

퇴적암의 공학지수를 추정하기 위한 L. A. 마모율 시험

Los Angeles Abrasion Test for Estimating Engineering Index on the Sedimentary Rocks of Kyeongsang Basin

민 덕 기¹ Min, Tuk-Ki
문 중 규² Moon, Jong-Kyu
이 상 일³ Lee, Sang-Il

Abstract

Los Angeles abrasion loss test has usually been applied to the quarry for the purpose of aggregate hardness estimation. 324 blocks from 25 sites of Kyeongsang basin samples of sedimentary rock were examined and tested in laboratory. This paper found that L. A. abrasion loss test is a good method to estimate engineering index such as uniaxial compressive strength, elastic modulus, indirect tensile strength, point load strength index, Schmidt hammer rebound value of sedimentary rocks with high correlation factor. Engineers will prefer L. A. abrasion loss test to the other one for design and construction as this method is quick and easy.

요 지

L. A. 마모율 시험은 건설용 골재의 강도를 확인하기 위한 방법으로 주로 석산의 모암을 대상으로 시행하여 왔다. 본 연구는 경상분지 퇴적암이 집중 분포되어 있는 25 지점에서 지질학적 특성을 대표할 수 있는 324 블록의 시료를 채취하여 L. A. 마모율시험으로 각종 공학지수(일축 압축강도, 압열 인장강도, 탄성계수, 점하중 강도지수, Schmidt 해머 반발지수)를 추정하기 위한 실험을 시행하여 회귀 분석법으로 서로간의 상관성을 확인한 결과, 상호간 좋은 상관관계가 있음을 확인하였다. 이 방법이 다른 공학지수를 추정함에 손색이 없으므로 이후에도 많은 활용이 있기를 기대한다.

Keywords : Brazilian test, Los Angeles abrasion loss test, Point load strength index, Regression analysis, Sedimentary rock, Uniaxial compressive strength,

1. 서 론

암, 암반을 대상으로 하는 토목공사의 계획, 조사, 설계, 시공 및 시공관리 과정에서 제반 물성이나 공학적 특성치의 개략적인 값을 필요로 할 때 간단하고 쉽고 저렴한 방법을 적용하는 것이 효과적이고 유용하다. 이러한 방법 중에는 점하중 강도시험, Schmidt hammer 타

격시험, 탄성과 시험 등이 많이 활용되고 있다.

그러나 L. A. abrasion loss test(마모율시험)성으로 공학적 지표를 추정하기 위한 시도는 지금까지 거의 없었고 다만 도로 포장용 골재의 강도나 콘크리트 골재의 적합성을 판별하기 위하여 활용되었을 뿐이다.

본 연구에서는 마모율 성과와 일축 압축강도, 탄성계수, Brazilian 성과, 점하중 강도지수, Schmidt hammer

1 정회원, 울산대학교 공학대학 건설환경공학과 교수 (Member, Prof. Dept of Civil & Environ., Univ. of Ulsan, tkmin@ulsan.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 동명기술공단(주) 부사장, 공학박사, 토질 및 기초기술사 (Member, Dongmyung Eng., Consultant. Co.)

3 정회원, 한국농촌공사 울산지사 차장, 박사과정 (Member, Korea Rural Community & Agriculture Corporation)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

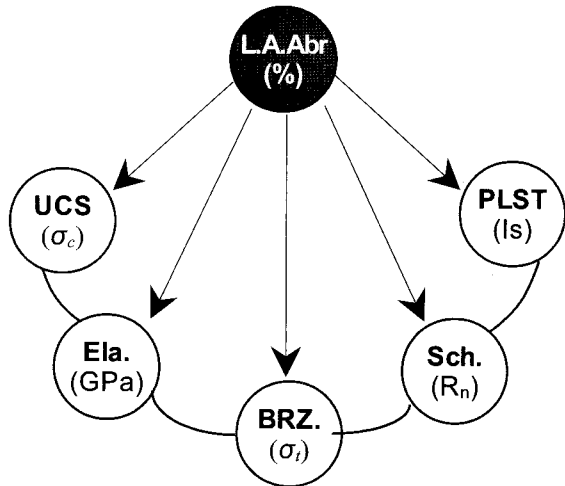


그림 1. L. A. 마모율 시험의 연구범위

반발 값과의 상관성 분석을 하였다(그림 1). 이들의 결과는 암석의 공학적 지수를 간접적으로 도출함에 의의로 만족할 수 있는 상관성과 유용성이 확인되었다. 활용된 모집단의 규모와 상관성 분석 결과 값의 통계적 수치들을 고려한다면 본 연구의 성과는 빠르고 쉬우며 저렴하게 각종 공학지표를 파악할 수 있는 또 하나의 좋은 방법이라 할 수 있다.

2. 연구동향

L. A. 마모율 시험은 건설용 골재 품질을 판단하기 위하여 ASTM(C 131-89, 1989), (C 535-89, 1989), ISRM (1978b)에서 제정한 것으로 우리나라에서도 이를 준용하고 있는 품질관리를 위한 시험법(KS F 2508-1997)이다. 즉, 마모율이 적으면 골재 기준강도가 확보되어 콘크리트, 도로의 기층재, 철도의 ballast 골재로 적합한 재료로 인정을 받을 수 있다. 이러한 사실은 마모율과 암석의 강도가 밀접한 관계를 가지고 있다는 사실을 내포하고 있다.

1960년대 중반부터 1970년대 중반 사이에 Russia 공학자들은 이 사실에 착안하여 암석의 마모율과 각종 공학적, 물리적 상관성을 해석하여 실용적 성과를 도출하였다. Kowalski(1966), Smorodinov 등(1970), Rzhhevski 등(1971), Szlavina(1974)는 서로 다른 각종 암석을 대상으로 마모율과 일축 압축강도와의 상관성을 해석하여 암석강도 추정을 가능케 하였으며, ASTM(C 131-89, 1989)에서는 시험법을 제정하여 Los Angeles Abrasion Test Method로 발표하였다. 이에 따라 Kazi 등(1980-a), Gunsallus 등(1984), Shakool 등(1993)은 강도추정과 더

불어 물리적, 암석학적 특성을 추정할 수 있는 상관식을 발표하였다. Cargill과 Shakoor(1991)은 마모율과 일축 압축강도와의 상관성이 0.92정도의 높은 정도의 경험식을 제시했고 또한 물리적 parameter와도 높은 상관성의 경험식을 발표하여 활용 중이다.

3. 시험준비

3.1 시료채취

우리나라의 퇴적암은 경남북지역에 집중 분포되어 있는 특징이 있으며, 이는 전국 분포비율의 87%에 이른다. 퇴적환경의 특성으로 분류하면 수성 쇄설성 퇴적암 지대인 신동층군은 호변 퇴적특성을 보이고, 하양층군은 호상 퇴적특성을 보이고 있다. 화산 쇄설성 퇴적암 지대인 유천층군은 화산 폭발로 인한 생성물의 퇴적특성을 보이고 있다. 이들 세 퇴적군을 경상누층군 혹은 경상분지라 칭한다.

