

침투류에 의한 암석시료의 함수 저감거동 연구 (I)

A Study on Decreasing Behavior of Strength & Elastic Parameters due to Water Infiltration in Rock Cores (I)

조 홍 제¹ Cho, Hong-Je

문 중 규² Moon, Jong-Kyu

정 일 수³ Jeong, Il-Soo

Abstract

A study on strength decrease due to water contents through infiltration has been conducted with 9 rocks of high frequency in Korea. It has been proved that a strength decrease through infiltration has high dependence on rock strengths ranges while the species of rock have no impact. It has been found that the weaker the rocks are, the more sensitive the strength decreases are, and that water content of 0.5% corresponds to strength decrease of almost 50%. Another finding is that most rocks have a failure when water content is about one quarter~one half of its saturation. It has been shown that the weakening of rock strength due to water content results from leaching and the weakening of bonding strength of cementation materials.

요 지

국내에서 출토빈도가 높은 9개 암종을 대상으로 침투에 의한 함수시 강도저감에 대한 연구를 시행하였다. 함수에 의한 강도저감은 암종에 관계없이 암석강도에 지배된다는 사실을 확인하였다. 강도가 약한 암일수록 강도저감 민감도가 예민함을 알 수 있다. 강도에 따라 0.5%의 함수비에 50% 내외의 강도 저감현상이 발생하는 일은 매우 흔하게 관찰된다. 대부분의 암석은 포화함수비의 1/4~1/2의 포화에서 파괴가 일어난다는 사실도 확인할 수 있었다. 함수시 암석강도의 약화는 교질물질의 접착강도 약화와 용탈에 의한 것으로 사료된다.

Keywords : Water content, Strength decrease, Residual strength, Sensitivity

1. 서 론

우리나라 건설공사의 전환점이라 할 수 있는 경부고속도로 조사 설계 및 시공단계에서는 암반 굴착공사는 가급적 피하는 방침하에 시행되었다. 건설공사의 중기

단계에 현대화된 굴착, 상차 및 운반장비들의 도입으로 불가피한 경우에 한해서 설계변경에 의한 암반굴착이 시공되기도 하였다. 이러한 연유로 암반공학에 대한 지식도 빈약했기에 암반이라면 불변의 큰 강도를 지닌 지반재료로 인식하고 있었다.

1 비회원, 울산대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (Prof. Dept. of Civil & Envir., Ulsan Univ.)

2 정회원, 동명기술공단(주), 공학박사, 토질 및 기초기술사 (Member, Dongmyung Eng. Consultant Co., Tel: +82-52-259-2856, Fax: +82-52-259-2629, mjki1067@hanmail.net, 교신저자)

3 정회원, 울산대학교 대학원 박사과정, (주)부광엔지니어링, 대표이사 (Member, Graduate Student, President Bukwang Eng. Consultant Co.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 3월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

현대적 교통시설과 그 유지관리 필요성의 증대는 더 많은 시설과 지하공간의 이용을 필요로 하게 되었다. 이러한 결과로 점토 seam이 협재된 연약한 암반이나, 구조적 취약성을 가진 암반을 포함한 다양한 지반조건인 암반층에 더 많은 지하공간 시설을 해야만 했다. 암반공사에서 괄목할만한 기술 발전이 여러 어려운 문제들을 해결하며 각종 지하공간 시설물이 시공되고 있거나 더 많은 연구로 더 어려운 문제들을 해결하도록 끊임없이 도전해야 할 과제들이 많다. 해결을 요구하는 많은 과제들중 함수비 증가에 따른 암석, 암반강도 저감거동을 구명하는 부분도 포함되기에 이에 대한 연구를 하게 되었다.

ASTM과 ISRM시험법에서는 암석시료는 건조된 시료를 사용하도록 규정하고 있다. 자연상태의 암반은 극히 적은 예를 제외하고는 항상 포화상태이거나 거의 포화에 가까운 상태로 존재하지만 설계 및 시공시엔 실험실에서 시험한 건조상태의 강도를 적용하는 경우가 대부분이다. 외국의 연구자들이 특정 암석에 대한 강도저감 연구결과를 참고하여 국내 기술자들은 암석, 암반이 함수를 하면 강도가 저감된다는 사실은 인지하고 있으나 그들의 연구가 극히 제한된 암종과 빈약한 모집단 규모로 인한 결과이기 때문에 다양한 국내 암에 적용하기는 무리가 있었다.

본 연구에서는 국내에서 출토빈도가 높은 9개 암종 2,756개의 시료를 모집단으로 구성하여 일축압축강도 및 압열인장강도 시험을 실시하고 각 강도의 단계에 따

른 함수비-강도의 상관성 해석식을 제시한 부분을 (I)편으로, 함수비에 의한 탄성계수의 저감거동을 (II)편으로, 함수비 증가에 의한 체적변화거동을 (III)편으로 나누어 논의함으로써 함수비와 암석시료의 각종 특성변화의 결과를 설계 및 시공에 참고가 되도록 시도하였다.

2. 기존 연구성과 검토

Colback(1965)은 셰일(shale)시료 31조를 대상으로 함수비와 일축압축강도, 탄성계수의 저감거동에 대한 성과로 암석, 암반이 함수상태에서 강도가 저감된다는 학술적 연구를 최초로 발표하였다. 그 후 수많은 연구자들은 셰일, 사암, 이암, 응회암 등을 대상으로 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수 혹은 점하중강도와 상관성 내지 저감거동에 관한 성과들을 보고하였다. 많은 연구자들이 성과를 보고하였으나 그 중 참고할만한 연구자들을 정리하여 Table 1에 요약하였다.

Hawkins et al.(1992)은 35조의 사암(sandstone)을 대상으로 상관성 해석을 시행하였다. 그리고 사암에서는 경우에 따라서 1%의 함수가 암석강도를 현저히 저하시키므로 암석을 대상으로 시행하는 공사에서는 함수시의 일축압축강도를 고려할 것을 권고하였으며 통상의 설계에 적용되는 강도는 반드시 포화시의 강도를 적용할 것을 강력히 권고하였다. Erguler et al.(2009)은 퇴적암의 강도는 포화시에 90%의 강도저감을 가져온다는

Table 1. Researchers (strength decreasing due to water content of rock cores)

Researcher	Result	Rocks	No. of Sample
Aughenbaugh N.B.(1974)	w-UCS	shale	NS
Colback P.S.B.el (1965)	w-(UCS, E) decreasing	shale	31
Erguler Z.A.el (2009)	w-(UCS, E) decreasing	shale, sandstone mudstone,tuff, marl	67
Hawkins A.B.el (1992)	w-UCS decreasing	sandstone	35
Lashkaripour G.L.(1998)	w-UCS	mudrock	43
Rao K.S. el (1987)	w-(UCS,BRZ, PLS)	sandstone	7 kinds
Seedman R. (1986)	w-UCS decreasing	shale	NS
Talesnick M.el (2007)	w-(UCS, BRZ)	chalk	NS
Torok A. el (2010)	w & texture	travertine	NS
Vasarhelyi B.el (2003)	w-(UCS, E) decreasing	sandstone	35
Vasarhelyi B.,el (2005)	w-(UCS, BRZ, E)	sandstone	45
Vasarhelyi B.el (2006)	w-UCS decreasing	sandstone	35
Yasar E. el (2010)	w-(UCS,BRZ)	sandstone, siltstone, mudstone	NS
Yilmaz I. (2010)	w-(UCS, E)	gypsum	42

※ UCS: Uniaxial Comp. Strength, E: Elastic Modulus, BRZ: Brazilian Test Strength, PLS: Point Load Strength. w: Water Content, NS: No Shown

연구 결과를 발표를 한 바 있다.

연구자들의 성과에서 두가지 특성을 알 수 있다. 하나는 시험대상이 연약 퇴적암(셰일, 사암, 이암, 응회암)을 주 대상으로 택하였고 또한 대상 시료의 모집단이 소규모(31~67조)라는 점이다. 이러한 연유로 함수비의 증가로 암석, 암반의 강도는 상대적으로 저감된다는 경향을 보여주었으나 공학적 활용성은 미흡하였음을 알 수 있다.

3. 시험방법 및 모집단의 구성

한국지질도(한국자원 연구소, 1995)에 분포된 퇴적암, 화성암 및 변성암의 분포 기준으로 지역과 면적의 비례에 따라 지점을 선정한 후 시공중인 공사현장, 인근 석산 등에서 rock hammer와 Schmidt hammer 타격으로 개략적 강도분포를 고려하여 채취하였다. 동일 블록에

서 생산된 시료로 일축압축시험 등 강도시험과 물성시험을 시행하기 위하여 28~30cm 길이의 NX 기준 core 30개 이상을 확보하기 위하여 최소한 40×50×30cm(약 160kg/개)급의 블록을 한 지점에서 7~12개씩 채취하였다.

