

Schmidt hammer 반발지수로 울산지역 퇴적암의 공학적 특성을 추정하기 위한 연구

A Prediction of Engineering Properties of Ulsan Sedimentary Rocks with Schmidt Hammer Rebound Number

민 덕 기¹ Min, Tuk-Ki

문 종 규² Moon, Jong-Kyu

Abstract

A study has been made of the Schmidt hammer rebound test for the estimation of engineering and physical characteristics of sedimentary rocks. As there is no universal formular for the estimation of rock strength due to geological conditions, in this study only sedimentary rocks are adopted to testing. The aim of study is to make the information more meaningful and useful for engineers and contractors by providing rapid, cheap and easy method. The obtained parameters were correlated and regression equations were established among Schmidt hammer rebound number, uniaxial compressive strength, tangent Young's modulus, indirect tensile stress, water absorption and porosity of rocks with high coefficients of correlation with each other.

요 지

울산분지 퇴적암을 대상으로 Schmidt hammer 타격시험을 시행하여 일축 압축강도, 압열 인장강도, 탄성계수, 흡수율 및 간극율과의 상호 관계를 구명하였다. 기 연구된 결과는 여러 압종이 혼합된 결과로 실용적 적용에 어려움이 있어 지질학적 생성배경의 차이로 인한 원인을 배제하고 실용적 적용에 유용하도록 울산분지 퇴적암만을 대상으로 하여 연구를 시행하였다. Schmidt 햄머 반발지수와 각 실험결과 상호간에 높은 상관성이 있으며 본 연구 결과값으로 상호 교차검정을 한 결과도 만족할 수 있는 결과가 도출되었다.

Keywords : Brazilian test, Regression analysis, Schmidt hammer, Sedimentary rocks, Uniaxial compressive stress

1. 서 론

건설공사의 기본계획 수립, 타당성 조사, 예비설계 및 시공관리 과정에서 암, 암반의 제반 물성이나 공학적 특성치의 개략적인 값을 필요로 할 때 간단하고 쉽고 저렴한 방법을 적용하는 것이 효과적이고 유용하다.

이러한 방법 중에는 점하중 강도시험, Schmidt hammer 타격시험, 탄성파 시험 등이 있으나 이중 Schmidt

hammer 타격시험은 비파괴 시험으로 현장 및 실내시험이 간단하고 장비 취급이 간편하며 장비가 저렴하기 때문에 실험에 활용하기가 타 방법에 비해 편리하다. 이러한 연유로 본 연구에서는 Schmidt hammer 반발지수와 암석의 제반 물성치와의 상관관계를 구명하여 각종 요구에 쉽게 부응할 수 있도록 하였다.

많은 연구자들이 간단한 시험법으로 물성치 추정 연구를 하여 왔으나 그 값은 연구자에 따라 각기 다른 값이

1 정희원, 울산대학교 공학대학 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept of Civil & Environment, Univ. of Ulsan, tkmin@ulsan.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, 동명기술단 (주) 부사장, 토질 및 기초기술사 (Member, V/P, Dongmyung Eng. Consultant. Co.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

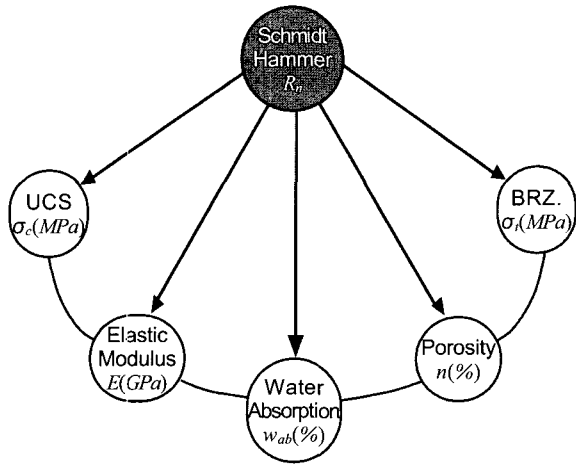


그림 1. 연구 개요도

제시되었다. 이는 기본적으로 대상 암석의 상이함과 지질학적 생성원인이 다른 화성암, 변성암, 퇴적암에 따라 다르며 더욱이 동일 암종일지라도 암석이력에 따라 그 물성이 다르다는 것을 의미하므로 본 연구에서는 울산 분지 퇴적암으로 대상을 국한하였다.

본 연구에서는 ISRM(1978a), ASTM(D5873-00)의 시험법에 준하여 그림 1과 같이 Schmidt hammer 반발치 수를 이용하여 일축 압축강도, 압열 인장시험값 등 공학적 특성값과 물리적 특성치인 암석의 단위중량, 비중, 흡수율 등을 추정할 수 있는 상관관계를 도출하였다.

2. Schmidt hammer 타격 시험

Schmidt hammer 타격시험은 지수 시험법으로 공학적 자료를 얻는 간접 시험법이며 정밀을 요하는 공학지수 외에는 대부분의 암석 물성 추정이 가능할 정도의 신뢰도를 가지는 시험이라 할 수 있다.

Hammer의 타격방법과 자료처리에 있어서는 여러 가지 방법이 제시되고 있으며 특히 Hucka(1965), Poole 등(1980)이 제시한 방법은 ISRM과 ASTM방법과는 상당히 다르다. 이는 ISRM법이나 ASTM의 시험법에 세부적 규정이 미흡하기 때문이다. 그러나 본 연구에서는 기존 연구자들의 성과와 비교가 쉬운 ISRM 시험법을 채택하였으며 ASTM법을 원용하여 시험방법을 보완하였다.

3. 연구동향

Schmidt hammer는 Swiss의 기술자 Ernst Schmidt가 1948년에 콘크리트 강도의 평가를 위하여 개발하였으

며 콘크리트 강도측정(Schmidt, 1951)을 발표한 이래 암석의 강도측정을 하는 단계까지 발전하였다(Barton 등, 1977). Deere와 Miller(1966)는 hammer의 반발치(R_L)와 단위중량(r_i)을 곱한값($R_L * r_i$)과 암석의 일축 압축강도(UCS), 탄성계수(E_i)와의 상관성 도표를 발표했고 Aufmuth(1974)와 Beverly(1979)는 여러 암석을 대상으로 $R_L * r_i$ 와 UCS사이의 높은 상관성이 있음을 실험으로 증명하였다. 이들의 연구에서 반발치와 단위중량을 곱한 것은 상관성을 높이기 위한 기법이다.

ISRM(1978a)은 Schmidt hammer 시험법을 규정하게 이르렀고 Kidybinski(1980)는 R_L 값과 UCS값을 직접 상관시켰고 Singh 등(1983), Shorey 등(1984), Haramy와 DeMorco(1985)는 ISRM의 규정에 따른 시험으로 여러 암석을 대상으로 R_L 값과 UCS값의 상관성을 발표하였으며 Xu 등(1990)은 R_L 값으로 연약암의 물리적 성질을 추정할 수 있는 상관식을 발표하였고 Katz 등(2000), Kahraman(2001)도 R_n 값과 UCS값의 상관성 연구를 하였다.

