한국지반공학회논문집 제24권 10호 2008년 10월 pp. 131 ~ 146

Brazilian시험을 이용한 일축압축강도, 탄성계수의 추정 (I)

Predicting Uniaxial Compressive Strength and Elastic Modulus Using Brazilian Test

민 덕 기[1] Min, Tuk-Ki
문 종 규[2] Moon, Jong-Kyu
노 재 술[3] Ro, Jai-Sool

Abstract

Many attempts have been made to determine the uniaxial compressive strength and elastic modulus of regular specimens of rock indirectly. But little experimental work has been done to find above two parameters using Brazilian test value up to date. This paper employs Brazilian test value to estimate uniaxial compressive strength and elastic modulus of sedimentary (sand stone, shale) and metamorphic (gneiss) rocks. High reliability of Brazilian test has been supported by the established conclusions drawn from point load test and Schmidt hammer strike values. It has also been found that this method can be applied easily and rapidly to the estimation of uniaxial compressive strength and elastic modulus of rock cores when direct tests are not available.

요 지

일축압축강도와 탄성계수를 신속하고 간편하게 추정하기 위하여 많은 연구자들이 여러 가지 방법을 제시하여 왔으며 그 중 실용성이 높은 경험식들도 있다. 본 연구는 압열인장강도를 매개로 일축압축강도와 탄성계수를 추정할 수 있는 경험식을 퇴적암을 대표하는 사암과 셰일, 변성암을 대표하는 편마암에서 도출하였다. 기존 간편식(점하중강도, Schmidt hammer 타격법)으로 도출된 결과와 비교, 검정을 하여 높은 신뢰성을 확인하였기에 압열인장강도를 매개로 일축압축강도와 탄성계수를 추정할 수 있는 또 하나의 신뢰성 높은 간접방법으로 사료된다. 지질 조사시 얻은 제한된 코어로 인하여 직접시험으로 도출하기 어려운 경우에도 본 연구에서 제시하는 방법이 효율성이 높을 것으로 사료된다.

Keywords : Brazilian test, Correlation, Elastic modulus, Gneiss, Point load test, Schmidt hammer test, Shale, Uniaxial compressive strength

1. 서 론

일축압축시험은 암석의 물리적, 역학적 제반 정수를 파악하기 위한 기초적인 시험이다. 그러나 정도 높은 결과를 얻기 위해서는 시편규격의 정밀도와 시험방법의 정교함이 요구되는 시험이기 때문에 많은 시간과 노력 및 비용이 소요된다. 따라서 일축압축강도와 탄성계수를 쉽고 빠르게 추정하기 위하여, 또는 시료 부족으로 인하여 불가피하게 간접 시험법을 채택하고 있다. 이를 위해서 적용되고 있는 방법에는 탄성파속도시험, 점하중강도시험, Schmidt hammer 타격시험, L. A. 마모율시험 등이 있다.

1 정회원, 울산대학교 공과대학 건설환경공학부 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, (주)수성ENG, 이사, 토목 시공기술사, 박사수료 (Soo Sung Eng. Co. Ltd.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

암석의 여러가지 강도, 즉 일축압축강도, 전단강도, 인장강도 중에서 인장강도가 가장 작으며 압축강도에 비하여 훨씬 작기 때문에 설계시 인장강도는 무시되는 경우가 많다. 따라서 일반적으로 인장강도는 정확한 값이 요구되는 경우는 드물고 암석에 따라 상대적인 값을 구하기 위하여 시험하는 경우가 많다. 이 때문에 어렵고 까다로운 직접 인장시험보다 간편하고 빠른 간접 시험방법으로 결정하는 것이 효율적일 때가 많다. 그 중 한 가지 방법이 압열인장시험이며 이 방법은 세계 각국에서 널리 쓰이고 있다.

현장 시추조사에서 core 회수율이 저조한 RQD<40 정도의 암석에서는 일축압축강도와 탄성계수 시험규정에 적합한 시료 생산이 부족할 경우가 많으며, 이로써 불가피하게 간접시험방법을 적용하여 도출해야 할 경우에는 회수된 core의 상태와 개수에 따라 간접시험방법의 특성을 고려하여 시험방법을 선택할 수 밖에 없을 경우가 실무에서는 매우 많다.

