



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2018年 8월
박사학위논문

고로슬래그와 아라미드 섬유를
이용한 보강그라우트재 특성 연구

조선대학교 대학원

토목공학과

김찬정

고로슬래그와 아라미드 섬유를 이용한 보강그라우트재 특성 연구

**A Study on Characteristics of Reinforcement Grout Materials
Using Blast Furnace Slag and Aramid Fiber**

2018년 8월 24일

조선대학교대학원

토목공학과

김찬정

고로슬래그와 아라미드 섬유를 이용한 보강그라우트재 특성 연구

지도교수 김 대 현

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함

2018년 4월

조선대학교 대학원

토 목 공 학 과

김 찬 정

김찬정의 박사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김 운 중 (인)

위 원 조선대학교 교수 박 정 응 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 성 홍 (인)

위 원 송원대학교 교수 정 상 국 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 대 현 (인)

2018년 6월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제 1 장 서론	1
1.1 연구배경과 목적	1
1.2 연구동향	3
1.3 연구내용 및 방법	9
제 2 장 이론적 배경	11
2.1 그라우팅 공법	11
2.1.1 개요	11
2.1.2 그라우팅 공법 종류	11
2.1.3 주입재료 분류	13
2.1.4 그라우팅 공법 조건	15
2.1.5 그라우팅 침투 이론	19
2.1.6 침투한계 주입비	22
2.2 그라우팅 공법 설계	25
2.2.1 주입재의 종류 및 특성	25
2.2.2 그라우팅 공법 선정	32
2.2.3 그라우트량 계산	34
2.2.4 그라우팅 공 배치 방법	37

2.3	지반개량공법	39
2.3.1	개요	39
2.3.2	지반개량제의 일반적 성질	40
2.3.3	지반개량제의 수축 및 균열	42
2.3.4	지반개량제의 활용	43
2.4	아라미드 섬유	45
2.4.1	개요	45
2.4.2	아라미드 섬유 제조 방법	47
2.4.3	아라미드 섬유 구조화 특성	49
 제 3 장 실내시험		 52
3.1	개요	52
3.2	주입재료의 Gelttime 측정	53
3.2.1	Gelttime 측정을 위한 배합비	53
3.2.2	Gelttime 측정을 위한 제작과정	55
3.3	배합비별 일축압축강도시험	56
3.3.1	호모겔 일축압축강도를 측정하기 위한 배합비	56
3.3.2	호모겔 공시체 제작과정	58
3.3.3	샌드겔 일축압축강도 측정하기 위한 배합비	60
3.3.4	샌드겔 공시체 제작과정	62
3.4	배합비에 따른 투수시험	64
3.5	SEM 및 EDX 분석 방법	66
3.6	환경성 평가	67
3.6.1	중금속 용출시험	70
3.6.2	pH시험	72

제 4 장 실내시험 결과분석	73
4.1 배합비에 따른 Gelttime 분석	73
4.1.1 표면유제처리 비율에 따른 Gelttime 분석	74
4.1.2 아라미드 섬유에 따른 Gelttime 분석	76
4.1.3 Gelttime 종합분석 결과	78
4.2 호모젤의 일축압축강도 분석	80
4.2.1 C:B 배합비에 따른 일축압축강도 시험결과	80
4.2.2 O:A 배합비에 따른 일축압축강도 시험결과	82
4.3 샌드젤의 일축압축강도 분석	86
4.3.1 C:B 배합비에 따른 일축압축강도 시험결과	86
4.3.2 O:A 배합비에 따른 일축압축강도 시험결과	88
4.3.3 재령에 따른 일축압축강도의 통계분석	92
4.4 투수시험 결과	94
4.4.1 투수시험 결과분석	94
4.4.2 기존공법(LW공법)과의 그라우팅 특성 비교	96
4.5 SEM 및 EDX 분석결과	97
4.5.1 SEM 분석결과	97
4.5.2 EDX 분석결과	99
4.6 환경성평가 시험결과	101
4.6.1 용출시험 결과 분석	101
4.6.2 pH시험 결과 분석	102
 제 5 장 결론	 104
 참고문헌	 106

표 목 차

표 2.1 그라우트 종류별 G_{85} 와 G_{95} 의 값	23
표 2.2 포틀랜드시멘트 물리적 특성	26
표 2.3 주입재 화학성분	28
표 2.4 주입재 입도분포	28
표 2.5 주입재 물리적 성질	29
표 2.6 규산소다 종류	30
표 2.7 그라우팅 룯드 구성에 의한 약액 그라우팅 종류	32
표 2.8 목적별 그라우트 분류	33
표 2.9 토질에 의한 그라우트의 충진율, 그라우팅률의 참고치	36
표 2.10 토질별 그라우팅간격	38
표 2.11 초고강도 섬유소재의 물리적 성질	51
표 3.1 Gelttime 측정을 위한 주입재 배합비(중량비)	54
표 3.2 호모겔의 일축압축강도 측정을 위한 주입재 배합비(중량비)	57
표 3.3 샌드겔의 일축압축강도 측정을 위한 주입재 배합비(중량비)	61
표 3.4 투수시험 측정을 위한 주입재 배합비	64
표 3.5 중금속 검출기준	71
표 3.6 pH 시험 방법	72
표 4.1 Gelttime 종합분석 결과	79
표 4.2 호모겔 일축압축시험 결과	84
표 4.3 호모겔 일축압축 공시체 단위중량	85
표 4.4 샌드겔 일축압축시험 결과	90
표 4.5 샌드겔 일축압축 공시체 단위중량	91
표 4.6 채령 3일에 따른 회귀분석 결과	92
표 4.7 채령 28일에 따른 회귀분석 결과	93
표 4.8 투수시험 결과	94
표 4.9 기존공법(LW공법)과의 그라우팅 특성 비교	96
표 4.10 C:B(100 : 0%)에 대한 EDX 분석 결과	99

표 4.11 C:B(70 : 30%)에 대한 EDX 분석 결과	100
표 4.12 C:B(40 : 60%)에 대한 EDX 분석 결과	100
표 4.13 중금속 용출 시험결과	101
표 4.14 pH 용출 시험결과	102

그림 목 차

그림 2.1 혼합공정에 의한 그라우팅 방식 분류	12
그림 2.2 주입재 분류	13
그림 2.3 그라우트 재료에 대한 고결진행시험	15
그림 2.4 균열 내에서의 그라우트 슬러리 속도비교	17
그림 2.5 그라우트 슬러리와 물에 따른 유동학적 해석 모델	18
그림 2.6 토립자 간극에서의 약액의 침투와 규산겔에 의한 토립자 고결 모형도	19
그림 2.7 $d/D(\%)$ 와 간극률 n 과의 관계	24
그림 2.8 물유리 겔화 과정	31
그림 2.9 그라우팅공 배치	37
그림 2.10 시멘트 안정처리 기층	41
그림 2.11 시멘트 안정처리에 따른 수축 및 균열	42
그림 2.12 S.C.W 공법	43
그림 2.13 기존 공법과 새로운 공법의 비교	44
그림 2.14 파라아라미드 섬유 개발 역사	45
그림 2.15 파라계 아라미드 섬유	46
그림 2.16 파라계 아라미드 원사의 제조 과정	48
그림 2.17 섬유 파쇄 장치	48
그림 2.18 파라계 아라미드 섬유의 화학식	49
그림 2.19 파라계 아라미드 섬유의 구조	50
그림 3.1 Geltime 측정을 위한 시험과정	54
그림 3.2 주입재의 Geltime 측정 모습	55
그림 3.3 호모겔의 일축압축강도 측정을 위한 시험과정	57
그림 3.4 호모겔 제작에 사용된 일축압축 시험용기	58
그림 3.5 호모겔의 공시체 양생	59
그림 3.6 샌드겔의 일축압축강도 측정을 위한 시험과정	61
그림 3.7 일축압축시험 전경	63
그림 3.8 투수시험 배합 과정	65
그림 3.9 시험에 사용된 전자현미경	66

그림 3.10 Leaching test 방법	68
그림 3.11 폐기물공정시험방법에 따른 Leaching test 절차	69
그림 4.1 표면유제처리 0.7%의 C:B 배합비에 따른 Gelttime 측정결과	74
그림 4.2 표면유제처리 1.2%의 C:B 배합비에 따른 Gelttime 측정결과	75
그림 4.3 아라미드 섬유 0.5%의 C:B 배합비에 따른 Gelttime 측정결과	76
그림 4.4 아라미드 섬유 1.0%의 C:B 배합비에 따른 Gelttime 측정결과	77
그림 4.5 C:B 배합비에 따른 Gelttime 측정결과	79
그림 4.6 C:B 배합비에 따른 일축압축강도 분석	81
그림 4.7 O:A 배합비에 따른 일축압축강도 분석	84
그림 4.8 C:B 배합비에 따른 일축압축강도 분석	87
그림 4.9 O:A 배합비에 따른 일축압축강도 분석	90
그림 4.10 차수 그라우트 재료에 따른 차수효과 분석	95
그림 4.11 무섬유 시료의 SEM 사진	97
그림 4.12 아라미드 섬유로 시료의 SEM 사진	98
그림 4.13 pH 용출 시험결과	103

ABSTRACT

A Study on Characteristics of Reinforcement Grout Materials Using Blast Furnace Slag and Aramid Fiber

Kim, Chan Jung

Advisor : Prof. Kim, Daehyeon, Ph. D.

Department of Civil Engineering

Graduate School of Chosun University

Various grouting methods have been used recently to secure the stability of the ground in civil engineering works at the sites such as old reservoirs and dams. The grouting method is used for reinforcement and waterproofing of soft ground and restoring foundation and increasing bearing capacity of the structured damaged by subsidence and uneven subsidence due to lowering or rising of groundwater level and vibration at reservoir or dam. The cement is commonly used as a binder in ground improvement method such as grouting method, however these cement materials may cause environmental problems.

The replacement of cement with a large amount of admixture, an industrial byproduct, has been increasing as an effort to reduce the amount of cement used. In the grouting field for improving ground, the rapid drop in fluidity and rapid hardening of furnace slag in early phase may be advantageous and the strength of grout material, unlike cement concrete, does not require initial high strength.

In addition, cement is a brittle materials and have poor resistance against tensile and horizontal forces. The purpose of this study was, therefore, to develop a ground improvement method of higher resistance, an recently raised domestic issue, by improving tensile and horizontal force with aramid fiber.

For the purpose, this study used furnace slag fine powder, cement, and recycled

aramid fiber. The calcium hydroxide was used as a furnace slag fine powder for membrane destruction by latent hydraulic activity. To avoid the environmental problems caused by existing LW method, various laboratory tests were performed based on above mixing materials before site application and optimum mixing ratio was determined by analyzing the increase in compressive strength due to lateral force improvement, a characteristics of fiber material, durability, and establishment of compressive strength and waterproof due to replacement with large amount of furnace slag fine powder.

In order to confirm the effect of strength improvement by grout material, gellime and uniaxial compressive strength tests on related homo-gel and sand-gel were performed. In addition, permeability tests to determine waterproof effect, SEM and EDX analysis to characterize the ground enforced by addition of fiber demolition agent, and heavy-metal leaching test and pH test to determine environmental effect were performed.

The results of laboratory tests showed that the uniaxial compressive strength of both homo-gel and sand-gel increase with the increase in contents of fiber demolition agent and processing rate of surface agent, suggesting that the bridging activity caused by aramid fiber in cement material promotes uniaxial compressive strength. The highest 3-days and 28-days strengths in homo-gel were found to be C:B 100 : 0% and O:A 1.2 : 1.0% of C:B 40 : 60%, respectively. and these of sand-gel were O:A 1.2 : 1.0% of C:B 40 : 60% in both cases.

The permeability coefficient was lowest in C:B 40 : 60%, suggesting that the this new mixed material of this study has excellent waterproof effect according to mixing rate of furnace slag fine powder and aramid fiber, therefore, is expected to be used as a cut off wall grouting material in the field.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 노후화된 저수지, 댐 등의 토목공사에서 지반의 안정성 확보를 위하여 다양한 그라우팅 공법이 사용되고 있다. 과거에는 압밀을 유발하는 압밀배수공법이나, 동적하중을 이용한 다짐공법, 시멘트나 약액 등 화학약품을 이용하여 지반을 고결화시키는 그라우팅공법이나 원지반 토사 자체를 치환하는 치환공법, 샌드 드레인, 페이퍼 드레인 공법 등을 주로 사용하였다(박경호, 2015).

그라우팅공법은 토목분야에서 주로 불안정한 사면의 보강목적이거나 매립지역, 제방 또는 댐 등의 차수를 필요로 하는 곳, 그리고 구조물의 보수·보강, 연약지반 보강의 수단으로 개발되었다. 최근에는 지하철, 도로 및 공항, 단지조성, 고속철도, 항만, 발전소 등 수많은 대규모 국가 산업시설물 건설공사에서 사용되고 있다. 하지만 공사가 진행되는 동안 연약한 지반에 대한 안전대책 소홀로 비롯되는 인적 물적사고가 끈임없이 일어나고 있으며, 구조물이 완성된 후 발생하는 크랙이나 기울어짐, 누수 등의 원인도 연약한 지반의 부등침하가 직접적인 원인인 경우가 많았다(천병식 등, 1994).

이와 같이 그라우팅 공법은 연약지반의 보강 및 차수, 저수지와 댐 시공 등 지하수 위저하 또는 상승과 진동으로 인하여 침하 및 부등침하에 피해를 받는 건물의 원상복구 및 지지력증대를 위해 사용되고 있다. 그라우팅공법과 같은 지반개량공법의 고결제로는 시멘트를 보편적으로 사용하고 있으나 시멘트 재료는 환경적인 문제를 일으킬 수 있다.

전 세계 CO₂발생량의 3~7%가 포틀랜드시멘트(Ordinary portland cement, OPC)의 생산과정에서 발생하며, 시멘트구조물에서 용출되는 Cr⁶⁺ (6가크롬)¹⁾ 또한, 환경적으로 문제가 될 수 있다. 특히 건설산업에서 환경에 대한 관심이 점점 커짐에 따라 새로운 개선마련의 요구가 커지고 있는 실정이다.

이러한 시대적 요구에 따라 시멘트를 사용하는 대신 일정량을 산업부산물로 치환하는 노력이 증가되고 있는 추세이며, 특히 제철과정에서 산업부산물로 발생하는 고로슬

1) 6가크롬 또는 6가크롬화합물(Cas No. 7440-47-3, MW=51.996, BP=2,672℃)은 정사면체 구조로서 Oxide 또는 Oxyanions로 존재하며, 세포막의 음이온 채널을 통해 세포안으로 통과하므로 3가크롬보다 흡수가 더 잘되며, 생화학적인 변화를 거쳐 발암성을 야기하게 된다(김치년 등, 2009; 윤충식 등, 1999).

래그 미분말, 플라이 애시(Fly Ash)²⁾, 실리카 흙(Silica Fume)³⁾, 메타카올린(Meta-Kaolin)⁴⁾ 등이 꾸준히 연구되고 있다. 특히, 포틀랜드시멘트와 성분이 유사하면서 잠재수경성⁵⁾의 특징을 지닌 고로슬래그 미분말은 플라이애시 등과 같은 물질을 사용할 때보다 2배 정도 높은 치환율로 활용되어도 큰 문제가 없는 것으로 알려지고 있어 점점 그 치환율이 증가하고 있는 추세이다(국토교통부, 2014).

고로슬래그 미분말의 활용 방안은 지속적으로 개발되어져 왔으나 비교적 큰 켈타임에 따른 초기강도 저하, 크랙발생과 초기 급경 현상 등의 뚜렷한 단점 때문에 그 한계가 분명했다. 하지만 그라우팅 분야에서 고로슬래그의 급속한 유동성 저하 및 초기 급경현상은 오히려 높은 투입율을 기대할 수 있으며, 그라우팅공법의 특성상 그라우트재의 강도에는 시멘트 콘크리트 만큼의 높은 초기강도 값을 요구하지 않는다.

또한, 시멘트 등의 물질은 취성재료로써 인장, 수평력에 취약한 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 보완하기 위하여 아라미드 섬유를 이용하여 인장, 수평력을 증대시켜 최근 국내에서 대두되고 있는 내진성능도 향상시킬 수 있는 지반개량공법을 개발하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 그라우팅 재료개발의 기본 시험인 Geltime 시험을 수행하였고, 고로슬래그 미분말과 아라미드 섬유를 첨가한 차수 그라우팅 재료개발의 특성에 맞게 투수시험과 내구성 확인을 위해 호모겔, 샌드겔의 일축압축강도를 측정하였다. 또한, 유제처리량에 따른 유동성과 섬유의 분산성에 대한 검토를 하고자 물 : 규산소다 3호의 양은 50:50%로 고정하고, 시멘트 : 고로슬래그 미분말의 비는 100:0%, 70:30%, 40:60%로 고치환(50% 이상)까지 확인하고자 하였다.

아라미드 섬유의 혼입율은 시멘트 : 고로슬래그 중량의 0.0%, 0.5%, 1.0%로 증가시켜 첨가하였고, 표면의 유제처리 비율을 0.7%와 1.2%로 Geltime, 호모겔, 샌드겔 공시체를 성형하여 기존 공법과 비교·분석하였으며, 배합비별 재료의 특성을 분석하기 위해 Scanning Electron Microscope(이하 SEM)⁶⁾ 분석과, Energy Dispersive X-Ray(이하

2) 석탄이나 증유를 보일러 연료로 사용하는 화력발전소에서 연료의 연소과정중 발생하는 회분을 굴뚝에서 전기 집진기로 포집한 연소재로서, 입자의 크기는 시멘트와 같은 정도이며, 알루미늄(Al_2O_3)과 산화규소(SiO_2)가 주성분이다.

3) 실리콘(Si), 페로실리콘(FeSi), 실리콘 합금 등을 제조할 때 발생하는 폐가스 중에 포함되어있는 산화규소(SiO_2)를 집진기로 수집 및 여과하여 얻어지는 마이크로 실리카 입자로서, 고강도 시멘트 및 콘크리트 제품, 내화물, 석면 등의 대체재로서 활용되고 있다.

4) 카올린광물을 가열 처리하여 얻어지는 탈수형 물질로 시멘트 입자보다 작고, 주로 시멘트의 혼화제로 사용된다.

5) 보통의 조건에서는 물과 접촉하여도 수경성을 보이지 않으나, 특정 조건이 만족될 경우 수경성을 나타내는 성질을 말한다. 특히, 슬래그의 경우 물과 접촉하여도 수경성을 나타내지 않지만, 알칼리 자극제로 소석회, 유산염 등이 존재하면 수경성을 나타낸다.

하 EDX)⁷⁾분석, 환경성 평가를 수행하기 위하여 배합비별 중금속(Cr^{6+}) 용출시험과 pH 측정을 수행하여 그라우트재의 현장 적용성을 위한 지반조건에 따른 적절한 그라우트 재료를 개발하고자 하였다.

1.2 연구동향

그 동안 시멘트 사용 시 환경적 문제를 해소하기 위해 폐기되는 고로슬래그의 재활용에 관한 연구가 활발하게 진행되어왔다. 고로슬래그 미분말은 선철을 제련하는 과정에서 발행하는 대표적인 부산물중 하나이다. 그 자체로는 경화하는 성질이 미약하지만 알칼리 용액에 의해 경화가 촉진될 수 있으며, 시멘트 수화생성물인 황산염과 수산화칼슘에 반응하여 압축강도가 증가되는 특성을 지닌다. 이러한 고로슬래그에 관한 연구는 주로 시멘트 사용량을 줄이기 위한 목적 또는 소량을 사용하여 시멘트 혼화재로서의 용도에 국한되어 있었다.

또한, 최근 국내에서는 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트에 대한 연구가 진행되고 있으며, 사용하는 시멘트의 일정비율에 대해 고로슬래그 미분말을 치환하는 형태의 연구가 진행되고 있다.

Kyhl(1930)은 고로슬래그분말과 수산화칼륨용액 혼합물의 응결에 대하여 연구하였으며, 수산화칼륨과 수산화나트륨 용액을 사용하여 슬래그의 반응성을 평가하였다. 그 결과 수산화나트륨용액과 슬래그 및 가성 알칼리재료의 배합비에 관한 결과를 도출하였다.

Shi and Day(1995)는 알칼리 활성화 슬래그의 수화특성을 분석하였다. 그 결과 초기에는 pH가 반응과 반응생성물에 끼치는 영향이 크지만, 이후 Ca와의 반응이 초기 pH반응보다 커지는 것을 확인하였다.

수쇄슬래그와 수산화칼슘을 혼합한 슬래그 시멘트가 상품화되어 서구권 국가에서도

6) 주사전자현미경(SEM)은 전자선이 시료면 위를 주사(Scanning)할 때 시료에서 발생하는 여러 가지 신호중 그 발세확률이 가장 많은 이차전자 또는 반사전자를 검출하는 장치이다. 주로 시료 표면의 정보를 얻을 수 있고, 시료의 두께, 크기에 제한을 받지 않으며, 광학현미경에 비해 입체적인 상을 얻는 것이 가능하다.

7) 재료의 표면에 전자현미경에서 발생된 전자가 충돌할 때 방출된 고유의 X선을 디텍팅하여 물질을 유추해내는 장치로 주로 광물의 함량을 측정할 때 사용된다.

상업적으로 생산되기 시작하였으며, 이 슬래그시멘트는 포틀랜드시멘트보다 낮은 비용으로 비중이 작았으며, 미분쇄한 것은 강도 등의 품질 면에서도 당시의 포틀랜드시멘트에 충분히 대항할 수 있었다.

G. Prussing은 1882년 포틀랜드시멘트 클링커⁸⁾에 수쇄슬래그를 섞어 혼합 분쇄하는 방식을 연구해 철포틀랜드 시멘트를 개발하였다. 한편 수쇄슬래그 60~70%를 클링커에 혼합한 시멘트는 1907년 P. Prussing에 의해 개발되었으며, 이것은 고로시멘트라고 불려졌다. 일본에서도 1910년 슬래그량이 60~70%까지 함유된 고로시멘트를 제조하여 1913년부터 본격적으로 생산에 들어가 오늘날까지 이어지고 있다.

1930년대 독일에서는 Thurament라고 불리는 수쇄슬래그를 클링커와 혼합 분쇄하지 않는 방식의 고로슬래그 미분말 제조를 시작하였다. 콘크리트 혼합시 믹서에 투입하는 혼화재 방식의 이 재료는 건설재로서 각광받았지만 품질의 신뢰성 등을 고려하여 사용에 제한을 받아 저 강도용 콘크리트로 사용대상이 한정되었다(박영복, 2017). 포틀랜드 시멘트와 Thurament를 중량비 1:1로 만든 DIN모르타르의 강도는 통상 재령 28일 기준에서 포틀랜드시멘트 모르타르의 70% 이상이 되도록 요구되었다(김시환, 2008).

N. Satterheim은 1953년에 건조슬래그 분말을 개발하였다. 이 고로슬래그 분말은 Blaine값으로 $3,800\text{cm}^2/g$ 이상으로 사용에 제한이 없고 Thurament보다 분말도가 커서 대표적인 고로슬래그 분말의 혼화재 양식으로 인정받고 있다. 1950년대 남아프리카에서 처음 사용되었으며, 현재에는 전세계적으로 일반화되어 있다.

이처럼 콘크리트 믹서에 고로슬래그 분말을 직접 투입하는 방식에 착안하여 콘크리트 믹서내에서 고로시멘트를 제조하는 방식 또한 개발될 수 있었다. 특히 일본에서는 이와 같은 고로슬래그 분말을 투입하는 시멘트제조는 시멘트의 품질개선을 위한 목적이 강하다(박영복, 2017).

한편 국내의 고로슬래그 미분말에 관한 연구는 단순한 순환골재로의 활용이 연구의 주를 이루었다. 많은 연구자들이 경제성 측면에서 강점을 지닌 골재를 재활용하여 환경친화적인 모르타르의 개발에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다(김영희 등, 2013; 한천구 등, 2011; 박선규 등, 2013; 정지용 등, 2015). 연구의 또 다른 축으로는 건설현장에서의 시공성과 물리적 특징을 분석하기 위해 고로슬래그 미분말의 치환률과 분말도에 연구의 초점이 맞춰져 있는 경우가 많았다(조성광, 2013; 장현오 등, 2013; 이승태,

8) 석회석과 점토 등을 섞어서 고온으로 가열하면 나오는 어두운 녹색의 물질로 여기에 석고를 섞은 뒤 분쇄하여 얻어지는 물질이 시멘트이다.

2014).

한천구 등(2009)과 김준호 등(2014)은 시멘트와 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 시험체의 압축강도 및 특성을 측정하였다. 그 결과 치환율이 높아질수록 유동성은 증가하고, 공기량은 소량 감소하는 것으로 나타났다. 강도값은 재령 28일을 기준으로 초기에는 일반 시멘트에 비해 낮았으나, 이후에는 동등 이상의 강도값을 발휘하는 것으로 나타났다.

이현호(2016)는 고로슬래그 미분말과 순환 껌은골재를 혼합한 콘크리트의 특성에 관하여 연구하였으며, 김무한 등(2007)도 고로슬래그 미분말을 다량 치환한 콘크리트의 특성에 관한 연구를 진행하였다. 민경산과 이승현(2007)은 고로슬래그와 첨가제(알루미나시멘트)⁹⁾를 혼합하여 강한 내산성을 지닌 재료를 개발하였으며, 고로슬래그와 Na 활성화제를 사용한 무시멘트 슬래그의 특성에 관한 연구를 진행하였다.

박성식 등(2013)은 시멘트의 사용없이 다양한 종류의 화학약품과 친환경 재료로 만든 알칼리 활성화제를 이용하여 사질토를 고결화 하는 연구를 진행하였으며, 사용한 알칼리 활성화제는 수산화칼슘, 수산화나트륨, 수산화칼륨, 굴폐각을 이용하였고, 모든 알칼리 활성화제에 대해 고로슬래그의 양이 증가할수록 일축압축강도가 증가한다고 하였으며, 동일한 화학성분을 가진 알칼리 활성화제를 비교하였을 때 화학적 알칼리 활성화제가 더 큰 일축압축강도를 얻는다고 하였다.

최선규(2013)는 고로슬래그 미분말과 알칼리 활성화제를 첨가하여 흙을 고결시키는 연구에 대하여 진행하였으며, 수산화칼슘, 수산화나트륨을 이용한 화학적 알칼리 활성화제와 굴폐각, 미생물 알칼리 활성화제를 이용하여 일축압축강도 비교시험을 실시하였으며, 고로슬래그와 미생물 알칼리 활성화제를 이용하였을 때 내구성 및 경제성이 높은 친환경 고결제로 현장 적용 가능성이 있다고 하였다.

이재현 등(2015)은 무시멘트 결합재의 지반 그라우팅용 결합재로서의 적용 가능성을 검토하기 위하여 고로슬래그를 사용하여 호모겔강도의 변화 특성에 대하여 연구하였으며 결합재의 화학조성비에 따라 호모겔강도의 차이가 나타난다고 하였다.

오명현(2015)은 기존의 약액주입공법이 가지고 있는 물환경에 부적합한 문제점을 해결하기 위해 무시멘트 알칼리 활성 슬래그 결합재를 이용한 연구를 진행하였으며, 겔화¹⁰⁾를 발생시키는 알칼리 활성 자극제를 선정하고 선정된 알칼리 활성 자극제를 이용

9) 석회석과 보크사이트등 알루미늄 성분이 많은 점토류와 배합하여, 1,500~1,600℃에서 용융한 다음 냉각시켜 미세한 분말로 만든 것으로 경화시간이 짧다.

10) 졸(sol)이 겔(gel)로 변하는 현상으로 뚜렷한 탄성의 증가, 급격한 점도의 상승을 보인다.

하여 시험을 수행하였고, 수산화나트륨과 탄산나트륨을 혼합하여 사용하는 것이 바람직하다고 평가하였으며, 현장적용을 위한 지속적인 연구가 필요하다고 하였다.

이현진 등(2016)은 알칼리 활성 슬래그 기반 무시멘트 콘크리트를 이용하여 연구를 수행하였으며, 물-결합재비에 따른 장기 염소이온 침투 저항성 및 황산염 침투 저항성을 평가하였고, 포틀랜드시멘트를 이용하였을 때보다 염소이온 및 황산염 침투 저항성이 대폭 개선되는 것으로 나타났으며, 재령 365일의 공시체에서 황산염 침투 환경에 노출된 무시멘트 길이변화율이 매우 작아 시멘트를 사용할 때 보다 우수한 성능을 나타낸다고 하였다.

이동윤(2017)은 고로슬래그 미분말을 다량치환한 모르타르의 품질향상을 위한 탈황석고의 최적 정제방법 및 혼입비율을 제시하고자 연구를 진행하였으며, 탈황석고의 치환율이 증가할수록 유동성은 감소하고 응결시간은 단축되며 흡수율은 증가하는 것으로 나타났으며 건조수축 길이변화율은 감소하는 것으로 나타났다. 또한 압축강도의 경우 정제방법에 따라 최적 혼입비율이 다르다고 하였다.

김호철(2018)은 고로슬래그 미분말을 20%, 40%를 치환하였고 탄소섬유를 사용하여 차수그라우트재를 개발하고자 하였다. 호모겔 일축압축강도 시험결과, 고로슬래그 미분말의 함유량이 증가할수록 일축압축강도는 감소하는 경향을 나타내었고, 탄소섬유의 함유에 따라 공시체의 일축압축강도는 증가하였다.

이처럼 고로슬래그 미분말을 사용한 연구는 콘크리트에서 순환골재의 대체자원으로 사용하는 연구가 지배적이었으나, 최근 고로슬래그 미분말을 고치환하는 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다. 하지만 현재 연구자들에 의한 결과가 각각 다르게 나타나고 있어 고로슬래그 미분말을 다량치환한 시멘트에 대한 연구는 지속적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 고로슬래그 미분말의 치환율을 높여 시멘트 사용량을 최소화하는 친환경적인 차수그라우트재 및 강도 증진을 통한 지반개량제에 대한 연구를 진행하고자 한다.

한편 토목 구조물에 첨가제와 혼화제로 섬유를 활용한 보강공법 또한 국내·외로 연구가 이루어지고 있다.

콘크리트는 압축강도가 크고 내화성과 내구성이 우수하며 경제성, 시공성의 편리함 등으로 인하여 건축 및 토목구조물에 가장 많이 사용되는 구조재료 중 하나이지만, 콘크리트는 건조함에 따라 인장응력이 작용하여 건조 수축이 크고, 상대적으로 인장강도

가 작으며, 취성 파괴가 일어나는 단점을 가지고 있다(한국콘크리트학회, 2005).

이러한 콘크리트와 다르게 합성섬유는 고강도, 고탄성률의 우수한 물리적 특성을 가지고 있으며, 열안정성, 내약품성 등이 우수하여 산업용 섬유로 많이 이용되고 있다(Choi, 2002). 이러한 섬유가 가지고 있는 특성으로 콘크리트의 단점을 보완하고자 콘크리트와 섬유를 배합하여 섬유보강콘크리트를 만들었으며, 1960년대 이후로 유리섬유 및 강섬유를 이용한 연구가 점차적으로 확장되었다(Shah, 1988).

하기주 등(2013)은 고로슬래그 미분말과 순환골재를 치환한 강섬유 보강 RC보의 구조성능을 평가하였다. 그 결과 순환골재와 고로슬래그를 치환한 콘크리트에 강섬유를 보강한 시험체에서 안정적인 휨인장 파괴를 확인하였고, 최대내력이 1~6% 증가한 것으로 나타났다.

