한국지반공학회논문집 제28권 11호 2012년 11월 pp. 87 ~ 99

ISSN 1229-2427
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2012.28.11.87

침투류에 의한 암석시료의 함수 저감거동 연구 (Ⅱ)

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

조 홍 제[1] Cho, Hong-Je
정 일 수[2] Jeong, Il-Soo
문 종 규[3] Moon, Jong-Kyu

Abstract

Targeting 9 types of rocks, which have high frequency of excavation, the researcher has analyzed decreasing behaviors of elastic modulus due to water content. The elastic modulus decreasing behaviors have been classified into 5 steps by uniaxial compressive strength. The results indicate that all of 5 sedimentary rocks and andesite show single decreasing behavior and granite, rhyolite, and gneiss demonstrate another decreasing behavior. Moreover, sensitivity of water content in granite, rhyolite, gneiss is almost twice as fast as that of the other rocks and their residual value of elastic modulus is very low.

요 지

국내에서 출토되는 퇴적암, 화성암 및 변성암군중 출토빈도가 높은 9개 암종을 대상으로 함수에 의한 탄성계수의 저감거동을 분석하였다. 일축압축강도 기준으로 20MPa 범위로 5개단계로 분활하여 단계별, Group별로 함수 저감거동을 분석한 결과는 5개 퇴적암 전부와 화성암군인 안산암을 포함한 모집단은 단일 저감거동을 보이며, 화성암군인 화강암, 유문암과 변성암군인 편마암은 또 다른 동일 거동을 보이며, 더욱이 저감속도가 퇴적암군을 포함한 모집단에 비해서 2배이상 빠르며 탄성계수의 잔존값도 매우 낮게 나타났다.

Keywords : Water content, Elastic modulus, Decreasing sensitivity

1. 서 론

국가의 경제적 발전에 따른 고도의 산업화가 보편화되어 가는 세계적 추세속에, 우리나라는 좁은 국토와 인구의 과밀화로 인한 생산부지 및 생활용지의 부족은 지하시설 개발이란 필연적 국면을 맞이하게 될 것이다. 이에 따라 지하공간의 시설과 유지관리는 암반공학이 해결할 중요한 과제일 것으로 예상되는 시점이다.

건설기술의 발전은 이미 이러한 문제들의 해결을 할 수 있는 수준에 도달하여 있지만 부분적으로, 또는 획기적인 기술개발을 위해서는 암반공학자들의 열정적인 도전을 기다리는 부분도 매우 많다. 그 중에서 암반, 암

1 비회원, 울산대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사 (Prof. Dept. of Civil & Envir.,Ulsan Univ.)
2 정회원, 울산대학교 대학원 박사과정, (주)부광엔지니어링, 대표이사 (Member, Graduate Student, President Bukwang Eng. Consultant Co.)
3 정회원, 동명기술공단(주), 공학박사, 토질 및 기초기술사 (Member, Dongmyung Eng. Consultant Co., Tel: +82-52-259-2856, Fax: +82-52-259-2629, mjk1067@hanmail.net, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 5월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

석에 침투류로 인한 강도의 저감, 탄성정수들의 함수거동을 구명하는 부분도 매우 중요한 과제라 할 수 있을 것이다. 이는 설계 및 시공에 임한 실무 기술자들이 암반, 암석의 각종 요소(parameter)들의 적용에서 아무른 평가나 비교도 없이 외국문헌의 자료를 채택하는 경우가 종종 있으며, 이에 따른 구조물의 안정성 및 경제성의 문제가 발생하는 경우도 많다.

암석의 특성은 지질학적 생성원인에 절대적 지배를 받는 지반재료기 때문에 외국의 사암과 우리나라의 사암특성이 동일하거나 비슷할 수 없다. 그러나 설계 및 시공에 임하는 현장기술자들에게 우리나라의 자료를 구득하기도 어렵고 또 기존자료도 부족한 것이 현실이다. 더욱이 우리나라 암반, 암석을 대상으로 연구된 함수상태의 각종 parameter의 변화에 대한 성과는 미소할 뿐이다.

자연상태의 암반은 극히 적은 예를 제외하고는 항시 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 저하된다는 사실은 알고 있으나 그 결과를 적합하게 적용하는 경우는 거의 없는 실정이다. 외국의 연구 결과도 극히 제한된 암종과 시료규모로 인한 결과이기 때문에 다양한 국내 암에 적용하기는 무리가 있다.

사면안정공법 도출을 시행할 때 거의 대부분의 경우 기존 해석 program을 사용하며 이에 지하수위를 사면마루에 적용하여 함수상태(우기시)의 안전율을 산출하고 있으나 이는 program에 함수시의 토사(암석)무게를 증가시켜 활동력의 증가를 도모할 뿐, 토사(암석)의 강도저하로 인한 저항력의 감소효과를 유도한 program 구성은 아니다. 또한 터널 굴진시 암반의 함수비가 높거나 용수상태의 막장안정을 위한 보강공법 도출시에도 암반강도의 저감은 고려치 않은 보강 공법을 활용하고 있지만 이의 공학적 미흡성이나 그 위험성에 대한 평가는 이루어지지 않고 있는 실정이다.

이러한 실정을 감안하여 본 연구는 우리나라 건설현장에서 토출빈도가 매우 높은 퇴적암(셰일, 사암, 이암, 역암, 응회암)5종, 화성암(화강암, 안산암, 유문암)3종 및 변성암(편마암) 1종을 포함한 9종의 암석군에 대하여 함수상태의 압축강도시험을 시행하여 탄성계수의 함수거동을 암군의 특성에 따라 관찰하였다. Ⅰ편(Cho et al., 2012a)에서는 일축압축강도와 압열인장강도의 함수거동을 다루었고, 본고인 Ⅱ편에서는 탄성계수의 함수거동에 대한 연구결과를 기술하기로 한다. 이는 강도와 탄성계수의 거동 연관성을 비교하기 위하여 Ⅰ편에서 사용한 시험시료와 동일한 시료의 결과를 해석하였다. 즉 Ⅰ편의 강도 시험시료에 탄성계수 측정을 위한 게이지를 부착하여 도출된 자료를 해석하였다.

2. 기존연구의 검토와 실험방법

2.1 기존연구

함수비증가로 인한 암반, 암석의 각종 강도 parameter의 변화를 연구하기 위해서 많은 공학자들이 헌신을 하여 왔으며 특히 Colback(1965)은 셰일(shale)을 대상으로 함수비와 일축압축강도, 탄성계수의 저감거동에 대한 성과로 암석, 암반이 함수상태에서 강도가 저하된다는 학술적 연구를 최초로 발표하였다. 그 후 수많은 연구자들은 셰일, 사암, 이암, 응회암 등을 대상으로 일축압축강도, 압열인장강도, 탄성계수 혹은 점하중강도와의 상관성 내지 저감거동에 관한 성과들을 보고하였다. 많은 연구자들이 성과를 보고하였으나 그 중 탄성계수의 함수거동에 대한 연구를 시행한 성과를 정리하여 Table 1에 요약하였다.