현장 시추에서 core가 충분히 확보되지 못하여 역학적 기본성질 파악이 어려울 경우라도 일축압축강도용 시편 길이 및 소요량의 1/3~1/2의 core로 압열인장강도 시험이 가능하기 때문에 일축압축강도와 탄성계수를 추정할 수 있을 것이다. 압열인장강도시험은 일축압축강도시험에 비해서 시료의 총량, 시료제작, 시험과정이 상대적으로 쉽고 또 자료정리도 간편하므로 이 시험의 성과로 역학적 기본 성질을 추정할 수 있다면 또 하나의 좋은 간접방법이라 할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 한국에 분포된 화성암의 주류인 화강암, 안산암, 유문암을, 퇴적암에서 사암과 세일 및 변성암의 대종인 편마암을 대상으로 압열인장강도의 효용성이 보편화될 수 있을지를 검정하기 위해 연구를 수행하였다. 본고에서는 사암, 세일 및 편마암에 대한 압열인장강도시험의 효용성에 대한 연구결과를 수록하고 후속편에서 화성암중 화강암, 안산암, 유문암에 대한 결과를 포함한 전체에 대한 검정을 종합적으로 기술할 예정이다.

우리나라의 퇴적암은 경상남북도 지방에 집중 분포되어 그 비율이 전체 퇴적암 면적의 87%(민덕기 등, 2007)에 이르며 그 중 가장 분포율이 높은 사암과 셰일을 대상암으로 선정하였다. 변성암은 좁은 벨트인 옥천 변성대와 경상분지를 제외한 전국적으로 고루 분포되어 있고 분포면적이 가장 큰 편마암을 연구 대상으로 선정하였다. 편암, 천매암들도 변성암에 속하나 옥천 변성대에 편마암과 교호 혼재하여 건설공사에서 관심을 가질 면적은 되지 못하므로 본고에서는 제외하였다.

본 연구에서는 각 실험방법의 결과를 상호 비교하기 위하여 동일한 block에서 생산된 시료를 사용하여 압열인장강도와 일축압축강도, 탄성계수와의 상관성을 해석하여 압열인장강도로 일축압축강도, 탄성계수를 추정할 수 있는 경험식을 도출하였다. 또한 점하중강도시험, Schmidt hammer 타격시험을 시행하여 일축압축강도와의 상관관계에서 도출된 일축압축강도값과 상호 비교하여 압열인장강도로 추정된 일축압축강도값의 신뢰성 및 추정의 간편성를 검정하였다.

2. 시료채취

2.1 사암, 셰일

경상남북도 지역에 집중 분포되어 있는 퇴적암은 지질학적으로 중생대 백악기에 형성된 지층으로 이를 경상 누층군 또는 경상분지(Kyungsang basin)라 지칭하고 있다. 이에는 지층형성 특성상 신동층군(Sindong formation), 하양층군(Hayang formation) 및 유천층군(Yuchun formation)으로 분류되며, 이중 신동층군과 하양층군은 수성 쇄설성 퇴적암, 유천층군은 화산암 및 화산 쇄설성 퇴적암으로 분류된다.

여기서 수성 쇄설성 퇴적암과 화산 쇄설성 퇴적암은 공학적 성질이 매우 상이함으로 분포면적이 큰 수성 쇄설성 퇴적암의 대종을 이루는 사암과 세일을 본 연구의 대상으로 하였다.

이러한 지질학적 특성에 따라 본 연구는 하양층군과 남북으로 길고 좁게 발달한 신동층군으로 구성된 수성 쇄설성 퇴적암대의 개략적 분포면적 비례로 25개 지역으로 분할하여 시료를 채취하였다. 이를 요약한 것이 표 1이다.