이들 퇴적군중에서 수성 쇄설성 퇴적암지대인 신동층군과 하양층군에서 개략적 면적비례로 25지구로 분할해서 본 연구에 필요한 시료를 채취하였다. 이들 시료는 그 지역을 대표할 수 있는 지질학적 특성을 고려하고 또 Schmidt hammer와 rock test hammer로 현지에서 개략적 강도를 검정하고 연약한 암석의 실험에 무게를 두기 위하여 현지생산 비율에서 신선암의 채취수를 가급적 줄였으며 절리 등 불연속면이 표출되는 block을 우선 채취하였다. 또한 동일 block에서 생산된 시료로 일축 압축시험, 압열 인장시험, 점하중시험을 시행하기 위하여 280~310mm 길이의 NX 기준 core가 최소한 30개 이상이 확보되기 위하여 400×500×300mm(약 160kg/개)급의 block이 필요하였다. 시료 채취지점 및 시료의 특성을 표 1에 요약하였다.

3.2 시료성형

25개 지점에서 채취한 324 block에서 일축 압축강도, 압열 인장강도, 점하중 강도용 시료 특성의 상관성 유지를 위하여 길이 280~310mm의 동일 core에서 각 시험용 시료를 절단 생산하여 시험에 임하였다. 채취된 block은 H-beam (350×350×12×2000)을 300mm 간격으로 평행하게 용접한 편평한 면에 click 밴드로 양단부를 고정시켜 층리 혹은 불연속면에 수직되는 방향으로 NX-size

표 1. 시료 채취지점 및 특성

No.	Group No.	block 개수.	채취지점	비고
1	US/UD	19 (1~19)	울산~범서간 국도24호선 확,포장(반송리 대절개구간)	자색 shale(교호층상), shale우세
2	US/UD	12 (20~31)	울산~범서간 국도24호선 확,포장(연양 육교 터파기)	자색사암(층상구조), 사암 절대 우세
3	US/UD	14 (40~49C)	천상 정수장 시설공사(범서면 천상리) ; mudstone	녹,회색 mudstone, shale(층상구조), shale 절대 우세
4	US/UD	8 (71~79)	협성 Apt.신축공사(북구 호계리)	shale, 사암(교호층상),
5	US/UD	10 (80~89)	대곡댐 이설도로(두동면 나전리),	자색shale(층상구조) shale 절대 우세
6	US/UD	8 (90~97)	인보~도계간 국도37호선 확,포장 (두동면 봉계리) 중방향-회색선이 뚜렷(0.5mm)	자색shale(층상구조) shale이 절대 우세
7	US/UD	6 (100~111)	울산~부산간 고속도로 7공구 (용촌면 동천리)	연자색,회색shale, 사암(교호층상),회색우세
8	A	13	경북 의성군 신평면 교안리 917번 도로 확장	자색shale, 사암(교호층상)
9	W	9	경북 의성군 의성읍 비봉리-의성 우회도로 개설	흑회 자색 shale, 사암(층상) shale우세
10	Y	12	경북 영천시 화산면 대가리 (대구-포항 고속4공구) 영천시 도남동 (도남 농공단지)	회자색 shale, 사암(교호층상), shale 우세
11	JWS/JWD	13	경남 진주시 내동면 내평리 (국도2호선 확포장)	자색 shale 사암(교호층상), shale 우세
12	JS/JD	21	경남 진주시 이반성면 대천리 (국도2호선 확포장)	자색 shale 사암(교호층상), shale 우세
13	KRS/KRD	8	경북 고령군 성산면 어곡리 (구마 고속 확장)	자색 shale 사암(교호층상), shale 우세
14	TS/TD	22	대구광역시 달성군 다사읍 매곡리 (지하철2호선-주차장 건설공사) :적갈색 우세	자색 shale, 사암(교호층상), shale 절대 우세
15	CS	11	경남 창원군 창녕읍 말흘리 (창녕 우회도로 개설)	흑,자색 shale, 사암(교호층상), shale절대 우세
16	YG	14	경북 영양군 창수면 창수리 (묘곡 저수지 축조)	자색 shale, 사암(교호층상)
17	YC	11	경북 영양군 청기면 당리 (자연 하상)	자색 역암
18	CJ	16	경북 안동시 임동면 갈전리 (임하댐 건설 사토장)	회, 자색 shale, 회색사암(층상)
19	B	9	경북 안동시 일직면 운산리 (낙동강 지류 하상) -국도5호선 확장공사 대절개구간 사토장	자색사암, shale(교호층상)
20	D	14	경북 의성군 춘산면 신흥리 고갯마루 (68번 지방도 확장 절개지 사토장)	흑색 shale, 회색사암(층상),사암우세
21	E	9	경북 경주시 내남면 이조리 국도35호선 절개지	갈색 shale, 사암(층상)
22	L	12	경북 청송군 현동면 도평리 (삼자형 휴게소 고개)	흑갈색 shale 우세 (층상)
23	M	10	경북 영양군 영양읍 전곡리 하천(직립 자연 범면유실 암석)	흑,자색 shale, 흑,회색사암(교호층상)
24	Z	18	경북 구미시 장천면 상림리 (공장부지 조성)	연자색 shale, 진회색 사암(층상)
25	N	25	경남 합천군 대양면 양산리 (국도33호선 확장)	회색,연자색 shale, 회색사암(교호층상), shale 절대 우세
	25개소	324 blocks		

로 coring하였다. 일축 압축강도(UCS)용 시료는 직경이 54mm, 길이 110mm 기준으로 가공하였고, Brazilian test (BRZ)시료와 point load strength test(PLS)시료는 UCS 시료로 가공한 동일한 core에서 가공하였으며 BRZ시료는 직경 대 길이의 비가 1.0에 가깝도록 성형하였으며 UCS시료와 BRZ시료는 각각 3개를 1조로 구성하였다. PLS(//)용은 L/D = 1.0 이상, (⊥)용은 L/D = 0.5~0.7 이상이 되도록 준비하였다. UCS와 BRZ시험중 이상 시험

값의 출현을 대비하여 각 조마다 3개 이상 씩의 여분을 준비하였다.

coring작업을 시작하기 전에 block을 H-beam 좌대에 올려 양단을 click band로 고정시킨 후 표면을 grinder로 정리를 하고 block의 bedding plane 및 불연속면과 좌대면이 평행되도록 안치된 상태에서 Schmidt hammer 타격시험을 하였다.

마모율시험(Los Angeles abrasion loss : L. A. loss)을

위하여 ASTM(C 131-89)규정에 따른 입도조성에 맞도록 block에서 coring을 한 후 남은 벌집을 분쇄하여 시료를 확보하였다.