또한 암반공사의 실무적 연구에서 Duncan(1969)은 암반굴착의 ripping 능력 추정, Fowell 등(1976)은 암반의 변형계수 추정, Day 등(1977)은 암반의 풍화도 측정, Poole 등(1978)은 TBM 굴진속도 추정, Kazi 등(1980)은 골재의 마모율 연구, Karpuz(1990)은 road-head를 이용한 석탄의 굴착 능력을 추정하는 연구, Goktan(2005)은 암석 절단기의 절단속도 연구, R_n 값과 UCS값의 상관 관계식으로 해석하여 상관식을 발표하였다.

한편 이영남 등(1993)은 화강암과 편암을 대상으로, 이수곤과 이송(1995)은 한국 화강암을 대상으로, 정형식과 유병옥(1997)은 다양한 암종에 대하여, 이영휘 등(2000)은 대구 경북지역 퇴적암을 대상으로 Schmidt hammer 반발치와 일축 압축강도의 상관식을 발표하였으며 임성빈 등(2005)은 인공 신경망 기법을 적용하여 일축 압축강도 추정식을 연구하였다.

국내 연구자들의 공통성은 개별 암석에 대한 상관식을 제시했으며 또한 일축 압축강도에 대응시키는 값으로 단위중량을 활용치 않고 반발치 값을 직접 대응시킨 점이라 할 수 있으며 이는 국내의 암석에서는 R_n 값과 UCS값의 직접 상관성이 매우 크다는 것을 의미한다.

그러나 국내에서는 이 시험법에 의한 연구 부진으로 인하여 현장 암석강도 판별정도에 쓰이고 있을 뿐 그 활용도를 높이지 못하고 있는 실정이다. 간편하고 쉬운

표 1. 기존연구 성과

연구자(년도)	추정식					반발강도 범위	대상암석
	일축 압축강도(Mpa)			탄성계수(GPa)			
	상관식	계수(r)	범위	상관식	계수(r)		
Deere and Miller(1966)	$\delta_{UCS} = 9.97 * e^{(0.02 * R_L * \rho)}$	0.94	22~358	$E_t = 0.19 * R_L * \rho^2 - 7.87$	0.88	23~59	28 종류
Aufmuth(1974)	$\delta_{UCS} = 0.33 * (R_L * \rho)^{1.35}$	0.80	12~362	$E_t = 4911.84 * (R_L * \rho)^{1.06}$	0.75	10~54	25 종류
Dearman and Irfan(1978)	$\delta_{UCS} = 0.00016 * R_L^{3.47}$		11~266	$E_t = 1.89 * R_L - 60.55$	0.93	23~62	화강암
Beverly et al(1979)	$\delta_{UCS} = 12.74 * e^{(0.02 * R_L * \rho)}$		38~218	$E_t = 0.19 * R_L * \rho^2 - 12.71$			20 종류
Kidybinski(1980)	$\delta_{UCS} = 0.52 * e^{(0.05 * R + \rho)}$						퇴적암
Shorey et al(1984)	$\delta_{UCS} = 0.40 * R_N - 3.60$	0.94	3~13			15~40	석탄
Singh et al(1983)	$\delta_{UCS} = 2.00 * R_L$	0.86	12~73				
Haramy and De Marco (1985)	$\delta_{UCS} = 0.99 * R_L - 0.38$	0.70	7~46				
Xu et al.(1990)	$\delta_{UCS} = 1.26 * e^{(0.52 * R_L * \rho)}$	0.92		$E_t = 0.07 * e^{(0.31 * R_L * \rho)}$	0.89		이암
Cargill and Shakoor (1990)	$\delta_{UCS} = 3.32 * e^{(0.04 * R_L * \rho)}$	0.93					사암
Katz et al(2000)	$\delta_{UCS} = 2.21 * e^{(0.07 * R_N)}$	0.96	11~259	$E_t = 0.00013 * R_N^{3.09}$	0.99	24~73	화성암, 퇴적암
Kahraman(2001)	$\delta_{UCS} = 6.97 * e^{(0.02 * R_N * \rho)}$	0.78	4~153			15~70	화성, 변성, 퇴적암
Yilmaz and Sendir (2002)	$\delta_{UCS} = 2.27 * e^{(0.06 * R_L)}$	0.98	15~30	$E_t = 3.15 * e^{(0.05 * R_L)}$	0.95	30~44	Gypsum
Aydin and Basu(2005)	$\delta_{UCS} = 1.45 * e^{(0.07 * R_L)}$	0.92	6~196	$E_t = 1.04 * e^{(0.06 * R_L)}$	0.91	20~65	화강암

※: δ_{UCS} 는 암석의 일축압축 강도, R_L , R_N 은 각각 L-hammer와 N-hammer의 반발값, ρ 는 암석의 단위중량

시험으로 향후 높은 활용도가 기대된다. 국내외의 기존 연구성과를 표 1에 요약하였다.

4. 지질개황과 시료채취

4.1 지질개황

울산분지는 중생대 백악기 지층중 하양층군에 속하며 층적선상지 및 층적평야 퇴적층들로 구성 쇄설성 퇴적암인 사암, 셰일, 이암들이 주류를 이루며 이들은 교호 퇴적되어 층리 형성이 30~50cm 정도로 층상이 뚜렷하며 신선암에 가까운 암에서 풍화 진행이 깊은 암들까지 분포가 다양하며 특히 이암층의 풍화가 매우 심하다.

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

4.2 시료채취 및 준비

울산 분지내 퇴적암 지역을 분포 면적비와 사암, 셰일, 이암의 분포도를 고려하여 7개군으로 구분하고 지역내의 시공중인 건설 현장내의 암반 굴착 지점에서 신선암과 풍화 진행암의 구성 비율에 따라 각각의 군에서 20~25개의 block(50×40×30cm-약160kg/개)을 채취하였으며 또한 암종, 외형상의 암석조직, 색상 및 연암에서 경암까지의 각 요소를 고려하여 모 집단으로서 군을 대표할 수 있는 block을 채집하였다.

시료로 선별하는 과정에서 지질조사용 햄머와 Schmidt hammer로 연암, 경암 판정과 고른 강도 분포가 되는 sampling을 하였다. 풍화가 심한 연암군은 공시체 가공 중의 파손을 고려하여 2~3개씩 더 채취하였다.

채취한 block의 군별 구분을 표 2에 요약하였고 여기서 Group No.는 울산지역 퇴적암 지역의 넓이비로 개략 구분한 것이며 이 group내에 공사현장 지명을 채취지점으로 표기하였으며 채취한 시료가 대표할 수 있는 암종별 분포 특성을 병기하였다.