2.2 편마암

한국의 변성암은 퇴적암에 비해 생성년대가 매우 이른 시생대에 지층이 형성되었으며 경상분지와 옥천 변성대를 제외한 전국에 고루 분포되어 있는 특색이 있다. 이에는 편마암, 편암, 천매암 등이 있으나 편마암의 분포가 월등히 많고 또 분포가 전국적으로 고루 되어있기

표 1. 시료 채취지점(사암, 셰일)

No.	Group No.	block 개수.	채취지점	비고
1	US/UD	19	울산~범서간 국도24호선 확포장(반송리 대절개구간)	자색 shale(교호층상), shale우세
2	US/UD	12	울산~범서간 국도24호선 확포장(언양 육교 터파기)	자색사암(층상구조), 사암 절대 우세
3	US/UD	14	천상 정수장 시설공사(범서면 천상리) ; mudstone	녹,회색 mudstone, shale(층상구조), shale 절대 우세
4	US/UD	8	협성 Apt.신축공사(북구 호계리)	shale, 사암(교호층상)
5	US/UD	10	대곡댐 이설도로(두동면 나전리),	자색 shale(층상구조), shale 절대 우세
6	US/UD	8	인보~도계간 국도37호선 확포장(두동면 봉계리) 종방향-흰색선이 뚜렷(0.5mm)	자색 shale(층상구조), shale이 절대 우세
7	US/UD	6	울산~부산간 고속도로 7공구(웅촌면 동천리)	연자색, 회색shale, 사암(교호층상), 회색우세
8	A	13	경북 의성군 신평면 교안리 917번 도로 확장	자색 shale, 사암(교호층상)
9	W	9	경북 의성군 의성읍 비봉리-의성 우회도로 개설	흑회 자색 shale, 사암(층상) shale우세
10	Y	12	경북 영천군 화산면 대기리(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-조차장 건설공사) :적갈색 우세	자색 shale, 사암(교호층상), shale 절대 우세
15	CS	11	경남 창녕군 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 법면유실 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 block	(사암, 셰일은 259 block, 기타는 이암)	

때문에 본 연구는 변성암에서는 편마암을 대상으로 하였다.

전국의 18개 지점의 편마암 지역내에 도로공사의 대절개구간, 단지조성 등 각종 공사현장에서 발파 굴착된 암에서 출토비율, 풍화도, 암종에 따른 외형상의 암석조직, 색상 등을 고려하여 모집단으로서 채취지점의 특성을 대표할 수 있는 block 시료를 1개 지점에서 12~25개씩 채취하였다. 이들 채취지점의 분포 특성을 정리 요약한 것이 표 2이다.

2.3 시료채취 기준

Schmidt hammer와 rock test hammer로 현지에서 개략적 강도를 검정하였다. 설계나 현장시공에서 언제나 주의를 기울여야 할 연약한 암석에 주안하기 위하여 현지생산 비율에서 신선암의 채취수를 가급적 줄이고 향후 절리면 전단시험을 고려하여 절리등 불연속면이 일부 표출되는 block을 우선 채취하였다. 동일 block에서 생산된 시료로 일축압축시험, 압열인장시험, 점하중시험을 시행하기 위하여 25~30cm의 NX 기준 core로 최소한 30개 이상이 확보되기 위하여 40×50×30cm(약160kg/block)급의 block을 기준하여 채취하였다.

표 2. 시료 채취지점(편마암)

No.	Group Code	Sample 규모	채 취 지 점	비 고
1	K	12	경기.파주군 백석리 (국지도 7호선 대절개구간)	경기 편마암 복합체 풍화진행이 큰 지역
2	HA	15	경북 봉화군 소천면 분천리 (삼양산업 석산)	유백질 편마암 (선Cambria기,화→편)
3	GA	16	경북 울진군 서면 쌍전리 (불영계곡-쌍전1교)	폐석장(흑운모편마암)
4	YK	20	강원 양구 양구읍 웅전리 산 29	편마암(마 조직이 미약)
5	HC	16	서해안 고속도로, 신갈-안산 1공구, 수원 관교 터널	편마암(진 흑색)
6	HQ	16	중앙고속도로 죽령터널, 경북 영풍군 풍기읍 수철동	편마암(선명한 조직)
7	HL	16	중앙고속도로 죽령터널, 충북 단양군 적성면 상리	편마암(선명한 조직)
8	MM	15	경북 상주시 모서면 백학리, 901 지방도 선형개량공사	편마암
9	PM	15	경북 성주군 장천면 법전리 903 지방도 선형개량공사	편마암
10	PB	15	강원도 횡성군 강림면 강림3리 411 지방도 굴곡부 개량공사	편마암
11	PL	13	전남 구례군 토지면 내동리 865 지방도 선형개량공사	화강암질 편마암 (지리산 복합체)
12	MA	14	인천시 서구 시천동 인천 국제공항 고속도로	편마암
13	ML	13	서울 성동구 성수동 뚝섬 쇼핑센타 신축공사 기초굴착	편마암
14	LK	15	경기도 포천군 일동면 기산리 필로스 컨트리 클럽 토공현장.	편마암(굵은 마 조직)
15	LU	14	서해안 고속도로, 당진-서천 5공구 충남 홍성군 은하면	편마암(진 흑색)
16	LM	15	강원도 인제군 기린면 현리(수해복구)	편마암(마 조직이 미약)
17	BH	13	전남 장흥군 안량면 계산리 군도 개량공사	화강암질 편마암
18	RK	12	전남 장성군 황룡면 오룡리 816 지방도 선형개량공사	화강암질 편마암
	18 개소	265 block		