이렇게 준비된 시료는 사암(sandstone), 셰일(shale), 이암(mudstone) 및 역암(conglomerate)으로 분류하였으며, 육안으로 분류가 어려운 시료는 XRF시험을 한 후 SiO₂ 함량 68% 이상을 사암, 그 이하를 셰일 및 이암으로 규정하는 Petijohn 등(1972)의 분류법을 적용하였다. 채취한 시료에서 sand stone, arkose, wacke, grey wacke를 포함하는 사질암(arenaceous stone)을 사암으로, mud stone, silt stone, clay stone이 포함된 argillaceous stone을 셰일로, 층리, 엽층리 등의 흔적이 없는 argillaceous stone을 이암으로, 5mm 이상의 모래알로 구성된 암을 역암으로

분류했다. 표 2는 각종 암의 물리적 성질을 요약한 것이며 표 3은 본 연구지역의 지질학적 생성배경이 동일한 각 지층별, 암종별로 화학 조성의 평균값을 정리한 것이다.

3.3 시험기준 및 방법

L A 마모율시험은 석산 쇄석골재의 강도를 추정하기 위하여 시료를 소정의 규격으로 준비하여 철재 Drum에 강철구와 함께 시료를 넣은 후 일정한 수의 회전 후에 투입된 골재가 1.7mm이하로 마모된 양을 측정하여 마모율을 산정하여 원석이 쇄석골재의 적합도를 판단하는 시험이다.

이 시험법에는 세골재(모래)를 대상으로하는 시험과

표 2. 암석의 물리적 성질

	일축압축강도	단위중량	비중	간극	흡수율
셰일	95.76	2.663	2.758	3.541	2.59
사암	111.3	2.647	2.730	3.023	2.41
이암	52.6	2.638	2.797	6.062	4.26
역암	50.6	2.592	2.717	4.985	4.29
퇴적암	93.5	2.649	2.751	3.778	3.09

표 3. 지층별, 암종별 XRF값

암석	지층	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Total
셰일	신동층군	63.02	12.64	4.04	1.35	1.44	5.56	2.82	2.67	0.57	0.18	0.07	94.37
	밀양지괴	62.79	14.59	3.28	2.03	2.40	3.72	3.22	2.23	0.64	0.16	0.07	95.14
	의성분지	57.00	15.41	5.61	1.94	2.23	5.00	3.50	3.47	0.64	0.19	0.07	95.06
	울산분지	56.45	14.97	4.76	1.21	2.16	6.02	4.06	3.33	0.59	0.20	0.09	93.83
	영양분지	62.83	14.35	2.27	1.30	2.35	4.47	3.84	1.86	0.60	0.17	0.06	94.10
	평 균	60.42	14.39	3.99	1.57	2.12	4.95	3.49	2.71	0.61	0.18	0.07	94.50
사암	신동층군	76.53	10.90	1.51	1.09	0.60	1.47	3.77	1.77	0.21	0.09	0.05	97.99
	밀양지괴	73.95	11.85	2.10	1.03	0.93	2.35	3.40	1.68	0.28	0.10	0.05	97.70
	의성분지	70.88	12.24	2.13	0.72	0.47	4.45	4.26	1.79	0.38	0.13	0.08	97.53
	울산분지	72.88	11.13	1.73	0.58	0.52	4.21	3.11	2.31	0.27	0.12	0.05	96.90
	영양분지	75.23	12.47	1.25	1.05	0.54	2.09	4.19	1.82	0.22	0.09	0.06	99.01
	평 균	73.89	11.72	1.74	0.89	0.61	2.91	3.75	1.87	0.27	0.11	0.06	97.83
이암	신동층군	51.63	13.32	4.25	1.38	3.53	8.80	2.94	3.32	0.53	0.19	0.17	90.07
	밀양지괴	51.14	12.90	3.13	2.16	3.03	10.00	1.96	3.37	0.53	0.20	0.10	88.52
	의성분지	46.25	13.12	4.68	1.15	3.80	11.26	2.79	3.36	0.51	0.20	0.14	87.24
	울산분지	50.40	13.40	3.88	1.74	3.72	9.19	2.47	3.69	0.53	0.21	0.11	89.34
	영양분지	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	평 균	49.86	13.19	3.99	1.61	3.52	9.81	2.54	3.44	0.53	0.20	0.13	88.79
역암	신동층군	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	밀양지괴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	의성분지	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	울산분지	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	영양분지	69.52	12.95	2.60	0.79	1.53	3.24	3.73	1.95	0.42	0.12	0.06	96.93
	평 균	69.52	12.95	2.60	0.79	1.53	3.24	3.73	1.95	0.42	0.12	0.06	96.93

표 4. ASTM 시험규정 (L. A. Abrasion loss)

Sieve Size (Square Openings)		Weight of Indicated Sizes, g			
Passing	Retained On	Grading			
		A	B	C	D
37.5mm(1.1/2 in.)	25.0mm(1 in.)	1250 ± 25	...	...	...
25.0mm(1 in.)	19.0mm(3/4 in.)	1250 ± 25	...	...	...
19.0mm(3/4 in.)	12.5mm(1/2 in.)	1250 ± 10	2500 ± 10	...	...
12.5mm(1/2 in.)	9.5mm(3/8 in.)	1250 ± 10	2500 ± 10	...	...
9.5mm(3/8 in.)	6.3mm(1/4 in.)	...	...	2500 ± 10	...
6.3mm(1/4 in.)	4.75mm(No.4)	...	...	2500 ± 10	...
4.75mm(No.4)	2.36mm(No.8)	...	...	...	5000 ± 10
Total		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

표 5. 중량에 따른 철구의 수

Grading	Number of Spheres	Weight of Charge, g
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

조골재를 대상으로 하는 시험이 있으며 조골재 시험에는 시료 규격이 19mm이상 75mm 이하를 대상으로 하는 시험법(ASTM C 535-89)과 37.5mm이하를 대상으로 하는 시험법(ASTM C 131-89)이 있다. 여기에 따라서 투입하는 강철구의 개수와 중량이 달라지며 투입시료 전체 무게에 따라 회전수가 달라진다. KS F 2508(1997)은 위의 두 가지 방법을 통합해서 제정되어 있다. 그러나 규정내용은 ASTM과 같으며, ISRM (1978b)에서도 ASTM과 같은 내용으로 규정되어 있다. ASTM의 규정을 표 4로 요약하였다.

본 연구에서는 채집된 block 시료를 coring한 후 남은 별집을 분쇄하여 각 체 규격에 맞게 확보하여 시험을 했기 때문에 최대치 75mm규격 확보가 어려워 최대규격 37.5mm로 시행하였기에 시험법 ASTM C 131-89의 A grade에 준하였으며 105°C, 24시간 건조된 시료와 12개의 철구를 시험기에 넣고 30~33rpm 속도로 500회 회전 후 인출하여 #12번체(1.7mm)로 쳐서 통과한 양을 투입 시료와의 백분율로 산출한 값이 loss양이다. 표 5는 시료중량에 따른 강철구의 규정을 적시한 것이다.