표 2. 시료 채취 지점

Group No.	Sample No.	채취 지점	현장의 특성
1	US/UD 1~18	울산-범서 확포장(반송리 대절개구간)	자색 셰일, 사암(교호층상), 셰일이 우세
2	US/UD 20~31	울산-범서 확포장(안양 육교 터파기)	자색 사암(층상구조), 사암이 절대적 우세
3	US/UD 40~49C	천상 정수장 공사(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 이설도로 공사(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)

표 3. UCS와 BRZ 시료수

암종	Block수	UCS	%	BRZ	%
셰일	36	137	47.1	152	49.5
사암	25	44	32.3	93	30.3
이암	16	60	20.6	62	20.2
계	77	291	100	307	100

표 4. 암종별 물리적 특성

암종	단위중량(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

채취한 시료에서 sand stone, arkose, wacke, grey wacke를 포함하는 arenaceous stone을 편의상 사암으로, mud stone, silt stone, clay stone이 포함된 argillaceous stone을 셰일(shale)로, bedding plane의 흔적이 없는 argillaceous stone을 이암으로 분류했다. 이는 건설 기술자들이 현장에서 퇴적암을 쉽게 구분하는 방법이기도 하다.

시험용 시료는 층리면에 수직으로 coring을 하였으며 block마다 채취 지점별로 사암, 셰일 및 이암으로 분류하였다.

Schmidt hammer 타격시험은 시료 성형이 가능했던 77개의 block을 대상으로 실시하였고 일축 압축강도와 압열 인장시험 시료수는 표 3과 같다. 실제 sampling한 block은 153개였으나 시료 성형과정에서 파손된 것이 반 정도되었다. 이는 연약한 암석을 위주로 채취하였기 때문이다.

4.3 시료의 물리적 성질

시료의 물리적 성질을 표 4에 정리하였으며 파괴시험은 공기건조 상태로 실시하였다. 표 4에서 퇴적암 전체

의 자연 함수비 및 흡수율이 높고 특히 이암의 흡수율은 사암과 셰일에 비해 두배 정도가 되며 간극율을 동시에 고려하면 풍화 속도가 매우 빠를 것으로 예상되며 이암의 강도 및 탄성계수는 사암, 셰일에 비해 반 정도의 값으로 나타나고 있다. 이는 간극율이 크기 때문에 흡수율이 크고 강도와 탄성계수가 작은 값을 나타낸다고 할 수 있다.

5. 시험

5.1 일축 압축강도시험

NX규격의 일축 압축강도 시험용 공시체의 상하 압축면의 편평도는 diamond 편이 박힌 직경 10cm의 grinding disc를 사용하여 0.02mm를 목표로 연마하였다(ASTM D 2938-95, ISRM 1981). 아주 약한 암석은 연마중에 양단면의 파괴가 심하여 표준 편평도에 만족시키지 못한 시료도 많았다. 그래서 파괴 시험시(UTM-15MN) spherical platen으로 축하중의 편심을 방지했다(ASTM D 4543-01).

직경방향 및 축 방향 변형율과 재하하중 자료를 1초

간격으로 data logger로 읽어 자료를 정리하였으며 재하-제하의 반복재하는 3회 이상씩 실시하였다(ASTM D 3148-96).

강도가 높은 암석일수록 파괴순간에 입자간의 접촉력 이완으로 인한 인장 파괴 양상이 파단면에 고루 분포되어 있는 현상을 볼 수 있었으며 파괴음도 대단히 커서 취성파괴의 양상을 보였다.

파괴선 역시 거의 수직에 가까운 모양이었으나 강도가 낮은 공시체의 파단면에는 전단파괴된 부분도 상당수 나타났으며 파괴음도 크지는 않았다.

공시체를 3개/조로 시험하였는데 분산이 심한 것은 5~7개/조로 추가하여 시험을 실시하였다. 그림 2는 총 291개의 시험시료의 강도분포를 그린 것으로 50~130 Mpa 사이에서 고르게 분포되어 있는 것을 볼 수 있다.

5.2 압열 인장시험

압열 인장시험(Brazilian test, BRZ)용 시료는 직경 대 길이의 비(L/D=1.0)를 1.0에 근접하도록 하였으며 UCS 용 시료와 BRZ용 시료는 동일 core에서 절단 준비하여 상호 상관성이 유지되도록 하였다. 시험중 이상 파손을 대비하여 여유분을 2~3개 더 준비하였고 시험기준, 순서 및 자료처리는 ASTM(D 3967-95a)과 ISRM(1978-Part 2)의 권장에 따라 실시되었다.

5.3 Schmidt Hammer 타격시험

선행 연구자들과 ASTM(D 5873-00), ISRM(1978a)의 권장에 따라 NX Core에 타격시험을 하기 위하여 층리면에 수직으로 coring을 하였고 core 양단면을 절단하여 평편하도록 연마한후 NR형 Schmidt hammer로 축방향 타격을 하였으나 1회 타격에 거의 모든 시료가 파괴되

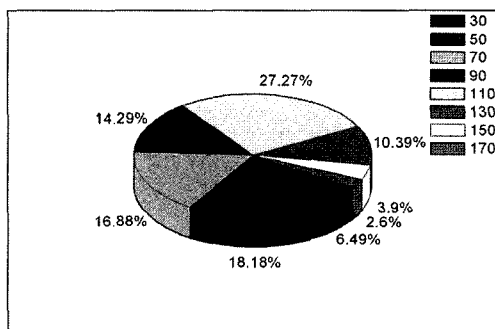


그림 2. 시료의 일축 압축강도 분포도(MPa)

어 50여개의 시험은 자료없이 시료를 버리게 되어 다시 V hold에 설치후 직경방향으로 타격을 실시했으나 역시 40여개의 시료가 전부 1회 타격에 파괴되었다. 파괴된 시료의 일축 압축강도는 최대 110MPa 정도로 강한 것도 포함되어 있었다. 이는 시료가 연약한 퇴적암으로 시료 내부에 육안으로 판별이 어려운 흠결(층리등 불연속면)이 있었을 가능성도 있고 또한 시료 부피가 타격 에너지를 수용하기엔 너무 적었기 때문으로 판단이 되어 block을 대상으로 타격하는 시험방법으로 변경하여 철제좌대(H-beam:350×350×12)를 제작하여 그 위에 block을 고정한 후 층리면에 수직하게 타격하였다(그림 3).

5.4 시험자료 검토

일축 압축강도, 압열 인장강도 및 Schmidt hammer 타격시험의 결과와 흡수율, 탄성계수, Poisson 비, 진 비중, 간극율, 포화도 등의 시험자료를 정리한 후 시험 결과값을 각 시험항목에 따라 통계자료를 정리한 것이 표 5이며 이 자료를 검토하면 시험항목의 평균값과 중위수값의 차이가 근소하므로 이는 정규분포에 가까운 결과치로 대표값을 평균치로 취함에 무리가 없다는 것을 의미한다. 또한 변동계수도 흡수율(W_{ab})과 간극비에서는 진폭이 다소 크나 좋은 결과를 도출하였다고 할 수 있다.