류금성 등(2013)은 지오폴리머(Geopolymer)¹¹⁾를 사용하여 강도발현을 확인하였다. 시험결과, 일반 시멘트에 비해 동결융해 저항성 및 강도발현이 약 20%증가되는 것으로 나타났다. 최민형 (2015)은 강섬유 보강 그라우팅을 쏘일네일링 공법에 활용하여 인장 및 압축강도를 시험하였다. 시험결과, 무처리 그라우팅 공법에 비해 압축강도와 인장강도, 전단강도가 각각 12.1%, 29.8%, 51.5% 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 현장 시험에서는 무처리 그라우팅에 비해 압축강도가 약 16% 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

이방연(2012)은 PVA(Poly Vinyl Alcohol)¹²⁾ 섬유를 활용하여 섬유를 이용한 그라우팅에 적합한 점성을 가지는 섬유 혼입량을 확인하고자 하였다. 시험을 위해 1.3%, 12mm와 1.6%, 8mm의 배합비로 배합하여 각 배합비별 점성과 인장강도를 측정하였으며, 1.6%에 8mm가 더 낮은 점성과 우수한 인장성능을 확인 할 수 있었다.

양열호(2017)은 아라미드 섬유를 0.0, 0.5, 1.0, 1.5%를 활용하여 호모겔의 일축압축강도 특성을 확인하였다. 시험결과, 아라미드 섬유의 함유율이 높을수록, 아라미드 섬유를 분산시키는 표면유체처리율이 높을수록 일축압축강도가 증가함을 확인하였다.

Shah and Rangan(1971)은 시멘트에 강섬유를 혼합하여 인장강도와 휨강도를 측정하였다. 그 결과 휨강도는 20배가 증가하고 인장강도는 2배가 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 섬유를 보강한 재료는 내충격성능, 균열제어성능, 휨·인장성능, 전단성

11) 포틀랜드 시멘트를 사용하지 않고 Si와 Al이 풍부한 플라이애쉬와 같은 무기물이 알칼리성 액체에 의해 활성화되는 결합제이다.

12) 초산비닐 모노머를 라디칼 중합 후 알칼리 검화하여 제조된다. 분자간 수소결합이 강하여 용융점이 높고 물에 용해되기 어려운 특성이 있다.

능, 압축성능 등에서 우수한 특성을 가지고 있어 시멘트의 단점을 보완하고 구조물의 유지보수 및 보강에 있어 높은 활용가능성을 지니고 있다.

Maalej et al.(2004)는 섬유를 활용하여 보강한 복합재료는 구조체 내에서 섬유가 콘크리트와의 일체거동을 통해 성능을 개선하는 원리이기 때문에 활용하는 섬유의 고유한 인장강도와 탄성계수 등의 재료적 특성과 사용하는 섬유의 혼입률이 결과물의 주요한 특성을 결정짓는다고 보았다.

Li(1993)은 PVA섬유 및 PE(Poly Ethylen)섬유¹³⁾가 고성능 또는 고인장성 섬유보강 시멘트의 경우 주로 사용되고 있으며, 이는 섬유와 시멘트 재료간의 계면가교작용을 하는 이들 섬유의 특성때문이라고 하였다.

Fariborz et al.(2007)은 아라미드 섬유 특성에 관한 연구를 진행하였다. 그 결과 아라미드 섬유는 인장강도가 약 2,920 MPa로 PVA섬유 및 PE섬유에 비하여 상대적으로 우수하며, 단섬유로 제조시 섬유의 길이와 직경은 PE섬유와 흡사한 것으로 나타났다.

섬유 보강 시멘트의 혼입률에 관한 연구는 사용된 섬유의 종류에 따라 다양하였으나 대부분의 경우 섬유보강재는 국내 순환골재 자원사용기준인 1.0%의 비율내외로 사용하고 있었다. 실질적인 이유로는 섬유보강재의 비율이 1.0%를 초과할 경우 친수성인 섬유의 특성 때문에 유동성이 급격히 저하되어 뭉침현상 등으로 인하여 품질관리에 어려움이 발생했기 때문인 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 아라미드 섬유를 시멘트의 무게대비 0.5%와 1.0%를 사용하여 차수그라우트 재료를 개발하고자 하였다. 실험 조건의 편의성 때문에 아라미드 섬유를 구입하여 사용하였으나, 추후 폐천막, 헌 옷 등을 재활용하여 경제성 및 일반폐기물의 재활용률을 높이고자 한다.

13) 석유에서 얻어지는 에틸렌을 주원료로 한 합성섬유로, 비교적 가볍고, 산과 알칼리에 견딜 수 있으며, 강하나 흡수성이 없고 내열성이 약하다.

1.3 연구내용 및 방법

본 연구에서는 고로슬래그 미분말, 재활용 자원인 아라미드 섬유 그리고 시멘트를 사용하였으며, 잠재수경성의 특성을 지니고 있는 고로슬래그 미분말의 박막파괴를 위해 $Ca(OH)_2$ (수산화칼슘)을 사용하였다. 이러한 배합재료를 기초로 하여 기존 LW공법의 문제점¹⁴⁾ 개선을 개선하고자 하였다. 또한 섬유재료가 가지고 있는 수평력 증대에 따른 압축강도 증가 및 내구성 확보하고, 고로슬래그 미분말을 고치환하여 시멘트 사용량 감소에 따른 압축강도, 차수성 확보 등의 특성을 분석하기 위해 각종 실내시험을 통하여 적정 배합비를 선정하고자 하였다.

실내시험은 그라우트재의 겔화진행 시간을 확인하기 위해 Getime을 측정하였고, 그에 따른 차수 효과를 확인하기 위해 호모겔 일축압축강도 시험 및 투수시험, 지반개량 효과를 확인하기 위해 샌드겔 일축압축강도 시험, 섬유 파쇄체를 첨가한 그라우트의 특성을 확인하고자 SEM 및 EDX 분석, 환경성 평가를 위해 중금속 용출시험 및 pH 시험을 수행하였다.

본 연구 목적을 달성하고자 실시한 실내시험을 요약하면 다음과 같다.

(1) Getime 및 호모겔 일축압축강도 시험

1) A액 - 규산소다:물(50 : 50%)

2) B액 - 시멘트 : 고로슬래그 미분말(100:0%, 70:30%, 40:60%), 아라미드 섬유(0.0%, 0.5%, 1.0%)

3) C액 - 표면유제처리(0.7%, 1.2%), 수산화칼슘(고로슬래그 미분말 1:1, 1Mol)

상기의 A액, B액, C액을 혼합하여 지반조건에 따른 Getime 및 호모겔의 시간경과에 따른 일축압축강도 특성을 분석하고, 이를 통하여 차수그라우트재를 개발하고자 하였다.

(2) 샌드겔 일축압축강도 시험

1) A액 - 시멘트 : 고로슬래그 미분말(100:0%, 70:30%, 40:60%), 아라미드 섬유(0.0%, 0.5%, 1.0%)

2) B액 - 표면유제처리(0.7%, 1.2%), 수산화칼슘(고로슬래그 미분말 1:1, 1Mol)

14) 내구성 및 차수효과가 떨어지고, 외력(충격 및 진동)에 저항력이 떨어진다.

상기의 A액, B액을 혼합하여 샌드겔의 시간경과에 따른 일축압축강도 특성을 분석하고, 이를 통하여 지반개량제를 개발하고자 하였다.

(3) 투수시험

본 연구에서는 차수그라우트재의 성능을 판단하기 위해 표준사 시료에 호모겔 일축 압축강도시험에서 적용한 배합비를 적용하였으며, 투수시험을 통해 각각의 배합비에 따른 차수성능을 측정하고자 하였다.

(4) SEM, EDX 분석

위 시험에서 사용된 시료를 채취 및 건조하여 전남대학교 공동실험실습관에 SEM, EDX 분석을 의뢰하여, 시험체 내에서 아라미드 섬유 및 시료의 성분을 확인하고자 하였다.

(5) 환경성 평가

환경성 평가는 일정한 양의 시료를 배합하여 28일 기중건조 하였으며, 전남대학교 공동실험실습관에 의뢰하여 중금속 용출시험을 통해 6가크롬과 pH 분석을 통하여 환경성 평가를 수행하고자 하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 그라우팅 공법

2.1.1 개요

그라우팅공법의 목적은 현탁액상의 시멘트 물질을 일정 압력상태에서 지반 내에 주입하여 지반의 성능을 개선하는 것이다. 액상의 형태로 된 주입재는 주입 후 양생시간의 증가에 따라 강도와 강성이 증가한다. 주입재가 지닌 각각의 특성에 따라 양생 후 공학적 특성의 발현정도가 다르게 나타나기 때문에, 다양한 시멘트 주입재의 개발이 활발하게 진행되고 있다.

주입에 의한 지반의 성질개선 범위는 크게 3가지가 있으며, 이는 지반의 차수, 지반 변형의 감소, 지반강도의 증가이다. 주입재는 재료특성(입경, 입도, 비중, 분말도, 투수계수, 구성 재료의 종류, 배합비 등)에 따라 성질(유동성, 침투성, 강도, 강성)이 변화하여 침투효과와 보강효과가 극명하게 차이가 난다(이강호, 2013).

2.1.2 그라우팅 공법 종류

그라우팅공법은 시공과정에서 경화 시간이 투입물과 직접적인 관계가 있기 때문에 경화 시간에 따라 공정을 구분하고 있다. 주입방식에는 Getime(겔타임)을 기준으로 완결에 속하는 20분 이상일 경우 사용하는 1액 1공정(1Shot system), 급결일 경우 사용되는 2액 2공정(2Shot system), 2~10분일 경우 사용하는 2액 1공정(1.5Shot system)으로 세가지 주입방식이 있다(천병식, 1998). 그림 2.1

(1) 1액 1공정방식

주입하는 약액이 완결의 특성을 가질 경우 1액의 주입재를 1공정의 주입관에서 펌프로 압력을 가해서 주입하는 1액 1공정식이 적용된다. 대부분 믹서 안에서도 시간의 경과에 따라 경화반응이 시작되기 때문에 20분 이상의 긴 고결시간을 확보할 수 있는 경

우에 사용된다.

(2) 2액 1공정방식

2액 1공정식은 20분 미만의 급결의 특성을 지닌 약액을 사용할 경우 사용된다. 각각의 약액을 각각 독립된 펌프로 압송해서 주입관 상단의 Y자관에서 합류시킨 후 1개의 관으로 주입하는 방식이다.

(3) 2액 2공정방식

2액 2공정식은 10분 미만의 순결성 약액이나 순결성을 갖도록 배합된 약액의 주입에 주로 사용된다. 이 방식은 2중의 주입관을 통해 각각 다른 약액을 압송하여 주입관 선단에서 합류시키는 방식이다.

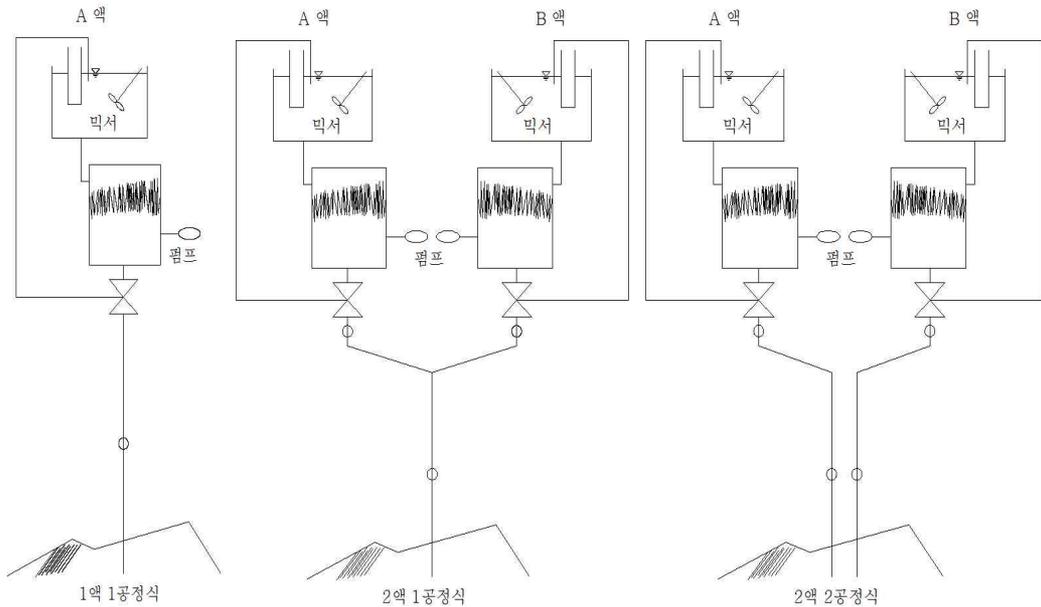


그림 2.1 혼합공정에 의한 그라우팅 방식 분류(권지연, 2012)

2.1.3 주입재료 분류

주입재의 분류는 시공방식, 반응형식, 재료 등에 따라서 여러 가지로 분류가 가능하다. 일반적으로 주입재의 종류에 따라 그림 2.2와 같이 분류한다.

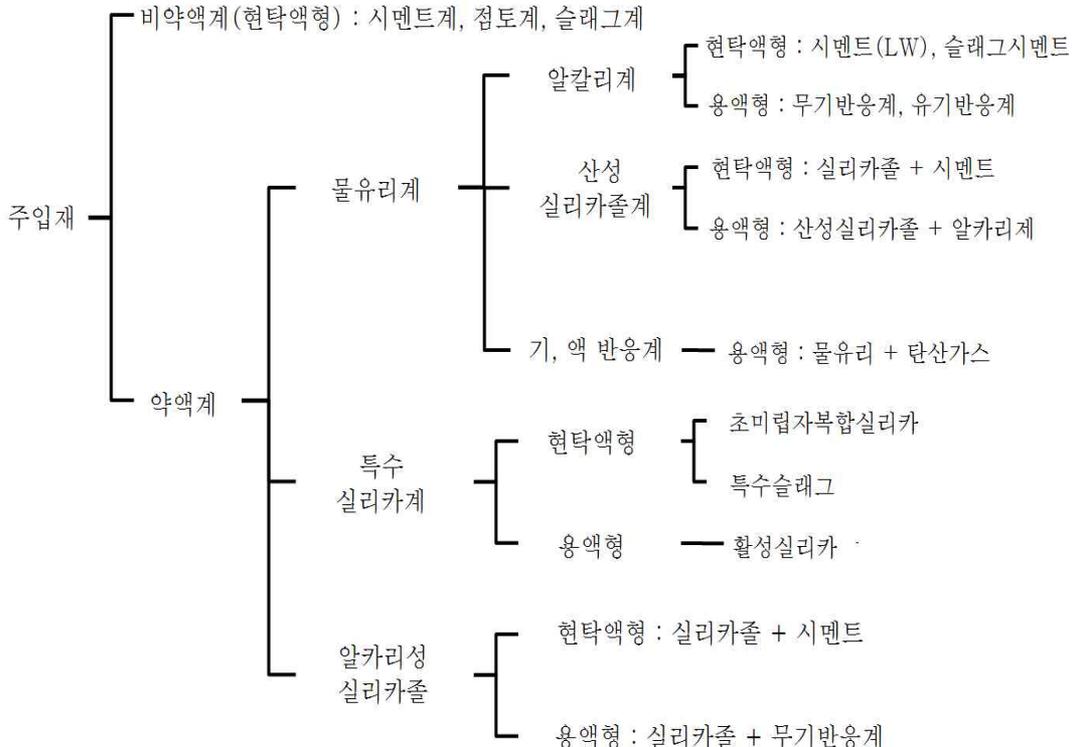


그림 2.2 주입재 분류(한국지반공학회, 2005)

(1) 현탁액형(알칼리 약액) 주입재

LW약액으로 대표되는 현탁액형 주입재는 물유리계 약액에 시멘트나 Bentonite(벤토나이트)를 혼합하여 고결시킨 것이다. 입자가 액체 중에 분산된 현탁액 상태로 있는 특성을 가지며, 소성유동의 특성을 지닌 초미립자시멘트 주입재도 현탁액형 주입재로 분류된다.

현탁액형 주입재 침투율을 결정하는 주요 변수로는 주입하는 약액 입자의 크기, 주입재의 안정성(입자의 침강, 응집정도), 유동성(겔보기 점도, 전단강도), 약액이 투입되는 지반의 간극률과 크기 등이 있다. 이런 현탁액형 주입재는 상대적으로 침투효율이 떨어

어지는 단점을 가지고 있으나, 비교적 공해가 적고 내구성이 강하며 경제성 측면에서도 적절한 경쟁력을 가지고 있는 장점이 있다.

(2) 용액형 주입재

입자를 가지있지 않으며, 항상 균질한 상태를 유지하는 약액을 용액형 주입재라고 한다. 용액형 주입재는 Newtonial Fluid(뉴턴유체)¹⁵⁾에 근접한 유동성을 가지고 있다. 용액형 주입재의 침투성능은 주로 주입하는 주입재의 유동성과 Geltime, 주입되는 대상 지반의 간극률과 그 크기 등에 의해 결정된다. 용액형 주입재는 환경(지하수)오염의 가능성이 크기 때문에 철저한 사전준비가 필수적이다. 한편, 용액형 주입재의 대부분을 차지하고 있는 물유리계 약액은 상대적으로 뛰어난 침투성을 가지고 있지만, 강도와 내구성 측면에서 상대적으로 약한 결점을 가지고 있다. 그러한 단점을 보완하기위해 일반적으로 시멘트계 현탁액형과 조합하여 반현탁액형 주입재로 사용하는 추세이다.

15) 전단속도의 크기에 관계없이 일정한 점도를 나타내는 유체로서, 물, 알콜 등의 저분자 액체, 액상유지 등 비교적 단순한 조성의 액체가 뉴턴유체의 거동을 나타낸다.

2.1.4 그라우팅 공법 조건

(1) 물-결합재비(W/B)의 영향

그라우트의 W/B비는 시멘트 무게에 대한 물의 질량비로 표시 한다. 일반적으로 그라우트 주입재는 주입에 따른 침투효율을 높이기 위하여 W/B비를 200%가까이 크게 한다. 이는 그라우트재의 응결시의 수축량이 상대적으로 큰 빈배합을 초래하여 화학적 불안정성을 유발한다. 그림 2.3은 응결과정에서 조인트 내의 콘크리트가 고결되어가는 과정을 개념화한 것이다. W/B비가 작은 콘크리트는 균일한 고결진행률을 지닌 것에 비해 W/B비가 큰 빈배합 그라우트 재료의 분리가 발생함과 동시에 주입재는 고결 진행률이 불규칙한 것을 알수 있다. 일반적으로 이와 같은 재료분리와 이로 인한 품질 저하를 극복하기 위해 혼화재 및 첨가재 등을 혼합한다(이강호, 2009).

그라우트 주입재의 강도와 내구성은 W/B비와 반비례하는 것으로 알려져 있다. 그렇기 때문에 적절한 W/B비를 선택하는 것이 적정 내구성과 강도 및 침투성을 확보하는데 결정적인 역할을 한다고 할수 있다.

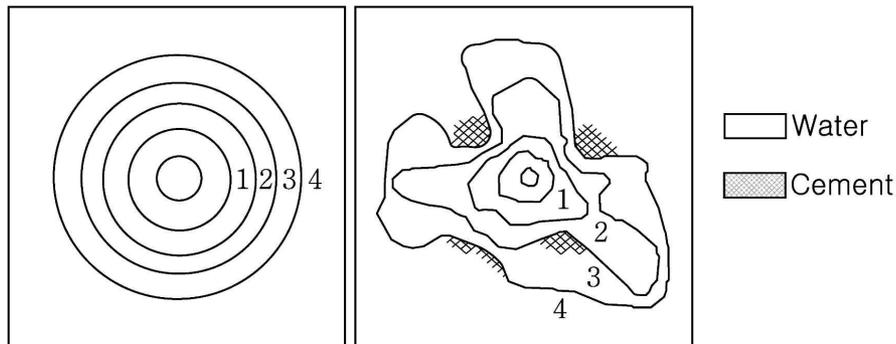


그림 2.3 그라우트 재료에 대한 고결진행시형

(2) W/B비가 큰 그라우트 주입재의 기술적 장점

- ① 비교적 W/B비가 큰 그라우트 주입체는 점성과 점착력이 감소하여 암반 내 불연속면에 대한 침투가 용이하다.
- ② W/B비가 큰 그라우트 주입체의 경우 시멘트 입자들끼리의 마찰저항을 감소시켜 불연속면에 대한 마찰 저항을 감소시켜 막힘이나 뭉침 등의 현상을 감소시켜준다.
- ③ W/B비가 큰 그라우트 주입체는 약액 내에 혼합된 수분이 건조한 암반 불연속면을 적셔줌으로 물의 손실보상이 가능하다. 이는 주입체의 상대적 침투효율 증가에 긍정적인 작용을 한다.
- ④ W/B비가 큰 그라우트 주입체는 기존 암반 내 발달된 불연속면을 이격시키는 역할하여 주입체의 침투효율을 높이는데 기여한다. 그러나 이와 같은 역할은 미세 균열의 조건에서만 가능하며 기존 지반에 침투되어 있는 수분이나 포화도, 균열면의 폭 및 길이, 암반의 강성 등에 따라 그 효율이 달라질 수 있다.

(3) 주입속도의 영향

주입체는 불연속면 내에서 그림 2.4와 같은 속도분포를 보인다. 이것은 불연속면의 중심에서는 흐름속도가 빠르고 관벽에서는 무시할 만큼 작음을 의미한다. 즉, 주입 종료시 고결시작과 더불어 주입체의 밀도가 중심에서는 증가하고 관벽에서는 감소하게 된다.

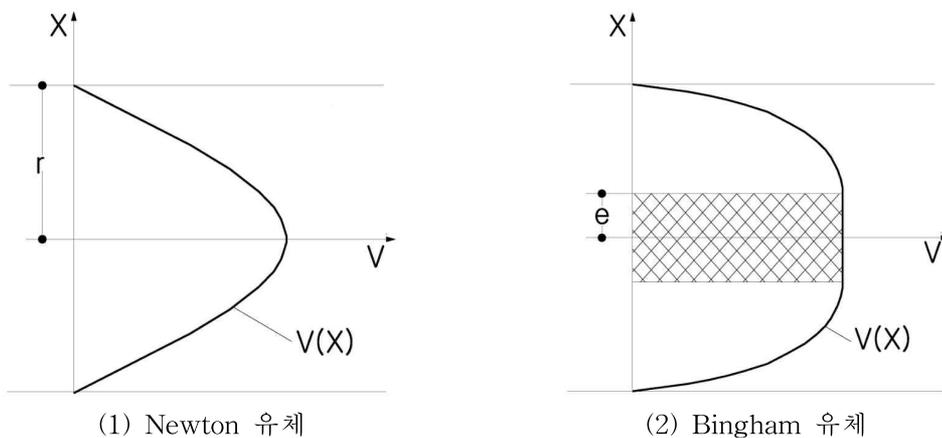


그림 2.4 균열 내에서의 그라우트 슬러리 속도비교(Deere, 1982)

(4) 그라우트 슬러리의 유동성

현탁액형의 그라우트 주입재는 물과 시멘트로 구성되어 있으나, 일반적인 물의 흐름과는 다른 특성을 지닌다. 일반적으로 그림 2.5와 같이 물과 같이 점성이 작은 유체의 흐름은 Newton 흐름특성을 가진 유동체로 가정한다. 반면 현탁액형의 주입재 슬러리는 현탁액(Suspension)특성으로 인하여 유동저항성이 크다. 따라서 유동저항이 큰 현탁액 상태의 그라우팅 슬러리는 뉴턴유체의 모델이 아닌 Bingham 모델로 설명될 수 있다(Deere, 1982).

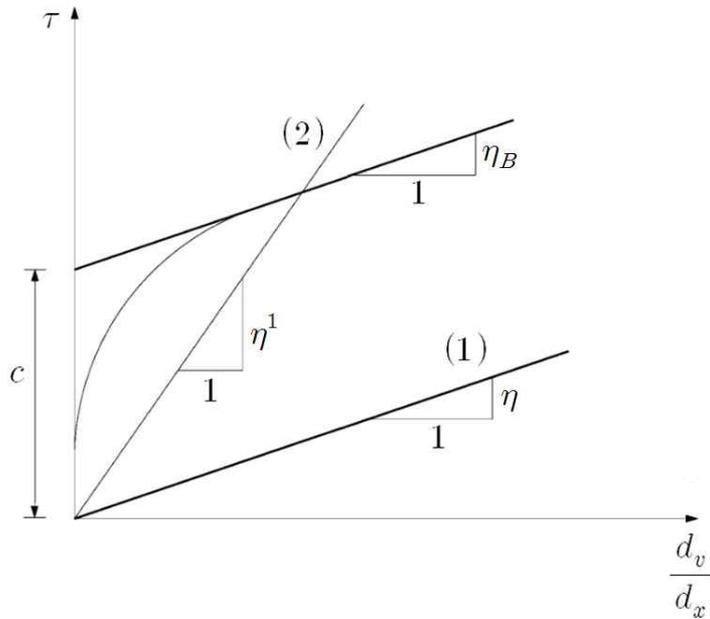


그림 2.5 그라우트 슬러리와 물에 따른 유동학적 해석 모델 :
(1) Newton 유체, (2) Bingham 유체 (Deere, 1982)

그림 2.5에서 $\tau =$ 전단응력, $\frac{d_v}{d_x} =$ 전단변형이다.

Bingham 모델의 경우 점성(Viscosity, η)과 점착력(Cohesion, c)을 포함하며, Newton 유체의 경우 점성만을 포함한다. 따라서 Newton 유체와 Bingham 모델의 거동은 각각 아래 식 (2.1)과 식 (2.2)로 표현할 수 있다.

$$\tau = \eta \frac{d_v}{d_x} \tag{2.1}$$

$$\tau = c + (\eta_B \frac{d_v}{d_x}) \tag{2.2}$$

여기서, η : 동적 유동계수(Dynamic viscosity)

η_B : 소성 유동계수(Plastic viscosity)

c : 점착력(Cohesion)

2.1.5 그라우팅 침투 이론식

(1) 침투와 고결의 메커니즘

그림 2.6과 같이 주입약액은 초기에는 저분자 용액이지만, 시간의 경과에 따라 물유리와 중합되어 고분자화되고 Colloid(콜로이드)¹⁶⁾가 커지게 된다. 콜로이드 또는 겔화가 진행되고 있는 물유리는 최초 흠입자의 여과작용에 의해 흠입자 사이의 점점 부근에 정착하여 다시 흠입자 표면을 물유리 층이 덮게 된다(박경호, 2015).

초기에는 약액이 간극을 투과해서 침투범위를 넓혀 가지만 일정 시점 이후에는 간극이 막히고 주입액이 더 이상 지반에 침투하지 못하게 되면서 주입이 완료된다. 이와 같이 토립자의 접점을 중심으로 해서 토립자 표면을 덮은 규산겔은 1차 결합 또는 2차 결합으로 견고한 규산층으로 되어 토립자 접점을 견고하게 고정하고 연속된 막에 의해 토립자를 연결한다.

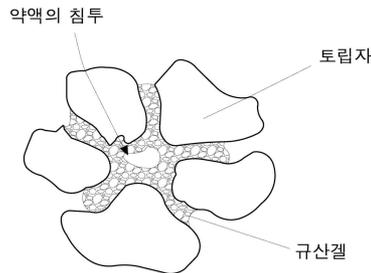


그림 2.6 토립자 간극에서의 약액의 침투와 규산겔에 의한 토립자 고결 모형도(한국지반공학회, 2005)

토립자 상호간의 규산에 의한 정착은 규산층에서 분자간의 응집력과 규산층 및 토립자 표면의 부착력으로 이루어진다. 이 가운데 규산층과 토립자 표면의 부착은 사질토의 경우 수소결합 등에 의한 2차 결합으로 의해 나타난다(김혜양, 2011).

점토분이 많아짐에 따라 약액의 입자간의 침투는 불충분해지므로 전체의 균질한 고결효과는 감소한다. 이와 같은 토립자와 약액의 상호작용에 의해 약액주입 전 모래의 전단강도가 입자 상호간의 접촉이나 맞물림에 의한 마찰로 생긴 요소가 주된 것이었으나, 약액주입 후 모래의 전단강도는 이 마찰로 인한 요소 이외에 규산층 토립자 간의 고결로 인한 점착력의 요소가 추가되었다고 생각할 수 있다(김진수, 2003).

16) 전기를 가지고 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ cm의 크기를 가진 입자로, 보통의 분자나 이온보다 1,000배 이상 크다.

(2) 침투에 관한 이론식

주입에 있어서 침투이론식은 약액의 고결시간, 점성, 주입압력, 주입속도, 주입시간, 주입공의 유효경, 주입방식 및 지반의 투수계수, 간극률, 간극경 등과 상관관계가 있다. 또한, 실제 지반의 불균질성, 지하수의 유동, 주입제 점도의 경시변화, 고결되면서 수반되는 약액의 복잡한 침투기구 등과 관련이 있다. 따라서 약액의 침투기구를 엄밀히 수식화 한다는 것은 어려운 일이며, 지반의 불균질성을 감안한다면 오히려 무의미하다고 까지 판단할 수 있지만 많은 연구자들에 의해서 침투성에 관한 경험식들이 제안되고 있다(노경연, 2008). 이러한 침투이론식들은 크게 현탁액형 침투이론식과 용액형 침투이론식으로 구분할 수 있으며 전반적으로 다음과 같은 가정들을 전제로 한다(천병식 1998).

주입제의 침투는 층류로써 Darcy의 법칙에 따르고, 주입제의 비중은 물과 큰 차이가 없으며 중력은 무시할 수 있다(이영섭, 2009). 또한, 주입제의 점성은 일정불변하고, 지반은 균질하게 무한히 계속되며 구속하는 것이 없다. 마지막으로 지반은 물로 포화되어 있고 지하수의 유동은 없다(박경호, 2015).

용액형주입제에 대한 침투이론식은 현탁액형에 비해서 많이 제안되어 있다. 어떤 제안식이든 유속이 그 유선의 동수구배에 비례한다는 Darcy의 법칙을 기본으로 하고 중력의 영향을 무시한다는 가정에서 식 (2.3)과 같이 유도된다(박경호, 2015).