3. 시료가공

18개 지점에서 채취한 265개 block의 편마암과 25개 지점에서 채취한 131 block의 사암, 128 block의 셰일 sample에서 일축압축강도, 압열인장강도, 점하중강도용 시료 특성의 상관성 유지를 위하여 길이 28~31cm의 동일 core에서 각 시험용 시료를 절단 생산하여 시험에 임하였다.

시료는 층리 및 엽리면에 수직되게 coring 하였으며 일축압축강도(uniaxial compressive strength, UCS)용 시료는 직경이 54mm, 길이 110mm 기준으로 가공하였고(ASTM D2938-95, ISRM 1979), 압열인장강도(Brazilian strength, BRZ)용 시료(ASTM D3967-95a, ISRM 1978a)와 점하중강도(point load strength, PLS)용 시료(ASTM D5731-95, ISRM 1985)는 UCS시료로 가공한 동일한 core에서 가공하였다. BRZ시료는 직경 대 길이의 비가 1.0에 가깝도록 성형하였으며, UCS시료와 BRZ시료는 각각 3개를 1조로 구성하였다.

4. 시험

4.1 압열인장강도시험

시료는 NX 규격이므로 압열인장시험시 가압면적이 원주상에서 10mm정도가 되기 위하여 upper, lower jaw의 직경이 95mm가 되도록 stainless steel 재료로 제작하여 시험을 시행하였다(ISRM-1978a, ASTM D 3967-95a).

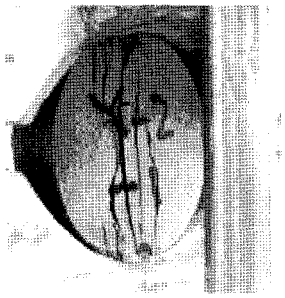
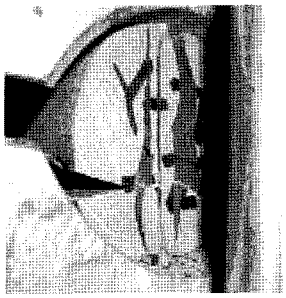
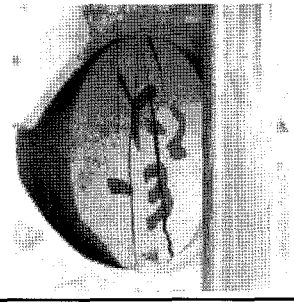
Brazilian Test			
	Y-2		
	Date : 2004. 7. 3		
Sample No.	Y-2-1	Y-2-2	Y-2-3
D(mm)	47.84	47.87	47.82
	47.82	47.86	47.80
	47.83	47.83	47.83
평균	47.83	47.85	47.82
H(mm)	50.11	53.98	51.91
	49.50	53.83	51.98
	49.74	53.87	52.14
평균	49.78	53.89	52.01
P(kg)	8000.00	8100.00	6600.00
σt(kg/cm^2)	213.89	199.95	168.95
파 괴 양 상			