특히 Schmidt hammer 타격값의 변동계수가 가장 작다는 것은 본 시험의 결과치로 타 항목간의 상관성 분석을 위한 자료로 사용하기에 적합하다는 의미이며 또한 이를 활용하여 도출된 결과값의 신뢰성도 높아 진다는 것을 의미한다.

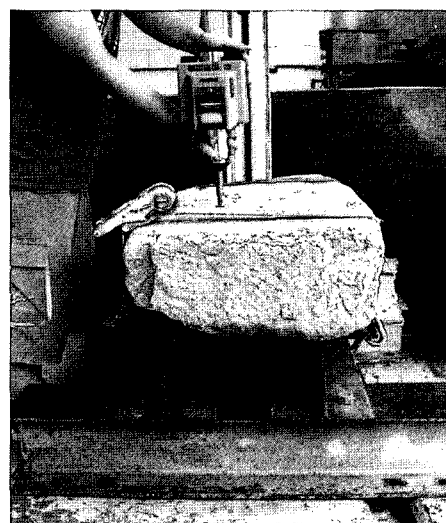


그림 3. Schmidt hammer 좌대

표 5. 시험결과 통계자료

	Mean	Max.	Min.	SD	Cv	Median	Range
UCS(MPa)	89.21	173.90	23.10	33.60	0.38	89.30	150.80
BRZ(MPa)	10.09	21.19	2.33	3.91	0.39	9.79	18.86
Schmidt(R _n)	51.10	75.50	20.60	11.18	0.22	54.10	54.90
W _{ab} (%)	3.14	8.63	0.35	1.92	0.61	2.68	8.28
E _t (GPa)	42.27	87.01	8.63	16.05	0.38	43.46	78.38
Poisson 비	0.25	0.53	0.10	0.09	0.36	0.24	0.42
Porosity(%)	3.63	10.25	0.39	2.14	0.59	3.43	9.86
Unit Wt.(t/m ³)	2.676	2.764	2.598	0.032	0.012	2.674	0.166
Gs(진)	2.778	2.962	2.672	0.062	0.022	2.760	0.290

6. 결과의 분석

6.1 일축 압축강도와의 관계

77개의 사암, 세일, 이암 시료로 지수함수로 상관성을 표현한 것이 그림 4와 식 (1)이다. 상관계수는 0.956으로 높은 상관성을 나타내며 분산도 아주 작다.

$$\sigma_c = 30.1 \cdot \exp(R_n/38.2) - 30.2 \text{ (MPa)}, \quad (1)$$

$$(R^2 = 0.956)$$

그림 4의 곡선은 R_n값의 증가에 따라 점진적으로 UCS값이 증가하는 양상을 보이며 전체적인 값은 기존 연구자들의 값 보다 다소 낮게 나왔다.

이는 본 연구에서는 강도가 낮은 퇴적암만을 대상으로 했기 때문일 것으로 사료된다.

타 연구자들의 결과와 비교한 그림 5의 결과와 같이 본 연구대상 퇴적암의 상관곡선은 타 연구자들의 결과

처럼 어느 특정값을 경계로하여 급증하는 양상은 보이지 않는다. 이것이 Schmidt hammer로 UCS값을 추정할 때의 퇴적암의 특징일 수도 있다.

단단한 화성암, 변성암류를 주 대상으로 시험한 기존 연구 결과에서는 타격 범위도 20~60정도이며 R_n값도 50을 전후하여 급증하는 양상을 보이므로 R_n값이 급증한다는 것은 신뢰도가 떨어진다는 것을 의미한다.

퇴적암을 대상으로 시험한 본 연구에서는 시험범위가 넓고 높은 반발값(20~80)에서도 유효한 UCS값을 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 R_n값이 20이하에서는 유효한 값을 찾지 못하였다. 이는 타격 에너지가 큰 NR 해머를 사용했기 때문일 것이다.

또한 본 연구에 사용한 NR hammer의 제작사(Maker: Sanyo Testing Machine-GSR)가 제시한 값도 R_n값 45를 전후하여 급증함을 보이고 있으며 적용 범위도 좁아지고 있다. 이는 제작사의 data로 타격값을 적용하면 참값과 매우 다른 결과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

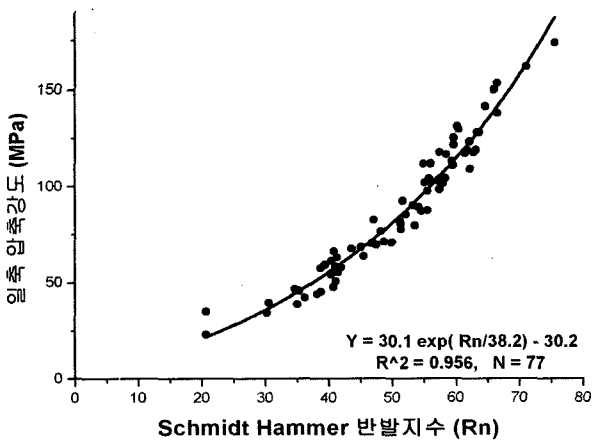


그림 4. 일축 압축강도 : Schmidt Hammer 반발지수

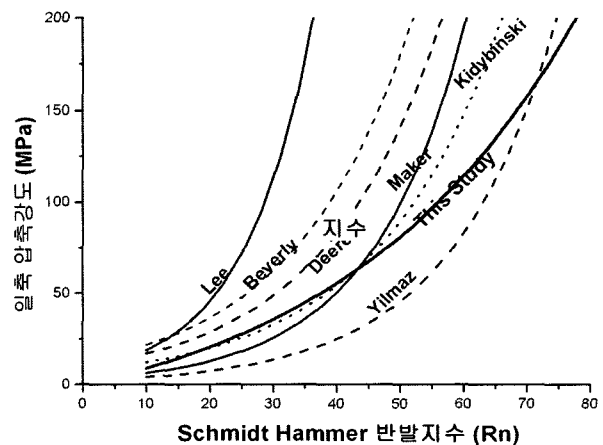


그림 5. 기존연구 결과와 비교(반발지수)

6.2 탄성계수와와의 관계

탄성계수와 Schmidt hammer 반발지수 간에는 그림 6과 같이 직선변화 관계가 표출되며 상관계수는 0.917, 분산은 6.44로 높은 상관성이 있다고 할 수 있다.