또한 일축 압축강도(ASTM D 2938-95, ISRM-1981), 압열 인장강도(ASTM D 3969-95a), 점하중강도(ASTM D 5731-95, ISRM-1985), Schmidt hammer 타격시험(ASTM D 5873-00, ISRM 1981b)들은 각기 해당 기준에 따라 시행되었다.

4. 일축 압축강도와의 관계

4.1 세일

128개의 자료로 마모율(\mathcal{L})과 일축 압축강도(σ_c)와의 상관성을 분석한 결과 상관지수 $R^2=0.884$ (상관계수 $R=0.940$)로 상호간 밀접한 관계가 있음을 나타내고 있다. 상관곡선은 급격한 변화없이 점진적 감소 형태의 그림으로 표현되고 있으며 이의 분석 결과를 식 1과 그림 2(a)으로 표현하였다. 마모율은 20~60% 사이에 집중 분포되어 있고 고강도에서 약간의 분산이 있으나, 전체적으로는 분산이 적게 나타났다.

$$\sigma_c = 264.66 * \exp(-\mathcal{L}/32.01) + 16.84 \quad (1)$$

4.2 사암

132개의 사암시험에서 상관지수 $R^2=0.877$ (상관계수 $R=0.936$)로 높은 상관성을 나타내고 있으며, 자료의 분산은 세일보다 다소 크게 나타났다. 마모율 20~40% 구간에 분포가 집중되어 있음을 알 수 있다. 세일보다 더 완만한 감소 곡선 형태이며, 이는 넓은 범위의 마모율이 유효하다는 의미이다. 이들 결과를 식 2와 그림 2(b)로 정리하였다.

$$\sigma_c = 286.24 * \exp(-\mathcal{L}/30.81) + 11.30 \quad (2)$$

4.3 이암

이암은 모집단이 49개로 작기 때문에 점진적 감소형의 곡선형이며, 상관지수는 0.870으로, 이 역시 높은 상관성을 나타내고 있으며, 분산도 큰 편은 아니다. 마모

을 35~70% 사이에 주로 분포되어 있으며 이는 다른 암 종류에 비해 상대적으로 강도가 낮기 때문으로 생각된다. 식 3과 그림 2(c)는 이암의 결과를 표현하고 있다.

$$\sigma_c = 217.15 \cdot \exp(-\mathcal{L}/63.60) - 32.76 \quad (3)$$

4.4 역암

마모율 50% 부근까지 급격한 감소형태를 나타내고 있다. 식 4와 그림 2(d)는 역암의 분석 결과이며 상관성이 $R^2=0.814$ 로 타 암종에 비해 낮으며, 그림 2(d)에서 마모율 60%~90% 범위의 시료만이 존재하여 타 암석과의 공통부분이 현저히 적고 본 연구에 사용된 모집단의 개수 또한 소량인 점을 감안하면 신뢰성이 매우 낮을 것으로 사료된다. 또한 분산도 매우 크게 나타나고 있다.

$$\sigma_c = 9294.45 \cdot \exp(-\mathcal{L}/8.45) + 38.44 \quad (4)$$

4.5 퇴적암

역암, 이암, 사암 및 셰일을 하나의 모집단으로 하여 마모율과 상관성을 분석하였다. 324개 자료로 분석된 결과는 식 5와 그림 3으로 정리하였다. 상관지수 $R^2=0.901$ (상관계수 $R=0.949$)로 마모율과 일축압축강도 사이에

는 높은 상관성이 있음이 확인되었다. 마모율-강도의 상관성을 암종별 상호 비교하여 나타낸 그림 4는 지수곡선 형태로 급격한 변곡점은 보이지 않고 점진적 감소곡선 형태를 나타내고 있으며, 자료의 분산도 매우 작다. 이는 마모율의 넓은 범위에서 일축 압축강도를 추정할 수 있음을 의미하기 때문에 마모율을 매개로 하여 일축 압축강도를 간접적으로 추정하기에 적절한 방법이 될 수 있음을 의미한다. 또한 상관지수도 높고 분산도 작기 때문에 추정값의 신뢰도 역시 높을 것으로 기대할 수 있다.

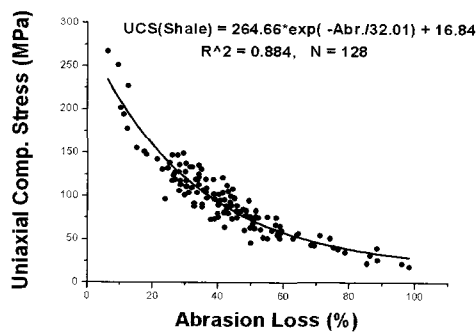
$$\sigma_c = 279.09 \exp(-\mathcal{L}/32.11) + 10.38 \quad (5)$$

4.6 유효구간

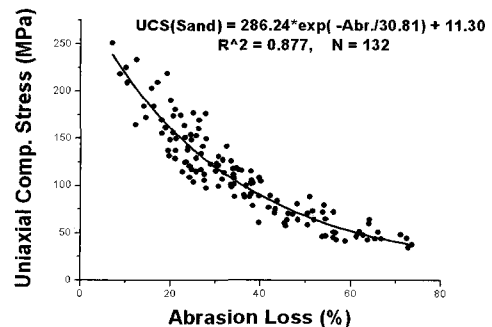
L. A. 마모율 성과로 일축 압축강도를 추정하기 위한 경험식 (1) ~ (5)를 산출하였으나 각 각의 암종에 따라

표 6. 적용 강도의 유효범위

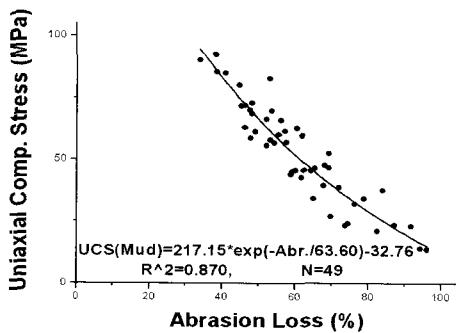
암석	일축 압축강도(MPa)
셰일	30 ~ 230
사암	40 ~ 240
이암	10 ~ 90
역암	40 ~ 90
퇴적암	10 ~ 240



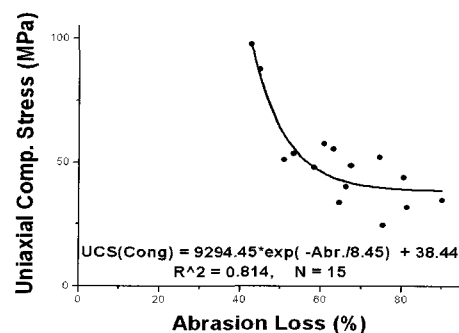
(a) 셰일



(b) 사암



(c) 이암



(d) 역암

그림 2. 일축 압축강도와의 상관성

적용 가능한 범위는 그림 2와 그림 3처럼 모두 상이하게 나타나므로 이를 실무에 적용하여 참값에 가까운 추정값을 정하기 위하여 각 압종별 유효범위를 표 6에 요약하였다. 이 표에서 역암은 유효범위가 아주 좁고 세일과 사암의 경우는 범위가 가장 넓게 나타나고 있으며 현장에서 암종 판별이 애매할 때는 퇴적암 전체를 포함하는 대표식(식 5)을 활용해도 좋을 것이다.

