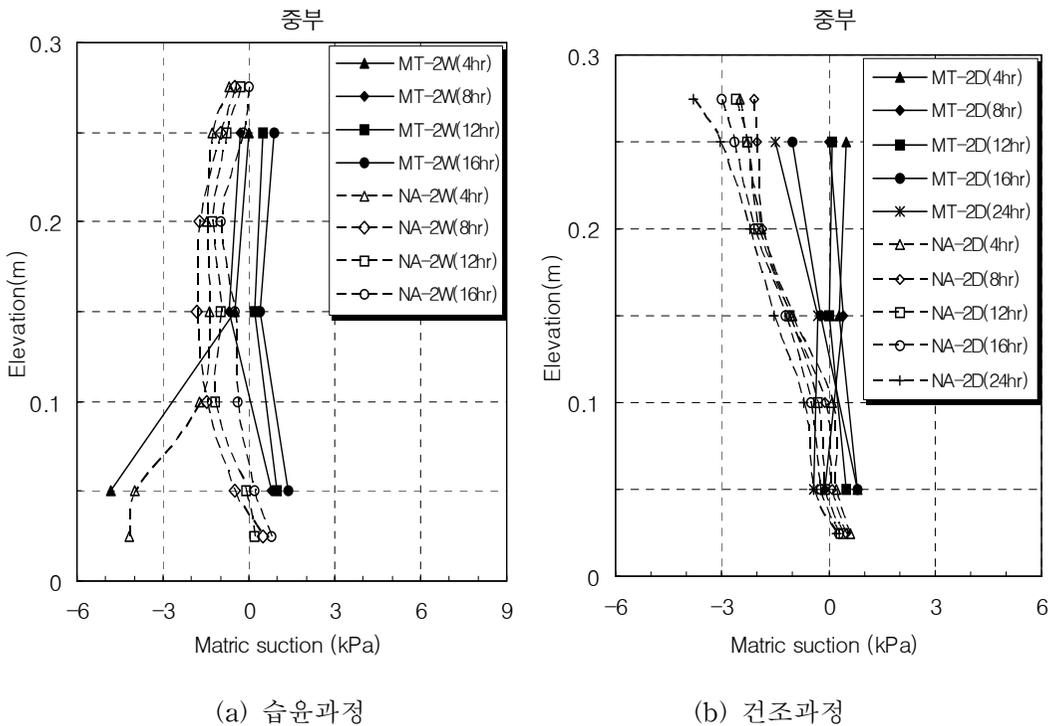


그림 5.6 해석조건 NA-2의 시간에 따른 간극수압의 변화

다음으로 그림 5.7은 사면의 상·하부에서 사면깊이와 경과시간에 따라 체적함수비 변화를 나타낸 것이다. 불포화 사면의 체적함수비 변화는 습윤 및 건조과정 모두 수치해석 값과 강우재현 모형실험에서 얻은 측정값의 차이는 최대 4% 정도로

발생하였으나 대체적으로 변화하는 경향은 유사하게 나타났다. 수치해석 결과와 측정값의 차이는 초기 체적함수비의 차이로 인해 발생하는 것으로 여겨진다. 또한 수치해석결과, 사면하부를 투수조건으로 모델링하여 사면내의 전체적인 강우침투는 중력에 의해 연직방향에 가깝게 일어나는 것으로 나타났다.

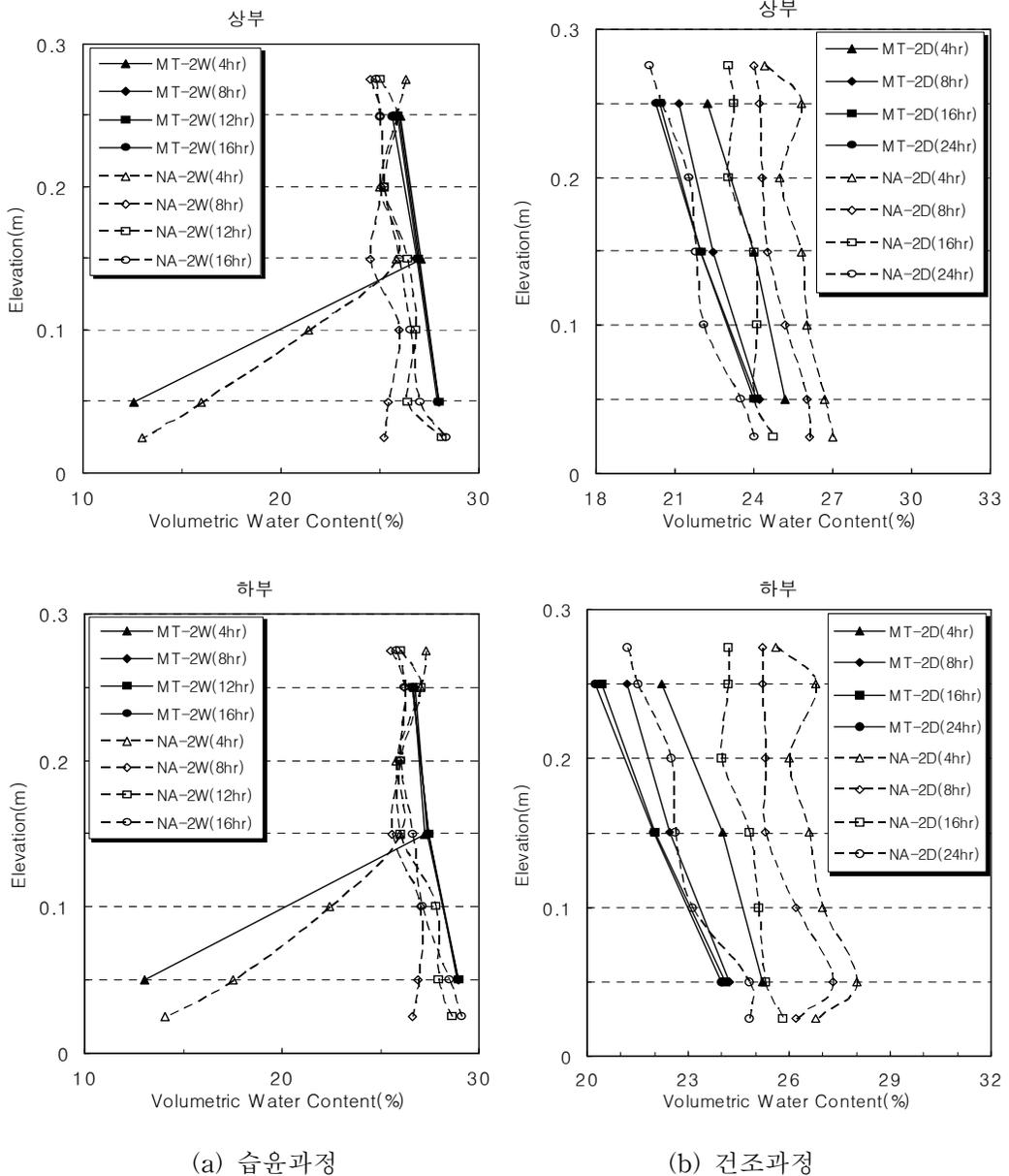
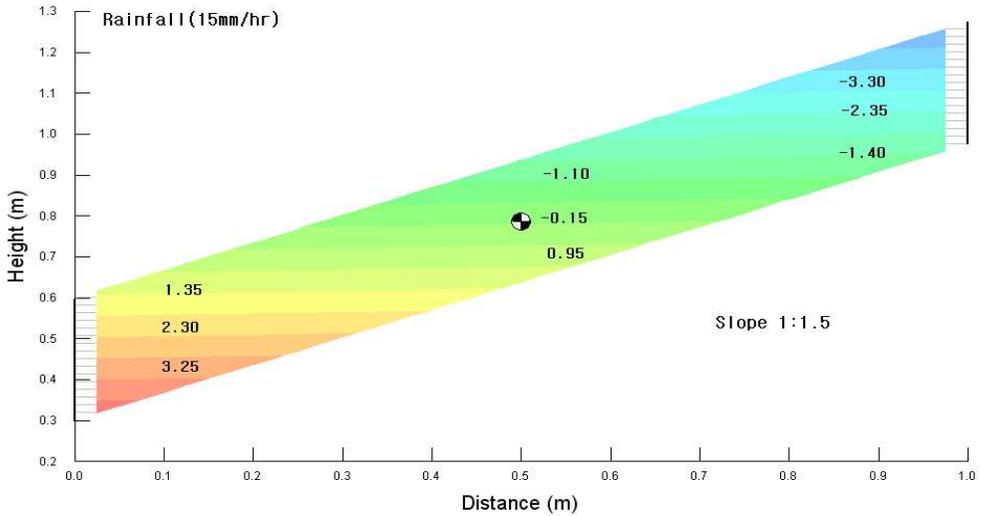