연구자들의 성과에서 두가지 특성을 알 수 있다. 하나는 시험대상이 연약 퇴적암(셰일, 사암, 이암, 응회암)을

Table 1. Studies of Elastic Modulus decreasing on water content

Researcher	Result	Sample rocks	No. of Sample
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
Vasarhelyi B.el (2003)	w-(UCS, E) decreasing	sandstone	35
Vasarhelyi B. el (2005)	w-(UCS, BRZ, E)	sandstone	45
Yilmaz I. (2010)	w-(UCS, E)	gypsum	42

w: Water Content, UCS: Uniaxial Comp. Strength, E: Elastic Modulus, BRZ: Brazilian Strength.

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 미흡함을 알 수 있다.

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(Hawkins et al., 1992). 따라서 일축압축강도와 탄성계수는 일차 함수관계를 가지기 때문에 암반구조물의 변형을 구명하기 위한 탄성계수의 저감 역시 암석강도와 직접적인 영향을 받을 것이다.

2.2 시료채취 및 시험방법

한국지질도(한국자원 연구소, 1995)에 분포된 퇴적암, 화성암 및 변성암의 분포도를 기준으로 지역과 면적의 비례에 따라 지점을 선정한 후 시공중인 공사현장, 인근 석산 등에서 rock hammer와 Schmidt hammer 타격으로 개략적 강도분포를 고려하여 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 시료중 셰일, 사암, 이암, 역암, 응회암, 화강암, 안산암, 유문암, 편마암의 9개 암종 139조, 680개의 시료를 대상으로 함수비에 따른 탄성계수의 저감거동을 관찰할 모집단을 구성하였다.

기존 연구자들은 거의가 대상을 퇴적암으로 국한하였기에 강도저감과 탄성계수 저감의 상관성의 결과가 모든 암석에 공히 적용될 것으로 잠정적인 인식을 가질 수 있는 결과들이였다. 그러나 필자의 연구경험으로 미루어 볼 때 탄성계수와 일축압축강도는 암석군에 따라 여러가지 거동을 나타내고 있다. 본 연구에서는 퇴적암, 화성암 및 변성암들로 구성된 시료들 대상으로 실험할 계획이기에 일축압축강도-탄성계수의 상관성을 구명하고 그 결과에 따라 함수 탄성계수의 거동을 구명할 것이다.

Aughenbaugh(1974)과 Erguler(2009)의 시료 침수에 의한 포화시간을 참고하여 본 연구에서는 실험에 소요될 일축압축강도용 시료를 code별로 묶어 동시에 건조기에 110±5℃/24시간 건조후(ASTM D 2216-98, ISRM 1994) 건조시료의 파괴강도를 참고하여 수침시간을 조절하였다. 수침시간은 3종류로, 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 표면건조상태의 시료를 파괴하였다. 시료는 1.2m 수심의 수조에서 수침시켰으며 자연상태의 수침현상에 가깝게 재현할 목적으로 증류수를 사용하지 않고 일반 수돗물을 사용하였으며 침투 확산제인 오산화인(P_2O_5)의 첨가도 하지 않았다. 수조는 수온 조절장치를 설치하여 23℃±1℃를 기준하였다.

수침되기전에 일축압축강도용 시료에 변형률계(PFL-10-11-1L, 119.8±0.5Ω, 10mm, Sokki Kenkyujo)를 시료 높이의 1/2지점에 종방향으로 부착한고, 그 반대편 시료 표면에 횡방향으로 부착하여 축변형률과 직경방향 변형률을 Data Logger에 송신하여 자료저장용 컴퓨터에 자동 수신되도록 연결하였다. 압축강도를 검측하기 위하여 50톤 용량의 Load Cell(ELG-50)을 20MN 용량의 UTM에 장착하여 시험하였다. 자료수신은 1초간격으로 수신하고 6.5MPa/min의 일정하중을 가하여 5~8회의 재하-재재하 가압하였다. 탄성계수는 재하-재재하시험의 최종회의 파괴하중 1/2점에서 도출된 값을 해석 parameter로 적용하였다.

Ⅰ편에서 일축압축강도-함수거동에 대한 연구성과를 보고한 바 있기에 본 연구도 전 연구의 후속 연구로, 모든 기준은 전 연구에 준하여 시행하여 일관성을 유지하였다. 전 연구에 따르면 함수시 암석강도는 암종에 관계없이 강도의 크기에만 지배된다는 사실을 알 수 있었다. 그러나 본 연구는 탄성계수의 함수거동에 대한 것이며, 탄성계수는 암종에 따라 거동특성이 다르게 도출되는 특성을 보이고 있음을 다음장에서 확인할 수 있을 것이다. 따라서 모집단의 시료와 조합은 Ⅰ편과 동일하나 그 구성과 해석절차는 전 연구와 다르게 진행될 것이다.

3. 암석군별, 단계별 해석

3.1 강도와 탄성계수의 상관거동 특성

일축압축강도와 탄성계수의 상관성은 암석군에 따라 다르게 표출될 것으로 예상이되어 위선 상호간의 상관성 특성을 해석해서 거동특성이 상이함을 확인할 필요가 있다. 이 결과에 따라 거동이 동일한 군끼리 묶어 함

수-탄성계수의 거동을 해석함이 합리적으로 사료된다. 이를 위하여 강도와 탄성계수 시험의 기준에 따른 건조 시 시료에 대한 시험성과로 퇴적암, 화성암 및 변성암을 단일 모집단으로 통합하여 강도-탄성계수의 상관성을 나타낸 것이 Fig. 1(a)이다.

Fig. 1(a)는 퇴적암(사암, 세일, 이암, 역암, 응회암)의 5개 암석군, 화성암(화강암, 안산암 유문암)의 3개 암석군, 변성암(편마암) 1개 암군을 포함한 9개 암군, 1,342개의 기 시험된 성과를 사용하여 일축압축강도-탄성계수 좌표에 적점한 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 암