4.7 마모율의 통계자료

변동계수(CoV)와 표준편차(S.D.)를 검토해보면 이 실험의 성과로 공학자료 해석에 적용될 본 자료는 적절한 결과임을 보이고 있다. 역암, 이암, 세일 및 사암을 각각 상관분석을 하여 얻은 상관지수도 매우 높을 뿐만 아니라 전체를 모집단으로 분석한 상관지수 역시 높게 나타나고 있다는 것은 공학지수를 간접적으로 추정하기 위하여 이용함에 합리적이라는 것을 의미한다.

경상분지 퇴적암의 평균 마모율은 44.01%로 마모율이 변성암, 화성암에 비하여 높게 나타나고 있다. 사암의 마모율이 가장 작은 값으로 36.12%이며, 역암이 가장 크고 다음이 이암이다.

최소 마모율은 역암과 이암이 각각 42.8%, 33.8%로 사암, 세일에 비하여 월등히 높다. 각 압종별 상관식과 통계적 결과를 정리한 것이 표 7이다.

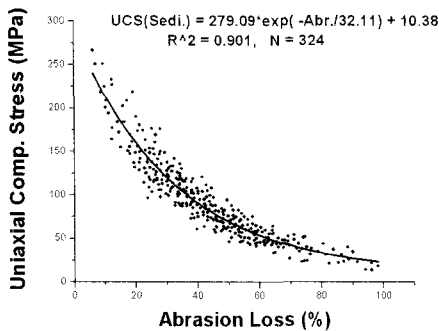


그림 3. 일축압축강도와 의 상관성 (퇴적암)

4.8 대표식의 선정

역암, 이암, 세일, 사암을 각각 상관성을 분석한 것과 퇴적암 전체를 분석한 것을 그림 4에 비교하였다. 낮은 강도 즉 높은 마모율에서는 편기되는 현상을 보이거나 전체적으로 퇴적암 곡선에 근접함을 보이고 있다. 이는 마모율로 일축 압축강도를 추정함에 있어서 개별 암 종류에 따른 추정식을 사용하지 않고 이들을 통합한 퇴적암 추정식을 사용해도 큰 차이가 없음을 의미한다. 실제로 쓸 때 편리하게 쓰기 위해 대표식의 형태를 간편히 하여 식 6으로 사용할 것을 권한다.

$$\sigma_c = 279 * \exp(-L/32) + 10 \quad (6)$$

4.9 신뢰성의 검증

식 6을 이용하여 일축 압축강도를 추정하여 예측값과 참값과의 차이를 검증하여 그 신뢰도를 판단하여 실무 적용여부를 결정해야 한다. 그리하여 실측값을 종속변수로, 예측값을 독립변수로 정하여 직선 회귀분석을 하면 직선의 기울기 값이 1.00에 근접하면 신뢰성이 제고된다고 판단할 수 있다. 이렇게 하여 얻은 것이 그림 5이다.

그림 5에서 선형 회귀분석 직선의 기울기 a=0.903으로

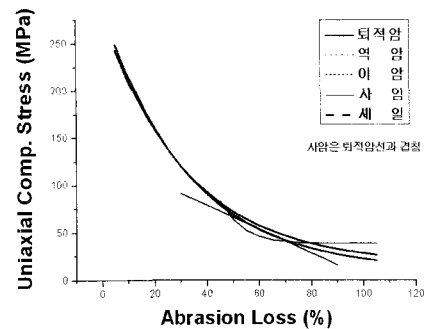


그림 4. 마모율-강도의 상관성

표 7. 마모율-일축 압축강도 자료의 통계

	상관식	상관지수 (R ²)	마 모 율					
			No.	Mean	Max	Min	S.D.	CoV
역 암	$\sigma_c = 9294.45 * \exp(-L/8.45) + 38.44$	0.814	15	64.9	90.0	42.8	13.75	0.21
이 암	$\sigma_c = 217.15 * \exp(-L/63.60) - 32.76$	0.870	49	61.0	96.1	33.8	14.97	0.25
사 암	$\sigma_c = 286.24 * \exp(-L/30.81) + 11.30$	0.887	132	36.1	73.6	7.1	15.94	0.44
세 일	$\sigma_c = 264.66 * \exp(-L/32.01) + 16.84$	0.884	128	43.2	98.3	6.2	18.02	0.42
퇴 적 암	$\sigma_c = 279.09 * \exp(-L/32.11) + 10.38$	0.901	324	44.0	98.3	6.2	19.03	0.43

로 예측값이 실측값에 일치하는 기울기 $a=1.000$ 에 거의 근접함을 보이고 있다. 이는 추정식을 사용하여 일축 압

축강도를 도출함에 참값과의 차이가 약 10% 미만으로 발생할 수 있다는 것을 의미한다.

5. 탄성계수와의 관계

5.1 상관성 해석

마모율을 이용하여 탄성계수를 추정할 수 있는 식 7을 도출하고 회귀분석을 시행하여 그림 6을 나타내었다. 상관지수 $R^2=0.871$ (상관계수 $R=0.933$)으로 높은 상관성을 나타내고 있으며 곡선도 점진적 감소형태를 띠고 있어 신뢰성이 높은 추정값이 도출될 것이다. 또한 마모율 적정 범위도 4~96% 범위에서 고루 분포된 양상을 보이고 있다. 분산도 적당한 수준으로 신뢰성이 높은 상관관계라는 것을 의미한다. 그러나 제안된 식 7을 적용함에 있어 탄성계수값 10 ~ 110 GPa 범위에서 유효함을 보여주고 있다.

$$E = 127.05 \cdot \exp(-L/31.16) + 7.46 \quad (7)$$

5.2 신뢰성 검증

L. A. 마모율값으로 탄성계수를 추정하여 도출된 값이 참값에 얼마나 근접하는지를 검토할 필요가 있다. 그림 7은 검토결과를 나타내고 있으며 기울기는 0.870으로 제시되고 있다. 즉 마모율로 탄성계수를 추정함에 약 13%정도의 오차가 발생할 수 있다는 의미이다.

