

울산지역 퇴적암의 강도 추정법 연구 - 점 하중 강도지수로 일축 압축강도 추정 -

A Review of Strength Estimation Method on Ulsan Sedimentary Rocks

민 덕 기¹ Min, Tuk-Ki

문 종 규² Moon, Jong-Kyu

Abstract

In the ASTM and ISRM, an uniaxial compressive strength(σ_c) has been estimated to be 23(ASTM) or 20~25(ISRM) times of point load strength index using a diametral test regardless of the rock rating or geological conditions. This paper presents a relationship between I_s and σ_c of a weak sedimentary rocks on Ulsan of the Kyung-Sang Basin in Korea. In the results of 291 for σ_c test and 2310 for I_s test from 77 spots, the predicted errors of σ_c determined by strength ratio of σ_c/I_s have been relatively less than those determined by linear regression analysis. And in case of weak sedimentary rocks such as mudstones, shales and sandstones, σ_c should be lower than those suggested by ISRM and ASTM.

요 지

암석의 점하중 강도지수(I_s)로 일축압축강도(σ_c)를 추정함에 있어, ASTM이나 ISRM에서는 암종이나 지질학적 생성 과정에 관계없이 직경방향 점하중 강도(I_s)의 23배(ASTM) 혹은 20~25배(ISRM)로 취하고 있다. 여기서는 경상분지의 울산에서 채취한 연약한 퇴적암의 시험결과로 σ_c 와 I_s 의 관계를 제시한다. σ_c 와 I_s 시험결과 σ_c 의 추정값은 선형 회귀분석 보다는 강도비(σ_c/I_s)로 표현하는 것이 추정오차가 적었다. 그리고 약면이 내포된 퇴적암의 강도비는 σ_c/I_s 보다 σ_c/I_s 의 추정오차가 더 작으므로 σ_c 추정치는 ASTM이나 ISRM에서 제시한 값보다 낮게 취해야 참값에 가까울 수 있다는 결론을 얻었다.

Keywords : Linear regression analysis, Mudstone, Point load strength index, Sandstone, Shale, Uniaxial compressive strength

1. 서 론

암반공사의 대부분은 지표에서 깊이 100m 내외의 암반을 대상으로 하는 경우가 많다. 지중의 깊은 곳에는 대체로 신선암이겠지만, 건설공사의 관심대상인 지표 부근의 풍화가 진행 중이거나 고결토사에 가까운 암반은 지반 공학적 특성의 파악이 어렵다. 특히, 일축 압

축강도(σ_c)가 50MPa이하인 연약암(weak rocks)의 공학적 특성은 세밀한 조사와 검토가 요구되는데, 기 발표된 연구결과는 강도가 보통암급 이상이거나 신선암에 대한 연구가 대부분이다.

많은 연구자들이 점하중 강도지수에 대하여 연구한 성과는 보편적 적용(universal using)을 하기엔 오차 범위가 너무 커서 실무 활용이 안되고 있는 실정인 바 이

1 정회원, 울산대학교 공과대학 건설환경 공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Env., Univ. of Ulsan, tkmin@ulsan.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 동명기술공단(주), 부사장, 토질 및 기초기술사 (Member, V/P, Dongmyung Eng. Consult. Co.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

는 지질학적 생성원인의 차이인 화성암, 변성암 및 퇴적암을 구분하지 않은 이유일 것이며 더욱이 같은 퇴적암에 대한 연구성과도 비슷하지 않은 원인은 퇴적이력, 입자구조 및 광물조성의 차이 때문일 것으로 사료되어 본 연구에서는 불확실성 원인을 해소하고자 연구 대상의 시료를 생성원인과 퇴적이력이 동일한 경상분지 하양층군에 속하는 퇴적암중 울산지역에 분포된 사암과 셰일 및 이암에 국한하였다.

선형 회귀분석 결과에서는 $\sigma_c = k \cdot I_s + b$ 의 절편 b 값에 대한 검토가 중요하다. b 값은 일반적으로 강도가 높을수록 크게 나타나므로, 연약암일수록 b 값의 크기에 따라 σ_c 의 참값 추정이 곤란하다. 그리고 I_s 가 0인 경우에도 $\sigma_c > 0$ 인 모순이 내포되어 있다. 그래서 여기서는 $\sigma_c < 50\text{MPa}$ 인 연약암이 24.7%이상 포함된 사암, 셰일 및 이암 시료로 일축 압축강도시험(uniaxial compressive strength test-UCST)과 점하중 강도시험(point load strength test-PLST) 결과를 연약암에서도 결과 도출이 가능한 점하중 시험법의 축방향 시험값($\sigma_c/I_s \perp$)을 사용한 강도비(σ_c/I_s)로 해석하여 추정식을 제시하였다.

2. 연구동향

Protodyakonov와 Voblikov(1957, 1960) 그리고 Ilivitskii와 Nickolin(1961)은 구형에 가까운 불규칙 암석시료의 강도 시험법을 소개하였고, Hobbs(1963), D'Andrea등(1965)은 이 방법으로 σ_c 추정식을 발표했다.

Hiramatsu와 Oka(1966)에 이르러 PLST의 이론적 근거가 비로소 정립되었다. 그 후, Broch와 Franklin(1972)은 $\sigma_c - I_s$ 관계식 및 구체적인 시험법을 제시하였으며, Bieniawski(1975)에 의해 Broch와 Franklin의 경험식이 검증되어 ASTM(D5731-95)과 ISRM(1985)에서 표준시험법으로 채택되어 현재에 이른다. Guidicini등(1973), Singh D.P.과 Singh J.N.(1979)은 불규칙 암석시료의 σ_c 추정식을 발표하였고, Peng(1976)은 직경방향 실험결과를 유한요소법으로 해석하여 시료내부의 응력분포를 구명했다. 특히, Brook(1977)은 불규칙 시료의 형상과 크기에 따른 강도변화를 구명하였다.

전술한 연구의 대부분이 직경방향의 점하중강도지수($I_s \parallel$: 직경방향 실험값, 그림 3(b))로 $\sigma_c - I_s$ 관계를 제시하였고, 축방향의 점하중 강도지수($I_s \perp$: 축 방향 실험값, 그림 3(c))는 이방성 지수(I_{sa})를 구하는 정도에 그쳤다. 그리고 시험대상의 암석도 화성암, 변성암, 퇴적암

등 압중에 상관없이 적용 가능한 일반식으로 제시하였으며 또한 한국의 대다수 연구에서도 이러한 경향이였다.

추정식은 암종별 및 지질학적 생성 배경과 퇴적이력에 따라 다르므로 기 연구된 일반식의 성과가 현실적으로 잘 맞지 않고 있음이 인지되고 있는 것이 최근의 경향이지만, 구체적인 주제로 아직 발표되지 않은 실정이다.

Wilson(1976)은 연약암인 경우는 $\sigma_c - I_s$ 관계를 축방향 점하중 강도로 추정할 것을 주장하였으며, Cargill과 Shakoor(1990), Jenni와 Balissat(1979), Rao K.S.와 Rao G. 및 Ramamuthy(1987), Bowden, Lamint-Black 및 Ulllyott(1998)도 같은 견해이다. Pells(1975), Forster(1983), Greene와 Schaffer(1997)는 직경방향보다는 축방향 점하중 강도를 이용해야 σ_c 의 추정오차가 감소됨을 실험적으로 제시했다. 그러나 이들 역시 지질학적 생성배경을 고려하지는 않고 풍화된 연약암을 대상으로 하였다.

3. 지질개황과 시료준비

3.1 지질개황

울산분지는 중생대 백악기 하양층군에 속하며 충적선상지 및 충적평야 퇴적층들로 수성 쇄설성 퇴적암인 사암, 셰일, 이암들이 주류를 이루며 이들 암종간 교호 퇴적되어 층리 형성이 30~50cm 정도로 교호 층상이 뚜렷하며 신선암에 가까운 암에서 매우 풍화된 암층까지 고루 분포되어 있으나 풍화 진행이 깊은 암들의 분포가 더 많으며 특히 이암층의 풍화가 매우 심하다.

