



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

2011년 8월

석사학위논문

연약암반의 일축압축강도 추정을
위한 침관입시험법 적용

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

제 동 광

연약암반의 일축압축강도 추정을
위한 침관입시험법 적용

Application of Needle Penetration Test for Estimation
of Uniaxial Compressive Strength on Weak Rocks

2011년 8월 25일

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

제 동 광

연약암반의 일축압축강도 추정을 위한 침관입시험법 적용

지도교수 강 성 승

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2011년 4월

조선대학교 대학원

에너지자원공학과

제 동 광

제 동광의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 강 추 원 (인)

위 원 조선대학교 교수 고 진 석 (인)

위 원 조선대학교 교수 강 성 승 (인)

2010년 5월

조선대학교 대학원

- 목 차 -

List of tables	i
List of figures	iii
Abstract	v
1. 서론	1
2. 연구배경	3
2.1 암반분류	3
2.2 암반강도추정	7
2.3 침관입시험	7
3. 시험방법	10
3.1 시험편	10
3.2 침관입시험법	12
3.3 일축압축시험법	14
4. 연구결과	15
4.1 침관입시험결과	15
4.1.1 양생기간 3일	15
4.1.2 양생기간 7일	19
4.1.3 양생기간 14일	23
4.1.4 양생기간 21일	27
4.1.5 양생기간 28일	31
4.1.6 양생기간에 따른 NPR-UCS ^E 상관관계	35
4.2 일축압축시험결과	36
4.2.1 양생기간 3일	36
4.2.2 양생기간 7일	40
4.2.3 양생기간 14일	43
4.2.4 양생기간 21일	46
4.2.5 양생기간 28일	49

4.2.6 양생기간에 따른 NPR-UCS ^M 상관관계	52
4.3 추정 및 측정 일축압축강도 관계	53
5. 토의	54
5.1 침관입시험의 문제점	54
5.2 현장 침관입시험 적용 예	56
6. 결론	61
참고문헌	62

List of tables

Table 2-1. Definitions of rock classes of Terazghi's rock load theory (SINHA, 1989)	4
Table 2-2. Correlation between RQD and rock mass quality (Deere, 1968)	5
Table 2-3. Classification of Rock Material based on unconfined compressive strength (Stapledon and ISRM, 1971)	5
Table 2-4. Strength of intact rock material (Bieniawski, 1979)	6
Table 3-1. The ratio of mixed materials, Cement, Bentonite, and Water for the artificial rocks	10
Table 4-1. The results of the needle penetration test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 3-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS ^E : Estimated Uniaxial Compressive Strength	16
Table 4-2. The results of the needle penetration test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 7-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS ^E : Estimated Uniaxial Compressive Strength	20
Table 4-3. The results of the needle penetration test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 14-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS ^E : Estimated Uniaxial Compressive Strength	24
Table 4-4. The results of the needle penetration test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 21-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS ^E : Estimated Uniaxial Compressive Strength	28
Table 4-5. The results of the needle penetration test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period	

	28-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS ^E : Estimated Uniaxial Compressive Strength	32
Table 4-6.	The results of the uniaxial compression test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 3-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS ^E : Estimated Uniaxial Compressive Strength, UCS ^M :Measured Uniaxial Compressive Strength	37
Table 4-7.	The results of the uniaxial compression test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 7-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS ^E : Estimated Uniaxial Compressive Strength, UCS ^M :Measured Uniaxial Compressive Strength	40
Table 4-8.	The results of the uniaxial compression test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 14-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS ^E : Estimated Uniaxial Compressive Strength, UCS ^M :Measured Uniaxial Compressive Strength	43
Table 4-9.	The results of the uniaxial compression test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 21-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS ^E : Estimated Uniaxial Compressive Strength, UCS ^M :Measured Uniaxial Compressive Strength	46
Table 4-10.	The results of the uniaxial compression test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 28-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS ^E : Estimated Uniaxial Compressive Strength, UCS ^M :Measured Uniaxial Compressive Strength	49
Table 5-1.	The results of the needle penetration test in the case of in-situ	58

List of figures

Figure 2-1. Configuration of needle penetrometer and its parts, 1: pressure, 2: chuck, 3: penetration scale, 4: load scale, 5: load indicating ring, 6: UCS-NPR correlation chart, 7: removable cap, 8: penetration needle (modified from Maruto Corporation, 2006)	9
Figure 3-1. Manufacturing process of core specimen, (a) curing for each specimen, (b) Clean and smooth of specimen surface, (c) Specimens for needle penetration test and uniaxial compression test	11
Figure 3-2. A view of the needle penetrometer test in laboratory and fixed base support	12
Figure 3-3. Core specimen for needle penetration test. (a) size of the core specimen, (b) test section of 4 quadrants	13
Figure 3-4. A view of the uniaxial compression test for measuring uniaxial compressive strength in laboratory	14
Figure 4-1. Relationship between NPR and estimated UCS ^E in the case of curing period 3-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data	17
Figure 4-2. Relationship between NPR and estimated UCS ^E in the case of curing period 7-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data	21
Figure 4-3. Relationship between NPR and estimated UCS ^E in the case of curing period 14-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data	25
Figure 4-4. Relationship between NPR and estimated UCS ^E in the case of curing period 21-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data	29
Figure 4-5. Relationship between NPR and estimated UCS ^E in the case of	

curing period 28-day, (a) Specimen-2, (b) Specimen-3, (c) all data	33
Figure 4-6. Relationship between NPR and estimated UCS ^E in all cases	35
Figure 4-7. Relationship between NPR and measured UCS ^M in the case of curing period 3-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data	38
Figure 4-8. Relationship between NPR and measured UCS ^M in the case of curing period 7-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data	41
Figure 4-9. Relationship between NPR and measured UCS ^M in the case of curing period 14-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data	44
Figure 4-10. Relationship between NPR and measured UCS ^M in the case of curing period 21-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data	47
Figure 4-11. Relationship between NPR and measured UCS ^M in the case of curing period 28-day, (a) Specimen-2, (b) Specimen-3, (c) all data	50
Figure 4-12. Relationship between NPR and measured UCS ^M	52
Figure 4-13. Relationship between the estimated UCS ^E and the measured UCS ^M	53
Figure 5-1. Schematic illustration of an invalid test (Erguler and Ulusay, 2007)	54
Figure 5-2. Some fractures developed in Specime-1 with curing period 21-day, (a) side view, (b) top view	55
Figure 5-3. Relationship between the NPR-UCS of natural rocks and the artificial rocks	56
Figure 5-4. In-situ needle penetration test with respect to the sedimentarily rock in Uhangri, Haenam	57
Figure 5-5. Schematic diagram of needle penetration test on rock surface	57
Figure 5-6. Distribution of (a) NPR at each test point, (b) UCS ^E at each test point	59
Figure 5-7. Relationship between NPR and UCS ^E in all cases	61

Abstract

Application of Needle Penetration Test for Estimation of Uniaxial Compressive Strength on Weak Rocks

By DONGKWANG JE

Adv. Prof. : Seong-Seung Kang, Ph.D,

Dept. of Energy and Resources Engineering

Graduate School of Chosun University

The various mechanical properties of rock materials, which are commonly used in rock engineering, are required for analyzing and evaluating the stability of geo-structures such as tunnels, dams and slopes. In particular, the uniaxial compressive strength (UCS) has been one of the important mechanical properties in rock materials. The uniaxial compressive strength of rock materials can be generally obtained by the conventional uniaxial compression test. This conventional testing method can be obtained the value of exact uniaxial compressive strength, whereas a lot of time and effort to prepare sample for its test are needed. In addition, a test sample of the appropriate size demanded for the uniaxial compression test is often difficult to make. Due to these problems, some testing method such as the point load test, brazilian test, schmidt hammer test, and block punch strength index test have been developed and suggested for estimating the uniaxial compressive strength. However, these methods are also difficult for preparing the appropriate test sample, especially in the case of weak rocks. Needle penetration test has been developed in order to solve above difficulties. This method as non-destructive test method can be applied in in-situ state as well as laboratory.

The purpose of this study is to estimate the uniaxial compressive strength for the weak rocks from the needle penetration resistance measured by a needle

penetrometer. For this purpose, we firstly made the artificial cemented-based specimens. Curing period of each specimen is five steps, 3-day, 7-day, 14-day, 21-day and 28-day. and the ratio of Cement : Bentonite : Water is three cases, 1.0 : 1.0 : 3.0, 1.3 : 0.7 : 2.5, 1.5 : 0.5 : 2.0. Secondly, the needle penetration test and uniaxial compression test were performed to obtain the needle penetration resistance(NPR) and the uniaxial compressive strength(UCS). Then, the relationship between the measured needle penetration resistance and the estimated and measured uniaxial compressive strengths were compared. Finally, the uniaxial compressive strength was estimated from the needle penetration resistance.

In relationship between NPR and UCS, the UCS gradually increased until the NPR of less than 10 N/mm, then drastically increased from more than 10 N/mm. The NPR was widely distributed at the curing period of 3-day to 14-day, but was narrowed at the curing period of 21-day to 28day. In addition, the NPR of the curing periods, 21-day and 28-day, was nearly constant, but the UCS of those showed a big difference. In relationship between the estimated uniaxial compressive strength and the measured uniaxial compressive strength, the gradient of UCS obtained from this study was between the lower limit of 1:06 and the upper limit of 1:1.7, and most of the values are closely located at the accurate estimation gradient of 1:1. As a result, it is considered that the UCS estimated from the NPR is reasonable enough.

1. 서론

터널, 사면, 댐 등과 같은 구조물을 건설할 경우 구조물이 위치할 곳에 대한 지질상태를 파악하는 것은 구조물의 안정성을 평가하기 위해서 수행되어야 할 중요한 요소 중의 하나이다. 구조물의 안정성 평가는 정성적인 평가와 함께 정량적인 평가도 요구되므로 정성적인 평가인 지질상태 파악에만 의존하는 것은 무리가 있다. 예를 들면 터널과 같은 구조물의 역학적 변형은 터널 굴착에 따른 응력의 변화와 암반 강도와와의 관계에 의해 결정되기 때문에 암반의 강도를 정량적으로 나타내야 할 필요성이 있다. 정량적인 평가 지표로서 암반에 대한 강도는 암반공학(Hudson and Harrison, 1997)이나 암반분류(Bieniawski, 1989)에 적용되는 암석재료의 중요한 물리적 성질 중의 하나이며, 실내시험에 의한 일축압축강도(UCS)가 그 예이다.

하지만 암석재료에 대한 UCS를 알아내기 위해서는 현장에서 채취한 시료를 ASTM(1994)과 ISRM(1979)에서 규정한 일축압축시험법에 근거하여 원기둥 형태의 시험편을 제작해야 하는데 그 과정이 복잡하고 많은 시간이 소요된다. 더군다나 신선한 암반에서 채취한 시료의 경우 시험편을 제작하는데 어려움이 없는 반면, 풍화된 암석, 절리나 층리를 포함한 암석, 또는 점토광물을 포함한 암석과 같은 연약암반 시료의 경우 일축압축시험을 위한 적정한 형태의 시험편 제작이 어렵다.

이러한 원기둥 형태의 정형화된 시험편 제작의 문제점을 해결하기 위하여 슈미트해머시험(Schmidt hammer test, ISRM, 1978a), 압열인장시험(Brazilian test, ISRM, 1978b), 점하중시험(point load test, ISRM, 1985), Block punch strength index test(Ulusay et al., 2001) 등과 같은 다양한 암석강도 시험법들이 개발되었다. 하지만, 이상에서 언급한 시험법들도 연약암반의 경우 시험편이 제작되는 과정에서 시험편이 깨지거나 비교적 짧은 시간에 쉽게 풍화가 일어나는 등의 문제점이 발생함으로 인하여 실내시험이 불가능할 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하고 연약한 암반에도 적용할 수 있는 또 다른 형태의 시험법이 요구되었으며, 이를 위한 비파괴 간이 시험기인 침관입시험기(Needle penetrometer)가 개발되었다(Okada et al., 1985, Yamaguchi et al., 2005, Maruto Corporation, 2006, Erguler and Ulusay, 2007, 2009).

이 연구에서는 첫째, 연약암반의 UCS추정 시험법으로서 비파괴 간이 시험기인

침관입시험법에 대하여 소개하고자 한다. 둘째, 연약암반의 UCS를 추정하기 위한 연구로서 인공암반 시료와, 자연암반 시료에 대한 침관입시험을 실시하여 침관입저항력(NPR)으로부터 UCS를 정량적으로 추정하고자 한다. 마지막으로, 침관입시험으로부터 계산된 UCS 추정값과 실제 일축압축시험에 의한 UCS를 비교하고, 자연암반에 대한 침관입시험결과를 검토하여 연약암반에 대한 UCS 추정 시험법으로서 그 적용 가능성을 파악하고자 한다.

2. 연구배경

터널, 사면, 댐 등과 같은 구조물의 안정성 평가를 위한 역학적인 설계방법으로 경험적인 방법과 수치 해석적인 방법이 있다. 지표지질조사와 시추조사 및 간단한 현장시험을 시행하여 지반거동을 파악하고 암반을 몇 가지 등급으로 분류하여 기존에 경험적으로 조사된 암반의 거동에 따른 설계보강지침을 제시하는 경험적인 방법과, 비교적 근래에 사용되기 시작한 수치해석을 이용한 설계방법이 있다. 하지만 방법에 따른 장단점이 있으며 현재 구조물 설계는 유기적으로 두 방법을 적절히 보완하여 사용되고 있다.

2.1 암반분류

구조물을 위한 암반의 분류는 크게 정성적 분류와 정량적 분류로 구분되며 근래에 제안된 정량적 분류가 오늘날 많이 사용되는 분류방법이다. Table 2-1의 암반하중 분류법(Terzaghi, 1946)은 최초로 소개된 실용적인 분류방법으로 미국에서 35년 이상 활용되었으며 철제지보 터널에 성공적으로 적용될 수 있음이 입증되었다. 이 방법은 암반을 파쇄 정도와 암석 특성을 고려하여 9종류의 정성적 분류방법을 나타낸다. 다른 분류방법으로는 신속하고 적은 비용으로 암반의 특성을 판단하는 RQD(Rock Quality Designation : Deere, 1964)가 있다. RQD는 대상으로 하는 지반에 코어링을 하여 채취된 코어에서 길이 약 150cm 의 구간을 지정하고, 그 중에서 약 10cm 이상의 양호한 코어만을 고려하는 수정된 코어회수율에 기초한 정량적 지수이다. Table 2-2는 RQD를 통하여 나타낸 암반분류를 나타낸 것이며, Table 2-3은 암석종류에 따른 암반분류를 정리한 것이다. 남아프리카 공화국의 Bieniawski는 많은 광산용 터널시공에서 경험적으로 얻어진 암반특성과 보강과의 관계에 근거하여 1973년 RMR 분류 체계를 개발(Bieniawski, 1973)하였고 1979년 이를 일부 수정하여 발표(Bieniawski, 1979)하였다. Table 2-4는 RMR의 6가지 변수 중에서 압축강도값에 따른 암반분류를 나타낸 것이다.

Table 2-1. Definitions of rock classes of Terazghi's rock load theory (SINHA, 1989).

Rock Class	Type of Rock	Definition
I.	Hard & intact	The rock is unweathered. It contains neither joints nor hair cracks. If fractured, it breaks across intact rock.. After excavation the rock may have some popping and spalling failures from roof. At high stresses spontaneous and violent spalling of rock slabs may occur from sides of roof. The unconfined compressive strength is equal to or more than 100 MPa
II.	Hard stratified and schistose	The rock is hard and layered. The layers are usually widely separated. The rock may or may not have planes of weakness. In such rock, spalling is quite common.
III.	Massive moderately jointed	A jointed rock. The joints are widely spaced. The joints may or may not be cemented. It may also contain hair cracks but the huge blocks between the joints are intimately so that vertical walls do not require lateral support. Spalling may occur.
IV.	Moderately blocky and seamy	Joints are less spaced. Blocks are about 1 m in size. The rock may or may not be hard. The joints may or may not be healed but the interlocking is so intimate that no side pressure is exerted or expected.
V.	Very blocky and seamy	Closely spaced joints. Block size is less than 1 m. It consists of almost chemically intact rock fragments which are entirely separated from each other and imperfectly interlocked.. Some side pressure of low magnitude is expected. Vertical walls may require supports.
VI.	Completely crushed but chemically intact	Comprises chemically intact rock having the character of a crusher run aggregate. There is no interlocking. Considerable side pressure is expected on tunnel supports. The block size could be few centimeters to 30 cm
VII.	Squeezing rock - moderate depth	Squeezing is mechanical process in which the rock advances into the tunnel opening without perceptible increase in volume. Moderate depth is a relative term and could be upto 150 m to 1000 m
VIII.	Squeezing rock - great depth	The depth may be more than 150 m. The maximum recommended tunnel depth is 1000 m (2000 m in very good rocks).
IX.	Swelling rock	Swelling is associated with volume change and is due to chemical change of the rock usually in presence of moisture or water. Some shales absorb moisture from air and swell. Rocks containing swelling minerals such as montmorillonite, illite, kaolinite and others can swell and exert heavy pressure on rock supports.

Table 2-2. Correlation between RQD and rock mass quality (Deere, 1968).

S. No.	RQD(%)	Rock Quality
1	< 25	Very poor
2	25 - 50	Poor
3	50 - 75	Fair
4	75 - 90	Good
5	90 - 100	Excellent

Table 2-3. Classification of Rock Material based on unconfined compressive strength (Stapledon and ISRM, 1971).

Term for Uniaxial compressive Strength	Symbol	Strength (MPa)	Ranges for some Common Rock Materials				
			Granite, Basalt, Gneiss, Quartzite, Marble	Schist, Sandstone	Limestone, Siltstone	Slate	Concrete
Extremely weak	EW	0.25 - 1		**	**		
Very weak	VW	1 - 5		**	**	**	**
Weak	W	5 - 25		**	**	**	**
Medium Strong	MS	25 - 50			**	**	
Strong	S	50 - 100	**				
Very Strong	VS	100 - 250	**				
Extremely Strong	ES	>250	**				

Table 2-4. Strength of intact rock material (Bieniawski, 1979).

Qualitative Description	Compressive Strength (MPa)	Point Load Strength (MPa)	Rating
Exceptionally strong	> 250	8	15
Very strong	100 - 250	4 - 8	12
Strong	50 - 100	2 - 4	7
Average	25 - 50	1 - 2	4
Weak	10 - 25	Use of uniaxial compressive strength is preferred	2
Very weak	2 - 10	- do -	1
Extremely weak	1 - 2	- do -	0

Note: At compressive strength less than 0.6 MPa, many rock material would be regarded as soil

2.2 암반강도추정

암석재료에 대한 일축압축강도를 알아내기 위해서는 현장에서 채취한 시료를 ASTM(1994)이나 ISRM(1979)에서 규정한 일축압축시험법에 근거하여 원기둥 형태의 시험편을 제작해야 하는데 그 과정이 복잡하고 많은 시간이 소요된다. 더군다나 신선한 암반에서 채취한 시료의 경우 시험편을 제작하는데 어려움이 없는 반면, 풍화된 암석, 절리나 층리를 포함한 암석, 또는 점토광물을 포함한 암석과 같이 연약 암반 시료의 경우 일축압축시험을 위한 적정한 형태의 시험편 제작이 어렵다. 또한 구조물의 설계단계에서 지질조사를 통하여 얻어진 TCR 또는 RQD 값이 낮은 경우 간접시험법을 통하여 암반강도를 추정하는 경우도 매우 흔하다. 이러한 원기둥 형태의 정형화된 시험편 제작의 문제점을 해결하기위하여 슈미트해머시험(Schmidt hammer test, ISRM, 1879a), 압열인장시험(Brazilian ttest, ISRM, 1978b), 점하중시험(Point load test, ISRM, 1985), Block punch strength index test(Ulusay et al., 2001), 침관입시험(Okada et., 1985, Maruto Corporation, 2006, Erguler and Ulusay, 2007) 등과 같은 다양한 암석강도 시험법들이 개발되었다.

2.3 침관입시험

이상에서 언급한 시험법들도 연약암반의 경우 시험편이 제작되는 과정에서 시험편이 깨지거나 비교적 짧은 시간에 쉽게 풍화가 일어나는 등의 문제점이 발생함으로써 인하여 실내시험이 불가능할 수 있다. 이러한 문제점을 극복하고 연약한 암반에도 적용할 수 있는 또 다른 형태의 시험법이 요구되었으며, 이를 위한 비파괴 간이 시험기인 침관입시험기(Needle penetrometer)가 개발되었다(Okada et al., 1985, Yamaguchi et al., 2005, Maruto Corporation, 2006, Erguler and Ulusay, 2007, 2009). 침관입시험은 관입하중(N)과 침관입깊이(mm)의 상관관계를 통하여 일축압축강도값을 추정한다.

침관입시험기는 코일 스프링식의 하중 측정기로서 최대직경 40 mm, 길이 285 mm, 무게 700 g으로서 휴대성이 용이하며 간단한 구조가 특징이다. 8 개의 주요 부분으로 구성되어 있다(Figure 2-1, Yamaguchi et al., 2005, Maruto Corporation,

2006, Erguler and Ulusay, 2007). 즉, 첫 번째 부분은 관입량 측정과 침관입을 보호하기 위한 압착부(pressure)이다. 두 번째 부분은 침관입을 고정시키는 물림부(chuck)이다. 세 번째 부분은 0 ~ 10 mm범위의 1 mm간격으로 나타낸 관입량 눈금부(penetration scale)이다. 네 번째 부분은 10 ~ 100 N범위의 10 N간격으로 나타낸 하중 눈금부(load scale)이다. 다섯 번째 부분은 하중 지시부(load indication ring)이다. 여섯 번째 부분은 일축압축강도(UCS)-침관입저항력(NPR) 상관관계를 나타내는 보정도표부(UCS-NPR correlation chart)이다. 일곱 번째 부분은 여분의 관입침을 보관하는 보관부(removable cap)이다. 마지막 여덟 번째 부분은 일본 토목학회 지침에 따라 제작된 직경 0.84 mm의 관입침(penetration needle)이다. 관입침이 마모되었거나 파손되어 교체해야 할 경우 압착부를 제거하고 물림부를 풀어서 사용된 관입침을 제거한 후 새 관입침을 정확하게 결합한 후 물림부를 조여 고정시킨다.