그림 7과 같이 탄성계수값 역시 기존 연구자들의 값보다 낮은 값으로 도출되었으나 Deere and Miller(1966)와 Beverly 등(1979)의 결과와는 거의 평행하게 나타난다. 반발치가 20이하에서는 측정값을 도출할 수가 없었기 때문에 상관식 2에서는 20이상 값에서만 유효하다고 할 수 있다.

$$E_t = 1.32 \cdot R_n - 25.07 \text{ (GPa)} \quad (R = 0.917, SD = 6.44) \quad (2)$$

6.3 Poisson 비와의 관계

반발지수에 따른 Poisson 비는 그림 8과 같이 직선 변화를 하며 감소하고 있다. 이는 강도가 커질수록 횡 변

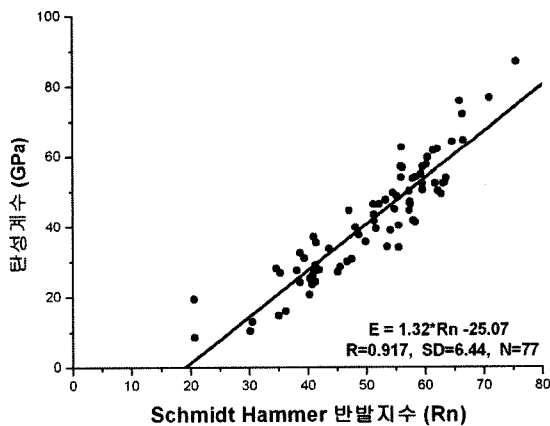


그림 6. Schmidt Hammer 반발지수 : 탄성계수

형율이 줄어든다는 의미이며 본 시험에서는 식 (3)이 얻어졌으며 여기서 상관계수는 0.846, 표준편차는 0.05로 제시된다. 상관성이 높은 편이 아니나 두 변수간의 연관성에 대한 흐름을 파악하기에 충분할 것으로 판단된다.

$$\mu = -0.007 \cdot R_n + 0.60 \quad (R = 0.846, SD = 0.05) \quad (3)$$

6.4 압열 인장강도와의 관계

77조 307개의 시료로 압열 인장강도 시험을 하여 Schmidt hammer 반발지수와 상관성을 분석한 결과가 그림 9와 식 (4)이다. 상관계수는 0.927, 표준편차는 1.48의 관계가 도출되었다.

그리고 종속 변수인 반발지수의 변환 계수값의 오차 범위가 0.02로 도출된 것은 높은 상관계수와 더불어 식 (4)의 추정식의 정도가 매우 높다는 것을 의미한다.

그러나 반발지수 20부근과 65이상에서는 값의 분산이 다소 커지고 있음을 보여준다. 이는 20이하의 낮은

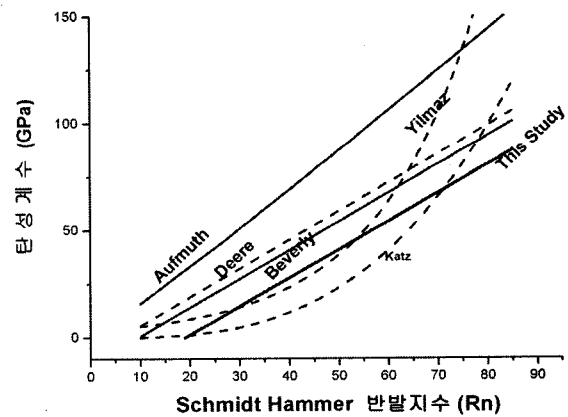


그림 7. 기존연구 결과와 비교(탄성계수)

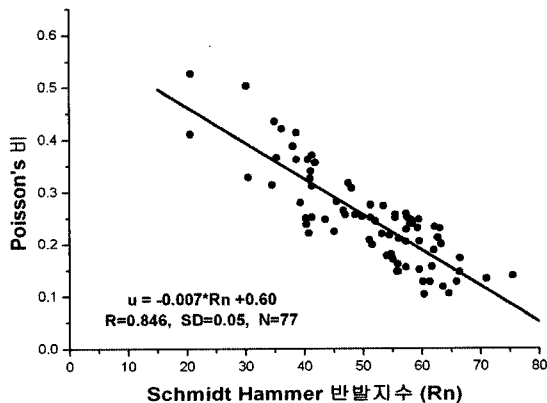


그림 8. Schmidt Hammer 반발지수 : Poisson's 비

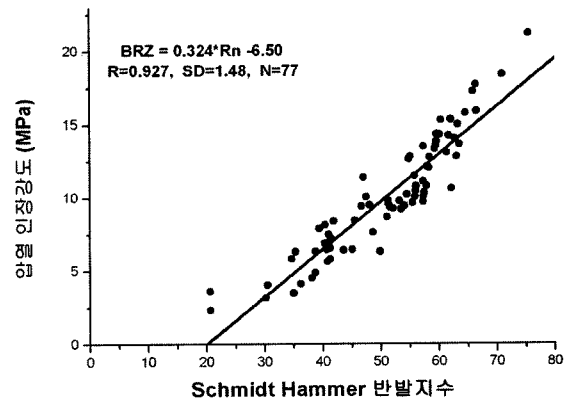


그림 9. Schmidt Hammer 반발지수 : 압열 인장강도

강도의 암석은 내부의 풍화정도에 따라 흡결의 빈도가 불규칙하다는 것을 의미한다. 이런 연유로 반발지수 20 이상에서 65사이 값이 그 외의 값보다 신뢰도가 크다는 것을 의미하고 있음을 나타낸다. 또한 20이하에서는 적절한 실험치 도출이 되지 않았기에 식 (4)에서 절편값이 영보다 작게 나왔다.

$$\begin{aligned} \sigma_t &= 0.324 \cdot R_n - 6.50 \text{ (MPa)} \\ (R &= 0.927, \text{SD} = 1.48) \end{aligned} \quad (4)$$

6.5 간극율과의 관계

각 조의 개별 간극율 (n)의 평균값으로 Schmidt hammer 반발지수와 상관시킨 결과 상호간에 직선적관계가 있으며 상관계수가 0.856, 표준편차가 1.11로 밀접한 관계로 볼 수 있다.

그림 10에서 변환 계수값의 오차범위가 0.01로 도출된 것 역시 식 (5)의 추정식의 정도가 매우 높다는 것을 나타낸다. 그림 10에서 간극율이 2~6%사이 집중적으로 분포가 되는 특성을 보이고 있으며 퇴적암의 일반적 분포에 비해 값이 다소 낮은 편이다.

암석의 풍화정도에 따라 광물입자와 교결물질의 이완과 풍화, 침식에 의한 교결물질의 일탈이 암석의 강도를 약화시키는 결과를 초래한다는 것을 이 실험에서 확인할 수 있다. 간극율이 낮을수록 반발지수는 커지므로 이는 간극이 적어 치밀한 조직을 가질수록 강도는 커진다는 것을 의미한다.

$$\begin{aligned} n &= -0.160 \cdot R_n + 11.99 \\ (R &= 0.856, \text{SD} = 1.11) \end{aligned} \quad (5)$$

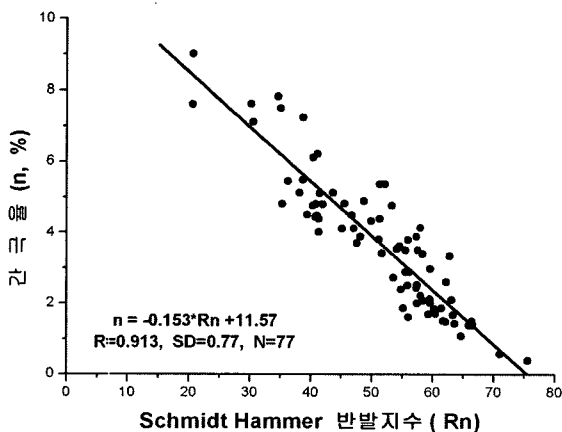


그림 10. Schmidt Hammer 반발지수와 간극율

6.6 흡수율과의 관계

간극이 크고 느슨한 조직의 시료는 흡수율(W_{ab})이 크며 강도는 작아짐을 그림 11과 식 (6)에서 볼 수 있으며 반발지수와 흡수율과는 감소 직선관계를 나타내고 있다.