각 암종마다 전국분포에 따른 고른 채취를 하여 암종 특성이 편중되지 않도록 고려하였다. 그리하여 퇴적암 45개 지점, 화성암 37개 지점 및 변성암 24개 지점의 106개 지점에서 채취한 954개 블록에서 생산된 33,390 여개(길이 28~30cm의 NX 규격)의 core를 확보하여 12년에 걸쳐 각종 역학 및 물리시험을 시행하였다.

본 연구를 위하여 기 시험된 자료중에서 일축압축강도가 150MPa보다 큰값의 시료는 실무활용에 보편성이 없을 것으로 판단하여 추출에서 제외하고, 각 암종별, 각 암석별로 강도기준으로 무작위 추출하여 모집단을 구성하였다. 일축압축강도와 함수비, 압열인장강도와

Table 2. Rock samples for water content-uniaxial comp. strength relation

Step	Sedimentary Rock						Igneous Rock				Meta.	Total
	Sh.	Sd.	Md.	Cl.	Tf.	sume	Gr.	An.	Rh.	sume	Gs.	
100 ↑	31/5	30/5	0	0	0	61 (10)	41/6	30/5	32/5	103 (16)	39/5	203 (31)
100 ↓	34/6	30/4	38/5	40/6	38/5	180 (26)	41/5	30/5	34/5	105 (15)	39/5	324 (46)
80 ↓	36/6	30/4	38/5	40/5	38/5	182 (25)	41/5	33/5	35/5	109 (15)	39/5	330 (45)
60 ↓	38/7	30/4	38/5	40/5	38/5	184 (26)	41/5	33/5	0	74 (10)	39/5	297 (41)
40 ↓	32/6	30/4	38/5	40/5	38/5	178 (25)	41/5	33/5	0	74 (10)	39/5	291 (40)
Total	171 (30)	150 (21)	152 (20)	160 (21)	152 (20)	785 (112)	205 (26)	159 (25)	101 (15)	465 (66)	195 (25)	1,445 (203)

Table 3. Rock samples for water content-indirect tensile strength relation

Step	Sedimentary Rock						Igneous Rock				Meta.	Total
	Sh.	Sd.	Md.	Cl.	Tf.	sume	Gr.	An.	Rh.	sume	Gs.	
100 ↑	30/5	30/5	0	0	0	60 (10)	38/6	30/5	31/5	99 (16)	33/5	192 (31)
100 ↓	39/6	32/4	34/5	33/6	30/5	168 (26)	32/5	30/5	33/5	95 (15)	32/5	295 (46)
80 ↓	42/6	31/4	34/5	32/5	30/5	169 (25)	33/5	33/5	32/5	98 (15)	32/5	299 (45)
60 ↓	42/7	31/4	33/5	32/5	30/5	168 (26)	34/5	33/5	0	67 (10)	31/5	266 (41)
40 ↓	33/6	31/4	34/5	34/5	31/5	163 (25)	33/5	33/5	0	66 (10)	30/5	259 (40)
Total	186 (30)	155 (21)	135 (20)	131 (21)	121 (20)	728 (112)	170 (26)	159 (25)	96 (15)	425 (66)	158 (25)	1,311 (203)

※ Meta.: Metamorphic Rock, Sh.: Shale, Sd.: Sandstone, Md.: Mudstone, Cl.: Conglomerate, Tf.: Tuff, Gr.: Granite, An.: Andesite, Rh.: Rhyolite, Gs.: Gneiss

함수비의 거동분석을 위하여, 암석별로 통계적 신뢰도가 95% 이상이 될 수 있도록(김정년 1985, 김우철 등 2005, Yamaguchi 1970) 각암석별, 각단계별로 최소 30개 이상으로 모집단을 구성하였다.

일축압축강도와 압열인장강도의 비교를 위하여 이들 시험에 소요되는 시료는 동일 code(시료계열)의 시료를 사용하였으며 일축압축강도는 각 함수비 단계에 따라 동일 code의 시료 6~8개, 압열인장강도 시료는 6~9개의 시료가 소요되었다. 일축압축강도용 시료는 NX규격으로 110mm를 기준으로 제작되었으며 압열인장강도용은 역시 NX규격의 55~60mm의 시료를 사용하였다. 일축압축강도용 시료는 ASTM(D 7012-07e1, D 2938-95, D 4543-08), ISRM(1979, 1981) 기준으로, 압열인장강도용 시료는 ASTM(D 3967-95a), ISRM(1978)기준으로 제작 및 시험을 시행하였다.

Aughenbaugh(1974)는 세일을 대상으로 함수비-일축압축강도 실험에서 시료가 포화되는데는 약 160시간이 소요된다고 보고하였다. 한편 Erguler(2009)는 강한 퇴적암(이암, 실트암, 대리암)에서는 포화 함수비 1.75%에 이르는 시간은 230시간, 약한 퇴적암에서는 약 48시간에 7% 포화 함수비에 이른다는 보고를 하였다.

본 연구에서는 실험에 소요될 일축압축강도용, 압열인장강도용 시료를 code별로 묶어 동시에 건조기에 110±5°C-24시간 건조후(ASTM D 2216-98, ISRM 1994) 건조시료의 파괴강도를 참고하여 수침시간을 조절하였다. 수침시간은 위의 두 선임연구자들의 방법을 참고하여 3가지방법으로 5단계를 기준으로 나누어 수침시켰다. 60MPa이하 시료는 1, 3, 8, 24, 48시간 수침을, 60~100MPa 시료는 8, 24, 48, 96, 168시간으로, 100MPa이상 시료는 8, 48, 96, 168, 240시간 수침을 시킨후 표면 건조상태의 시료를 파괴하였다. 이 시험에서 압열인장강도용 시료도 같은 조건에서 시험을 시행하였다. 시료는 1.2m 수심의 수조에서 수침시켰으며 자연상태의 수침현상에 가깝게 재현할 목적으로 증류수를 사용하지 않고 일반 수도물을 사용하였으며 침투 확산제인 오산화인(P_2O_5)의 첨가도 하지 않았다. 수조는 수온 조절장치를 설치하여 23°C를 기준하였으나 1°C의 변동은 허용할 수 있었다.

퇴적암(세일, 사암, 이암, 역암, 응회암)5종, 화성암(화강암, 안산암, 유문암)3종과 변성암(편마암) 1종으로 모두 9개 암종에 대한 시험이 실시되었으며 일축압축강도 시료 203조 1,445개, 압열인장강도 시료 203조 1,311개

로 모두 2,756개의 시료를 시험하였다. 암종별, 암석별 시료의 집계된 자료를 Table 2와 Table 3에 요약하였다. 이암, 역암, 응회암은 100MPa이상의 시료는 채취하지 못하였으며 유문암에서는 60MPa이하 시료 역시 채취하지 못하였다.

Table 2에서 퇴적암, 세일의 100 ↑ 은 100MPa이상의 강도를 표현하며, 31/5는 code가 다른 세일 암석이 5조며, 31은 각 함수단계의 시료 31개가 포함되었다는 뜻이다. 즉 100MPa이상 강도에서 5개 세일 암석의 함수비-강도는 적점이 31점이란 뜻이다. 아래 ()내의 숫자는 암종의 합계이다.

4. 함수시험

세일시료(XA-5 계열) 6개로 각 수침방법에 따라 침수시켜 압축시험을 시행한 결과를 보인것이 Fig. 1(a)이다. 이들 시료 6개의 평균 간극비는 4.72%(포화 함수비 4.11%)인바 2.5%(168시간 수침)의 함수비로 건조시 강도 79.46MPa 시료가 36.04MPa로 저감 되었음을 볼 수 있다. 이는 포화 함수비 이전에 45.4%로 강도저감이 되고 있음을 알 수 있다. 사암시료(A-5 계열) 7개로 같은 방법으로 수침시킨 각각의 시료들을 대상으로 압열인장강도시험을 시행하였다. 건조시 인장강도가 8.23MPa였으나 168시간후 1.75%(포화 함수비 1.99%)의 함수비로 2.2MPa로 저감되어 26.7%로 저감된 상태를 Fig. 1(b)에서 볼 수 있다.

암석의 code별로 6~7개의 함수시험을 시행한 결과를 암석군(세일, 사암, 이암, 역암, 응회암, 화강암, 안산암, 유문암 및 편마암)별로 적정한 그림들 중 화강암의 함수비-일축압축강도 적정그림을 예시한 것이 Fig. 1(c)며, 세일의 함수비-압열인장강도 변화를 나타낸 것이 Fig. 1(d)이다. 여기서 알 수 있듯이 각각의 군집 그림에서는 암석별 강도저하의 특성을 분석할 수가 없다. 따라서 본고에서는 암석의 강도범위를 구분하여 각 암석별 강도범위에 따라 저감특성을 살펴 볼 것이다.