6. 압열 인장강도와의 상관성

6.1 상관성 해석

Brazilian 시험의 압열 인장강도와 마모율의 상관성을 분석하여 식 8과 그림 8을 도출하였다. 분산이 다소 크게 나타나고 있으나, 상관지수 $R^2=0.834$ (상관계수 $R=0.913$)으로 상호간에는 높은 상관성이 있음을 보여주고 있다. 점진 하향곡선으로 급격한 변곡점은 보이지 않는다. 즉 압열 인장강도는 본 연구의 유효구간인 4.0 ~ 26.0MPa 사이에서 마모율을 이용하여 추정하여도 큰 오차는 없을 것이다.

$$\sigma_t = 29.06 \cdot \exp(-L/29.10) + 2.72 \quad (8)$$

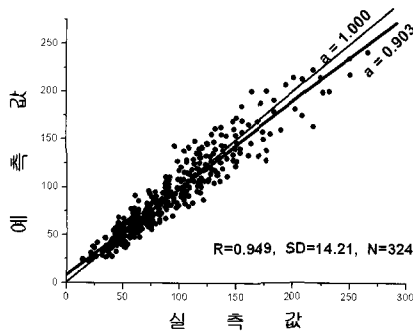


그림 5. 예측값과 실측값의 비교

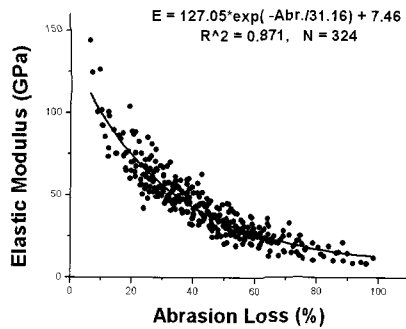


그림 6. 탄성계수와의 상관성

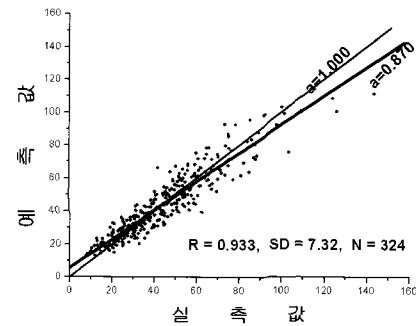


그림 7. 실측값과 예측값의 비교

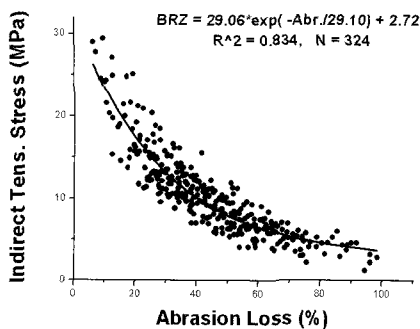


그림 8. 압열 인장강도와의 상관성

6.2 신뢰성 검증

마모율시험 성과를 이용하여 압열 인장강도를 추정하기 위한 식 8을 간편히 정리하여 $\sigma_t = 29 \cdot \exp(-L/29) + 3$ 로 얻은 결과가 실측값에 얼마나 근접하는지 점검을 하기 위하여 그림 9를 나타내었다. 직선의 기울기는 0.832로 나타났으며, 이는 참값과는 약 17% 정도의 차이를 가지고 있다는 것을 의미하므로 신뢰성이 높은 편이 아니며 경향을 파악하는 정도로 활용함이 바람직한 결과이다.

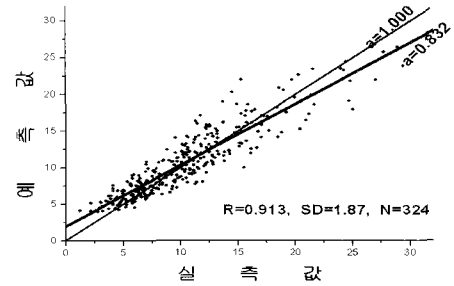


그림 9. 실측값과 예측값의 비교

7. Schmidt hammer 반발지수(Rn)와의 상관성

7.1 상관성 해석

암석의 마모율을 직접시험법으로 산출하기에는 여러 복잡한 과정을 거쳐야 시료 준비가 가능하므로 이를 간단한 실험으로 빠르게 도출할 수 있는 방법인 Schmidt hammer 타격시험도 그러한 방법 중 한 가지이다(민덕기 등, 2006b). 본 연구에서는 경상분지 퇴적암을 대상으로 마모율 시험과 동시에 Schmidt hammer 타격시험을 시행한 바 이들의 상관성을 해석하여 실용성이 확인되었다. 즉 두 변수 간에는 감소형 직선변화를 하는 일차함수 형태의 상관성이 표출되었으며 상관계수 $R=0.914$ 로 높은 상관성이 있음이 증명되었고 또한 표준편차도 5.31로 산출되었다. 분산도 크지 않는 편이며 간접법으로 도출한 결과를 활용하기에는 적절한 유도식이라 할 수 있으므로 식 9와 그림 10을 제시한다. 식 9에서 Schmidt hammer 타격수 20 ~ 80 범위에서는 신뢰성 있는 값을 추정할 수 있을 것이다.

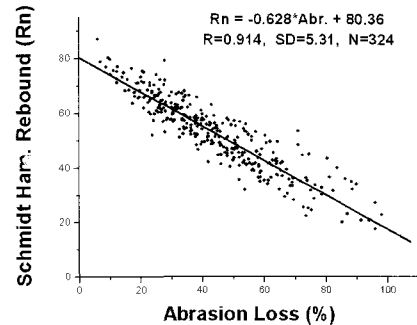


그림 10. Schmidt hammer 반발지수와의 상관성

$$R_n = -0.628 \cdot L + 80.36 \quad (9)$$

7.2 신뢰성 검증

Schmidt hammer 반발값과 L.A. 마모율간의 상관성은 높으나 식 9를 활용함에 신뢰성이 얼마나 되는지 확인할 필요가 있다. 그림 11은 이들 두 관계에 대한 실측값과 예측값이 얼마나 근접하는지를 보여주는 것으로 두개의 값이 근접하기 위해서는 약 16.5% 정도의 오차가 있다는 것을 의미한다. 예측값의 정밀도가 높지 않으나 개략값을 활용하는 데는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

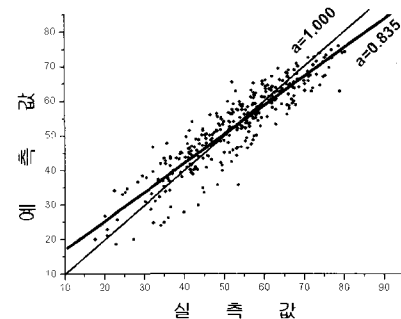


그림 11. 예실대비 (Schmidt hammer - L.A. 마모율)

8. 점하중 강도지수(PLS-⊥)와의 상관성

8.1 상관성 해석

점하중 강도지수와 타 역학지수와의 상관성 분석에서는 점하중 강도지수의 직경방향지수보다 축방향지수 값이 더 높은 상관성을 나타내기 때문에 여기서도 축방향지수(PLS-⊥)로 L. A. 마모율과 대비를 한다(민덕기 등, 2006a).