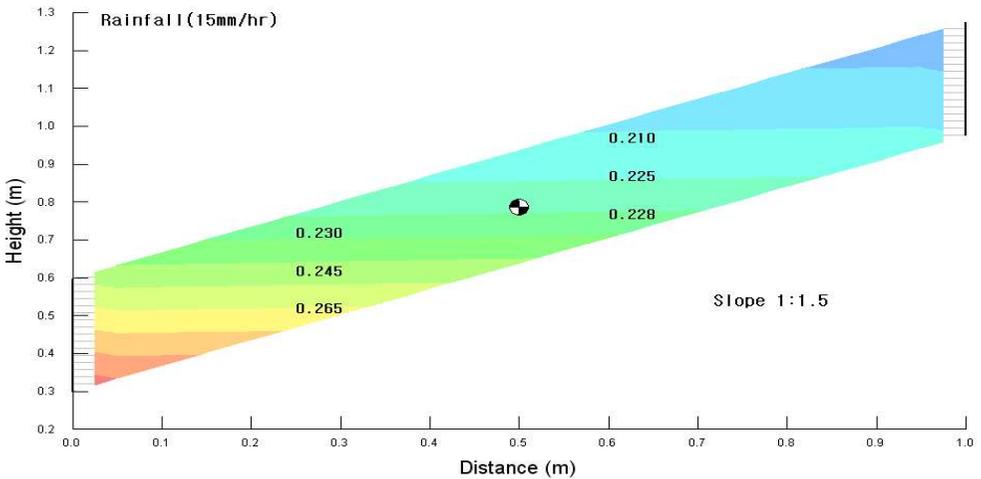
그림 5.7 해석조건 NA-2의 깊이에 따른 체적함수비의 변화

5.3.3 해석조건 NA-3의 결과 비교

그림 5.8은 수치해석조건 NA-3(강우강도 15mm/hr, 사면경사 1:1.5, 강우지속 및 방치 16/24)의 침투해석결과, 최종단계에서 간극수압과 체적함수비 분포를 나타낸 것이다.



(a) 간극수압 분포

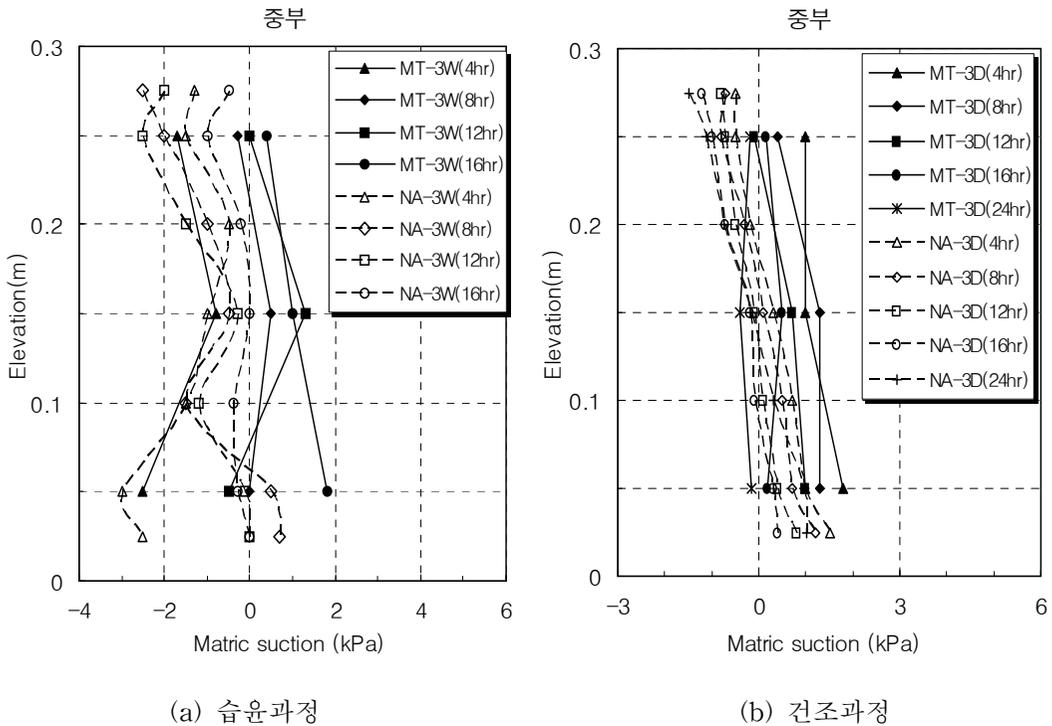


(b) 체적함수비 분포

그림 5.8 해석조건 NA-3의 침투해석 결과

NA-3의 수치해석결과와 동일조건의 강우재현 모형실험 MT-3에서 얻어진 간극수압과 체적함수비의 분포를 비교하여 그림 5.9와 5.10에 나타내었다.