강도범위의 크기에 따라 함수비-일축압축강도의 상관식, 분산정도 및 상관지수가 다를 것이므로 이에 따른 상관성의 정밀도가 각기 다르게 나타날 것이다. 따라서 실험값을 20MPa, 30MPa 및 50MPa의 범위로 나누어 도출되는 값을 평가함에 따라 어떤 범위의 값이 가장 적절한지 판단이 될 것으로 사료된다. 이런 기준으로 세일과 화강암에 대한 단계별 강도분할에 따른 함수비-일축압

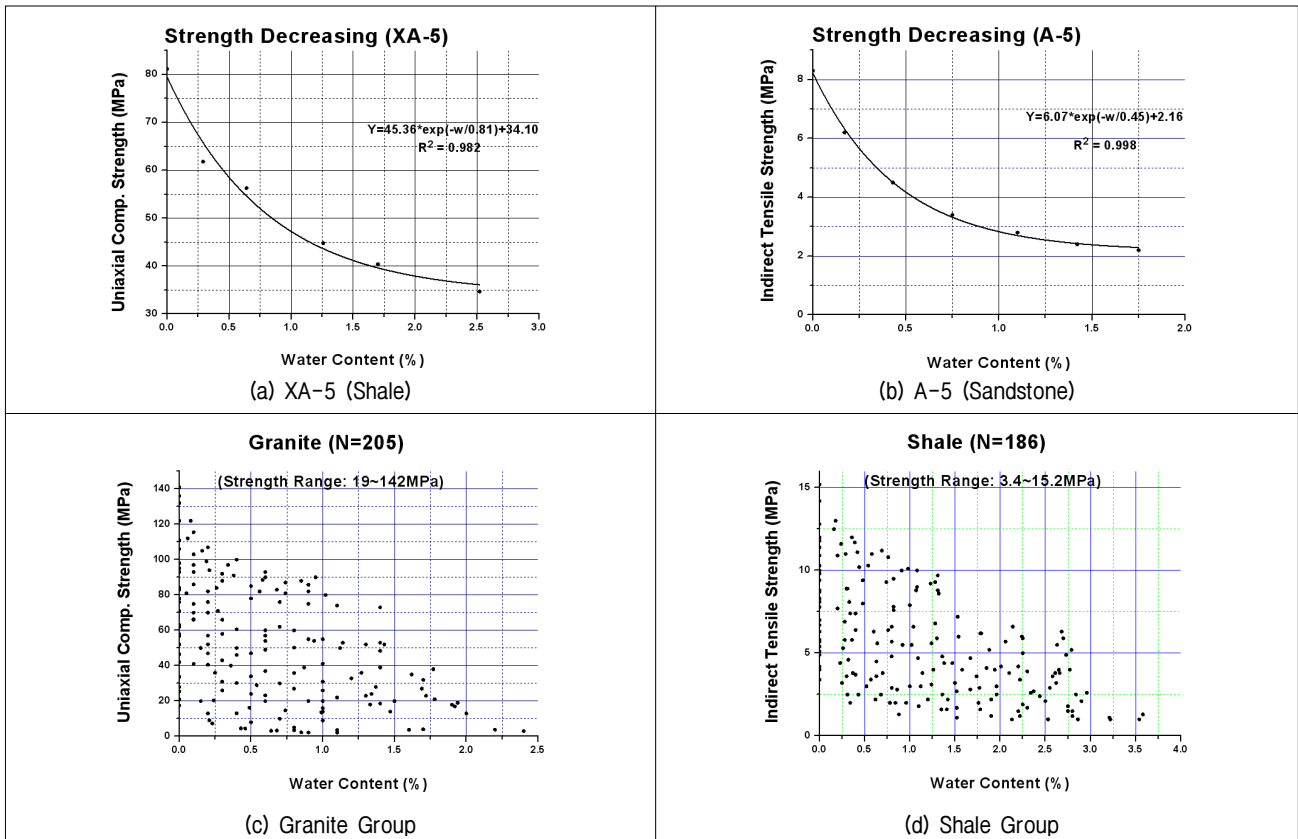


Fig. 1. Water content-strength decreasing

Table 4. Correlation Factors by each strength step (shale)

Step	1st.	2nd.	3rd.	4th.	5th.	Mean	Remark
20MPa	0.919	0.947	0.882	0.943	0.870	0.910	
30MPa	0.904	0.776	0.821	0.612	0.930	0.807	
50MPa	0.770	0.641	0.848	-	-	0.753	Big SD

Table 5 Correlation Factors by each strength step (granite)

Step	1st.	2nd.	3rd.	4th.	5th.	Mean	Remark
20MPa	0.785	0.890	0.861	0.921	0.782	0.840	
30MPa	0.811	0.776	0.555	0.841	0.905	0.778	
50MPa	0.464	0.473	0.724	-	-	0.554	Big SD

※ SD: Standard Deviation

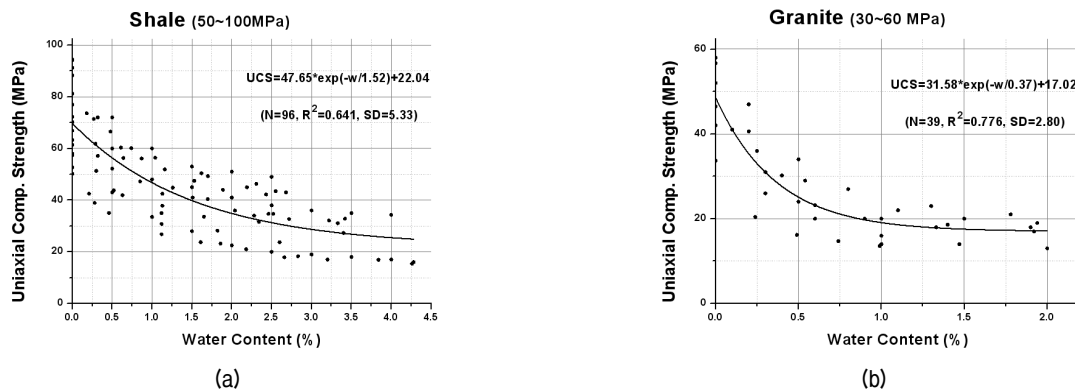


Fig. 2. Correlation diagrams for strength range 30, 50MPa

축강도와와의 상관해석을 시행한 상관지수를 Table 4와 Table 5에 요약하였으며, 강도범위 50MPa에 대한 세일의 상관도를 Fig. 2(a)에, 강도범위 30MPa에 대한 화강암의 해석결과를 Fig. 2(b)에 표본으로 예시하였다. 두 그림에서 상관지수도 낮으며 또한 분산도 매우 큰 것을 알 수 있다.

Table 4와 Table 5에서 각 암석의 상관지수 평균값을 보면 분할범위가 좁을수록 상관지수가 높게 도출된 것을 알 수 있다. 본 실험결과에서 분할범위를 10MPa로 구분한다면 상관지수가 더 높게 도출될 수 있을 것이라 추정도 가능하다. 그러나 통계적 신뢰도 95%를 확보하기 위한 기본적 요건인 최소 모집단의 규모가 30개의

적점이 필요한 바 이를 위해서는 본 연구에서 사용한 2756개의 시료수의 두배인 약 5,000개 이상의 실험값이 소요되기 때문에 3가지 실험값중 상관계수가 가장 높게 도출된 20MPa 범위로 본 연구에서는 해석할 것이다.

5. 함수비-일축압축강도시험

세일과 사암의 개별 시료에 대한 함수비-강도시험을 시행한 Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 강도가 저감된다는 사실은 인지가 되나, 각 암석군에 대한 결과를 집적한 그림에서는 저감특성을 찾기가 어렵다(Fig. 1(c), Fig. 1(d)). 따라서 본고에서는 Table 4와 Table 5에서