① Maag의 식(Nakayama and Okano, 2013)

$$t = \frac{\mu n (R^3 - r^3)}{3khr} \tag{2.3}$$

여기서, t = 주입소요시간(s)

n = 지반의 간극률

k = 지반의 투수계수(cm/s)

h = 수두(주입압)(cm)

μ = 물과 약액의 점도비

R = 주입유효반경(cm)

r = 주입공반경(cm)

그러나 Maag의 식은 Gelttime, 간극충진율, 주입관의 형식과는 관계가 없기 때문에 주입특성을 나타내는 정수를 설정하여, 식 (2.4)와 같은 실용식을 제시하였다.

$$t = \frac{\alpha n \beta}{3A k h r} (R^3 - r^3) \quad (2.4)$$

여기서, α = 간극충진율

β = 약액의 동점성계수

A = 주입면적

② Karol의 식(Karol, 1960)

주입재가 지반의 공극으로 침투하는 것을 가정하여 식 (2.5)와 같이 제안되었다.

$$r = 6.2 \times \sqrt[3]{\frac{1}{\nu} q \times t / n} \quad (2.5)$$

여기서, r = 침투거리(cm)

q = 주입량(cm^3/s)

n = 간극률

ν = 용액의 점도 역수

t = 주입시간(s)

2.1.6 침투한계 주입비

주입재가 침투효율을 높이기 위해서는 주입재의 입자가 충분히 작아야 한다. Kravetz(1958)는 주입재와 침투 가능한 흙 입자에 대한 침투성 시험결과, 식 (2.6)과 같이 주입비 관계식을 발표한 바 있다(박경호, 2015). 식 (2.6)을 동시에 만족하는 지반에 대해서는 현탁액형 주입재의 사용이 가능하다.

$$N_1 = \frac{D_{15}}{G_{85}} > 15 \quad \text{또는} \quad N_2 = \frac{D_{10}}{G_{95}} > 8 \quad (2.6)$$

여기서, N_1, N_2 = 주입비

D_{15}, D_{10} = 토립자의 입경가적곡선의 15%, 10% 입경

G_{85}, G_{95} = 주입재의 입경가적곡선의 85%, 95% 입경

Mitchell and Santamarina(2005)은 토사에서 그라우팅 시 주입재와 침투 가능한 흙 입자에 대한 침투성 시험결과, 식 (2.7)을 이용하여 판정하도록 하였다. 표 2.1에 주입재의 종류별 입경을 나타냈다.

$$N_1 = \frac{D_{15}}{G_{85}} > 25 \quad (2.7)$$

여기서, N_1 = 주입비

D_{15} = 토립자 입경가적곡선의 15% 입경

G_{85} = 주입재 입경가적곡선의 85% 입경

표 2.1 그라우트 종류별 G_{85} 와 G_{95} 의 값

주입재의 입경 그라우트의 종류	$G_{85}^*(\mu\text{m})$	$G_{95}^{**}(\mu\text{m})$
보 통 시 멘 트	67	74
조 강 시 멘 트	25	34
플 라 이 애 시	47	52
점 토	26	50
콜로이드 시멘트	18	27
초미립자 시멘트	6	8
벤 토 나 이 트	1.5	7

<주> * G_{85} = 주입재의 입경가적곡선의 85% 입경

** G_{95} = 주입재의 입경가적곡선의 95% 입경

시멘트계 주입재의 최대 입경을 보통시멘트 $100\mu\text{m}$, 초미립자시멘트 $10\mu\text{m}$ 수준으로 가정하면 주입이 가능한 암반균열의 최저 간격은 각각 $300\mu\text{m}$, $60\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$ 수준이 된다.

Kravetz(1958)의 주입비 식 (2.6)의 관계를 만족하면 주입재가 흙 입자 간극을 무리 없이 침투주입 될 수 있다. 즉, 식 (2.6)의 관계를 만족하는 흙 입자의 최소 입경은 약 $5\mu\text{m} \sim 15\mu\text{m}$ 정도로 초미립자시멘트를 사용하는 경우 흙 입자의 최소 입경은 $50\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$ 정도이다. 반면, 보통 시멘트를 사용하는 경우는 식 (2.6)의 관계를 만족하기 위해서 흙 입자의 최소 입경이 $500\mu\text{m} \sim 1,200\mu\text{m}$ 정도로 흙 입자 입경이 약 10배 정도 커야 한다(박정호, 2015).

따라서 주입대상 토질이 가는 모래나 실트질 모래로 구성되어 있는 경우 간극경의 크기가 상대적으로 작기 때문에 입자가 큰 보통시멘트는 침투주입이 어렵지만, 주입재의 입자가 작은 초미립자시멘트의 경우는 침투주입이 상대적으로 용이하다.

현탁액형 주입재의 사용이 곤란하다고 생각되는 세사 등의 지반에 대해서는 용액형 주입재를 사용한다. 용액형 주입재의 침투성은 점도에 의해서 크게 좌우되지만, 일반적으로 투수계수가 10^{-3}cm/s 정도까지의 지반에 사용할 수 있다. 또한, Geltime이 긴 배

합의 경우에는 투수계수가 10^{-4} cm/s 정도의 지반에 까지 침투 가능범위가 확대된다(박경호, 2015).

King and Bush(1961)은 일반적인 사질토 지반의 흡을 대상으로 흡 입자 간극경 d 와 흡 입자 유효입경 D 와의 관계에 대해서 그림 2.7과 같은 관계를 제안하였다. 즉, 주입 대상 토질의 평균입경과 동일한 유효입경이 D 인 이상적인 구형 흡 입자를 가정하고 이와 같은 흡 입자의 평균 입경으로 형성된 흡 입자들의 간극률을 가정하면, 이에 대응하는 흡 입자 간극경 d 와의 관계는 가장 조밀하게 다져진 상태에서의 간극률 $n = 26\%$ 일 경우 $d = 0.15D$ 이고, 가장 느슨하게 다졌을 때의 간극률 $n = 48\%$ 일 경우 $d = 0.41D$ 임을 보였다(박경호, 2015).

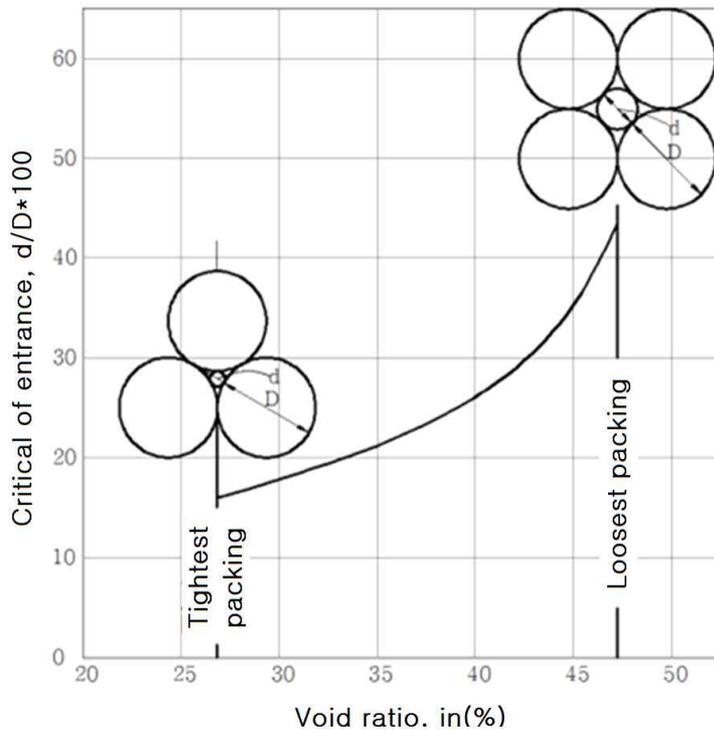


그림 2.7 $d/D(\%)$ 와 간극률 n 과의 관계(King and Bush, 1961)

2.2 그라우팅 공법 설계

2.2.1 주입재의 종류 및 특성

(1) 포틀랜드시멘트

한국산업규격(Korean industrial standards) KS L 5201에 의하여 포틀랜드 시멘트는 5가지 종류로 구분되며, 그 특징은 표 2.2와 같다.

제 1종은 OPC로 경제적으로 우수하며 가장 일반적인 그라우팅 재료로 사용되고 있지만, 다른 OPC에 비해 상대적으로 내화확성에 취약한 단점이 있다. 제 2종의 포틀랜드 시멘트의 경우 보통정도의 황산염이온으로 만들어졌으며, 상대적으로 수화열 발생이 적다. 제 3종은 조강시멘트로 단기간에 강도가 발현되어야 하는 긴급한 현장이나 미세한 간극의 주입재로 사용된다. 제 3종의 시멘트 분말도는 $3,300\text{cm}^2/\text{g}$ 이상으로 다른 종류의 시멘트에 비해 미세하여 비교적 빠른 조기강도를 기대할 수 있다. 그러나 완결시 여타의 시멘트에 비해 상대적으로 강도가 낮은 단점이 있다. 제 4종 포틀랜드 시멘트는 제 1종 포틀랜드 시멘트에 비해 강도발현이 늦지만, 제 2종 포틀랜드 시멘트에 비해 수화열이 적기 때문에 일반적으로 낮은 수화열이 요구되는 현장에 주로 사용된다. 제 5종 포틀랜드 시멘트(이하 제5종 시멘트)는 황산염이 많은 토사나 지하수의 오염우려가 있는 경우 이용되며 강력한 내황산염 그라우트 재료이다. 제5종 시멘트의 분말도는 $2,800\text{cm}^2/\text{g}$ 이상으로 최대입경은 0.1mm이다.

일반적으로 현장에서 이용하는 OPC의 경우는 단일 현탁액을 주로 사용하고 있으나, 주입재의 침하나 재료분리현상 방지 및 주입효율의 증대를 위하여 나트륨(Na)형 벤토나이트나 활성벤토나이트를 3~4%첨가하여 이용하는 경우도 많이 있다.

표 2.2 포틀랜드시멘트의 물리적 특성(건설교통부, 2003)

항 목		종 류		1종	2종	3종	4종	5종
분말도	비표면적(cm ² /g)			2,800 이상	2,800 이상	3,300 이상	2,800 이상	2,800 이상
응결 시간	길모어 시험	초결(분)	60이상	60이상	60이상	60이상	60이상	60이상
		종결(시간)	10이하	10이하	10이하	10이하	10이하	10이하
	비 카 시험	초결(분)	45이상 375이하	45이상 375이하	45이상 375이하	45이상 375이하	45이상 375이하	45이상 375이하
수화열 (cal/g)	7일 28일		-	70이상 (80이하)	-	60이상 70이상	-	-
압축 강도 (Mpa)	1일		-	-	130	-	-	-
	3일		130이상	110이상	250이상	-	90이상	
	7일		200이상	180이상	280이상	75이상	160이상	
	28일		290이상	285이상	310이상	180이상	210이상	

(2) 혼합시멘트

혼합시멘트는 최근 해상 점성토층이나 온천지역 등과 같이 염소이온이나 황산염이온이 많은 지역에서 콘크리트의 열화 때문에 제 5종 OPC와 함께 사용량이 증대되는 시멘트이다. 이 시멘트는 내화학적 시멘트로 고로슬래그시멘트나 플라이애시시멘트 등으로 구분되는데, 이는 혼합시멘트에 첨가되는 혼합재량의 첨가비율만큼 C_3A (알루미늄이트)를 감소시키는 효과는 같으면서도 혼합시멘트가 갖는 장점을 포함하고 있다(김진춘, 2003).

혼합시멘트의 장점은 제철과정이나 발전과정에서 발생하는 부산물로 슬래그나 플라이 애시와 같은 폐자원을 사용하므로 최근 선진국에서는 사용이 적극 장려되고 있다. 그러나 아직까지 일반화되지 않은 상태로 향후 방조제 등의 그라우팅에 적용성이 높을 것으로 예상된다(허원, 2011).

(3) 초미립자시멘트

일반적으로 주입 대상 지반에 대한 침투성은 주입재의 입자가 작을수록 좋아지므로 최근 현탁형 그라우트의 주입성 개선을 목표로 시멘트 입자의 미립화에 많은 연구가 진행되고 있다(김진춘 1999). 이 시멘트는 포틀랜드 시멘트에 비하여 입자가 작은 초미립자시멘트(Micro시멘트)로 물리적 성질은 OPC와 유사하지만 독성과 냄새가 없는 장점이 있다. 또한, C_3A 가 적고 강도발현이 크고 염화물과 황산염에 대한 화학적 저항성이 우수하여 해수침투지역이나 온천지역, 쓰레기 매립장과 같은 염화물 발생지역등에서 주로 활용되고 있다. 표 2.3은 주입재의 화학성분이다.

표 2.3 주입재 화학성분(건설교통부, 2003)

구 분	Micro 시멘트(%)	OPC(%)
SiO_2	28.5	20.3
$Al_2O_3 + Fe_2O_3$	66.8	69.5

표 2.4는 주입재의 일반적인 입도분포의 비교를 나타낸 것이다. OPC의 경우 최대입경이 $100\mu m$, 평균 입경이 $17\mu m$ 인데 비해 Micro시멘트의 경우는 최대입경이 $24\mu m$, 평균 입경이 $4.2\mu m$ 이다(김진춘, 1999).

표 2.4 주입재의 입도분포(김진춘, 1999)

주입재의 종류 입경크기(μm)	Micro 시멘트(%)	OPC(%)
1.0	10.1	4.7
1.5	13.4	5.6
2.0	19.2	8.3
3.0	30.1	11.3
4.0	48.3	16.1
6.0	79.6	21.7
8.0	87.3	28.4
12.0	98.4	36.7
16.0	99.8	48.0
24.0	100.0	62.2
32.0		77.9
48.0		93.7
64.0		97.2

표 2.5는 주입재의 물리적 성질을 비교한 것이다. 강도의 특성은 초미립자시멘트의 경우 OPC에 비해 장기 강도뿐만 아니라 초기 강도도 상대적으로 우수한 특성을 보인다. 이러한 특성은 주입성과 강도를 증가시켜 내구성을 향상시키는 주입공사에 적합하다.

표 2.5 주입재 물리적 성질(건설교통부, 2003)

\		KS 규정값	Micro 시멘트	OPC
비 중		-	2.94	3.15
분말도(cm ² /g)		2,800이상	8,150	3,250
응결(Vicat)	W/B(%)	-	30.5	28.7
	초결(분)	60이상	205	170
	종결(분)	600이하	485	450
압축강도	W/B(%)	-	50.7	48.5
	1일(MPa)	-	162	61
	3일(MPa)	130이상	356	202
	7일(MPa)	200이상	535	264
	28일(MPa)	290이상	689	450

(4) 물유리계

물유리는 산화나트륨(Na_2O)과 이산화규소(SiO_2)가 여러 가지 비율로서 결합한 것으로 화학식으로는 규산소다, 분자식으로는 $Na_2O \cdot nSiO_2$ 로 나타낸다. 물유리는 무기재료로서 많은 특성을 지니고 있어 다방면의 용도를 갖는 소재이다.

Na_2O 와 SiO_2 몰비(M)는 0.5~4의 범위의 것이 공업적으로 생산되고 있으며, n이 1 이하의 것은 결정성 규산소다라고 부르고, n이 1이상인 것은 비경질의 구조가 되어 액상으로서 통상 규산소다라고 부른다(안진현, 2009).

규산소다는 몰비(M)에 의해 1호, 2호, 3호, 4호로 구분하며, 일반적으로 약액주입에는 3호 물유리가 사용된다. 표 2.6은 규산소다의 종류를 나타낸 것이다.

표 2.6 규산소다 종류

종 류	화 학 명	분 자 식	몰비(M)
규산소다 1호	DiSodium DiSilicate	$Na_2O \cdot 2SiO_2$	2.0
규산소다 2호	TeraSodium PentaSilicate	$2Na_2O \cdot 5SiO_2$	2.5
규산소다 3호	DiSodium TriSilicate	$Na_2O \cdot 3SiO_2$	3.0
규산소다 4호	Disodium TeraSilicate	$Na_2O \cdot 4SiO_2$	4.0

제1단계에서 콜로이드 입자를 형성하고, 제2단계에서는 이 입자들이 서로 집합, 중합하여 연속적인 구조를 만들어 용매를 통해 확장함으로 겔화를 이루게 된다. 즉, 제1단계에서 규산은 시라놀($Si-OH$)끼리 탈수해서 중합하고 실록산(Siloxane) 결합($Si-O-Si$)을 하며, 입자형의 1차 입자가 되고 1차 입자끼리 결합하여 콜로이드 집합체를 형성한다. 이 집합체는 콜로이드 2차 입자라고 부를 수 있지만 이것이 용액 전체로 확장하여 겔을 형성한다(박경호, 2015). 이러한 1차 입자의 결합단계에는 수소결합에 의해 약하게 연결되지만 규산콜로이드 표면이 시라놀로 되는 점을 고려한다면, 시

라놀 사이에 중합이 일어나서 입자 사이에 실록산 결합이 형성되는 결과, 입자끼리 견고하게 연결되어 망상형(3차원)의 겔을 만든다(그림 2.8 참조).

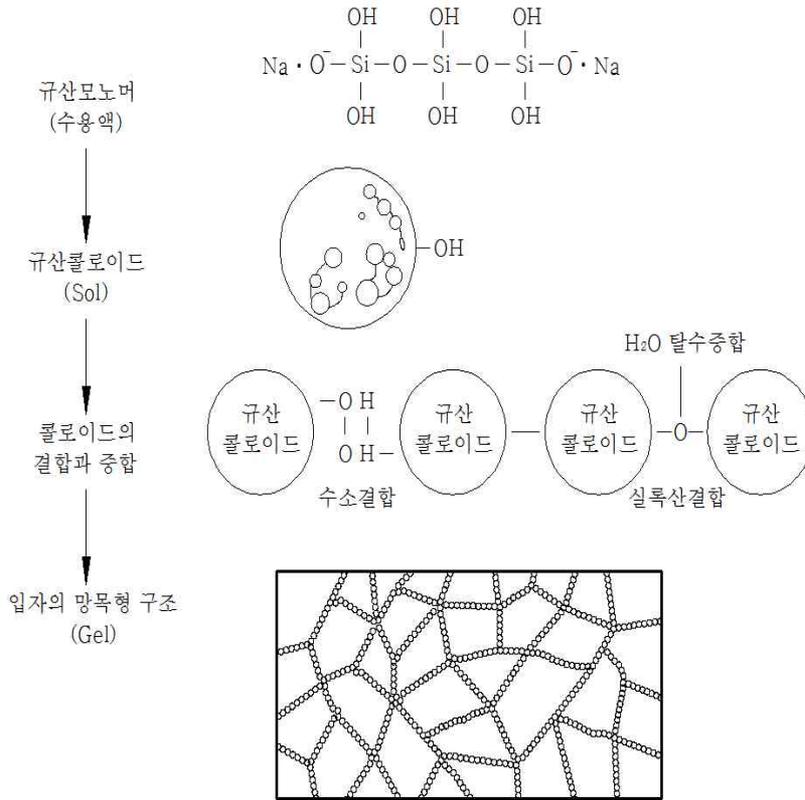


그림 2.8 물유리 겔화 과정(Iler, 1979)

규산입자의 등전점¹⁷⁾은 약알칼리성에 가까우며, 알칼리 용액과 있을 경우 수산화이온(OH^-)이온을 흡착해서 음전하를 띠고 있다. 따라서 pH가 높을수록 전기적 반발력이 크고 응집되기 어려우며, 반대로 산을 더하면 pH가 저하되어 응집되기 쉬운 특성을 지닌다. 이것이 겔화의 원리이며, 각종 염류를 혼합하더라도 겔화가 진행된다.

17) 입자의 전하가 0이 될 때의 pH값.

2.2.2 그라우팅 공법 선정

그라우팅 공법의 선정은 지반개량을 할 필요가 있는 개소에 대해서 사전에 토질, 지하수, 지하 매설물, 우물, 공공용수역 등의 조사를 하고, 그라우팅 공법에 의하는 것이 공사현장의 보안, 지하 매설물의 보호, 주변 가옥의 보전, 지하수위 저하방지 등의 관점에서 적당하다고 판단되는 경우에 선정한다. 대상 지반이 연약 점성토층이거나 고유기질일 경우 그라우팅 공법의 선정에 있어 특히 신중하게 검토할 필요가 있다(박경호, 2015). 그라우팅 로드 구성에 의한 약액 그라우팅의 종류는 표 2.7과 같다.

표 2.7 그라우팅 로드 구성에 의한 약액 그라우팅 종류(양형철 등, 2012)

그라우팅 공법	로드 구성	그라우트 혼합방식	겔화시간	공법명
약액 그라우팅	단관	1액 1공정	완결(수십분)	시멘트몰탈주입
		2액 1공정	완결(수분)	LW공법
	스트레이너주입			
	2중관	1액 1공정	완결(수분)	TAM공법
		2액 1공정	완결(수분)	LW공법
		2액 2공정	급결(수십초)	LAG공법
급결(수십초) 완결(수분)			JS-CGM공법	

그라우팅 공법이 선정되었다면 그라우팅의 목적을 명확하게 한 후에 사전에 충분한 주변 조건을 조사하여 합리적이고 경제적인 개량범위, 그라우팅 방식, 예상 그라우트량, 로드의 설치 형태, 그라우팅공의 배치 등을 결정해야 한다.

그라우팅의 목적은 차수와 지반보강, 공동충전의 3가지로 크게 구별한다. 그라우팅 설계는 지반공학적 이론 계산에 의해 본체 공사에 꼭 필요한 지반개량 범위와 정도를 명확하게 하고, 그것을 만족시킬 수 있는 그라우팅 방식, 그라우팅량 등을 공학적으로 결정하는 것이 바람직하다(박경호, 2015). 그러나 현실적으로는 유사 공사에서 과거의 경험을 참고하여 이루어지는 것이 일반적이고, 지반공학적 이론계산은 참고적으로 사용되고 있다. 표 2.8은 목적별 그라우트의 분류이다.

표 2.8 목적별 그라우트 분류(양형철 등, 2012)

항 목		기 본 적 인 조 건	
개량 의 목적	차 수	침투성을 고려한 저점성 용액형 약액	
	지반 보강	침 투	저점성 용액형 약액
		맥 상	Geltime이 짧고 호모겔 강도가 큰 현탁형 약액
		침투·맥상	호모겔 강도가 크고 침투성이 있는 약액
	용수방지	지하수에 희석 시 Geltime이 변하지 않는 약액 급결성 고결의 약액(용액 또는 현탁형)(2중관 사용)	
복합 그라 우팅	선행 그라우팅	Geltime이 짧고 호모겔 강도가 비교적 큰 현탁형 약액	
	본 그라우팅	선행그라우트와 같이 침투성을 갖는 약액	
특수지반		(산성, 알칼리성 지반) 사전에 check하여 그라우트를 선정	
기 타		환경 보존성을 검토(독성, 지하수 오염, 수질 오탁 등)	

2.2.3 그라우트량 계산

그라우트량의 계산은 개량 대상토층의 지반조건이나 그라우팅 목적에 적합한 그라우팅의 종류와 주입방식 등 기술적인 면과 경제적인 면을 동시에 고려하여 계획해야 한다. 그라우트량을 구하는 공식은 다음과 같다.

$$Q = V\lambda = Vn\alpha(1 + \beta) \quad (2.8)$$

여기서, Q = 개량 대상 지반에 대한 그라우트량(1m³ = 1,000L)

V = 개량 대상 지반의 체적(m³)

λ = 그라우팅률

n = 간극률

α = 충전율

β = 손실계수

식 (2.8)에 의한 그라우트량의 산정은 입자간 침투 그라우팅을 전제로 한 것으로, 맥상 그라우팅의 경우 일괄적인 적용에는 문제가 있으나 현재 계산방식이 확립된 것이 없기 때문에 맥상 그라우팅의 경우에도 식 (2.8)을 적용하고 있다.

(1) 간극률

일반적으로 지반의 간극은 물과 공기로 점유되어 있는 부분을 의미하지만 공기의 양은 무시할 수 있는 것으로 가정하고 간극수에 대해서만 고려한다. 간극수는 자유수와 흡착수로 이루어져있다. 이 중에서 자유수는 중력수라고도 말하고, 각종 배수공법을 실시하는 것에 따라 배제할 수 있는 물이다. 한편 흡착수는 보통 수행하는 배수공법 등을 사용해도 배제할 수 없는 물을 말한다(정신규, 2013). 그라우트량의 검토에서 간극률은 그라우팅에 의해 주입재로 바꿀 수 있는 자유수의 체적을 대상으로 하며, 이것을 유효 간극률이라고 한다.

간극률은 토질조사에 의해 실측하는 것이 바람직하지만, 실측이 곤란한 경우에는 경험적으로 유사지반에서의 시공경험으로부터 결정할 수 있다.

(2) 충전율

충진율은 지반의 간극에 대한 충전 비율을 나타낸다. 충전율은 대상 지반의 토질성상과 같은 현장 여건이나 그라우팅의 침투성, 그라우팅의 형태 등에 의해 달라진다.

(3) 손실계수

현실적으로 그라우트액 투입중 계획된 개량 범위 내에 기대한 효과를 얻기 위해서는 계획된 개량범위 외에까지 약액이 미치는 것은 피할 수 없는 것이 일반적이다. 이러한 상태는 시공상의 안전율로서 그라우트률을 결정할 때 고려할 필요가 있다. 이 값은 개량 대상의 중요도, 개량효과의 기대도 등에서 결정되어야 하는 것이지만, 현재는 이 계수에 대한 이론적인 뒷받침이 되어있지 않고, 경험적으로 손실계수(β)는 0.1 정도가 사용되고 있는 경우가 많다(박경호, 2015). 그라우트량의 산출에 관한 참고자료는 표 2.9와 같다.

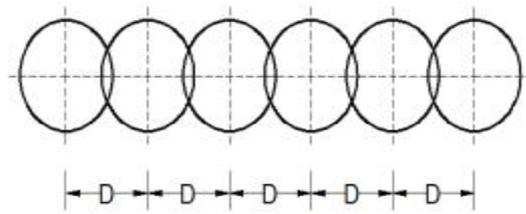
표 2.9 토질에 의한 그라우트의 충진율, 그라우팅률의 참고치(양형철 등, 2012)

토질		항목 N치	투수 계수 (cm/s)	간극률 (%)	그라우트 종 별	충진율 (%)		그라우팅률(%)		비고
						보 강	차 수	보강	차수	
자 갈 모 래	무르다	4~10	10^1	40~50	현탁액계	95	100	43~48	45~50	
					용액계	-	100	-	45~50	
	중정도	10~30	10^0	35~40	현탁액계	95		33~38	-	
					용액계	90	100	31~36	35~40	
	조밀	30~50	10^{-1}	30~35	현탁액계	90	-	27~31	-	
					용액계	90	95	27~31	28~33	
사 질 토	무르다	4~10	10^{-2}	45~50	용액계	90~95	40.5~47.5		$\alpha \cdot (1+\beta)$: 충진율 $n \cdot \alpha(1+\beta)$: 그라우팅률	
	중정도	10~30	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	40~45	용액계	90~92	36.0~41.4			
	조밀	30~50	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	35~40	용액계	80~85	28.0~34.0			
점 성 토	무르다	0~4	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	60~75	현탁액계	40	-	24~30	-	
					용액계	45	-	27~34	-	
	중정도	4~8	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	50~60	현탁액계	30	-	15~18	-	
					용액계	30	-	15~18	-	
부 식 토	0~5	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	70~90	현탁액계	60		42~54			
				용액계	-	100	-	70~90		

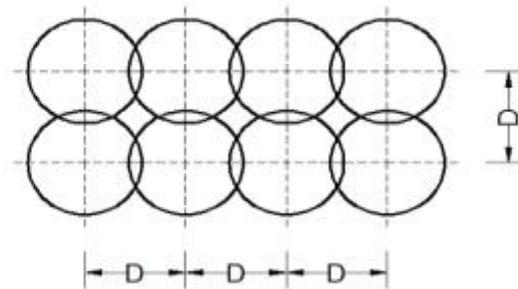
- <주> 1. 토질조사 결과 N치, 투수계수 간극률이 표와 다를 때는 간극률을 우선한다.
 2. 간극률이 분명하지 않을 때는 N치로 추정한다.
 3. 손실계수 β 는 0.1로 한 값이다.
 4. 그라우팅목적의 중요도로 충진율을 고려한다.

2.2.4 그라우팅공 배치 방법

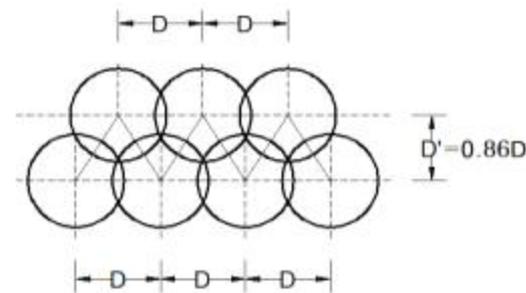
그라우팅공의 배치는 그림 2.9에서 보는 바와 같이 단열식과 복렬식으로 나누어진다. 경사 시공의 경우 그라우팅공 침단에서 표준 간격을 유지하도록 설계하고, 수평 시공의 경우 토층을 따라 수평방향으로 침투하기 쉬운 곳에서 상하방향의 그라우팅공 간격을 조밀하게 한다.



(a) 단열배치



(b) 복렬 정사각형 배치



(c) 복렬 정삼각형 배치

그림 2.9 그라우팅공 배치(양형철 등, 2012)

또한, 토질별 그라우팅 간격을 결정하기 위해서는 표 2.10과 같이 토질별 그라우팅의 간격을 고려할 필요가 있다.

표 2.10 토질별 그라우팅간격(양형철 등, 2012)

토질 \ 항목	주입목적		약액
	차수	보강(m)	
점성토	-	1.0~2.0	현탁형
모래	0.6~1.0	0.8~1.2	용액형
모래·자갈	0.8~1.2	1.0~1.5	용액형, 현탁형

2.3 지반개량공법

2.3.1 개요

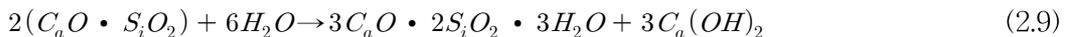
본 연구는 그라우트재의 개발에 있어 일반적인 차수효과뿐 아니라 아라미드 섬유와의 혼합을 통한 연약지반 개량의 효과도 기대하고 있어, 지반개량공법의 전반적인 개요 및 원리 그리고 시험방법을 알아보려고 한다.

지반개량공법(Soil-Cement 안정처리)은 1977년 미국에서 Amies가 특허를 얻어 Soil-Amies라는 명칭으로 도로공사에서 주로 사용되었다. 1929년 Proctor에 의하여 흙의 다짐 방법과 1931년 Flisofev에 의하여 시멘트가 흙 속에서 미치는 영향에 관하여 체계적으로 연구가 시작되었다. 그 후 1935년 미국의 포틀랜드시멘트 협회에서 여러 종류의 흙에 포틀랜드시멘트를 혼합하여 사용한 연구가 시작되었으며 그 결과, South Carolina 주에서 20,000 yard의 도로 기층공사에 사용되었다. 그 후로 매년 80,000 yard 이상의 도로공사에 적용되어 왔다(이광세, 2006).

1956년에는 North and South Carolina 주의 집계만으로도 수천마일에 달하였고, 캐나다, 영국, 독일, 일본을 비롯하여 호주, 네덜란드, 체코, 잠비아, 모잠비크, 태국 등지에서도 대규모로 사용하였다(권혁두, 2008).

C_5S 는 시멘트 화합물 중에서 가장 많은 것으로 물과 반응하면 곧바로 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)과 규산칼슘 수화물(C-S-H)을 생성한다. 즉, 물과 반응하면 곧 Ca^{2+} 가 용출되고, 액상은 높은 알칼리성이 되며, 과포화상태에 이르면 수산화칼슘 결정이 석출된다. 동시에 $(SiO_4)^{4-}$ 는 수산화규산 이온 $(Si(OH)_6)^{2-}$ 으로 되고 C_5S 입자 주위에 Ca^{2+} 와 결합하여 규산칼슘 수화물(C-S-H)가 생성된다. 이 수화물은 수화 정도에 따라 화학조성이 겔상태의 저결정질이다.

C_5S 의 수화가완결되었을 때의 반응식은 다음과 같다.



간략히 다음과 같이 나타내기도 한다.



Jack도 같은 이론으로 점토는 칼슘형태로 전이되고 점토 속에서 SiO_2 와 Al_2O_3 가 용해되어 단단하게 형성된다고 하였으며, Handy는 조립토에 시멘트를 배합하면 석영입자의 표면에 일어나는 비활성분극층인 알칼리와 용해되어 $CaAl_2$ Gel로 되어 Gel이 석영과 직접 결합한다고 하였다.