먼저 그림 5.9는 대표단면 사면의 중부에서 사면깊이와 경과시간에 따라 간극수압(모관흡인력)의 변화관계를 나타낸 것으로 수치해석에서 얻어진 간극수압 분포는 강우재현 모형실험과 전반적으로 유사한 간극수압 분포를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 수치해석에 의한 간극수압의 값은 강우재현 모형실험결과와 최대 2kPa 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이와 같이 결과 값의 차이를 보이는 것은 앞서 NA-1, NA-2의 해석결과에서 언급한 것처럼 수치해석만으로 모형사면의 지반상태를 정확하게 모델링하는 것이 불가능하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 침투해석에 적용된 모형사면의 크기가 작아 작은 변수에도 값의 변화가 상대적으로 크게 나타난 것으로 여겨진다.



(a) 습윤과정

(b) 건조과정

그림 5.9 해석조건 NA-3의 시간에 따른 간극수압의 변화

다음으로 그림 5.10은 사면의 상·하부에서 사면깊이와 경과시간에 따라 체적함수비 변화를 나타낸 것이다. 불포화 사면의 체적함수비 변화는 습윤 및 건조과정 모두 수치해

석 값과 강우재현 모형실험에서 얻은 측정값의 차이는 5% 정도로 나타났으나 대체적으로 변화경향은 유사하게 나타났다. 특히, 건조과정에서 수치해석 값과 측정값의 차이는 초기 체적함수비의 차이로 인해 다소 큰 차이를 보이는 것으로 여겨지며, 체적함수비의 변화폭은 수치해석의 허용오차범위 안에 분포하는 것으로 나타났다.

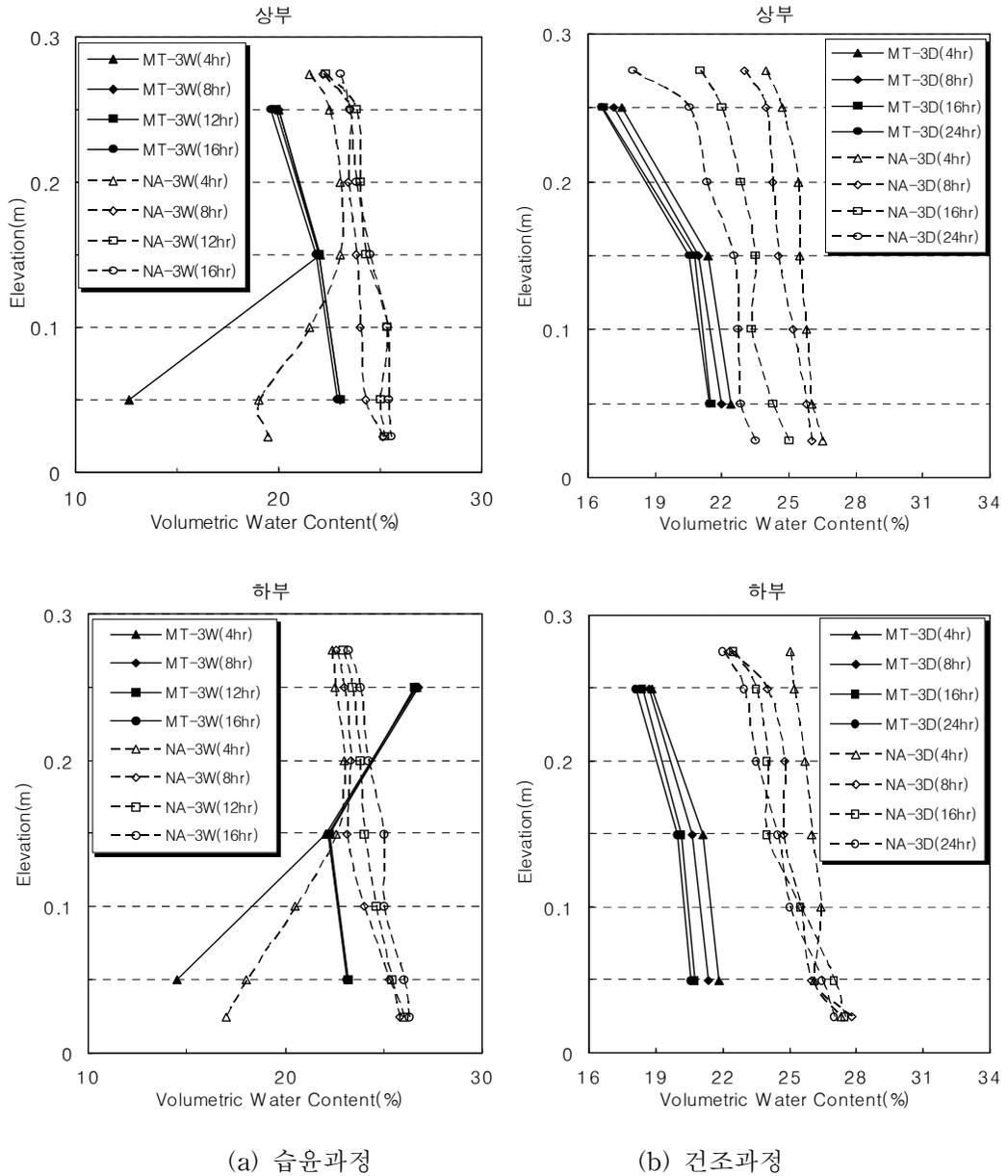
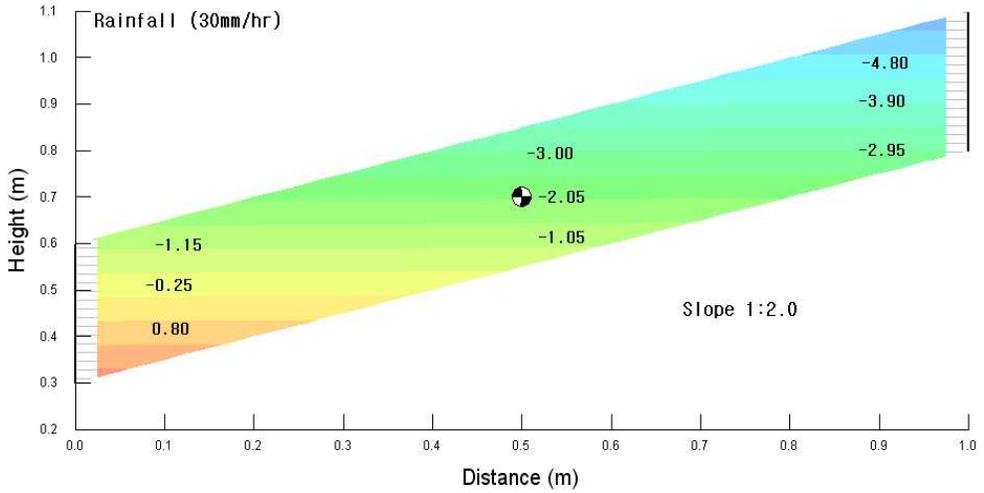