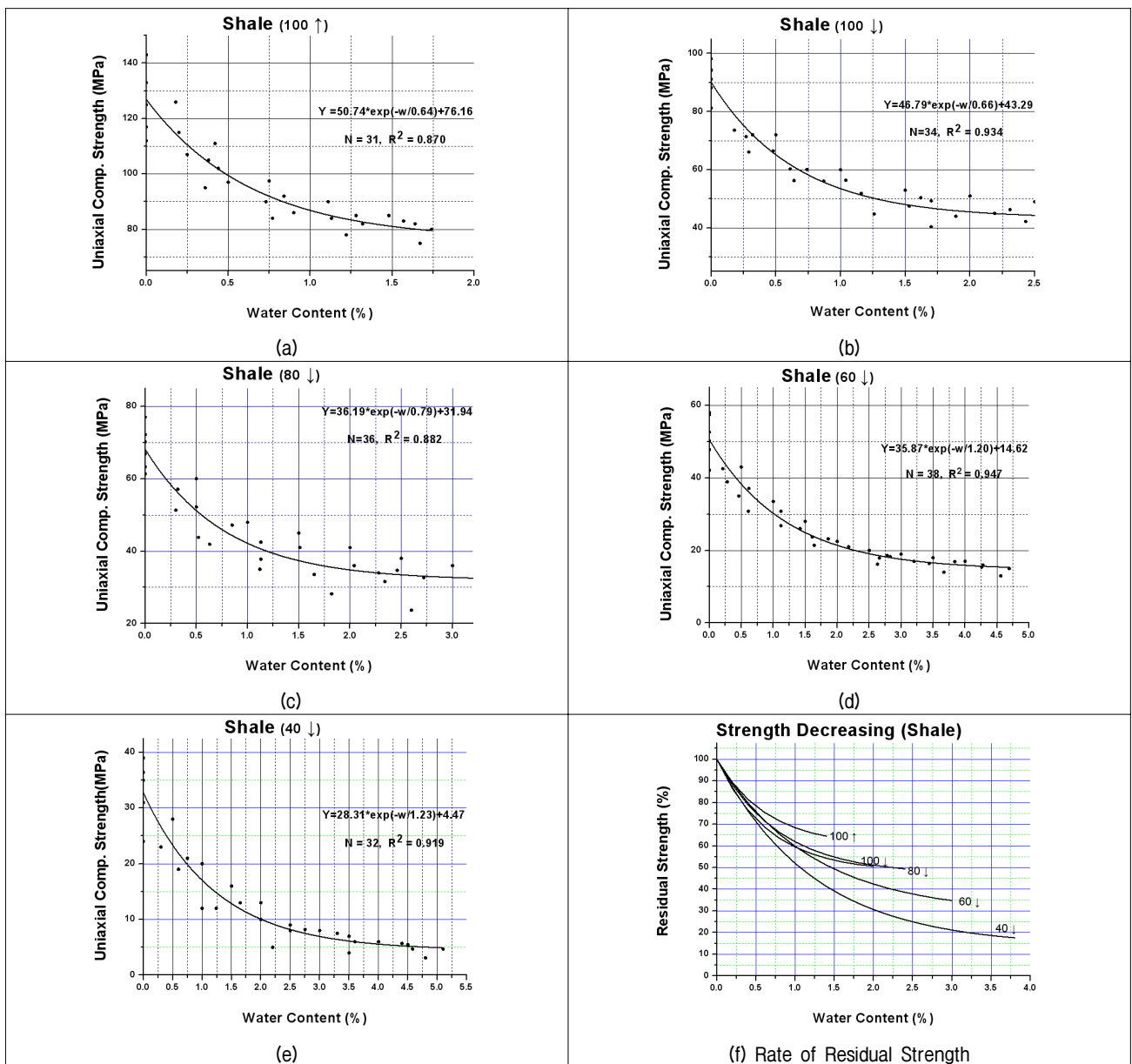


Fig. 3. Water content-strength decreasing (shale, uniaxial comp. strength)

상관성이 가장 높은 20MPa 범위로 분할하여, 100MPa 이상, 80~100MPa 구간을 100MPa이하로, 60~80MPa를 80MPa이하로, 40~60MPa를 60MPa이하 및 40MPa 이하의 5개 범위로 나누어 저감특성을 살펴 보기로 한다.

세일 강도 5단계 시료 30계열 171개, 사암 21계열 150개, 이암 20계열 152개, 역암 21계열 160개, 응회암 20계열 152개, 화강암 26계열 205개, 안산암 25계열 159개, 유문암 15계열 101개 및 편마암 25계열 195개의 각 강도단계별, 함수단계별 시료에 대한 일축압축강도시험을 시행하였다. 이들 시험중 세일에 대한 시험성과를 9개 암석군 성과의 대표로 예시한 것이 Fig. 3이다.

세일의 100MPa 이상 시료의 함수비-강도 저감곡선에서 함수비 1.70%이상에서는 평행축과 거의 동행함으로 함수 비증가로 인한 더 이상의 강도저감이 없음을 알 수 있다. 즉 1.70%가 한계저감 함수비로 볼 수 있다. 나머지 시험성과의 그림에서도 각각의 시료마다 한계저

감 함수비를 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉 이는 포화 함수비 이전에 충분한 강도저감이 된다는 사실로 판단할 수 있다.

Hawkins et al.(1992)은 일축압축강도와 함수비의 관계는 일반적으로 Exponential Growth 함수식 $Y=a*\exp(-w/b)+c$ 에서 최적의 상관성을 나타내는데 이 식에서 a, b, c는 암석에 따른 상수며 함수비 w에서 일축압축강도 Y로 나타낸다. 여기서 a+c는 건조시의 일축압축강도며 포화 시에는 c가 일축압축강도를 나타내며 b는 강도 저감계수라고 정의하였다. 즉 b는 함수 민감도를 나타낸다고 볼 수 있으며 b값이 클수록 민감도는 더 예민하다고 볼 수 있다.

세일 60MPa 이하, 7계열 38개 시료의 함수비-일축압축강도의 성과를 나타낸 Fig. 3(d)에서 함수시 강도는 $Y=35.87*\exp(-w/1.20)+14.62$ 로, 상관지수는 $R^2=0.947$ 로 도출되었다. 세일의 나머지 강도단계의 함수식들도 이

Table 6. Analysis of sedimentary rocks ($Y=a*\exp(-w/b)+c$, Y:uniaxial comp. strength, w:water content)

Rock	Step (MPa)	Rock Material Constant			No. of Sample	CorrelationFactor (R ²)
		a	b	c		
Shale	100 ↑	50.74	0.64	76.16	31	0.870
	100 ↓	46.79	0.66	43.29	34	0.934
	80 ↓	36.19	0.79	31.94	36	0.882
	60 ↓	35.87	1.20	14.62	38	0.947
	40 ↓	28.31	1.23	4.47	32	0.919
	Σ, (Mean)	-	0.90	-	171	0.910
Sandstone	100 ↑	53.45	0.51	96.62	30	0.832
	100 ↓	36.25	0.42	54.66	30	0.904
	80 ↓	37.59	0.82	32.84	30	0.871
	60 ↓	31.58	1.15	16.65	30	0.872
	40 ↓	23.88	1.14	4.65	30	0.855
	Σ, (Mean)	-	0.81	-	150	0.867
Mudstone	100 ↓	55.13	0.58	34.11	38	0.927
	80 ↓	52.80	0.56	19.15	38	0.913
	60 ↓	37.42	0.75	12.44	38	0.873
	40 ↓	22.30	0.83	4.35	38	0.735
	Σ, (Mean)	-	0.68	-	152	0.862
Conglomerate	100 ↓	43.80	0.42	56.04	40	0.797
	80 ↓	33.42	0.42	37.40	40	0.835
	60 ↓	28.45	0.37	20.38	40	0.816
	40 ↓	19.94	0.81	10.64	40	0.727
	Σ, (Mean)	-	0.51	-	160	0.794
Tuff	100 ↓	27.43	0.37	63.80	38	0.845
	80 ↓	36.03	0.50	34.45	38	0.886
	60 ↓	32.46	0.34	16.94	38	0.887
	40 ↓	21.63	0.41	6.29	38	0.773
	Σ, (Mean)	-	0.41	-	152	0.848

와같이 산출되었으며 화성암, 변성암종들에 대해서도 각각의 암석계열에 대한 함수비-일축압축강도의 상관성 해석결과를 도출하였다. 도출된 함수식을 Table 6과 Table 7에 요약하였다.

Fig. 3(f)는 세일에 대한 시험성가로 함수비에 따른 단계별 저감값을 정규화하여 동일 좌표에 집적하여 상호 관계를 비교한 그림이다. 퇴적암인 사암, 이암, 역암 및 응회암과 화강암, 안산암 및 유문암도 역시 비슷한 강도저감 경향을 보이며 변성암인 편마암도 비슷한 경향을 보이고 있다. 5종의 퇴적암, 3종의 화성암 및 변성암종인 1종의 편마암의 함수비 증가에 따른 강도저감 경향에는 암석별, 암종별 특성은 보이지 않고 있다.

Fig. 3(f)에서 40MPa 이하의 세일이 건조시에는 100%의 강도를 가지고 있으나 함수비 2%의 경우에는 약 30%의 강도를 나타내고 있음을 보여주고 있다. 이는 2%의 함수비로 인해 잔존 강도가 30%로 저감되어 있다는 것을 나타낸다.