이 관계는 높은 상관성을 보여주고 있으며 상관계수는 0.938, 표준편차는 0.67이며 흡수율의 주 분포 영역은 1~5% 사이로 퇴적암의 일반적 흡수율에 비하면 낮은 부분에 속한다.

그림 12의 간극율과 흡수율 직선에서 경미하지만 간극율이 낮을 수록 포화도가 적어지는 경향을 볼 수 있다. 여기서 평균 포화도 81.60%로 계산되었다. 즉 암석 시료의 닫힌 간극은 18.40%로 간주할 수 있다.

$$\begin{aligned} W_{ab} &= -0.161 \cdot R_n + 11.37 \\ (R &= 0.938, \text{SD} = 0.67) \end{aligned} \quad (6)$$

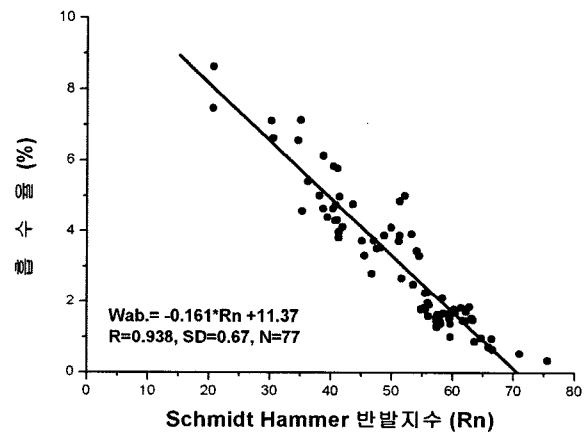


그림 11. Schmidt Hammer 반발지수와 흡수율

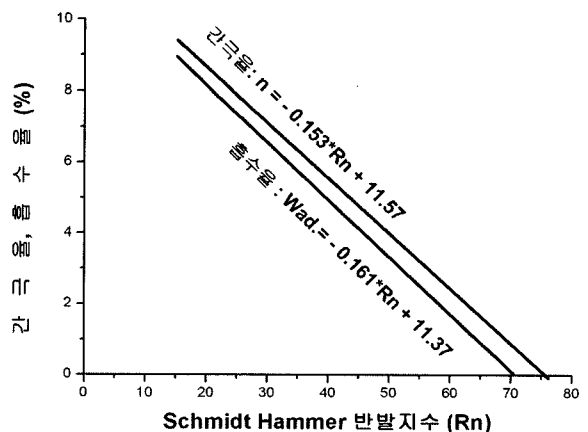


그림 12. 반발지수에 따른 간극율과 흡수율

6.7 단위중량과의 관계

단위중량이 크면 조직이 치밀하여 강도가 반발지수에 비례하여 증가할 것으로 짐작되나 그림 13과 같이 본 연구대상의 퇴적암에서는 상관성이 나타나지 않았다. 기존 연구자들의 성과에서도 상관성이 도출된 것과 그렇지 않은 것들이 있었다.

7. 검토

본 연구의 제안식을 사용하여 구한 예측값과 실험에

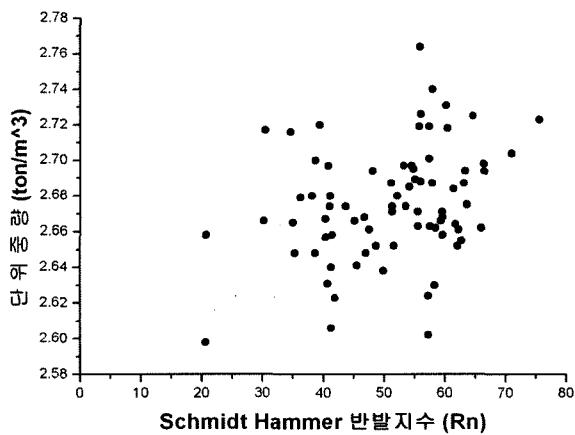


그림 13: Schmidt Hammer 반발지수와 단위중량

서 도출된 실측값을 비교하여 제안식의 신뢰성을 검증하였다. 실측값(X-축)에 대한 예측값(Y-축)의 직선 회귀 분석을 하여 예측식이 참값에 근접한다면 회귀 분석 직선의 기울기가 1.00에 접근하고 절편 X-축도 영에 가까울 것이다. 즉 $Y = aX + b$ 의 일차식에서 $a=1, b=0$ 이 될 것이다.

이 방법으로 Schmidt hammer 반발지수를 이용하여 일축 압축강도, 탄성계수, Poisson 비, 압열 인장강도, 간극율 및 흡수율 추정식의 신뢰성 검토를 위한 회귀 분석한 것이 그림 14이며 결과를 정리한 것이 표 6이다.

제안식으로 구한 일축 압축강도와 실측값으로 회귀 분석을 한 결과 기울기가 0.956으로 도출되었으며 이는 기울기 1.0에 거의 근접된 결과로 Schmidt hammer 반발지수를 이용하여 일축 압축강도를 추정함에 만족할 결과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

탄성계수, 압열 인장강도, 간극율, 흡수율을 Schmidt hammer 반발지수로 간접 도출함에 있어서도 기울기 값이 0.827~0.881 정도이며 이는 일축 압축강도 추정값보다는 다소 낮으나 기본계획 수립 및 현장관리를 하는데 사용함에는 무리가 없을 것으로 판단된다. 다만 Poisson 비의 추정에서는 기울기 값이 0.731 정도로 개략적 윤곽을 파악할 수 있을 뿐이다.