Chadda는 조립토에 시멘트를 배합하면 가변성을 띤 Ca^{++} 이온이 증가되어 K^+ 및 Na^+ 이온과 완전히 대체된다고 하였으며, Tyagi는 시멘트의 수화작용으로 $CaSiO_3$, $Ca(OH)_2$, $CaAlO_2$, $CaFeO_2$ 및 $CaSO_4$ 등의 화합물이 형성된다고 하였다(권혁두, 2008).

2.3.2 지반개량제의 일반적 성질

지반개량제는 연약지반에 시멘트계를 혼합 및 교반하여 연약지반을 개량하는 공법으로서 S.C.W(Soil Cement Wall) 공법과 연속벽 공법 등이 있다.

흙에 시멘트 함유량이 증가됨에 따라 액성한계가 감소하고 소성한계가 증가되어 소성지수를 감소시킴으로서 흙의 Consistency를 개량하는데, 이와 같은 애터버그 한계의 변화현상은 시멘트 안정처리 후 6년이 경과되어도 계속되었으며, 수축한계를 증가시켜 용적변화율이 높은 흙의 수축과 팽창을 저하시킬 뿐 아니라 투수성도 저하시킨다(이광세, 2006).

시멘트 혼합량이 증가될수록 다짐밀도는 증가하며 최적 함수비는 감소되었는데 이와 같이 다짐 밀도가 증대되는 이유는 비표면적이 $2,600cm^2/g$ 이상인 시멘트 입자가 크고 작은 흙 입자의 사이에 치밀하게 결합되어 다져지므로 단위 체적당 밀도가 증대되기 때문이다(권혁두, 2008).

또한, 시멘트 함유량 및 양생기간의 증가에 따라 내부마찰각과 점착력이 증대되는데, 이는 흙의 성질에 따라 다소 차이가 있다. 즉 사질토에서는 점착력과 내부마찰각이 크게 증가하나 Silt 및 점토에서 내부마찰각은 크게 증대하지만 점착력은 약간 증가한다.

Soil-Cement 안정처리 기층에서 강도 다음으로 중요한 요인인 흡수율이 저하됨으로써 흙에 안정성을 주며 이에 따라 동해가 경감된다. 도로기층의 동결원리는 그림 2.6과

같이 지하수의 영향을 받아 노상으로부터 동결피막이 형성되어 기층으로 전달되며 시멘트 처리층은 이와 같은 동결작용의 상승을 저하시킨다.

시멘트 함유량이 증가됨에 따라 마모율이 감소되므로 사용 목적에 따라서는 기층뿐만 아니라 표층으로도 시공을 가용케 하며, 압축강도의 증가에 수반하여 C.B.R (California Bearing Ratio) 시험치와 평판재하에 의한 지지력이 증가한다.

한편 시멘트 안정처리 기층의 인장강도는 압축강도의 10~20%, 휨강도는 15~30%로서 양생기간에 따라 탄성계수가 증대되는데 20일 양생 후의 탄성계수는 약 $100,000 \text{ kg/cm}^2$ 정도로서 이때의 포아송비는 0.25~0.4의 범위를 가진다(권혁두, 2008). 이와 같은 점을 고려할 때 시멘트 안정처리 기층은 강성 내지 반강성체의 골조로 가정하여도 무난하다.

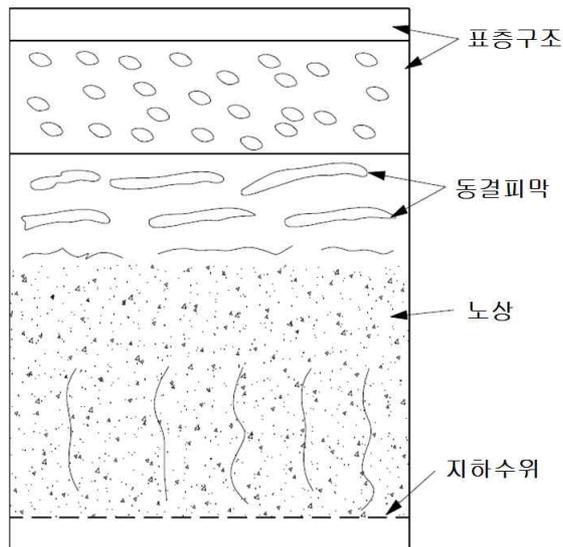


그림 2.10 시멘트 안정처리 기층

2.3.3 지반개량제의 수축 및 균열

건조수축은 시멘트의 수화작용에 의하여 발생하는 자연적인 성질이며 시멘트 함수율 및 점토의 종류에 따라 큰 영향을 받는다. 이와 같은 수축을 방지하기 위해서는 가급적 시멘트 함수율을 7% 이하가 되도록 하고 시멘트 혼합토의 수분이 과다하지 않도록 다짐 함수비를 최적함수비보다 약간 건조측으로 다지며 수분의 급속한 증발을 피하기 위하여 습윤양생을 한다. 또한, 필요에 따라서는 시멘트 대신 1~2%의 석회 또는 Fly Ash를 혼합 사용함으로써 수축을 줄일 수 있으며, 또한, 황산마그네슘, 염화마그네슘 등도 수축감소에 유효하다(권혁두, 2008).

또한, 리그린을 적당히 첨가하여도 흡수성을 개선하고 아울러 동결융해 및 건조에 대한 저항성을 증대시키며, 초기강도를 증가시키기 위해서는 탄산나트륨 0.5% 정도를 첨가하면 효과적이다. 이와 같이 균열은 전술한 시멘트의 수화작용에 의한 건조수축 이외에 온도변화, 하중재하 등에 의하여서도 발생되며, 그림 2.11에서와 같이 시멘트 안정처리층의 약점에서부터 발생된다(권혁두, 2008).

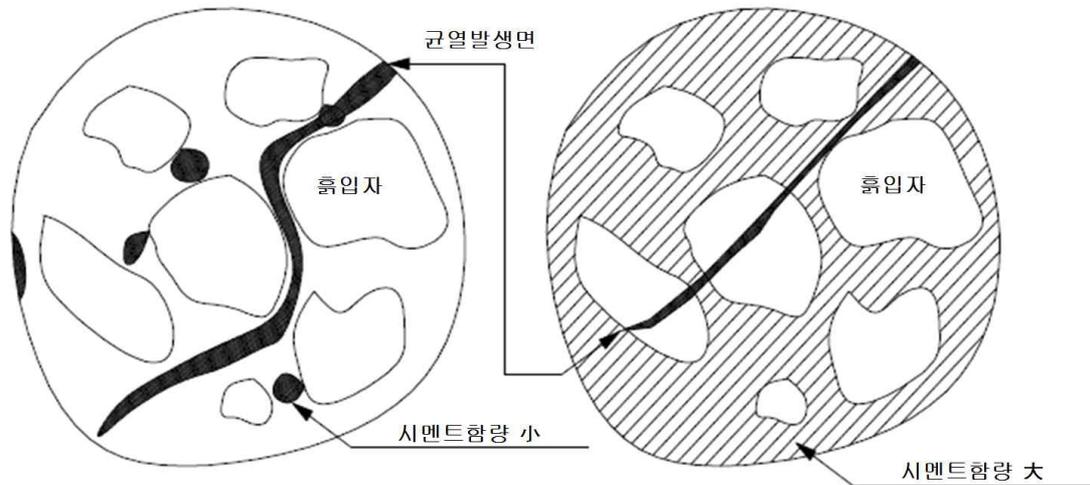


그림 2.11 시멘트 안정처리에 따른 수축 및 균열

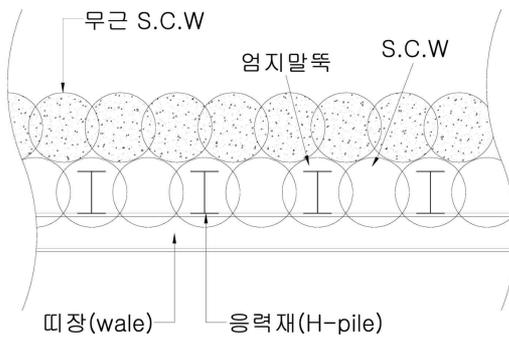
2.3.4 지반개량제의 활용

(1) S.C.W 공법

S.C.W(Soil Cement Wall) 공법은 S.M.W(Soil Mixing Wall) 공법이라고도 하며, 지반개량제를 이용한 주열식 흙막이 벽체 공법으로서 오거를 이용하여 지중을 굴착, 관입시키며, 오거의 중공로드를 통해 시멘트 밀크 주입재를 압력 $5\sim 10\text{kgf}/\text{cm}^2$ 정도로 주입하여 오거로드 주변에 부착된 교반 날개로 원지반의 흙과 혼합하여 Soil Concrete 를 만들어 흙막이 벽을 형성하는 공법이다. 흙막이 벽체로 사용시에는 응력 보강재로서 H형강, 강관, 강널말뚝 등을 삽입하기도 한다.

S.C.W 공법은 지름이 비교적 크므로 강도가 크고 철근, 철골을 삽입하면 강도가 더욱 증가하며, 지반의 변동이 있을 경우 길이의 조절이 가능하다는 장점이 있다. 반면 주열식 벽체이기 때문에 기둥의 수직도가 중요하므로 지중에 매설물, 호박돌 등이 있는 지층에서는 시공이 어려우며 가로방향으로 철근·철골 연결이 불가능하여 본체구조물로 사용하기는 어렵고, 토층의 변화가 심한 지반에서는 정확한 시멘트밀크 배합이 어렵다는 단점이 있다(권혁두, 2008).

S.C.W의 시공 장면 및 시공단면을 그림 2.12에 나타냈다.



(a) 교차시공



(b) 오거

그림 2.12 S.C.W 공법

(2) Soil-Cement 연속벽 공법

현재까지는 일반화 되지 않은 공법으로 국내에서 개발하여 사용되고 있으며, 굴진장비 본체에 커터기를 결합하여 지반에 삽입한 후 횡방향으로 이동하면서 지반을 절삭하면서 고화제를 동시에 주입하여 원지반 토사와 연속적으로 교반하여 지중에 연속벽을 조성하는 공법이다.

S.C.W의 단점인 기둥과 기둥 사이의 이음부의 취약성을 보완하여 이음부 없이 완벽하게 개량된 구조체 및 차수벽을 형성할 수 있다.

또한, 심도에 관계없이 균질한 벽체를 조성할 수 있으며, 커터기가 지중에 삽입되어 시공이 진행되기 때문에 작업상 전도의 위험성이 없고, 지반을 연속 혼합하여 시공함으로써 시멘트량이 절감되며, 석탄회를 동시에 주입재로 활용하면 폐기물 처리에 따른 비용도 절감된다(권혁두, 2008).

그림 2.13은 기존의 S.C.W 공법과 Soil-Cement 연속벽 공법의 시공단면의 비교를 나타낸 것이다.

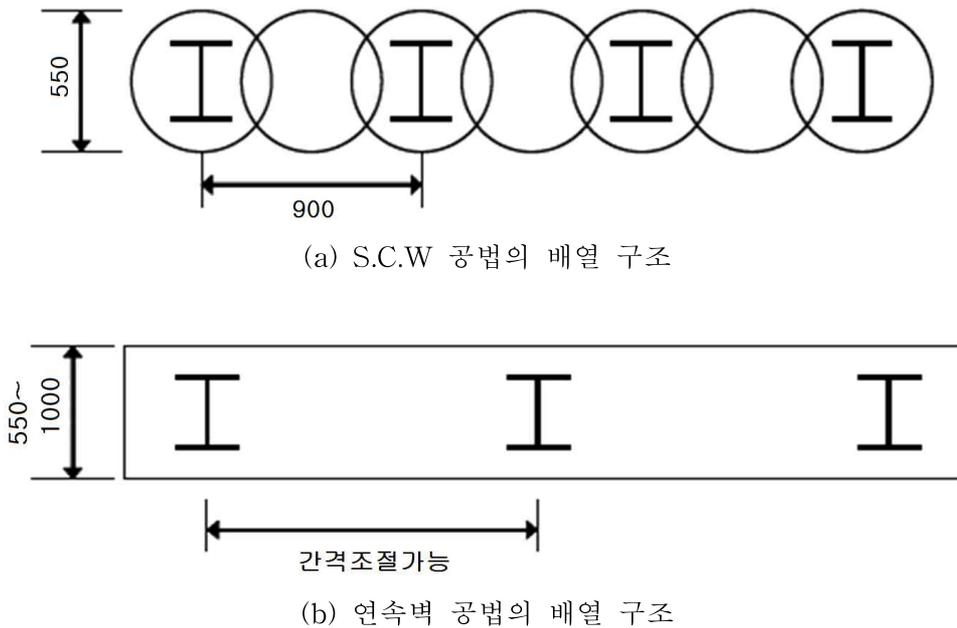


그림 2.13 기존 공법과 새로운 공법의 비교

2.4 아라미드 섬유

2.4.1 개요

아라미드 섬유 1965년에 유리섬유의 강도와 석면의 내열성을 갖는 섬유를 목표로 개발에 성공한 방향족 고분자를 원료로 한 합성섬유이며, 지방족 폴리아미드(aliphatic polyamide)의 Nylon과 대별되는 대표적인 용어이다. 1960년 말에 방향족 폴리아미드 섬유를 최초로 개발한 미국 DuPont사에 의해 제안 개발되어, kevlar 이라는 상표로 생산 되었다. 그 후 1974년 미국 연방통상위원회에 의해 방향족 폴리아미드는 85% 이상의 아미드기(CO-NH)가 두 개의 방향족 고리에 직접 연결된 합성 폴리아미드로부터 제조된 섬유로 규정하고 일반적인 명칭으로 아라미드라 정의되었다.

그림 2.14는 파라계 아라미드 섬유의 개발 역사이다.

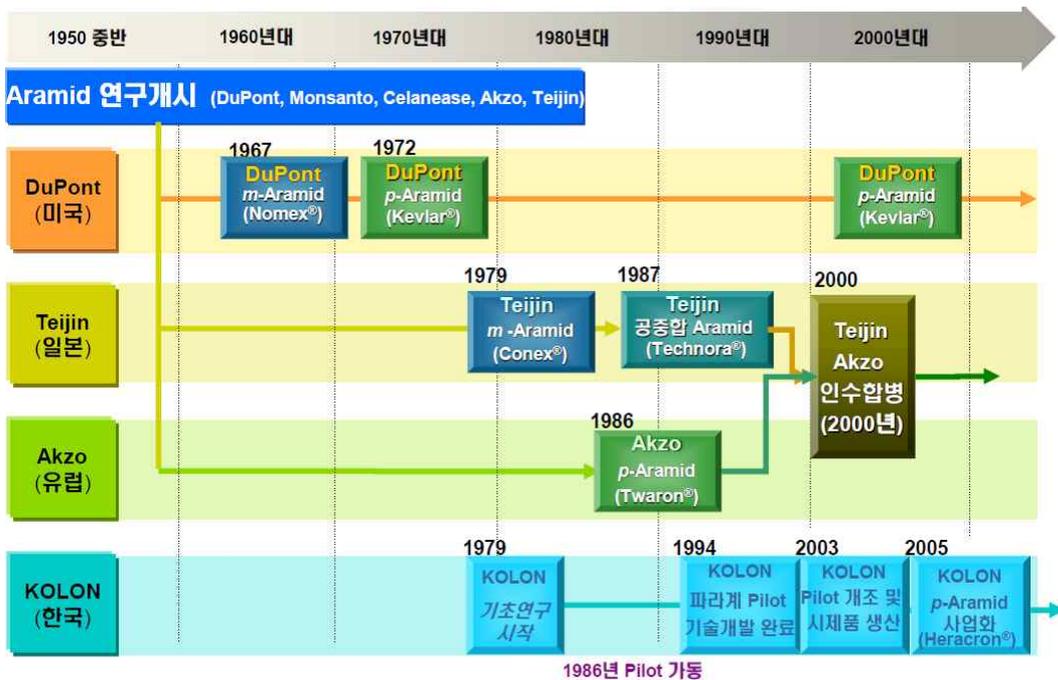


그림 2.14 파라계 아라미드 섬유의 개발 역사

아라미드의 종류로써 크게 결합된 방향축환의 결합단위에 의해서 파라계 아라미드와 메타계 아라미드로 구분된다. 메타계는 고온에 내열성이 우수하고, 파라계 아라미드는 고탄성 및 고강도의 특징을 갖는다. 특히, 파라계 아라미드는 탄성율이 500~1,000g/denier 정도로 탄성율이 좋으며, 인장강도 또한, 20g/denier 이상을 가지고 있다. 또한, 분해온도가 400°C이상, -160°C이하에서도 섬유 특성을 유지할 수 있어 내한·내열성 및 우수한 내구성을 가지고 있다. 아라미드 섬유는 다른 유기섬유와 다른 특성을 가지고 있고 가격대비 우수한 성능을 유지할 수 있어 최초의 산업화 이후, 부직포 및 원사를 비롯하여 직물 등의 형태로 방탄방호용과 로프, 각종 복합재료, 케이블 등 산업소재의 용도로 정보통신, 자동차, 국방, 우주항공 등 다양한 관련 산업분야에서 사용이 확대되고 있는 고부가가치 소재이다(양열호, 2017).

그림 2.15는 본 연구에서 사용된 파라계 아라미드 섬유이다.



그림 2.15 파라계 아라미드 섬유

2.4.2 아라미드 섬유 제조 및 파쇄 방법

(1) 액정용액 제조

아라미드 섬유는 녹는 온도가 분해되는 온도보다 높기 때문에 녹여서 방사하는 방법은 불가능 하다. 중합체를 적절하게 용매에 녹인 후 방사원액으로 만들어 용액방사를 해야 한다. 또한, 파라계는 유기용제에 용해성이 거의 없기 때문에 진한 황산 등 무기산을 방사용매로 사용한다. 파라계 아라미드는 적절하게 용매 되었을 때 이계농도 이상의 고농도에서 액정을 형성하는 특징을 갖는다.

이는 중합체가 용매에 용해될 때 임계농도까지 농도가 증가하면서 점도 또한, 증가한다. 하지만, 임계농도를 지나면서 급격히 감소하는데 이는 낮은 농도에서 불규칙하게 용해되었던 고분자 사슬이 임계농도를 지나면서 평행배열이 형성되고 이 배열은 미끄러짐 때문에 점도가 감소한다. 임계점이 넘은 용액에 농도를 계속 증가 시키면 액정상과 용해가 이루어지지 않은 고체의 혼합으로 점도는 다시 증가한다.

(2) 액정방사

액정 용액은 고분자 사슬이 평행하게 배열되어 유지 방사되는데 이를 액정 방사라고 한다. 고농도의 방사 용액에서 고분자 사슬이 방사되는데 평행 배열된 영역을 섬유축 방향으로 배향시킨다는 특징이 있다.

이러한 배향을 좀 더 효과적으로 하기 위해 그림 2.16과 같이 기격습식 방사법을 이용한다. 이는 습식방사법을 기본으로 하지만 노즐을 통해 토출된 방사 용액이 일정간격의 공기층을 통과한 후 응고액을 통과하게 된다는 특징이 있다(장은지, 2016). 습식 방사에서의 빠른 응고로 발생하는 문제점으로 백탁 현상과 결정화도 저하 등을 앓은 박막이 형성되어 이어지는 응고욕에서의 강한 상분리 응고 반응을 지연시켜 해결하였다.

파라계 아라미드의 경우 이방성 용액을 형성하기 때문에 고농도의 용액이 저점성에서 사용되어 응고액과 방사구 사이에서 토출된 방사용액이 응고되기 전 인장된다는 특징을 가지고 있다. 이러한 방사 방법을 통해 구조적이고 물리적 성질이 향상되어 후처리 등을 하지 않아도 고배향, 고탄성률을 갖는다.

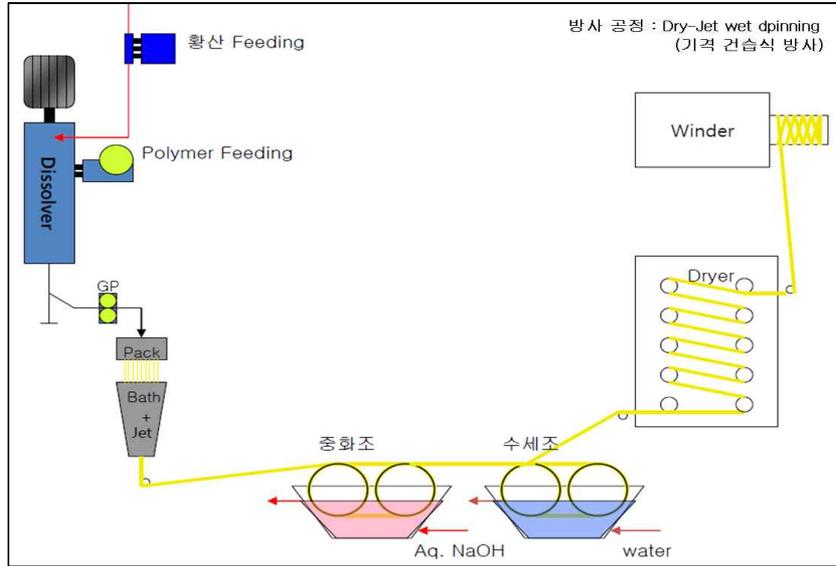


그림 2.16 파라계 아라미드 원사의 제조 과정(Eco융합섬유연구원, 2010)

(3) 섬유 파쇄 방법

아라미드 섬유는 그림 2.17과 같이 파쇄 장치를 이용하여 5~15mm 길이로 절단이 가능하며, 헌 옷, 폐천막 등 일반폐기물을 선별하여 절단할 수 있는 기계를 설비하거나 제작하여 분쇄할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 초기 장치 설계 및 제작비용을 투자하기 때문에 초기비용과 헌 옷, 폐천막 등 수거, 선별을 위한 장기비용은 높을 수 있으나, 시멘트 회사 및 지자체 협의를 통해 저렴한 비용으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.



그림 2.17 섬유 파쇄 장치

2.4.3 아라미드 섬유 구조와 특성

아라미드 섬유는 그림 2.18과 같은 구조를 가지며 선형 사슬을 따라 주기적으로 존재하는 아미드기의 영향으로 분자간의 수소결합이 형성되어 높은 결정화를 갖는다. 따라서 아라미드는 배향도가 80% 이상의 고배향성을 갖고 결정화도가 60이상으로 고결정성을 갖기 때문에 기계적 성질이 우수하다.

과라계 아라미드 섬유는 그림 2.19와 같이 사슬의 집합체가 원의 반지름 방향으로 배향된 주름 잡힌 판상 구조를 가진다.

주름의 폭은 약 250nm이고 주름과 주름의 접경에는 약 30nm 정도 폭의 띠가 주기적으로 형성되어 있으며, 주름과의 각도는 약 170°정도이다. 특히 각도는 탄성률에 지대한 영향을 미친다(조병성, 2012).

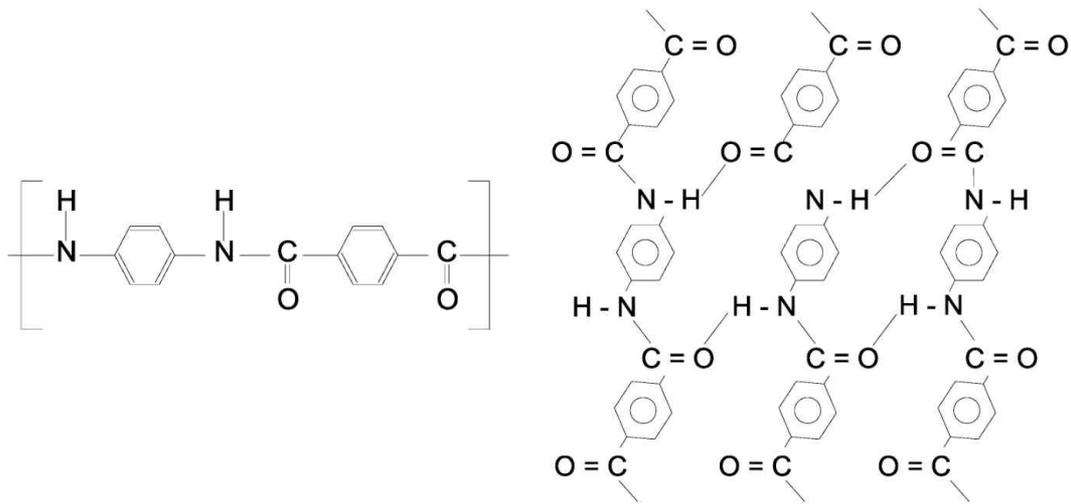


그림 2.18 파라계 아라미드 섬유의 화학식

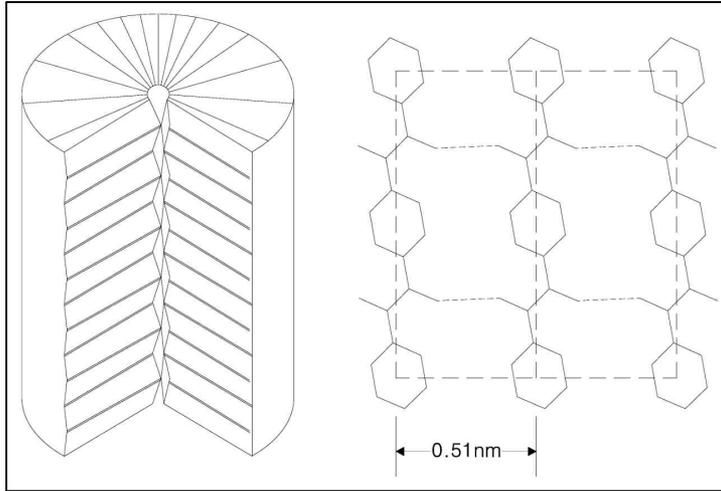


그림 2.19 파라계 아라미드 섬유의 구조

파라계 아라미드 섬유 Dobb와 Morgan에 규칙적인 피브릴 구조로 이루어져 있으며 피브릴은 섬유축을 따라 약 600nm의 폭과 35nm의 간격마다 층이 현상되어 있다. 섬유의 스킨에서는 피브릴이 섬유의 축방향으로 균일하게 배열되어 있다. 코어에는 피브릴이 250nm에 계단식으로 불안정하게 쌓여있다. 섬유의 성질은 주로 스킨층에 의해 결정 된다. 제조공정별 조건에 의해 스킨층과 코어층의 형상이 달라져 섬유의 물리적 성질에서 차이가 발생하게 된다. 이는 섬유의 외부가 받는 전단력이 내부보다 커서 외부의 분자쇄들이 내부보다 더 잘 배향하기 때문에 생기는데 필라멘트의 굵기가 굵을수록 코어 부분의 비율이 높아져 섬유의 강도를 저하시킨다(장은지, 2016).

표 2.11은 파라계열 아라미드와 다른 섬유의 특성을 비교한 것이다.

파라계열의 아라미드 섬유는 탄소섬유, 고밀도 폴리에틸렌, 폴리아크릴레이트 등에 비하여 판매가격이 저렴하고, 밀도나 강도 등은 유사한 값을 나타내므로 시장점유율이 높게 나타났다. 탄성률과 강도는 시료의 압축강도에 큰 영향을 미치며 가장 좋은 섬유는 탄소섬유나 고밀도 폴리에틸렌이지만 가격대비 파라계열 아라미드 섬유가 효율이 높을 것으로 판단된다.

표 2.11 초고강도 섬유소재의 특성

구 분	특 징	판매가격 (\$/kg)	밀도 (g/cc)	강도 (g/denier)	내화 학적	비 고
파라계열 아라미드	DP Kevlar, TJ Twaron ▶ 초고강도 시장점유율 70%	\$20~25	1.44	22~26	Mild Good	건습식 방사
고밀도 폴 리 에틸렌	DSM /Toyobo Dyneema oneywell Spectra ▶ 경량의 고강력사	\$41~47	0.97	35	Good	Gel 방사
폴 리 아크릴 레이트	Kuraray Vectran ▶ Kevlar 유사물성, 용융방사	\$48~60	1.47	25	Very Good	용융 방사
탄 소 섬 유	Toray, Toho Tenax ▶ 고강도/고탄성률, 치수안정	\$70~80	1.76 ~1.8	22~40	Excel lent	PAN 탄화

제 3 장 실내시험

3.1 개요

본 연구에서는 고로슬래그 미분말, 시멘트, 재활용 자원인 아라미드 섬유를 사용하였으며, 고로슬래그 미분말은 잠재수경성으로 박막파괴를 위해 수산화칼슘을 사용하였다. 이러한 배합재료를 기초로 하여 기존 LW공법의 문제점 개선과 섬유재료의 특성인 수평력 증대에 따른 압축강도 증가, 내구성 확보, 고로슬래그 미분말을 고치환하여 시멘트량 사용량감소에 따른 압축강도, 차수성 확보 등 상기와 같은 효과를 분석하기 위해 현장적용 전 각종 실내시험을 통하여 적정 배합비를 선정하고자 하였다.

실내시험은 그라우트재 강도효과를 확인하기 위해 Getime과 그에 따른 호모겔, 샌드겔 일축압축강도 시험을 수행하였고, 차수효과를 확인하기 위해 투수시험과 섬유 파쇄체를 첨가한 그라우트의 특성을 확인하고자 SEM 및 EDX 분석, 환경성 평가를 위해 중금속 용출시험, pH 시험을 수행하였다.

3.2 주입재료의 Getime 측정

3.2.1 Getime 측정을 위한 배합비

일반적으로 그라우팅용인 시멘트 현탁액형 주입재의 급결재로 규산소다 3호와 같은 물유리계를 주로 사용한다. 대표적으로 사용되는 물유리계인 규산소다의 경우 겔화형성이 뚜렷하고, 비교적 저점성으로 침투성도 좋으며, 단가가 매우 저렴하기 때문에 시공면에서 경제성이 우수하다(임춘호, 2017).

본 연구에서는 급결재인 규산소다 3호와 물의 비율을 고정시킨 혼합물(A액)에 고로슬래그 미분말과 아라미드 섬유, 시멘트 및 물의 배합비를 각각 달리하여 만든 혼합물(B액)을 표면유제처리율 0.7%와 1.2%의 조건으로 혼합하여 Getime을 측정하였다.

주입재 제조는 A액 속의 규산소다3호의 함량을 물 대비 31.25ml(50%)로 A액은 고정조건을 주었고, B액 속의 사용된 고로슬래그 미분말은 시멘트 대비 0g(0%), 8.4g(30%), 16.8g(60%)를 첨가하였다. 또한, 각각의 고로슬래그 미분말과 시멘트의 배합비에 아라미드 섬유 무첨가, 0.5%, 1.0%를 첨가하였다(최대 1.0%의 첨가기준은 재활용자원 활용 기준을 참고). 또한, 아라미드 섬유의 뭉침현상을 방지하고 원활하고 균등한 배합을 위해 표면유제처리 0.7%, 1.2%를 사용하였다. W/B는 시멘트 + 고로슬래그 미분말의 중량대비 200%로 고정하였다. 미세물질인 고로슬래그 미분말이 그라우트 재료에 포함될 경우 미세공극을 채워 보다 지반이 조밀해질 것으로 기대된다.

Getime은 A액과 B액을 각각 200ml 종이컵에 62.5ml씩 채운 후 연속적으로 좌, 우 혼합시켜 종이컵에서 유동성이 정지되는 시간을 3회 측정하여 평균값으로 나타내었다.

표 3.1은 Getime 측정을 위한 주입재 배합비이다.