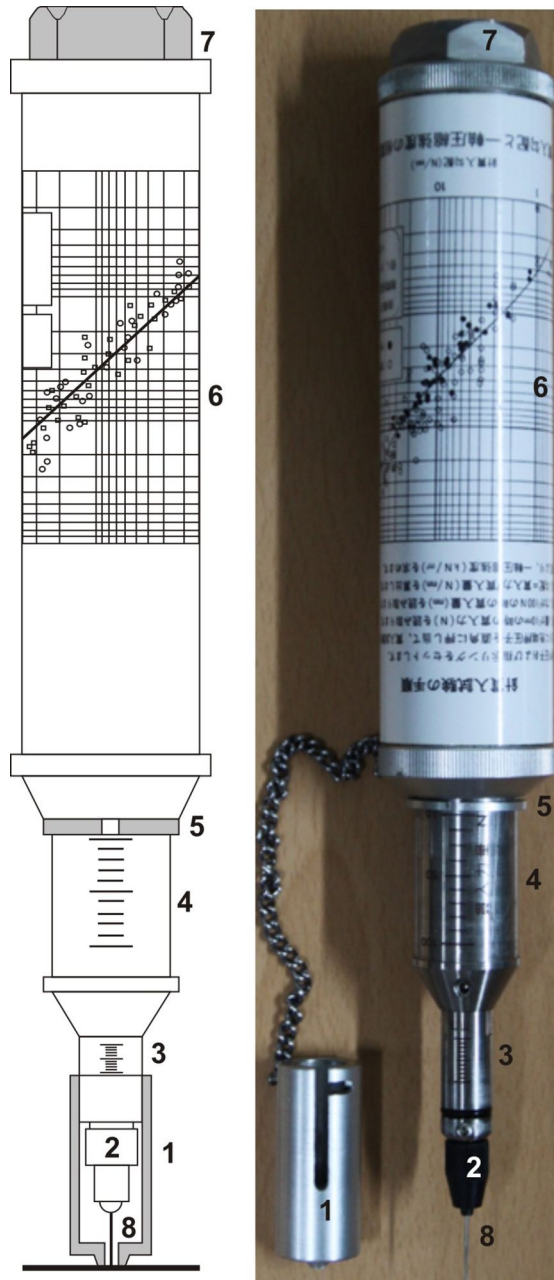


Figure 2-1. Configuration of needle penetrometer and its parts, 1: pressure, 2: chuck, 3: penetration scale, 4: load scale, 5: load indicating ring, 6: UCS-NPR correlation chart, 7: removable cap, 8: penetration needle (modified from Maruto Corporation, 2006).

3. 시험방법

3.1 시험편

침관입시험을 수행하기 위한 시험편은 비교적 시료제작이 용이한 시멘트와 점토가 혼합된 인공암반이 사용되었다. 시험에 사용할 인공암반의 재료중 점토는 Samchun pure chemical Co. Ltd. 의 B0105 벤토나이트(bentonite)가 사용되었고, 시멘트는 동양시멘트사의 KS L 5201 포틀랜드 시멘트가 사용되었으며, 이들을 일정한 비율로 혼합하여 시험편을 제작하였다. 이 연구에서 사용된 시험편은 인공암반 재료의 배합비에 따른 관입저항력 변화를 비교하기 위하여 세 가지 경우에 대한 재료 배합비를 선정하여 제작되었다(Table 3-1). 즉, 시멘트 : 벤토나이트 : 물의 배합비를 Specimen-1의 경우 1.0 : 1.0 : 3.0, Specimen-2의 경우 1.3 : 0.7 : 2.5, Specimen-3의 경우 1.5 : 0.5 : 2.0 으로 하였다. 양생조건은 포화나 강제건조가 아닌 실내습도, 실내온도 상태에서 건조하였다. 시험편의 양생기간에 따른 관입저항력을 살펴보기 위하여 양생기간은 3일, 7일, 14일, 21일, 28일로 하여 침관입시험을 실시하였다. 시험편은 ASTM(1994)과 ISRM(1979)에서 제안한 크기로서 직경 약 56.0 mm, 높이 114.0 mm인 원형시험편으로서 제작과정은 Figure 3-1과 같다. 시험편 제작 시 시험편 내 존재할 수 있는 공극을 최소화 하기 위하여 재료를 충분히 혼합하기 위한 재료 혼합기와 기포 발생 억제용 진동기를 사용하였다. 그리고 침관입시험을 실시하기 전에 시험편 양쪽 표면을 연마포를 이용하여 편평하게 연마하였다. 또한 침관입시험의 결과를 일축압축 강도와 비교하기 위하여 동일한 조건의 일축압축시험용 원형시험편을 추가로 제작하였다.

Table 3-1. The ratio of mixed materials, Cement, Bentonite, and Water for the artificial rocks.

	Cement	Bentonite	Water
Specimen-1	1.0	1.0	3.0
Specimen-2	1.3	0.7	2.5
Specimen-3	1.5	0.5	2.0

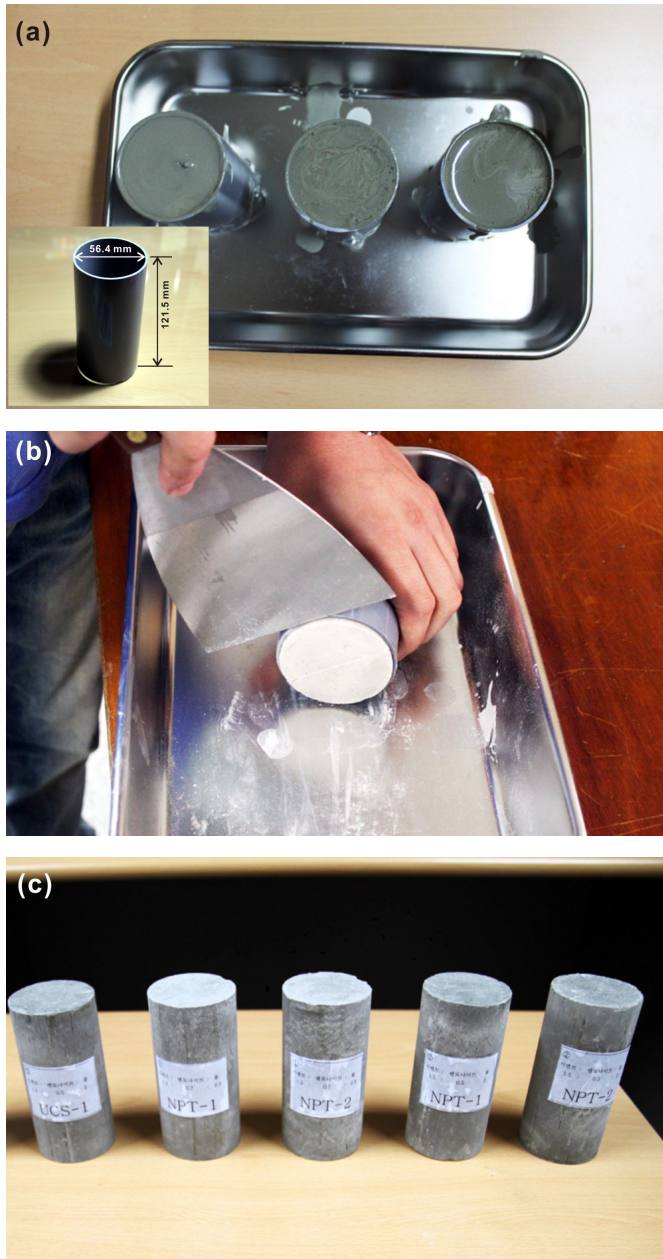


Figure 3-1. Manufacturing process of core specimen, (a) curing for each specimen, (b) Clean and smooth of specimen surface, (c) Specimens for needle penetration test and uniaxial compression test.

3.2 침관입시험법

침관입시험은 다음과 같은 순으로 실시한다(Okada et., 1985, Maruto Corporation, 2006, Erguler and Ulusay, 2007). 첫째, 시험하고자 하는 시험편의 표면을 매끄럽게 성형한다. 이것은 침관입시험을 수행할 때 시험편의 표면이 고르지 못 할 경우 정확한 측정값을 얻을 수 없기 때문이다. 둘째, 하중 지시링을 관입량 눈금부의 0에 오도록 한 후 침관입시험기를 시험편에 수직으로 일치시켜 서서히 침관입력을 가하여 관입침을 10 mm 관입시킨다(Figure 3-2).

시험편에 대한 본 시험의 신뢰도를 높이기 위하여 측정 면을 4개의 분면으로 나누어 각 분면마다 2~3회 진행하였다(Figure 3-3). 이때 시험편이 움직이지 않도록 Figure 3-2에서와 같이 고정용 받침대를 사용하였다. 마지막으로 침관입시험이 완료되면 하중 눈금으로부터 하중과 관입량 눈금으로부터 관입 깊이를 읽고 식 (3.1)을 이용하여 침관입저항력(Needle penetration Resistance, NPR)을 계산한다. 여기서, F는 하중(N), D는 관입량(mm)을 나타낸다.

$$NPR = \frac{F}{D} \quad (3.1)$$

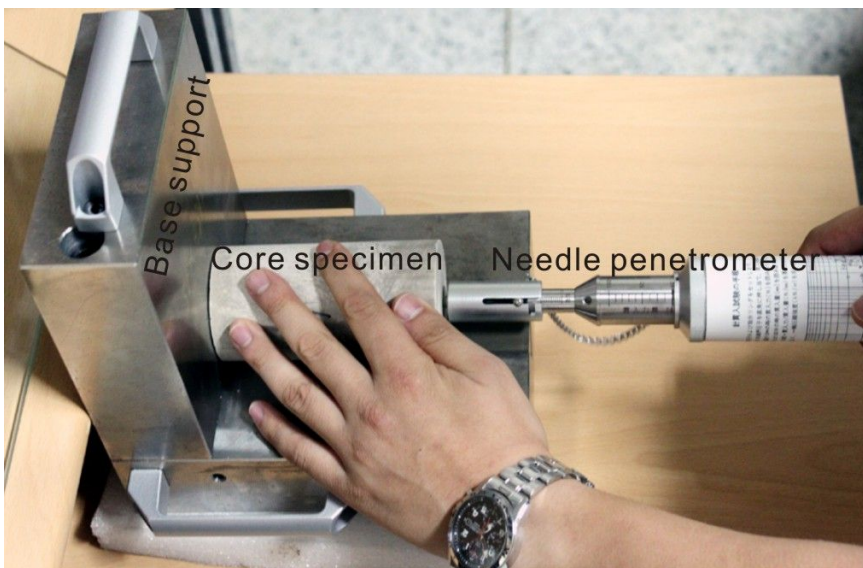


Figure 3-2. A view of the needle penetrometer test in laboratory and fixed base support.

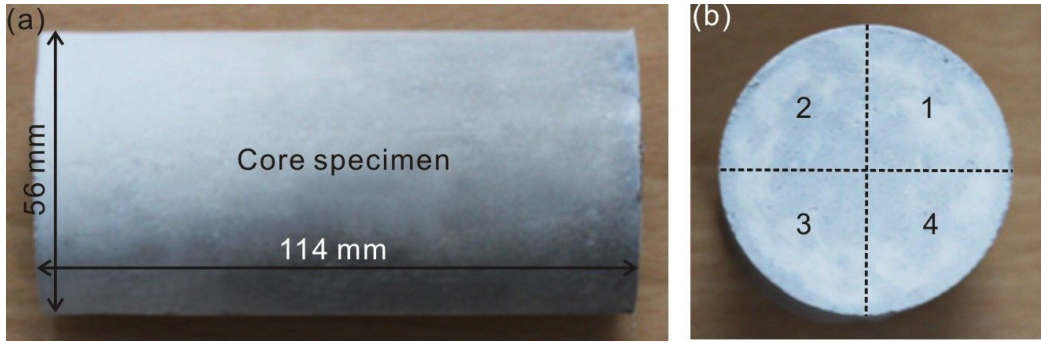


Figure 3-3. Core specimen for needle penetration test. (a) size of the core specimen, (b) test section of 4 quadrants.

일반적으로 관입력은 침관입 깊이가 10 mm 관입되었을 때 하중 지시링으로부터 읽고 기록하는데, 만약, 매우 연약하거나 물로 포화된 연약암반이나 풍화의 진행이 활발하게 진행된 연약암반의 경우 침관입시험 시 침관입 깊이가 10 mm 이상 관입되지만 침관입 깊이가 10 mm 도달되면 더 이상 관입력을 가하지 말고 그 상태에서의 관입력을 기록한다. 또한 연약암반 이상의 압축강도값을 가지고 있는 시료일 때 관입력이 100 N에 도달할지라도 침관입 깊이가 10 mm 관입되지 않을 경우 관입력이 100 N일 때의 침관입 깊이를 압착부를 통하여 관입량을 측정한 후 관입 저항력을 계산한다. 즉, 최대 침관입 깊이가 10 mm일 때 관입력과 최대 관입력이 100 N일 때 침관입 깊이를 기록하여 침관입저항력(NPR)을 구한다(Okada et al., 1985, Maruto Coporation, 2006, Erguler and Ulusay, 2007).

3.3 일축압축시험법

침관입시험으로부터 계산된 일축압축강도 추정값과 실제 일축압축시험에 의한 결과값을 비교하여 연약암반에 대한 일축압축강도 추정시험법으로 그 적용 가능성을 평가하고자 침관입시험에 사용한 시험편과 동일한 조건의 직경 약 56.0 mm, 높이 114.0 mm인 원형시험편 사용하였다. 상하 압축면의 편평도는 연마기를 사용할 경우 수분과 연마기의 다이아몬드 코팅 연마 날에 의하여 극히 약한 강도값의 시험편이 파괴발생 우려 때문에 연마포를 이용하여 건식으로 연마하였다. 배합비와 양생기간이 동일한 시료 2~4개/1조에 대하여 ISRM(1979)에서 규정 일축압축시험법에 근거하여 일축압축시험을 실시하였다. 이때 사용된 만능재료 시험기는 DAEKYOUNG TECH & TESTER MTG. Co. Ltd. 의 DTU-900HC serie를 사용하였으며, 측정값은 KYOWA사의 UCAM-65B-AC M14, Data logger를 통하여 획득하였으며, 모든 자료는 컴퓨터를 이용하여 처리 하였다(Figure 3-4).

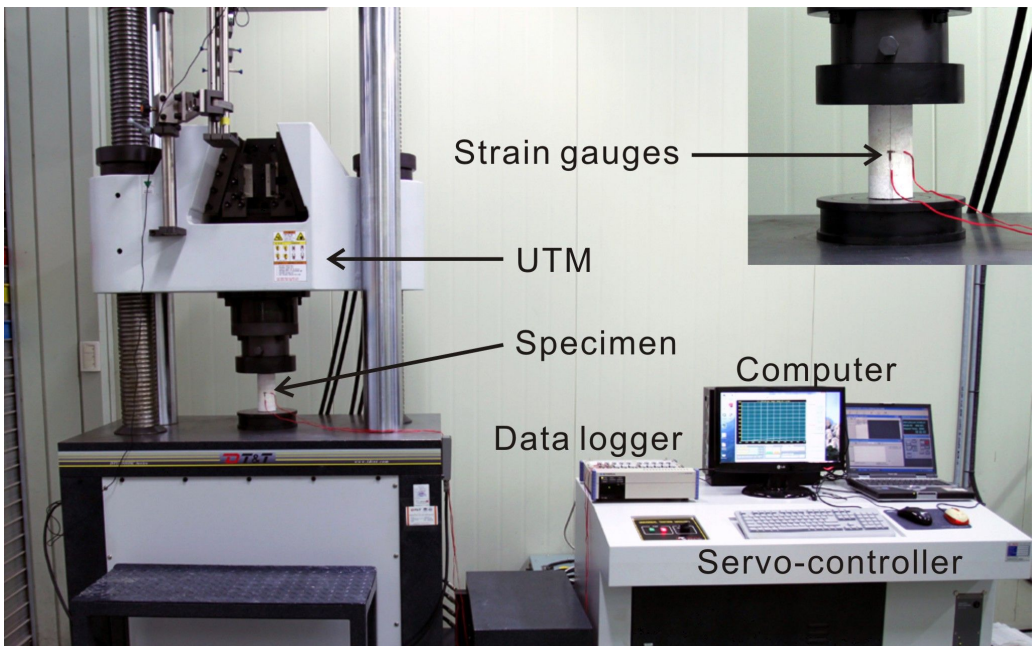


Figure 3-4. A view of the uniaxial compression test for measuring uniaxial compressive strength in laboratory.

4. 연구결과

4.1 침관입시험결과

인공암반인 원형시험편에 대해 배합비와 양생기간에 따라 침관입시험을 실시하였다. 추정 UCS^E값은 침관입시험으로부터 계산된 NPR값을 이용하여 Maruto Corporation(2006)에서 제시하고 있는 NPR - UCS^E간의 상관관계식 (4.1)로부터 추정하였다.

$$\log UCS^E = 0.978 \log NPR + 2.621 \quad (4.1)$$

4.1.1 양생기간 3일

양생기간이 3일 일 때 배합비에 따른 침관입시험결과와 함께 이들로부터 추정된 일축압축강도를 정리하면 Table 4-1과 같다. 그리고 각 배합비에 따른 NPR-UCS 관계를 Figure 4-1에 나타내었다. Specimen-1의 경우 침이 10 mm까지 관입할 때 관입하중은 18 N ~ 19 N이 작용하였다(Figure 4-1(a)). Specimen-2의 경우는 10 mm 관입하는데 27 N ~ 30 N의 관입하중이 작용하였으며(Figure 4-1(b)), Specimen-3은 48 N ~ 50 N로 가장 큰 관입하중이 작용하였다(Figure 4-1(c)). 이것은 점토의 배합비가 상대적으로 감소할수록, 시멘트의 배합비가 상대적으로 증가할수록 NPR값이 증가하는 것을 알 수 있다(Figure 4-1(d)). 측정된 NPR 값을 NPR - UCS^E 상관관계식에 대입하여 UCS값을 추정하면, Specimen-1의 UCS^E평균값은 0.771 MPa이고, Specimen-2는 1.184 MPa, 그리고 Specime-3은 2.024 MPa로 각각 계산되었다. Stapledon and ISRM (1971)의 암종에 따른 암반분류와 Bieniawski (1979)의 암반분류에 따른 UCS값을 비교해보면, 양생 3일째 인공암반은 매우 약한 연약암석에 포함되는 것을 알 수 있다.

Table 4-1. The results of the needle penetration test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 3-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS^E: Estimated Uniaxial Compressive Strength.

Curing period : 3-day									
No.	Specimen-1 (C:B:W = 1.0:1.0:3.0)			Specimen-2 (C:B:W = 1.3:0.7:2.5)			Specimen-3 (C:B:W = 1.5:0.5:2.0)		
	Measured (N/mm)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	Measured (N/mm)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	Measured (N/mm)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)
1	18/10.0	1.80	0.747	30/10.0	3.00	1.237	50/10.0	5.00	2.049
2	19/10.0	1.90	0.788	30/10.0	3.00	1.237	48/10.0	4.80	1.968
3	19/10.0	1.90	0.788	26/10.0	2.60	1.074	48/10.0	4.80	1.968
4	18/10.0	1.90	0.788	26/10.0	2.60	1.074	48/10.0	4.80	1.968
5	19/10.0	1.80	0.747	30/10.0	3.00	1.237	50/10.0	5.00	2.049
6	19/10.0	1.90	0.788	27/10.0	2.70	1.115	50/10.0	5.00	2.049
7	19/10.0	1.90	0.788	29/10.0	2.90	1.196	49/10.0	4.90	2.009
8	19/10.0	1.90	0.788	30/10.0	3.00	1.237	49/10.0	4.90	2.009
9	17/10.0	1.70	0.706	30/10.0	3.00	1.237	50/10.0	5.00	2.049
10	19/10.0	1.90	0.788	29/10.0	2.90	1.196	52/10.0	5.20	2.130
Avg.		1.86	0.771		2.87	1.184		4.94	2.024

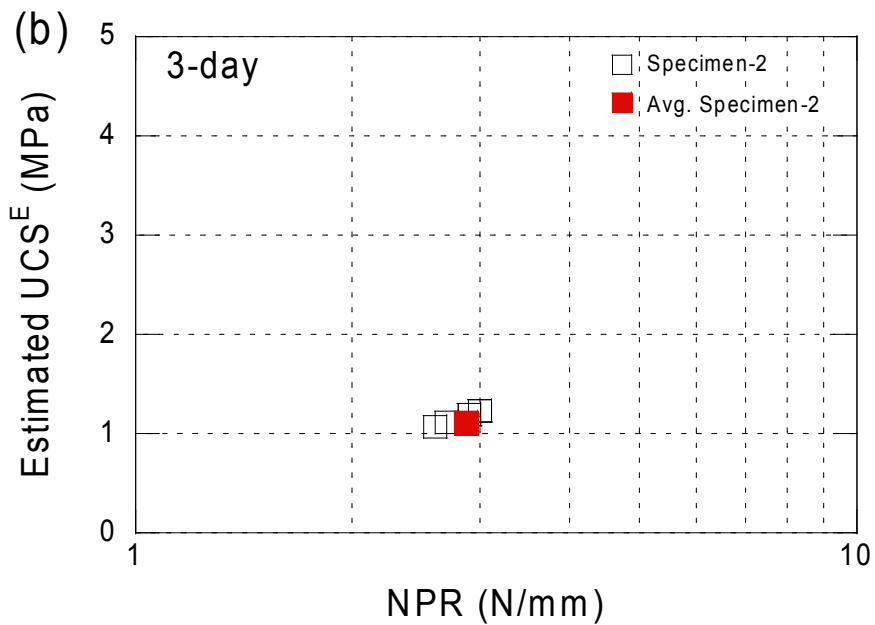
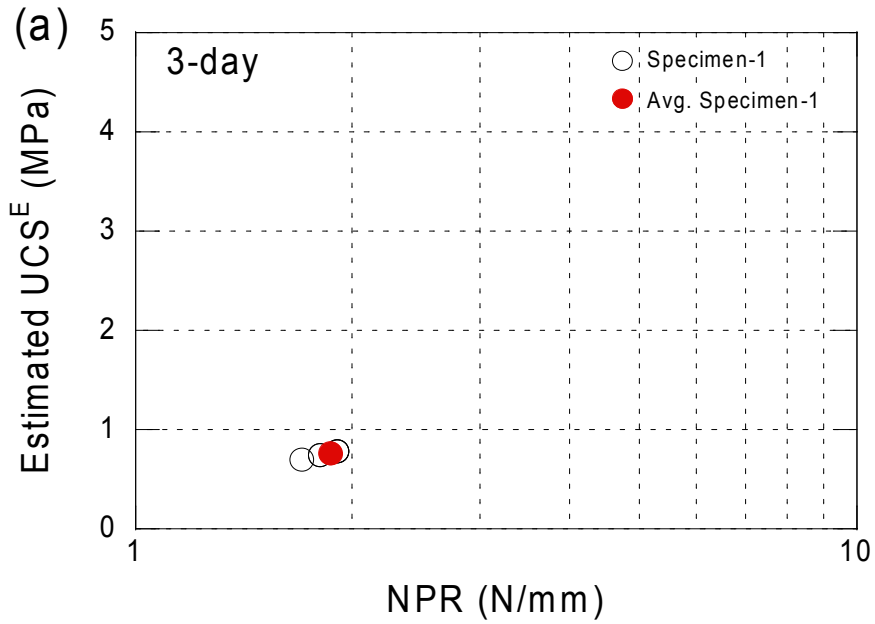


Figure 4-1. Relationship between NPR and estimated UCS^E in the case of curing period 3-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data.