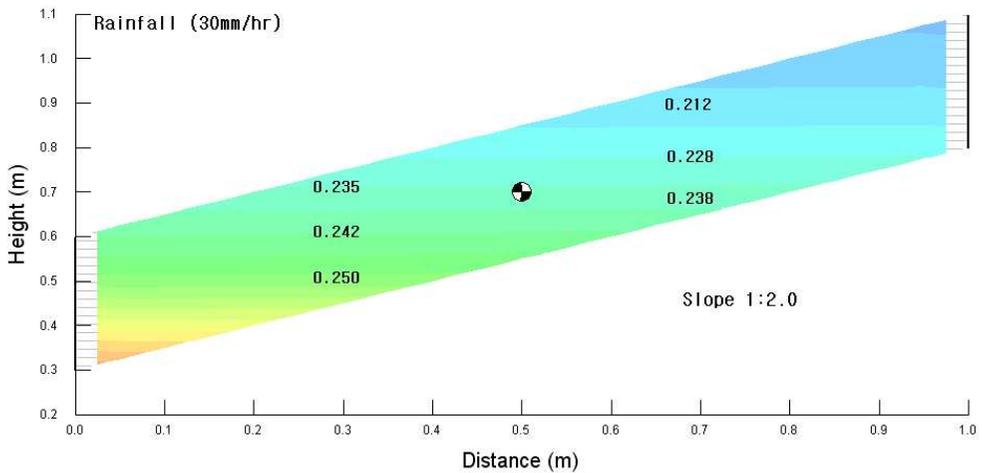
그림 5.10 해석조건 NA-3의 깊이에 따른 체적함수비의 변화

5.3.4 해석조건 NA-4의 결과 비교

그림 5.11은 수치해석조건 NA-4(강우강도 30mm/hr, 사면경사 1:2.0, 강우지속 및 방치 8/32)의 침투해석결과, 최종단계에서 간극수압과 체적함수비 분포를 나타낸 것이다.



(a) 간극수압 분포



(b) 체적함수비 분포

그림 5.11 해석조건 NA-4의 침투해석 결과

NA-4의 수치해석결과와 동일조건의 강우재현 모형실험 MT-4에서 얻어진 간극수압과 체적함수비의 분포를 비교하여 그림 5.12와 5.13에 나타내었다.

먼저 그림 5.12는 대표단면 사면의 중부에서 사면깊이와 경과시간에 따라 간극수압(모관흡인력)의 변화관계를 나타낸 것으로 수치해석에서 얻어진 간극수압 분포는 강우재현 모형실험과 전반적으로 유사한 간극수압 분포를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 수치해석에 의한 간극수압의 값은 강우재현 모형실험결과와 최대 3kPa 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 특히, 강우재현 초기에 간극수압 변화가 상당히 크게 나타났다. 이와 같이 결과 값의 차이를 보이는 것은 앞서 NA-1, NA-2, NA-3의 해석결과에서 언급한 것처럼 수치해석만으로 모형사면의 지반상태를 정확하게 모델링하는 것이 불가능하며 또한, 침투해석에 적용된 모형사면의 크기가 작아 작은 변수에도 값의 변화가 상대적으로 크게 나타난 것으로 여겨진다.

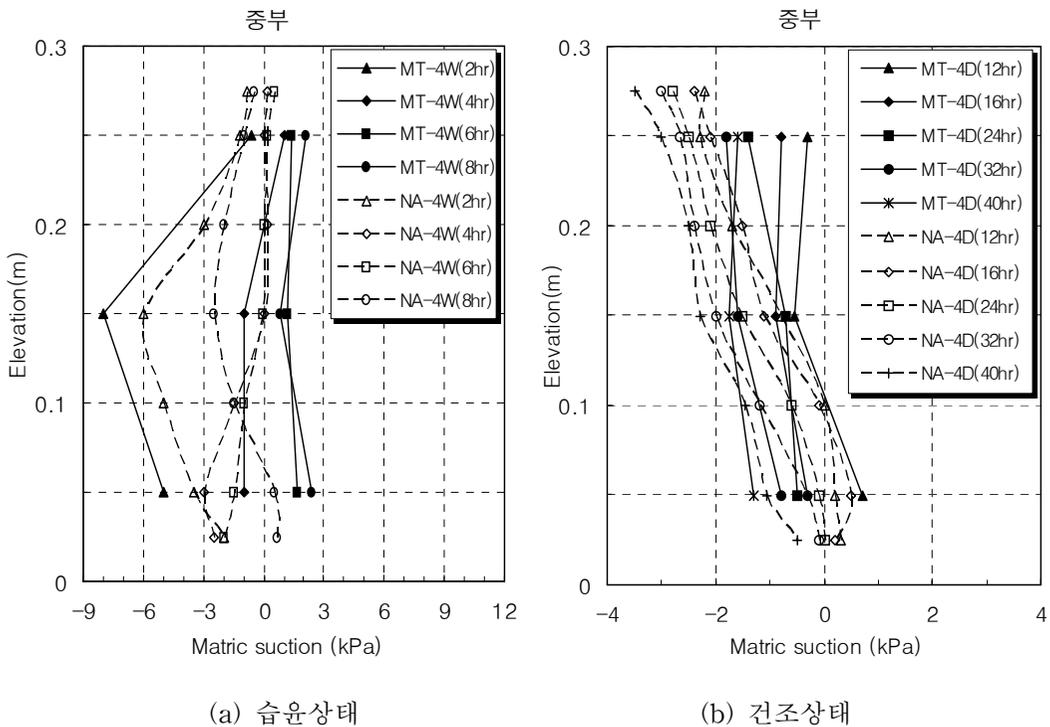
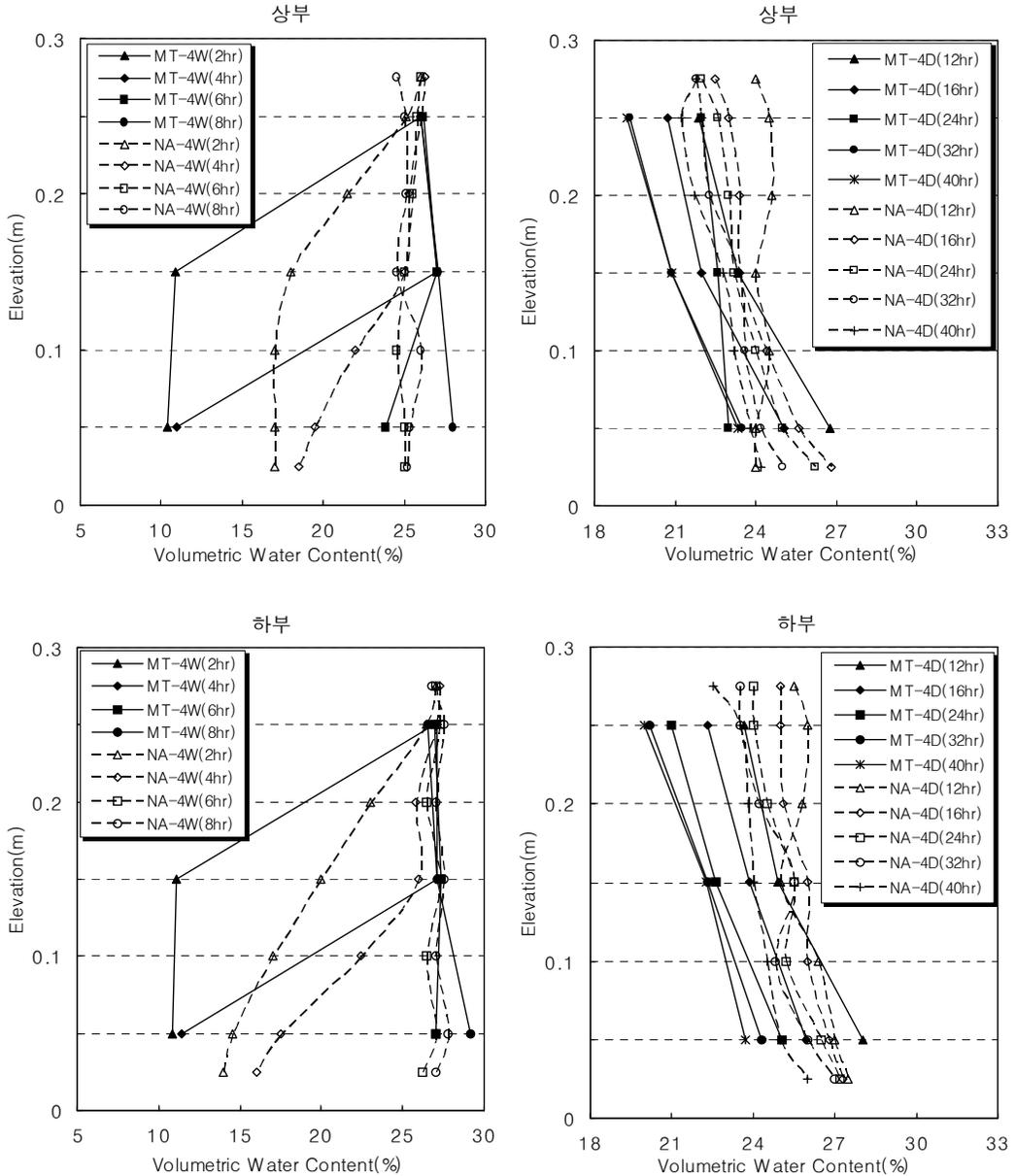