그림 1. 시험자료 및 파괴양상

본 연구에 사용된 모든 시료는 공기건조 상태의 것을 사용하였으며, 시료의 길이는 50mm를 기준하였고 3개/조로 시험을 시행하여 평균값을 해석에 사용하였다. 수동식 100KN 압축기를 사용하여 5~8분정도(0.6~1.0ton/분)에 파괴하중에 도달하도록 서서히 가압하였다. upper jaw와 하중봉 사이에 spherical platen을 삽입하여 축방향 하중전달의 편향을 방지하였다. 그림 1은 시험실 야장을 예시한 것이며 Y-2(사암)의 파괴응력과 파괴양상을 도시한 것이다. 파괴하중과 시료의 치수에 따라 식 (1)로 압열인장강도를 계산하였다.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi D t} \quad (1)$$

여기서, σ_t : 압열 인장강도(100KPa)

P : 파괴하중(10N)

D : 시료의 직경(cm)

t : 시료의 길이(cm)

4.2 일축압축강도시험

NX 기준, 공기건조 상태의 시료를 대상으로 UTM-2MN (MT200S, M & T Korea)을 사용하였으며 spherical platen으로 축하중의 편심을 방지하였다. 공시체를 3개/조로 시험하였는데 분산이 심한 것은 5~7개/조로 추가하여 시험을 실시하였다.

직경방향 및 축방향 변형율과 재하하중 자료를 1초 간격으로 data logger로 읽어 자료를 정리하였으며, 재하-제하 반복은 3~8회씩 실시하였다. 응력-변형율 곡선에서 탄성계수는 마지막 round의 파괴응력 1/2 지점의 접선 탄성계수로 산출하였다.

4.3 점하중강도시험

ASTM(D 5731-95), ISRM(1985)의 점하중 강도지수 (point load index, $Is_{(50)}$) 시험방법은 직경방향으로 가압하여 지수를 구하고, 시료는 직경이 50mm를 기준하며 직경 대 길이가 1.0이상으로 가압하도록 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 직경방향 가압법(PLS//)으로 점하중강도를 산출하였다.

4.4 Schmidt hammer 타격시험

비파괴 시험법인 Schmidt hammer시험은 지수시험법으로 공학적 자료를 얻는 간접 시험법이며 정밀을 요하

는 공학지수 외에는 대부분의 암석물성 추정이 가능할 정도의 신뢰도를 가지는 시험이라 할 수 있다.

본 연구에서는 암석용으로 제작된 N Hammer(타격 Energy 2.207 Nm-Sanyo Testing Machine-GSR, 자동기록)의 시방에 따라 보정을 한 후 시험에 임하였다. 또한 ASTM (D 5873-00), ISRM(1981b)의 권장에 따라 실험이 시행되었으며 평균 40×50cm의 표면에 4cm간격의 격자를 표시한 후 grinder로 평평하게 갈아서 각 격점에 타격을 하였다. H-beam좌대 위에 암석 block을 click band로 고정시킨 후 Schmidt hammer의 타격중 block의 흔들림이 없도록 하였다.

5. 자료의 검정

5.1 물리적 성질

128개조의 셰일과 131개조 사암 및 265개조의 편마암의 물리적 성질을 평균값으로 표현한 것이 표 3이다. 이 표에서는 사암과 셰일의 물리적 성질은 매우 유사함을 보이고 있다. 그러나 편마암의 간극율과 흡수율은 사암과 셰일에 비해 매우 낮게 나타났다. 이는 편마암이 사암 및 셰일에 비해서 조직이 매우 치밀함을 말하며 흡수율에 따른 강도 저감율도 훨씬 낮을 것으로 예상할 수 있다. 취성도는 편마암이 상대적으로 높으며 강도가 큰 암석일수록 취성도는 낮게 표출됨을 알 수 있다.