이러한 퇴적암 분포가 울산분지 전체 면적의 68%를 차지하고 있으며 부분적으로 접촉 변성작용을 받아 hornfels화 한 곳도 약간 분포되어 있으며 동남방 일부에는 화산 쇄설성 퇴적암인 안산암질 응회암(tuff)도 약간 분포하고 있다.

3.2 시료 준비

3.2.1 시료 채취

그림 1에서 AB선은 양산단층을 표시하며 AB선 왼쪽은 화성암(화강암, 안산암) 분포지역이며 그 외 붉은색 지역 또한 화성암(화강암, 응회암 및 규장암)분포지역으로 이들을 제외한 파란색 지역이 퇴적암 지역이다.

퇴적암 지역을 면적비와 사암, 셰일 및 이암의 분포도를 고려하여 7개군(group)으로 구분하여 사암, 셰일, 이

표 1. 시료 채취 지점

Group No.	Sample No.	채취지점	현장의특성
1	US/UD 1~18	울산-범서 확포장(반송리 대절개구간)	자색 셰일, 사암(교호층상)셰일이 우세
2	US/UD 20~31	울산-범서 확포장(연양 육교 터파기)	자색사암(층상구조) 사암이 절대적 우세
3	US/UD 40~49C	천상정수장공사(범서면 천상리)	녹/흑/회색 셰일(층상구조) 셰일이 우세
4	US/UD 71~79	협성 APT공사 터파기(북구 호계리)	연자색 셰일, 사암, (교호층상 구조)
5	US/UD 80~89	대곡댐 이설도로공사(두동면 나전리)	자색 셰일(층상구조), 셰일이 절대적 우세
6	US/UD 90~97	인보-도계 확포장 (두동면 봉계리)	자색 셰일(층상구조), 셰일이 절대적 우세
7	US/UD 100~111	부-울 고속도 7공구(웅촌면 동천리)	연자/회색 셰일, 사암(교호층상)

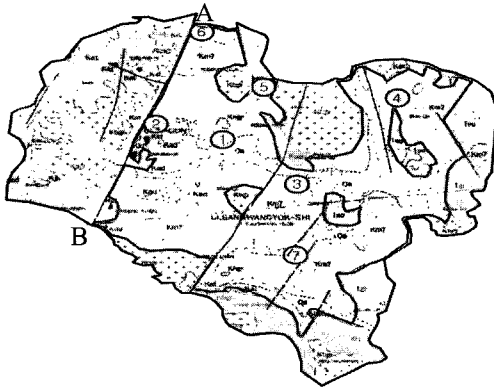


그림 1. 시료채취지점

암, 신선암과 풍화 진행암의 구성 비율에 따라 각군에서 12~15개의 block을 채취하였다.

건설공사 굴착현장에서 임의의 암석 block의 암종, 외형상의 암석조직, 색상 및 당해 현장에서 생산된 연암, 경암의 발생비율을 고려하여 모집단으로서 군(group)을 대표할 수 있도록 채집하기 위하여 현장에서 먼저 geologic hammer와 Schmidt hammer로 개략적 조사 후에, 균별로 크기 40×50×30(cm) 정도의 block을 채취했다. 특히 풍화가 심한 연약암군은 공시체 가공중에 파손을 고려하여 2~3개씩 더 채취했다. 채취된 block의 균별 구분은 표 1에 요약하였고 Group No.는 그림 1에 채취 지점을 표시하였다.

채취한 시료에서 sand stone, arkose, wacke, grey wacke를 포함하는 사질암(arenaceous stone)을 편의상 사암으로, mud stone, silt stone, clay stone이 포함된 argillaceous

표 2. UCST와 PLST 시료수

암종	Block수	UCST	%	PLST		
				//	┘	계
셰일	36	137	47.1	486	594	1080
사암	25	44	32.3	367	383	750
이암	16	60	20.6	192	288	480
평균	77	291	100	1,045	1,265	2310

stone을 셰일(shale)로, 층리, 엽층리등의 흔적이 없는 argillaceous stone을 이암으로 분류했다. 이는 건설 기술자들이 현장에서 퇴적암을 쉽게 구분하는 방법이기도 하다.

3.2.2 시료 준비

실내로 운반된 block을 H-beam(350×350×12×2000)을 300mm 간격으로 평행하게 용접한 편평한 면에 click 밴드로 양단부를 고정시켜 층리 혹은 불연속면에 수직되는 방향으로 NX-size로 coring하였다(그림 3(a)). UCST용 시료는 직경이 54mm, 길이 110mm 기준으로 가공하였고, PLST(//)용은 L/D = 1.0 이상, (┘)용은 L/D = 0.5~0.7 이상이 되도록 준비하였으며 준비된 시료 현황은 표 2와 같다.

3.2.3 시료의 물리적 성질

준비한 공시체에 대해서 지름과 길이를 측정하고, 수침, 자연건조 및 노건조 과점마다 측정한 무게로 밀도, 비중, 함수비 및 흡수율 등을 구한 결과가 표 3이며 파괴시험은 공기건조 상태로 실시하였다. 흡수율 시험은

표 3. 시료의 물리적 특성(암종별 평균값)

암종	밀도(kN/m ³)	비중	함수비(%)	흡수율(%)	σ_c (MPa)	E(GPa)	간극율
셰일	26.81	2.765	0.86	2.51	92.8	44.56	1.426
사암	26.76	2.751	0.36	2.37	106.3	50.05	2.717
이암	26.64	2.864	1.12	4.74	54.3	24.96	6.870
평균	26.76	2.778	0.65	2.93	89.2	42.27	3.630

미세기포 제거를 위하여 끓인 후 $2t/m^2$ 수압조에서 48시간 수침시킨 후 측정된 값이다. 표 3의 자료에서 퇴적암 전체의 자연 함수비 및 흡수율이 높게 나타나며 특히 이암의 흡수율은 사암과 세일에 비해 두배 정도가 되고 간극율을 고려하면 풍화 속도가 그만큼 빠르다고 할 수 있으며 이암의 강도 및 탄성계수는 사암, 세일에 비해 반정도의 값으로 나타나고 있다.

4. 강도시험

4.1 일축 압축시험 (UCST)

Block마다 채취 지점별로 사암, 세일 및 이암으로 분류하고 ASTM(D4513-85/91)에 준하여 공시체를 준비했다. UCST용 공시체는 길이 90mm이하는 제외하고, $L > 2D$ 인 것만 골라서 3개/조로 준비하였다.

상하 압축면의 편평도는 diamond 편이 박힌 직경 4인치 grinding disc를 사용하여 0.02mm를 목표로 연마하였다(ASTM D 2938-95, ISRM 1981). 아주 약한 압축은 연마중에 양단면의 파괴가 심하여 표준 편평도에 만족시키지 못한 시료도 많았다. 그래서 파괴시험시(UTM-15MN 사용) spherical platen으로 축하중의 편심을 방지했다.

직경방향 및 축 방향 변형율과 재하하중 자료를 1초 간격으로 data logger로 읽어 자료를 정리하였으며 재하-제하의 반복은 3회이상씩 실시하였다. 파괴순간에 입자간의 점착력 이완으로 인하여 인장 파괴되는 양상 및 입자간의 미끌림에 의한 전단파괴 양상이 전 파괴면에 고루 분포되어 있는 현상을 볼 수 있었으며 강도가 높은 암석일수록 파괴음도 대단히 커서 취성파괴의 양상을 보였다.

공시체를 3개/조로 시험하였는데 분산이 심한 것은 5~7개/조로 추가하여 시험을 실시하였다. 그림 2는 총 291개

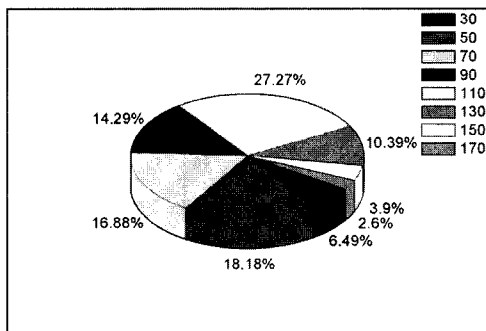


그림 2. 시료의 일축 압축강도 분포도(MPa)

의 시험시료의 강도분포를 그린 것으로 50~130MPa 사이에서 고르게 분포되어 있는 것을 볼 수 있다.