이상의 결과와 앞절에서 상관성 분석을 한 각 항목을

표 6. 검토 결과

	기울기(a 값)	상관성	표준편차	활용 여부
일축 압축강도(MPa)	0.956	0.978	6.93	적극 권장
탄성계수(GPa)	0.827	0.917	5.92	권장
Poisson 비	0.731	0.846	0.04	유보
압열 인장강도(MPa)	0.858	0.927	1.37	권장
간극율(%)	0.869	0.913	0.74	권장
흡수율(%)	0.881	0.938	0.63	권장

표 7. 상관식

	상관식	R	S D	오차		비고
				B	A	
일축 압축강도(Mpa)	$\sigma_c = 30.1 \cdot \exp(R_n/38.2) - 30.2$	0.956				R^2 값
탄성계수(GPa)	$E = 1.32 \cdot R_n - 25.07$	0.917	6.44	0.07	3.46	
Poisson's 비	$\mu = -0.007 \cdot R_n + 0.60$	0.846	0.05	0.00	0.03	
압열 인장강도(MPa)	$\sigma_t = 0.324 \cdot R_n - 6.50$	0.927	1.48	0.02	0.79	
간극율(%)	$n = -0.160 \cdot R_n + 11.99$	0.856	1.11	0.01	0.60	
흡수율(%)	$W_{abr} = -0.161 \cdot R_n + 11.37$	0.938	0.67	0.01	0.36	
단위중량(KN/M ³)	상관성이 없음					

1. B 및 A는 상관식 $Y = B \cdot X + A$ 에서의 계수
2. R_n : Schmidt hammer 반발지수

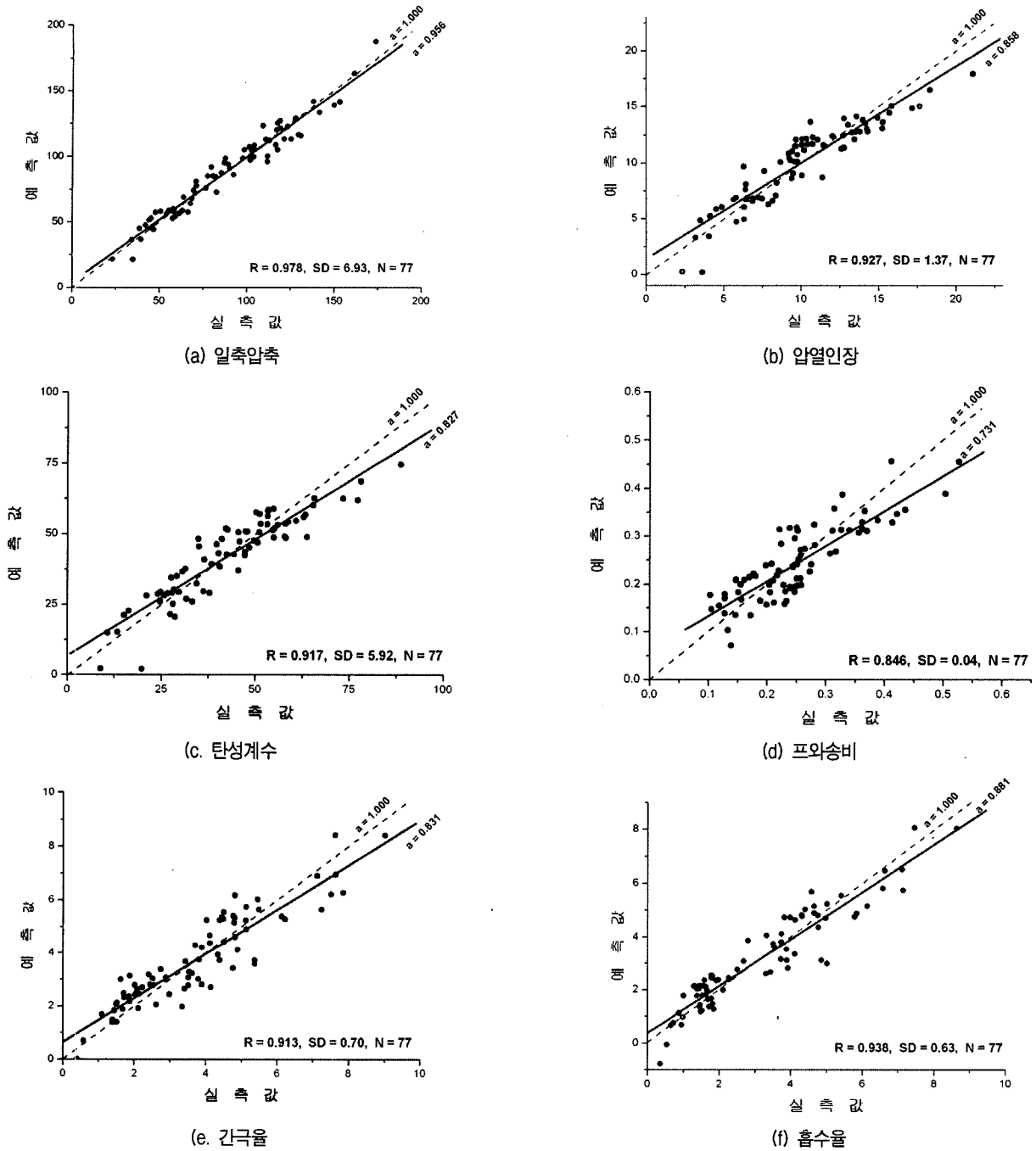


그림 14. 예측값-실측값의 회귀분석

정리하여 표 7에 요약하였다.

8. 결론

경상분지에 속한 울산지역 퇴적암을 대상으로 Schmidt hammer 반발지수를 이용하여 일축 압축강도, 압열 인장강도, 탄성계수, Poisson 비, 간극율 및 흡수율을 간접적으로 도출하기 위한 연구를 하였다.

공사의 타당성 조사, 기본설계 및 현장관리를 하기 위

하여 필요한 암석의 공학적 물리적 성질을 산정함에는 간편하고 신속하고 경제적인 방법을 활용함이 효율적이며 이러한 목적을 위하여 Schmidt hammer 반발지수를 활용하기 위한 연구 결과를 다음과 같이 요약한다.

- (1) 일축 압축강도를 추정함에는 높은 상관성과 신뢰도를 가지는 상관식을 도출할 수 있었으며 기존 연구자들의 성과에 비해서 낮은 값이 도출되었으며 반발지수는 급증하는 변곡점 없이 20~80의 넓은 강

도 범위까지도 적용이 가능하다.