표 3.1 Geltime 측정을 위한 주입재 배합비(중량비)

A액		B액				표면유제처리
규산소다 3호(ml)	물(ml)	시멘트 (g)	고로슬래그 미분말(g)	물 (ml)	아라미드 섬유 (g)	
31.25(50%)	31.25(50%)	28(100%)	0(0%)	53.75	- (0%)	0.7%
		19.6(70%)	8.4(30%)		0.14 (0.5%)	
		11.2(40%)	16.8(60%)		0.28 (1.0%)	1.2%

그림 3.1은 Geltime을 확인하기 위한 시험과정이다.

SS는 규산소다 3호(Sodium silicate)이며, W는 물(Water), C는 시멘트(Cement), B는 고로슬래그 미분말(Blast furnace slag powder), A는 아라미드 섬유(Aramid fiber), O는 표면유제처리(Oiling agent)을 나타내었다.

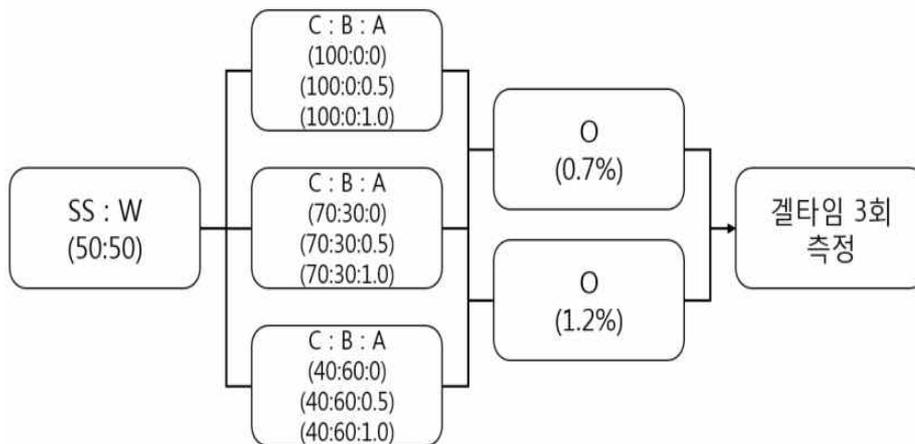


그림 3.1 Geltime 측정을 위한 시험과정

3.2.2 Geltime 측정을 위한 제작과정

본 시험에서는 주입재 배합비를 중량비로 계산하여 A액과 B액을 각각 200ml 종이컵에 62.5ml씩 채운 후 혼합하였다. Geltime을 측정하기 위해 각각의 종이컵 2개로 배합한 후, 혼합을 시작한 시간부터 종이컵에서 유동성이 없어질 때까지 좌, 우로 이동시킨 후 그때까지 소요된 시간을 초단위로 기록하였고, 3회 반복 측정하여 평균값을 구하였다.

그림 3.2(a)는 Geltime을 측정하기 위해 배합하여 유동성이 정지 할 때까지 반복적으로 좌, 우로 이동시키는 사진이고, 그림 3.2(b)는 유동성이 정지 한 후의 초단위를 기록한 사진이다.



(a) 종이컵에 배합



(b) 종이컵 유동성 확인

그림 3.2 주입재의 Geltime 측정 사진

3.3 배합비에 의한 일축압축강도시험

3.3.1 호모겔 일축압축강도를 측정하기 위한 배합비

본 연구에서 측정하고자 하는 호모겔 공시체는 흙 시료를 사용하지 않고 주입재료만의 순수한 일축압축강도를 측정하여 주입재료의 타당성을 확인하기 위한 시험으로, LW공법 시 사용되는 규산소다 3호와 물의 배합비는 고정하고, 시멘트와 고로슬래그 미분말, 아라미드 섬유, 표면유제처리율의 배합비를 통한 호모겔의 시간경과에 따른 일축압축강도를 확인하여 차수 그라우트재의 배합비를 개발하고자 하였다.

공시체의 강도를 측정하기 위해서 5cm(D) × 10cm(H) 규격의 원통형 몰드에 성형하여 호모겔 형태의 공시체를 제작하였으며, 3시간 후 탈영하여 수중양생으로 3, 7, 14, 28일의 일축압축강도를 확인하였다.

호모겔 공시체 제작은 A액의 규산소다 3호의 함량을 물 대비 125ml(50%)로 고정하였고, B액에서 사용된 고로슬래그 미분말은 시멘트 대비 0g(0%), 33g(30%), 66g(60%)를 첨가하였다. 각각의 배합비에 아라미드 섬유 무첨가, 0.5%, 1.0%를 첨가하였으며, 1.0%의 기준은 재활용자원 활용기준을 참고하였다. 또한, 아라미드 섬유의 뭉침현상을 방지하고 원활하고 균등한 배합을 위해 표면유제처리 0.7%, 1.2%를 사용하였다. W/B는 시멘트 + 고로슬래그 미분말의 중량대비 200%로 고정하였다. 미세물질인 고로슬래그 미분말이 그라우트 재료에 포함될 경우 미세공극을 채워 보다 지반이 조밀해질 것으로 판단된다. 수산화칼슘 용액은 1Mol을 제작하여 고로슬래그 미분말과 1:1 배합하였으며, 이는 고로슬래그의 박막 제거를 위해 사용하였다.

시험의 신뢰성을 높이기 위하여 각 배합비마다 3개의 Case를 제작한 후, 일축압축강도시험의 평균값을 구하였다. 일축압축강도는 만능재하시험기를 이용하였으며, 압축속도는 1mm/min 수준으로 설정하였다.

선행연구 결과, 섬유보강 콘크리트의 경우 대부분 휨강도 시험을 수행하고 있으나, 그라우트재료의 경우 콘크리트와 같은 강도를 요구하지 않고, 나타낼 수 없기 때문에 평가하기 용이한 압축강도 시험방법을 선정하였으며, 이에 따른 무처리와 섬유보강 그라우트재에 대한 강도를 비교·분석 하고자 하였다.

표 3.2는 호모겔의 일축압축강도 측정을 위한 주입재의 배합비를 나타낸 것이다.

표 3.2 호모겔의 일축압축강도 측정을 위한 주입재 배합비(중량비)

A액		B액				섬유처리	
규산소다 3호(ml)	물 (ml)	시멘트 (g)	고로슬래그 미분말(g)	수산화칼슘 용액(ml)	물 (ml)	표면유제 처리	아라미드 섬유(g)
125 (50%)	125 (50%)	110 (100%)	0 (0%)	0	220	0.7%	0%
		77 (70%)	33 (30%)	33	187		0.55 (0.5%)
		44 (40%)	66 (60%)	66	154	1.2%	1.1 (1.0%)

그림 3.3은 호모겔의 일축압축강도를 확인하기 위한 시험과정이다.

SS는 규산소다 3호(Sodium silicate)이며, W는 물(Water), C는 시멘트(Cement), B는 고로슬래그 미분말(Blast furnace slag powder), A는 아라미드 섬유(Aramid fiber), O는 표면유제처리유(Oiling agent)를 나타내었다.

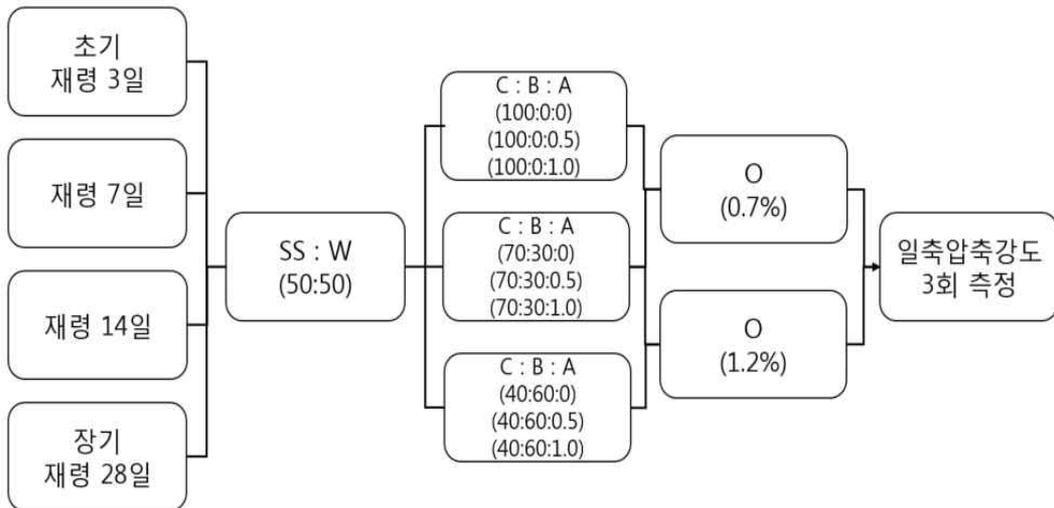


그림 3.3 호모겔의 일축압축강도 측정을 위한 시험과정

3.3.2 호모겔 공시체 제작과정

(1) 시험용기

일축압축강도시험을 위한 공시체의 몰드 크기는 KS F 2331에 의해 7cm(D)와 14cm(H)로 1 : 2의 크기를 추천하고 있으며, 시료의 크기나 직경 대 높이의 비율을 맞추도록 하고 있다. 그러나 실질적으로 사용하는 시료의 크기나 시험에 사용된 몰드에 맞추기는 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서 사용된 몰드의 크기는 직경 5cm(D), 높이 10cm(H)의 원통형 몰드로서 직경 대 높이의 비율이 1 : 2로 제작하였다. 시험 몰드의 소재는 주철을 사용하였고, 탈거 과정에서 공시체의 변형을 최소화하기 위하여 용기 내부에 윤활제를 소량 도포하였다. 공시체는 제작 후 용기의 탈거가 용이하도록 1/2로 분리되는 형태로 설계하였다.

시험에 사용한 용기는 그림 3.4와 같다.



(a) 공시체 몰드



(b) 윤활제 도포

그림 3.4 호모겔 제작에 사용된 일축압축강도 시험용기

(2) 호모겔 공시체 제작

1/2로 분리되는 공시체 몰드에 윤활제를 도포한 다음 배합비에 따라 주입체를 혼합 성형하였다. 준비된 몰드에 배합재료를 넣고, 24시간 후 공시체를 탈형하여 수중 양생을 통해 공시체를 재령하였다.

완성된 공시체의 크기는 5cm(D)와 10cm(H)로 주입체에 따른 일축압축강도를 분석하기 위해 3일, 7일, 14일, 28일까지 재령 하였으며, 호모겔의 재령에 따른 배합비별 공시체와 공시체 제작 후 수중양생 과정은 그림 3.5와 같다.

재령 28일자					
3/28 표면유제처리 0.7%			3/29 표면유제처리 1.2%		
아라미드 0% 솔레그 0%	아라미드 0% 솔레그 30%	아라미드 0% 솔레그 60%			
아라미드 0% 솔레그 0%	아라미드 0% 솔레그 30%	아라미드 0% 솔레그 60%			
아라미드 0.5% 솔레그 0%	아라미드 0.5% 솔레그 30%	아라미드 0.5% 솔레그 60%	아라미드 0.5% 솔레그 0%	아라미드 0.5% 솔레그 30%	아라미드 0.5% 솔레그 60%
아라미드 0.5% 솔레그 0%	아라미드 0.5% 솔레그 30%	아라미드 0.5% 솔레그 60%	아라미드 0.5% 솔레그 0%	아라미드 0.5% 솔레그 30%	아라미드 0.5% 솔레그 60%
아라미드 1.0% 솔레그 0%	아라미드 1.0% 솔레그 30%	아라미드 1.0% 솔레그 60%	아라미드 1.0% 솔레그 0%	아라미드 1.0% 솔레그 30%	아라미드 1.0% 솔레그 60%
아라미드 1.0% 솔레그 0%	아라미드 1.0% 솔레그 30%	아라미드 1.0% 솔레그 60%	아라미드 1.0% 솔레그 0%	아라미드 1.0% 솔레그 30%	아라미드 1.0% 솔레그 60%



(a) 재령에 따른 배합비별 공시체

(b) 공시체 제작 후 수중양생

그림 3.5 호모겔의 재령에 따른 배합비별 공시체 및 수중양생

3.3.3 샌드겔의 일축압축강도를 측정하기 위한 배합비

본 연구에서 측정하고자 하는 샌드겔 공시체는 흙 시료 80%와 주입재료 20%를 사용하여 흙 시료 공시체의 일축압축강도를 측정함으로써 지반개량재료에 대한 평가를 수행하기 위한 시험이다.

샌드겔은 규산소다 3호와 물 배합을 하면 공시체가 성형되지 않고 규산소다 3호 자체가 지반의 강도를 낮추기 때문에 본 배합비에서는 제외를 하였다. 시멘트와 고로슬래그 미분말, 아라미드 섬유, 표면유제처리율의 배합비를 통한 샌드겔의 시간경과에 따른 일축압축강도를 확인하고자 하였다.

공시체의 강도를 평가하기 위해서 5cm(D) × 10cm(H) 원주형 몰드에 성형하여 호모겔 형태의 공시체를 제작하였으며, 3시간 후 탈형하여 기중양생으로 3, 7, 14, 28일의 일축압축강도를 확인하였다.

경화제에서 사용된 고로슬래그 미분말은 시멘트 대비 0g(0%), 33g(30%), 66g(60%)를 첨가하였다. 각각의 배합비에 아라미드 섬유 0.0%, 0.5%, 1.0%를 첨가하였으며, 1.0%의 기준은 재활용자원 활용기준을 참고하였다. 또한, 아라미드 섬유의 뭉침현상을 방지하고 원활하고 균등한 배합을 위해 표면유제처리 0.7%, 1.2%를 사용하였다. 수산화칼슘 용액은 1Mol을 제작하여 고로슬래그 미분말과 1:1 배합하였으며, 이는 고로슬래그의 박막 제거를 위해 사용하였다.

시험의 신뢰성을 높이기 위하여 각 배합비마다 3개의 Case를 제작하여 일축압축강도의 평균값을 사용하였고, 일축압축강도는 만능재하시험기를 이용하였으며, 압축속도는 1mm/min 수준으로 설정하여 일축압축강도를 측정하였다.

샌드겔도 호모겔과 마찬가지로 압축강도를 측정하여 무처리 시료와 섬유보강 그라우트제에 대한 강도를 비교·분석 하고자 하였다.

아라미드 섬유 혼입율이 증가할수록 공시체 내에 섬유인자들이 시멘트와의 결합하여 섬유 인자들이 실철근과 같은 역할을 하여 공시체의 전단파괴에 대한 저항성을 높여줄 것으로 기대하였으며, 표면유제처리율의 증가에 따라 아라미드 섬유의 분산 능력이 향상되어 공시체 배합비 교반시 섬유의 뭉침현상을 방지하여 균열 제어에 효과적일 것으로 기대하였다.

표 3.3은 샌드겔의 일축압축강도 측정을 위한 주입재의 배합비이다.

표 3.3 샌드겔의 일축압축강도 측정을 위한 주입재 배합비(중량비)

시료(g)	경 화 제				섬 유 처 리	
	시멘트 (g)	고로슬래그 미분말(g)	수산화칼슘 용액(ml)	물 (ml)	표면유제 처리	아라미드 섬유(g)
350	70 (100%)	0 (0%)	0	50	0.7%	0%
	49 (70%)	21 (30%)	21	29		0.55 (0.5%)
	28 (40%)	42 (60%)	42	8	1.2%	1.1 (0.5%)

그림 3.6은 샌드겔의 일축압축강도를 확인하기 위한 시험과정이다.

C는 시멘트(Cement), B는 고로슬래그 미분말(Blast furnace slag powder), A는 아라미드 섬유(Aramid fiber), O는 표면유제처리용(Oiling agent)을 나타내었다.

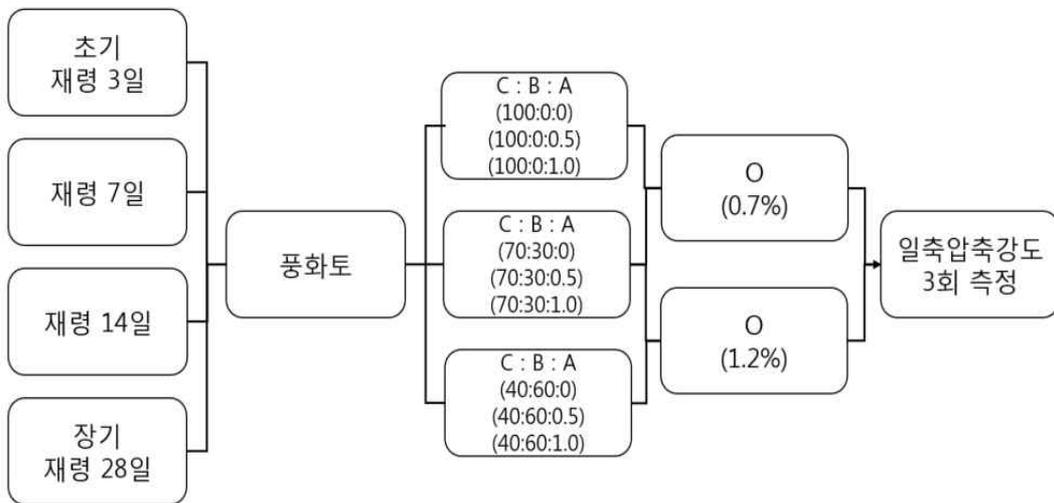


그림 3.6 샌드겔의 일축압축강도 측정을 위한 시험과정

3.3.4 샌드겔 공시체 제작과정

(1) 시험용기

일축압축강도시험을 위한 공시체의 몰드 크기는 KS F 2331에 의해 7cm(D)와 14cm(H)로 1 : 2의 크기를 추천하고 있으며, 시료의 크기나 직경 대 높이의 비율을 맞추도록 하고 있다. 그러나 실질적으로 사용하는 시료의 크기나 시험에 사용된 몰드에 맞추기는 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서 사용된 몰드의 크기는 그림 3.4와 같이 호모겔과 마찬가지로 5cm(D)와 10cm(H)의 원형 몰드로서 직경 대 높이의 비율이 1 : 2로 제작하였다. 시험 몰드는 주철로 제작하였으며, 탈거 과정에서 공시체의 변형을 최소화하기 위하여 용기 안쪽에 윤활제를 얇게 도포하였다. 공시체를 제작 후 용기의 탈거가 용이하도록 1/2로 분리되는 형태로 설계되었다.

(2) 샌드겔 공시체 제작

1/2로 분리되는 공시체 몰드에 윤활제를 도포한 다음 배합비에 따라 주입재를 혼합 성형하였다. 준비된 몰드에 주입재를 넣고, 24시간 후 공시체를 탈형하여 기중 양생을 통해 공시체를 재령하였다.

완성된 공시체의 크기는 5cm(D)와 10cm(H)로 주입재에 따른 일축압축강도를 분석하기 위해 3일, 7일, 14일, 28일까지 재령 하였으며, 그림 3.7과 같이 호모겔 및 샌드겔의 일축압축강도시험을 수행하였다.



(a) 재료배합



(b) 공시체 제작 후 기중양생



(c) 일축압축강도시험 전경



(d) 시험 후 공시체 모양

그림 3.7 일축압축강도시험 전경

3.4 배합비에 의한 투수시험

본 연구에서는 포화투수시험을 수행하였다. 투수시험은 모든 형태의 흙에 폭 넓게 사용되고 있으며, 유출되는 물의 양을 Q와 측정시간 t를 측정하여 투수계수를 유출한다.

본 연구에서는 아라미드 섬유가 차수효과 보다는 지반의 보강재료로 사용되었기 때문에 투수시험 시 배합비에서 제외하였다. 고로슬래그 미분말과 시멘트를 이용한 차수 그라우팅 공법은 시멘트와 약액으로 사용하는 그라우팅공법과 고로슬래그 미분말 입자를 이용하여 흙 입자 사이에 주입되고, 아라미드 섬유에 의해 수평저항력이 증가되므로 지반의 강도 증가 및 차수의 효과를 나타내는 공법이다.

주입재 제조는 A액의 규산소다3호의 함량을 물 대비 175ml(50%)로 고정하였으며, B액으로 사용된 고로슬래그 미분말은 시멘트 대비 0g(0%), 30g(30%), 60g(60%)를 첨가하였으며, 각각의 배합비를 표준사 900g에 교반하여 100mm(D) × 120mm(H)의 모형 토조에서 그림 3.8과 같이 투수시험을 진행하였다.

시료의 하단에 철망과 거름종이를 설치하여 시료가 빠져나가지 못하게 하였고, 배합 후 수중양생을 실시하여 20±2°C로 일정 온도를 맞춰 7일 양생 후 투수시험을 수행하였다.

투수시험을 위한 시료 배합비는 표 3.4에 나타내었다.

표 3.4 투수시험 측정을 위한 주입재 배합비

A액		B액				시료
규산소다 3호(ml)	물 (ml)	시멘트 (g)	고로슬래그 미분말(g)	수산화칼슘 용액(ml)	물 (ml)	표준사 (g)
175(50%)	175(50%)	100(100%)	0(0%)	0	200	900
		70(70%)	30(30%)	30	170	
		40(40%)	60(60%)	60	140	



(a) A액 + B액 Mixing



(b) 투수시험

그림 3.8 투수시험 배합 과정

3.5 SEM 및 EDX 분석 방법

본 연구에서는 SEM 및 EDX 분석을 위한 장비로 사용한 전자현미경은 그림 3.9와 같이 Scanning Electron Microscope이다. 전자현미경은 전자에 대한 렌즈작용을 코일에 흐르는 전류를 변환시킴으로서 Magnetic field를 사용하여 전자의 이동 경로를 변하게 하여 마치 볼록렌즈가 빛을 집속하듯 전자를 모아주는 것과 유사하다. 광선 대신에 전자 빔을 사용하기 때문에 현미경의 내부는 진공상태여야 하는 이유는 전자가 공기와 충돌하면 에너지가 소실되거나 굴절되는 등 제어하기 어렵게 때문이다.

또한, 표본과 대물렌지와 렌즈 사이의 거리는 일정하지만 중간렌즈와 투영렌즈의 코일에 통하는 전류의 세기에 의해 배율이 결정되며 상의 초점은 대물렌즈의 코일에 흐르는 전류에 의해 조절된다.

광학현미경은 실제의 상을 볼 수 있지만 전자현미경은 형광판이나 사진판을 상을 볼 수 있다. 광학현미경은 높은 에너지의 전자빔을 이용하여 전자가 시편과 충돌할 때 발생하는 이차전자, 반산전자, X-선 등을 검출하여 확대 상을 촬영하는 장치로서 표본의 빛을 흡수/반사상이 형성되는 반면, 전자현미경에서는 전자선이 시료의 표면에 충돌하면서 발생하는 이차전자, 산란전자, 투과전자, X-Ray 등을 측정하여 표면의 형태를 영상으로 나타낸다.



그림 3.9 시험에 사용된 전자현미경

3.6 환경성 평가

그라우트재의 독성배출 문제로 알칼리(pH)와 중금속 성분 등 환경유해성에 대한 관심이 커지고 있지만 그라우트재에 대한 국내의 용출시험방법은 현재까지 정립되어 있지 않은 실정이다. 기존 그라우트재와 더 나아가 새로운 재료개발에 따른 친환경 그라우트재의 환경유해성 확인을 위한 용출시험방법의 정립이 시급히 요구되고 있다.

현재 국내 및 국외에서 그라우트재에 한정된 알칼리(pH) 및 중금속 용출시험방법은 많지 않다. 그라우트재에 함유된 중금속 용출에 대한 국내 및 국제적인 공인 시험방법이나 기준은 없는 현실이다. 대부분의 중금속 용출시험방법은 매립지 폐기물에 대해 규정하고 있으며, 국내에서는 폐기물이 지정폐기물에 해당되는지 여부를 판단하기 위한 방법으로 폐기물공정시험방법(Korea standard leaching procedure, KSLP)을 준용하거나 콘크리트의 알칼리(pH) 및 중금속 용출시험방법으로 각기 다른 시험법을 적용하여 분석하고 있어 용출 결과가 상이하게 나타날 수 있다.

반면에 국외의 용출시험방법은 다양한 재료에 대해서 대부분 pH 및 중금속 용출시험방법을 동일하게 규정하고 있으며, 특히 폐기물 및 독성 재료에 대한 유해환경성시험에 대해 엄격한 규제를 하고 있는 미국과 유럽에서는 다양한 재료에 대한 다양한 용출시험방법을 규정하고 있다. 지정 폐기물뿐만 아니라 재활용된 콘크리트와 아스팔트 콘크리트 및 시멘트를 포함한 바인더 등 다양한 조건으로 배합된 콘크리트에 대한 용출시험방법도 일부 제시하고 있다.

그림 3.10은 Leaching test 시험방법의 절차이다.

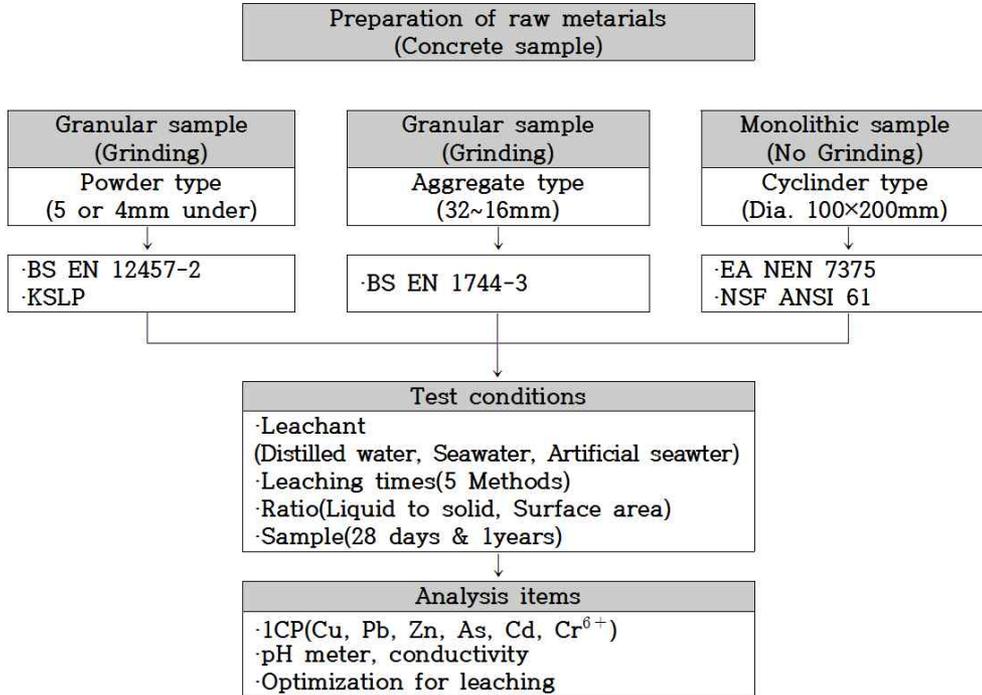


그림 3.10 Leaching test 방법

본 연구에서는 콘크리트의 용출시험방법으로 사용되고 있는 국내의 폐기물공정시험 방법을 이용하여 그라우트재에 대한 용출시험방법을 적용하였다. 일반적으로 폐기물 용출시험은 용출시료로 고품폐기물은 입상(Granular) 또는 단일체(Monolithic) 물질로 구분한다.

용출시료로 분말형태의 시료를 사용하는 용출시험방법인 국내의 폐기물공정시험방법이기 때문에 입상체를 사용하였으며, 시험 과정을 그림 3.11에 나타내었다.

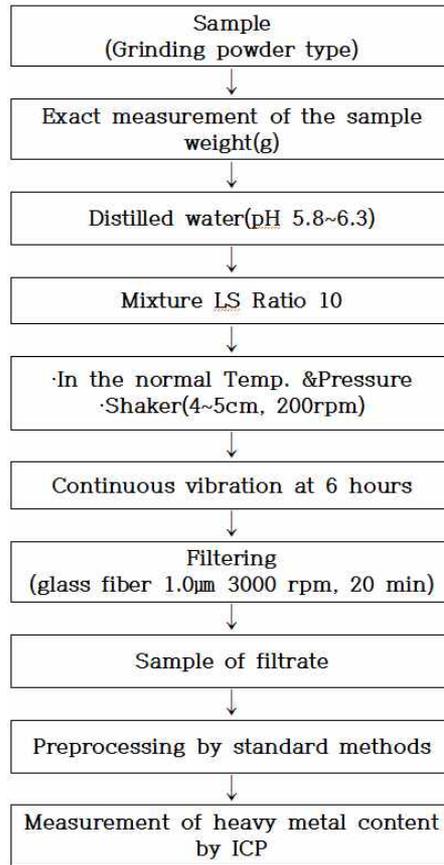


그림 3.11 폐기물공정시험방법에 따른 Leaching test 절차

일반적으로 콘크리트의 pH는 (12~13) 범위의 강알칼리성으로 경화한 후에도 지속적으로 유지하고 있어 콘크리트의 수밀성 증대와 표면 피막 형성 등 장기적인 콘크리트 안정화에 도움이 되고 있지만 해수면에 항상 잠겨 있는 콘크리트는 알칼리 성분(pH), 중금속 용출 등으로 인해 해중 생물의 생육 및 환경적인 문제 등 해양생태계에 직간접적으로 악영향을 줄 수 있다.

국내의 폐기물 관리법에서 규정하고 있는 폐기물공정시험기준에 의한 용출 허용기준은 지정폐기물에 함유된 유해물질에 대해 용출용액 1리터당 유해 함량을 규정하고 있다.

3.6.1 중금속 용출시험

용출시험은 그라우팅 시공 후 시간이 지남에 따라 그라우팅에서의 유해한 중금속들이 용출되어 주변의 토양 및 지하수 등을 오염을 시켜 2차 피해를 줄 수 있으며, 그 피해사례도 있기 때문에 본 차수 그라우팅 재료의 용출시험을 통하여 유해중금속이 용출되는지의 여부를 확인하여 차수그라우팅 재료의 친환경적인 특성을 알아보기 위함이다(허원, 2011).

표준용출시험법인 폐기물 공정시험방법에 의한 용출시험에 의거하여 실시하였으며, 시료의 조제는 물유리계 고결시편의 경우 고결 이후에도 자체가 가지고 있는 수분으로 인하여 105℃에서 1시간 건조 후 2mm체에 통과할 수 있을 정도로 파쇄 하였고, 이후 시료의 전처리는 시료의 조제방법에 따라 조제한 시료 100g이상을 정밀히 달아 정제수에 염산을 넣어 pH를 5.8 ~ 6.3으로 한 용매(ml)를 1 : 10(W:V)의 비율로 200ml 삼각플라스크에 넣어 혼합한다.

시료의 조제가 끝난 혼합액을 상온, 상압에서 진탕횟수 매분당 약 200회 진폭이 약 4 ~ 5cm의 진탕기를 사용하여 6시간 연속 진탕한 다음 1.0 μ m의 유시섬유 여지로 여과하고 여과액을 전처리하여 중금속 검출 시험을 한다.

표 3.5는 폐기물관리법(2017)에 제시된 중금속검출 기준을 나타낸 것이다.

한국양회공업협회(2010) 보고서에 따르면 국립환경과학원에서 포틀랜드 및 클링커(Clinker) 용출시험을 수행한 결과, 구리, 카드뮴, 수은, 비소, 납, 시안에서 중금속은 용출되지 않는 것으로 나타났으며, 6가크롬에서 1.08~0.51 정도로 검출되는 것을 확인하여 본 연구에서도 6가크롬에 대하여 전남대학교 공동실험실습관에 시료를 의뢰하여 측정하고자 하였다.