4.2 점하중 강도시험(PLST)

PLST용 시료는 Broch와 Franklin(1972)의 scale effect를 피할 수 있도록 길이 55mm 이상, 축 방향 시료는 25mm 이상으로 축 방향 및 직경 방향용 공히 각 조별 12개 이상 준비하였으며 시료 제작은 그림 3(a)와 같이 bedding면에 수직으로 coring하였고 직경방향($I_p//$)실험은 그림 3(b), 축 방향($I_p \perp$)실험은 그림 3(c)와 같이 시행하였다.

$\sigma_c < 40MPa$ 의 공시체는 $I_p//$ 시험을 위해 setting후 재하순간에 파괴되는 경우가 많았으나, 파괴된 시료를 재사용한 축 방향 시험에서는 그렇지 않았다. 이는 공시체 내부에 육안으로 식별되지 않은 판열(fisslity), 엽층리(laminae), 층리(bedding plane) 및 기타 불연속면이 있는 것으로 사료된다. 이와 같이 연약한 암은 $I_p//$ 보다는 $I_p \perp$ 의 시험결과 도출이 더 용이함을 의미한다.

5. 시험결과의 분석

5.1 자료의 정리

일축 압축강도의 보정은 ASTM(170-5)에 따라 식 (1)을 적용하였다.

$$\sigma_c = \frac{0.889(D/50)^{0.18} \sigma'_c}{0.778 + 0.222(D/L)} \quad (1)$$

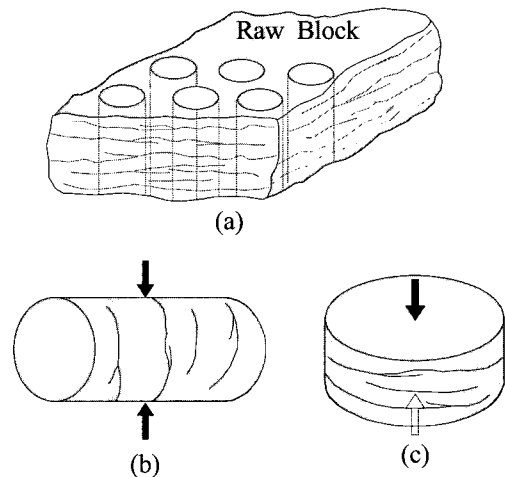


그림 3. 점하중 강도시험(PLST) 모식도

여기서 σ_c' 및 σ_c 는 각각 암석의 일축압축강도 시험치 및 D_{50} 으로 보정한 값으로서 단위는 MPa이다. 그리고 D 및 L은 각각 공시체의 직경 및 길이이다.

I_s 는 세일, 사암 이암별로 $I_{s//}$ 및 $I_{s\perp}$ 용 시료를 각각 1조에 12개 이상씩 시험한 결과에서 최상위, 최하위를 제외하거나, 최대/최소강도 비가 3배 이상을 제외한 평균을 취했다. 여기서, $I_{s(50)}$ 으로 통일하기 위하여 식 (2)(ASTM D5731-95, ISRM 1985)로 환산하였다.

$$I_{s(50)} = F \cdot I_{s(test)} ; F = \left(\frac{D}{50}\right)^{0.45} \quad (2)$$

이와 같은 방법으로 전체 시료에 대해서 UCST 및 PLST의 결과를 통계적으로 정리 하여 표 4에 요약하였고, 강도시험 결과를 표 5에 사암, 세일 이암별로 정리하였다.

표 4에서 일축 압축강도의 변동계수는 사암, 세일, 이암별로 각각 0.35, 0.26 및 0.34로 나타나며 이는 기초자료로 활용하기에 양호한 결과로 판단되며 표준편차 역시 같은 판단을 할 수 있는 자료라 할 수 있다. 더욱이 암석 전체의 $\sigma_c/I_{s//}$ 와 $\sigma_c/I_{s\perp}$ 의 표준편차와 변동계수값은 각각 4.79 및 0.20 이하로 시험결과 분석을 위한 기초자료로 활용하기에 적절하다고 할 수 있다.

5.2 자료의 분석

5.2.1 $\sigma_c - I_s$ 의 선형회귀분석

표 5의 $I_{s\perp}$ 와 $I_{s//}$ 를 독립변수, σ_c 를 종속변수로 취한 상관관계 분석 결과는 각각 그림 4와 식 (3), (4), (5) 및 (6)이다. 선형회귀분석 결과를 다시 정리하면 표 6과 같

으며 기 발표된 문헌과 이 연구에서 구한 결과를 표 7에 수록했다.

사암

$$\sigma_c = 6.06 + 21.58 I_{s//} \quad (3a)$$

$$(\rho = 0.916, SD = 15.16)$$

$$\sigma_c = -0.09 + 18.11 I_{s\perp} \quad (3b)$$

$$(\rho = 0.981, SD = 7.40)$$

세일

$$\sigma_c = 31.26 + 16.28 I_{s//} \quad (4a)$$

$$(\rho = 0.791, SD = 15.03)$$

$$\sigma_c = 12.77 + 15.95 I_{s\perp} \quad (4b)$$

$$(\rho = 0.923, SD = 9.40)$$

이암

$$\sigma_c = 12.01 + 17.65 I_{s//} \quad (5a)$$

$$(\rho = 0.866, SD = 9.54)$$

$$\sigma_c = 3.06 + 15.77 I_{s\perp} \quad (5b)$$

$$(\rho = 0.926, SD = 7.20)$$

퇴적암 전체(사암 + 세일 + 이암)

$$\sigma_c = 12.69 + 20.26 I_{s//} \quad (6a)$$

$$(\rho = 0.899, SD = 14.81)$$

$$\sigma_c = 1.04 + 17.87 I_{s\perp} \quad (6b)$$

$$(\rho = 0.965, SD = 8.87)$$

여기서, σ_c 는 점하중 강도지수(strength index)로 추정된 일축 압축강도, $I_{s\perp}$ 및 $I_{s//}$ 는 각각 암석core의 약면에 수직 및 평행방향의 점하중 강도지수이다. 응력단위는 MPa이며, 시료 직경은 식 (2)에 따라 50mm로 환산한

표 4. 시험결과와 통계자료

암종	강도	Mean	SD	C_v	Min	Max	암종	강도	Mean	SD	C_v	Min	Max
세일	σ_c	92.80	24.20	0.26	42.10	138.0	이암	σ_c	54.30	18.40	0.34	23.10	92.50
	$I_{s//}$	3.78	1.17	0.31	1.29	5.76		$I_{s//}$	2.40	0.90	0.38	0.85	4.93
	$I_{s\perp}$	5.01	1.40	0.28	2.11	8.78		$I_{s\perp}$	3.25	1.08	0.33	1.06	5.72
	I_{sa}	1.37	0.25	0.18	0.81	1.91		I_{sa}	1.38	0.19	0.14	1.05	1.66
	$\sigma_c/I_{s//}$	25.70	5.68	0.22	13.20	42.20		$\sigma_c/I_{s//}$	23.30	3.96	0.17	15.40	31.00
	$\sigma_c/I_{s\perp}$	18.70	2.05	0.11	15.90	23.30		$\sigma_c/I_{s\perp}$	16.90	2.38	0.14	14.20	21.80
사암	σ_c	106.3	37.00	0.35	34.80	173.9	전체	σ_c	89.20	33.6	0.38	23.10	173.9
	$I_{s//}$	4.65	1.57	0.34	1.37	6.42		$I_{s//}$	3.77	1.49	0.40	0.85	6.42
	$I_{s\perp}$	5.88	2.01	0.34	2.12	9.34		$I_{s\perp}$	4.93	1.81	0.37	1.06	9.34
	I_{sa}	1.28	0.17	0.13	1.00	1.54		I_{sa}	1.34	0.21	0.16	0.81	1.91
	$\sigma_c/I_{s//}$	23.00	3.21	0.14	16.80	29.40		$\sigma_c/I_{s//}$	24.30	4.79	0.20	13.20	42.20
	$\sigma_c/I_{s\perp}$	18.10	1.54	0.09	14.60	21.30		$\sigma_c/I_{s\perp}$	18.10	2.06	0.11	14.20	23.30