Fig. 3(f)에서 40MPa이하 세일의 강도 저감율은 Hawkins et al.(1992)이 Exponential Growth 함수에서 강도 저감 계수로 표현한 값 $b=-1.23$ (Table 6)으로, 민감도가 크기

때문에 가장 아래부분에 곡선이 위치하며 그 변화율도 크다. Table 6의 퇴적암 해석자료에서 함수 민감도(b)의 평균값은 0.41~0.90에 분포하고 있다. 그 중에서도 세일의 민감도가 가장 큰 값인 0.90으로 이는 퇴적암 중에서 함수로 인한 강도가 가장 크게 저감된다는 것을 의미하며, 이는 풍화속도가 가장 빠르다는 의미일 것이다. Table 7에서 화성암, 변성암군들의 함수 민감도는 0.33~0.44에 분포되고 있으며 퇴적암보다 낮음을 알 수 있다. 이는 상대적으로 강도저감 및 풍화속도가 퇴적암에 비해서 낮다는 것을 의미한다. 또한 퇴적암군의 강도 민감도가 크다는 것은 점토광물의 함량이 타 암석군에 비해 크서 풍화속도가 빠르며, 그에 따라 침수에 의한 점토광물의 수용성으로 입자간의 부착력의 약화로 강도의 저감이 크게 나타날 것으로 판단되며, 교질물질의 수용 및 유실로 인해 암석구조의 간극이 크게 발달되어 함수비가 높아짐에 따라 강도저감이 클 것으로 판단된다.

6. 함수비-압열인장강도시험

Fig. 1(d)에서와 같이 압열인장강도의 저감특성 구명

Table 7. Analysis of igneous & metamorphic rocks ($Y=a*\exp(-w/b)+c$, Y:uniaxial comp. strength, w:water content)

Rock	Step (MPa)	Rock Material Constant			No. of Sample	Correlation Factor (R^2)
		a	b	c		
Granite	100 ↑	42.00	0.20	82.11	41	0.782
	100 ↓	39.47	0.39	50.50	41	0.921
	80 ↓	40.79	0.41	30.15	41	0.861
	60 ↓	33.86	0.41	17.29	41	0.890
	40 ↓	19.61	0.26	5.45	41	0.785
	Σ, (Mean)	-	0.33	-	205	0.848
Andesite	100 ↑	34.20	0.44	80.15	30	0.758
	100 ↓	37.51	0.39	49.21	30	0.884
	80 ↓	45.93	0.46	23.91	30	0.876
	60 ↓	29.95	0.49	14.48	33	0.900
	40 ↓	23.08	0.25	7.74	33	0.785
	Σ, (Mean)	-	0.41	-	156	0.841
Rhyolite	100 ↑	41.35	0.36	80.09	32	0.793
	100 ↓	48.74	0.39	38.55	34	0.907
	80 ↓	50.06	0.44	24.38	35	0.829
	Σ, (Mean)	-	0.40	-	101	843
Gneiss	100 ↑	42.09	0.21	77.95	39	0.772
	100 ↓	48.53	0.27	38.05	39	0.869
	80 ↓	44.25	0.25	25.17	39	0.907
	60 ↓	34.80	0.19	14.42	39	0.903
	40 ↓	22.30	0.26	6.18	39	0.831
	Σ, (Mean)	-	0.24	-	195	0.856

이 어립위 일축압축강도 기준으로 강도 단계별 구분을 하였다. 이는 일축압축강도 저감과 일관성 유지를 위하여 동일 core에서 생산된 시료를 사용했으며 203조의 시료군 1,311개 시료를 대상으로 시험하였다. 또한 시험 결과도 일축압축강도의 결과에서와 같이 Hawkins et al. (1992)의 Exponential Growth 함수식 $Y=a*\exp(-w/b)+c$ 의 법칙에 성립되고 있다.

세일, 사암, 이암, 역암, 응회암을 포함한 5종의 퇴적 암종과 화강암, 안산암 및 유문암을 포함한 3종의 화성암과 편마암인 변성암을 대상으로 압열인장강도 시험을 시행하였으며 각 암종별 해석을 시행하여 함수비에

따른 압열인장강도의 저감거동을 정리한 결과중 안산암의 강도 단계별 저감거동을 예시한 것이 Fig. 4이다. Fig. 4(f)는 각 단계별 저감값을 정규화하여 함수비에 따른 잔존 강도율을 나타낸 것이다. 이 그림에서도 일축압축강도와 같이 암종에 따른 저감특성은 보이지 않는다.

지표 및 지각의 암석에 강우나 모세관 침투에 의한 함수상태에서는 암석을 구성하고 있는 광물입자, 입자와 입자 사이를 채우는 기질(matrix material), 입자와 입자를 접착시켜 주는 교질물질(cementation material) 및 간극에 수분의 피복 및 침투로 화학성분의 산화 및 환원 작용으로 화학적 풍화를 지속하든지, 점토광물이 대부

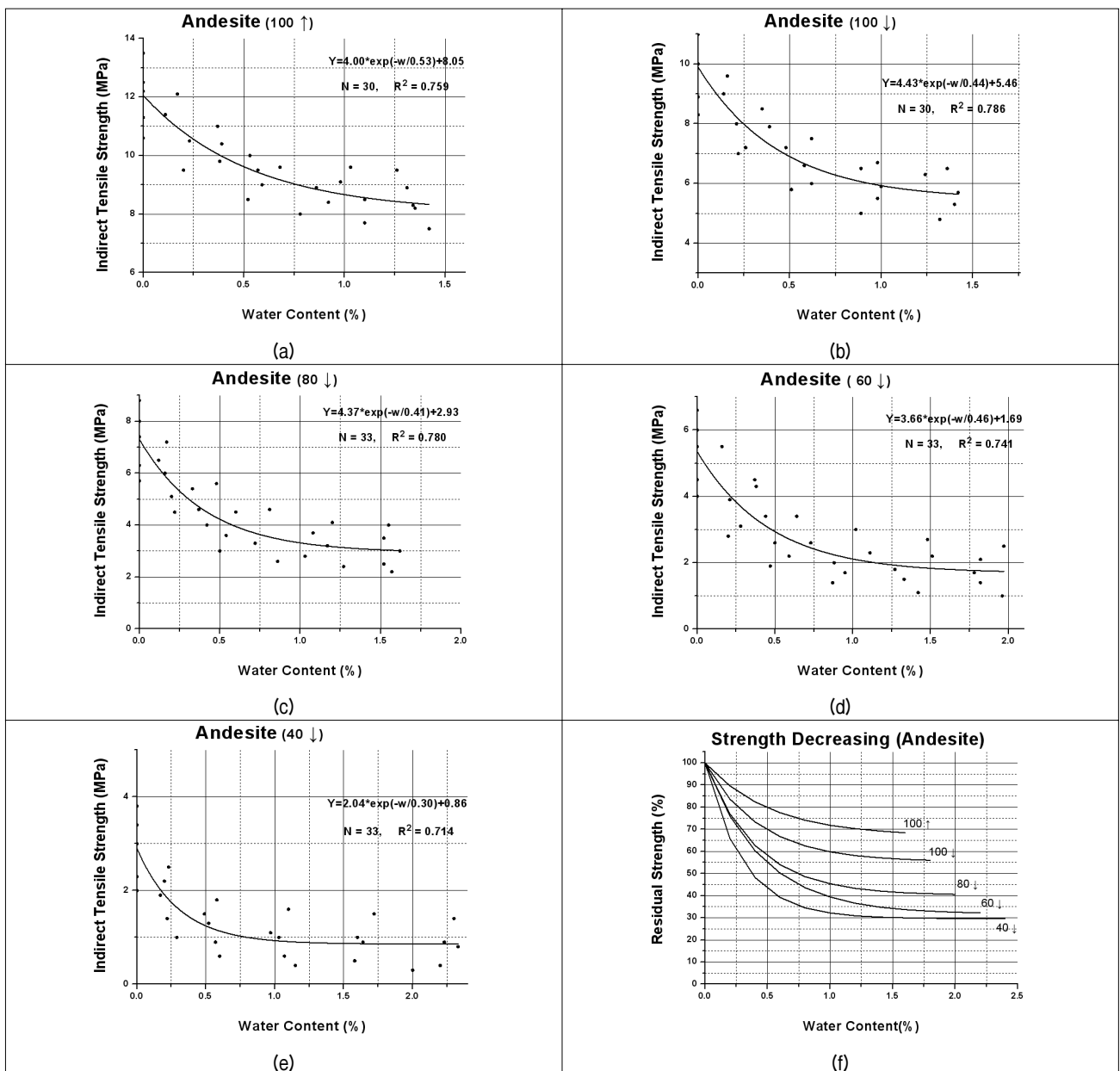


Fig. 4. Water content-strength decreasing (andesite, indirect tensile strength)

분인 기질과, 용해성 물질의 함율이 높은 교질물질에 수분의 침투로 용해 및 용탈작용(leaching)으로 부착, 접착력의 이완으로 강도의 약화를 초래 한다는 사실을 유추할 수 있다.

암석을 구성하는 광물입자를 서로 묶어주는 교질물질은 주로 규산 교질물질(silica cements), 탄산염 교질물질(carbonate cements), 점토광물 교질물질(clay mineral cements) 및 적철석 교질물질(hematite cements)로 이루어져 있다. 이들은 일반적으로 암석 부피의 5~10%로 비교적 적은 양이다(이용일 1994).