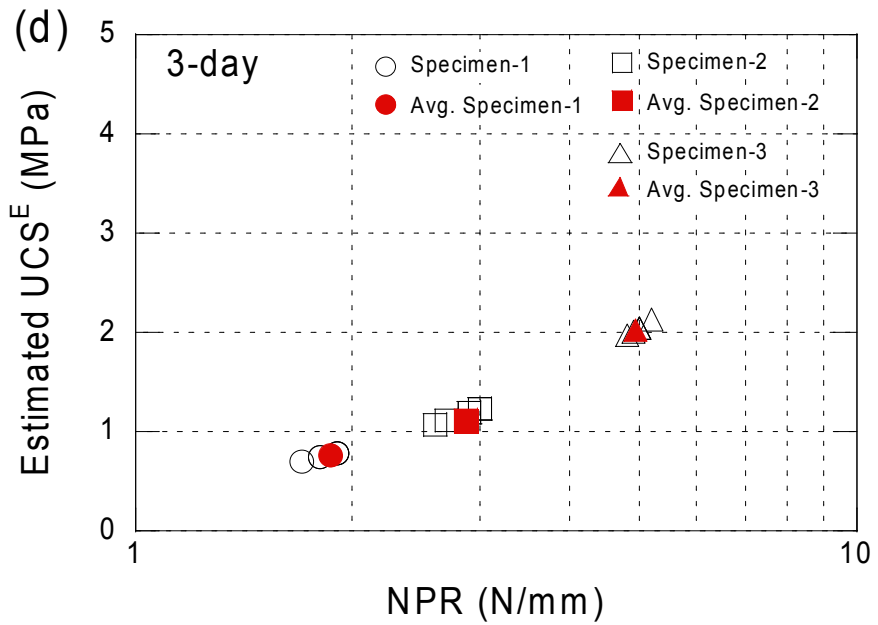
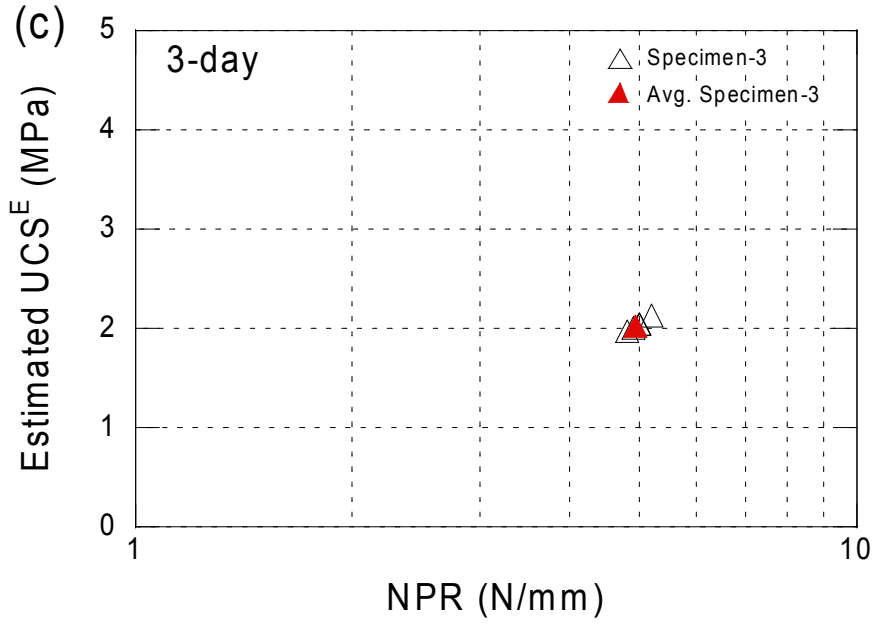


Figure 4-1. (Continued)

4.1.2 양생기간 7일

양생기간이 7일 일 때 배합비에 따른 침관입시험결과와 함께 이들로부터 추정된 일축압축강도를 정리하면 Table 4-2와 같다. 그리고 각 배합비에 따른 NPR-UCS관계를 Figure 4-2에 나타내었다. Specimen-1의 경우 침 관입깊이가 10 mm일 때 관입하중은 49 N ~ 50 N이었으며(Figure 4-2(a)), Specimen-2에서는 10 mm관입하는데 59 N ~ 61 N의 관입하중이 작용하였다(Figure 4-2(b)). Specimen-3의 경우에 1회의 시험을 제외하고 모두 최대관입하중인 100 N였으며, 이때 침관입 깊이는 8.0 mm ~ 9.0 mm였다(Figure 4-2(c)). 양생기간 7일에 대한 전체 시험결과를 살펴보면(Figure 4-2(d)), 시험편의 배합비 중 점토성분인 벤토나이트의 배합율이 낮을수록 NPR값이 증가하였으며, 양생기간이 3일보다는 기울기가 더 급하게 변화함을 알 수 있다. 측정된 NPR 값을 $NPR - UCS^E$ 상관관계식에 대입하여 UCS값을 추정하면, Specimen-1의 UCS^E 평균값은 2.036 MPa이며, Specimen-2에서는 2.465 MPa, 그리고 Specime-3의 경우 4.476 MPa로 나타났다. 암반분류(Stapledon and ISRM, 1971; Bieniawski, 1979)에 따른 UCS값을 비교해보면, 양생 7일째 인공암반도 양생3일째와 같이 매우 약한 연약암석 범위에 포함된다.

Table 4-2. The results of the needle penetration test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 7-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS^E: Estimated Uniaxial Compressive Strength.

Curing period : 7-day									
No.	Specimen-1 (C:B:W = 1.0:1.0:3.0)			Specimen-2 (C:B:W = 1.3:0.7:2.5)			Specimen-3 (C:B:W = 1.5:0.5:2.0)		
	Measured (N/mm)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	Measured (N/mm)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	Measured (N/mm)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)
1	50/10.0	5.00	2.049	61/10.0	6.10	2.493	100/9.0	11.10	4.504
2	50/10.0	5.00	2.049	62/10.0	6.20	2.534	100/9.0	11.10	4.504
3	50/10.0	5.00	2.049	60/10.0	6.00	2.453	90/10.0	9.00	3.661
4	50/10.0	5.00	2.049	60/10.0	6.00	2.453	100/9.0	11.10	4.504
5	49/10.0	4.90	2.008	60/10.0	6.00	2.453	100/9.0	11.10	4.504
6	49/10.0	4.90	2.008	61/10.0	6.10	2.493	100/9.0	11.10	4.504
7	50/10.0	5.00	2.049	60/10.0	6.00	2.452	100/9.0	11.10	4.504
8	50/10.0	5.00	2.049	59/10.0	5.90	2.412	100/9.0	11.10	4.504
9	50/10.0	5.00	2.049	60/10.0	6.00	2.452	100/9.0	11.10	4.504
10	49/10.0	4.90	2.008	60/10.0	6.00	2.452	100/8.0	12.50	5.064
Avg.		4.97	2.036		6.03	2.465		11.03	4.476

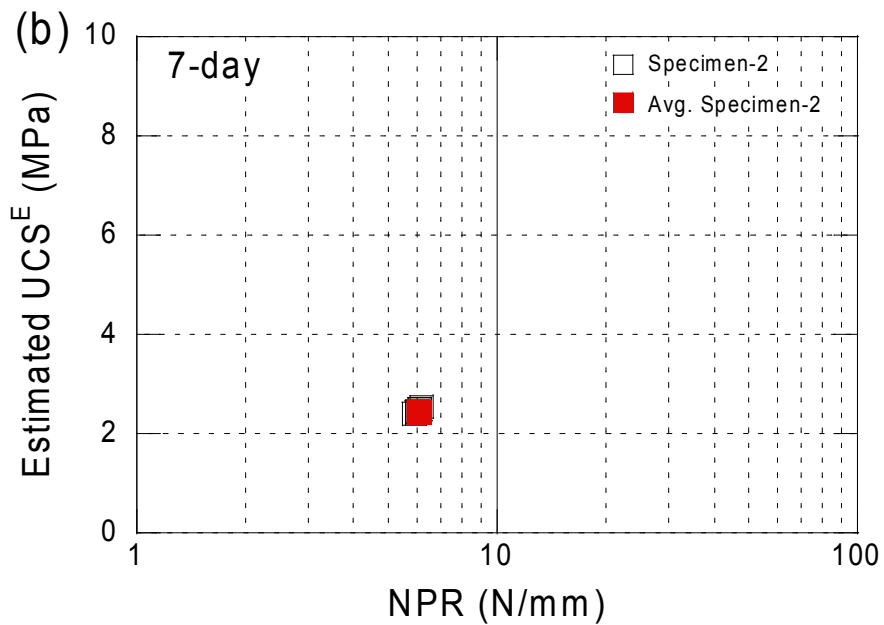
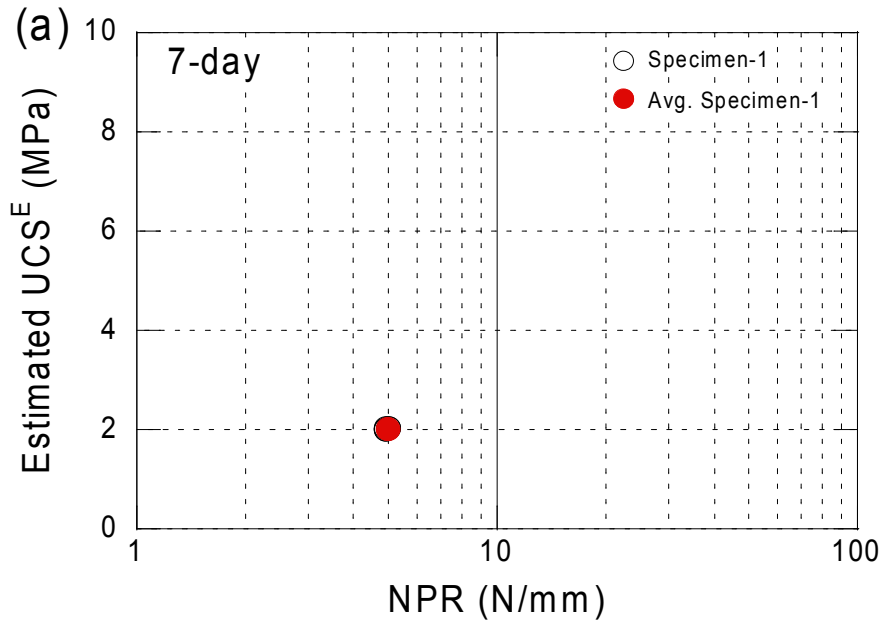


Figure 4-2. Relationship between NPR and estimated UCS^E in the case of curing period 7-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data.

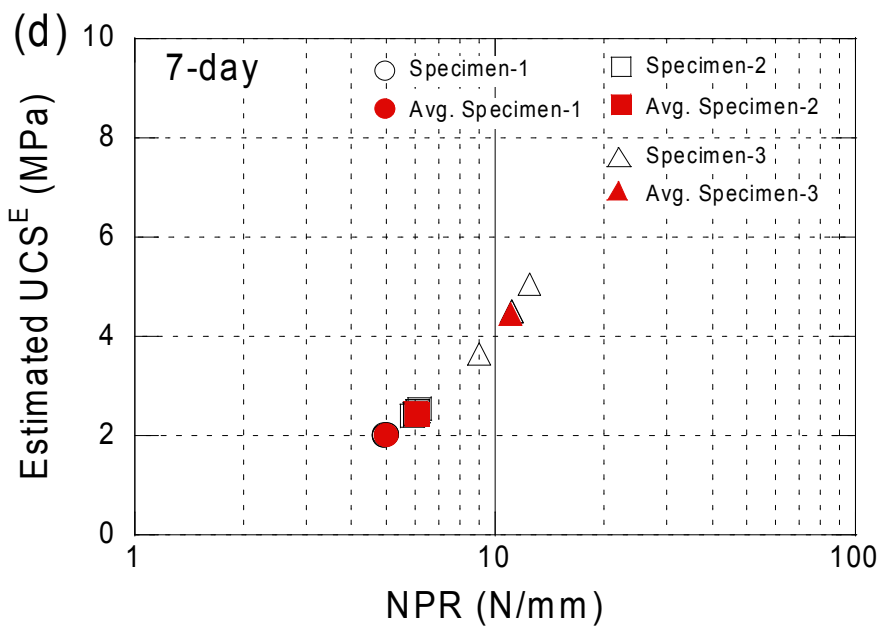
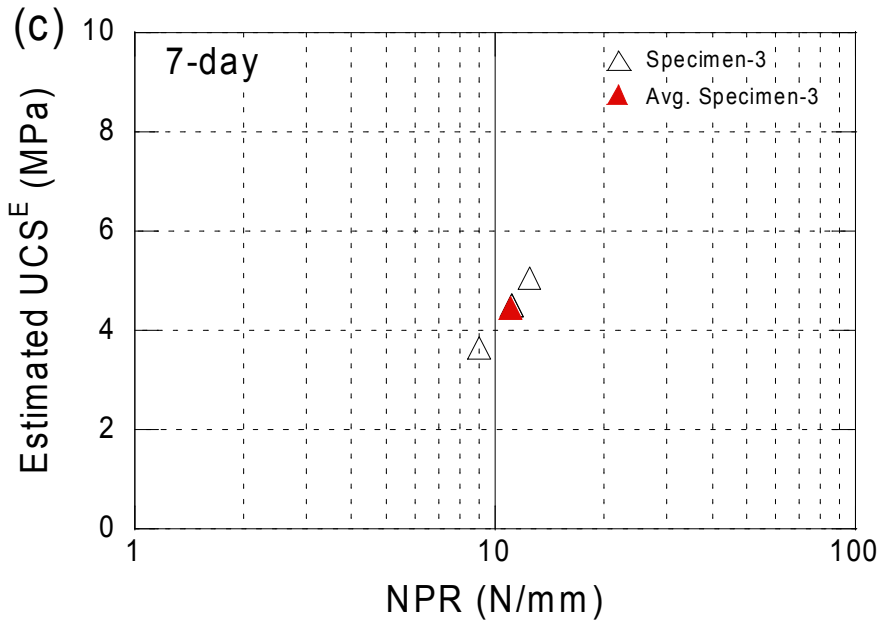


Figure 4-2. (Continued)

4.1.3 양생기간 14일

양생기간이 14일 일 때 배합비에 따른 침관입시험결과와 함께 이들로부터 추정된 일축압축강도를 정리하면 Table 4-3과 같다. 그리고 각 배합비에 따른 NPR-UCS관계를 Figure 4-3에 나타내었다. Specimen-1의 경우 침이 10 mm까지 관입할 때 관입하중은 68 N ~ 80 N이 작용하였고(Figure 4-3(a)), Specimen-2는 70 N ~ 95 N(Figure 4-3(b)), 그리고 Specimen-3은 모두가 침관입시험기의 최대 관입하중인 100 N까지 작용하였고 이때 침관입 깊이는 7.0 mm ~ 7.5 mm였다(Figure 4-3(c)). 벤토나이트의 배합비가 1.0인 Specimen-1과 0.7인 Specimen-2의 NPR값은 서로간의 차이가 크지 않은 반면, 0.5의 벤토나이트 배합비를 갖는 Specimen-3와는 큰 차이를 보였다(Figure 4-1(d)). 이것은 점토성분의 함량비가 NPR값에 미치는 영향이 큼을 의미한다. 측정한 NPR 값을 $NPR - UCS^E$ 상관관계식에 대입하여 UCS값을 추정하면, Specimen-1의 UCS^E 평균값은 3.120 MPa이고, Specimen-2는 3.540 MPa, 그리고 Specimen-3은 5.664 MPa로 각각 계산되었다. Stapledon and ISRM (1971)의 암종에 따른 암반분류와 Bieniawski (1979)의 암반분류에 따른 UCS값을 비교해보면, 양생 14일째 인공암반도 양생기간 3일과 7일의 경우와 같이 매우 약한 연약암석에 해당됨을 알 수 있다.

Table 4-3. The results of the needle penetration test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 14-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS^E: Estimated Uniaxial Compressive Strength.

Curing period : 14-day									
No.	Specimen-1 (C:B:W = 1.0:1.0:3.0)			Specimen-2 (C:B:W = 1.3:0.7:2.5)			Specimen-3 (C:B:W = 1.5:0.5:2.0)		
	Measured (N/mm)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	Measured (N/mm)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	Measured (N/mm)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)
1	80/10.0	8.00	3.259	70/10.0	7.00	2.856	100/7.0	14.29	5.778
2	75/10.0	7.50	3.058	90/10.0	9.00	3.661	100/7.5	13.33	5.398
3	75/10.0	7.50	3.058	90/10.0	9.00	3.661	100/7.5	13.33	5.398
4	80/10.0	8.00	3.259	90/10.0	9.00	3.661	100/7.0	14.29	5.778
5	80/10.0	8.00	3.259	90/10.0	9.00	3.661	100/7.0	14.29	5.778
6	75/10.0	7.50	3.058	90/10.0	9.00	3.661	100/7.5	13.33	5.398
7	75/10.0	7.50	3.058	75/10.0	7.50	3.058	100/7.0	14.29	5.778
8	75/10.0	7.50	3.058	90/10.0	9.00	3.661	100/7.0	14.29	5.778
9	80/10.0	8.00	3.259	90/10.0	9.00	3.661	100/7.0	14.29	5.778
10	68/10.0	6.80	2.776	95/10.0	9.50	3.861	100/7.0	14.29	5.778
Avg.		7.63	3.120		8.70	3.540		14.00	5.664

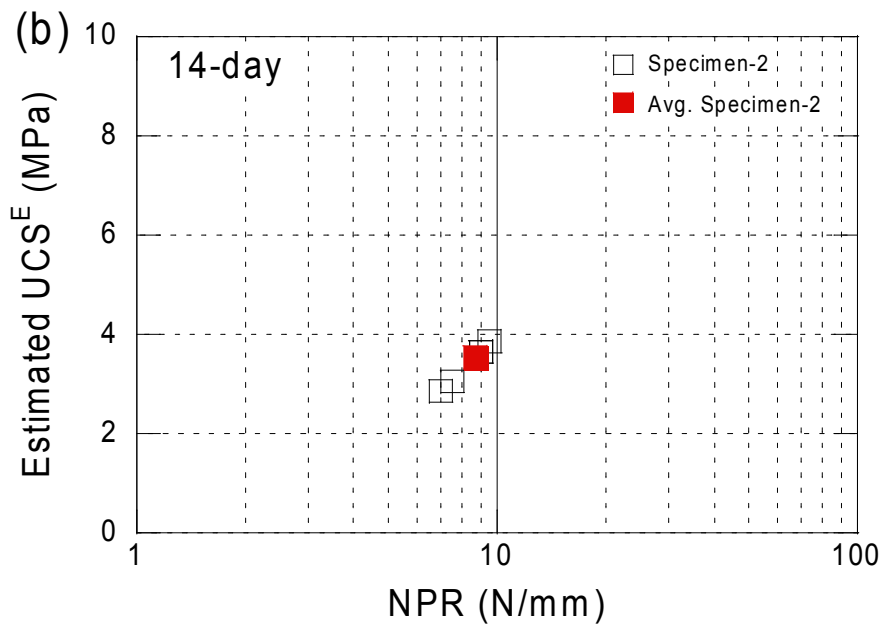
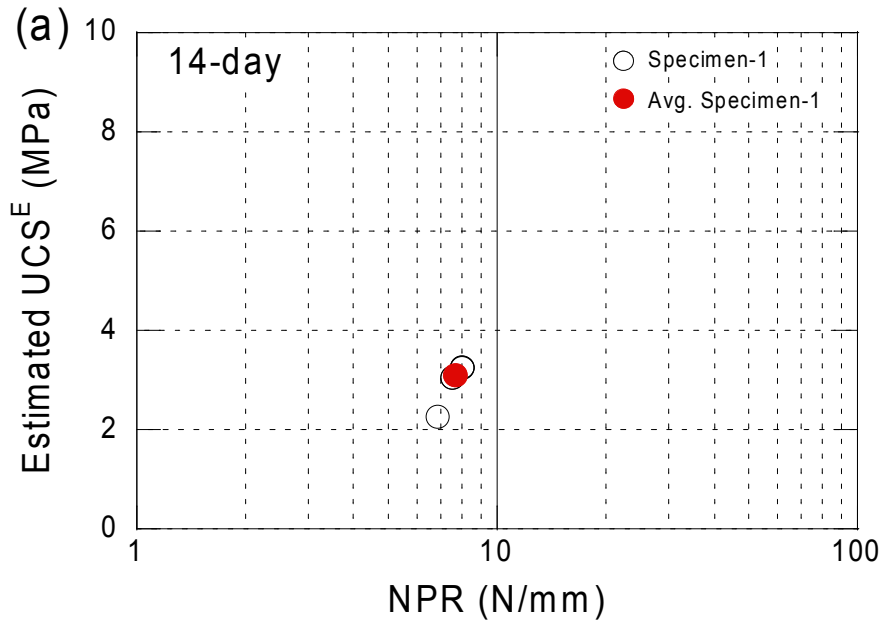


Figure 4-3. Relationship between NPR and estimated UCS^E in the case of curing period 14-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data.