표 5. (a) 시험 결과(사암), (MPa)

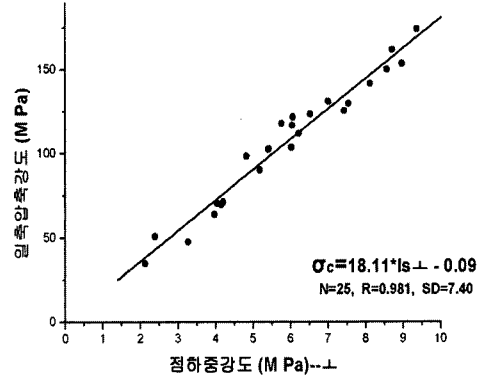
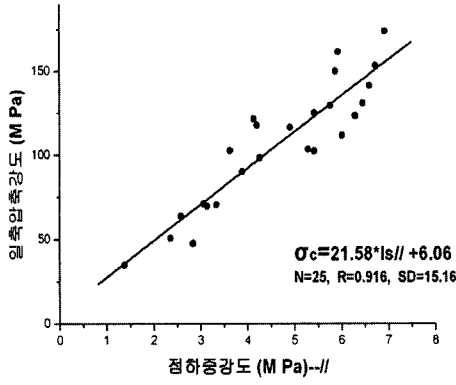
Sample No.		σ_c (UCS)	PLS			σ_c /PLS		Sample No.		σ_c (UCS)	PLS			σ_c /PLS	
			//	⊥	$I_{a(50)}$	//	⊥				//	⊥	$I_{a(50)}$	//	⊥
1	UD-1	121.4	4.13	6.05	1.47	29.4	20.1	14	UD-27	141.5	6.59	8.11	1.23	21.5	17.4
2	UD-3	47.7	2.84	3.27	1.15	16.8	14.6	15	UD-28	117.6	4.20	5.75	1.37	28.0	20.5
3	UD-7	63.9	2.58	3.96	1.54	24.8	16.1	16	UD-29	173.9	6.92	9.34	1.35	25.1	18.6
4	UD-9	70.5	3.34	4.04	1.21	21.1	17.4	17	UD-30	98.4	4.26	4.82	1.13	23.1	20.4
5	UD-18	129.5	5.76	7.53	1.31	22.5	17.2	18	UD-77	50.7	2.35	2.38	1.01	21.5	21.3
6	UD-19	111.7	6.01	6.21	1.03	18.6	18.0	19	UD-78	34.8	1.37	2.12	1.54	25.4	16.4
7	UD-20	102.3	5.42	5.40	1.00	18.9	19.0	20	UD-79	90.2	3.88	5.17	1.33	23.2	17.4
8	UD-21	102.7	3.63	5.42	1.49	28.3	19.0	21	UD-80	71.1	3.06	4.20	1.37	23.2	16.9
9	UD-22	125.2	5.42	7.42	1.37	23.1	16.9	22	UD-81	123.3	6.29	6.51	1.04	19.6	18.9
10	UD(S)-23	150.0	5.87	8.55	1.46	25.6	17.5	23	UD-108	103.5	5.29	6.01	1.14	19.6	17.2
11	UD(S)-24	161.6	5.93	8.69	1.47	27.3	18.6	24	UD-109	116.4	4.91	6.03	1.23	23.7	19.3
12	UD(S)-25	69.6	3.14	4.15	1.32	22.2	16.8	25	UD-110	153.2	6.72	8.95	1.33	22.8	17.1
13	UD-26	130.9	6.45	6.99	1.08	20.3	18.7	Mean		106.3	4.65	5.88	1.28	23.0	18.1

표 5. (b) 시험 결과(세일), (MPa)

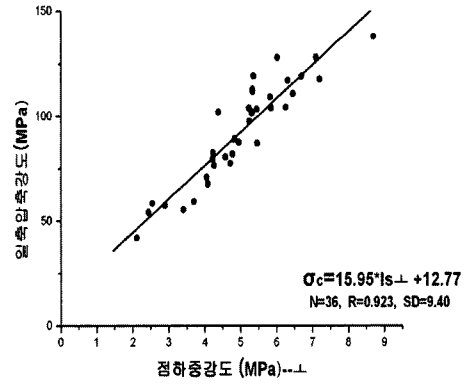
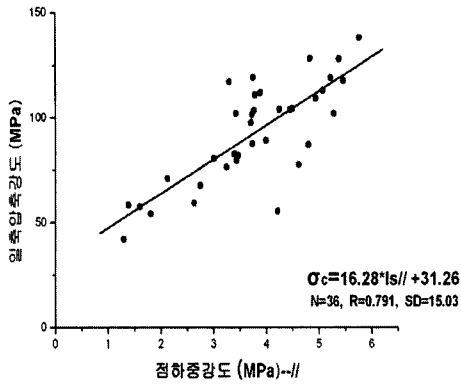
Sample No.		σ_c (UCS)	PLS			σ_c /PLS		Sample No.		σ_c (UCS)	PLS			σ_c /PLS	
			//	⊥	$I_{a(50)}$	//	⊥				//	⊥	$I_{a(50)}$	//	⊥
1	US-1	127.9	5.38	6.01	1.12	23.8	21.3	20	US-73	55.4	4.21	3.40	0.81	13.2	16.3
2	US-2	54.2	1.81	2.43	1.35	30.0	22.3	21	US-75	82.7	3.39	4.23	1.25	24.4	19.6
3	US-4	82.0	3.46	4.77	1.38	23.7	17.2	22	US-82	110.8	3.79	6.45	1.70	29.2	17.2
4	US-5	67.7	2.75	4.08	1.49	24.6	16.6	23	US-83	104.0	4.45	5.85	1.31	23.3	17.8
5	US-6	128.0	4.83	7.09	1.47	26.5	18.0	24	US-85	103.4	3.77	5.44	1.45	27.4	19.0
6	US-7	109.2	4.93	5.82	1.18	22.1	18.8	25	US-86	97.6	3.71	5.24	1.41	26.3	18.6
7	US-12	79.7	3.43	4.22	1.23	23.2	18.9	26	US-88	101.5	3.73	5.32	1.43	27.2	19.1
8	US-13	112.9	5.07	5.33	1.05	22.3	21.2	27	US-89	104.2	4.49	6.25	1.39	23.2	16.7
9	US-14	87.7	3.74	4.94	1.32	23.5	17.7	28	US-91	87.2	4.8	5.45	1.14	18.2	16.0
10	US-15	58.4	1.38	2.54	1.84	42.2	23.0	29	US-92	89.3	3.99	5.83	1.21	22.4	18.5
11	US-16	80.6	3.01	4.58	1.52	26.8	17.6	30	US-93	117.1	3.3	6.31	1.91	35.5	18.6
12	US-31	71.0	2.13	4.05	1.90	33.4	17.5	31	US-95	77.6	4.61	4.71	1.02	16.8	16.5
13	US-40	111.8	3.88	5.33	1.37	28.8	21.0	32	US-96	102.0	5.28	5.30	1.00	19.3	19.3
14	US-41	76.5	0.25	4.26	1.31	23.6	18.0	33	US-97	117.6	5.45	7.20	1.32	24.6	16.3
15	US-45	101.9	3.42	4.38	1.28	29.8	23.3	34	US-100	59.3	2.63	3.70	1.41	22.5	16.0
16	US-47	119.0	5.22	6.69	1.28	22.8	17.8	35	US-102	57.6	1.6	2.89	1.81	36.0	19.9
17	US-49B	119.1	3.75	5.36	1.43	31.8	22.2	36	US-107	104.0	4.25	5.23	1.23	24.5	19.9
18	US-49C	138.0	5.76	8.70	1.51	24.0	15.9								
19	US-72	42.1	1.29	2.11	1.63	32.5	20.0	Mean		92.8	3.78	5.01	1.37	25.7	18.7

표 5. (c) 시험 결과(이암), (MPa)