규산 교질물질과 적철석 교질물질은 안정도가 비교적 높아 풍화속도 및 용해도가 매우 느린 물질로, 함량이 매우 적으며 풍화 및 용해 속도가 느리기 때문에 함수비 증가에 따른 강도저감에 작용하는 요인이 상대적으로 적을 것으로 판단된다. 특히 본 연구와 같은 단시간의 침수에 의해서는 그 성질의 변화가 나타나지 않을

것으로 사료된다. 그러나 탄산염 교질물질과 점토광물 교질물질은 어느 암에서나 함량이 높고 수용성이 크기 때문에 이들의 영향으로 강도저감 현상이 발생할 것이란 추정을 할 수 있다. 특히 점토광물은 기질로서의 함량이 매우 높아 시간의 흐름에 따라 교질물질로의 점진적인 전환도 이루어지기 때문에 점토광물 교질물질의 함량이 타 교질물질에 비해서 상대적으로 높아, 함수시 성분의 용해 및 용탈로 인해 입자와의 결속력이 저감됨에 따라 강도저감 현상이 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 강도가 약한 암에서 함수 민감도가 더 크게 일어나는 것은 상대적으로 풍화도가 큰 암석일수록 함유하는 점토광물의 함량이 더 크기 때문일 것이다.

9개 암종의 각각에 대한 함수비-압열인장강도 거동을 해석하여 함수식을 Table 8과 Table 9에 요약 정리하였다. 압열인장강도 시험에서도 함수 민감도는 퇴적암이 0.54~1.02로, 화성암, 변성암에서는 0.38~0.51로 나타

Table 8. Analysis of sedimentary rocks ($Y=a \cdot \exp(-w/b)+c$, Y:indirect tensile strength, w:water content)

Rock	Step (MPa)	Rock Material Constant			No. of Sample	Correlation Factor (R^2)
		a	b	c		
Shale	100 ↑	5.08	0.85	8.02	30	0.759
	100 ↓	4.80	0.92	5.11	39	0.745
	80 ↓	5.19	0.85	3.32	42	0.862
	60 ↓	3.61	0.47	2.21	42	0.813
	40 ↓	3.38	0.57	1.22	33	0.839
	Σ, (Mean)	-	0.73	-	186	0.804
Sandstone	100 ↑	5.71	0.77	16.80	30	0.722
	100 ↓	8.78	1.21	7.93	32	0.842
	80 ↓	7.20	0.94	5.06	31	0.906
	60 ↓	6.35	1.15	2.99	31	0.822
	40 ↓	4.00	1.05	1.73	31	0.752
	Σ, (Mean)	-	1.02	-	155	0.809
Mudstone	100 ↓	6.78	0.57	4.20	34	0.900
	80 ↓	6.29	0.47	2.12	34	0.929
	60 ↓	4.69	0.61	1.13	33	0.835
	40 ↓	2.95	0.54	0.83	34	0.920
	Σ, (Mean)	-	0.55	-	135	0.896
Conglomerate	100 ↓	5.53	0.60	7.50	33	0.816
	80 ↓	4.52	0.58	4.20	32	0.790
	60 ↓	3.99	0.59	2.63	32	0.786
	40 ↓	2.74	0.80	1.08	34	0.712
	Σ, (Mean)	-	0.64	-	131	0.776
Tuff	100 ↓	3.91	0.44	8.17	30	0.795
	80 ↓	4.70	0.56	4.28	30	0.757
	60 ↓	4.71	0.53	2.29	30	0.785
	40 ↓	3.44	0.59	1.05	31	0.750
	Σ, (Mean)	-	0.54	-	121	0.772

나고 있다. 즉 퇴적암의 민감도가 화성암, 변성암의 민감도 보다 더 크다는 사실은 확인할 수 있으며 이는 일축압축강도와 같은 결과임을 보여주고 있다.

시료의 파괴가 포화 함수비 보다 훨씬 낮은 함수비에서 파괴가 일어난다는 사실은 간극공기압이나 간극수압으로 인한 파괴 이전에 교질물질의 입자간 접촉강도의 약화에서 비롯된다는 것을 의미한다. 즉 교질 물질중 수용성 인자를 많이 함유하고 있는 탄산염 교질물질과 점토광물 교질물질의 용해와 용탈로 인해 접촉강도의 약화로 낮은 강도에서 시료가 파괴된다는 사실을 알 수 있다.

각 암군별, 각 암종별 해석결과에서 암군 및 암종에 특별한 거동특성의 차이가 보이지 않는다. Table 6, 7, 8과 Table 9에서 함수민감도는 일축압축강도와 압열인장강도의 각 강도 단계별로 현격한 차이가 나는 것은 아니다. 이것은 암종에 불문하고 각 강도 단계별로 강도 저감거동을 검토해 보고 값의 분산정도가 만족할 수준이면 통합해서 해석한 결과를 활용할 수 있다면 보다 더 간편하게 실무에 적용이 가능할 것이다.

7. 잔류강도 추정 및 검토

설계와 공사관리 과정에서 압축강도와 인장강도의 자료는 시공품질을 제고시키는 가장 중요한 parameter 중의 하나일 것이다. 일반적으로 공사 설계단계에서 시행하는 현장조사와 토질, 암석 및 암반시험은 시간적, 경제적 제약으로 충분하지 못한 경우가 많지만 시공단계에서는 실물확인 과정에 있기에 구체적이고 현실적으로 공사품질의 제고에 적합한 판단을 할 수 있는 여건이 가취된 단계로, 자연함수비, 건조시료의 강도를 정확히 도출할 수 있다. 그러나 현장 실험실에서 복잡한 과정을 거쳐 현장 함수비의 재현, 시료의 제작 및 시험과정은 많은 시간과 비용이 필요하게 되며 이에 따라 그 과정이 소홀해 질 수도 있다.

본 연구로 도출된 일축압축강도와 압열인장강도의 함수비에 따른 강도도출을 위해서는 각 암석별, 각 단계별 상관식(Table 6~Table 9)을 활용하기엔 번거로운 점도 있기에 강도 단계별로 통합하여 합리적인 저감강도를 도출할 수 있을지 검토해 볼 필요가 있다. 따라서 본항에서는 100MPa 이상의 9개 암종을 시작으로 40MPa

Table 9. Analysis of igneous & metamorphic rocks ($Y=a \cdot \exp(-w/b)+c$, Y:indirect tensile strength, w:water content)

Rock	Step (MPa)	Rock Material Constant			No. of Sample	Correlation Factor (R^2)
		a	b	c		
Granite	100 ↑	4.97	0.43	9.57	38	0.813
	100 ↓	4.45	0.58	6.02	32	0.722
	80 ↓	5.23	0.50	3.67	33	0.779
	60 ↓	4.39	0.58	2.02	34	0.766
	40 ↓	2.85	0.46	1.00	33	0.801
	Σ, (Mean)	-	0.51	-	170	0.776
Andesite	100 ↑	4.00	0.53	8.05	30	0.759
	100 ↓	4.43	0.44	5.46	30	0.786
	80 ↓	4.37	0.41	2.93	33	0.780
	60 ↓	3.66	0.46	1.69	33	0.741
	40 ↓	2.04	0.30	0.86	33	0.714
	Σ, (Mean)	-	0.43	-	159	0.756
Rhyolite	100 ↑	4.99	0.32	9.79	31	0.811
	100 ↓	6.40	0.41	5.43	33	0.833
	80 ↓	6.08	0.42	3.02	32	0.835
	Σ, (Mean)	-	0.38	-	96	0.826
Gneiss	100 ↑	5.37	0.40	9.48	33	0.737
	100 ↓	6.32	0.40	4.89	32	0.841
	80 ↓	5.41	0.38	3.06	32	0.776
	60 ↓	4.87	0.52	1.54	31	0.837
	40 ↓	4.39	0.27	1.24	30	0.914
	Σ, (Mean)	-	0.39	-	158	0.821

이하의 9개 암종을 강도 단계별로 해석하여 압축강도를 Fig. 5에, 인장강도를 Fig. 6에 도시하였다. 이들의 집계로 상관식의 암석상수를 Table 10에 요약하였다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 강도 단계별 상관지수는 모두 0.800 이상으로 도출되었으며 이에 따라 분산도 작은 편이다. 높은 상관성을 보이고 있기 때문에 각 암종별, 단계별 강도저감 상관식으로 잔류강도를 산출하기 보다는 9개 암종의 통합된 상관식으로 결과를 도출함이 더 합리적이고 간편할 것으로 사료된다. 이는 상관계수, 분산정도 및 함수 민감도를 고려한다면, 함수비에 따른 강도 저감거동은 암종에 관계없이 강도 단계에만 지배된

다는 것을 의미한다.