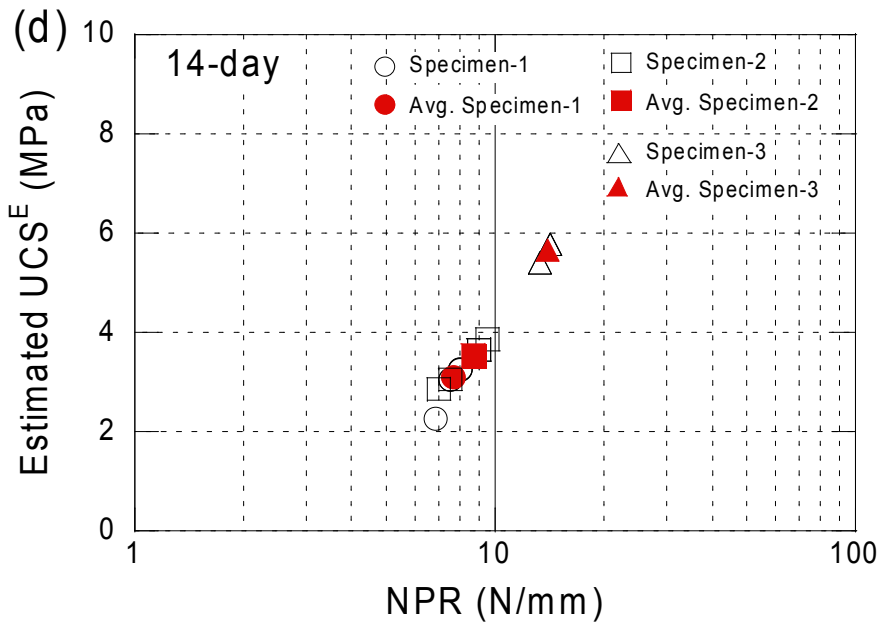
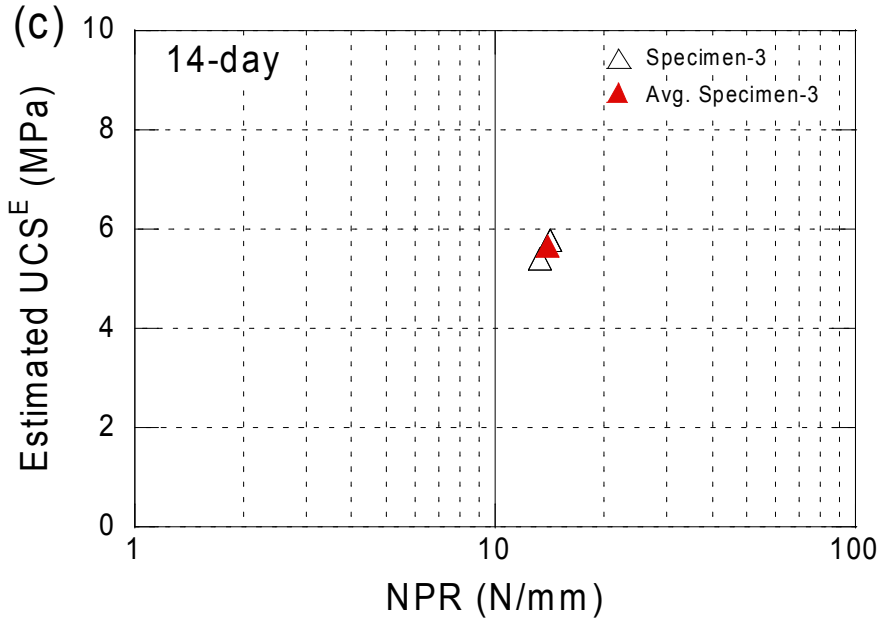


Figure 4-3 (Continued)

4.1.4 양생기간 21일

양생기간이 21일 일 때 배합비에 따른 침관입시험결과와 함께 이들로부터 추정된 일축압축강도를 정리하면 Table 4-4와 같다. 그리고 각 배합비에 따른 NPR-UCS관계를 Figure 4-4에 나타내었다. Specimen-1의 경우 침 관입깊이가 10 mm일 때 관입하중은 90 N ~ 100 N이었으며(Figure 4-4(a)), Specimen-2와 Specimen-3에서는 모두 최대관입하중인 100 N까지 작용하였으며, 이때 침관입 깊이는 Specimen-2는 8.5 mm ~ 9.0 mm(Figure 4-4(b)), Specimen-3은 5.5 mm ~ 6.5 mm(Figure 4-4(c))였다. 양생기간 7일에 대한 전체 시험결과를 살펴보면(Figure 4-4(d)), 시험편의 배합비 중 점토성분인 벤토나이트의 배합율이 낮을수록 NPR값이 증가하였으며, 이러한 경향은 양생시간 3일과 7일과 일치한다. 측정된 NPR 값을 $NPR - UCS^E$ 상관관계식에 대입하여 UCS값을 추정하면, Specimen-1의 UCS^E 평균값은 3.716 MPa이며, Specimen-2에서는 4.870 MPa, 그리고 Specime-3의 경우 6.747 MPa로 나타났다. 암반분류(Stapledon and ISRM, 1971; Bieniawski, 1979)에 따른 UCS값을 비교해보면, 양생 21일째 인공암반은 약한 연약암석 범위에 포함된다.

Table 4-4. The results of the needle penetration test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 21-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS^E: Estimated Uniaxial Compressive Strength.

Curing period : 21-day									
No.	Specimen-1 (C:B:W = 1.0:1.0:3.0)			Specimen-2 (C:B:W = 1.3:0.7:2.5)			Specimen-3 (C:B:W = 1.5:0.5:2.0)		
	Measured (N/mm)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	Measured (N/mm)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	Measured (N/mm)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)
1	90/10.0	9.00	3.661	100/9.0	11.11	4.508	100/5.5	18.18	7.333
2	100/10.0	10.00	4.063	100/9.0	11.11	4.508	100/6.0	16.67	6.729
3	90/10.0	9.00	3.661	100/9.0	11.11	4.508	100/6.0	16.67	6.729
4	90/10.0	9.00	3.661	100/9.0	11.11	4.508	100/6.0	16.67	6.729
5	90/10.0	9.00	3.661	100/8.5	11.76	4.770	100/6.0	16.67	6.729
6	90/10.0	9.00	3.661	100/9.0	11.10	4.508	100/5.5	18.18	7.333
7	90/10.0	9.00	3.661	100/8.5	11.76	4.770	100/6.0	16.67	6.729
8	95/10.0	9.50	3.862	100/9.0	11.11	4.508	100/6.5	15.38	6.218
9	95/10.0	9.50	3.862	100/9.0	11.11	4.508	100/6.5	15.38	6.218
10	95/10.0	9.50	3.862	100/8.5	11.76	4.770	100/6.0	16.67	6.729
Avg.		9.25	3.761		11.30	4.587		16.71	6.747

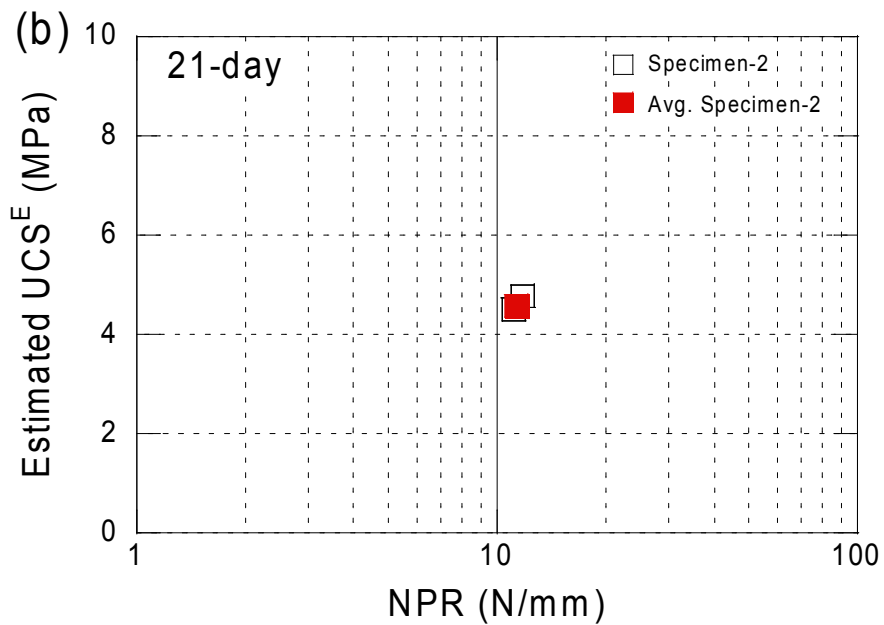
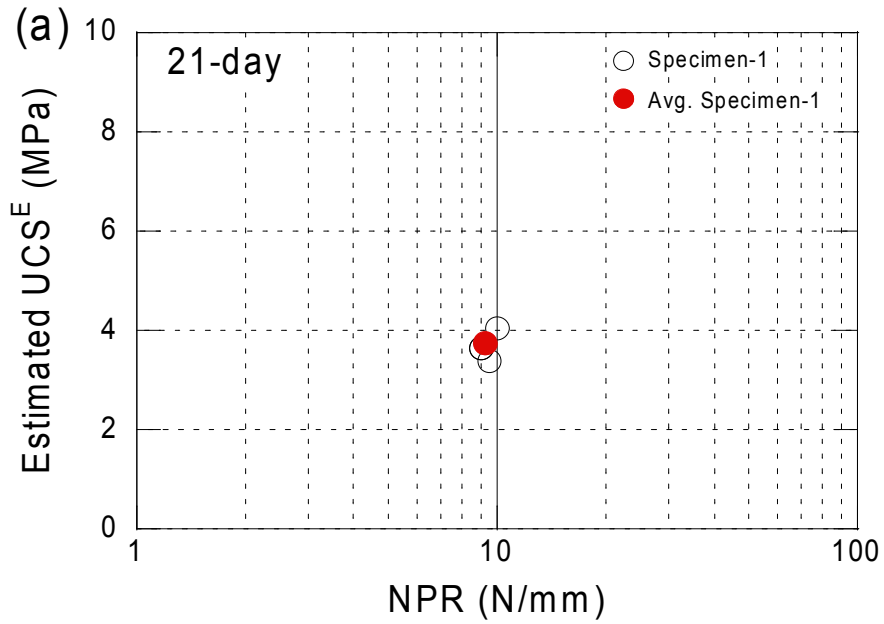


Figure 4-4. Relationship between NPR and estimated UCS^E in the case of curing period 21-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data.

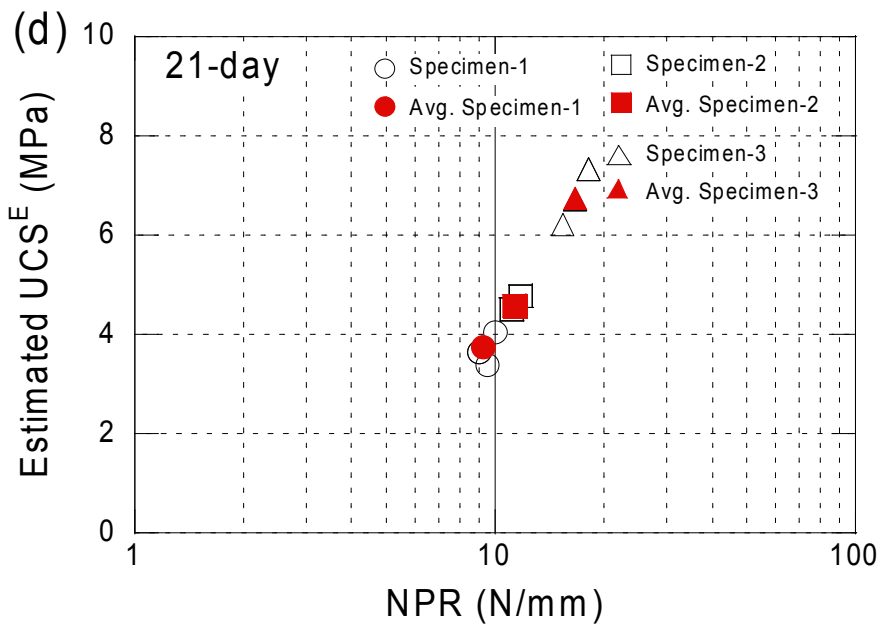
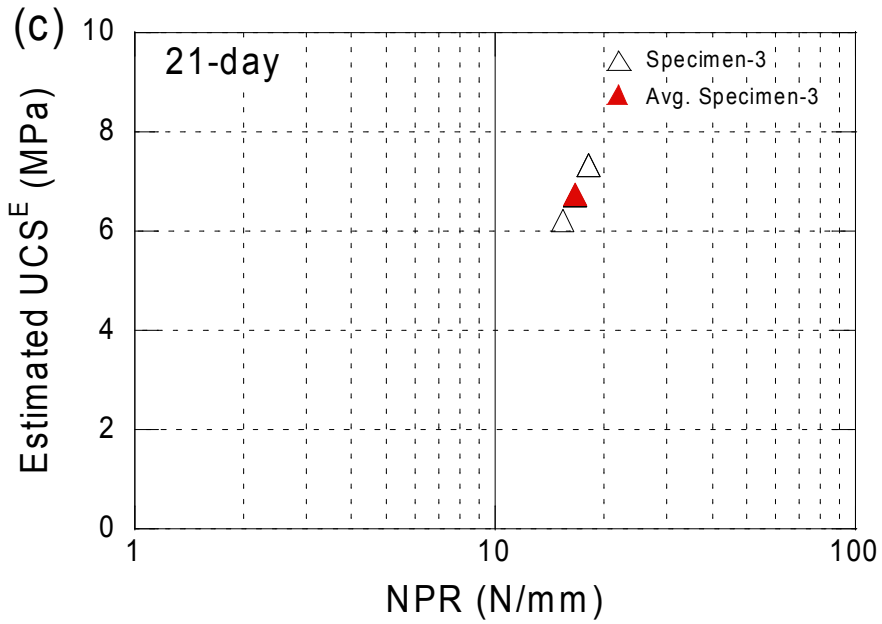


Figure 4-4 (Continued)

4.1.5 양생기간 28일

양생기간이 28일 일 때 배합비에 따른 침관입시험결과와 함께 이들로부터 추정된 일축압축강도를 정리하면 Table 4-5와 같다. 그리고 각 배합비에 따른 NPR-UCS관계를 Figure 4-5에 나타내었다. Specimen-1의 경우 양생기간이 21일을 지나면서 시험편 내외부에서부터 균열이 심하게 진행되어 양생기간이 28일에 대한 NPR은 측정이 불가능하였다. Specimen-2와 Specimen-3에서는 모두 최대관입하중인 100 N까지 작용하였으며, 이때 침관입 깊이는 Specimen-2는 8.5 mm ~ 9.0 mm(Figure 4-5(a)), Specimen-3은 5.5 mm ~ 6.5 mm(Figure 4-5(b))로 양생기간 21일의 결과와 거의 같게 나타났다. 양생기간 28일에 대한 전체 시험결과를 살펴보면(Figure 4-5(c)), 시험편의 배합비 중 점토성분인 벤토나이트의 배합율이 높을수록 NPR값이 감소하였으며, 이러한 경향은 양생시간 3일, 7일, 14일, 21일의 결과와도 일치한다. 이것은 점토성분의 함량비가 NPR값에 미치는 영향이 크음을 의미한다. 측정된 NPR값을 NPR - UCS 상관관계식에 대입하여 UCS값을 추정하면, Specimen-2의 UCS^E평균값은 4.694 MPa이고, Specimen-3은 6.965 MPa로 각각 계산되었다. Stapledon and ISRM (1971)의 암종에 따른 암반분류와 Bieniawski (1979)의 암반분류에 따른 UCS값을 비교해보면, 양생 28일째 인공암반도 양생기간 21일의 경우와 같이 약한 연약암석에 해당됨을 알 수 있다.

Table 4-5. The results of the needle penetration test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 28-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS^E: Estimated Uniaxial Compressive Strength.

Curing period : 28-day									
No.	Specimen-1 (C:B:W = 1.0:1.0:3.0)			Specimen-2 (C:B:W = 1.3:0.7:2.5)			Specimen-3 (C:B:W = 1.5:0.5:2.0)		
	Measured (N/mm)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	Measured (N/mm)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	Measured (N/mm)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)
1	-	-	-	100/8.5	11.76	4.770	100/5.5	18.18	7.333
2	-	-	-	100/8.5	11.76	4.770	100/5.5	18.18	7.333
3	-	-	-	100/8.0	12.50	5.064	100/6.0	16.67	6.729
4	-	-	-	100/8.6	11.63	4.715	100/5.5	18.18	7.333
5	-	-	-	100/8.9	11.24	4.558	100/5.5	18.18	7.333
6	-	-	-	100/8.5	11.76	4.770	100/5.8	17.24	6.958
7	-	-	-	100/9.0	11.11	4.508	100/5.8	17.24	6.958
8	-	-	-	100/9.0	11.11	4.508	100/6.0	16.67	6.729
9	-	-	-	100/8.5	11.76	4.770	100/6.5	15.38	6.217
10	-	-	-	100/9.0	11.11	4.508	100/6.0	16.67	6.729
Avg.		-	-		11.58	4.694		17.30	6.965

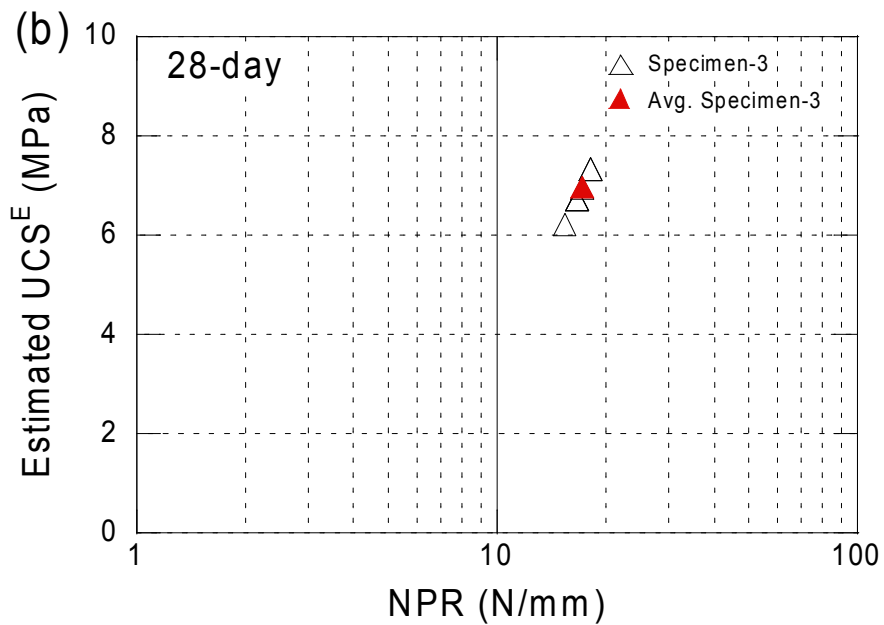
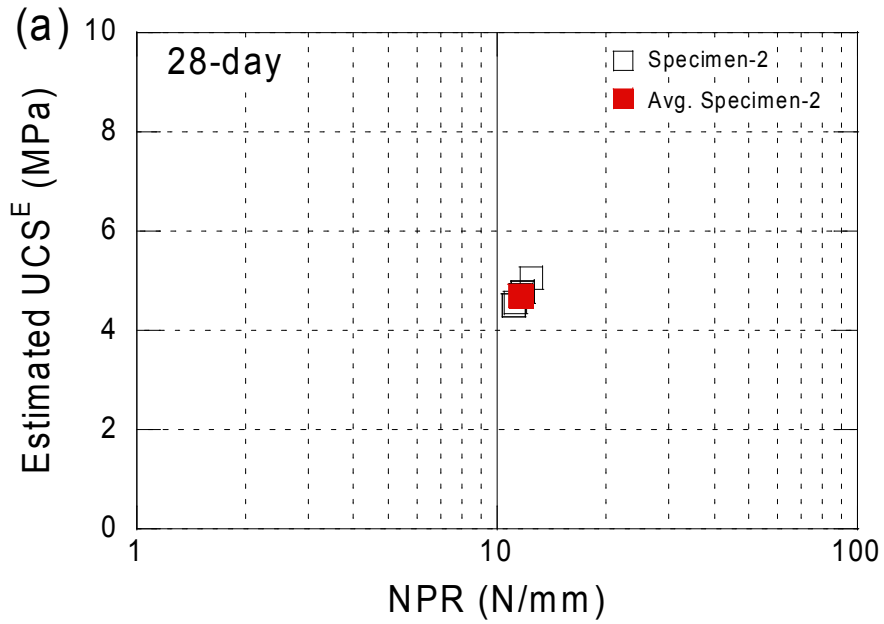


Figure 4-5. Relationship between NPR and estimated UCS^E in the case of curing period 28-day, (a) Specimen-2, (b) Specimen-3, (c) all data.