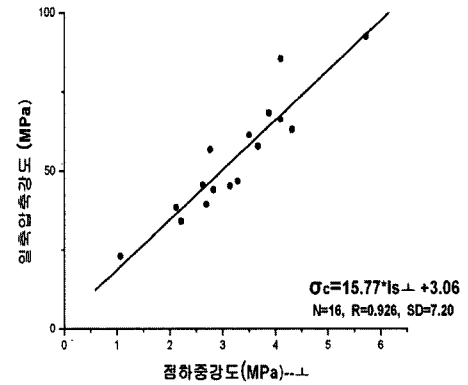
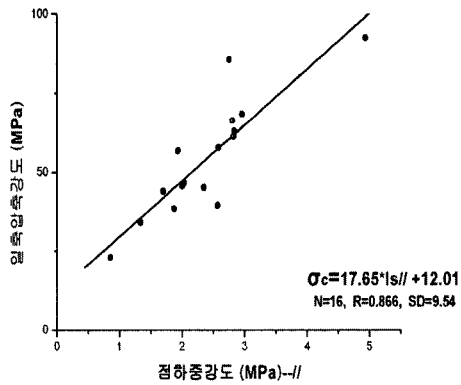
Sample No.		σ_c (UCS)	PLS			σ_c /PLS		Sample No.		σ_c (UCS)	PLS			σ_c /PLS	
			//	⊥	$I_{a(50)}$	//	⊥				//	⊥	$I_{a(50)}$	//	⊥
1	US-3	39.5	2.57	2.69	1.05	15.4	14.7	10	US-84	92.5	4.93	5.72	1.16	18.7	16.2
2	US-8	56.8	1.93	2.77	1.43	29.4	20.5	11	US-87	63.1	2.84	4.32	1.52	22.2	14.6
3	US-11	45.6	2.00	2.62	1.31	22.8	17.4	12	US-90	85.5	2.76	4.10	1.49	31.0	20.9
4	US-17	68.5	2.96	3.87	1.31	23.1	17.7	13	US-94	38.6	1.87	2.10	1.13	20.6	18.2
5	US-43	23.1	0.85	1.06	1.24	27.0	21.8	14	US-104	46.7	2.03	3.29	1.62	23.0	14.2
6	US-48B	34.1	1.33	2.22	1.66	25.6	15.4	15	US-106	66.4	2.81	4.10	1.46	23.7	16.2
7	US-49A	61.4	2.83	6.50	1.24	21.7	17.5	16	US-111	57.9	2.58	3.67	1.42	22.4	15.8
8	US-71	44.0	1.70	2.83	1.66	26.0	15.6	Mean		54.3	2.39	3.25	1.38	23.3	16.9
9	US-74	45.2	2.34	3.14	1.34	19.3	14.4	전체		89.2	3.77	4.93	1.34	24.3	18.1



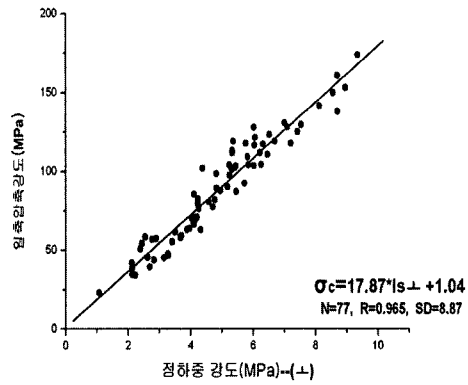
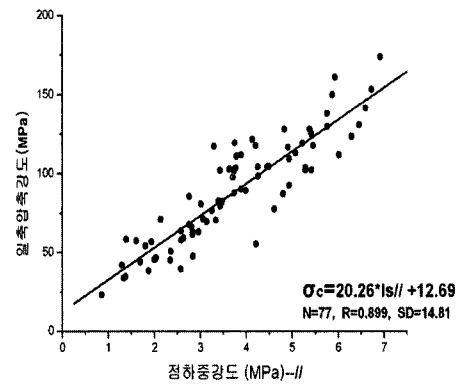
(a) 울산지역 사암



(b) 울산지역 세일



(c) 울산지역 이암



(d) 울산지역 퇴적암(사암, 세일, 이암)

그림 4. 선형 회귀분석(직경방향과 축방향)

값이다. 그리고 ρ 및 SD는 각각 상관계수 및 표준편차이다. 표 6에서 $\sigma_c - I_s$ 선형회기 분석 결과는 상관계수, 표준편차 및 변동계수값이 ISRM, ASTM 및 여러 연구자가 제안한 점하중 강도지수의 직경방향 실험값과 일축 압축강도($\sigma_c - I_{//}$)관계보다 축 방향 실험값과 일축 압축강도($\sigma_c - I_{s\perp}$)관계가 추정오차가 더 적음을 알 수 있다. 그리고 원주형으로 제작한 공시체에 결보기에는 흠결이 발견되지 않아 약면 방향으로 셋팅하여 재하하는 순간 파괴되는 것도 많았다 ($I_{//} \approx 0$). 즉, 이러한 경우에는 $I_{//}$ 는 아예 실험자료를 구할 수 없는 단점이 있으나

$I_{s\perp}$ 는 실험 가능하므로 σ_c 를 추정할 수 있는 이점도 있다.

5.2.2 강도비($\sigma_c/I_{s(50)}$) 해석

선형 회귀분석의 $\sigma_c = k \cdot I_s + b$ 관계에서는, I_s 값이 0인 경우에도 σ_c 가 절편만큼 존재하는 논리적 모순이 있다. 그래서 강도비 σ_c/I_s 로 표현하면 $I_s = 0$ 인 이러한 모순이 해소된다. 더욱이 강도가 클수록 σ_c 축의 절편이 크게 나오는 경향이 있어 참값과의 편차가 더 심할 수도 있다. 이러한 염려에서 이 연구에서는 강도비(σ_c/I_s)를 통계적 방법으로 처리하여 각각의 압축에 따라 분석하여 표 8

표 6. $I_s - \sigma_c$ 선형 회귀분석 결과 ($\sigma_c = K \cdot I_s + b$)

암종	구분	자료수	Min	Max	Mean	C_v	K	b	ρ	SD	비고
사암	$I_{s//}$	25	1.37	6.92	4.65	0.34	21.58	6.06	0.92	15.16	식 (3a)
	$I_{s\perp}$	25	2.12	7.34	5.88	0.34	18.11	-0.09	0.98	7.40	식 (3b)
세일	$I_{s//}$	36	1.29	5.76	3.77	0.31	16.28	31.26	0.79	15.03	식 (4a)
	$I_{s\perp}$	36	2.11	8.70	5.01	0.28	15.95	12.77	0.92	9.40	식 (4b)
이암	$I_{s//}$	16	0.85	4.93	2.40	0.38	17.65	12.01	0.87	9.54	식 (5a)
	$I_{s\perp}$	16	1.06	5.72	3.25	0.33	15.77	3.06	0.93	7.20	식 (5b)
전체	$I_{s//}$	77	0.85	6.92	3.77	0.40	20.26	12.69	0.90	14.81	식 (6a)
	$I_{s\perp}$	77	1.06	9.34	4.93	0.37	17.87	1.04	0.97	8.87	식 (6b)

표 7. $\sigma_c - I_{s//}$ 의 선형 회귀분석 사례

연구자	회귀식	암석의 종류	$\sigma_c = k \cdot I_{s//} + b$	
			k	b
D'Andrea(1965)		화성암, 변성암, 퇴적암 등 (49종-539개)	15.3	16.3
Gunsallus, Kulhawy(1984)			165	51
Lee(1987)		화강암	15.8	41.3
Grasso(1992)			9.3	20.1
정형식(1997)		화강암, 편마암, 세일	15	17.96
김영수(2001)		대구 세일(흑)	52.6	-49.8
김영수(2001)		대구 세일(적)	20.86	41.41
Cargill(1990)		사암, 석회암, 대리석, 백운암	23	13
Chou Wong(1996)		화강암, 응회암	14.9	0
Kahraman(2001)		석회석, 사암, 백운암	8.41	9.51
본 연구결과		세일, 사암, 이암	20.26	12.69