점하중 강도지수와 마모율간의 상관성 그림에는 분산이 다소 크게 나타났다. 상호간에 높은 상관성을 나타내지는 않으나 보통 이상의 상관성은 되리라 사료된다. 해석결과로 도출된 상관지수 $R^2=0.802$ (상관계수 $R=0.896$)로 감소 지수형 형태를 나타내고 있다. 이들의 관계를 식

10과 그림 12로 나타내었다. 또한 점하중 강도지수 2 ~ 14MPa 범위에서는 신뢰할 수 있는 값을 추정할 수 있을 것이다.

$$I_s(50-\perp) = 15.57 * \exp(-\mathcal{L}/27.53) + 1.79 \quad (10)$$

8.2 신뢰성 검증

그림 13과 같이 적합선과의 오차는 약 20%로 비교적 신뢰도가 낮은 편으로 도출되었다. 즉 L.A. 마모율 시험 성과로 점하중 강도지수를 추정하기에는 상당한 오차를 수반할 수 있다는 의미이며 전체적인 경향을 파악할 목적으로 활용해야 할 것이다.

본 연구의 성과는 모집단이 풍부하기 때문에 상관지

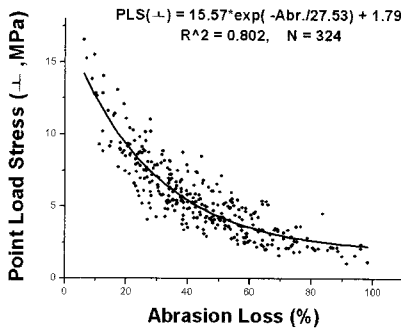


그림 12. 점하중 강도지수와의 상관성

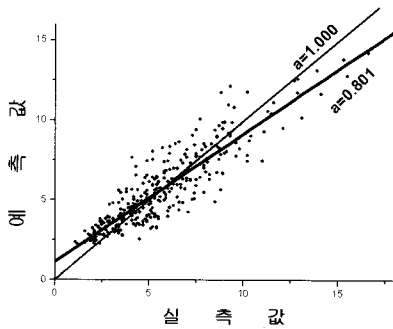


그림 13. 예실대비 (PLS-L.A. 마모율)

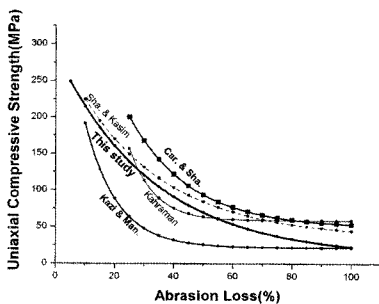


그림 14. 타 연구자 성과와 비교

수도 매우 높고 상대적으로 분산도 작으며 곡선이 완만한 경사로 활용범위가 넓으나 추정값과 실측값의 상관성이 낮아 추정값의 경향을 파악하는 목적으로 사용함이 좋을 것이다.

마모율 시험성과로 탄성계수, 간접 인장강도, 점하중 강도지수, Schmidt hammer 타격수를 직접 비교한 자료를 찾지 못하여 여타 비교는 할 수 없었다.

9. 결과의 검토

9.1 다른 연구 성과와의 비교

최근의 L. A. abrasion loss 시험은 중동의 연구자들이 주도하고 있다. 이들 연구 성과의 공통성은 모집단이 작고 상관성 해석의 결과를 제시하지 않는 점이며 이는 해석할 모집단의 수가 작기 때문이었을 것으로 생각되며 제시한 연구자들의 성과는 상관지수가 낮게 나타나고 있다. 또한 대상 암석도 여러 종류로 혼합되어 있기 때문에 본 연구 성과와 직접 비교하기는 불합리한 점이 있다. 이들의 논문에 제시된 수치로 본 연구에서 상관성 해석을 하였고 이를 요약한 것이 표 8이며 본 연구 성과와 이들 연구 성과를 비교한 것이 그림 14이다.

그림 14에서 다른 연구자들의 성과는 모집단이 작은 연유로 전체적으로 신뢰성은 떨어지기 때문에 상관식 제시가 되지 않은 것으로 추정되며 또한 상관지수 역시 Kazi 등(1980a)을 제외하면 모두 낮게 산정되고 있다. 그러나 전체의 추세를 볼 수 있는 것으로 짐작되어 본 연구 성과와 비교한다.

본 연구는 퇴적암만을 대상으로 하였고, 다른 연구는 여러 종류의 암을 대상으로 하였기에 Cargill과 Shakoor (1990)의 성과와 Kasim과 Shakoor(1996)의 성과와 비슷한 추세로 흐르고 있음을 알 수 있고, Khraman 등(2004)의 성과와 Kazi 등(1980a)의 성과는 마모율 50%이상에서는 실효성이 없는 결과가 도출되었다.

9.2 상관성의 검토

L. A. 마모율 시험성과를 종속변수로 하여 일축 압축 강도, 탄성계수, 압열 인장강도, Schmidt hammer 반발값, 점하중 강도지수 등의 역학지수를 독립변수로하여 각 상호간의 상관성을 분석하여 표 9에 결과를 요약하였다. 표 9의 결과는 L.A.마모율시험 결과값으로 일축

표 8. 다른 연구자 자료 (L.A Abrasin Loss)

연구자	시료수	상관지수(R ²)	상관식	대 상 암
본 연구	324	0.901	$\sigma_c = 279.09 \cdot \exp(-L/32.11) + 10.38$	퇴적암(사암, 세일, 이암, 역암)
S. Kahraman, M. Fener, O. Gunaydin	13	0.699	$\sigma_c = 1854.79 \cdot \exp(-L/8.51) + 58.29$	석회석, 용천 침전석
J. S. Cargill & A. Shakoor	14	0.772	$\sigma_c = 514.39 \cdot \exp(-L/20.39) + 49.22$	사암, 석회석, 대리석, 백운암
A. Shakoor & C. L. Brown	15	0.488	$\sigma_c = 1893.47 \cdot \exp(-L/6.74) + 94.79$	대리석, 석회석, 백운암
A. Kazi & Z. R. Al-Mansour	16	0.911	$\sigma_c = 431.85 \cdot \exp(-L/10.72) + 21.46$	안산암, 감람석, 화강암, 현무암 등
A. Shakoor & M. Kasim	21	0.619	$\sigma_c = 265.19 \cdot \exp(-L/29.33) + 35.73$	사암, 석회석, 대리석, 백운암, 화강암