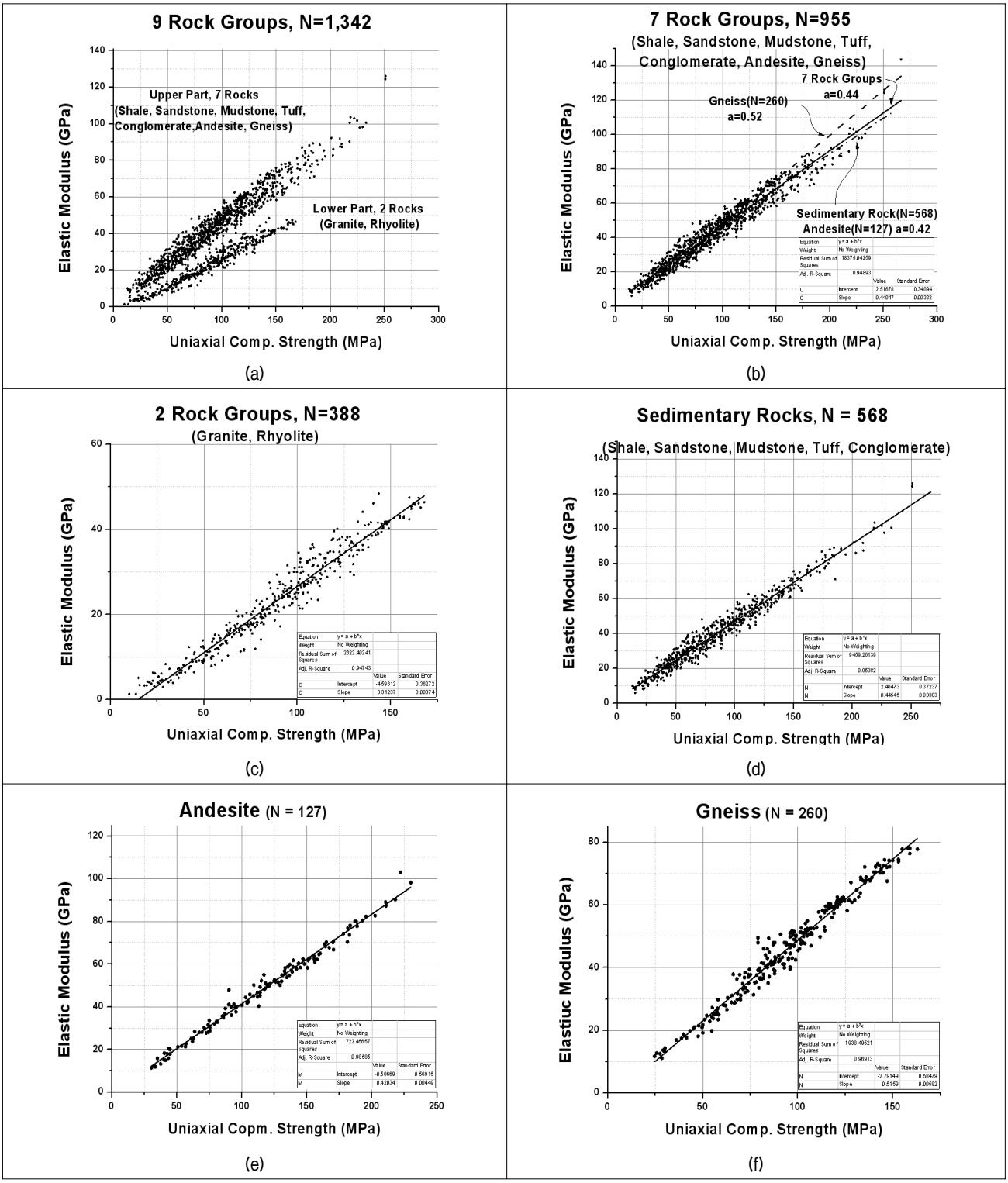


Fig. 1. Elastic Modulus behavior to Uniaxial Comp. Strength

석군에 따라 상관성 거동이 다르게 나타나며, 탄성계수와 일축압축강도는 일차함수인 직선관계로 표출되기 때문에 함수시에도 이와 같은 거동이 표출될 것으로 추정이 된다. 따라서 건조시료에 다른 상관성해석을 시행하여 향후 시험될 함수시 거동과 비교해 볼 필요가 있을 것이다.

Fig 1(b)는 Fig. 1(a)의 윗부분에 포진된 7개 암군에 대한 적점을 나타낸 그림이다. 동일 거동특성 처럼 보이나 260게 시료로 나타난 편마암의 기울기는 0.52로, 568개 시료인 5개 퇴적암군의 기울기는 0.42로 나타나기 때문에 7개 암군의 거동은 2종류로 나누어 관찰함이 합리적일 것으로 판단된다.

Fig. 1(c)는 Fig. 1(a)의 아랫부분에 적점된 화강암과 유문암 시료 388개에 대한 상관성 거동을 나타낸 것이다. 화강암과 유문암은 일축압축강도와 탄성계수의 상관거동은 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 상관계수인 기울기값은 0.31로 타 암종에 비해 매우 낮게 표출되고 있다. 즉 일축압축값으로 탄성계수값을 간접적으로 도출할 변환값이 낮음을 의미한다.

Fig. 1(d)는 5개 퇴적암군에 대한 상관성 해석도이다. 사암, 셰일, 이암, 역암, 응회암을 포함한 568개의 시료는 일축압축강도-탄성계수 좌표에서 동일거동을 나타내는 암석군임을 보여주고 있다. Exponential Growth 함수의 직선관계에서 상관계수가 0.980으로 높은 상관성이 있음을 보여주고 있다. 이 관계에서 퇴적암의 탄성계수는 일축압축강도의 약 45%에 해당됨을 알 수 있다.

Fig. 1(e)는 안산암 127개 시료에 대한 상관성 해석도이다. Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)에서 화강암과 유문암은 동일거동을 표출하고 있으나 안산암은 다른 거동을 나타내고 있다. 상관계수는 0.42로 퇴적암과 비슷한 양상을 보이고 있으나 강도범위와 상관계수의 상이함에 따라 별개 거동으로 함수탄성거동을 해석함이 옳을 것으로 사료된다.

Fig. 1(f)는 변성암종인 편마암에 대한 상관성 해석도이다. 260개 시료에 대한 해석결과는 높은 상관성을 보여주는 0.964의 상관계수가 도출되었다. 상관계수도 0.51로 9개 암종중 가장 높은 값을 보여주고 있다. 이는 편마암의 강도특성으로 볼 수 있는 점이다.

이상의 결과로 함수비-탄성계수거동을 관찰할 모집단의 구성은 5개 퇴적암군을 묶어 1개 모집단으로, 화성암에서 화강암과 유문암을 1개 모집단으로, 화성암인 안산암, 변성암인 편마암을 각각 1개 모집단으로, 모두 4개 집단을 대상으로 함수비에 따른 탄성계수의 저감거동을 관찰함이 합리적이라 사료된다. 이는 건조시료에 대한 구분이지만 일축압축강도와 탄성계수의 상관성은 Exponential Growth 함수에서 직선관계로 나타나기 때문에 함수시에도 같은 상관성을 유지할 것으로 추정된다. 4개 집단에 대한 상관성을 Table 2에 요약하였다.

3.2 강도기준으로 단계별 해석

화강암시료(S-4)5개로 수침규정에 따라 침수시켜 압축시험을 시행한 결과로 얻은 탄성계수값을 함수비-탄성계수 좌표에 적점한 것이 Fig. 2(a)이며, 화강암과 유문암은 강도-탄성계수의 상관거동이 동일하기 때문에 167개의 두 암석군의 개별 시험값을 함수비-탄성계수 좌표에 적점한 것이 Fig. 2(b)이다. 퇴적암군, 변성암(편마암) 및 화성암군인 안산암의 군집적점은 Fig. 2(b)와 같은 양상을 보이고 있다.

건조시 화강암시료(S-4)의 간극비는 1.32, 포화 함수비 1.14, 탄성계수 62.94GPa로 측정되었으며 0.63%의 함수로 탄성계수 8.4GPa에서 파괴되었으며 이는 포화 함수비의 약 55%에서 파괴된 결과이다.