- (2) 탄성계수 추정을 위한 상관식은 선형관계를 가지며 이 역시 기존 연구자들의 성과에 비해서 낮은 값을 가지는데 이는 퇴적암만을 대상으로 했기 때문일 것이다.
- (3) Schmidt hammer 반발지수와 Poisson 비와의 관계는 신뢰할 수준의 상관성은 없다고 할 수 있다.
- (4) 압열 인장강도와 Schmidt hammer 반발지수 사이에는 선형관계의 상관성이 있으며 상관성도 높다.
- (5) Schmidt hammer 반발지수와 간극율, 반발지수와 흡수율 간에도 좋은 상관성이 있으며 선형관계를 가지고 있다.
- (6) 간극율과 흡수율의 비교에서 높은 포화도를 나타내고 있으며 이는 울산 퇴적암의 특성이라 할 수 있다.
- (7) Schmidt hammer 반발지수와 단위 중량간에는 상관성이 발견되지 않는다. 이 역시 울산 퇴적암의 특성으로 볼 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 정형식, 유병옥 (1997), "암석의 풍화에 따른 강도 변화특성 및 강도추정에 관한 연구", *한국지반 공학회 논문집*, 제13권, 제6호, pp.71-91.
2. 이영남, 윤지선, 김두영 (1993), "Rock Test Hammer 측정결과의 활용에 관하여", *한국암반역학회, 터널과 지하공간*, Vol.3, pp.167-174.
3. 이수근, 이송 (1995), "슈미트 해머 수치를 이용한 한국 화강암의 일축 압축강도 추정방법", *대한토목학회 논문집*, 제15권, 제2호, pp.199-210.
4. 이영휘, 김용준, 박준규 (2000), "압축 강도와 풍화도에 관련된 퇴적암의 공학적 특성", *한국지반공학회 논문집*, 제16권, 제1호, pp.5-17.
5. 임성빈, 김교원, 서용석 (2005), "대구지역 퇴적암의 일축 압축강도 예측을 위한 인공신경망 적용", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.15, No.1, pp.67-76.
6. ASTM (D 2938-95), "Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens", *Annual Book of ASTM Standards 2005*.
7. ASTM (D 4543-01), "Practices for preparing rock core specimens and determining dimensional and shape tolerances", *Annual Book of ASTM Standards 2005*.
8. ASTM (D 3148-96), "Test method for elastic moduli of intact rock core specimens in uniaxial compression", *Annual Book of ASTM Standards 2005*.
9. ASTM (D 3967-95a), "Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens", *Annual Book of ASTM Standards 2005*.
10. ASTM (D 5873-00), "Test method for determination of rock hardness by rebound hammer method", *Annual Book of ASTM Standards 2005*.

11. ASTM (D 854-00), "Test method for specific gravity of soils", *Annual Book of ASTM Standards 2005*.
12. ASTM (D 2216-98), "Test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass", *Annual Book of ASTM Standards 2005*.
13. Aufmuth, R.E. (1974), "A systematic determination of engineering criteria for rock", *Bull. Ass. Eng. Geol.*, Vol.6, No.3, pp.235-245.
14. Aydin, A., Basu, A. (2005), "The Schmidt hammer in rock-material characterization", *Eng. Geol.*, Vol.81, pp.1-14.
15. Beverly, B.E., Schoenwolf, D.A., Brierly, G.S. (1979), "Correlations of rock index values with engineering properties and the classification of intact rock".
16. Barton, N., Choubey, V. (1977), "The shear strength of rock joints in theory and practice", *Rock Mech.*, Vol.10, pp.1-54.
17. Cargill, J.S., Shakoor, A. (1990), "Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.27, pp.495-503.
18. Dearman, W.R., Irfan, T.Y. (1978), "Assessment of the degree of weathering in granite using petrographic and physical index tests", *Proc. Int. Symp. on Deterioration and Protection of Stone Monuments*. UNESCO, Paris, pp.1-35, Paper 2, 3.
19. Deere, D.U., Miller, R.P. (1966), "Engineering classification and index properties for intact rocks", *Tech. Report, Air Force Weapons Lab. New Mexico*, No. AFNL-TR. Kirtland., pp.65-116.
20. Day, M.J., Goudie, A.S. (1977), "Field assessment of rock hardness using the Schmidt test hammer", *Br. Geomorphol Res. Group Tech. Bull.*, Vol.18, pp.19-29.
21. Duncan, N. (1969), "Engineering Geology and rock mechanics", *London, Leonard Hill*, Vol. 1.
22. Fowell, R.J., McFeat Smith, I. (1976), "Factors influencing the cutting performance of a selective tunnelling machine", In Jones, J.M. editor. *Proceedings of the International Symposium on Tunnelling '76*, London : IMM; pp.301-309.
23. Goktan, R.M., Gunes, N. (2005), "A comparative study of Schmidt hammer testing procedures with reference to rock cutting machine performance prediction", *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol.42, pp.466-472.
24. Haramy, K.Y., DeMarco, M.J. (1985), "Use of Schmidt hammer for rock and coal testing", *Proc. 26th. U. S. Symp. Rock Mech.*, pp.549-555.
25. Hucka, V. (1965), "A rapid method for determining the strength of rocks in situ", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.2, pp.127-134.
26. ISRM (1978a), "Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.15, pp.89-97.
27. ISRM (1979), "Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.16, pp.141-156.
28. 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 (2), pp.135-140.
29. Kahraman, S. (2001), "Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.38, pp.981-994.
30. Karpuz, C. (1990), "A classification system for excavation of

- surface coal measures”, *Min. Sci. Technol.*, Vol.11, pp.157-163.
31. Katz, O., Reches, Z., Reogiers, J.C. (2000), “Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.37, pp.723-728.
 32. Kazi, A., Al-Mansour, Z.R. (1980), “Empirical relationship between Los Angeles Abrasion and Schmidt hammer strength tests with application to aggregates around Jeddah”, *Q. J. Eng. Geol.*, London, Vol.13, pp.45-52.
 33. Kidybinski, A. (1980), “Method of investigations, estimation and classification of roofs in mines in the United States of America for the selection of suitable mechanized support for long-walls”, *USDI/CMI Joint Research Project Report*.
 34. Poole, R.W., Farmer, I.W. (1978), “Geotechnical factors affecting tunnelling machine performance in coal measures rocks”, *Tunnels Tunnelling*, pp.27-30.
 35. Poole, R.W., Farmer, I.W. (1980), “Consistency and repeatability of Schmidt hammer rebound data during field testing”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.17, pp.167-171.
 36. Schmidt, E. (1951), “A non-destructive concrete tester”, *Concrete*, Vol.59, No.8, pp.34-35.
 37. Shorey, P.R., Barat, D., Das, M.N., Mukherjee, K.P., Singh, B. (1984), “Schmidt hammer rebound data for estimation of large scale in situ coal strength”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.21, pp.39-42.
 38. Singh, R.N., Hassani, F.P., Elkington, P.A.S. (1983), “The application of strength and deformation index testing to the stability assessment of coal measures excavations”, *Proc. 24th. US Symp. on Rock Mech.*, Texas A & M Univ., AEG, pp.599-609.
 39. Yasar, E., Erogan, Y. (2004), “Estimation of rock physicochemical properties using hardness methods”, *Eng. Geol.*, Vol.71, pp.281-288.
 40. Yilmaz, L., Sendir, H. (2002), “Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young’s modulus in gypsum from Sivas (Turkey)”, *Eng. Geol.*, Vol.66, pp.211-210.
 41. Xu, S., Grasso, P., Mahtab. (1990), “Use of Schmidt hammer for estimating mechanical properties of weak rock”, *Proc. 6th. Int. IAEG Congress*, Vol.1, pp.511-519.
 42. Young, R.P., Fowell, R.J. (1978), “Assessing rock discontinuities”, *Tunnels Tunnelling*, pp.45-48.

(접수일자 2006. 7. 6, 심사완료일 2006. 8. 30)