표 9. 마모율과의 상관성

실험 항목	상 관 식	상관계수(R)	상관지수(R ²)
일축 압축강도(MPa)	$\sigma_c = 279 \cdot \exp(-L/32) + 10$	0.949	0.901
탄성계수(GPa)	$E = 127.05 \cdot \exp(-L/31.16) + 7.46$	0.933	0.871
압열 인장강도(MPa)	$\sigma_t = 29 \cdot \exp(-L/29) + 3$	0.913	0.834
점하중 강도지수(MPa)	$I_{s(50-L)} = 15.57 \cdot \exp(-L/27.53) + 1.79$	0.896	0.802
Schmidt hammer(Rn)	$Rn = -0.628 \cdot L + 80.36$	0.914	

표 10. 적합성

실험 항목	상 관 식	적합지수
일축압축강도(MPa)	$\sigma_c = 279 \cdot \exp(-L/32) + 10$	0.903
탄성계수(GPa)	$E = 127.05 \cdot \exp(-L/31.16) + 7.46$	0.870
압열 인장강도(MPa)	$\sigma_t = 29 \cdot \exp(-L/29) + 3$	0.832
점하중 강도지수(MPa)	$I_{s(50-L)} = 15.57 \cdot \exp(-L/27.53) + 1.79$	0.885
Schmidt hammer(Rn)	$Rn = -0.628 \cdot L + 80.36$	0.801

압축강도, 탄성계수, 압열 인장강도, Schmidt hammer 반발값, 점하중 강도지수 등의 역학지수를 추정하여도 높은 상관성을 유지하므로 실무에 활용함에 무리가 없음을 보여준다.

9.3 신뢰성의 검토

각종지수를 추정된 상관식으로 도출된 값이 실측값과의 적합성(matching factor-근접성)을 검토하였다. 즉 추정값이 실측값과 일치한다면 추정된 모든 값이 기율기 a=1.000인 직선상에 표시될 것이나 오차가 있다면 적합선 밖에 표시될 것이다. 이격된 점들과 적합선과의 거리가 오차라고 할 수 있다. 표 10은 각 상관식의 신뢰도를 검토한 결과를 요약한 것이다. 표 9에서 L.A. 마모율 시험값으로 일축 압축강도, 탄성계수 및 점하중 강도 지수를 추정할 때의 신뢰도는 높은 편이나 압열 인장강도와 Schmidt hammer 반발값의 추정값의 신뢰도는 높지 않다.

그러나 이 두 값의 경향을 판단하는데는 무리가 없을 것으로 사료된다.

10. 결론

본고에서는 경상분지 퇴적암을 대상으로 L. A. 마모율을 매개로 하여 일축 압축강도, 탄성계수, 압열 인장강도, 점하중 강도지수, Schmidt hammer 반발값과의 상관성 분석을 하였다. 이 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) L. A. 마모율 시험성과와 일축 압축강도, 탄성계수, 압열 인장강도, 점하중 강도 지수, Schmidt hammer 반발값 사이에는 좋은 상관성이 있음이 밝혀졌다.
- 2) L. A. 마모율 시험성과를 사용하여 위의 공학지수를 추정할 때는 좋은 신뢰성을 유지하고 있다.

참 고 문 헌

1. 민덕기, 문종규 (2006a), "울산지역 퇴적암의 강도 추정법 연구" 한국지반공학회 논문집, 제22권, 8호, pp.63-75.
2. 민덕기, 문종규 (2006b), "Schmidt hammer 반발지수로 울산지역 퇴적암의 공학적 특성을 추정하기 위한 연구" 한국지반공학회 논문집, 제22권, 10호, pp.139-150.
3. KS F (2508-1997), "로스앤젤레스 시험기에 의한 굵은 골재의 마모 시험 방법."

4. ASTM (C 131-69), "Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine", Annual Book of ASTM Standards 2005.
5. ASTM (C 535-89), "Standard test method for resistance to degradation of large-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine", Annual Book of ASTM Standards 2005.
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 3967-95a), "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens", Annual Book of ASTM Standards 2005.
8. ASTM (D 5731-95), "Standard test method for determination of the point load strength index of rock".
9. ASTM (D 5873-00), "Test method for determination of rock hardness by rebound hammer method", Annual Book of ASTM Standards 2005.
10. Cargill, J. S. and Shakoor, A., (1990), "Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock", Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech., Vol.27, pp.495-503.
11. 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.
12. ISRM (1985), "Suggested method for determining point load strength", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol.22, pp.53-60.
13. 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.
14. ISRM (1978), "Suggested methods for determining indirect tensile strength by the Brazil test". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.15, pp.99-103.
15. ISRM (1978b), "Suggested methods for determining the resistance to abrasion of aggregate by use of the Los Angeles machine", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol.15, pp.89-97.
16. 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.
17. ISRM (1981b), "Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks, Part 3, Commission on standardisation of laboratory and field tests, pp.101-102.
18. Kazi, A., Al-Masour, Z. R., (1980a), "Empirical relationship between Los Angeles abrasion and Schmidt hammer strength tests with application to aggregate around Jeddah", Q. J. Eng. Geol., Vol.13, pp.45-52.
19. Kazi, A., Al-Masour, Z. R., (1980), "Influence of geological factors on abrasion and soundness characteristics of aggregates", Eng. Geol., Vol.15, pp.195-203.
20. Kahraman S., Fener M. and Gunaydin O. (2004), "Prediction the sawability of carbonate rocks using multiple curvilinear regression analysis" Rock Mech. Min. Sci., Vol.41, pp.1123-1131.
21. Kasim M., Shakoor A.(1996), "An investigation of the relationship between uniaxial compressive strength and degradation for selected rock types." Eng. Geol., Vol.44, pp.213-227.
22. Kowalski W.C. (1966), "The independence between the strength and voids ratio of limestone and marls in connection with their water saturating and anisotropy." Proc. 1st. Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, Portugal. pp.143-144.
23. Pettijohn, F. J., Potter, P. E. and Siever, R., "Sand and sandstone" Springer-Verlag, New York, pp.237-238.
24. Rzhetski V. and Novik G. (1971), "The Physics of Rocks", Moscow, Mir Publishers, pp.320.
25. Shakoor, A., Brown, C. L., (1996), "Development of quantitative relationship between unconfined compressive strength and Los Angeles abrasion loss for carbonate rocks", Bull. Int. Ass. Eng. Geol., No.53, pp.97-103.
26. Smorodinov M.I., Motovilov E.A. and Volkov V.A. (1970), "Determination of correlation relationships between strength and some physical characteristics of rocks." Proc. 2nd. Congr. Int. Soc. Rock Mech., Vol.2, Belgrade, pp.35-37.
27. Szlavins J. (1974), "Relationships between some physical properties of rock determined by laboratory tests," Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol.11, pp.57-66.

(접수일자 2007. 6. 5, 심사완료일 2007. 11. 13)