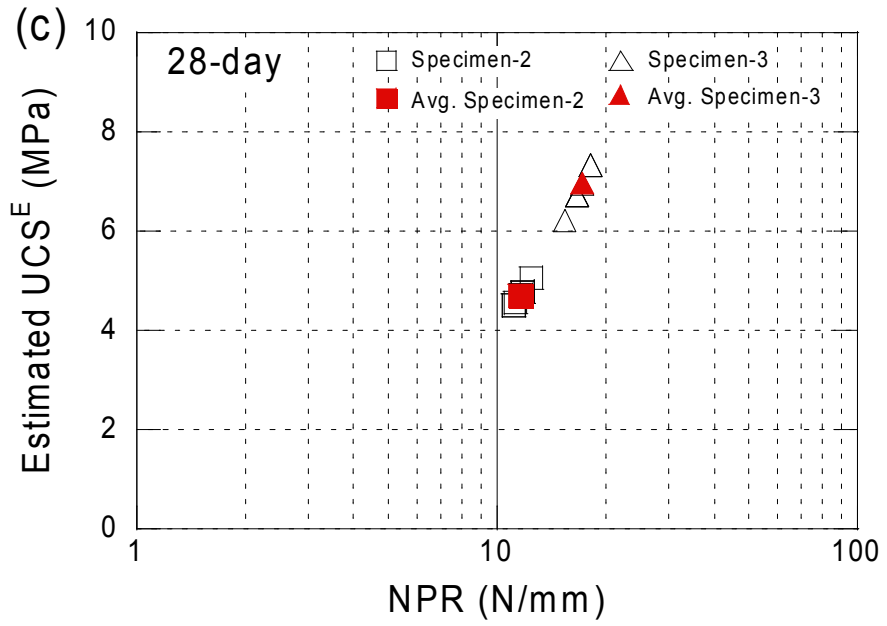


Figure 4-5 (Continued)

4.1.6 양생기간에 따른 NPR-UCS^E 상관관계

양생기간 3일, 7일, 14일, 21일, 28일에 대한 NPR-UCS^E관계를 전체 도시하면 Figure 4-6과 같다. 그림에서 보이는 바와 같이 10이하의 낮은 NPR 범위에서는 추정 UCS가 완만한 증가 양상을 나타내지만, 10이상에서는 급한 증가 양상을 나타냈다. 또한 양생기간이 3일, 7일, 14일에서의 NPR은 넓게 분포를 보인 반면, 21일과 28일에는 좁은 분포를 나타냈다. 결과적으로 NPR-UCS^E관계는 시험편의 양생기간에 따라 차이를 보이며, 특히 점토성분인 벤토나이트의 함량비에 따라 큰 차이가 나타나 점토성분의 함량비가 NPR값에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

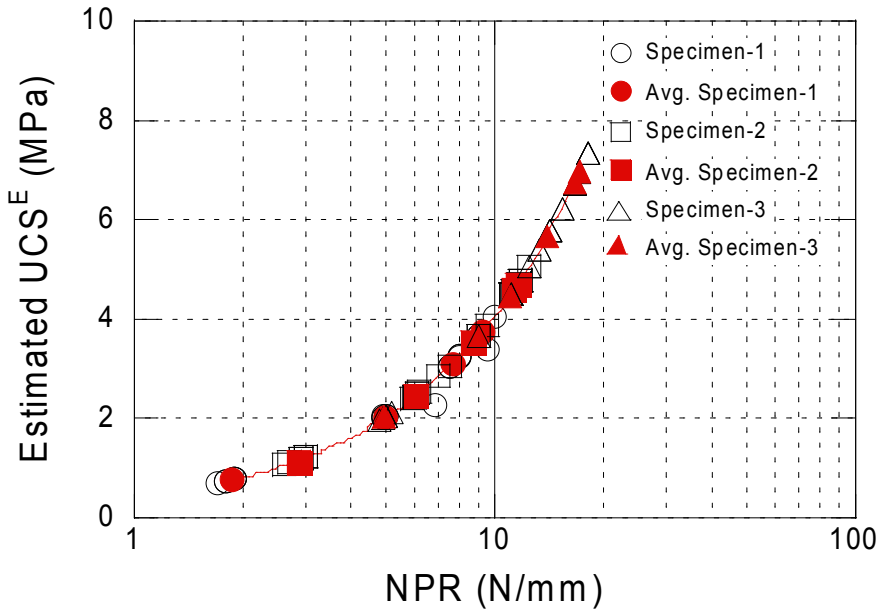


Figure 4-6. Relationship between NPR and estimated UCS^E in all cases.

4.2 일축압축시험결과

침관입시험으로부터 계산된 일축압축강도 추정값과 실제 일축압축시험에 의한 결과값을 비교하여 연약암반에 대한 일축압축강도 추정시험법으로 그 적용 가능성을 평가하고자 배합비와 양생기간에 따른 일축압축시험을 실시하였다. 침관입시험으로부터 측정된 NPR과 일축압축시험을 통하여 측정된 UCS^M결과를 정리하면 아래와 같다.

4.2.1 양생기간 3일

양생기간 3일 일 때 배합비에 따른 일축압축시험 결과를 정리하면 Table 4-6과 같으며, 각 시험편의 NPR에 대한 UCS^M을 Figure 4-7에 도시하였다. Specimen-1의 경우 측정 UCS^M값은 평균 0.490 MPa로 침관입시험을 통한 추정 UCS^E값의 평균 0.771 MPa보다 0.281 MPa 낮은 값을 보였다(Figure 4-7(a)). Specimen-2에 있어서 측정 UCS^M값은 평균 1.030 MPa로 침관입시험을 통한 추정 UCS^E값의 평균 1.184 MPa보다 0.154 MPa 낮은 값을 나타냈다(Figure 4-7(b)). 또한 Specimen-3의 측정 UCS^M값은 평균 1.593 MPa였으며, 침관입시험을 통한 추정 UCS^E값의 평균 2.024 MPa보다 0.431 MPa 낮은 값을 나타냈다(Figure 4-7(c)). 즉, 모든 시험편에서 측정 평균 UCS^M값이 추정 평균 UCS^E값보다 작게 나타났다(Figure 4-7(d)). 이것은 시료 표면에서 이루어지는 침관입시험에 의한 일축압축강도 추정값은 실제 일축압축강도 시험에 의한 측정값과 차이가 있음을 지시한다.

침관입시험을 통하여 시멘트의 배합비가 상대적으로 증가할수록, 그리고 양생기간이 길어질수록 NPR값이 증가하였는데, 이러한 현상은 측정된 UCS^M결과에서도 같은 양상을 보였다. 측정된 UCS^M결과를 Stapledon and ISRM(1971)과 Bieniawski(1979)이 제안한 암반분류에 적용한 결과 양생 3일째 인공암반은 매우 약한 연약암석에 해당되었다.

Table 4-6. The results of the uniaxial compression test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 3-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS^E : Estimated Uniaxial Compressive Strength, UCS^M :Measured Uniaxial Compressive Strength.

Curing period : 3-day									
No.	Specimen-1 (C:B:W = 1.0:1.0:3.0)			Specimen-2 (C:B:W = 1.3:0.7:2.5)			Specimen-3 (C:B:W = 1.5:0.5:2.0)		
	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	UCS ^M (MPa)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	UCS ^M (MPa)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	UCS ^M (MPa)
1	1.80	0.747	0.490	3.00	1.237	1.078	5.00	2.049	1.471
2	1.90	0.788	0.490	3.00	1.237	0.980	4.80	1.968	1.471
3	1.90	0.788	-	2.60	1.074	0.980	4.80	1.968	1.569
4	1.90	0.788	-	2.60	1.074	1.078	4.80	1.968	1.863
5	1.80	0.747	-	3.00	1.237	-	5.00	2.049	-
6	1.90	0.788	-	2.70	1.115	-	5.00	2.049	-
7	1.90	0.788	-	2.90	1.196	-	4.90	2.009	-
8	1.90	0.788	-	3.00	1.237	-	4.90	2.009	-
9	1.70	0.706	-	3.00	1.237	-	5.00	2.049	-
10	1.90	0.788	-	2.90	1.196	-	5.20	2.130	-
Avg.	1.86	0.771	0.490	2.87	1.184	1.030	4.94	2.024	1.593

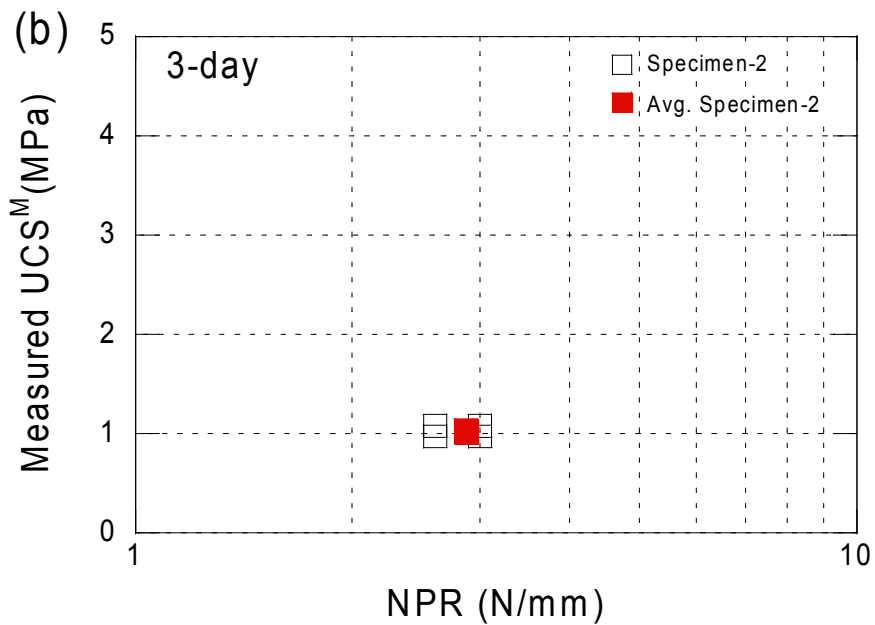
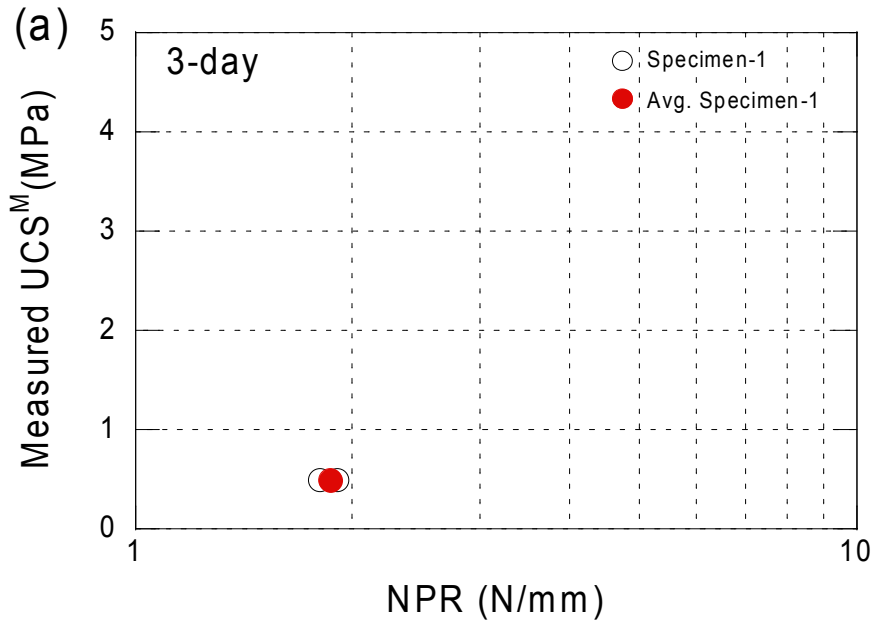


Figure 4-7. Relationship between NPR and measured UCS^M in the case of curing period 3-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data.

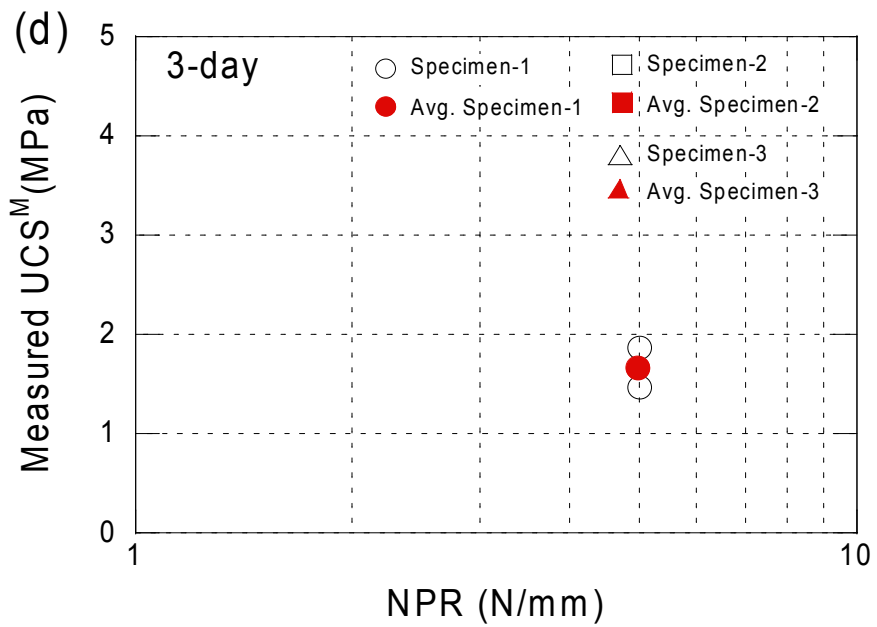
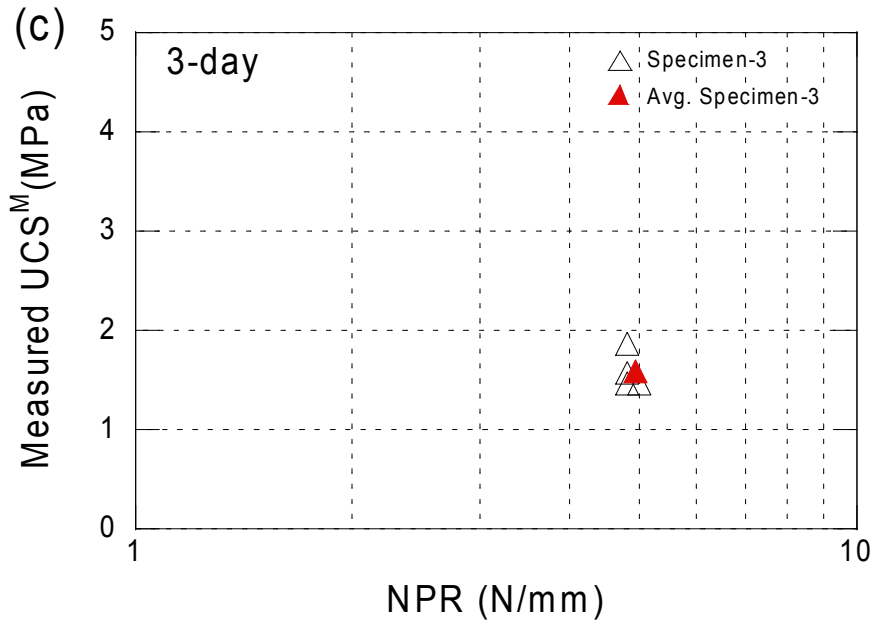


Figure 4-7. (Continued)

4.2.2 양생기간 7일

양생기간 7일에 대한 배합비에 따른 일축압축시험 결과를 정리하면 Table 4-7과 같으며, 각 시험편의 NPR에 대한 UCS^M을 Figure 4-8에 도시하였다. Specimen-1의 경우 측정 UCS^M값은 평균 1.667 MPa (Figure 4-8(a)), Specimen-2는 2.673 MPa (Figure 4-8(b)), Specimen-3은 3.506 MPa (Figure 4-8(c))의 결과를 각각 보였다. 양생기간 7일에서는 Specimen-2를 제외한 시험편에서 측정 평균 UCS^M값이 추정 평균 UCS^E값보다 작게 나타났다(Figure 4-8(d)). 측정된 UCS^M결과를 Stapledon and ISRM(1971)과 Bieniawski(1979)이 제안한 암반분류에 적용한 결과 양생 7일째 인공암반은 매우 약한 연약암석에 해당되었다.

Table 4-7. The results of the uniaxial compression test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 7-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS^E : Estimated Uniaxial Compressive Strength, UCS^M :Measured Uniaxial Compressive Strength.

Curing period : 7-day									
No.	Specimen-1 (C:B:W = 1.0:1.0:3.0)			Specimen-2 (C:B:W = 1.3:0.7:2.5)			Specimen-3 (C:B:W = 1.5:0.5:2.0)		
	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	UCS ^M (MPa)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	UCS ^M (MPa)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	UCS ^M (MPa)
1	1.80	2.049	1.863	3.00	2.493	2.648	5.00	4.504	3.334
2	1.90	2.049	1.471	3.00	2.534	2.942	4.80	4.504	2.746
3	1.90	2.049	-	2.60	2.453	2.550	4.80	3.661	4.413
4	1.90	2.049	-	2.60	2.453	2.550	4.80	4.504	3.530
5	1.80	2.008	-	3.00	2.453	-	5.00	4.504	-
6	1.90	2.008	-	2.70	2.493	-	5.00	4.504	-
7	1.90	2.049	-	2.90	2.452	-	4.90	4.504	-
8	1.90	2.049	-	3.00	2.412	-	4.90	4.504	-
9	1.70	2.049	-	3.00	2.452	-	5.00	4.504	-
10	1.90	2.008	-	2.90	2.452	-	5.20	5.064	-
Avg.	1.86	2.036	1.667	2.87	2.465	2.673	4.94	4.476	3.506

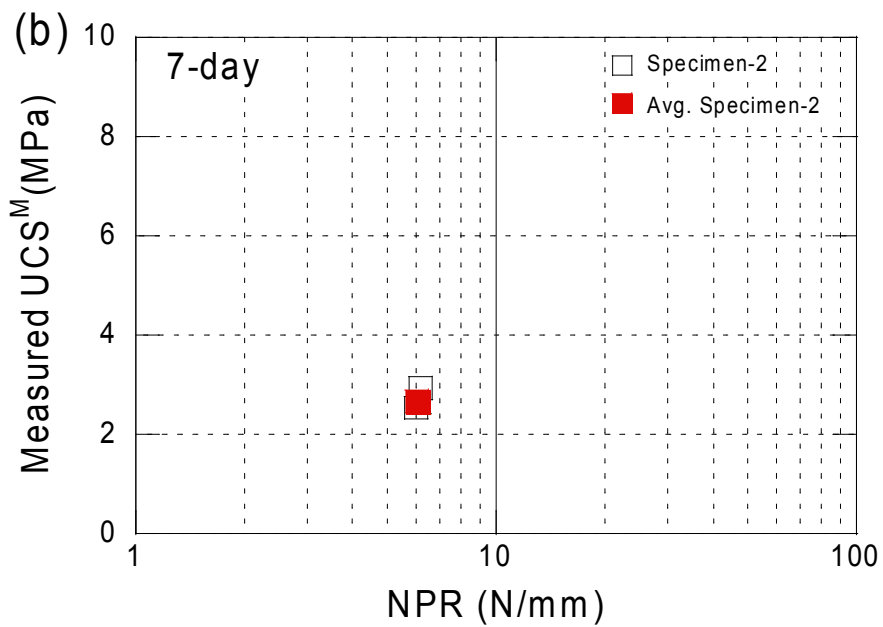
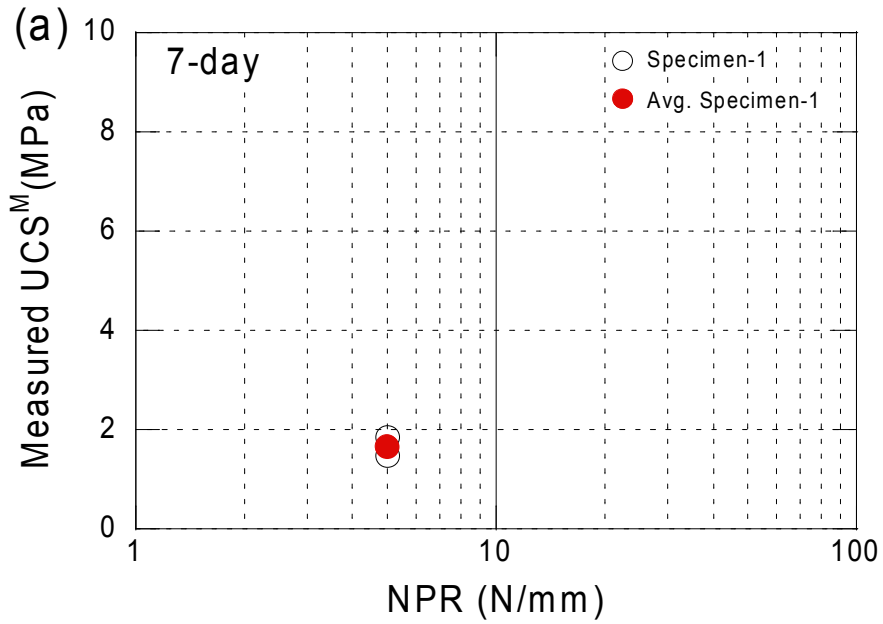


Figure 4-8. Relationship between NPR and measured UCS^M in the case of curing period 7-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data.