그림 5.12 해석조건 NA-4의 시간에 따른 간극수압의 변화

다음으로 그림 5.13은 사면의 상·하부에서 사면깊이와 경과시간에 따라 체적함수비

변화를 나타낸 것으로, 불포화 사면의 체적함수비 변화는 습윤 및 건조과정 모두 수치해석 값과 강우재현 모형실험에서 얻은 측정값의 차이는 있으나 대체적으로 변화하는 경향은 유사하게 나타났다.



(a) 습윤상태

(b) 건조상태

그림 5.13 해석조건 NA-4의 깊이에 따른 체적함수비의 변화

특히, 체적함수비의 수치해석 값과 측정값의 차이는 습윤과정의 강우재현 초기 2~4hr에서 크게 나타났으며 이는 초기 체적함수비의 차이로 인해 발생하는 것으로 판단되며 체적함수비의 변화폭은 수치해석의 허용오차범위 안에 분포하는 것으로 나타났다.

5.4 모형실험과 수치해석 결과의 분석

불포화 침투해석이 가능한 GEO-SLOPE사의 유한요소해석 프로그램인 SEEP/W를 활용하여 수치해석조건(NA-1, NA-2, NA-3, NA-4)의 해석결과와 강우재현 모형실험조건(MT-1, MT-2, MT-3, MT-4)에 따른 측정결과로 시간에 따른 간극수압 분포와 사면 깊이에 따른 체적함수비를 비교·검토하였다. 간극수압 분포는 사면의 중부, 체적함수비는 사면의 상부와 하부를 대표단면으로 선정하여 검토하였다.

해석조건에 따라 수행된 모든 수치해석결과에서 시간에 따른 간극수압의 분포경향은 강우재현 모형실험에서 측정된 값과 유사하게 나타났으며, 깊이에 따른 체적함수비 변화도 강우재현 모형실험과 유사한 경향을 보였다.

다만, 수치해석에서 산정된 결과와 강우재현 모형실험에서 측정된 간극수압과 체적함수비의 값은 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다. 간극수압(모관흡인력)은 최대 3kPa 정도, 체적함수비는 최대 5% 정도 값의 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 초기함수비 조건, 다짐, 사면하부의 투수성 다공관 등의 많은 지반조건들을 완벽하게 모델링하는 것이 불가능하기 때문이며, 또한 침투해석에 적용된 모형사면의 크기가 너무 작아 작은 변수에도 많은 차이를 보이기 때문인 것으로 여겨진다. 특히, 차이가 큰 체적함수비는 초기 체적함수비의 차이에서 발생하는 것으로 여겨지며 값의 차이는 수치해석의 허용범위 안에 들어오는 것으로 나타났다.

제6장 결 론

강우재현장치를 제작하고, 강우 및 사면조건에 따라 모형실험과 함수특성곡선실험을 실시하여 무한사면의 불포화특성에 관해 연구하였다. 그 결과를 이용하여 강우에 따른 침투거동 특성과 함수특성곡선 모델들의 불포화된 화강암질 풍화토 사면에 대한 적용성을 검토하였다. 또한, 수치모델링을 통한 침투해석 결과와 실내모형실험에서 얻어진 결과들을 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강우재현 모형실험을 실시한 결과 강우강도가 클수록 사면경사가 급할수록 강우지속시간이 길수록 습윤과정에서는 체적함수비의 증가시점이 빨라지고 모관흡인력의 감소가 빠르게 진행되는 양상을 보인 반면, 건조과정에서는 모관흡인력의 회복이 늦어지는 양상을 보였다. 이와 같은 모관흡인력의 빠른 감소와 회복의 지연으로 인해 불포화 사면의 안정성이 저하됨을 유추할 수 있었다.
2. 강우재현 모형실험의 습윤과정(강우재현)과 건조과정(방치)에서 측정된 체적함수비와 모관흡인력을 비교한 결과 체적함수비는 2~5%, 모관흡인력은 3~10kPa 정도 값의 차이를 보여 이력현상을 확인 할 수 있었다. 또한, 모관흡인력의 값이 체적함수비의 값에 비해 상대적으로 큰 차이를 보여 모관흡인력에 대한 이력거동의 영향이 더 큼을 확인할 수 있었다.
3. Lumb 모델식과 Pradel & Radd 모델식으로 산정한 습윤전선의 깊이를 모형실험 측정값과 비교한 결과 Lumb 모델은 16.67%, Pradel & Radd 모델은 33.33% 정도 과대평가되는 것으로 나타났다. 그리고 모형실험에서 얻은 체적함수비와 모관흡인력을 이용하여 산정한 습윤전선의 깊이와 세립질 함유량을 기준으로 얻은 값으로 산정한 깊이를 비교한 결과, 모형실험에서 얻은 값을 적용하는 것이 측정값에 근접한 결과를 보여주었다. 따라서 보다 신뢰도가 높은 습윤전선의 깊이 예측을 위해서는 반드시 실험이 선행되어야 할 것으로 여겨진다.