암종별 강도 단계별 상관식은 압축강도용으로 40개의 식과 인장강도의 40개로 모두 80개의 상관식으로 세분되어 있으나 9개 암종을 통합하여 강도 단계별 해석을 한 상관식은 압축강도용 5개, 인장강도용 5개로 단순화 되어 있어 활용이 간편할 것이다. 이들을 요약하여 Table 10에 정리하였다. 9개 통합 강도 저감거동을 정규화하여 단계별 잔류강도를 Fig. 7(a)에 압축강도, Fig. 7(b)에 인장강도를 도시하였다. Table 11은 정규화된 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)의 암석상수와 상관지수를 요약한 것이다.

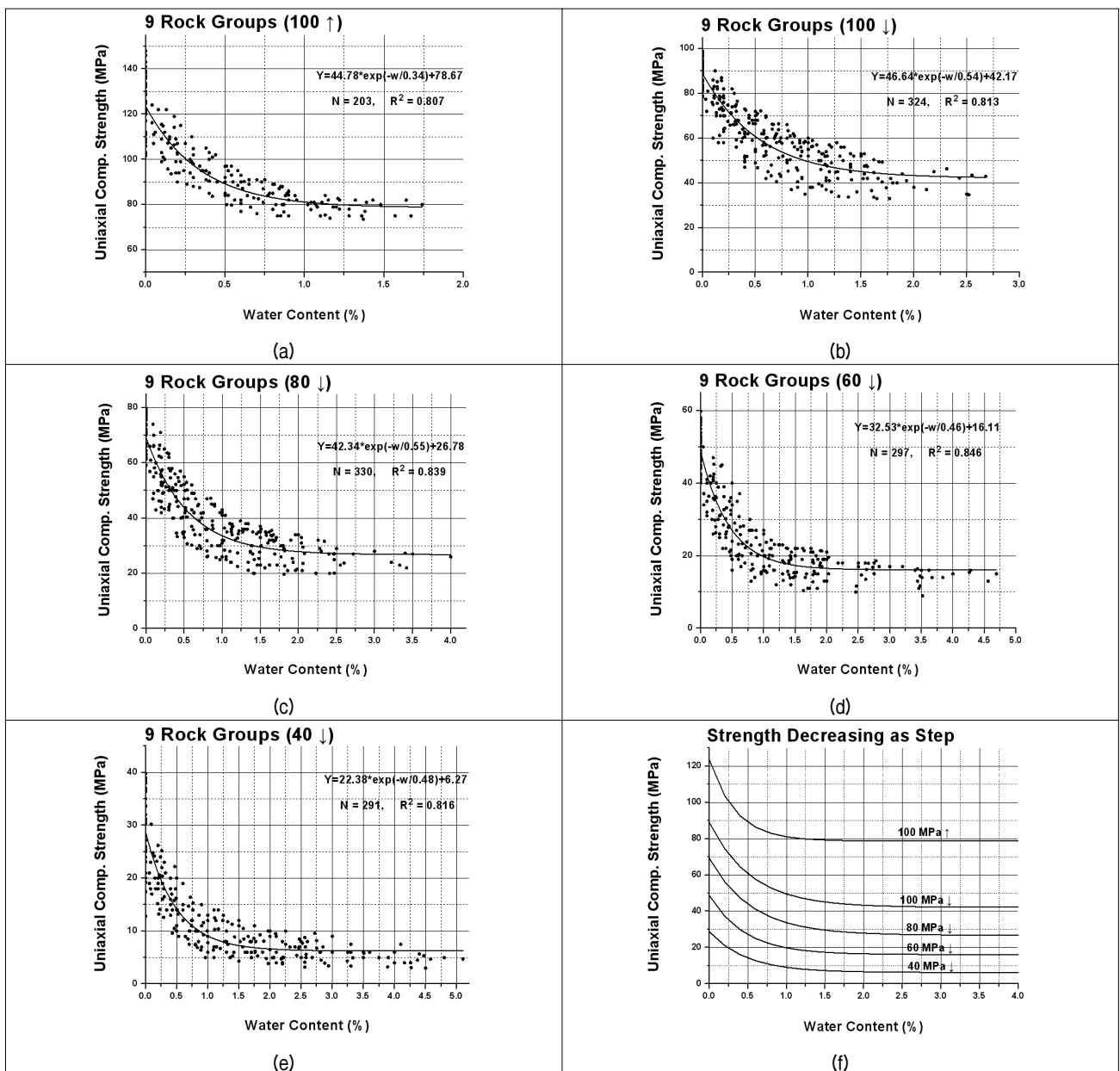


Fig. 5. Analysis of uniaxial comp. strength decreasing due to water content

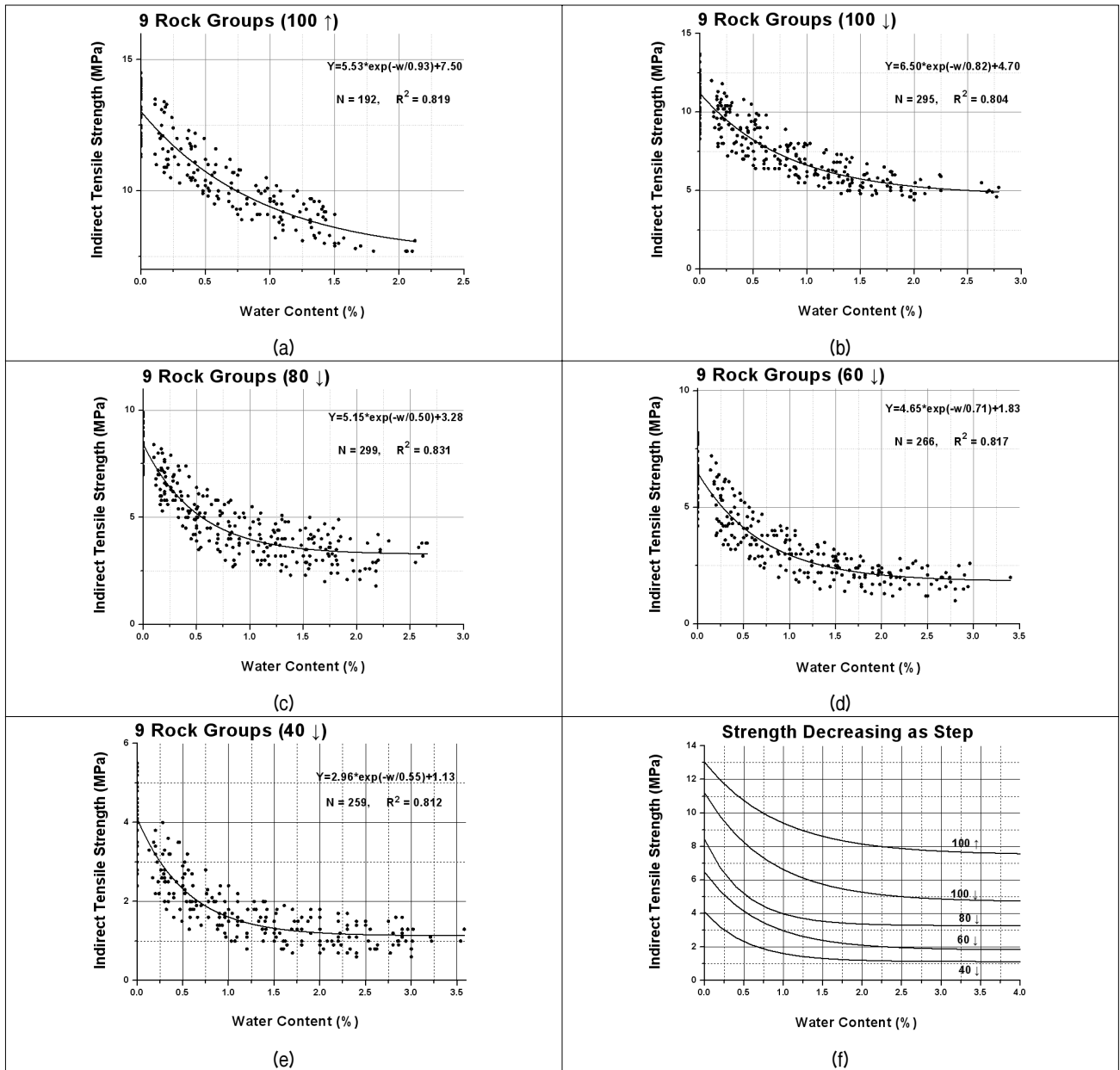


Fig. 6. Analysis of indirect tensile strength decreasing due to water content

Table 10. Residual strength ($Y=a \cdot \exp(-w/b)+c$, Y : residual strength by water content, w : water content)