Fig. 2(b)와 같이 각군의 군집 적점에서는 함수비에 따른 탄성계수값의 저감특성을 도출하기가 어렵다. 따라서 강도와의 연관성을 고려하여 Ⅰ편의 강도저감 해

Table 2. Correlation analysis for 4 groups

Rock Group	Rock	No.	Relation Fuction	R	SD
Sedimentary R.	sandstone, mudstone, shale, conglomerate, tuff	568	E=0.45*UCS+2.46	0.980	4.09
Igneous R.	granite, rhyolite	387	E=0.31*UCS−4.60	0.973	2.61
	andesite	127	E=0.42*UCS−0.59	0.993	2.40
Metamorphic R.	gneiss	260	E=0.51*UCS+1.54	0.964	0.61
Σ, (Mean)	9 Rocks	1,342		(0.978)	(2.43)

UCS: Uniaxial Comp. Strength/MPa, E: Elastic Modulus/GPa, R: Correlation Factor, SD: Standard Deviation, No.: Number of Sample, R.: Rock

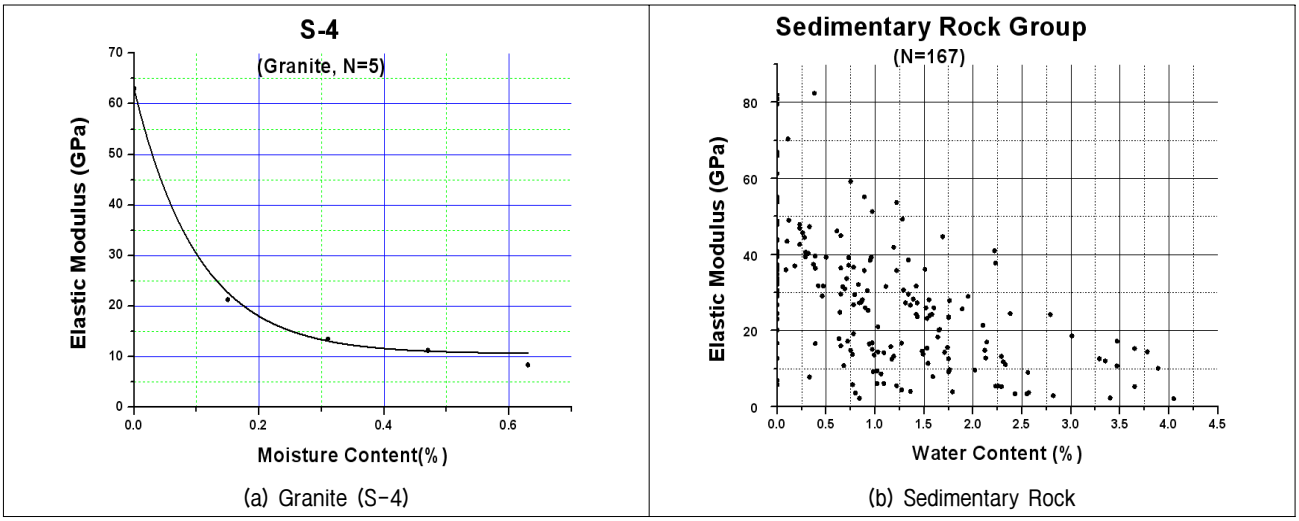


Fig. 2. Elastic Modulus Decreasing

석과 같은 방법으로 탄성계수값을 시료의 일축압축강도 단계별로 분할하여 해석함이 적절할 것이다. Ⅰ편에서 20MPa 범위로 분할하는 것이 표준편차가 가장 작고 상관계수도 높았기 때문에 일축압축강도 기준으로 100MPa 이상(100MPa↑), 80~100MPa를 편의상 100MPa 이하(100↓)로, 60~80MPa 이하(80↓), 40~60MPa 이하(60↓) 및 40Mpa 이하(40↓)의 5단계로 분할하였다.

4. 모집단의 구성

Table 2에 적시된 4개 군별마다 강도기준으로 5단계로 나눈 암석군을 기본해석 모집단으로 선정해서 함수시 탄성계수의 저감거동을 해석한 결과를, Table 2에 제시된 건조시 탄성계수-일축압축강도값과 비교해야 저감율을 산출할 수 있을 것이다. 이를 위하여 모두 20개소 모집단(4개군-5단계)이 구성되어야 하며, 신뢰성 확보를 위하여 소 모집단의 최소 규모는 30개 이상(Yamaguchi, 1970, Kim, 1985, Kim et al., 2005)의 시료가 필요하다.

Table 2에서 퇴적암 통합시료 150개 이상, 화강암과 유문암의 통합시료 150개 이상, 안산암 150개 이상, 편마암 시료 150개 이상이 소요된다. 안산암 시료는 150개 이상이 되도록 기 시험된 자료에서 보충해야 하며 타 암석군은 강도분포가 편중되지 않도록 임의 선별해야 할 것이다. 150개가 넘는 타 암석군의 시료를 모두 해석대상으로 사용할 수 있으나 해석결과가 Ⅰ편의 결과와 같이 탄성계수값의 크기별로 재해석(통합해석)이 필요할 때는 특정암석 자료의 과다한 분포에 의한 해석값의 편중을 우려해서다.

퇴적암군은 강도-탄성계수의 상관성거동이 동일하므로 통합해석을 시행할 것이나 강도별로 5개 암종을 고루 혼합하여 편중됨을 피할 것이다. 이는 화강암과 유문

Table 3. Population size (Sedimentary & metamorphic rocks)

Step (MPa)	Sedimentary rocks		Metamorphic rock	
	Sample/Group	Composition	Sample/Group	Composition
100↑	33/7	3shale, 4sandstone	34/7	7 Gneiss
100↓	33/7	2shale, 2sandstone, mudstone, tuff, conglomerate	33/7	7 Gneiss
80↓	35/7	2shale, 2sandstone, tuff, conglomerate	34/7	7 Gneiss
60↓	34/7	2shale, 2sandstone, 2tuff, conglomerate	33/7	7 Gneiss
40↓	32/7	shale, 2sandstone, 2mudstone, tuff, conglomerate	34/7	7 Gneiss
Total (Group)	167 (35 Group)	10shale, 12sandstone, 5tuff, 5mudstone, 3conglomerate	168 (35 Group)	35 Gneiss

Table 4. Population size (Igneus rocks)

Step (MPa)	Igneous rocks			
	Granite + Rhyolite		Andesite	
	Sample/Group	Composition	Sample/Group	Composition
100↑	35/6	4 granite, 2 rhyolite	36/7	7 andesite
100↓	34/7	5 granite, 2 rhyolite	35/7	7 andesite
80↓	34/7	4 granite, 3 rhyolite	34/7	7 andesite
60↓	35/7	7 granite	34/7	7 andesite
40↓	34/7	7 granite	34/7	7 andesite
Total (Group)	172 (34 Group)	27 granite, 7 rhyolite	173 (35 Group)	35 andesite

Table 5. Materials for Analysis (Illustration) (Sedimentary rocks, 100MPa↓)

Rock	Sample	w (%)	UCS (MPa)	E (GPa)	Rock	Sample	w (%)	UCS (MPa)	E (GPa)
N-4 Md.	N-4-5	0	90.3	42.1		SH-8-8	1.27	30.7	17.0
	N-4-6	0.03	82.1	41.0		SH-8-11	1.36	25.1	15.0
	N-4-8	0.08	78.5	38.5	YC-5 Cl.	YC-5-10	0	98.5	47.5
	N-4-9	0.18	66.9	32.5		YC-5-4	0.79	44.7	20.5
CO-2 Sd.	CO-2-3	0	92.5	43.8		YC-5-9	0.86	40.1	19.3
	CO-2-10	0.23	73.9	36.7		YC-5-2	0.90	37.4	18.0
	CO-2-12	0.28	66.1	32.5		YC-5-15	0.97	34.1	16.8
	CO-2-13	0.33	60.1	29.4	YG-7 Sd.	YG-7-17	0	90.9	41.9
	CO-2-14	0.39	56.8	27.3		YG-7-2	0.65	52.2	27.3
US-86 Sh.	US-86-21	0	97.6	47.6		YG-7-6	0.78	39.2	19.2
	US-86-22	1.34	25.5	17.3		YG-7-7	1.09	24.6	14.3
	US-86-14	1.52	24.1	16.0	US-91 Sh.	US-91-3	0	87.2	42.3
	US-86-6	1.56	23.4	15.2		US-91-4	0.34	50.5	25.4
	US-86-20	1.59	22.8	14.4		US-91-6	0.68	39.2	20.4
SH-8 Tf.	SH-8-2	0	81.2	37.5		US-91-8	0.88	34.8	16.5
	SH-8-5	0.63	44.3	22.4		US-91-9	1.07	27.4	13.1
	SH-8-7	0.68	39.7	19.8	7 Rock Group/33 Point				

w: Water Content, UCS: Uniaxial Comp. Strength, E: Elastic Modulus, Sh.: Shale, Sd.: Sandstone, Md: Mudstone, Cl.: Conglomerate, Tf.: Tuff