4. 함수특성곡선실험(SWCC Cell Test)결과로 얻어진 함수특성곡선의 불포화 특성값과 대상토의 물리적 특성만으로 유추한 함수특성곡선에서 산정한 불포화 특성값은 상당한 차이를 보여, 흙의 물리적 특성만으로 함수특성곡선을 결정하여 불포화해석에 적용하는 것은 불합리함을 알 수 있었다.
5. 강우재현 모형실험의 습윤과정과 건조과정에서 측정한 결과로부터 구한 함수특성곡선과 함수특성곡선실험의 습윤과정과 건조과정에서 얻은 결과로부터 구한 함수특성곡선을 비교하면, 습윤과정과 건조과정에서 두 방법 모두 근접한 함수특성곡선을 얻을 수 있었으나, 두 방법 모두 습윤과정과 건조과정에서의 결과는 차이가 있었다. 이로써 불포화토의 특성을 고려한 보다 합리적인 설계나 안정검토에 함수 및 투수특성곡선을 적용시킬 때는 습윤과정에서는 습윤과정 함수특성곡선, 건조과정에서는 건조과정 함수특성곡선을 적용하는 것이 합당할 것으로 여겨진다.
6. 강우재현 모형실험과 동일한 상태와 조건으로 검증된 프로그램을 통해 침투해석을 실시한 결과 간극수압과 체적함수비의 분포경향이 일치하고, 허용오차범위 안에 드는 것으로 나타났다. 그러나 간극수압은 최대 3kPa 정도, 체적함수비는 최대 5% 정도의 차이를 보였다. 이는 초기함수비 조건, 다짐, 사면하부의 투수성 다공관 등의 많은 지반조건들을 프로그램에서 완벽하게 모델링하지 못 했기 때문인 것으로 보이며, 또한 침투해석에 적용된 모형사면의 크기가 너무 작아 작은 변수에도 많은 차이를 보이기 때문인 것으로 여겨진다.

본 논문에서 실시한 실내모형실험은 한정된 토사와 지반조건에 대해서 수행하였다. 향후, 신뢰도가 향상된 계측기를 활용하여 다양한 지반조건인 이질 성토층, 배수조건 등과 세분화한 토사의 종류에 대해 실내실험 즉, 강우재현 모형실험, 함수특성곡선실험 등을 실시하여 보다 실제에 근접한 불포화 특성과 거동에 관한 자료가 확보된다면 불포화 침투거동에 관련하여 보다 정확한 거동예측과 합리적인 설계가 가능할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. 강종범 · 이봉직 · 신방웅(2002), “부분포화토의 함수특성”, 대한토목학회논문집, 제22권, 제5-C호, pp. 535~543.
2. 김상규 · 김영목(1991), “강우로 인한 사면 불안정”, 대한토질공학회지, 제7권, 제1호, pp. 53~64.
3. 김상규 · 류지협 · 송진규(1996), “불포화토의 함수특성 측정”, 한국지반공학회지, 제12권, 제6호, pp. 139~151.
4. 김상규 · 류지협 · 김동현(1999), “불포화 풍화토의 침투 특성” 대한토목학회 논문집 제19권, pp. 995~1002.
5. 김상규(1988), “사면안정(1)”, 대한토질공학회지, 제4권, 제1호, pp. 90~101.
6. 김상규 · 이은수(1996), “보강토구조물 뒤채움 재료로서 화강풍화토의 적용성”, 한국지반공학회지, 제12권, 제1호, pp. 63~72.
7. 김영목(1989), “강우시 무한사면의 침투거동”, 동국대학교 대학원 박사학위논문.
8. 김재홍 · 박성완 · 정상섭 · 유지형(2002), “강우시 습윤에 의한 불포화 풍화토 사면안정해석 연구”, 한국지반공학회논문집, 제18권, 제2호, pp. 123~136.
9. 김홍택 · 유한규 · 강인규 · 이혁진(2001), “실내모형실험을 통한 강우시 사면내 간극수압의 변화 탐구”, 한국지반공학회 2001년 봄학술발표회논문집, pp. 199~206.
10. 류지협(1997), “불포화 화강풍화토의 투수 및 강도 특성”, 동국대학교 대학원 박사학위 논문.
11. 류지협(2003), “모관흡수력을 고려한 사면의 안정성 평가”, 대한토목학회논문집, 제23권, 제4C호, pp. 195~201.
12. 박성완 · 신길호(2005), “강우침투시 함수특성이력을 고려한 불포화 풍화사면 안정해석”, 대한토목학회 2005년도 정기 학술대회 논문집, pp. 3970~3973.
13. 박성완 · 김병수(2006), “강우에 의한 불포화 풍화사면 침투깊이 평가”, 대한토목학회 2006년도 정기 학술대회 논문집, pp. 219~222.

14. 정상규 · 이인모(2003), “화강풍화잔적토의 불포화 전단강도에 미치는 순 연직응력의 영향”, 한국지반공학회논문집, 제19권, 제2호, pp. 27~38.
15. 심태섭 · 김선학 · 기완서 · 주승완(2004), “강우에 따른 화강암질 풍화토 사면의 전단강도 특성에 관한 연구”, 대한지질공학회지, 제14권, 제4호, pp. 349~360.
16. 심태섭 · 김선학 · 최순범 · 박노환(2006), “집중강우에 따른 화강풍화토 사면의 전단강도 특성” 대한토목학회 2006년도 정기 학술대회 논문집, pp. 1152~1155.
17. 송영석 · 채병곤 · 서용석(2007), “강우에 의한 산사태 확산범위 산정기법 제안”, 대한토목학회논문집, 제27권, 제5C호, pp. 343~352.
18. 이광모 · 심태섭 · 김선학 · 최용준(2005), “강우강도에 따른 무한사면의 간극수압 변화의 특성”, 대한토목학회 2005년도 정기 학술대회 논문집, pp. 4442~4445.
19. 이상경(2006), “불포화 무한사면의 침투거동에 관한 연구”, 홍익대학교 대학원, 박사학위논문
20. 이성진 · 이혜지 · 이승래(2005), “화강풍화토에 대한 함수특성곡선 - 추정방법에 대한 연구”, 한국지반공학회논문집, 제21권, 제1호. pp.15~27.
21. 이수형 · 황선근 · 사공명 · 김현기(2005), “철도연변 절취 토사사면에 대한 강우에 의한 침투를 고려한 사면안정해석법의 적용성 평가”, 한국지반공학회논문집, 제21권, 제6호, pp. 137~146.
22. 이인모 · 정상규 · 임충모(1991), “뿌리의 강도가 자연사면 안정에 미치는 영향에 관한 실험연구”, 대한토질공학회지, 제7권, 제2호, pp. 51~66.
23. 이인모(1992), “산사태 위험도 추정을 위한 간극수압 예측에 관한 연구(1) - 지하수 유입량 비교 연구”, 한국지반공학회지, 제8권, 제1호, pp. 81~100.
24. 이인모 · 조우성 · 김영욱 · 정상규(2003), “풍화토 사면에서 강우로 인한 간극수압 변화에 대한 실험연구”, 한국지반공학회논문집, 제19권, 제1호, pp. 41~49.
25. 조성은 · 이승래(2000), “강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석”, 한국지반공학회논문집, 제16권, 제1호, pp. 51~64.
26. 조성은 · 이승래(2000), “강우특성을 고려한 사면의 표면파괴에 대한 안정성 평가”, 한국지반공학회논문집, 제16권, 제5호, pp. 107~116.