시료의 배합비는 아라미드 섬유는 중금속 용출과 무관할 것으로 판단하여 고로슬래그 미분말의 함량이 증가함에 따라 분석하고자 하였으며, 따라서 배합비 C:B이 100:0, 70:30, 40:60%에 대하여 28일 기건양생을 한 후 시료를 전남대학교 공동실험실습실 표면분석실에 의뢰하여 분석하였다.

표 3.5 중금속 검출기준(폐기물관리법, 2017)

중금속	검출기준(mg/l)
납 (Pb)	3.0
구 리(Cu)	3.0
비 소(As)	1.5
카 드 뎀(Cd)	0.3
수 은(Hg)	0.005
6가크롬(Cr ⁶⁺)	1.5

3.6.2 pH시험

본 연구에서 시험한 공시체는 중금속 용출시험과 마찬가지로 공시체 내부에 존재하는 아라미드 섬유는 pH와 무관할 것으로 판단하여 고로슬래그 미분말의 함량이 증가함에 따라 분석하고자 하였다. 따라서 배합비 C:B 100:0, 70:30, 40:60%에 대하여 분석하였으며, 이들이 지반에서 차수 및 지반보강의 목적으로 사용 될 경우 물과의 접촉에 의해 배출되는 용출수에 의한 오염정도를 측정하고자 하였다.

그라우트제에 대한 알칼리(pH) 용출특성을 분석하고 평가하여 환경적인 유해성을 검토하기 위한 용출시험방법으로 특정 입도 크기 이하로 분쇄하여 적용하고 있는 국내의 폐기물공정시험방법과 토양오염공정시험방법을 사용하였다.

pH의 정의는 수소이온의 활동도에 따른 음의 상용지수이다.

pH는 눈금상으로 0에서 14까지 측정되며, 용액의 산성 및 염기성 정도를 나타내는 측정단위이다. pH측정방법에는 물 붓기에 의한 방법, 페이스트 분쇄에 의한 방법, 고상 및 반고상 폐기물에 대한 방법, 수침에 의한 측정방법이 있다. 이러한 방법들 중 물 붓기에 의한 pH측정과 물속에 담그기에 의한 pH 측정법은 기존의 발표된 여러 연구에 의하면 그 측정값의 차이가 미미한 것으로 나타난다. 그리고 페이스트 분쇄에 의한 pH측정은 그 시료의 얇은 판상을 따로 제작한다는 것이 실제로 많은 어려움이 있다. 고체상 및 반고체상 폐기물에 대한 pH측정시험은 고결체에 정확한 pH 측정값을 얻어 내기가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 배합비 C:B가 100:0, 70:30, 40:60%에 대하여 28일 기건양생을 한 후 시료를 전남대학교 공동실험실습관에 보내어 분석하였다. pH 분석은 표 3.6과 같이 30분간 수침시킨 후 초기, 0.5, 1, 3, 6, 12, 24, 48시간 동안 pH를 측정하였다.

표 3.6 pH 시험 방법

구 분	폐기물 공정시험 방법
시 료	10g
증 류 수	25ml
액체 고체 비율(LS ratio)	2.5
수 침 시 간	30분

제 4 장 실내시험 결과분석

4.1 배합비에 따른 Getime 분석

아라미드 섬유의 경우 유기섬유로서 친수성의 성질을 가지고 있어 시멘트 복합재료의 보강재료로 사용될 경우 유동성의 저하 및 섬유의 분산성에 문제가 있다.

본 연구에서는 이를 개선하기 위하여 섬유표면에 유제처리를 실시하였으며, 유제처리량에 따른 유동성 및 섬유의 분산성과 Getime에 대한 검토를 하고자 유제처리량에 따라 다음과 같이 설정하였다.

각각의 비율(0.0%, 0.5%, 1.0%)별 표면유제처리비율(Oiling agent ratio)을 0.7%, 1.2%로 구분하여 섬유의 표면특성을 개선하고자 하였고, 정확한 평가를 위해 Getime 시험은 각 배합비별 3회 시험 후 평균값을 사용하였다.

아라미드 섬유는 친수성으로서 배합 시 배합수를 흡수하는 성질이 크기 때문에 유동성 및 시멘트 매트릭스 내부에서의 섬유분산효율이 저하된다. 이에 본 연구에서는 아라미드 섬유의 표면유제처리를 통해 소수성으로 개질하여 유동성 및 분산효율을 개선하고자 하였다.

4.1.1 표면유제처리 비율에 따른 Geltime 분석

(1) 표면유제처리 0.7%의 Geltime 분석

표면 유제처리를 0.7%일 경우 아라미드 섬유(0.0%, 0.5%, 1.0%) 비율에 따라 Geltime을 분석하였다. 그림 4.1은 아라미드 첨가 비율을 “A”로 표기하였고, 표면유제 처리 비율을 “O”로 표기하였다.

C:B의 배합비가 100:0, 70:30, 40:60%일 때 무처리의 경우 3회 측정 후 평균 157, 215, 303초로 가장 낮은 Geltime을 가지고 있으며, O:A가 0.7:0.5%일 때 131, 184, 270 초, O:A가 0.7:1.0% 일 때 101, 167, 245초로 나타났다.

C:B의 배합비 중 고로슬래그 미분말의 함량이 30% 증가할수록 Geltime은 약 50초 증가하는 경향을 나타내었으며, O:A의 배합비 중 아라미드 섬유의 함량이 0.5% 증가할수록 Geltime은 약 25초 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 시멘트 양이 감소함에 따라 수화반응과 포졸란 반응이 약해지는 결과로 Geltime이 증가한 것으로 나타났으며, 아라미드 섬유가 친수성으로 배합수를 흡수하여 Geltime을 감소시키는 것으로 판단된다.

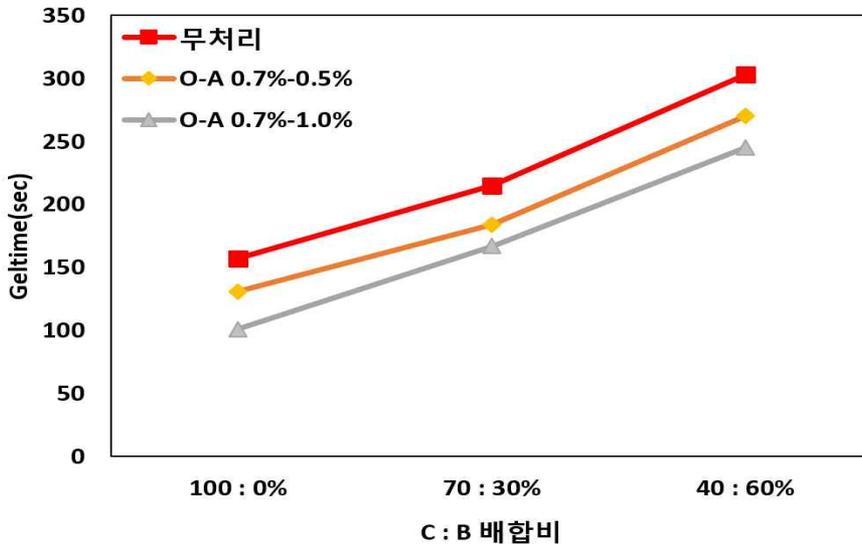


그림 4.1 표면유제처리 0.7%의 C:B 배합비에 따른 Geltime 측정결과

(2) 표면유제처리 1.2%의 Gelttime 분석

표면 유제처리를 1.2%일 경우 아라미드 섬유(0.0%, 0.5%, 1.0%) 비율에 따라 Gelttime을 분석하였다. 그림 4.2는 아라미드 첨가 비율을 “A”로 표기하였고, 표면유제 처리 비율을 “O”로 표기하였다.

C:B의 배합비가 100:0, 70:30, 40:60%일 때 무처리의 경우 3회 측정 후 평균 157, 215, 303초로 가장 늦은 Gelttime을 가지고 있으며, O:A가 1.2:0.5%일 때 145, 197, 279 초, O:A가 1.2:1.0% 일 때 126, 179, 256초로 나타났다.

C:B의 배합비 중 고로슬래그 미분말의 함량이 30% 증가할수록 Gelttime은 약 40초 증가하는 경향을 나타내었으며, O:A의 배합비 중 아라미드 섬유의 함량이 0.5% 증가할수록 Gelttime은 약 20초 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 시멘트 양이 감소함에 따라 수화반응과 포졸란 반응이 약해지는 결과로 Gelttime이 증가한 것으로 나타났으며, 아라미드 섬유가 친수성으로 배합수를 흡수하여 Gelttime을 감소시키는 것으로 판단된다.

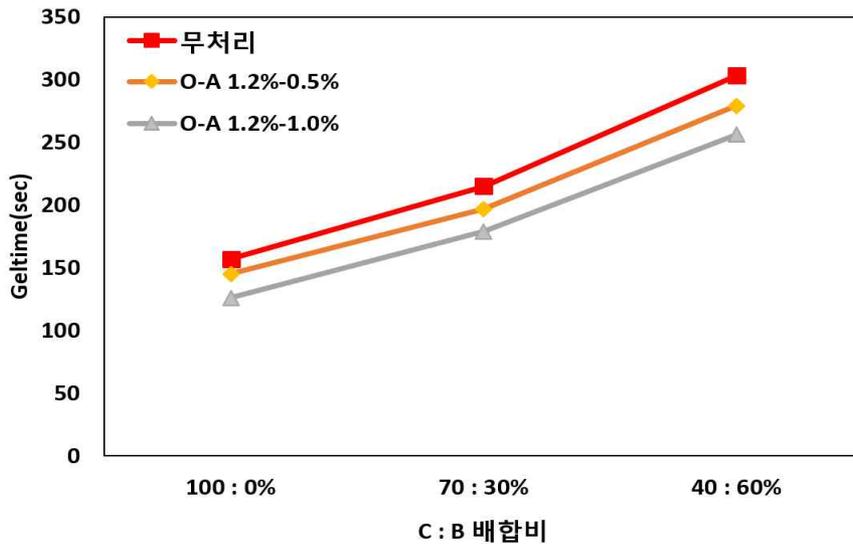


그림 4.2 표면유제처리 1.2%의 C:B 배합비에 따른 Gelttime 측정결과

4.1.2 아라미드 섬유에 따른 Gelttime 분석 그래프

(1) 아라미드 섬유 0.5% 첨가에 따른 Gelttime 분석

아라미드 섬유 0.5%일 경우 표면유제처리(0.0%, 0.7%, 1.2%) 비율에 따라 Gelttime을 분석하였다. 그림 4.3은 아라미드 첨가 비율을 “A”로 표기하였고, 표면유제처리 비율을 “O”로 표기하였다.

C:B의 배합비가 100:0, 70:30, 40:60%일 때 무처리의 경우 3회 측정 후 평균 157, 215, 303초로 가장 낮은 Gelttime을 가지고 있으며, O:A가 0.7:0.5%일 때 130, 184, 270초, O:A가 1.2:0.5% 일 때 145, 197, 279초로 나타났다.

O:A의 배합비 중 표면유제처리의 함량이 0.5% 증가할수록 Gelttime은 약 10~15초 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 아라미드 섬유 자체는 친수성으로 물을 흡수하는 특징을 가지는데 표면유제처리를 통하여 아라미드 섬유가 배합수를 흡수하는 양을 줄여 Gelttime이 증가하는 것으로 판단된다.

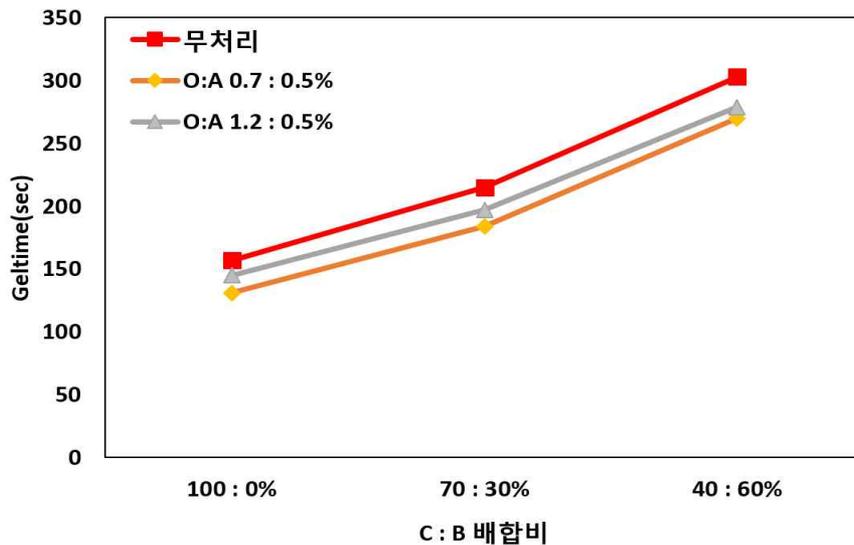


그림 4.3 아라미드 섬유 0.5%의 C:B 배합비에 따른 Gelttime 측정결과

(2) 아라미드 섬유 1.0% 첨가에 따른 Gelttime 분석

아라미드 섬유 1.0%일 경우 표면유제처리(0.0%, 0.7%, 1.2%) 비율에 따라 Gelttime을 분석하였다. 그림 4.4는 아라미드 첨가 비율을 “A”로 표기하였고, 표면유제처리 비율을 “O”로 표기하였다.

C:B의 배합비가 100:0, 70:30, 40:60%일 때 무처리의 경우 3회 측정 후 평균 157, 215, 303초로 가장 늦은 Gelttime을 가지고 있으며, O:A가 0.7:1.0%일 때 101, 167, 245 초, O:A가 1.2:1.0% 일 때 126, 179, 256초로 나타났다.

O:A의 배합비 중 표면유제처리의 함량이 0.5% 증가할수록 Gelttime은 약 20초 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 아라미드 섬유 0.5%와 마찬가지로 아라미드 섬유 자체는 친수성으로 물을 흡수하는 특징을 가지는데 표면유제처리를 통하여 아라미드 섬유가 배합수를 흡수하는 양을 줄여 Gelttime이 증가하는 것으로 판단된다.

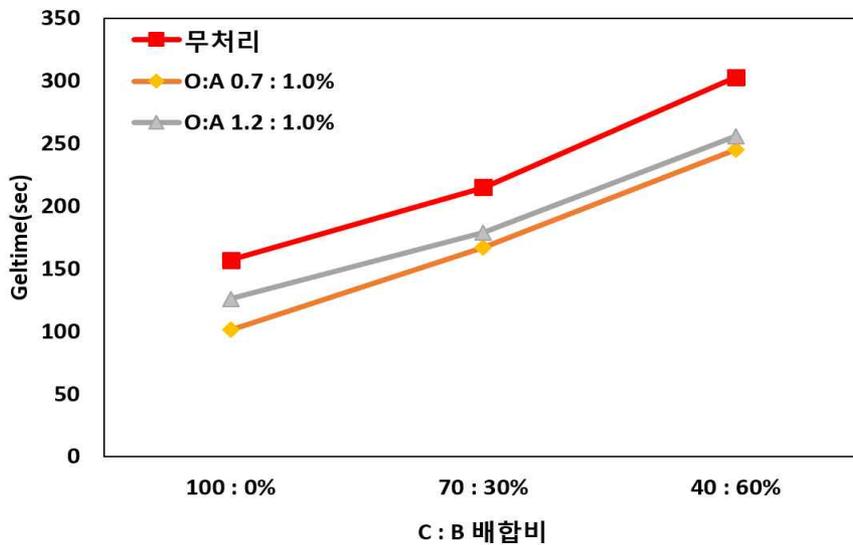


그림 4.4 아라미드 섬유 1.0%의 C:B 배합비에 따른 Gelttime 측정결과

4.1.3 Gelttime 종합분석 결과

표면유제처리 비율에 따른 아라미드 섬유 Gelttime 분석결과, 아라미드 섬유의 첨가량이 0.5% 증가할수록 Gelttime은 약 20~25초 감소하였다. 이는 아라미드 섬유 특성상 친수성으로 배합수를 흡수하여 섬유의 양이 증가할수록 Gelttime이 감소하는 것으로 나타났다.

또한, 아라미드 섬유의 배합비별 표면처리 비율에 따른 Gelttime은 각각의 배합비 표면유제처리 비율이 0.5% 증가할수록 약 10~20초 정도 Gelttime이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 아라미드 섬유가 친수성이나 표면에 유제처리가 되면서 섬유의 특성인 친수성 발휘 범위가 줄어들어 배합수에 흡수량이 감소한 결과 Gelttime이 증가되었을 것으로 판단된다.

C:B의 배합비에 따른 분석결과, 고로슬래그 미분말이 30% 증가될수록 Gelttime은 약 40~50초 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 시멘트 양이 감소함에 따라 수화반응과 포졸란 반응이 약해지는 결과로 Gelttime이 증가한 것으로 판단된다.

일반 LW 그라우팅 공법에서 Gelttime의 기준은 없으나, 초급결 Gelttime은 6~12초이며, 급결 Gelttime은 12~50초이고, 일반 Gelttime은 50~90초, 완결 Gelttime은 90~300초를 기준으로 보고 있다.

따라서 본 연구에서 Geltiem 시험을 수행한 결과, 시멘트를 줄이고 고로슬래그 미분말로 치환할 경우, Gelttime의 경우 급결보다는 완결에 가까운 Gelttime을 갖는다. 고로슬래그 미분말의 첨가는 Gelttime을 지연시킴으로 급결시 보다 완결시에 사용하는 것이 적정할 것으로 나타났으며, 이는 조기강도 발현에 부정적인 영향을 미치므로 조기강도 발현을 위해서는 혼화재인 석회(CaO), 실리카(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3), 산화철(Fe_2O_3)의 양을 증가시켜 목표(초급결, 급결 등)하는 Gelttime을 확보해야 할 것으로 판단된다.

표 4.1은 Gelttime 종합 분석 결과를 정리하였다.

표 4.1 Gelltime 종합분석 결과

구 분		C:B 100 : 0%	C:B 70 : 30%	C:B 40 : 60%
O:A	무처리	157초	215초	303초
	0.7 : 0.5%	131초	184초	270초
	0.7 : 1.0%	101초	167초	245초
	1.2 : 0.5%	145초	197초	279초
	1.2 : 1.0%	126초	179초	256초

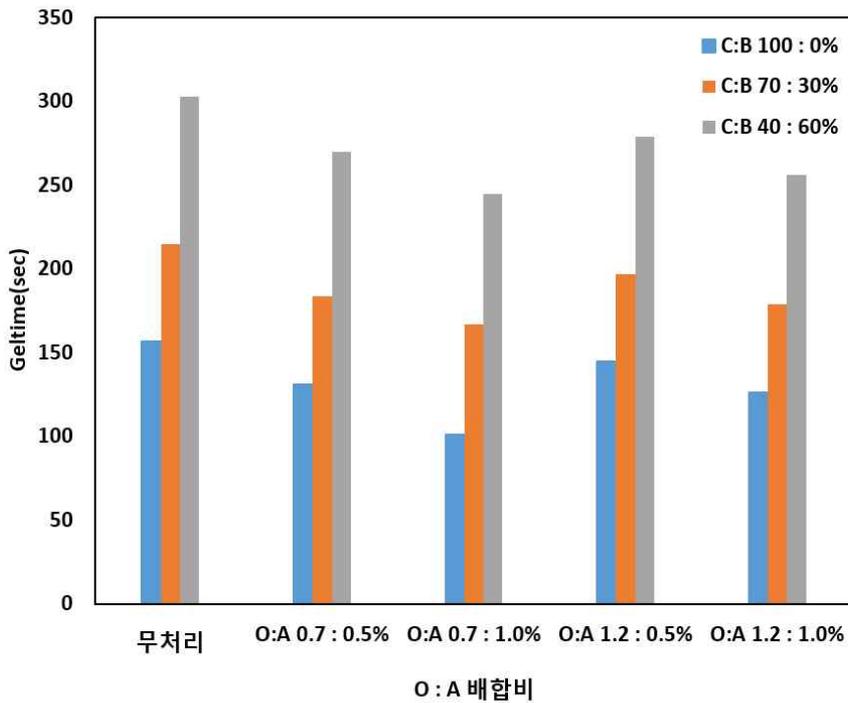


그림 4.5 C:B 배합비에 따른 Gelltime 측정결과

4.2 호모겔의 일축압축강도 분석

4.2.1 C:B 배합비에 따른 일축압축강도 시험결과

그림 4.6 (a)와 같이 무처리에서 C:B 100:0, 70:30, 40:60%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 C:B 100:0%의 경우 1.44MPa로 가장 높게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 0.45MPa로 가장 낮게 나타났다. 28일 강도에서는 C:B 100:0%의 경우 9.22MPa로 가장 낮게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 14.8MPa로 가장 높게 나타났다.

그림 4.6 (b)와 같이 O:A 0.7:0.5%에서 C:B 100:0, 70:30, 40:60%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 C:B 100:0%의 경우 1.51MPa로 가장 높게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 0.5MPa로 가장 낮게 나타났다. 28일 강도에서는 C:B 100:0%의 경우 12.31MPa로 가장 낮게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 16.75MPa로 가장 높게 나타났다.

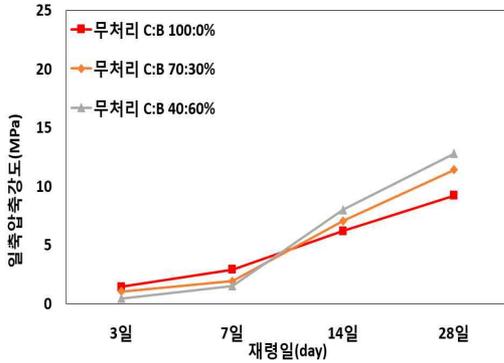
그림 4.6 (c)와 같이 O:A가 0.7:1.0%에서 C:B 100:0, 70:30, 40:60%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 C:B 100:0%의 경우 2.57MPa로 가장 높게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 0.74MPa로 가장 낮게 나타났다. 28일 강도에서는 C:B 100:0%의 경우 14.53MPa로 가장 낮게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 19.73MPa로 가장 높게 나타났다.

그림 4.6 (d)와 같이 O:A 1.2:0.5%에서 C:B 100:0, 70:30, 40:60%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 C:B가 100:0%의 경우 1.81MPa로 가장 높게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 0.67MPa로 가장 낮게 나타났다. 28일 강도에서는 C:B 100:0%의 경우 13.83MPa로 가장 낮게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 18.16MPa로 가장 높게 나타났다.

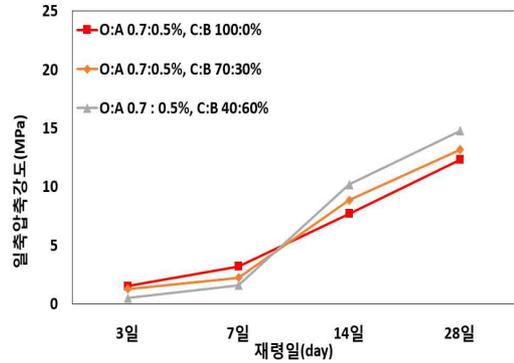
그림 4.6 (e)와 같이 O:A가 1.2:1.0%에서 C:B 100:0, 70:30, 40:60%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 C:B 100:0%의 경우 2.72MPa로 가장 높게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 0.81MPa로 가장 낮게 나타났다. 28일 강도에서는 C:B 100:0%의 경우 15.89MPa로 가장 낮게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 21.68MPa로 가장 높게 나타났다.

고로슬래그 미분말은 잠재수경성으로서 시멘트와 물을 교반한다고 하여 28일강도가

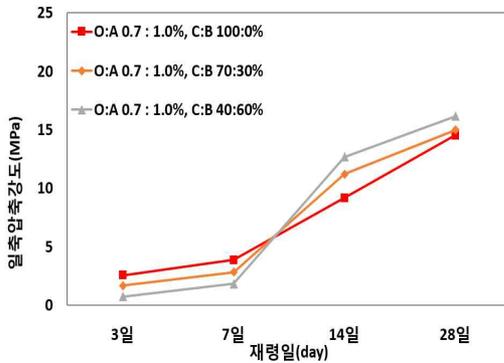
크게 증가하지 않는다. 따라서 고로슬래그 미분말의 표면을 둘러싸고 있는 박막을 수산화칼슘 이온으로 제거하여 장기 수화열을 높일 수 있었고 이로 인해 기존 선행연구와는 달리 고로슬래그 미분말의 함유량에 따라 장기강도를 증진시킬 수 있었다.



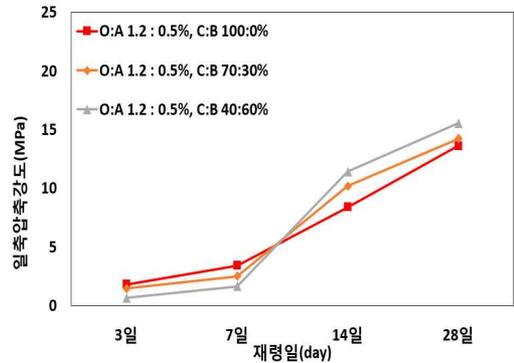
(a) 무처리



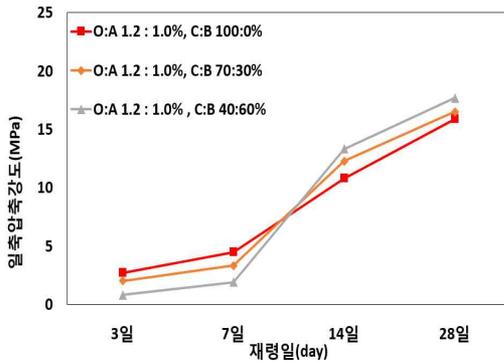
(b) O:A = 0.7:0.5



(c) O:A = 0.7:1.0



(d) O:A = 1.2:0.5



(e) O:A = 1.2:1.0

그림 4.6 C:B 배합비에 따른 일축압축강도 분석

4.2.2 O:A 배합비에 따른 일축압축강도 시험결과

그림 4.7 (a)와 같이 표면유제처리(0.7, 1.2%)와 아라미드 섬유(0.0, 0.5, 1.0%)일 때 시간경과에 따른 C:B 100:0%의 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 무처리에서 1.44MPa로 가장 낮게 나타났으며, O:A 1.2:1.0%일 때 2.72MPa로 가장 높게 나타났다. 28일 강도에서는 무처리에서 9.22MPa로 가장 낮게 나타났으며, O:A가 1.2:1.0%일 때 15.89MPa로 가장 높게 나타났다.

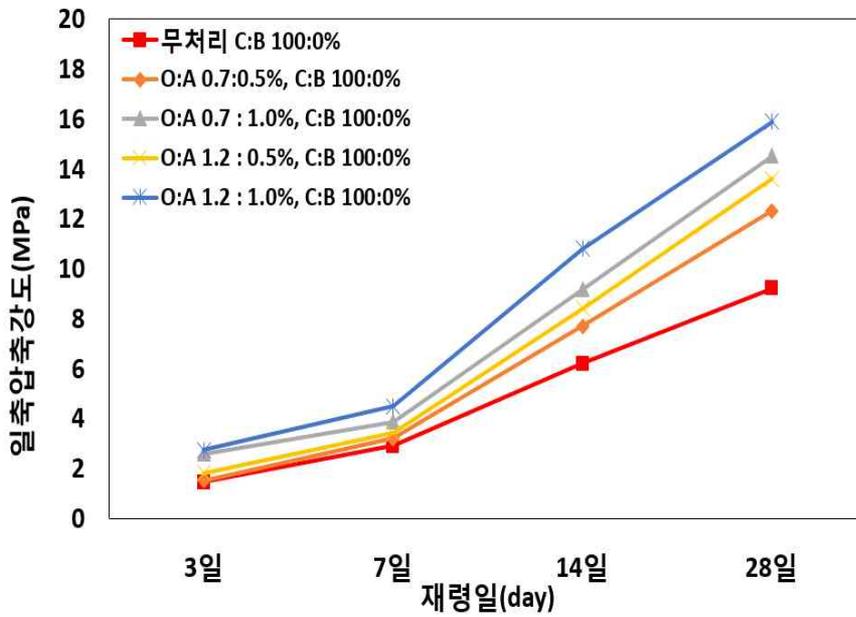
그림 4.7 (b)와 같이 표면유제처리(0.7, 1.2%)와 아라미드 섬유(0.0, 0.5, 1.0%)일 때 시간경과에 따른 C:B 70:30%의 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 무처리에서 1.04MPa로 가장 낮게 나타났으며, O:A가 1.2:1.0%일 때 2.03MPa로 가장 높게 나타났다. 28일 강도에서는 무처리에서 12.4MPa로 가장 낮게 나타났으며, O:A가 1.2:1.0%일 때 18.49MPa로 가장 높게 나타났다.

그림 4.7 (c)와 같이 표면유제처리(0.7, 1.2%)와 아라미드 섬유(0.0, 0.5, 1.0%)일 때 시간경과에 따른 C:B 40:60%의 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 무처리에서 0.45MPa로 가장 낮게 나타났으며, O:A가 1.2:1.0%일 때 0.81MPa로 가장 높게 나타났다. 28일 강도에서는 무처리에서 14.8MPa로 가장 낮게 나타났으며, O:A가 1.2:1.0%일 때 21.68MPa로 가장 높게 나타났다.

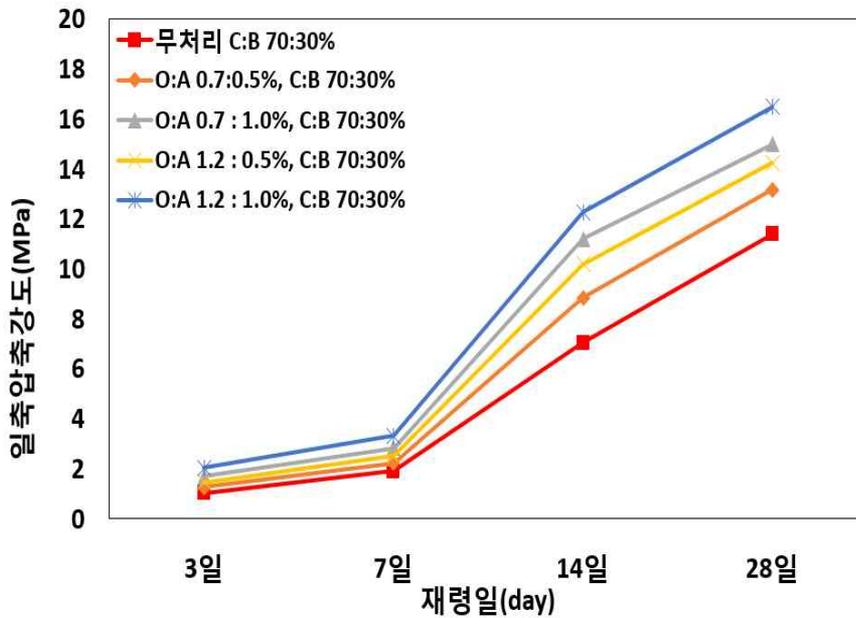
아라미드 섬유를 활용한 호모젤의 일축압축강도에 대한 선행연구는 양열호(2017)에서 진행하였으며, 아라미드 섬유의 양이 증가할수록, 표면유제처리 비율이 높아질수록 높은 일축압축강도를 확인한바 있다.

본 연구에서도 아라미드 섬유의 양이 0.5% 증가할수록 3, 7, 14, 28일 모두 일축압축강도가 높은 것으로 나타났는데 이는 시멘트와 섬유간의 부착성이 좋기 때문에 축하중에 의한 응력을 공시체 내부에서 저항하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 표면유제처리 비율이 0.5% 증가할수록 3, 7, 14, 28일 모두 일축압축강도가 높은 것으로 나타났는데 이는 표면유제처리를 통해서 아라미드 섬유의 분산능력이 높아져 섬유가 공시체에 골고루 배합됨에 따라 일축압축강도가 증가된 것으로 판단된다. 또한, 표 4.3과 같이 각 시료의 단위중량을 측정된 결과 고로슬래그 미분말이 높게 함유될수록 공시체의 단위중량이 증가됨을 확인하였다.