암의 통합해석에서도 같은 기준으로 소모집단을 구성할 것이다. 통합해석 소모집단의 시료는 Ⅰ편의 함수비-강도저감에 참여한 시료들 중에서 선별할 것이다.

본고에서 해석할퇴적암군과 변성암군의 각 강도단계별 소요 시료의 집계를 Table 3에, 화성암군은 Table 4에 요약하였다. Table 5는 각 암석군의 강도 단계별로 구성된 암석자료중 퇴적암군의 100MPa 이하 자료를 예시한 것이다.

5. 저감거동

본 연구에서 암석의 강도 및 탄성계수의 함수거동이 매우 민감하며 낮은 함수비에서도 탄성계수 저감량이 매우 큰 상태로 관찰되었다. 함수로 인한 강도 및 탄성계수 저감거동의 윤곽을 이해하기 위하여 화강암(AA-6 Group, 146.04MPa)시료와 사암(YG-14 Group, 79.49MPa) 시료를 예시로 개별 암석의 함수거동을 살펴 볼 필요가 있다.

AA-6 Group에서 자연함수비 상태의 강도 및 탄성계수의 저감은 거의 건조상태의 값에 비해 25% 가까운 수준으로 저감됨을 알 수 있다. 일반적인 저감상태를 나타내고 있는 AA-6(화강암, Gs=2.747, n=0.572, 포화함수비 =0.43%, 포화함수율=75.2%)를 예를 들면 함수비 0.25%에서 강도 8.04MPa로 저하되는 현상을 보여주고 있다. 암석의 포화함수비 0.43%와 비교하면 포화도 약 58%에서 강도는 약 94%나 저감되는 현상을 나타내고 있다.

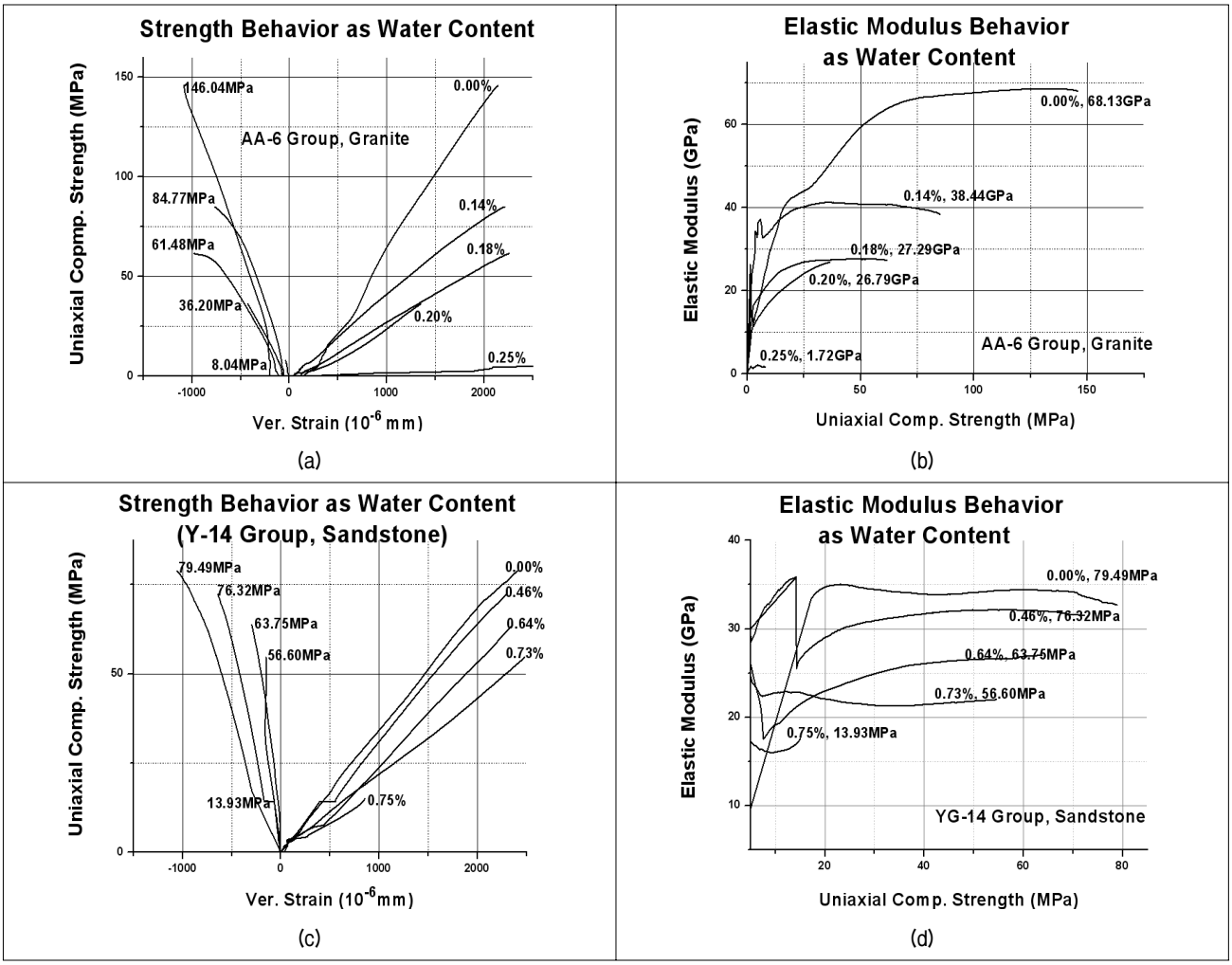


Fig. 3. An illustration of water content behavior at cores

YG-14(사암, Gs=2.729, n=1.627, 포화함수비=1.50%, 포화함수율=92.1%)에서도 건조강도 79.49MPa 시료가 함수비 0.75%에서 13.93MPa로 저감되며 포화함수비 1.50%와 비교하면 포화도 50%에서 잔존강도는 17.5%만 남아있는 결과를 보이고 있다. 이러한 현상을 그림으로 나타낸것이 Fig. 3이며 Fig. 3(a)는 AA-6의 5개 시료의 각각의 함수비에 대한 응력-변형률을, Fig. 3(b)는 함수비 증가에 따른 각각의 시료가 응력수준에 따라 나타낸 탄성계수 저감거동을 보이고 있다. Fig. 3(c)는 YG-14의 5개 시료의 각각의 함수비에 대한 응력-변형률을, Fig. 3(d)는 탄성계수 저감거동을 나타내고 있다.