27. 조성은 · 이승래(2001), “불포화 토사사면의 얽은파괴 해석에 대한 비교 연구”, 한국지반공학회논문집, 제17권, 제4호, pp. 135~143.
28. 홍원표 · 최승호 · 한중근 · 황인철(1996), “강우시 사면안정해석법에 관한 연구”, 토목학회 학술발표회 논문집, pp. 195~198.
29. 홍원표 · 김상규 · 김마리아 · 김윤원 · 한중근(1990), “강우로 기인되는 우리나라 사면활동의 예측”, 대한토질공학회지, 제6권, 제2호, pp. 55~63.
30. 榎 明 潔(1999), “降雨時の斜面表層崩壊”, 土と基礎, 47-5, pp.17~20.
31. Allan Freeze R.(1971), "Influence of the Unsaturated Flow Domain on Seepage Through Earth Dams", Water Resources Research, Vol. 7, No.4, pp. 929~941.
32. Allan Freeze R.(1980), "A Stochastic-Conceptual of Rainfall-Runoff Processes on a Hillslope", Water Resour. Res., Vol. 16, No. 2, pp. 391~407.
33. Anderson, M. G, Richards, K. S.(1987), "Slope Stability, Jhon Wiley &sons, Inc.
34. Brooks, R. H., and Corey,A.T.(1964), "Hydraulic Properties of Porous Media", Hydrol. Papers, Colorado State University, Fort Collis, Colorado.
35. Cai, F. and Ugai, K.(2004), "Numerical Analysis of Rainfall Effects on Slope Stability", International Journal of Geomechanics, ASCE, Vol.4, No.2, pp.69~78.
36. Childs, E. C., and Collis-Gorge, N.(1950), 'The Permeability of Porous Materials' , Proc. Royal Soc. Ser.A, Vol.201, pp. 392~405.
37. Davidson M. R.(1985), "Numerical Calculation of Saturated-Unsaturated Infiltration in a Cracked Soil", Water Resources Research, Vol.21, No.5, pp. 709~714.
38. Fourie, A. B., Rowe, D. and Blight, G. E.(1999), "The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump", Geotechnique, Vol. 49, No.1, pp.1~13.
39. Fredlund, D. G. and Morgenstern N. R.(1976), "Constitutive Relations for Volume Change in Unsaturated Soils", Canadian Geotechnical Journal, Vol.13, pp. 261~275.

40. Fredlund, D. G. and Morgenstern N. R.(1977), "Stress State Variables for Unsaturated Soils", ASCE, Vol.109, No.GT5, pp. 447~466.
41. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger R. A.(1978), "The shear strength of unsaturated Soils", Canadian Geotechnical Journal, Vol.15, No.3, pp. 313~321.
42. Fredlund, D. G., and Rahardjo, H.(1993), "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", John Wiley and Sone, Inc.
43. Fredlund, D. G., Xing, A. and Huang, S.(1994), "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 533~546.
44. Fredlund, D. G., and Anqing Xing.(1994), "Equations for the soil-water characteristic curve", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 521~532.
45. Gardner, W. R., D. Hillel, and Y. Benyamini(1970). "Postirrigation movement of soil water, 1. Redistribution", Water Resour. Res., 6, pp. 851~861.
46. Gasmo, J. M., Rahardjo, E. C. and Leong, E. C.(2000), "Infiltration effects on stability of a residual soil slope", Computers and Geotechnics, Vol. 26, pp.145~165.
47. Green, W. H., and Ampt, G. A.(1911), "Studies on Soil Physics : 1. Flow of Air and Water through Soils", Journal of Agricultural Science, Vol. 4, pp. 1~24.
48. Green, R.E., and Corey,J.C.(1971), "Calculation of Hydraulic Conductivity: A Further Evaluation of Some Predictive Methods", Soil Sci, Soc. Am. Proc., Vol. 35, pp. 3~7.
49. Kramer S. L. and Bolton Seed H.(1988), "Initiation of Soil Liquefaction under Static Loading Conditions", ASCE, Vol.114, No.GT4, pp.412~430.
50. Kunze, R. J. et al.,(1968), "Factors Important in the Calculation of Hydraulic Co-nductivity",Sjoil Sci. Soc. Am. Proc., Vol.32,pp. 760~764.
51. Liakopolous, A. C.(1965), "Theoretical Solution of Unsteady Unsaturated Flow Problems in Soils", Bull. the Inter. Associ. Sci. Hydro., Vol. 10, pp.5~39.

52. Lam L., Fredlund D. G. and Barbour S. L.(1987), "Transient Seepage Model for saturated-Unsaturated Soil System: a Geotechnical Engineering Approach", Canadian Geotechnical Journal, Vol.24, pp. 565~580.
53. Lambe, T. W. and Silva-Tulla(1992), "Stability Analysis of an Earth Slope", Proceedings of Stability and Performance of Slope and Embankments-II, ASCE Specialty Conference, University of California, Berkeley, CA, pp.27~67.
54. Leong, E. C., and Rahardjo, H.(1997), "Review of Soil-water Characteristic Curve Equations", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 12, December, ASCE.
55. Lumb P.(1975), "Slope Failures in Hong Kong", Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol.8, pp.31~65.
56. Mein R. G. and Larson C. L.(1973). "Modeling infiltration during a steady rain", Water Resour. Res., Vol. 9, No. 2, pp.384~395.
57. Mualem Y.(1976), "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media", ASCE, pp.513~521.
58. Ng, C. W. W. and Shi, Q.(1998), "A Numerical Investigation of the Stability of Unsaturated Soil Slopes Subjected to Transient Seepage", Computers and Geotechnics, Vol. 22, No. 1, pp.1~28.
59. Ng, C. W. W. and Pang, Y. W.(1999), "Stress effects on soil-water characteristic curve pore water pressure distributions in unsaturated soil slopes", 11th Asian Regional Conference on SMGE.
60. Narasimhan T. N. and Witherspoon P. A.(1977), "Numerical Model for Saturated-Unsaturated Flow in Deformable Porous Media 1. Theory", Water Resources Research, Vol.13, No.3, pp. 657~664.
61. Narasimhan T. N. and Witherspoon P. A.(1977), "Numerical Model for Saturated-Unsaturated Flow in Deformable Porous Media 2. the Algorithm", Water Resources Research, Vol.13, No.3, pp. 255~261.