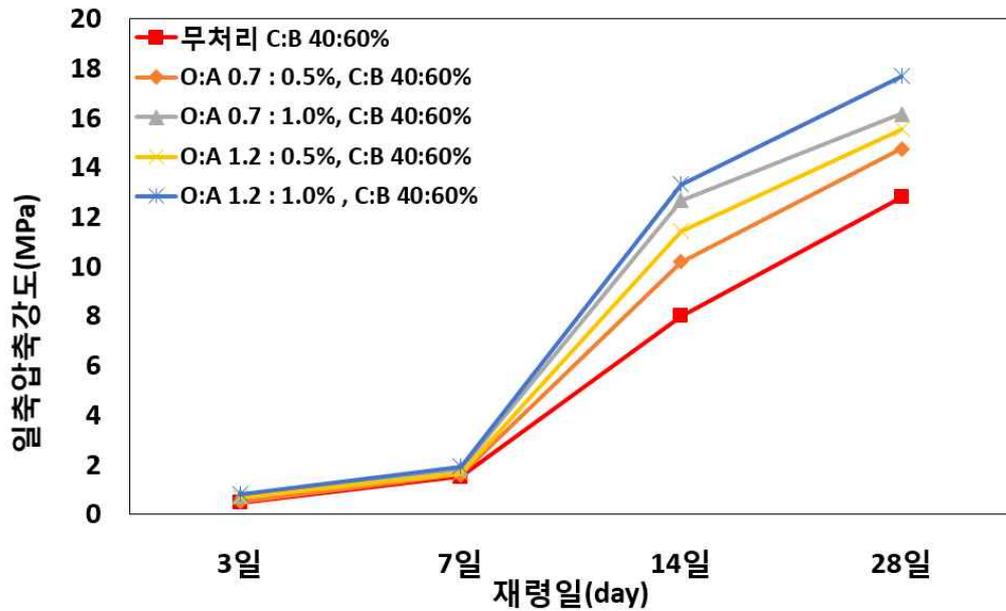
표 4.2는 호모젤의 일축압축강도 시험결과이다.



(a) C:B 100 : 0%



(b) C:B 70 : 30%



(c) C:B 40 : 60%

그림 4.7 O:A 배합비에 따른 일축압축강도 분석

표 4.2 호모겔의 일축압축강도시험 결과

구	분	일축압축강도(MPa)			
		3일	7일	14일	28일
O : A 무처리	C : B 100 : 0%	1.44	2.90	6.19	9.22
	70 : 30%	1.04	1.91	8.05	12.40
	40 : 60%	0.45	1.51	9.00	14.80
0.7 : 0.5%	100 : 0%	1.51	3.20	7.70	12.31
	70 : 30%	1.27	2.23	8.85	14.17
	40 : 60%	0.50	1.60	11.19	16.75
0.7 : 1.0%	100 : 0%	2.57	3.87	9.17	14.53
	70 : 30%	1.69	2.83	11.20	17.64
	40 : 60%	0.74	1.83	14.67	19.73
1.2 : 0.5%	100 : 0%	1.81	3.42	8.40	13.83
	70 : 30%	1.47	2.52	9.20	15.61
	40 : 60%	0.67	1.65	13.43	18.16
1.2 : 1.0%	100 : 0%	2.72	4.48	10.79	15.89
	70 : 30%	2.03	3.33	12.28	18.49
	40 : 60%	0.81	1.92	16.32	21.68

표 4.3 호모겔의 일축압축강도시험 공시체 단위중량

구	분	단위중량 $\gamma_t (g/cm^3)$			
		3일	7일	14일	28일
O : A	C : B	3일	7일	14일	28일
무처리	100 : 0%	1.24	1.26	1.22	1.22
	70 : 30%	1.26	1.27	1.23	1.24
	40 : 60%	1.27	1.29	1.24	1.25
0.7 : 0.5%	100 : 0%	1.23	1.24	1.23	1.23
	70 : 30%	1.25	1.26	1.24	1.23
	40 : 60%	1.28	1.28	1.30	1.24
0.7 : 1.0%	100 : 0%	1.24	1.24	1.23	1.22
	70 : 30%	1.24	1.25	1.23	1.24
	40 : 60%	1.26	1.31	1.25	1.24
1.2 : 0.5%	100 : 0%	1.25	1.25	1.18	1.24
	70 : 30%	1.26	1.26	1.23	1.25
	40 : 60%	1.27	1.28	1.24	1.26
1.2 : 1.0%	100 : 0%	1.23	1.22	1.22	1.24
	70 : 30%	1.26	1.23	1.24	1.26
	40 : 60%	1.27	1.31	1.26	1.32

4.3 샌드겔의 일축압축강도 분석

4.3.1 C:B 배합비에 따른 일축압축강도 시험결과

그림 4.8 (a)와 같이 무처리에서 C:B 100:0, 70:30, 40:60%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 C:B 100:0%의 경우 3.35MPa로 가장 낮게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 3.86MPa로 가장 높게 나타났다. 28일 강도에서도 C:B 100:0%의 경우 4.91MPa로 가장 낮게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 6.71MPa로 가장 높게 나타났다.

그림 4.8 (b)와 같이 O:A 0.7:0.5%에서 C:B 100:0, 70:30, 40:60%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 C:B 100:0%의 경우 3.63MPa로 가장 낮게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 4.66MPa로 가장 높게 나타났다. 28일 강도에서도 C:B 100:0%의 경우 5.14MPa로 가장 낮게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 7.22MPa로 가장 높게 나타났다.

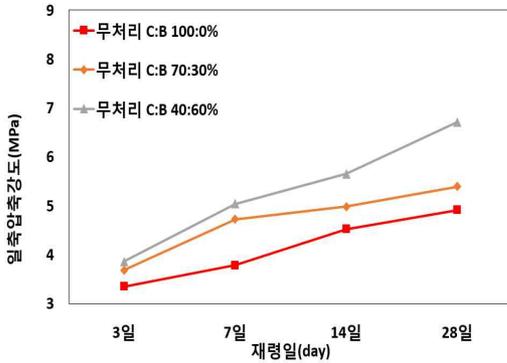
그림 4.8 (c)와 같이 O:A 0.7:1.0%에서 C:B 100:0, 70:30, 40:60%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 C:B 100:0%의 경우 4.26MPa로 가장 낮게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 5.5MPa로 가장 높게 나타났다. 28일 강도에서도 C:B 100:0%의 경우 5.84MPa로 가장 낮게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 7.43MPa로 가장 높게 나타났다.

그림 4.8 (d)와 같이 O:A 1.2:0.5%에서 C:B 100:0, 70:30, 40:60%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 C:B 100:0%의 경우 4.02MPa로 가장 낮게 나타났으며, C:B 40:60%일 때 5.1MPa로 가장 높게 나타났다. 28일 강도에서도 C:B 100:0%의 경우 5.74MPa로 가장 낮게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 7.26MPa로 가장 높게 나타났다.

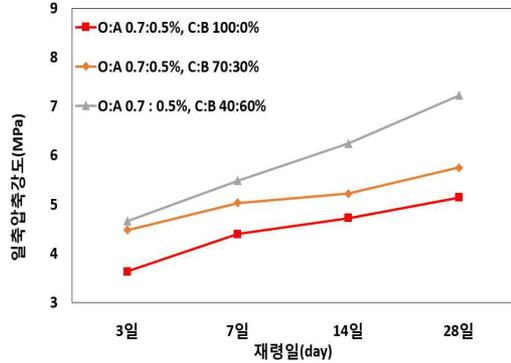
그림 4.8 (e)와 같이 O:A 1.2:1.0%에서 C:B 100:0, 70:30, 40:60%일 때 시간경과에 따른 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 C:B 100:0%의 경우 4.43MPa로 가장 낮게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 6.1MPa로 가장 높게 나타났다. 28일 강도에서도 C:B 100:0%의 경우 6.5MPa로 가장 낮게 나타났으며, C:B가 40:60%일 때 8.09MPa로 가장 높게 나타났다.

호모겔과 달리 3일강도가 C:B 100:0% 보다 40:60%에서 높게 나타났다. 이는 공시체

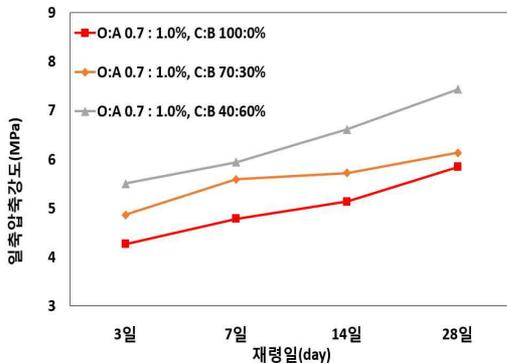
제작시 3층다짐으로 다짐을 하였고, 미립분의 고로슬래그 미분말이 흙의 입자사이를 채워 건조단위중량이 높아지고, 수화반응을 통해 굳어지면서 일축압축강도가 증가된 것으로 판단된다.



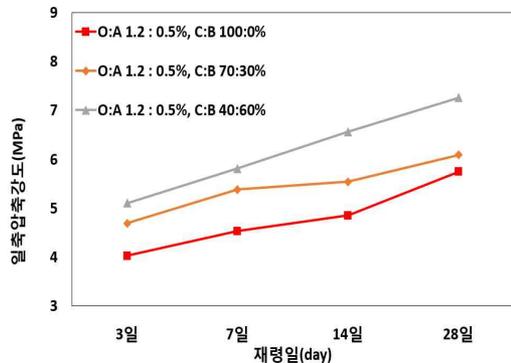
(a) 무처리



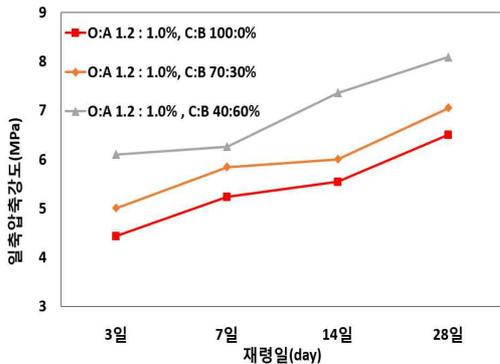
(b) O:A 0.7 : 0.5%



(c) O:A 0.7 : 1.0%



(d) O:A 1.2 : 0.5%



(e) O:A 1.2 : 1.0%

그림 4.8 C:B 배합비에 따른 일축압축강도 분석

4.3.2 O:A 배합비에 따른 일축압축강도 시험결과

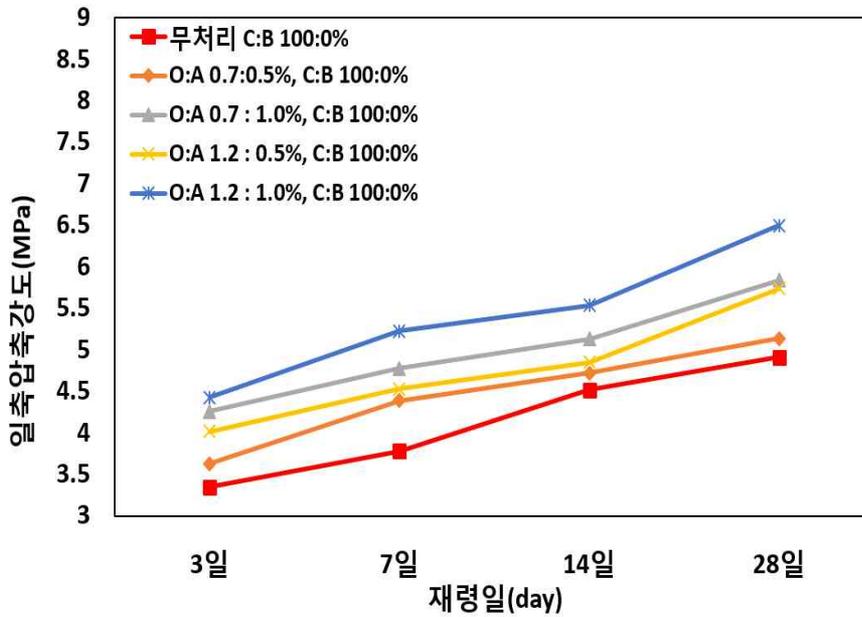
그림 4.9 (a)와 같이 표면유제처리(0.7, 1.2%)와 아라미드 섬유(0.0, 0.5, 1.0%)일 때 시간경과에 따른 C:B 100:0%의 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 무처리에서 3.35MPa로 가장 낮게 나타났으며, O:A가 1.2:1.0%일 때 4.43MPa로 가장 높게 나타났다. 28일 강도에서는 무처리에서 4.91MPa로 가장 낮게 나타났으며, O:A가 1.2:1.0%일 때 6.5MPa로 가장 높게 나타났다.

그림 4.9 (b)와 같이 표면유제처리(0.7, 1.2%)와 아라미드 섬유(0.0, 0.5, 1.0%)일 때 시간경과에 따른 C:B 70:30%의 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 무처리에서 3.68MPa로 가장 낮게 나타났으며, O:A 1.2:1.0%일 때 5.0MPa로 가장 높게 나타났다. 28일 강도에서는 무처리에서 5.39MPa로 가장 낮게 나타났으며, O:A가 1.2:1.0%일 때 7.05MPa로 가장 높게 나타났다.

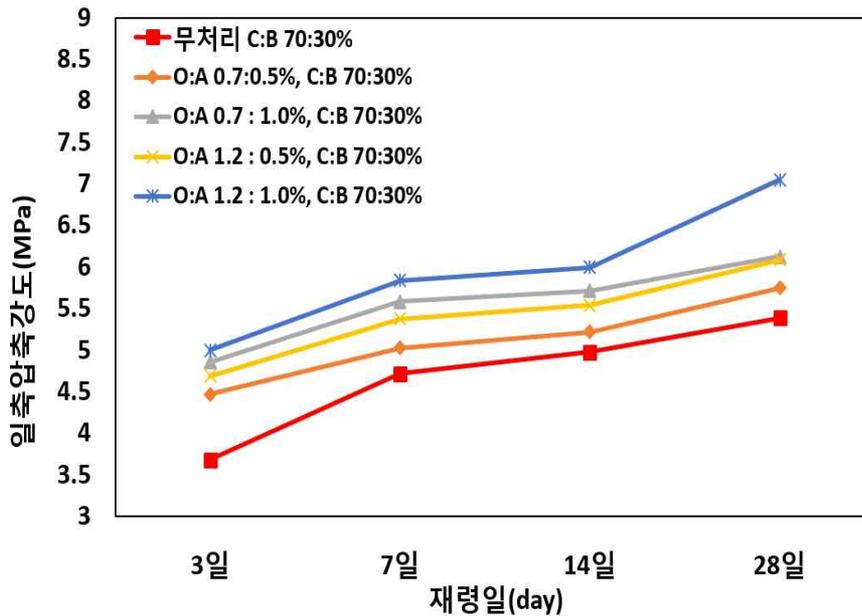
그림 4.9 (c)와 같이 표면유제처리(0.7, 1.2%)와 아라미드 섬유(0.0, 0.5, 1.0%)일 때 시간경과에 따른 C:B 40:60%의 일축압축강도 분석결과, 3일 강도에서는 무처리에서 3.86MPa로 가장 낮게 나타났으며, O:A가 1.2:1.0%일 때 6.1MPa로 가장 높게 나타났다. 28일 강도에서는 무처리에서 6.71MPa로 가장 낮게 나타났으며, O:A가 1.2:1.0%일 때 8.09MPa로 가장 높게 나타났다.

아라미드 섬유의 양이 0.5% 증가할수록 3, 7, 14, 28일 모두 일축압축강도가 높은 것으로 나타났는데 이는 공시체의 흡과 섬유간의 부착성이 좋기 때문에 축하중에 의한 응력을 공시체 내부에서 저항하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 표면유제처리 비율이 0.5% 증가할수록 3, 7, 14, 28일 모두 일축압축강도가 높은 것으로 나타났는데 이는 표면유제처리를 통해서 아라미드 섬유의 분산능력이 높아져 섬유가 공시체에 골고루 배합됨에 따라 일축압축강도가 증가된 것으로 판단된다. 또한, 표 4.5와 같이 각 시료의 단위중량을 측정된 결과, 고로슬래그 미분말이 높게 함유될수록 공시체의 단위중량이 증가됨을 확인하였다.

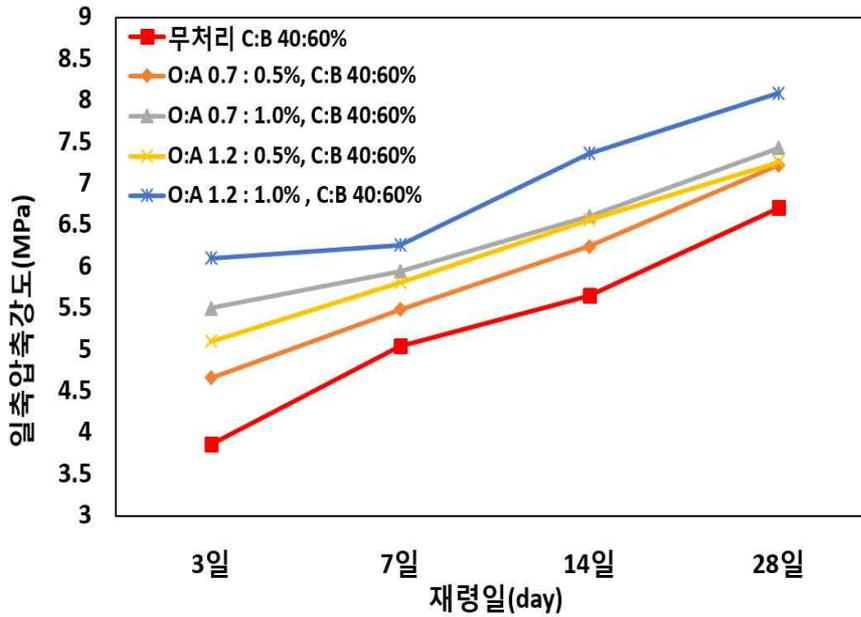
표 4.4는 샌드겔의 일축압축강도 시험결과이다.



(a) C:B 100 : 0%



(b) C:B 70 : 30%



(c) C:B 40 : 60%

그림 4.9 O:A 배합비에 따른 일축압축강도 분석

표 4.4 샌드겔의 일축압축강도시험 결과

구 분		일축압축강도(MPa)			
O : A	C : B	3일	7일	14일	28일
무처리	100 : 0%	3.35	3.78	4.52	4.91
	70 : 30%	3.68	4.72	4.98	5.39
	40 : 60%	3.86	5.04	5.65	6.71
0.7 : 0.5%	100 : 0%	3.63	4.39	4.72	5.14
	70 : 30%	4.47	5.03	5.22	5.75
	40 : 60%	4.66	5.48	6.24	7.22
0.7 : 1.0%	100 : 0%	4.26	4.78	5.13	5.84
	70 : 30%	4.86	5.59	5.72	6.13
	40 : 60%	5.50	5.94	6.61	7.43
1.2 : 0.5%	100 : 0%	4.02	4.53	4.85	5.74
	70 : 30%	4.69	5.38	5.54	6.09
	40 : 60%	5.10	5.81	6.56	7.26
1.2 : 1.0%	100 : 0%	4.43	5.23	5.54	6.50
	70 : 30%	5.00	5.84	6.00	7.05
	40 : 60%	6.10	6.26	7.36	8.09

표 4.5 샌드겔의 일축압축강도시험 공시체 단위중량

구 분		단위중량 $\gamma_t (g/cm^3)$			
O : A	C : B	3일	7일	14일	28일
무처리	100 : 0%	2.04	2.05	2.04	1.76
	70 : 30%	2.06	2.06	2.10	1.82
	40 : 60%	2.06	2.10	2.12	1.84
0.7 : 0.5%	100 : 0%	2.05	2.05	2.04	2.05
	70 : 30%	2.06	2.06	2.08	2.11
	40 : 60%	2.07	2.08	2.08	2.11
0.7 : 1.0%	100 : 0%	2.16	2.03	1.99	2.02
	70 : 30%	2.17	2.07	2.03	2.02
	40 : 60%	2.20	2.15	2.05	2.04
1.2 : 0.5%	100 : 0%	2.06	2.06	2.05	1.88
	70 : 30%	2.07	2.08	2.06	2.05
	40 : 60%	2.10	2.09	2.09	2.06
1.2 : 1.0%	100 : 0%	2.06	2.07	2.04	2.01
	70 : 30%	2.07	2.08	2.07	2.04
	40 : 60%	2.09	2.08	2.11	2.06

4.3.3 재령에 따른 일축압축강도의 통계분석

샌드궤의 재령일에 따른 종합결론을 도출하기 위해서 다중회귀분석을 사용하였다.

다중회귀분석이란 종속변수(y , 일축압축강도)의 다수의 독립변수(X_1 = 아라미드 섬유, X_2 = 시멘트, X_3 = 고로슬래그 미분말)가 서로 인과관계를 가질 때 독립변수가 변화함에 따라 종속변수에 미치는 영향을 규명하는 통계기법이다. 본 연구에서 사용된 재료인 물과 흙 시료는 모든 공시체에서 동일한 조건이기 때문에 독립변수에서 제외하였다.

결과분석에는 P값(가설의 유의성)과 t값(변수들의 영향성)을 이용하는 방법이 있는데 P값의 경우 독립변수의 값이 0.05보다 적으면 유의하다. 일반적으로 간편성 때문에 P값을 많이 이용하나, 정확한 분석을 위해서는 t값을 이용하는 것이 올바른 방법이다. t값을 검증할 때에는 95%의 신뢰도를 가정하여 유의수준을 5%로 본다. 이와 같은 가설을 검증하는 것은 곧 양측검정을 의미하기 때문에 대개 t값의 절대치가 2보다 작으면 독립변수는 종속변수에 미치는 영향이 미미하다(송기준 등 2013).

재령 3일에 따른 공시체의 다중회귀분석 결과, r^2 는 0.98로 다수의 독립변수 값이 종속변수의 변동량에 99.8%의 높은 정확도를 나타내며, 추정된 회귀계수는 X_1 , X_2 , X_3 의 P값이 0.05보다 작으므로 통계적으로 유의한 모형이다. 또한, t값의 절댓값이 X_1 , X_2 , X_3 모두 2보다 크기 때문에 각각의 독립변수가 종속변수에 영향을 나타냄을 확인하였다. 재령에 3일에 따른 회귀분석결과는 표 4.6과 같고 표를 통하여 식 (4.1)의 회귀식을 얻었다.

표 4.6 재령 3일에 따른 회귀분석 결과

항 목 \ 통 계	계 수	표준오차	t값	P값
아라미드 섬유(A) (g)	1.243	0.166	7.507	7.16×10^{-6}
시멘트(C) (g)	0.028	0.001	20.235	1.22×10^{-10}
고로슬래그 미분말(B) (g)	0.045	0.002	21.326	6.58×10^{-11}

$$q_u = 1.243(A) + 0.028(C) + 0.045(B) \quad (4.1)$$

재령 3일에 따른 회귀분석 결과, 각각의 종속변수 중 아라미드 섬유, 시멘트, 고로슬래그 미분말의 계수는 1.243, 0.028, 0.045로 아라미드 섬유가 가장 큰 변수임을 확인하였다.

재령 28일에 따른 공시체의 다중회귀분석 결과, r^2 는 0.98로 다수의 독립변수 값이 종속변수의 변동량에 99.8%의 높은 정확도를 나타내며, 추정된 회귀계수는 X_1 , X_2 , X_3 의 P값이 0.05보다 작으므로 통계적으로 유의한 모형이다. 또한, t값의 절대값이 X_1 , X_2 , X_3 모두 2보다 크기 때문에 각각의 독립변수가 종속변수에 영향을 나타냄을 확인하였다. 재령에 28일에 따른 회귀분석결과는 표 4.7과 같고 표를 통하여 식 (4.2)의 회귀식을 얻었다.

표 4.7 재령 28일에 따른 회귀분석 결과

항 목	통 계	계수	표준오차	t값	P값
아라미드 섬유(A) (g)		1.086	0.263	4.133	0.001
시멘트(C) (g)		0.043	0.002	19.431	1.95×10^{-10}
고로슬래그 미분말(B) (g)		0.069	0.003	20.551	1.02×10^{-10}

$$q_u = 1.086(A) + 0.043(C) + 0.069(B) \quad (4.2)$$

재령 28일에 따른 회귀분석 결과, 각각의 종속변수 중 아라미드 섬유, 시멘트, 고로슬래그 미분말의 계수는 1.086, 0.043, 0.069로 아라미드 섬유가 가장 큰 변수임을 확인하였다.

아라미드의 섬유는 공시체 내에서 흡과 고화재, 섬유간의 부착성을 높이고 축하중에 대한 응력을 공시체 내에서 저항하기 때문에 아라미드 섬유 배합 공시체에서 일축압축 강도가 높게 나타나 적은 중량비로도 높은 계수 값이 나타났다.

4.4 투수시험 결과

4.4.1 투수시험 결과분석

투수시험은 식 (4.3)과 같다.

$$k = QL/AHt \quad (4.3)$$

여기서, Q : 통과량(cm^3), L : 시편의 길이(cm)

A : 공시체 면적(cm^2)

H : 수두차(cm), t : 측정시간(s)

식 (4.3)을 적용하여 표 4.8과 같이 투수시험 결과를 확인하였다.

표 4.8 투수시험 결과

시 료	통과량 (cm^3)	시편 길이 (cm)	공시체 면적 (cm^2)	수두차 (cm)	측정시간 (s)	투수계수 (cm/s)
C:B (100:0%)	13.17	15	176.6	19	600	9.8×10^{-5}
C:B (70:30%)	5.61	15	176.6	19	600	4.2×10^{-5}
C:B (40:60%)	2.32	15	176.6	19	600	1.7×10^{-5}

그림 4.10은 본 연구결과와 기존 개발공법에 대한 차수효과를 비교하였다.

박원춘 등(2004)과 이강호(2010)는 미세립 시멘트, 마이크로 시멘트를 이용한 투수시험을 시험한 결과 각각 $5.0 \times 10^{-5} cm/s$, $8.0 \times 10^{-5} cm/s$ 로 나타나 C:B가 70:30%와 경우와 유사한 경향을 나타내었다.

고로슬래그 미분말이 30% 증가할수록 약 2.0배 이상 투수계수가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 고로슬래그 미분말이 입자간의 사이를 채움으로서 차수효과를

나타내는 것으로 판단된다. 실제현장에서 그라우팅 차수를 평가할 때 특정한 기준은 없으나¹⁸⁾, 일반적으로 투수계수가 약 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 이하일 경우 차수가 되었다고 판단한다. 하지만 본 연구에서 사용한 그라우트의 경우 C:B가 40:60%일 때 최고 $1.7 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 로 현장차수 조건에 미달하는 것으로 나타났다. 따라서 현장에서 차수를 목적으로 할 경우, A액인 규산소다의 비율을 높여 초기 급결시간을 단축시키거나 추가적인 혼화재의 혼합비율을 높여야 할 것으로 판단된다.

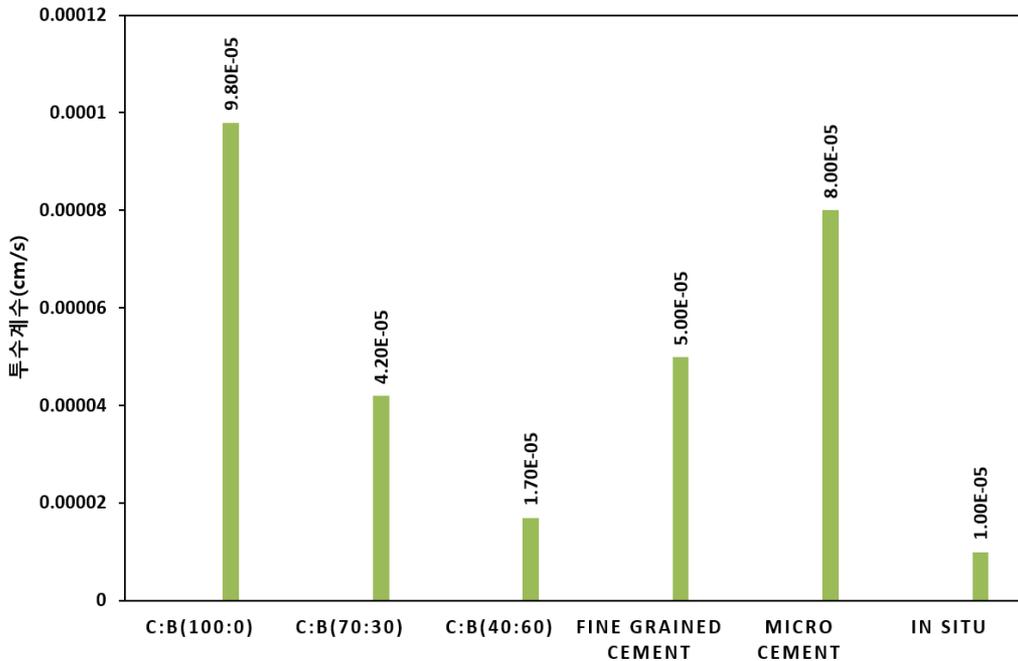


그림 4.10 차수 그라우트 재료에 따른 차수효과 분석

18) 현장마다 지반의 상태가 동일하지 않아 특정한 기준을 정하기에 어려움이 있다.

4.4.2 기존공법(LW공법)과의 그라우팅 특성 비교

본 연구에서 시험한 Geltime, 일축압축강도 등의 특성과 기존 공법인 LW공법과 데이터를 비교하였으며, 그 값은 표 4.9와 같다.

처리공정을 살펴보면, 기존공법(LW공법)의 경우 1액 1공정(1.0 Shot system)이지만 본 연구에서 사용된 차수 그라우트재의 경우 2액 1공정(1.5 Shot system)으로 지반 내의 공극을 보다 밀실하게 충전시킬 것으로 판단되며, 압축강도의 경우 LW공법에 비해 장기강도가 높고 Geltime은 시간 조절이 가능하나, 완결에 적합한 것으로 확인되었다.

하지만 차수효과의 경우 C:B가 40:60%에서 현장 차수요구치($1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$)에 미달하는 차수효과($1.7 \times 10^{-5} \text{cm/s}$)를 나타낸 것으로 조사되었다. 경제성은 기존공법(LW공법)이 다소 저렴한 편이나, 내구성에 취약점이 있으며, 본 연구의 경우 보통정도의 경제성과 아라미드 섬유 혼입으로 인한 일체 거동으로 강도가 증대될 것으로 판단된다.