6. 함수저감 해석

6.1 퇴적암의 해석

셰일, 사암, 이암, 역암 및 응회암을 포함한 퇴적암군을 1개 모집단으로 해석할 수 있다. 각 단계별로 가장 많이 분포된 암군을 추출하여 30개 이상의 모집단을 구성하여 해석을 하였다. 즉 100↑ 집단에는 셰일 3종, 사암 4종을, 100↓ 집단에는 셰일 2종, 사암 2종, 이암 1종, 역암 1종, 응회암 1종을, 80↓에는 셰일 2종, 사암 2종, 이암 2종, 응회암 1종을, 60↓는 셰일 2종, 사암 2종, 역암 1종, 응회암 2종을, 60↓는 셰일 1종, 사암 2종, 이암 2종, 역암 1종, 응회암 1종을 포함시킨 해석대상 모집단을 구성하여 각 암종당 4~5개 시료, 각 단계별 7개 암종으로 구성되었다.

Hawkins et al.(1992)은 일축압축강도와 함수비의 관계는 일반적으로 Exponential Growth 함수식 Y=a*exp(-w/b)+c에서 최적의 상관성을 나타내는데 이 식에서 a, b, c는 암석에 따른 상수며 함수비 w에서 일축압축강도 Y로 나타낸다. 함수비-탄성계수좌표에서도 Hawkins et al.의 법칙이 잘 표현되고 있음을 해석그림에서 알 수 있다. 즉 여기서는 Y값을 탄성계수로 간주하면 a+c는

건조시의 탄성계수며 포화시에는 c가 탄성계수를 나타내며 b는 탄성계수 저감계수라고 할 수 있다. 즉 b는 함수민감도를 나타낸다고 볼 수 있으며 b값이 클수록 민감도는 더 예민하다고 볼 수 있다.

Fig. 4에서 100↑~80↓까지는 함수민감도가 0.56에서 0.77로 증가하며 60↓~40↓에서는 0.67에서 0.54로 감소함을 볼 수 있다. 즉 탄성계수값이 높은 부분에서는 함수비증가에 의해 감소폭이 컷다가 차츰 값이 작은 부분에서는 감소폭이 조금식 적어지는

경향을 보이고 있다. 함수로 인한 시료 파괴때의 한계 함수비도 1.8~4.1%로 단계별로 함수비 범위가 증가함을 알 수 있다.

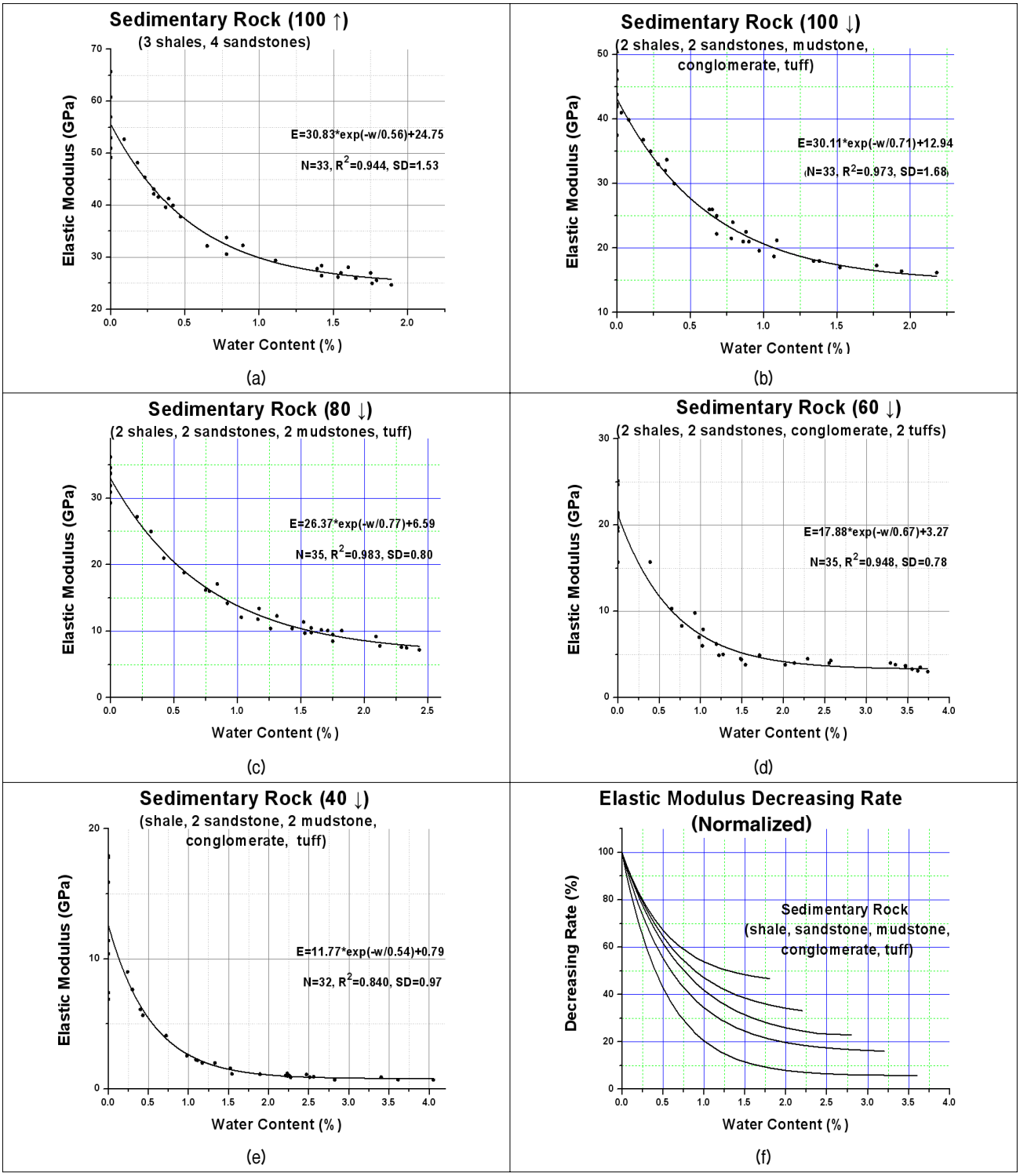


Fig. 4. Behavior of Elastic Modulus Decreasing (Sedimentary Rock)

Fig. 4(a)의 100↑에서 건조시 탄성계수값이 56GPa였으나 1.8%의 함수비로 26GPa로 저감되어 46%의 잔존값을 보이고 있으며, 100↓에서는 43GPa가 2.2% 함수비에 16.5GPa로 저감되어 38%의 잔존값을, 80↓에서는 33GPa에서 2.4%의 함수비에 의해 8GPa로 저감되어 24%의 전존값을, 60↓에서 21GPa가 3.8%의 함수비로 3.5GPa로 저감되어 17%의 잔존값을, 40↓에서 건조시 탄성계수값이 12GPa였으나 4.2%의 함수비 증가로 1GPa로 값이 저감되어 8%의 잔존값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 탄성계수값이 낮은 암석일수록 함수비증가에 따른 저감율이 크고 잔존율이 더 작아진다는 사실을 확인할 수 있다.