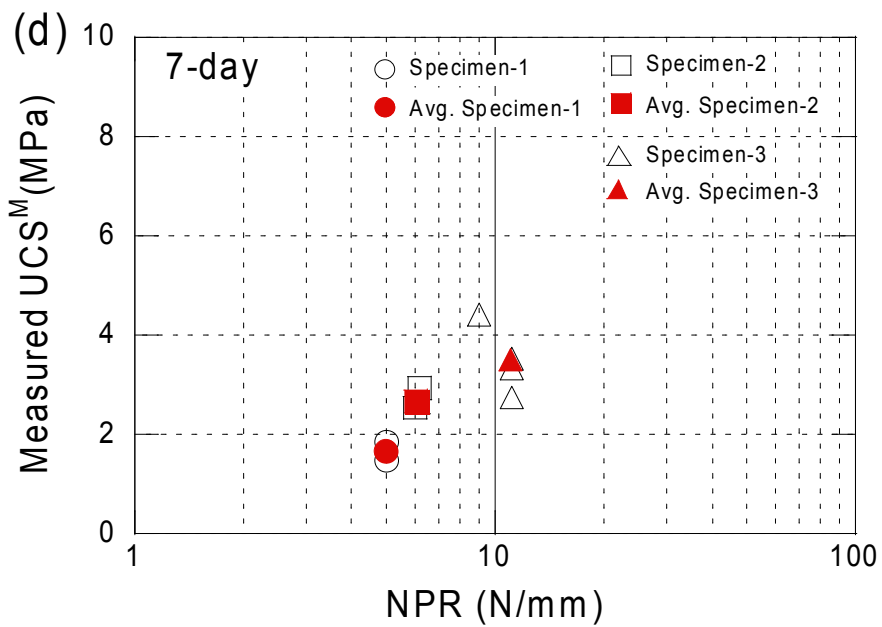
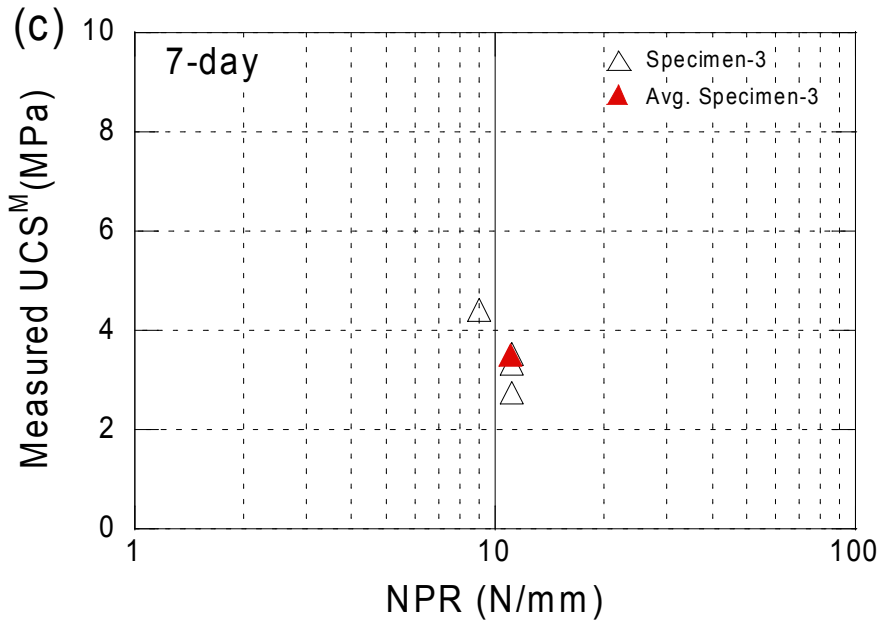


Figure 4-8. (Continued)

4.2.3 양생기간 14일

양생기간 14일에 대한 배합비에 따른 일축압축시험 결과를 정리하면 Table 4-8과 같으며, 각 시험편의 NPR에 대한 UCS^M을 Figure 4-9에 도시하였다. Specimen-1의 경우 측정 UCS^M값은 평균 3.481 MPa (Figure 4-9(a)), Specimen-2는 3.374 MPa (Figure 4-9(b)), Specimen-3은 5.222 MPa (Figure 4-9(c))의 결과를 각각 보였다. 양생기간 14일에 대한 전체 결과를 도시해 볼 때(Figure 4-9(d)) Specimen-1과 Specimen-2의 UCS^M값은 거의 차이를 보이지 않은 반면 Specimen-3과는 큰 차이를 나타냈다. 측정된 UCS^M결과를 Stapledon and ISRM(1971)과 Bieniawski(1979)이 제안한 암반분류에 적용한 결과 양생 14일째 인공암반은 매우 약한 연약암석에 해당되었다.

Table 4-8. The results of the uniaxial compression test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 14-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS^E : Estimated Uniaxial Compressive Strength, UCS^M :Measured Uniaxial Compressive Strength.

Curing period : 14-day									
No.	Specimen-1 (C:B:W = 1.0:1.0:3.0)			Specimen-2 (C:B:W = 1.3:0.7:2.5)			Specimen-3 (C:B:W = 1.5:0.5:2.0)		
	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	UCS ^M (MPa)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	UCS ^M (MPa)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	UCS ^M (MPa)
1	1.80	3.259	3.530	3.00	2.856	4.119	5.00	5.778	5.198
2	1.90	3.058	3.432	3.00	3.661	3.432	4.80	5.398	5.198
3	1.90	3.058	-	2.60	3.661	3.385	4.80	5.398	5.296
4	1.90	3.259	-	2.60	3.661	4.119	4.80	5.778	5.198
5	1.80	3.259	-	3.00	3.661	-	5.00	5.778	-
6	1.90	3.058	-	2.70	3.661	-	5.00	5.398	-
7	1.90	3.058	-	2.90	3.058	-	4.90	5.778	-
8	1.90	3.058	-	3.00	3.661	-	4.90	5.778	-
9	1.70	3.259	-	3.00	3.661	-	5.00	5.778	-
10	1.90	2.776	-	2.90	3.861	-	5.20	5.778	-
Avg.	1.86	3.120	3.481	2.87	3.540	3.374	4.94	5.664	5.222

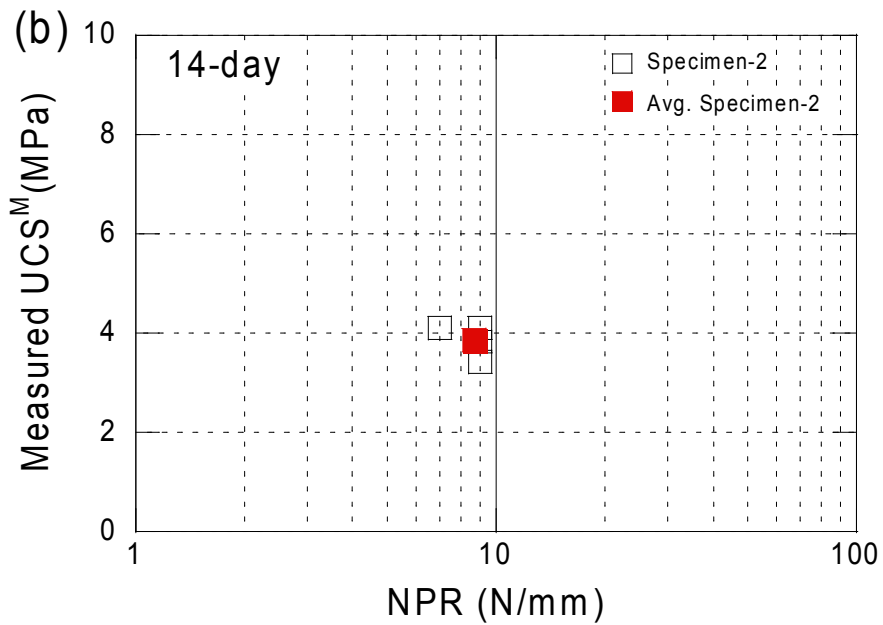
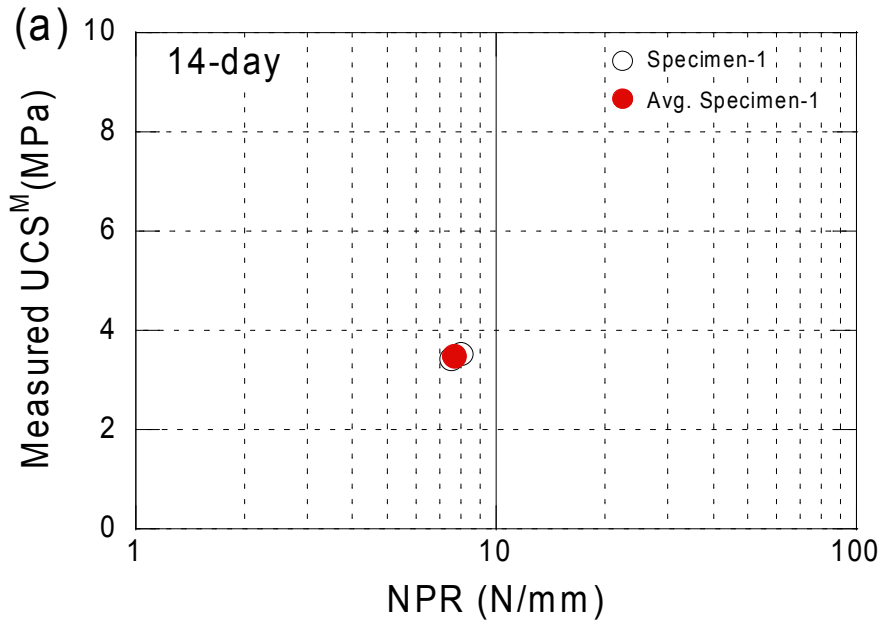


Figure 4-9. Relationship between NPR and measured UCS^M in the case of curing period 14-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data.

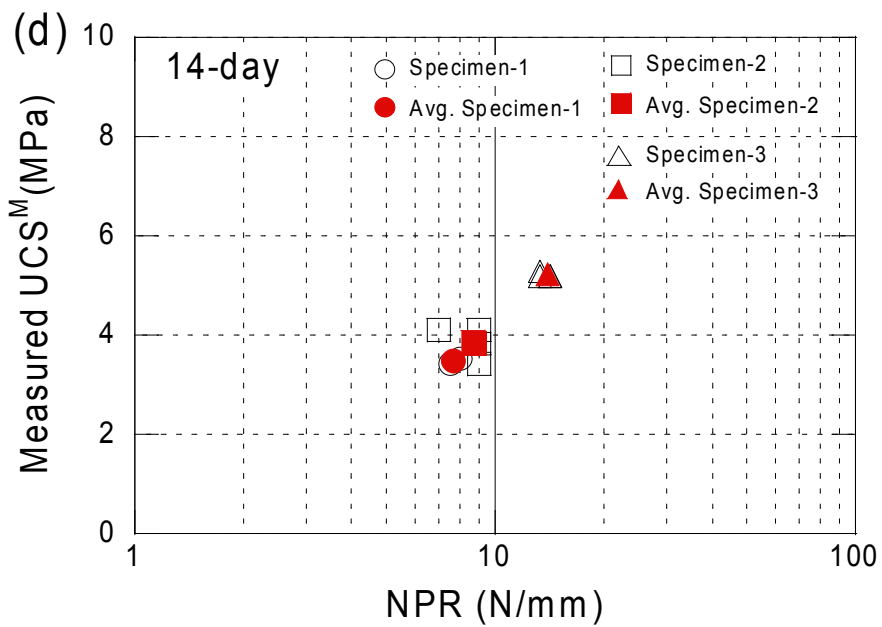
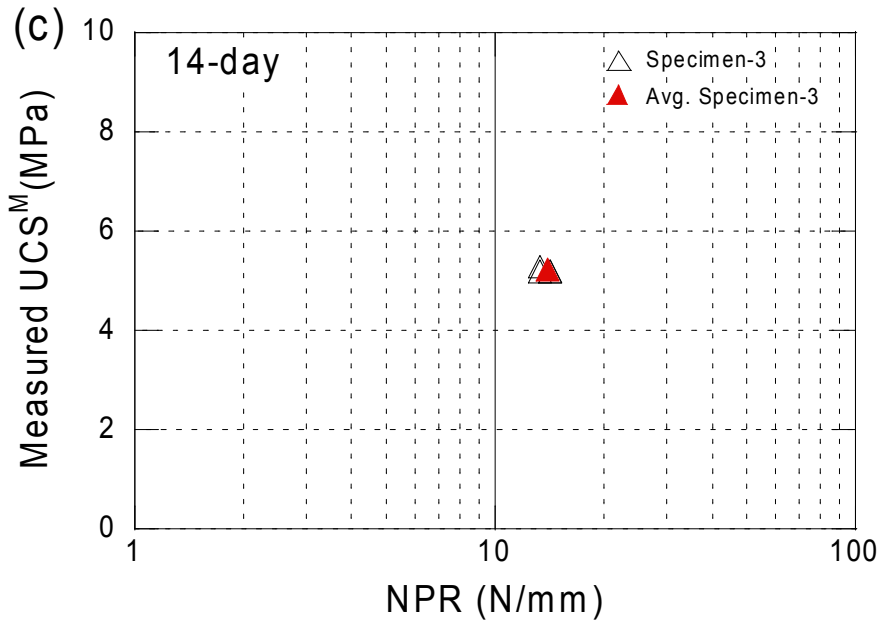


Figure 4-9. (Continued)

4.2.4 양생기간 21일

양생기간 21일에 대한 배합비에 따른 일축압축시험 결과를 정리하면 Table 4-9와 같으며, 각 시험편의 NPR에 대한 UCS^M을 Figure 4-10에 도시하였다. Specimen-1의 경우 측정 UCS^M값은 평균 4.070 MPa (Figure 4-10(a)), Specimen-2는 4.683 MPa (Figure 4-10(b)), Specimen-3은 6.914 MPa (Figure 4-10(c))의 결과를 각각 보였다. 양생기간 21일에서는 측정 평균 UCS^M값이 추정 평균 UCS^E값보다 높게 나타나(Figure 4-10(d)) 양생기간 3일, 7일, 14일의 결과와는 다름을 보였다. 측정된 UCS^M결과를 Stapledon and ISRM(1971)과 Bieniawski(1979)이 제안한 암반분류에 적용한 결과 양생 21일째 인공암반은 약한 연약암석에 해당되었다.

Table 4-9. The results of the uniaxial compression test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 21-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS^E : Estimated Uniaxial Compressive Strength, UCS^M :Measured Uniaxial Compressive Strength.

Curing period : 21-day									
No.	Specimen-1 (C:B:W = 1.0:1.0:3.0)			Specimen-2 (C:B:W = 1.3:0.7:2.5)			Specimen-3 (C:B:W = 1.5:0.5:2.0)		
	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	UCS ^M (MPa)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	UCS ^M (MPa)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	UCS ^M (MPa)
1	1.80	3.661	4.217	3.00	4.508	4.903	5.00	7.333	7.061
2	1.90	4.063	3.923	3.00	4.508	5.001	4.80	6.729	6.570
3	1.90	3.661	-	2.60	4.508	4.903	4.80	6.729	7.061
4	1.90	3.661	-	2.60	4.508	3.923	4.80	6.729	6.963
5	1.80	3.661	-	3.00	4.770	-	5.00	6.729	-
6	1.90	3.661	-	2.70	4.508	-	5.00	7.333	-
7	1.90	3.661	-	2.90	4.770	-	4.90	6.729	-
8	1.90	3.862	-	3.00	4.508	-	4.90	6.218	-
9	1.70	3.862	-	3.00	4.508	-	5.00	6.218	-
10	1.90	3.862	-	2.90	4.770	-	5.20	6.729	-
Avg.	1.86	3.761	4.070	2.87	4.587	4.683	4.94	6.747	6.914

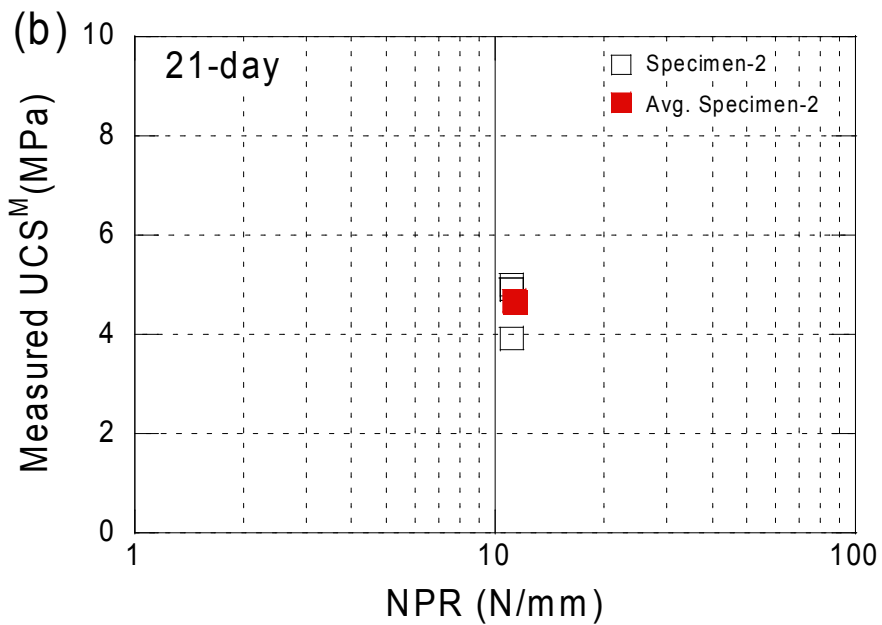
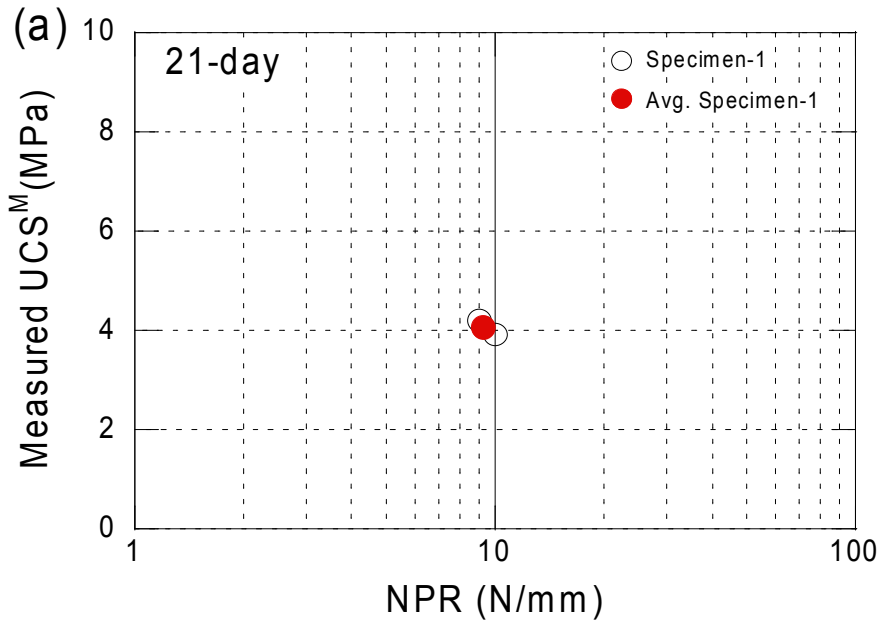


Figure 4-10. Relationship between NPR and measured UCS^M in the case of curing period 21-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data.

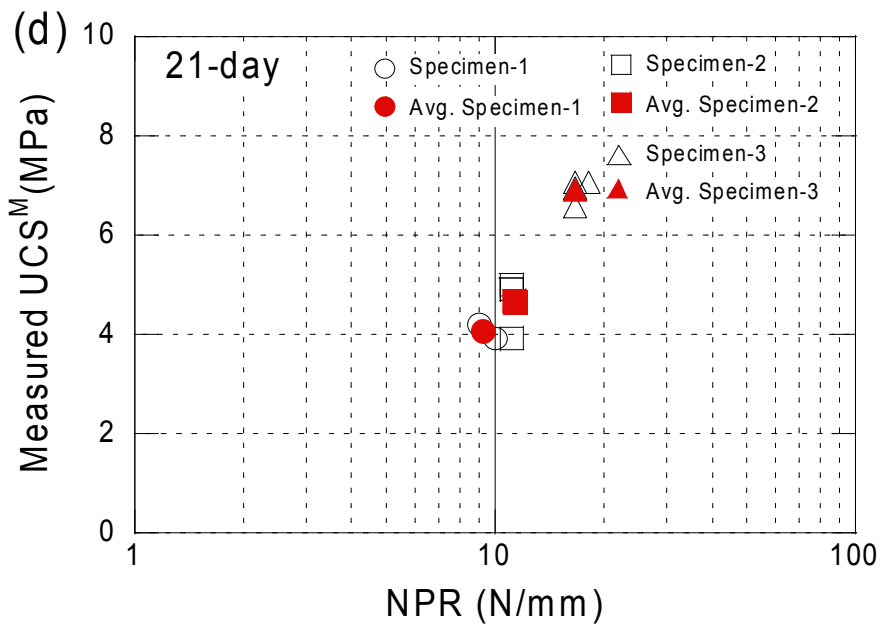
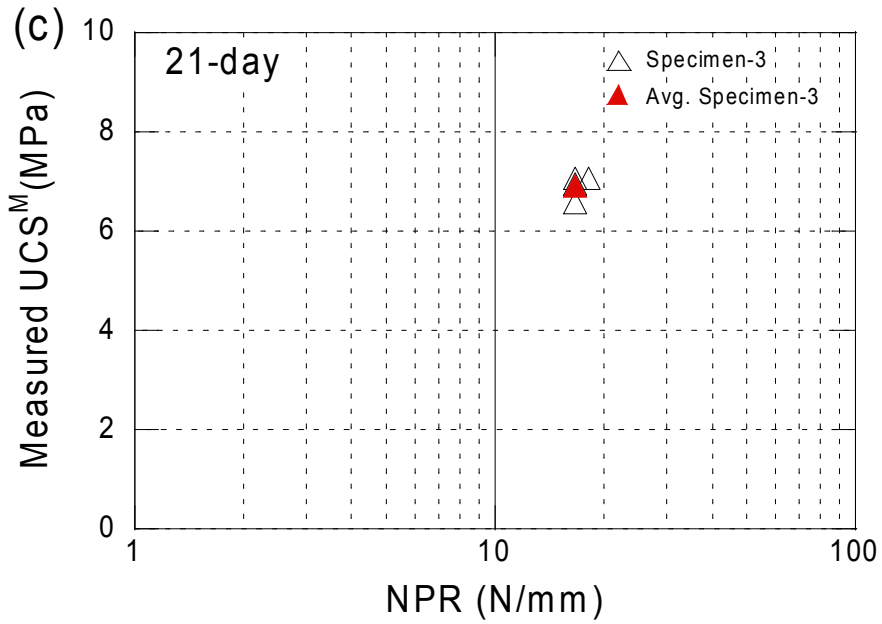


Figure 4-10. (Continued)

4.2.5 양생기간 28일

양생기간 28일에 대한 배합비에 따른 일축압축시험 결과를 정리하면 Table 4-10과 같으며, 각 시험편의 NPR에 대한 UCS^M을 Figure 4-11에 도시하였다. Specimen-1의 경우 21일을 지나면서 시험편의 내외부에서 균열이 심하게 발생하여 양생기간이 28일에 대한 일축압축시험은 수행할 수 없었다. Specimen-2의 경우 측정 UCS^M값은 평균 6.865 MPa (Figure 4-11(a)), Specimen-3은 8.924 MPa (Figure 4-11(b))의 결과를 각각 보였다. 양생기간 28일에 대한 전체 결과를 도시해 볼 때(Figure 4-11(c)), 측정 UCS^M값이 추정값보다 매우 높게 나타났다. 측정된 UCS^M결과를 Stapledon and ISRM(1971)과 Bieniawski(1979)이 제안한 암반분류에 적용한 결과 양생 28일째 인공암반은 약한 연약암석에 해당되었다.