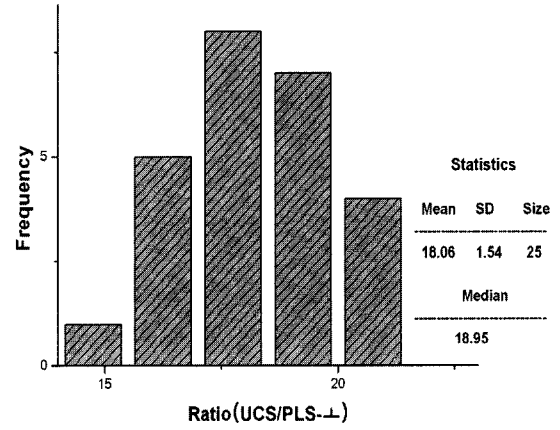
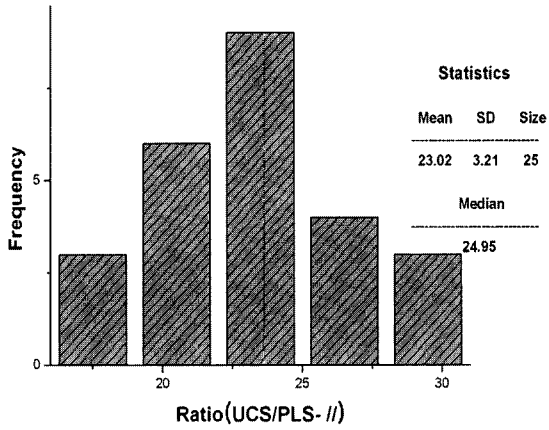
표 8. 강도비(UCST/PLST) 실험결과

암종	구분	자료수	Mean	SD	분포형태	Median	C_v	비고
사암	$I_{s//}$	25	23.02	3.21	유사정규	24.95	0.14	(7a)
	$I_{s\perp}$	25	18.06	1.54	정규	18.95	0.09	(7b)
세일	$I_{s//}$	36	25.73	5.68	정규	24.56	0.22	(8a)
	$I_{s\perp}$	36	18.7	2.05	정규	18.70	0.11	(8b)
이암	$I_{s//}$	16	23.25	3.96	정규	23.11	0.17	(9a)
	$I_{s\perp}$	16	16.94	2.38	유사정규	17.42	0.14	(9b)
전체	$I_{s//}$	77	24.31	4.80	정규	29.40	0.20	(10a)
	$I_{s\perp}$	77	18.11	2.07	정규	28.53	0.11	(10b)

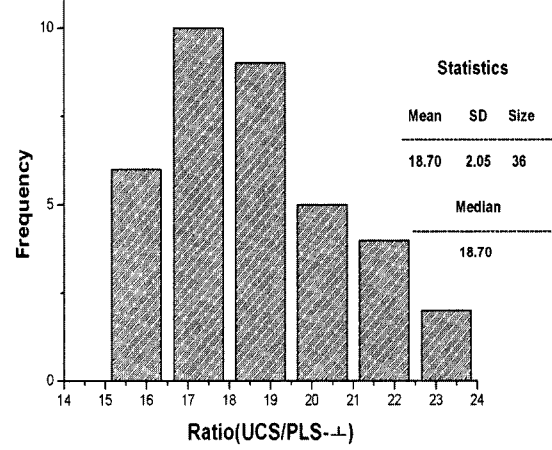
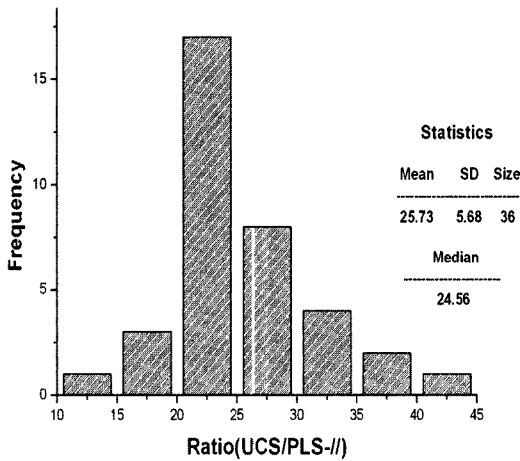
의 결과와 그림 5를 제시하였다. 식 (7), (8), (9) 및 (10)은 각각 사암, 세일, 이암 및 퇴적암 전체에 대하여 강도 비로 도출한 상관식이다.

시료 전체에 대한 빈도분석은 그림 5에서 보여 주는 바와 같이 빈도분포 형태가 정규분포에 가까우므로 대

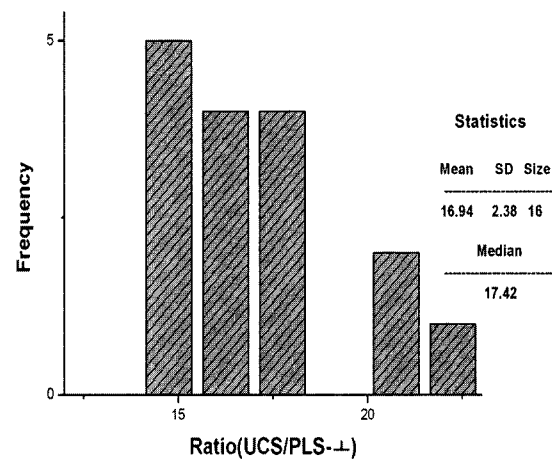
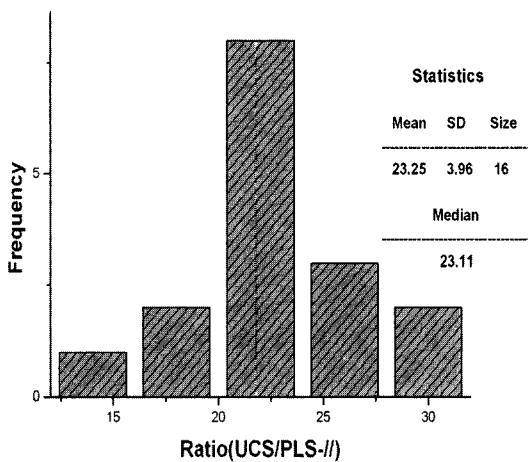
표값은 Median보다 Mean이 더 타당하다고 판단된다. 여기서 퇴적암 전체의 직경방향 강도비($\sigma_c/I_s//$)의 평균은 23.31, 표준편차는 4.80, 변동계수는 0.20, 또한 축 방향 강도비($\sigma_c/I_s\perp$)는 18.11, 표준편차는 2.07, 변동계수는 0.11로 축 방향 강도비($\sigma_c/I_s\perp$)로 $\sigma_c - I_s$ 관계에서 σ_c



(a) 울산지역 사암

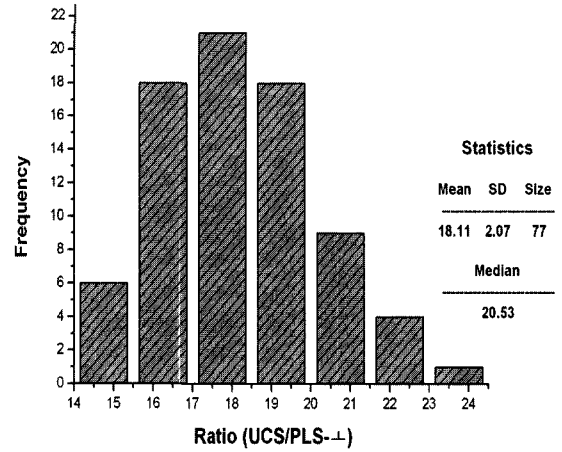
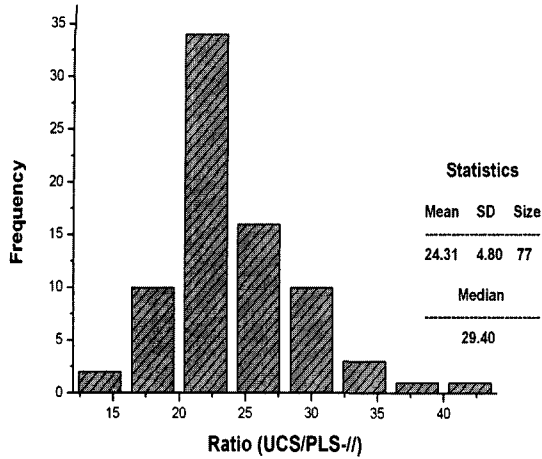