6.2 화성암의 해석

본 연구에서 화성암은 화강암, 유문암 및 안산암을 대상으로 선정하였으나 강도와 탄성계수의 상관거동을 검증한 결과 화강암과 유문암은 동일 거동을 보이지만 안산암은 별개의 거동을 나타내기 때문에 화강암과 유문암을 동일 모집단으로, 안산암을 또 다른 모집단으로 해석하기로 한다.

여기서도 Hawkins et al.(1992)의 Exponential Growth 함수식 Y=a*exp(-w/b)+c의 법칙이 성립함을 그림에서 볼 수 있다. 화강암과 유문암을 모집단으로 해석한 결과에서 100↑~80↓까지는 함수민감도가 0.19로 동일한 값을 보이나 60↓, 40↓에서는 각각 0.24와 0.26으로 함수민감도가 증가함을 보이고 있다. 이는 탄성계수값이 낮은 암석에서는 함수비증가에 따라 값의 저감폭이 매우 커다는 것을 의미한다. 즉 약한 암석에서는 함수비증가에 급격한 약화현상을 보인다고 할 수 있다. 또한 한계함수비 범위는 0.6~1.4%로 타 암석군에 비해 매우 낮음을 알 수 있다.

안산암의 100↑~60↓까지는 함수민감도가 0.50~0.72로 점차 증가하다가 40↓에서 0.67로 다소 낮아짐을 볼

Table 6. Results of Elastic Modulus Decreasing as water content (N=679)
Exponential Growth Function, Y=a*exp(-w/b)+c, Y: Elastic Modulus at Water Content, w: Water Content

Rock Group	Step (MPa)	Rock Constant			Statistics		
		a	b	c	No.	R^2	SD
Sedimentary Rock (shale,sandstone,mudstone, tuff conglomerate)	100↑	30.83	0.56	24.75	33	0.944	1.53
	100↓	30.11	0.71	12.94	33	0.973	1.68
	80↓	26.37	0.77	6.59	35	0.983	0.80
	60↓	17.88	0.67	3.27	35	0.948	0.78
	40↓	11.77	0.54	0.79	32	0.840	0.97
	Mean(Σ)		0.65		(168)	0.938	1.15
Igneous Rock (granite, rhyolite)	100↑	17.01	0.19	24.43	35	0.918	0.99
	100↓	18.02	0.19	15.34	34	0.943	0.51
	80↓	15.89	0.19	9.08	34	0.952	0.76
	60↓	13.91	0.24	4.08	35	0.935	0.66
	40↓	8.59	0.26	0.94	34	0.892	0.85
	Mean(Σ)		0.21		(172)	0.928	0.75
Metamorphic Rock (gneiss)	100↑	38.63	0.17	28.08	34	0.916	2.28
	100↓	33.20	0.21	14.66	33	0.974	1.01
	80↓	27.56	0.22	9.67	34	0.986	0.62
	60↓	20.46	0.23	4.96	33	0.916	1.19
	40↓	14.94	0.23	1.87	34	0.955	0.62
	Mean(Σ)		0.21		(168)	0.949	1.14
Igneous Rock (andesite)	100↑	20.47	0.50	34.28	35	0.863	2.44
	100↓	18.30	0.64	20.78	35	0.918	1.84
	80↓	17.17	0.65	13.19	35	0.966	0.73
	60↓	13.67	0.72	5.95	35	0.900	0.86
	40↓	12.77	0.67	2.10	32	0.967	0.46
	Mean(Σ)		0.64		(172)	0.923	1.27

수 있다. 그 외의 거동은 화성암과 퇴적암의 저감거동과 비 슷한 경향을 보이고 있다. 40↓에서는 화강암, 유문암, 안산암의 탄성계수 잔존율이 거의 10%정도로 저감되고 있음을 볼 수 있다.

6.3 변성암(편마암)의 해석

편마암은 함수민감도가 0.17~0.23으로 완만하며 타 암석군에 비해 민감도가 가장 낮은 특성을 보이고 있다. 함수비 0.5%까지는 급격한 저감현상을 보이다가 그 이후에는 완만하며 수평축에 수렴하는 경향을 보이고 있다. 한계함수비 범위는 0.72~1.30사이에 분포되어 있다. 한계함수비때의 탄성계수 잔존율은 100↑~40↓에서 42, 31, 27, 20 및 11%로 저감된다. Exponential Decay 저감곡선의 상관지수 R^2값은 0.916~0.986으로 높은 상관성을 보이며 표준편차 SD값도 0.62~3.71로 매우 신뢰성 높은 해석 결과를 보여주고 있다.

6.4 해석결과

퇴적암군, 화성암군(화강암, 유문암), 안산암 및 변성암(편마암)의 해석결과를 나타낸 그림은 Fig. 4의 퇴적암군의 해석도를 대표로 예시하며 각 암군의 해석값을 요약하여 Table 6에 정리하였다. 소 모집단의 규모가 30을 넘어서 통계적 신뢰도가 높다는 것을, 높은 상관지수값과 매우 낮은 표준편차값으로 확인할 수 있다. 또한 일축압축강도 기준 20MPa 간격으로 분할하여 해석한 결과도 통계적 신뢰도를 향상시킨 요인으로 볼 수 있다.

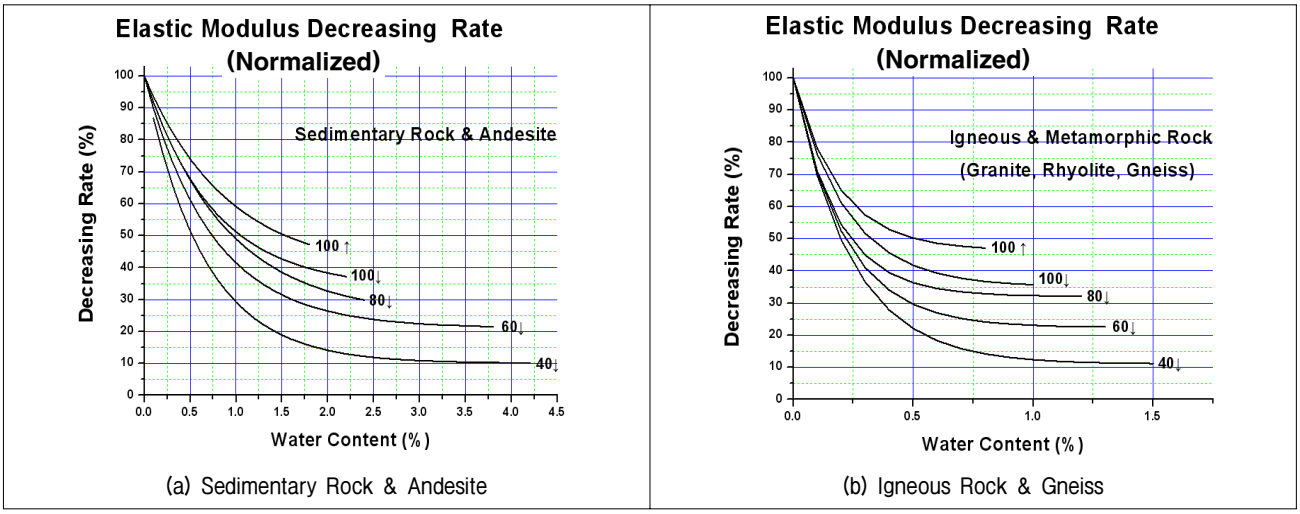
함수민감도 b값은 퇴적암군과 안산암의 값이 각각 0.65와 0.64로 전체적으로 비슷함을 보이고 있다. 화성암군(화강암, 유문암)과 변성암(편마암)의 값도 0.21로 서로 같아, 함수시 탄성계수의 저감정도가 비슷하게 거동한다는 의미이다. 즉 함수 민감도값이 같거나 미세한 차이로 비슷하다는 것은 그들이 함수를 하는 과정에서 탄성계수값의 저감 속도와 저감 정도가 동일하다는 의미이므로 통합해석이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