표 4.9 기존공법(LW공법)과의 그라우팅 특성 비교

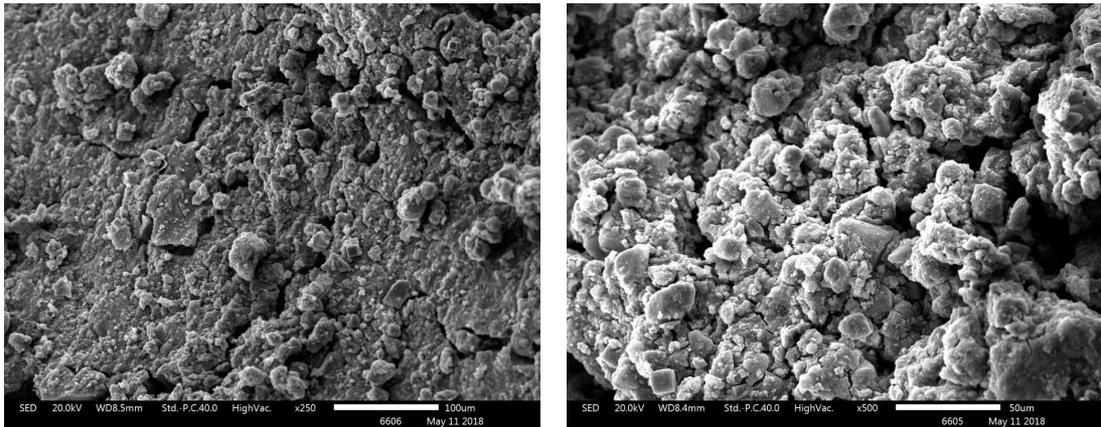
항 목	기존공법(LW공법)	차수 그라우트재
처리공정	1액 1공정(1.0 Shot system)	2액 1공정(1.5 Shot system)
압축강도	10 ~ 20Mpa	49 ~ 80Mpa
Geltime	120 ~ 180초(조절불가)	101 ~ 303초 (급결, 완결 조절가능)
차수효과	$1.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$	$1.7 \times 10^{-5} \text{cm/s}$
지반조건	모든 지반	모든 지반
경제성	저 렵	보 통

4.5 SEM 및 EDX 분석결과

4.5.1 SEM 분석결과

SEM 시험은 섬유 보강재 특성에 따라 그라우트재 내에서 아라미드 섬유와 시멘트, 고로슬래그 미분말의 결합에 대한 메커니즘을 파악하기 위한 시험으로 일축압축강도 측정 시 파괴된 재료 시편을 사용하였으며, C:B 100:0%의 섬유보강이 되지 않은 무처리 시료와 C:B 100:0%의 아라미드 섬유 1.0%배합된 시료를 전남대학교 공동실험실습실 표면분석실에 의뢰하여 실시하였다.

SEM 전자현미경으로 그림 4.11(a)는 C:B 100:0%의 섬유보강이 되지 않은 시료를 채취하여 250배율로 샘플시료를 사진촬영 하였고, 그림 4.11(b)는 채취된 샘플시료의 겉표면을 500배율로 확인하였다. 공시체의 표면에 여러 알갱이들이 쌓여 있는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 시멘트의 부스러기로 확인되었다.



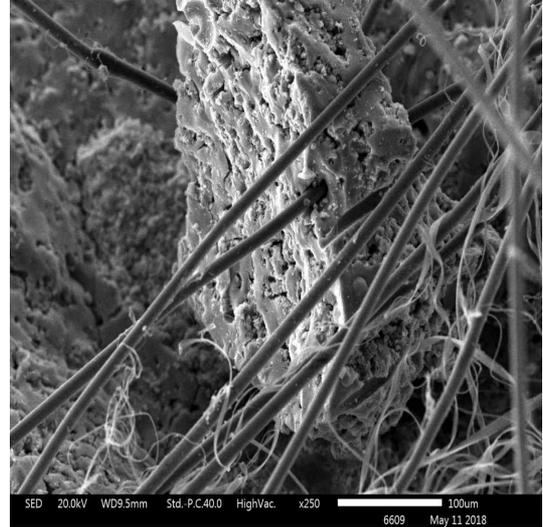
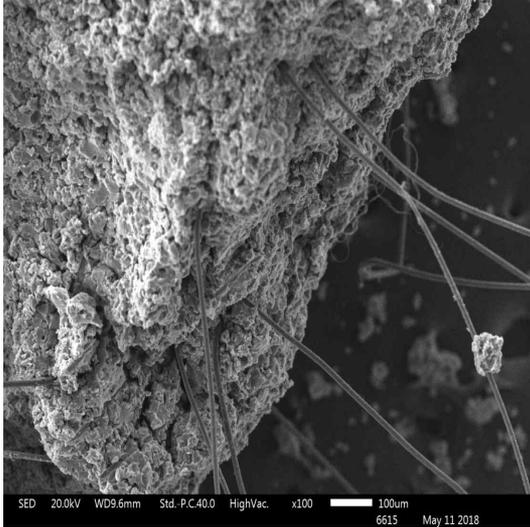
(a) 250배율

(b) 500배율

그림 4.11 무섬유 시료의 SEM 사진

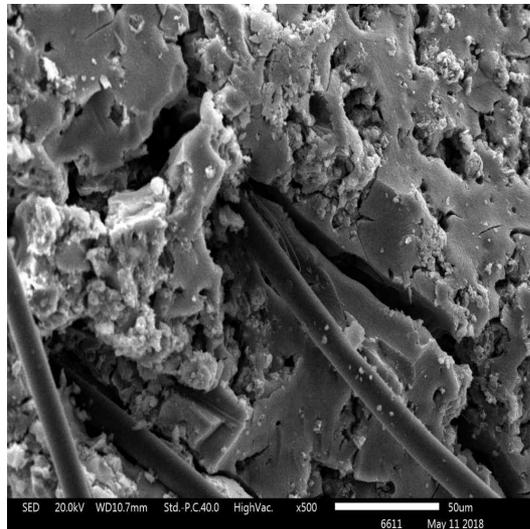
C:B 100:0%의 아라미드 섬유 1%가 포함된 채취 샘플시료를 SEM으로 분석한 결과 그림 4.12(a)와 (b), (c)는 채취된 샘플시료의 겉표면을 100배율, 250배율 및 500배율로 확인하였다. 그림 4.12에서 보는바와 같이 아라미드 섬유가 그라우트재에 결합되어 있는 형상으로 굳어진 공시체가 아라미드 섬유와 일체거동을 하므로 공시체의 전단파괴

시 공시체 내에서 섬유 인자들이 실철근과 같은 역할을 하여 전단파괴면에서 저항하는 역할을 하므로 압축강도가 증가되도록 영향을 미치게 된다. 철근콘크리트와 같이 섬유 보강으로 인해 내구성 증대가 이루어질 것으로 판단된다.



(a) 다량의 섬유로 보강된 시료(100배율)

(b) 다량의 섬유로 보강된 시료(250배율)



(c) 다량의 섬유로 보강된 시료(500배율)

그림 4.12 아라미드 섬유 시료의 SEM 사진

4.5.2 EDX 분석결과

본 연구를 통해 혼합된 시료의 일부를 채취하여 EDX 분석을 하였다.

시험결과는 일축압축강도 측정 후 파쇄된 시료에서 채취하여 EDX 분석을 수행하였고 채취위치에 따라 결과 값이 상이하므로 1개의 일축압축강도 시험 대상체에서 3개소에서 채취하여 평균값을 사용하였다.

EDX 분석 결과, 본 배합비의 주요 구성요소는 O(산소)와 C(탄소), Ca(칼슘), Si(규소)로 나타났다. 또한, 함유율 10% 미만 중에 Al(알루미늄), Mg(마그네슘), Na(나트륨) 등의 원소는 시멘트와 고로슬래그 미분말에서 나타나는 원소임을 확인하였다.

표 4.10 ~ 표 4.12에서 보는바와 같이 고로슬래그 미분말의 양이 증가함에 따라 Si 및 Ca가 증가한 것으로 나타났는데 이는 시멘트와 고로슬래그 미분말이 유사한 광물로 구성되어 있으므로 비표면적이 큰 고로슬래그 미분말 함유량이 증가함에 따라 Si 및 Ca가 증가한 것으로 판단된다.

표 4.10 C:B(100 : 0%)에 대한 EDX 분석 결과

시 료	그 래 프	함 유 원 소	
C:B (100:0)		광물	함유원소(%)
		O	45.26
		C	17.26
		Ca	14.37
		Si	13.40

표 4.11 C:B(70 : 30%)에 대한 EDX 분석 결과

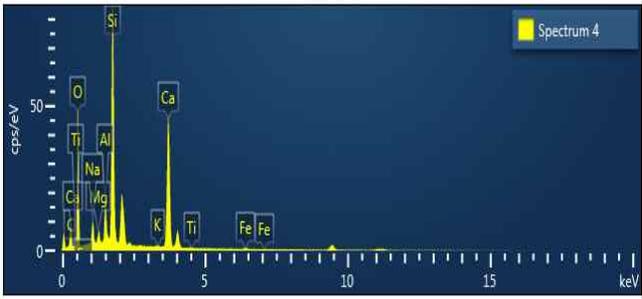
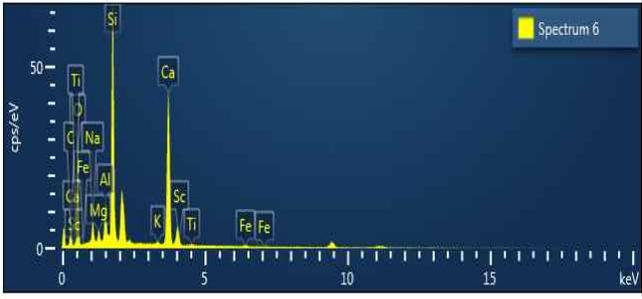
시 료	그 래 프	함 유 원 소	
		광물	함유원소(%)
C:B (70:30)		O	45.58
		Si	16.36
		Ca	16.10
		C	15.06

표 4.12 C:B(40 : 60%)에 대한 EDX 분석 결과

시 료	그 래 프	함 유 원 소	
		광물	함유원소(%)
C:B (40:60)		O	41.63
		Ca	19.89
		Si	17.27
		C	13.63

4.6 환경성평가 시험결과

4.6.1 용출시험 결과 분석

중금속 용출특성을 분석하고 평가하는 국내의 용출시험방법은 대부분 폐기물공정시험방법을 따르고 있다. 반면에 국외의 용출시험방법은 용출시료를 소정의 입도로 분쇄한 분말형태, 재활용 콘크리트 및 슬래그와 같은 골재형태 그리고 그라우트재 배합 후 제작하는 공시체 몰드를 용출시료로써 사용하는 용출시험방법 등이 있다.

국내에서는 용출시료와 용출용매의 비율인 액고비(LSR)는 보통 10을 사용하고 있으며, 용출시간이 짧은 6시간을 규정하고 있다.

중금속 용출 시험결과는 표 4.13과 같다.

중금속 용출시험 결과, C:B 100:0에서는 $0.467\text{mg}/\ell$ 로 C:B 40:60%에서는 $0.092\text{mg}/\ell$ 로 나타났다. 또한, 고로슬래그 미분말의 30% 증가함에 따라 약 50% 6가크롬이 감소하는 경향이 나타났는데 이는 포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 미분말의 수화반응을 통한 중금속 성분이 화학적인 결합으로 고정화되어 상대적으로 미미하게 용출되는 것으로 판단된다. 기존 LW공법의 경우 중금속 용출시험방법은 상이하나 오명현(2015)의 결과에 의하면 LW공법은 0.662로 나타나 기존 공법에 비해 중금속 용출이 낮은 것으로 확인되었다.

6가크롬의 중금속 용출함량은 유해물질 용출기준으로 폐기물 관리법에서 규정하고 있는 중금속 용출함량 기준 이하의 극소량으로 용출됨에 따라 환경유해성에 미치는 영향이 낮게 나타남을 확인하였다.

표 4.13 중금속 용출 시험결과

구 분	중금속 용출량(mg/ℓ)	비 고
	Cr^{6+}	
기 준	1.500	
C:B 100 : 0%	0.467	
C:B 70 : 30%	0.285	
C:B 40 : 60%	0.092	

4.6.2 pH시험 결과 분석

용출시료의 알칼리(pH) 용출특성 경향을 표 4.14와 그림 4.14와 같이 나타내었다.

C:B 100:0%에서의 pH 용출시험 결과, 48시간 후 10.38로 나타났으며, C:B 70:30%에서는 10.89, C:B 40:60%에서는 11.31로 고로슬래그 미분말 30%가 증가할수록 pH는 0.5씩 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 고로슬래그 미분말의 입경이 작아 비표면적이 커짐에 따라 용출되는 pH가 증가되었을 것으로 판단되며, 추후 환경적인 부분을 고려하여 가소화제¹⁹⁾를 사용함으로써 차수 그라우트재의 수중불분리²⁰⁾를 통해 pH 상승 억제 및 중금속 용탈을 감소시켜야 할 것으로 판단된다.

표 4.14 pH 용출 시험결과

구 분	0h	0.5h	1h	3h	6h	12h	24h	48h
C:B 100:0%	9.50	9.57	9.68	9.76	9.84	9.90	10.26	10.38
C:B 70:30%	10.20	10.30	10.39	10.44	10.49	10.57	10.85	10.99
C:B 40:60%	10.69	10.73	10.78	10.82	10.89	10.94	11.16	11.31

19) 플라스틱, 페인트, 광택제, 접착제 등을 매끄럽게 하거나 연성을 높이기 위해 사용하는 물질로 다이소노닐 프탈레이트(Diisononyl Phthalate, DINP)와 다이소데실 프탈레이트(Diisodecyl Phthalate, DIDP)가 대표적인 가소화제이다.

20) 수중에서 재료의 분리를 방지하는 것

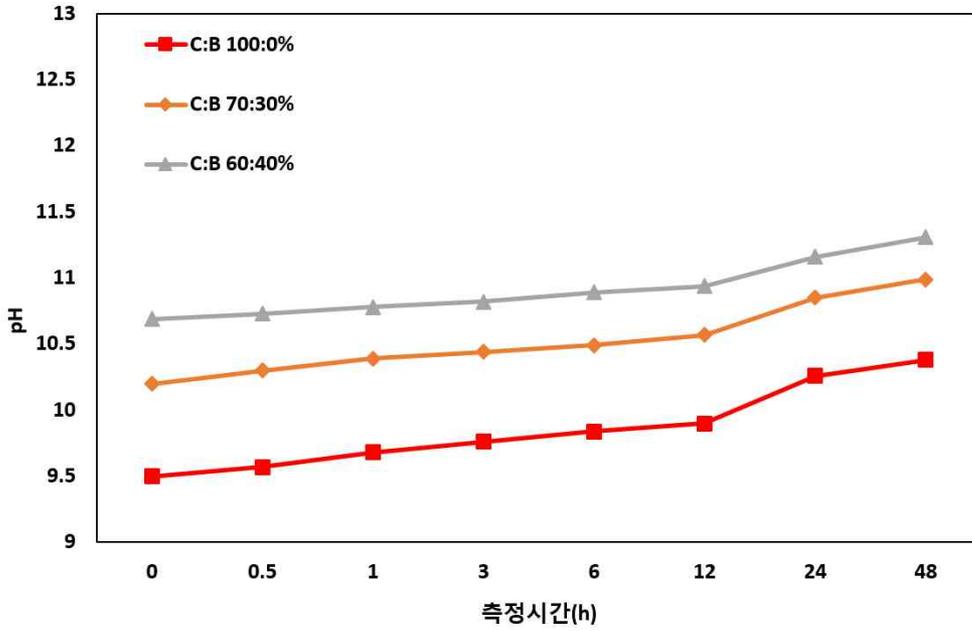


그림 4.13 pH 용출 시험결과

제 5 장 결 론

본 연구에서는 재활용 자원인 섬유 파쇄체의 아라미드 섬유 및 고로슬래그 미분말, 시멘트 혼합으로 우수한 압축강도, 차수성을 지닌 차수 그라우트재를 개발하고자 하였다. 상기 배합재료의 배합비를 통해 그라우트재의 Geltime 시험과 내구성 확인을 위한 호모겔, 샌드겔 일축압축강도(3, 7, 14, 28일) 시험을 수행하였으며, 배합비에 따른 투수 시험을 수행하였고, 배합재료에 따른 SEM 및 EDX 분석, 환경성평가를 수행하여 개발하고자 하는 그라우트재의 역학적인 기초 성능을 평가하고 검증하였다. 이상의 연구 내용을 통한 결론은 다음과 같다.

1. Geltime 측정결과, 아라미드 섬유가 0.5% 증가할수록 Geltime은 약 20~25초 감소하였고, 표면유제처리 비율이 0.5% 증가할수록 Geltime은 약 10~20초 증가하였다. 또한, 고로슬래그 미분말이 30% 증가할수록 Geltime은 약 40~50초 증가하였다. 이는 시멘트 양이 감소함에 따라 수화반응과 포졸란 반응이 약해지는 결과로 Geltime이 증가하는 경향이 나타났으며, 친수성인 아라미드 섬유의 양이 증가할수록 배합수를 흡수하여 Geltime이 감소하는 것으로 나타났다.
2. 호모겔 일축압축강도를 측정한 결과, 3일 강도에서는 C:B 100:0%에서 가장 높게 나타났으며, 28일 강도에서는 C:B 40:60%에서 가장 높게 나타났다. 이는 고로슬래그 미분말이 잠재수경성으로서 초기강도 보다는 장기강도에 더욱 효과적인 것을 알 수 있다. 또한, 아라미드 섬유 1% 첨가 시 일축압축강도는 약 1.5배 정도 증가되었는데, 이는 아라미드 섬유가 그라우트재내에서 보강재 역할을 하여 내구성이 증가된 것으로 판단된다.
3. 샌드겔 일축압축강도를 측정한 결과, 호모겔과는 달리 3일강도, 28일강도 모두 C:B 40:60%에서 가장 높게 나타났다. 이는 공시체 제작 시 3층 다짐과 미립분의 고로슬래그 미분말이 흙의 입자사이를 채워 단위중량이 높아져 강도가 증진된 것으로 판단된다. 또한, 아라미드 섬유 1% 첨가 시 일축압축강도는 약 1.3배 정도 강도가 증가하여 아라미드 섬유가 샌드겔 내에서도 보강재 역할을 하여 내구성이 증가된 것임을 알 수 있다.

4. 투수시험결과, 고로슬래그 미분말이 30% 증가할수록 약 2.0배 이상의 투수계수가 감소하는 것을 확인 할 수 있었는데, 이는 고로슬래그 미분말이 흙 입자사이에 침투되어 차수효과가 높게 나타난 것으로 판단된다. 하지만 시험에서는 모든 시험체에서 현장차수의 조건인 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 를 만족하지 못하여, 향후 급결제인 규산소다 3호의 배합비율을 변경하는 등의 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.
5. SEM 분석결과, 아라미드 섬유가 그라우트재내에서 일체거동을 하므로 내구성증진 및 강도증가가 충분히 이루어진 것으로 확인되었다. 또한, EDX 분석결과, 고로슬래그 양이 증가할수록 Si 및 Ca가 증가하였는데, 이는 비표면적이 큰 고로슬래그 미분말의 양이 증가하여 나타는 결과로 확인되었다.
6. 환경성 평가를 위한 용출 시험결과, 6가크롬은 고로슬래그 미분말이 30% 증가할수록 중금속 용출은 약 50% 감소하였다. 이는 시멘트와 고로슬래그 미분말의 수화반응을 통한 중금속 성분이 화학적 결합으로 고정된 것으로 판단된다. 또한, pH 용출 시험결과, 고로슬래그 미분말이 30% 증가할수록 pH는 약 0.5 증가하는 경향을 나타냈는데 이는 고로슬래그 미분말의 입경이 작아 비표면적이 커짐에 따라 용출되는 pH가 높아진 것으로 판단된다. 향후 현장여건에 따른 수중불분리재를 사용함에 있어 pH에 대한 환경성은 보완이 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(2003), 마이크로시멘트 현장제조 및 시리간 시공모니터링을 이용한 최적 그라우팅 시스템 개발연구, 한국건설기술연구원 보고서
2. 권지연(2012), 실내실험을 통한 알칼리성 실리카졸-시멘트 주입재의 공학적 특성에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교
3. 권혁두(2008), 지반보강 및 차수그라우팅재로서의 Bottom Ash 활용에 관한 연구, 박사학위논문, 한양대학교
4. 김무한, 김규용, 조봉석, 나철성, 김영덕(2007), “고로슬래그 미분말을 대량 활용한 콘크리트의 공학적 특성 및 내구성특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집, 제 23권, 제 3호, pp.61~68.
5. 김시환(2008), 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 고성능콘크리트의 내구특성에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 한밭대학교
6. 김영희, 한천구, 이향재(2013), “고로슬래그 미분말과 천연잔골재를 사용하는 모르타르의 강도증진에 미치는 OPC 및 순환잔골재 치환율의 영향”, 대한건축학회 논문집, 제 29권, 제 3호, pp.81~88.
7. 김준호, 한민철, 한천구(2014), “고로슬래그 미분말과 알칼리 자극재로서 순환골재를 사용하는 콘크리트의 강도발현 특성”, 한국건설순환자원학회논문집, 제 2권, 제 2호, pp. 107-114.
8. 김진춘(1999), 지반개량용 초미립자시멘트의 주입특성에 관한 연구, 박사학위논문, 한양대학교, pp.6~32.
9. 김호철(2017), 고로슬래그 및 탄소섬유가 함유된 차수 그라우트제 개발에 관한 연구, 박사학위논문, 조선대학교
10. 류금성, 고경택, 이장화(2013), “플라이애시와 고로슬래그 미분말을 혼합 사용한 지오폐리머 모르타르의 강도발현 및 내구성”, 한국건설순환자원학회논문집, 제 6권, pp.35~41.
11. 민경산, 이승현(2007), “알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 내황산성”, 한국세라믹학회논문집, 제 44권, 제 11호, pp.633~638.
12. 박경호(2015), 친환경 바이오그라우팅공법에 대한 모래지반에서의 적용성 평가, 박사학위논문, 조선대학교

13. 박선규, 권성준, 김윤미, 이상수(2013), “고로슬래그 미분말을 사용한 무시멘트 경화체의 반응 특성”, 한국콘텐츠학회논문지, 제 13권, 제 9호, pp.392~399.
14. 박성식, 최선규(2013), “고로슬래그와 알칼리 활성화제를 이용한 모래 고결 및 초기 강도에 관한 연구”, 한국지반공학회논문집, 제 29권, 제 4호, pp.45~56.
15. 박영복(2017), 슬래그를 활용한 무시멘트 그라우트의 물리화학적 특성, 석사학위논문, 명지대학교
16. 송기준, 최은희, 한수연(2013), 엑셀 2010을 이용한 쉬운 통계학, 진샘미디어
17. 양열호(2017), 아라미드를 활용한 그라우팅공법 보강효과 평가, 석사학위논문, 조선대학교
18. 양형철, 김건호, 김보석, 김승희, 김영섭, 김창근, 김호열, 류연길, 엄귀만, 유일형, 이상열, 이오형, 정지현, 한산용(2012), 그라우팅환경공학, 구미서관
19. 오명현(2015), 알칼리 활성화 슬래그 기반 그라우트재의 성능에 관한 연구, 석사학위논문, 전남대학교
20. 이강호(2013), 슬래그 시멘트를 이용한 터널보강용 주입재에 관한 연구, 박사학위논문, 배재대학교
21. 이동윤(2017), 고로슬래그 미분말 다량치환 모르타르의 탈황석고 정제방법 및 치환율 변화에 의한 품질향상, 박사학위논문, 청주대학교
22. 이방연(2012), “그라우팅에 적합한 점성을 갖는 변형률 경화 시멘트 복합재료”, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 제 16권, 제 1호, pp.153~162.
23. 이재현, 김용로, 김규용, 윤성진, 문경주(2016), “무시멘트 결합재를 사용한 지반 그라우팅용 약액주입재의 특성”, 한국건축시공학회논문집, 제 16권, 제 1호, pp.45~52.
24. 이현진, 이석진, 배수호, 권순오, 이광명, 정상화(2016), “알칼리 활성화 슬래그 기반 무시멘트 콘크리트의 장기 내구성 평가”, 한국건설순환자원학회논문집, 제 4권, 제 2호, pp.149~156.
25. 이현호(2016), “고로슬래그 미분말과 순환굵은골재를 사용한 콘크리트의 재료 성능 평가”, 대한건축학회학술발표대회 논문집, pp.1523~1524.
26. 임춘호(2016), 바이오그라우팅공법의 주입재 배합비에 따른 적용성, 박사학위논문, 조선대학교
27. 장현오, 지남용(2013), “고로슬래그 미분말을 혼입한 보통강도 고유동 콘크리트 배합에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집, 제 29권, 제 6호, pp. 81~88.

28. 정지용, 장승엽, 최영철, 정상화, 김성일(2015), “고강도 고로슬래그 혼합 시멘트 페이스트의 수화 및 포졸란 반응에 미치는 고로슬래그 미분말의 치환률과 분말도의 영향”, 콘크리트학회논문집, 제 27권, 제 2호, pp.115~125.
29. 조성광(2013), “고로슬래그 미분말 사용율을 높인 콘크리트의 시공성 및 공학적 특성에 관한 실험적 연구”, 융복합지식학회논문지, 제 1권, 제 1호, pp.43~50.
30. 최민형(2005), 강섬유 보강 그라우팅을 사용한 Soil Nailing 공법의 보강효과 연구, 석사학위논문, 단국대학교
31. 천병식(1998), 최신 지반주입 : 이론과 실제, 구미서관
32. 천병식, 김진춘(1998), “어독성시험에 의한 지반주입재의 공해성 평가”, 대한토목학회 논문집, 제 18권, 제 4호, pp.531~538.
33. 천병식, 정종주, 오민열(1994), “동수지반에서 주입된 물유리계 약액의 내구성에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.685~688.
34. 최선규(2013), 고로슬래그 및 Calcite 침전을 이용한 모래의 친환경적인 고결방법 개발, 박사학위논문, 경북대학교
35. 하기주, 이동렬, 하재훈(2013), “순환골재와 고로슬래그 미분말을 치환한 강섬유 보강 RC보의 구조성능 평가”, 콘크리트학회 논문집, 제 25권, 제 5호, pp.477~484.
36. 한국양회공업협회(2010), 시멘트에 대한 오해와 진실, Korea Cement Industrial Association Report
37. 한국지반공학회(2005), 지반공학시리즈 6, 연약지반, 한국지반공학회 저
38. 한국콘크리트학회(2005), 최신콘크리트 공학
39. 한천구, 김성환, 손호정(2009), “고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따른 고강도 콘크리트의 공학적 특성 분석”, 한국건설순환자원학회논문집(구), 제 7권, pp.62~68.
40. 한천구, 손석현, 박경택(2011), “고로슬래그 미분말과 순환잔골재를 사용하는 무시멘트 모르타르의 특성에 미치는 순환골재 미분말의 영향”, 대한건축학회논문집-구조계, 제 27권, 제 6 호, pp.99~106.
41. 허원(2011), 친환경 그라우팅 재료의 현장 적용성 연구, 석사학위논문, 단국대학교
42. Choi, S. M. (2002), “Polyviny Alcohol Fibers : Introduction and Manufacturing Technology”, Fiber Technology and Industry, Vol. 6, No. 2, pp.83~95.
43. Deere, D. U. (1982), “Cement-bentonite Grouting”, ASCE, Proceedings of Conference Sponsored by the Geotechnical Engineering Division, New Oleans,

- USA, pp.279~300.
44. Eco융합섬유연구원(2010), 아라미드 섬유의 특성 및 현황, Eco융합섬유연구원 탄소 융복합기술개발팀 보고서, pp.1~36.
 45. Fariborz, V., Claudia, P. O., Paulo, J. M. and George, C. (2007), “Resistance of Concrete Protected by Fabric to Projectile Impact”, Cement and Concrete Research, ELSRVIER, Vol. 37, pp.96~106.
 46. Iler, R. K. (1979), The Chemistry of Silica, John Wiley and Sons
 47. Karol, R. H. (1960), Oil & Soil Engineering, Prentice Hall Engineering Mechanics Series, Englewood Cliffs, New York.
 48. King, J. C. and Bush, E. G. W. (1961), “Symposium on Grouting : Grouting of Granular Materials”, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 87, pp.1~32.
 49. Kravetz G. A. (1958), “Cement and Clay Grouting of Foundation : The Use of Clay in Pressure Grouting, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp.1546~1576.
 50. Li, V. C. (1993), “The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications”, Japan Society of Civil Engineers, Vol. 10, No. 2, pp.37~48.
 51. Maalej, M., Zhang, J., Quek, S. T. and Lee, S. C. (2004), “High-velocity Impact Resistance of Hybrid-fiber Engineered Cementitious Composites”, In Proc. 5th Int. Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, France, pp.1051~1058.
 52. Michell, J. K., and Santamarina, J. C. (2005), “Biological Considerations in Geotechnical Engineering” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, pp.1222~1233.
 53. Nakayama, T. and Okano, N. (2013), “Prediction Method of Ground Displacement Caused by Chemical Grouting”, Railway Technical Research Institute Report, Vol. 27, No. 6, pp.19~24.
 54. Shah, S. P. and Rangan, B. V. (1971), “Fiber Reinforced Concrete Properties”, ACI Materials Journal, pp.126~135.
 55. Shah, S. P., Ludirdja, D., Daniel, J. I. and Mobasher, B. (1988), “Toughness-Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Systems”, ACI

Materials Journal, Vol. 85, No. 5, pp.352~360.

56. Shi, C. and Day, R. L. (1995), "A Calorimetric Study of Early Hydration of Alkali-slag Cement", Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 6, pp.1333~1346.

감 사 의 글

많은 분들의 도움으로 부족하지만 한 권의 논문을 완성할 수 있었기에 이 자리를 빌어 감사한 마음을 전하려 합니다.

비전공자인 저를 여기까지 이끌어주시고, 믿어주신 김대현 교수님께 진심으로 감사드립니다. 이런 저런 핑계로 박사과정을 좀더 충실하게 수행하지 못해 항상 죄송했습니다. 꽃이 지고서야 봄인줄 알았다는 말처럼 논문을 쓰고나니 좀더 열심히 했어야 했는데 하는 후회가 남습니다.

논문의 심사과정을 통하여 부족한 점을 지적해주시고 제 논문이 더 발전할 수 있도록 도와주신 김운중교수님, 김성홍교수님, 박정웅교수님 그리고 정상국 교수님께도 심심한 감사의 말씀을 드립니다.

바쁜 일정중에도 익산과 광주를 오가며 논문의 기틀을 잡아주신 박경호 박사님께도 진심으로 감사드립니다. 박사과정 초기에 경호씨에게 했던 말들을 지키지 못해 항상 떳떳하지 못했던것 같습니다. 토질연구실을 든든하게 지키며 늦은 밤까지 논문집필에 큰 도움을 주신 서혁균. 선택한 길이 쉽지는 않겠지만 멋지게 해낼거라 믿고 있습니다. 연구실에 갈 때 마다 반갑게 맞아주었던 김경업군. 응원하고 있습니다. 여담으로 악함과 선함은 상대적인 개념이라서 경업군을 기준으로 봤을 경우, 경업군보다 선하기는 쉽지 않은 것 같습니다. 형들 사이에서 고생이 많은 연구실 막내 김호연군. 큰 성장 기대하고 있습니다. 함께 논문학기를 진행하며 고생 많았던 최진호군. 기쁨도 슬픔도 인생의 일부분인것 같습니다. 앞으로도 자주 만나서 생산적인 이야기를 많이 나눴으면 좋겠습니다. 그리고 끈끈한 정으로 이어져있는 토질 연구실의 선배님들께도 이 자리를 빌어 감사의 말씀을 드립니다.

많은 시간과 노력이 들어간 병원도 포기하고, 낯선 도시 광주에 내려와 혼자 아들을 키우며, 제가 논문에 집중할 수 있도록 도와주신 아내에게도 감사의 마음을 전합니다. 마지막으로 저를 지켜봐주신 아버지와 어머니에게도 감사한 마음을 전합니다.

2018년 7월10일