(b) 울산지역 세일



(c) 울산지역 이암

그림 5. 강도비 분석(직경방향과 축방향)



(d) 울산지역 퇴적암(세일, 사암, 이암)
그림 5(계속). 강도비 분석(직경방향과 축방향)

표 9. (a) 기존연구 결과(강도비 ($\sigma_c / I_{s(50)} \perp$))

발표자	암석 종류	$\sigma_c / I_{s(50)} \perp$	비 고
Wilson(1996)	약한 점토암	8	$\sigma_c = 1.5\text{Mpa}$
Cargill(1990)	사암	21~27	$35 < \sigma_c < 208$
	석회암/백운암	17~30	$\sigma_c = 60$
Ramamurthy(1987)	사암	9.5~15	$6 < \sigma_c < 80$
Foster(1983)	사암/휘록암	15~18	$17 < \sigma_c < 39$
본 연구결과	세일/사암/이암	14.2~23.3 (18.11)	$24 < \sigma_c < 162$

표 9. (b) 기존연구 결과(강도비 ($\sigma_c / I_{s(50)} //$))

발표자	암석종류	$\sigma_c / I_{s(50)} //$	비 고
Franklin & Broch(1972)	화강암/점판암/백운암/휘록암/사암	24	
Bieniawski(1975)	사암/화성암	24	$50 < \sigma_c < 350$ $\sigma_c < 5$ (사용불가)
Hawkins(1979)	석회석/백운암, 사암	22~27	$131 < \sigma_c < 240$
Cavagnaro(1980)	석탄	25	$0.5 < \sigma_c < 12$
Foster(1983)	휘록암	14.5	$79 < \sigma_c < 133$
Jenni et. al(1979)	석회석/백운암	12	$47 < \sigma_c < 64$
Hassani(1980)	대리석/사암	29	$68 < \sigma_c < 156$
Read et al(1980)	사암/실트암	16	
	현무암	20	
Carter & Sneddon(1977)	석회석/사암	22	
	점토암	38	
이영휘 (2000)	세일, 사암, 실트암, 이암	15.01	
Lashkaripour(2001)	점토암	21~43	$3 < \sigma_c < 115$
ISRM		20~25	
ASTM		23	
본 연구결과	세일/사암/이암	13.2~42.2 (24.31)	$24 < \sigma_c < 162$

를 추정함이 참값에 더 가까울 수 있다는 것을 의미한다. 또한 그림 5(d)는 자료 분포가 가장 정규분포에 가까움을 알 수 있다. 강도비로 추정식을 발표한 기존 문헌들을 표 9에 요약하였다.

사암

$$\sigma_c = 23.02 I_{s(50)} //, (SD = 3.21) \quad (7a)$$

$$\sigma_c = 18.06 I_{s(50)} \perp, (SD = 1.54) \quad (7b)$$

세일

$$\sigma_c = 25.73 I_{s(50)} // , (SD = 5.68) \quad (8a)$$

$$\sigma_c = 18.70 I_{s(50)} \perp , (SD = 2.05) \quad (8b)$$

이암

$$\sigma_c = 23.25 I_{s(50)} // , (SD = 3.96) \quad (9a)$$

$$\sigma_c = 16.94 I_{s(50)} \perp , (SD = 2.38) \quad (9b)$$

퇴적암 전체(사암 + 세일 + 이암)

$$\sigma_c = 24.31 I_{s(50)} // , (SD = 4.80) \quad (10a)$$

$$\sigma_c = 18.11 I_{s(50)} \perp , (SD = 2.07) \quad (10b)$$

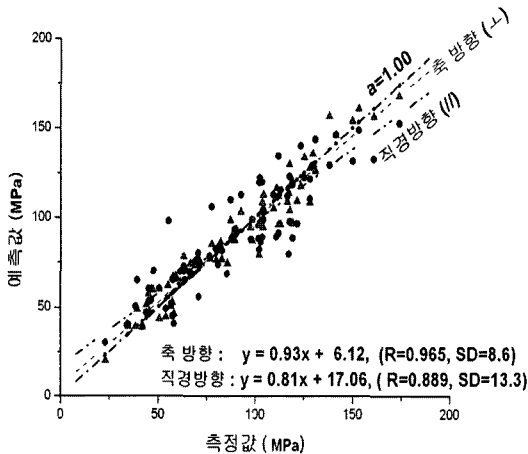
그림 5(d)에서 $\sigma_c/I_{s(50)}//$ 값이 35이상인 것은 육안식별로는 흠결이 없으나 내부의 층리, 엽층리, 판열등의 불연속면 파괴로 여겨진다. 이러한 시료가 존재하면 편차와 분산이 커지기 마련이다.

6. 결과의 검토

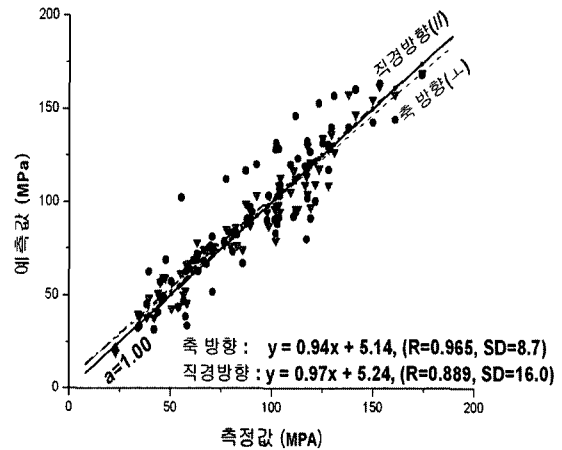
식 (3)~식 (10)으로 예측한 값과 실측정값을 비교하기 위하여 선형 회귀분석한 결과를 그림 6과 표 10에 요약하였다. 예측식이 참값에 근접한다면 직선의 기울기가 1.00에 접근하고 절편도 영에 가까울 것이다.

퇴적암(사암, 세일, 이암) 전체를 대표할 수 있는 방법을 찾기위해 선형 회귀분석법으로 도출된 결과의 식 (6a), (6b)와 강도비 방법으로 도출된 식 (10a), (10b)에 대해서 검토하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 회기 분석법으로 예측식을 정리한 표 6의 결과를 보면 식 (6b)가 식 (6a)에 비해서 상관성이 높고 표준편차가 적고 또한 변동계수가 적으므로 예측식은 점하중 강도지수를 축방향으로 산출한 식 (6b)가 참값에 가까운 예측식이라 할 수 있다.
- 표 8의 강도비 실험결과에서 식 (10b)에서 도출된 표준 편차값이 식 (10a)의 절반 이하이며 변동계수 역시 그러므로 예측식은 점하중 강도지수를 축방향으로 산출한 식 (10b)이 유리하다.
- 표 10의 상관식에서 기울기가 1.00에 가까운 식은 직경방향 강도비 분석법(//)의 $y = 0.98 \cdot x + 5.24$ ($\rho = 0.889$, $SD = 16.0$)이나 축 방향 강도비 분석법(\perp)에 비해 상관성이 낮으며 표 8의 사암, 세일, 이암의 결과를 합한 전체 결과값의 직경방향 강도비값 $I_s(//)$ 와 축 방향 강도비 값 $I_s(\perp)$ 을 비교하면 SD값, Cv값에서 $I_s(\perp)$ 실험값이 자료의 신뢰성이 높음을 알 수 있으므로 직경방향 강도비 분석법(//)의 기울기 값의 차이가 약간 크더라도 상대적 신



(a) 회귀 분석법



(b) 강도비 분석법

그림 6. 측정값과 예측값의 회귀분석

표 10. 측정값과 예측값의 비교를 위한 회귀분석 결과

검토방법	상관식	기울기	절편	상관성	SD	오차(기울기)
회귀분석(//)	$y = 0.81x + 17.06$	0.81	17.06	0.889	13.3	0.05
회귀분석(\perp)	$y = 0.93x + 6.12$	0.93	6.12	0.965	8.6	0.03
강도비 분석(//)	$y = 0.98x + 5.24$	0.98	5.24	0.889	16.0	0.05
강도비 분석(\perp)	$y = 0.94x + 5.14$	0.94	5.14	0.965	8.7	0.03

뢰성이 떨어진다.

d) 표 6의 식 (6b)의 결과와 표 8의 식 (10b)의 결과에서 상관성, 표준편차, 변동계수 등을 비교하면 식 (10b)가 통계적인 관점에서 유리함을 알 수 있고 또한 전술한 바와 같이 약한 압의 강도추정에 유리하다고 판단된다.