7. 함수저감율

탄성계수값의 크기에 따라, 암석군의 종류에 따라 각기 다른 저감거동을 나타내는 경향을 정규화하여 함수비에 따른 일축압축강도의 크기에 따라 저감 잔존값을 추정할 수 있도록 간편화함이 실무에 도움이 될 것으로 사료된다. 또한 함수민감도가 비슷하여 저감거동이 동일한 군들끼리 통합해석을 한 결과로 쉽게 문제해결의 접근이 가능할 것이다.

셰일, 사암, 이암, 역암 및 응회암을 포함한 5개 퇴적암군과 함수민감도가 0.65, 0.64로 비슷한 화성암군의 안산암을 묶어 통합하여 정규화된 저감거동 함수식을 도출하고, 화성암군의 화강암, 유문암과 함수민감도가 0.21로 동일한 변성암의 편마암을 1개 모집단으로 묶어 통합해석을 한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5(a)는 퇴적암군(셰일, 사암, 이암, 역암, 응회암)과 화성암군의 안산암자료를 정규화한 저감곡선이며 Fig. 5(b)는 화성암군(화강암, 유문암)과 변성암(편마암)의 저감곡선이다. Fig. 5(b) 곡선들은 저감속도가 매우



(a) Sedimentary Rock & Andesite

(b) Igneous Rock & Gneiss

Fig. 5. Normalizied Decreasing Diagram of Elastic Modulus as water content

Table 7. The Value Decreased (Y=a*exp(-w/b)+c, Y : The Decreased Elastic Modulus, w : Water Content)

구 분	암 종	강도범위 (MPa)	암 석 상 수			시료수 (개)	상관성 (R^2)
			a	b	c		
탄성계수	퇴적암 (셰일, 사암, 이암, 역암 응회암) + 화성암(안산암)	100 ↑	33.49	0.91	21.17	68	0.888
		100 ↓	27.46	0.75	13.96	68	0.823
		80 ↓	23.69	0.88	7.87	68	0.932
		60 ↓	16.08	0.74	4.30	69	0.902
		40 ↓	12.10	0.65	1.35	69	0.851
		소계(평균)		(0.79)		342	(0.881)
	화성암(화강암, 유문암) + 변성암(편마암)	100 ↑	29.59	0.19	25.53	69	0.865
		100 ↓	26.73	0.22	14.43	67	0.841
		80 ↓	20.90	0.18	9.88	67	0.830
		60 ↓	16.77	0.21	4.84	67	0.846
		40 ↓	11.65	0.24	1.44	68	0.854
		소계(평균)		(0.21)		(338)	(0.847)

Table 8. The Rate of Residual Value(Normalized) (Y=a*exp(-w/b)+c, Y : The Rate of Residual Value %, w : Water Content)

구 분	암 종	강도범위 (MPa)	암 석 상 수			한계 함수비(%)
			a	b	c	
탄성계수	퇴적암 (셰일, 사암, 이암, 역암 응회암) + 화성암(안산암)	100 ↑	61.16	0.91	38.81	1.80
		100 ↓	66.34	0.75	33.69	2.20
		80 ↓	74.94	0.88	24.90	2.40
		60 ↓	78.83	0.74	21.08	3.70
		40 ↓	89.62	0.65	10.00	4.20
		소 계		(0.79)		1.8~4.2
	화성암(화강암,유문암) + 변성암(편마암)	100 ↑	53.70	0.19	46.31	0.80
		100 ↓	64.96	0.22	35.02	1.00
		80 ↓	67.91	0.18	32.08	1.20
		60 ↓	77.57	0.21	22.42	1.30
		40 ↓	88.95	0.24	11.02	1.50
		소 계		(0.21)		(0.8~1.5)

빨라 동일한 함수비에서도 저감된 탄성계수값이 Fig. 5(a)에 비해 두배정도 차이를 보이고 있다. 즉 화성암과 변성암군의 함수로 인한 탄성계수 저감속도가 퇴적암군의 속도에 비해서 두배나 빠르며 저감된 잔류값도 더 작게 나타나고 있다. Fig. 5의 100MPa 이상 group에서 함수비 0.5% 상태의 탄성계수 저감 잔류값은 퇴적암군(안산암 포함)은 75%이나 화성암 변성암군은 50%로 나타나 있음을 알 수 있다. 이 차이가 함수민감도(sensitivity) 차이이다.

Exponential Growth 함수식으로 해석한 결과를 Table 7에 요약하였다. 즉 9개 암석을 대상으로 Table 7의 해당식을 활용하여 탄성계수값의 저감된 잔류값을 도출할 수 있을 것이다.

8. 결 론

우리나라에서 출토빈도가 높은, 퇴적암 45개 지점, 화성암 37개 지점 및 변성암 24개 지점의 106개 지점에서 채취한 954개 블록에서 생산된 시료중 셰일, 사암, 이암, 역암, 응회암, 화강암, 안산암, 유문암, 편마암의 9개 암종 139조, 680개의 시료를 대상으로, 함수비 증가에 따른 탄성계수값의 저감거동을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 탄성계수의 함수 저감거동은 5개 퇴적암(사암, 셰일, 이암, 역암, 응회암)과 화성 암군의 안산암이 동일 저감거동을 나타내며, 화성암(화강암, 유문암)과 변성암(편마암)이 또 다른 동일거동을 나타내고 있다.

(2) 화성암, 변성암군의 함수 저감속도가 퇴적암군 보다 더 빠르며 저감량도 더 크게 나타난다.

(3) 탄성계수의 함수 민감도는 강도가 약한 암일수록 예민하다.

(4) 모든 암종에서 탄성파괴는 포화 함수비 이전에 일어난다.

(5) 자연상태의 모든 암반, 암석은 함수상태이기 때문에 설계, 시공시에는 반드시 함수 잔류값을 적용해야 할 것이다.

참 고 문 헌

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. Aughenbaugh, N. B. (1974), "Effect of Moisture on shale", 23rd. *Annual Soil Mech. & Found. Eng. Conf.*(ASCE Geotechnical Division), pp.1-15.
3. Cho, H. J., Moon, J. K., and Jeong, I. S. (2012a), "A Study on Decreasing Behyavior of Strength and Elastic Parameters due to Water Infiltration in Rock Cores (Ⅰ). "*J. of The Korean Geotechnical Society*." Vol.29, No.9. pp.69-83.
4. 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, Vol.pt., pp.65-83.
5. 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.
6. 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.
7. Kim, J. N. (1985), *Statistics*, Kyungmunsa.
8. 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 Sience, Seoul National Univ., Yungji Cul. Co.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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. 9. 27, 심사완료일 2012. 11. 13)