Table 4-10. The results of the uniaxial compression test with respect to Specimen-1, Specimen-2, and Specimen-3 in the case of curing period 28-day. C: cement, B: bentonite, W: water, NPR: Needle Penetration Resistance, UCS^E : Estimated Uniaxial Compressive Strength, UCS^M :Measured Uniaxial Compressive Strength.

Curing period : 28-day									
No.	Specimen-1 (C:B:W = 1.0:1.0:3.0)			Specimen-2 (C:B:W = 1.3:0.7:2.5)			Specimen-3 (C:B:W = 1.5:0.5:2.0)		
	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	UCS ^M (MPa)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	UCS ^M (MPa)	NPR (N/mm)	UCS ^E (MPa)	UCS ^M (MPa)
1	-	-	-	3.00	4.770	6.865	5.00	7.333	8.826
2	-	-	-	3.00	4.770	6.669	4.80	7.333	8.532
3	-	-	-	2.60	5.064	7.061	4.80	6.729	9.316
4	-	-	-	2.60	4.715	6.865	4.80	7.333	9.022
5	-	-	-	3.00	4.558	-	5.00	7.333	-
6	-	-	-	2.70	4.770	-	5.00	6.958	-
7	-	-	-	2.90	4.508	-	4.90	6.958	-
8	-	-	-	3.00	4.508	-	4.90	6.729	-
9	-	-	-	3.00	4.770	-	5.00	6.217	-
10	-	-	-	2.90	4.508	-	5.20	6.729	-
Avg.		-	-	2.87	4.694	6.865	4.94	6.965	8.924

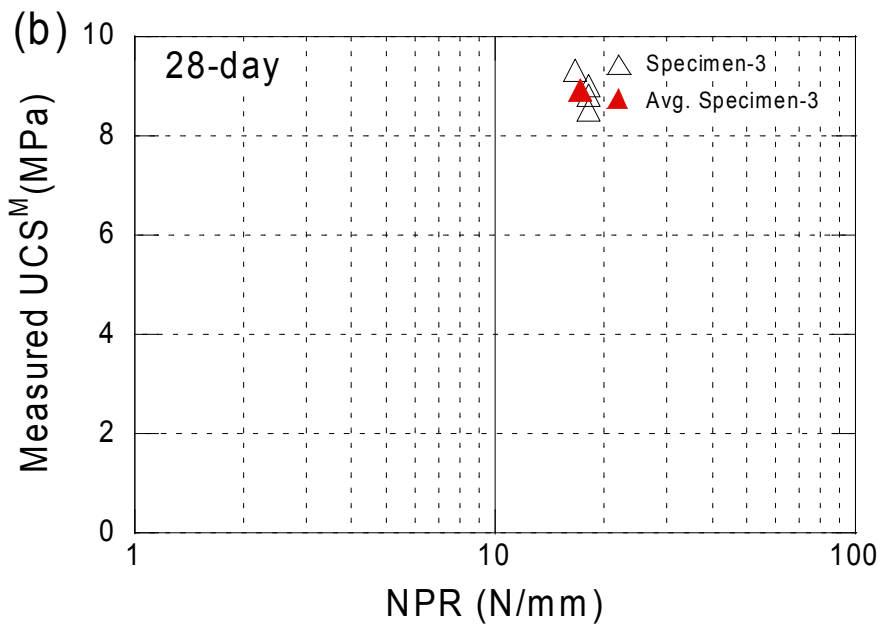
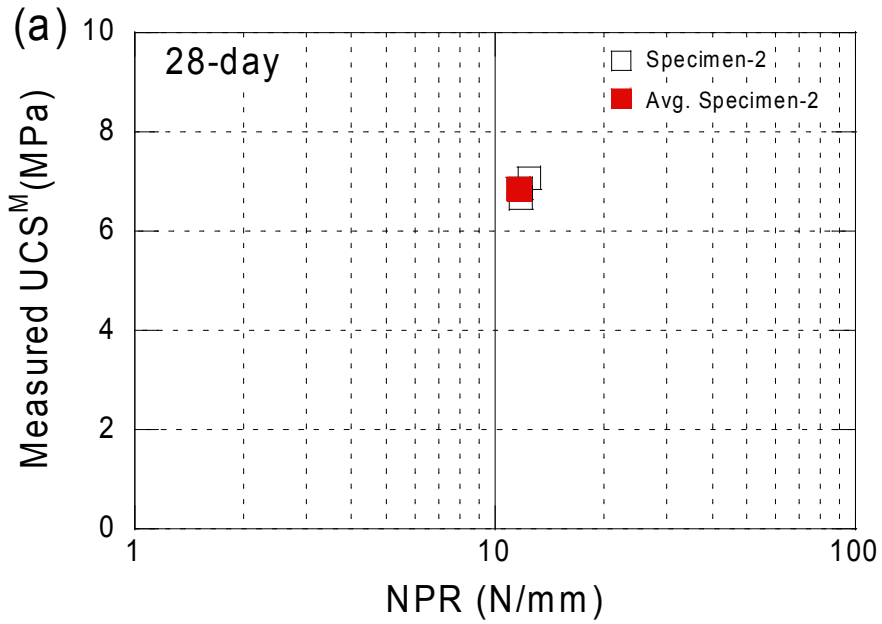


Figure 4-11. Relationship between NPR and measured UCS^M in the case of curing period 28-day, (a) Specimen-1, (b) Specimen-2, (c) Specimen-3, (d) all data.

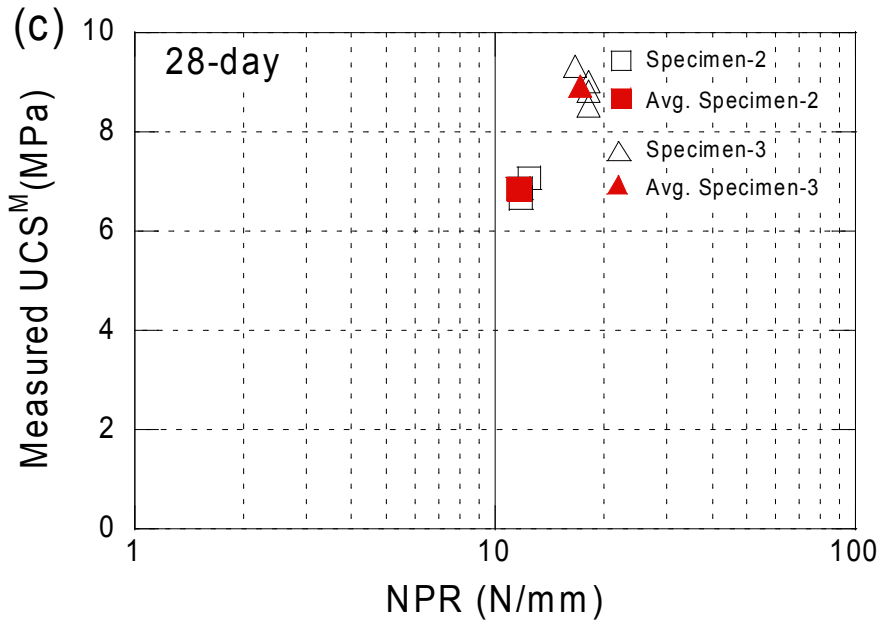


Figure 4-11. (Continued)

4.2.6 양생기간에 따른 NPR-UCS^M 상관관계

이상의 결과를 정리하여 NPR-UCS^M상에 도시하면 Figure 4-12와 같다. 그림상의 곡선은 최소자승법에 의해 회귀분석한 결과이다. 그림에서와 같이 10이하의 낮은 NPR 범위에서는 측정 UCS^E값이 완만하게 증가하다가 그 이상에서는 급하게 증가하는 것을 알 수 있다. 양생기간 21일과 28일에서 NPR의 차이는 크지 않았다. 즉, 21일을 경과한 시료에 대해서 침관입시험이 어려운 Specimen-1을 제외한 Specimen-2와 Specimen-3의 경우 양생기간이 21일과 28일의 NPR값은 양생일이 지남에 따라 변화폭이 적은 반면, 측정 UCS^M값은 양생일이 지남에 따라 변화폭이 거의 일정하게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 NPR-UCS^M결과는 앞서 설명한 NPR-UCS^E관계보다 더 분산된 형태를 보이고 더 큰 기울기를 가진다.

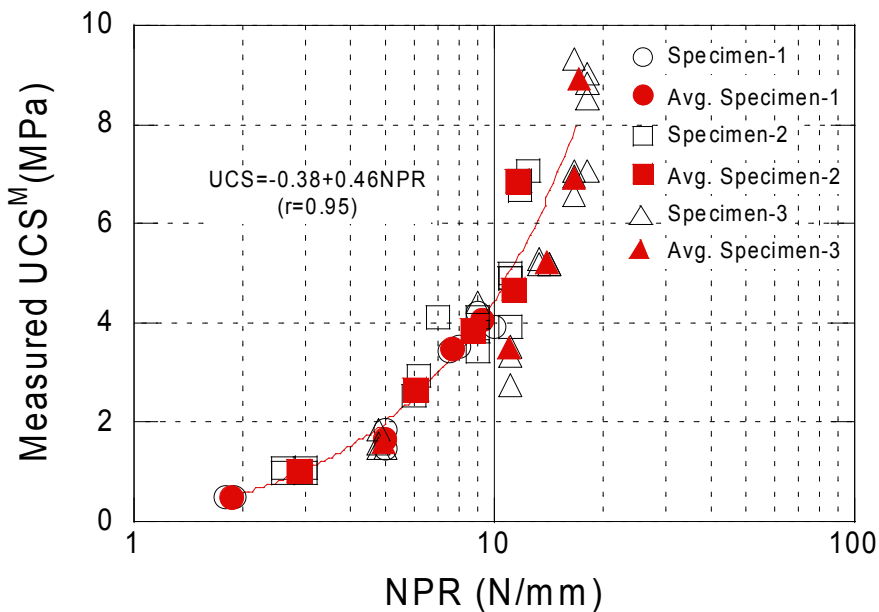


Figure 4-12. Relationship between NPR and measured UCS^M

4.3 추정 및 측정 일축압축강도 관계

침관입시험에 의한 일축압축강도의 추정 가능성을 평가하기 위하여 측정 UCS^M값과 식 (4.1)에 의해 계산된 추정 UCS^E관계를 Figure 4-13상에 표시하였다. 그림상에서 정확한 추정값의 구배를 1:1이라 할 때, 이 연구에서 얻은 측정 UCS^M값과 추정 UCS^E값의 구배결과는 하한선 1:0.6 과 상한선 1:1.7 구배사이에 놓임을 알 수 있다. 하지만, 대부분의 값이 1:1의 구배에 가까이 위치하고 있어 식 (4.1)에 의한 UCS의 추정은 어느 정도 타당한 것으로 판단된다. 하지만, 보다 정확한 추정식에 근거하여 침관입저항력으로부터 일축압축강도를 추정하기 위해서는 인공암반을 이용한 침관입시험의 측정 결과뿐만 아니라 실제 연약암반에 대한 측정 자료가 함께 포함되어야 할 것으로 사료된다.

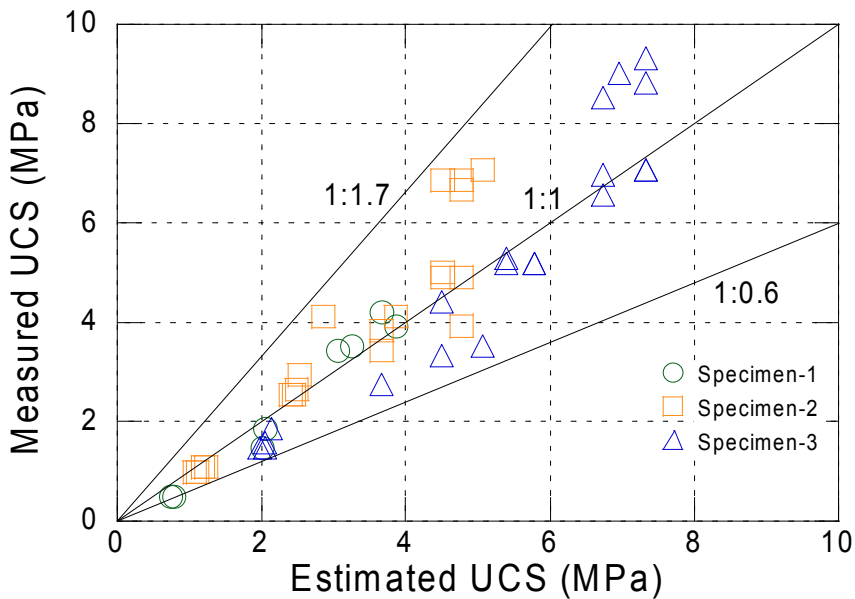


Figure 4-13. Relationship between the estimated UCS^E and the measured UCS^M.

5. 토의

5.1 침관입시험의 문제점

이 연구는 휴대가 간편하고 구성이 간편한 침관입시험으로부터 계산된 일축압축강도 추정값과 실제 일축압축시험에 의한 측정값을 비교하여 연약암반에 대한 일축압축강도 추정시험법으로 침관입시험의 적용 가능성을 평가하는데 있다. 하지만 시험 전 발생된 균열이나 시험 중 관입침을 중심으로 균열이 발생한다면 이는 느슨한 조직으로 인하여 관입침의 비정상적인 관입 원인이 되어 정확한 NPR값을 구하기 어렵다. 따라서 Figure 5-1와 같이 침관입시험시 발생할 수 있는 시험편의 균열에 의해 측정값은 무효가 될 수 있다(Erguler and Ulusay, 2007).

이 연구에서 시멘트(C):벤토나이트(B):물(W)의 배합비가 1.0:1.0:3.0인 Specimen-1의 경우 양생기간이 21일을 지나면서 시험편 내외부에서 균열이 심하게 발생하여 양생기간이 28일에 대한 침관입시험이 불가능하였다. 이것은 Specimen-1의 점토 함유량이 Specimen-2와 Specimen-3보다 많아서 양생기간이 증가함에 따라 건조 정도가 진행되면서 인공암반 재료의 수축으로 인한 시험편 내외부에 균열이 발생했기 때문으로 사료된다(Figure 5-2). 이것은 시멘트와 벤토나이트 사이의 수축률이 다르기 때문에 나타나는 광물학적 요인이기도 하다.

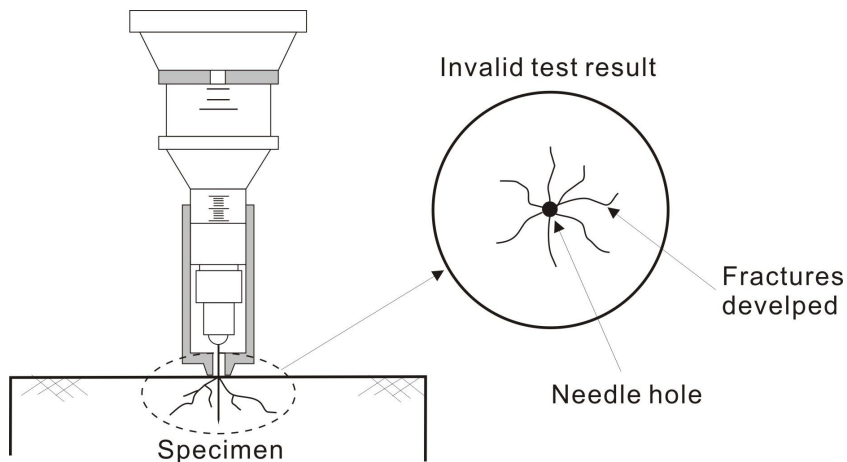


Figure 5-1. Schematic illustration of an invalid test (Erguler and Ulusay, 2007).

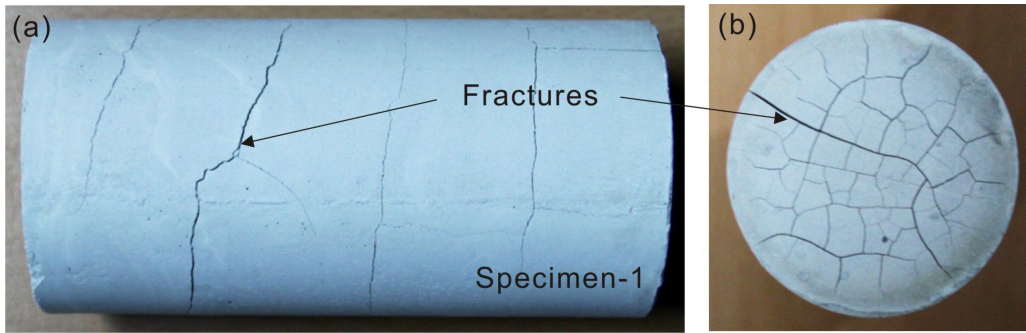


Figure 5-2. Some fractures developed in Specimen-1 with curing period 21-day,
(a) side view, (b) top view.

침관입시험기를 이용한 연구는 일본에서 처음으로 수행(Okada et al., 1985; Yamaguchi et al., 2005; Maruto Corporation, 2006)되었으며, 이를 터키 연구자(Erguler and Ulusay, 2007, 2009)에 의해 발전되었다. 현재 국내에서는 강성승 외(2011)에 의해 연구가 진행되고 있다. 이들 연구에 의하면 침관입시험기를 이용하여 연약암반으로 구성된 댐 기초에 대하여 비파괴적인 방법으로 계측 및 평가와 절리를 포함한 연약암반구조에서 암상도를 나타내었다(Yamaguchi et al., 2005). 또한 Erguler and Ulusay (2007)는 침관입시험을 이용하여 자연암반 및 인공암반에 대하여 수분 포화상태에 따른 UCS값을 추정하였다. 즉, Erguler and Ulusay (2007)는 터키의 19개의 서로 다른 지역의 노두, 채석장, 노천광 및 지하광산에서 연약암반과 점토함유 연약암반 시료를 수집하였고, 이를 건조상태, 습윤상태, 포화상태의 조건으로 하여 침관입시험을 수행하였다. 그 결과로 건조상태의 시료가 포화나 습윤상태의 시료보다 강도값이 높게 나타났고, 선행연구결과(Maruto Corporation, 2006; Erguler and Ulusay, 2007)와 이 연구에서 얻어진 NPR-UCS결과를 비교하기 위하여 함께 도시하면 Figure 5-3과 같다. 그림에서와 같이 낮은 범위와 높은 범위에서 침관입저항력에 따른 일축압축강도가 일정하지 않고 차이를 보임은 물론, 재료의 상태와 조건에 따라 NPR-UCS관계가 달라질 수 있음을 나타내고 있다(Yamaguchi et al., 2005; Erguler and Ulusay, 2009). 따라서 향후 국내에 존재하고 있는 다양한 종류의 연약암반을 대상으로 추가적인 연구가 진행되어 더 많은 자료를 확보하는 것이 필요하다고 사료된다.

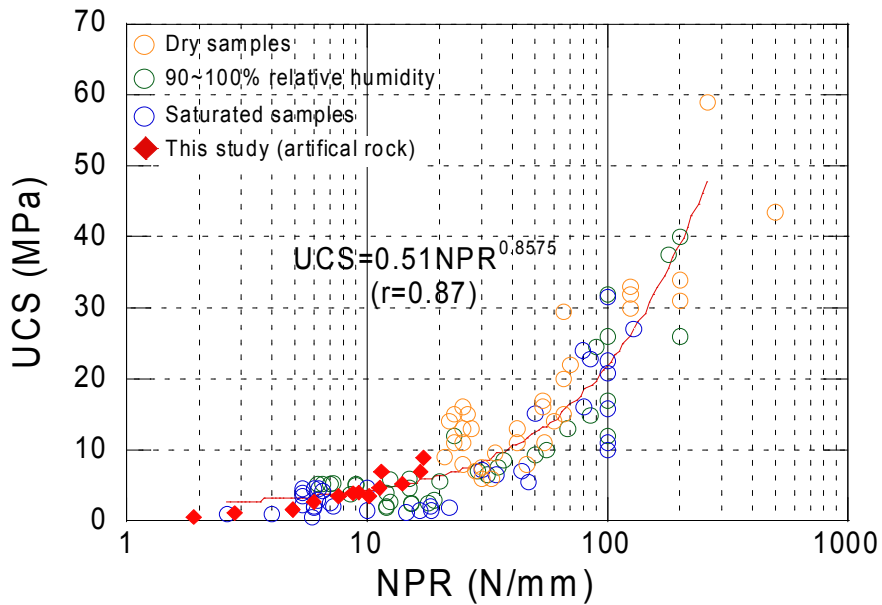


Figure 5-3. Relationship between the NPR-UCS of natural rocks and the artificial rocks.

5.2 현장 침관입시험 적용 예

침관입시험의 연약암반의 일축압축강도 추정 시험법으로서 현장 적용 가능성을 파악하고자 전남 해남군 황산면 우항리(N35°36' 20"/E126°27' 34")에 위치한 우항리 퇴적층을 대상으로 침관입시험을 수행하였다. 침관입시험을 수행 하기위하여 Figure 5-4와 같이 퇴적층과 퇴적층 사이에 풍화가 진행되어진 미상의 퇴적층에 길이 1m × 층높이 20cm 구간을 Figure 5-5와 같이 격자로 나누어 총 50회의 침관입시험을 수행하였다. 풍화가 진행된 미상의 퇴적층에 추정 UCS값은 침관입시험으로부터 계산된 NPR값을 이용하여 Maruto Corporation (2006)에서 제시하고 있는 NPR - UCS^E간의 상관관계식 (4.1)로부터 추정하였다.