	Step (MPa)	Rock Material Constant			No. of Sample	Correlation Factor (R^2)
		a	b	c		
Uniaxial Comp. Strength (MPa)	100 ↑	44.78	0.34	78.67	203	0.807
	100 ↓	46.64	0.54	42.17	324	0.813
	80 ↓	42.34	0.55	26.78	330	0.839
	60 ↓	32.53	0.46	16.11	297	0.846
	40 ↓	22.38	0.48	6.27	291	0.816
	sume			0.47		1,445
Indirect Tensile Strength (MPa)	100 ↑	5.53	0.93	7.50	192	0.819
	100 ↓	6.50	0.82	4.70	295	0.804
	80 ↓	5.15	0.50	3.28	299	0.831
	60 ↓	4.65	0.71	1.83	266	0.817
	40 ↓	2.96	0.55	1.13	259	0.812
	sume			0.70		1,311

Table 11. Rate of residual strength ($Y=a*\exp(-w/b)+c$, Y : Rate of residual strength by water content, w : water content)

	Step (MPa)	Rock Material Constant			No. of Sample
		a	b	c	
Uniaxial Comp. Strength (MPa)	100 ↑	36.27	0.34	63.73	203
	100 ↓	52.52	0.54	47.48	324
	80 ↓	61.26	0.55	38.74	330
	60 ↓	66.88	0.46	33.12	297
	40 ↓	78.12	0.48	21.88	291
	sume			0.47	
Indirect Tensile Strength (MPa)	100 ↑	42.44	0.93	57.56	192
	100 ↓	58.04	0.82	41.96	295
	80 ↓	61.09	0.50	38.91	299
	60 ↓	71.76	0.71	28.24	266
	40 ↓	72.37	0.55	27.63	259
	sume		0.70		1,311

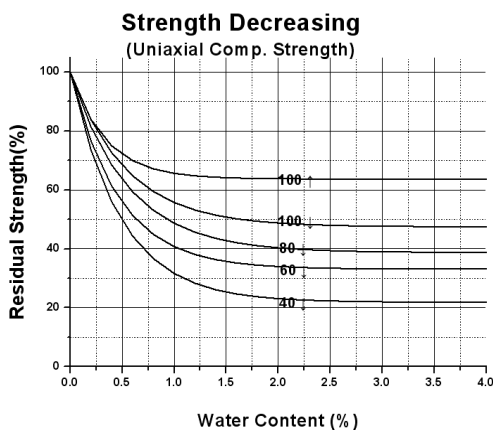
개별 암종에 따른 저감거동중 소수의 시료는 2.5~3.0%의 함수비에 25%의 잔류강도로 저감되는 경우도 있었지만 이들 결과 역시 통합 상관식의 오차범위내로 수렴되기에 통합 상관식을 사용하더라도 사용 program의 결과로 95%의 신뢰도는 유지한다고 볼 수 있다.

Table 10에서, 동일한 암석이라도 압열인장강도의 함수 민감도는 일축압축강도의 민감도 보다 더 예민함을 알 수 있다.

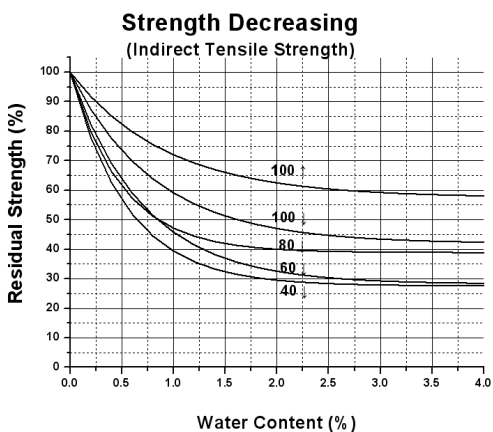
8. 결론

전국에 산재된 퇴적암군중 셰일, 사암, 이암, 역암, 응회암, 화성암군중 화강암, 안산암, 유문암, 변성암군중 편마암 등의 9개 암종을 채취하여 제작한 압축강도용 시료 1,445개, 인장강도용 시료 1,311개를 대상으로 함수시험을 시행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 함수시 강도 저감은 암군이나 암종에 관계없이 강도에만 지배된다.
- (2) 함수 민감도는 약한 암석일수록 예민하다.
- (3) 모든 암종에서 파괴는 포화 함수비에 도달하기전에 파괴된다.
- (4) 동일한 암석이라도 압열인장강도의 함수 민감도는 일축압축강도에서의 민감도 보다 더 예민하다.
- (5) 퇴적암의 함수 민감도가 화성암, 변성암보다 예민하다.
- (6) 자연상태의 모든 암반, 암석은 함수상태이기 때문에 설계, 시공시에는 반드시 잔류 강도를 적용해야 할 것이다.



(a) Uniaxial Strength Decreasing Rate



(b) Indirect Strength Decreasing Rate

Fig. 7. Rate of residual strength due to water content

참고 문헌

1. ASTM (D 2216-98), "Standard Test Method for Laboratory Determination of Water(Moisture) Content of Soil and Rock by Mass", *Annual Book of ASTM Standards* 2005.

2. ASTM (D 2938-95), "Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens", *Annual Book of ASTM Standards* 2005.
3. ASTM (D 3967-95a), "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens", *Annual Book of ASTM Standards* 2005.
4. ASTM (D 4543-01), "Practices for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances", *Annual Book of ASTM Standards* 2005.
5. ASTM (D 7012-07e1), "Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures", *Annual Book of ASTM Standards* 2009.
6. Aughenbaugh N. B. (1974), "Effect of Moisture on shale", *23rd. Annual Soil Mech. & Found. Eng. Conf.*(ASCE Geotechnical Division), pp.1-15.
7. Colback, P. S. B. and Wild, B. L. (1965), "The influence of moisture content on the compressive strength of rocks", *Proc. 3rd. Can. Symp. Rock Mech.*, Toronto, Ontario, pp.65-83.
8. Erguler, Z. A. and Ulusay, R. (2009), "Water induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks", *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.46, pp.355-370.
9. Hawkins, A. B. and McConnell, B. J. (1992), "Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content". *Q. J. Eng. Geol.*, Vol.25, pp.115-130.
10. ISRM (1978), "Suggested methods for determining indirect tensile strength by the Braxil test", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.15, pp.99-103.
11. ISRM (1979), "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.16, No.2, pp.135-140.
12. ISRM (1981), Part 1, "Suggested method for determination of the uniaxial compressive strength of rock materials", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.18, No.1, pp.211-213.
13. ISRM (1994), "Suggested methods for determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.31, No.5, pp.547-550.
14. Kim, J. N. (1985), *Statistics*, Kyungmunsa.
15. Kim, W. C., Kim, J. J, Park, B. W., Park, S. H., Song, M. S., Lee, S. Y., Lee, Y. J., Jeon, J. W., and Cho, S. S. (2005), *Mordern Statistics* (4th. Pub.), Col. of Science, Seoul National Univ., Yungji Cul. Co..
16. Lashkaripour, G. L. (1998), "The effect of water content on the mechanical behaviour of mudrock", *Proc. 8th. Int. IAEG Congr.*, pp.289-293.
17. Lee, Y. L. (1994), "Sedimentary Rocks", *Books Publising Woosung*, pp.127-194.
18. Rao, K. S., Rao, V., and Ramamurthy, T. (1987), "Strength of sandstone in saturated and partially saturated conditions", *Geotech. Eng.*(Thailand), Vol.18, pp.99-127.
19. Seedsman, R. (1986), "The behaviour of clay shale in water", *Can. Geotech. J.*, Vol.23, pp.18-22.
20. Talesnick, M. and Shehadeh, S. (2007), "The effect of water content on the mechanical response of a high-porosity chalk", *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.44, pp.584-600.
21. Torok, A. and Vasarhelyi, B. (2010), "The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, example from Hunggary", *Eng. Geol.*, Vol.115 pp.237-245.
22. Vasarhelyi, B. (2003), "Some observations regarding the strength and deformability of sandstones in dry and saturated conditions", *Bull. Eng. Geol. Env.*, Vol.62, pp.245-249.
23. Vasarhelyi, B. (2005), "Statistical Analysis of the Influence of Water Content on the Strength of Miocene Limestone", *Rock Mech. Rock Engng.* Vol.38, No.1, pp.69-76.
24. Vasarhelyi, B. and Van, P. (2006), "Influence of water content on the strength of rock", *Eng. Geol.*, Vol.84, pp.70-74.
25. Yamaguchi, U. (1970), "The number of test-pieces required to determine the strength of rock", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.7, No.2, pp.209-227.
26. Yasar, E., Ranjith, P. G., and Perera, M. S. A. (2010), "Physico-mechanical behaviour of southeastern Melbourne sedimentary rocks", *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.47, pp.481-487.
27. Yilmaz I. (2010), "Influence of water content on the strength and deformability of gypsum", *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.47, pp.342-347.

(접수일자 2012. 6. 5, 심사완료일 2012. 8. 24)