7. 결론

울산 지역에서 채취한 퇴적암의 일축 압축강도용 시료 291개와 점하중 강도지수용 시료 2310개 시료로 시험한 결과는 다음과 같이 요약된다.

- (1) 울산지역 퇴적암에서 I_s 값으로 σ_c 을 추정함에 있어 σ_c 는 화성암, 변성암 및 퇴적암, 즉 지질학적 배경의 고려 없이 도출된 ISRM이나 ASTM에서 제시한 값보다 낮다.
- (2) σ_c 값이 약 50MPa 이하인 $\sigma_c - I_{s(50)}$ 선형 회귀분석 결과는 절편값으로 인해 활용 범위가 제한적이다.
- (3) 퇴적암에서 점하중 강도지수로 일축 압축강도를 추정하는 데는 $I_{s(50)}/\sigma_c$ 보다 $I_{s(50)}$ 가 신뢰성이 더 높다.
- (4) 점하중 강도지수로 일축 압축강도를 예측하기 위해서는 선형 회귀분석법 보다는 점하중 강도지수의 축 방향 실험값을 적용한 강도비값의 신뢰성이 가장 높다.
- (5) 본 논문에서는 울산지역 퇴적암에 대한 점하중 강도지수로부터 일축 압축강도를 예측하는 식을 다음과 같이 제안한다.

$$\text{퇴적암 전체} : \sigma_c = 18.11 \cdot I_{s(50)} \pm$$

$$\text{사암} : \sigma_c = 18.06 \cdot I_{s(50)} \pm$$

$$\text{셰일} : \sigma_c = 18.70 \cdot I_{s(50)} \pm$$

$$\text{이암} : \sigma_c = 16.94 \cdot I_{s(50)} \pm$$

참 고 문 헌

1. 김영수, 서인식, 허도영, 이재호, 김병탁 (2001), “층리면을 고려한 셰일의 공학적 특성”, *한국지반공학학회 논문집*, 제17권, 1호, pp.5-13.
2. 박양대, 윤형대 (1968), “*한국지질도 울산도폭*”, 국립지질 자원 연구소.
3. 이영휘, 김용준, 박준규 (2000), “압축강도와 풍화도에 관련된 퇴적암의 공학적 특성”, *한국지반공학학회 논문집*, 제16권, 1호, pp.5-17.

4. 정형식, 유병옥 (1997), “암석의 풍화에 따른 강도변화 특성 및 강도측정에 관한 연구”, *한국지반공학회지*, 제13권 6호, pp.71-93.
5. ASTM (D 4513-85/91), “Standard practice for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances”.
6. ASTM (D 5731-95), “Standard test method for determination of the point load strength index of rock”
7. ASTM (D 2938-95), “Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens”
8. Bieniawski, Z. T. (1975), “The point-load test in geotechnical practice”, *Eng. Geol.* Vol.9, pp.1-11.
9. Broch E. and Franklin, J. A. (1972), “The point-load strength test”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol.9, pp.669-697.
10. Brook, N. (1977), “The use of irregular specimens for rock strength test”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.14, pp.193-202.
11. Bowden, J. P., Lamint-Black, J. and Ullyott, S. (1998), “Point load testing of weak rocks with particular reference to chalk”, *Q. J. J. Geol.* Vol.31, pp.95-103.
12. Cargill, A. S and Shakoor, A. (1990), “Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock”, *Int. J. Rock-Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.27, pp.495-530.
13. Chau, K. T and Wong, R. H. C. (1996), “Uniaxial compressive strength and point load strength of rocks”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol.33, No.2, pp.183-188.
14. D'Andrea, D. V, Fischer, R. L. and Fogelson, D. E. (1965), “Prediction of compressive strength from other rock properties”, *US Bureau of Mines, Report of Investigation, REPT. 6702*, pp.1-23.
15. Forster, I. R (1983), “The influence of core sample geometry on the axial point load test”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.20, No.6, pp.291-295.
16. Grasso, P., Xu, S and Mahtab, A. (1992), “A problems and promises of index testing of rocks”, *Int. Tillerson, Wawersik, editors, Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam*, pp.879-888.
17. Greene, B. H. and Schaffer, A. (1997), “Laboratory measurement of weak rock strength”, *Proc. Symp. Characterization of weak and weathered rock masses. Ass. Eng. Geologists. Special Pub. Vol.95.9*, pp.73-85.
18. Guidicini, G., Nieble, C. M. and Cornides, A. T. (1973), “Analysis of point load test as a method for preliminary geotechnical classification of rocks”, *Bull. Int. Asso. Eng. Geol.*, No.7, pp.37-52.
19. Gunsallus, K. L. and Kulhawy, F. H. (1984), “A comparative evaluation of rocks strength measurement”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.21, pp.223-248.
20. Hassani, F. P., Scoble, M. J. and Whittaker, B. N. (1980), “Application of the point load index test to strength determination of rock and proposals for a new size-correction chart”, *Proc. 21th. US Symp. on Rock Mech., The State-of-the-Art in Rock Mech.*
21. Hiramatsu, Y. and Oka, Y. (1966), “Determining of the tensile strength of rock by a compression test of an regular test piece”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.3, pp.89-99.
22. Hobbs, D. W. (1963), “A simple method for assessing the uniaxial compressive strength of rock”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol.1, pp.5-15.
23. Iivitskii, A. A. and Nickolin, V. I. (1961), “Determining the strength of rock strata on irregular shaped specimens”, *Ugol.* 36, Vol.1, pp.34-36.
24. ISRM (1981), Part 1, “Suggested method for determination of the

- uniaxial compressive strength of rock materials”.
25. *ISRM* (1985), “Suggested method for determining point load strength”.
 26. Jenni, J.P. and Balissat, M. (1979), “Rock testing methods performed to predict the utilisation possibilities of a tunnel boring machine”, *Proc. 4th. Congr. Int. Sci. Rock. Mech.*, Montreaux, pp.267-273.
 27. Kahraman, S. (2001), “Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.38, pp.98-994.
 28. Lashkaripour, G. R. (2001), “Predictly mechanical properties of mudrock from index parameters”, *Pub. On-line Springer-Verlag.*, Vol.33, No.2, pp.183-188.
 29. Lee, S. G. (1987), “*Weathering & geotechnical characterization of Korea granites*”, Ph.D. Thesis, Imperial College, Univ. of London.
 30. Pells, P. J. N. (1975), “The use of the point load test in predicting the compressive strength of rock materials”, *Australian Geomechanics Journal*, Lecture Note, pp.54-56.
 31. Peng, Syd. S. (1976), “Stress analysis of cylindrical rock discs subjected to axial double point load”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.13, pp.97-101.
 32. Protodyakonov, M. M. and Voblikov, V.S. (1957), “Determining rock strength with specimens of irregular shape”, *Ugol.* 32. Vol.14. pp.13-17.
 33. Protodyakonov, M. M (1960), “New methods of determining mechanical properties of rocks”, *Int. Conf. on Strata Control*, Paris. pp.187-195.
 34. Rao, K. S., Venkatappa Rao, G. and Ramamurthy, T. (1987), “Strength of sandstone in saturated and partly saturated condiditions”, *Geotechnical. Engineering.*, Thailand, Vol.18, pp.99-127.
 35. Read, J. R. L., Thornton, P. N. and Regan, W. M. (1980), “A rational approach to the point load test”, *Proc. 3rd. Austr. & New Zealand Conf. Geomech.*, Wellington, Vol.2.
 36. Singh, D. P. and Singh, J. N. (1979), “Determination of compressive strength of rocks by testing irregular specimens”, *Mines J. & Fuels*, Vol.15, pp.18-22.
 37. Wilson, L. C. (1976), “Tests of bored and driven piles in cretaceous mudstone at Port Elizabeth Africa”, *Geotechnique*, Vol.26, No.1, pp.5-12.

(접수일자 2006. 3. 6, 심사완료일 2006. 7. 27)