62. Oberg, A. L.(1995), "Negative pore pressures-Seasonal variation and importance in slope stability analysis", *Unsaturated Soil*, Alonso and Delage (des).
63. Pradel, D. and Raad, G.(1993), "Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes", *J. Geotech. Engrg. ASCE.*, Vol. 119, No. 2, pp. 315~332.
64. Richards, L. A.(1931), "Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums", *Physics*, Vol. 1.
65. SEEP/W User's Guide(2002), GEO-SLOPE International Ltd.
66. SLOPE/W User's Guide(2002), GEO-SLOPE International Ltd.
67. Sloan, P. G. and Moore, I. D.(1984), "Modeling subsurface storm flow on steeply sloping forested watersheds", *Water Resour. Res.*, Vol.20, No.12, pp.1815~1822.
68. Soil-Vision User's Manual(2004), Soil Vision Systems Ltd.
69. Tami, D., Rahardjo, H., Leong, B. C., Fredlund, D. G.(2004), "Design and laboratory verification of a physical model of sloping capillary barrier", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.41, pp. 814~830.
70. Tsaparas, I., Rahardjo, H., Toll, D. G. and Leong, E, C.(2002), "Controlling parameters for rainfall-induced landslides", *Computers and Geotechnics*, Vol.29, pp. 1~27.
71. Wang, G. and Sassa, K.(2001), "Factors Affecting Rainfall-Induced Flowslides in Laboratory Flume Tests", *Geotechnique*, Vol. 51, No.7, pp.587~599.
72. Weyman D. R.(1973), "Measurements of the Down slope Flow of Water in a Soil", *Journal of Hydrology*, Vol.20, pp. 267~288.
73. Zaslavsky D. and Sinai G.(1981), "Surface Hydrology: V. In Surface Transient Flow", *ASCE*, Vol.107, No.HY1, pp. 65~93.

감사의 글

남들보다 긴 과정동안 미흡하나마 소중한 결실을 맺게 되었습니다. 먼저 본 논문이 완성되기까지 많은 도움과 격려를 주신 모든 분들께 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

석·박사 과정과 본 논문이 완성되기까지 학문적으로나 인간적으로 세심한 배려와 지도로서 격려와 성원을 아끼지 않으시고, 항상 바른길로 인도해 주신 심태섭 교수님께 머리 숙여 감사드립니다. 바쁘심에도 불구하고 여러 가지로 미흡한 논문을 보다 좋은 논문이 될 수 있도록 조언과 격려를 아끼지 않으시고 심사하여 주신 조선대학교 안종필 교수님, 박길현 교수님, 동신대학교 양우식 교수님, 호남대학교 이원택 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

학부시절부터 대학원과정까지 많은 애정과 가르침으로 부족한 저를 지금의 위치까지 있도록 성장시켜 주신 정영동 교수님, 오재화 교수님, 김운중 교수님 그리고 김성홍 교수님, 박정웅 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

항상 깊은 관심과 힘들 때마다 격려와 용기를 주신 조선이공대학 기원서 교수님, 송원대학 정상국 교수님, 서강정보대학 주승완 교수님, (주)서림 박주원 사장님께도 깊은 감사를 드리며, 깊은 애정과 격려로 빈 공간을 채워 주신 동강대학 교수님들과 서강정보대학 교수님들께도 진심으로 감사드립니다.

아낌없는 질책과 격려로서 깊은 사랑을 주신 서초수도학원 박성규 원장님, 박동규 원장님께 깊은 감사의 마음을 전합니다. 또한, 논문을 완성하기까지 바쁘신 와중에도 많은 도움을 주신 최두영 선생님께도 감사를 드립니다.

대학원 생활이 힘들 때마다 친형님처럼 옆에서 힘이 되어주신 양승현 박사님, 강상구 박사님께도 감사드리며 같은 길을 걸어오면서 서로의 기쁨과 아픔을 함께 해온 석·박사 과정의 동반자인 김영균 선생님의 애정과 사랑은 마음속 깊이 간직할 것이며 좋은 논문 쓰시길 기원합니다.

대학원 생활동안 옆에서 힘이 되어준 지반원우회 선배님과 후배님들께 깊은 감

사를 드리며, 항상 따뜻한 마음으로 격려해 주신 김우혁 박사님, 신태욱 박사님, 최순범 사장님께도 감사드립니다. 각자의 자리에서 깊은 관심으로 격려와 성원을 아끼지 않는 김성현 선생님, 성현종 선생님, 황선하 선생님, 최웅, 이광모, 최응준 후배님께도 깊은 감사를 드립니다.

또한 논문이 완성되기까지 도움을 준 석사과정의 유준규, 박세원, 최진호 후배님에게도 감사와 사랑의 마음을 전하며, 항상 진실과 배려하는 마음으로 학업증진에 매진하기를 성원합니다. 가까이서 멀리서 항상 성심껏 성원해준 터울회, 토담회, 시나브로 회원님들께도 깊은 감사의 마음을 전합니다.

공부하는 자식을 위해 아직까지 힘든 농사일을 놓지 못하시고, 가장 큰 사랑과 믿음으로 언제나 저의 곁에서 묵묵히 지켜봐 주시며 성원해 주신 아버님, 어머님께 머리 숙여 깊은 감사를 드리며 공부하는 저에게 딸을 맡기시고도 항상 웃음으로 격려해 주신 장모님과 고인이 되신 장인어르신께도 깊은 감사의 마음을 전합니다. 그리고 항상 가까이서 마음속 깊이 성원해 주신 형님들과 형수님들, 자형들과 누님들 그리고 처형 내외, 처남 내외에게도 깊은 감사의 마음을 전합니다.

오늘이 있기까지 오랜 세월동안 많은 어려움 속에서도 인내하며 묵묵히 사랑과 정성으로 뒷바라지를 해 온 영혼한 동반자 아내 승희와, 항상 아빠와 노는 시간이 적다고 불평하는 큰아들 태완이와 이제 갓 돌이 된 작은 아들 민찬이에게 진심으로 사랑하고 더 멋진 남편과 더 자상한 아빠가 되겠다는 말을 전하며 이 작은 보람을 함께 나누고 싶습니다.

끝으로 이 결실이 또 다른 시작의 밑거름이 되어 학문정진에 더욱더 노력할 것이며, 항상 겸손함과 초심을 잃지 않고 열심히 살아갈 것을 다짐하면서 도와주신 모든 분들께 다시금 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

2008년 7월

연구실에서 김 선 학

저작물 이용 허락서

학 과	토목공학과	학 번	10141072	과 정	박 사
성 명	한글 : 김 선 학 한문 : 金 善 學 영문 : Kim, Sun Hak				
주 소	광주광역시 서구 풍암동 주은모아아파트 102동 1008호				
연락처	E-mail : sun93k@naver.com				
논문 제목	한글 : 강우재현 모형실험에 의한 불포화 무한사면의 간극수압 특성				
	영문 : Pore Water Pressure Characteristics of Unsaturated Infinite Slopes through Simulated Rainfall System				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의() 반대()

2008년 8월 25일

저작자 : 김 선 학 (인)

조선대학교 총장 귀하