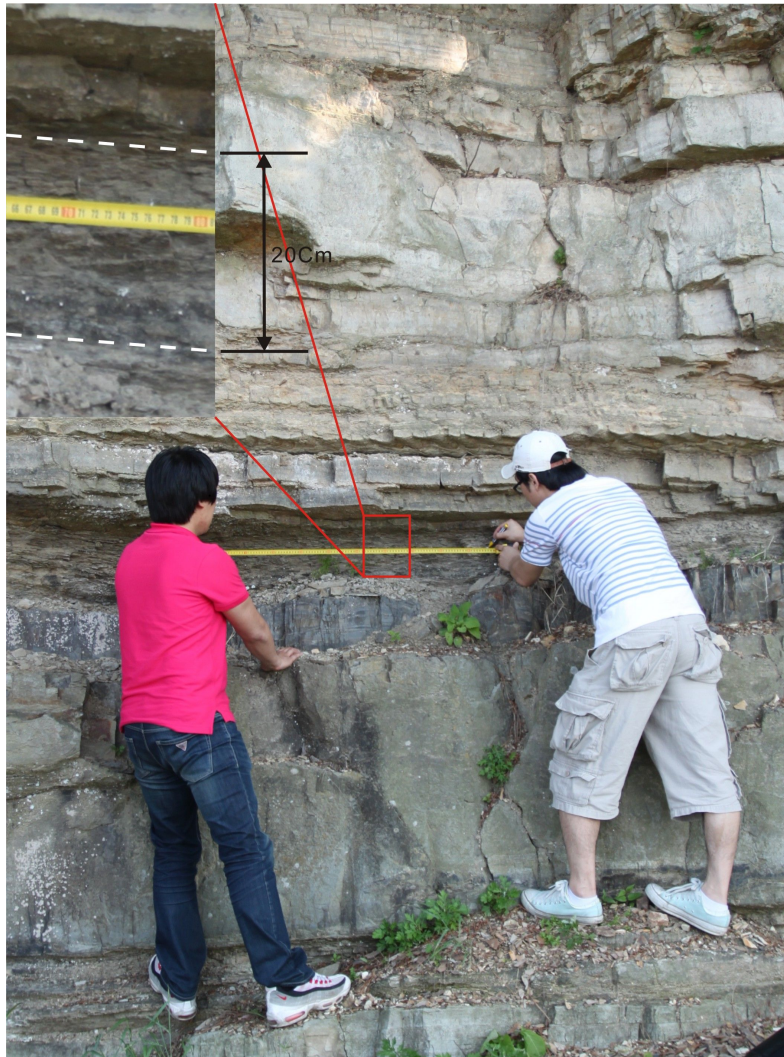


Figure 5-4. In-situ needle penetration test with respect to the sedimentarily rock in Uhangri, Haenam.

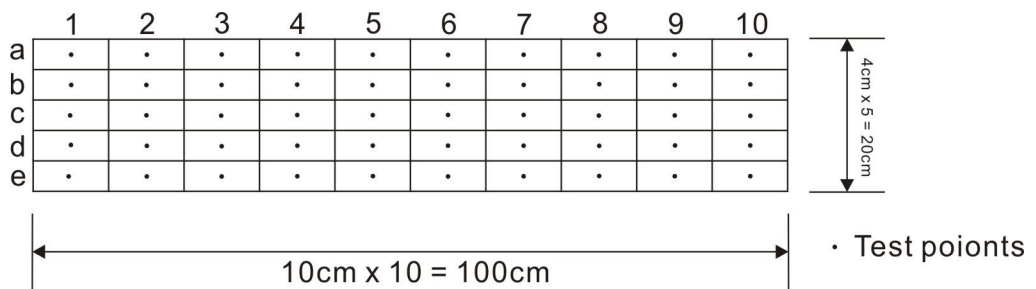


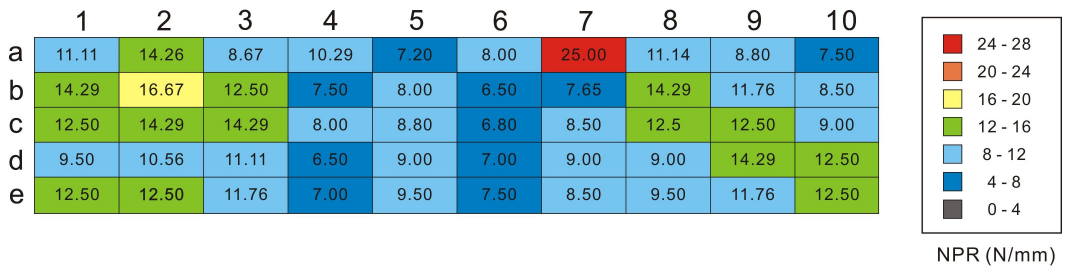
Figure 5-5. Schematic diagram of needle penetration test on rock surface.

침관입시험결과와 함께 이들로부터 추정된 일축압축강도를 정리하면 Table 5-1과 같으며, 각 측정 위치에 대한 NPR과 추정 UCS^E값의 분포도를 Figure 5-6에 나타냈다. 총 50회의 침관입시험에 대한 측정된 NPR값을 NPR - UCS^E상관관계식에 대입하여 UCS값을 추정하면 최소값은 2.65 MPa이고, 최대값은 10.00 MPa이다. 평균값은 4.29MPa이다(Figure 5-6). 같은 암반 내 일지라도 포화 정도에 따라 각 위치에서의 NPR값이 다르게 나타남을 알 수 있다. 따라서 연약암반 지역에 대한 특성을 정확하게 파악하기 위해서는 암반 전체에 대한 물성 평가가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

Table 5-1. The results of in-situ needle penetration test on rock surface.

Test point	1-a	1-b	1-c	1-d	1-e	Avg.	2-a	2-b	2-c	2-d	2-e	Avg.
Measured (N/mm)	100/9	100/7	100/8	90/10	100/8		100/7	100/6	100/7	95/9	100/8	
NPR (N/mm)	11.11	14.29	12.50	9.50	12.50	11.98	14.29	16.67	14.29	10.56	12.50	13.66
UCS ^E (MPa)	4.51	5.78	5.06	3.86	5.06	4.86	5.79	6.73	5.78	4.29	5.06	5.53
Test point	3-a	3-b	3-c	3-d	3-e	Avg.	4-a	4-b	4-c	4-d	4-e	Avg.
Measured (N/mm)	65/7.5	100/8	100/7	100/9	100/8.5		72/7	75/10	80/10	65/10	70/10	
NPR (N/mm)	8.67	12.50	14.29	11.11	11.76	11.67	10.29	7.50	8.00	6.50	7.00	7.86
UCS ^E (MPa)	3.53	5.06	5.78	4.51	4.77	4.73	4.18	3.06	3.26	2.65	2.86	3.20
Test point	5-a	5-b	5-c	5-d	5-e	Avg.	6-a	6-b	6-c	6-d	6-e	Avg.
Measured (N/mm)	72/10	80/10	88/10	90/10	95/10		80/10	65/10	68/10	70/10	75/10	
NPR (N/mm)	7.20	8.00	8.80	9.00	9.50	8.50	8.00	6.50	6.80	7.00	7.50	7.16
UCS ^E (MPa)	2.94	3.26	3.58	3.66	3.86	3.45	3.26	2.65	2.78	2.86	3.06	2.92
Test point	7-a	7-b	7-c	7-d	7-e	Avg.	8-a	8-b	8-c	8-d	8-e	Avg.
Measured (N/mm)	100/4	68/8.5	85/10	90/10	85/10		78/10	100/7	100/8	90/10	95/10	
NPR (N/mm)	25.00	7.65	8.50	9.00	8.50	11.73	11.14	14.29	12.50	9.00	9.50	11.29
UCS ^E (MPa)	10.04	3.11	3.46	3.66	3.46	4.75	4.52	5.78	5.06	3.66	3.46	4.58
Test point	9-a	9-b	9-c	9-d	9-e	Avg.	10-a	10-b	10-c	10-d	10-e	Avg.
Measured (N/mm)	88/10	100/8.5	100/8	100/7	100/8.5		75/10	85/10	90/10	100/8	100/8	
NPR (N/mm)	8.80	11.76	12.50	14.29	11.76	11.82	7.50	8.50	9.00	12.50	12.50	10.00
UCS ^E (MPa)	3.58	4.77	5.06	5.78	4.77	4.79	3.06	3.46	3.66	5.06	5.06	4.06

(a)



(b)

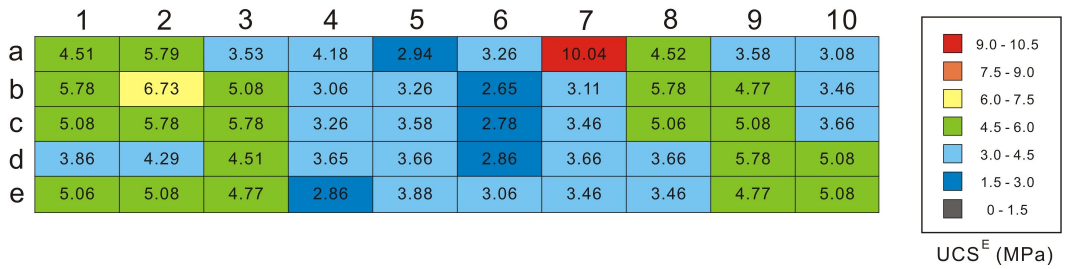


Figure 5-6. Distribution of (a) NPR at each test point, (b) UCS^E at each test point.

이상의 현장시험을 통하여 Figure 5-7처럼 이 연구에서 얻어진 인공암반에 대한 실내시험으로 얻어진 NPR값과 현장에서 침관입시험 수행으로 측정된 NPR값을 NPR - UCS^E상관관계식에 대입하여 추정된 UCS^E값을 도시해보면 일치한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 현장시험결과 실내시험에서 알 수 있는 대상암석의 일축압축강도, 삼축압축강도, 인장강도, 전단강도, 내부마찰각, 점착력 등 물리적 성질을 알 수 없으나, 침관입시험을 통하여 대상 암석인 미상의 퇴적암에 대하여 현장에서 비파괴 간이 시험기로서 간단하면서 쉽게 적용하여 일축압축강도 추정 방법으로 용이하다고 판단할 수 있다. 하지만 침관입시험을 적용할 수 있는 연약암반의 강도 값의 범위에 대하여서도 많은 연구가 필요하고, 국내에 존재하고 있는 다양한 종류의 연약암반을 대상으로 좀 더 연구가 필요할 것으로 사료된다.

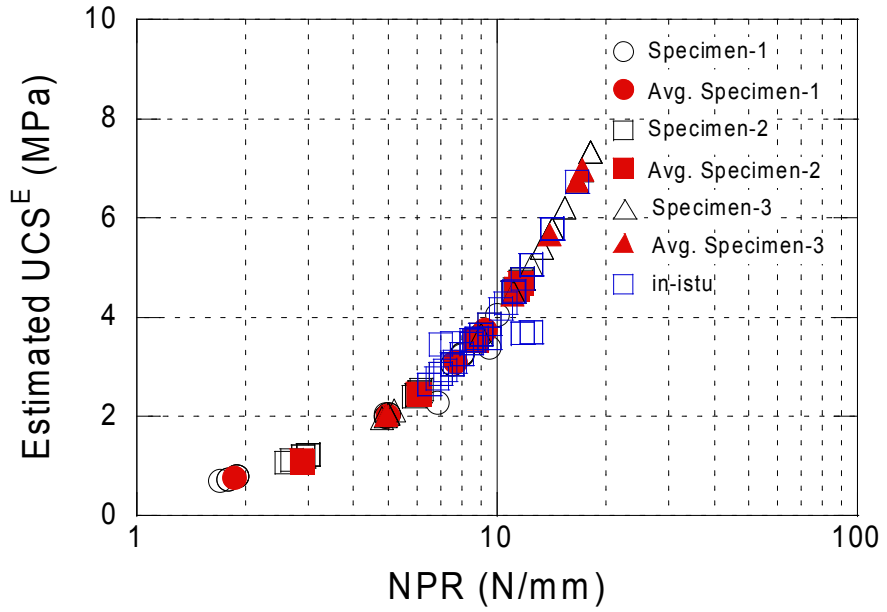


Figure 5-7. Relationship between NPR and UCS^E in all cases

6. 결론

본 연구는 침관입시험으로부터 계산된 일축압축강도 추정값과 실제 일축압축시험에 의한 결과값을 비교하여 연약암반에 대한 일축압축강도 추정시험법으로서 제안된 침관입시험의 적용 가능성을 살펴보고자 양생기간과 재료 배합비에 따른 관입저항력 변화를 비교하기 위하여 세 가지 경우에 대한 재료 배합비를 선정하여 제작되었고, 시험편의 양생기간에 따른 관입저항력을 살펴보기 위하여 양생기간은 3일, 7일, 14일, 21일, 28일로 하여 침관입시험을 실시하였다. 측정 결과에 의하면 10이하의 낮은 침관입저항력에서는 일축압축강도가 완만하게 증가하다가 그 이상에서는 급하게 증가하였다. 측정된 일축압축강도와 추정된 일축압축강도 관계는 정확한 추정 구배값인 1:1을 기준으로 하한선 1:0.6과 상한선 1:1.7구배사이에 놓이며, 대부분의 값이 1:1에 근접하므로 침관입저항력으로부터 일축압축강도값을 추정하는 것은 충분히 가능할 것으로 판단된다. 또한 침관입시험의 연약암반의 일축압축강도 추정 시험법으로서 현장 적용 가능성을 파악하고자 전남 해남군 황산면 우항리에 위치한 퇴적층과 퇴적층 사이에 풍화가 진행되어진 미상의 퇴적층을 대상으로 총 50회의 침관입시험을 수행한 결과 UCS^E값을 추정하면 2.65 MPa ~ 10.00 MPa의 범위이고, 평균값은 4.29MPa이다. 같은 암반 내 일지라도 풍화 정도에 따라 각 위치에서의 NPR값이 다르게 나타남을 알 수 있다. Bieniawski의 암반분류(1979)에 의하면 매우 약한 암석의 UCS값의 범위 2 MPa ~ 10 MPa범위에 해당한다. 따라서 연암에 대한 비파괴 간이 시험 장치로서 현장 적용 가능성이 충분하다고 판단된다.

하지만, 보다 정확한 추정식에 근거하여 침관입저항력으로부터 일축압축강도를 추정하기 위해서는 인공암반을 이용한 침관입시험의 측정 결과뿐만 아니라 다양한 종류의 실제 자연 상태 연약암반에 대한 침관입시험 측정 자료와 일축압축시험 결과가 함께 포함되어야 할 것으로 사료되고 연약암반 지역에 대한 특성을 정확하게 파악하기 위해서는 암반 전체에 대한 물성 평가가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 강성승, 오바라 유조, 제동광, 박영호., 2011, 침관입시험을 이용한 연약암반의 일축압축강도 추정, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 21, pp. 41-49.
2. ASTM, 1994, Annual book of ASTM Standards-Soil and Rock, Building Stones, Selection 4, Construction, V.04.08. West Conshohocken, PA, ASTM International.
3. Bieniawski, Z. T., 1989, Engineering rock mass classifications. New York, John Wiley and Sons.
4. Erguler, Z. A. and Ulusay, R., 2007, Estimation of uniaxial compressive strength of clay-bearing weak rocks using needle penetration resistance. Proceedings of 11th Congress on International Society of Rock Mechanics, Lisbon, Vol. 1, pp. 256-258.
5. Erguler, Z. A. and Ulusay, R., 2009, Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 46, pp. 355-370.
6. Hudson, J. A. and Harrison, J. P., 1997, Engineering rock mechanics - An introduction to the principles. Pergamon.
7. ISRM, 1978a, ISRM Suggested Methods for Determining Hardness and Abrasiveness of Rocks. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences & Gemechanics Abstract, Vol. 15, pp. 89-97.
8. ISRM, 1978b, ISRM Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences & Gemechanics Abstract, Vol. 15, pp. 99-103.
9. ISRM, 1979, ISRM Suggested Methods for Determining The Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences & Gemechanics Abstract, Vol. 16, pp. 135-140.
10. ISRM, 1985, ISRM Suggested Methods for Determining Point Load Strength. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences & Gemechanics Abstract, Vol. 22, pp. 51-60.
11. Okada, S., Izumiyo, Y., Iizuka, Y. and Horiuchi, S., 1985, The estimation of soft rock strength around a tunnel by needle penetration test,

- Tsuchi-to-Kiso, JSSMFE, Vol. 33, pp.35-38. (in Japanese)
12. Maruto Corporation, 2006, Penetrometer for soft rock: Model SH-70 Instruction manual. Tokyo, Japan.
 13. Ulusay, R., Gokceoglu, C. and Sulukcu, S., 2001, Draft ISRM suggested method for determining block punch strength index (BPI). International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 38, pp. 1113-1119.
 14. Yamaguch, Y., Nakamura, Y., Nakamura, M., Hakoishi, N., Yamaya, M. and Kato, Y., 2005, Verification of design strength of soft rock foundation for dams by needle penetration test. Journal of Japanese Society for Engineering Geology, Vol. 46, pp. 20-27..5

감사의 글

자원공학, 암석역학의 의미도 모른 채 마냥 새로운 마음으로 전공수업을 듣고 차츰 전공에 대해서 조금씩 알아가고 있을 때쯤 벌써 졸업을 앞두고 있다는 것이 믿기지 않습니다.

대학원 생활 2년은 어쩌면 인생의 터닝 포인트같이 저를 돌아보고 앞으로의 길을 제시해주는 큰 계기가 되었으며, 제게 있어 학위과정의 길은 학문의 길 보다는 어쩌면 인격수양의 과정에 더 가깝지 않았나 싶습니다. 베풀지 못하고 받기만 한 삶을 반성하게 됩니다. 저를 도와 주신분이 이렇게도 많았음에도 불구하고 일일이 찾아뵙고 감사드리지 못하는 점 용서를 구합니다.

참으로 부족한 저를 학문의 길로 안내해주어 오늘의 저와 앞으로의 길을 아낌없이 조언해주시고 합리적인 사고와 학자로서의 참모습을 보여주시는 평생스승인 지도교수 강성승 교수님의 은혜에 고개 숙여 깊이 감사드립니다.

부족한 제가 질문할 때마다 항상 자상하게 대답해주시고 젠뜰한 웃음으로 항상 반겨주시는 박영석 교수님, 학부 때부터 아낌없는 조언과 충고를 더해주시신 강추원 교수님, 열정적이고 주옥같은 강의를 해주시고 항상 밝으신 한오형 교수님, 바쁘신 가운데 초라한 논문을 열과 성의로 심사해 주신 고진석 교수님, 학문에는 끝이 없음과 아낌없는 충고와 조언을 해주신 박천영 교수님 모두 진심으로 감사드립니다.

저에게는 대학원 생활의 반 이상이라 해도 과언이 아닐 만큼 소중한 자원개발/지하공간 연구실. 그 중에서도 학기 초부터 많은 부분을 같이했던 승희형, 이런저런 사소한 일부터 큰일까지 같이 부대끼며 지낸 대학원 입학동기 우람이형, 알게 모르게 진로 고민부터 자잘한 하소연까지 받아주신 학중이형, 항상 밝은 남주, 대학원 신입생이지만 열심히 하는 학부동기 영호와 찬우, 옆자리에서 공부 열심히 하는 지성이, 조용한 홍일점 지혜 에게도 늘 고맙습니다.

대학원 선배로서 아낌없이 조언을 해주신 태진이형, 우경이형 감사드립니다. 그리고 대학원 졸업동기들, 학부 때부터 에이스 강희와 봉주, 천진난만 열심히 하는 종원, 미소 모두들 고생했습니다.

어리고 여린 사춘기 시절 따뜻하고 아낌없이 사랑을 베풀어주신 최은주 선생님! 바쁘다는 핑계로 찾아뵙지도 못해 너무 죄송스럽습니다. 그리고 감사합니다.

나에게 큰 인연으로 다가온 모두들 동원, 명오, 미선, 민재, 민지, 상곤, 선중, 성화, 영로, 장현, 주희, 준, 지식, 지아, 지웅, 하나 모두 감사합니다.

학창시절 때부터 지치고 힘들 때 존재만으로도 큰 힘과 용기가 되어준 친구들! 경표, 광현, 우리, 정민, 준후, 진승, 평화 그대들을 내 인생에서 값진 보물중의 하나라고 당당하고 자랑스럽게 이야기 할 수 있어 너무 고맙습니다.

마지막으로 아낌없는 응원을 해주신 용암사 주지스님 정타 스님과, 늘 옆에서 응원과 믿어주시고 묵묵히 헌신적으로 베풀어주신 어머니, 할머니 너무 감사드립니다. 너무 사랑합니다.

이제 졸업을 앞두고 사회를 나가는 문턱에 서니 설렘과 두려움이 앞섭니다. 하지만 지금까지 해왔던 것처럼 주위에 모든 분들 실망시키지 않고 후회 없는 삶을 살도록 하루하루 노력하는 사람이 되겠습니다. 감사합니다.

저작물 이용 허용서

학과	에너지자원공학과	학번	20107093	과정	석사
성명	한글 : 제 동 광 한문 : 諸 東 洸 영문 : DONGKWANG JE				
주소	전남 화순군 능주면 잠정리 근로자아파트 402호				
연락처	E-MAIL : baby7093@gmail.com				
논문제목	한글 : 연약암반의 일축압축강도 추정을 위한 침관입시험법 적용 영어 : Application of Needle Penetration Test for Estimation of Uniaxial Compressive Strength on Weak Rocks				

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

- 다 음 -

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

동의여부 : 동의() 반대()

2011 년 5 월 일

저작자: 제 동 광 (인)

조선대학교 총장 귀하