표 3. 시료의 물리적 성질

	단위중위 (kN/m^3)	비중	간극율 (%)	흡수율 (%)	취성도
셰일	26.6	2.76	3.54	2.59	8.97
사암	26.5	2.73	3.02	2.41	9.09
편마암	26.6	2.71	1.85	1.57	9.68

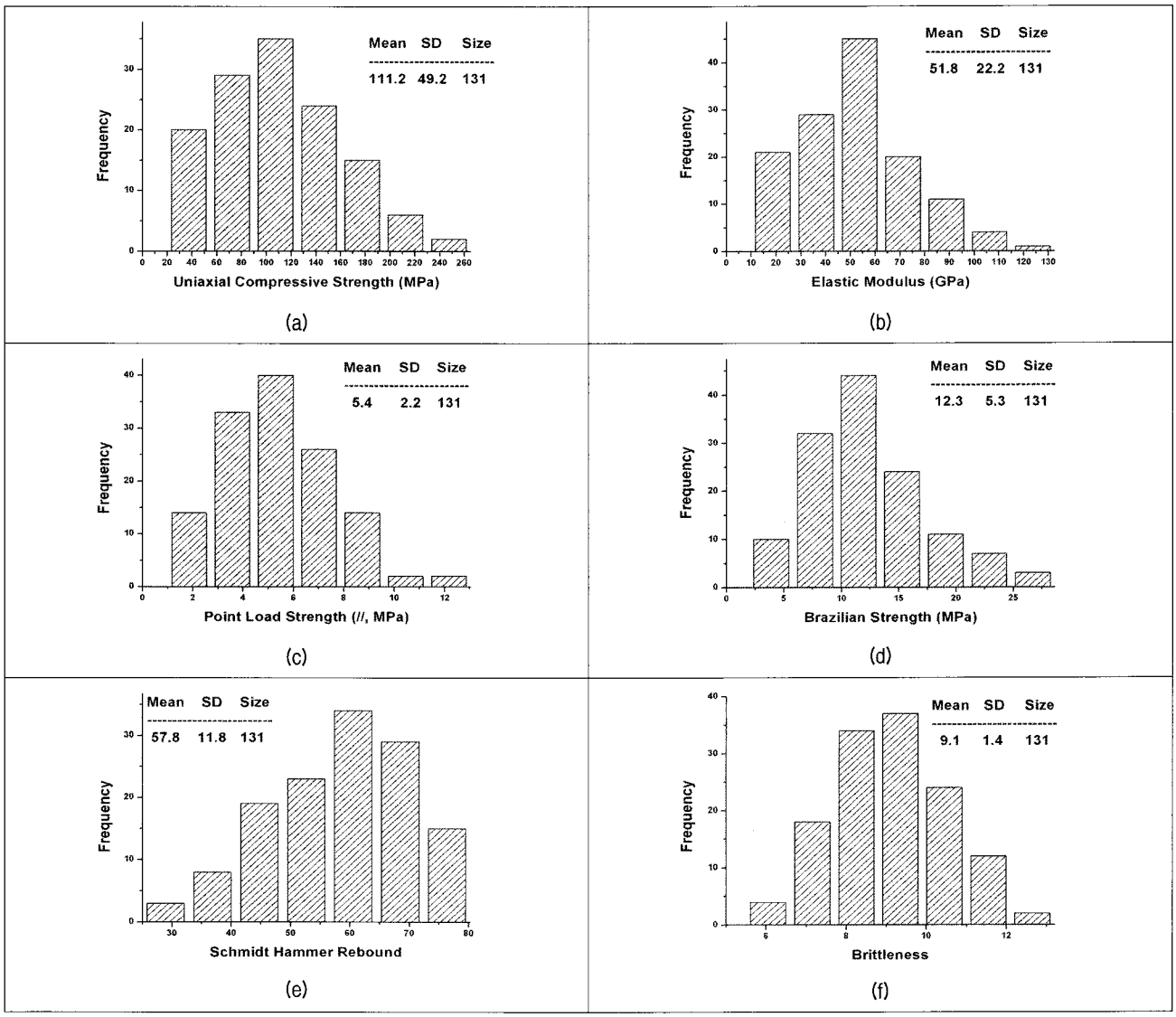


그림 2. 역학자료의 분포(사암)

5.2 시험자료의 분포

사암 131개, 세일 128개, 편마암 265개 block을 시험한 자료들이 본 연구의 해석 대상 값으로의 가치를 지니고 있는지를 검정할 필요가 있다. 즉 대표성과 자료값의 분포가 정규 분포형태를 띠고 있는지를 검정하므로서 해석결과의 신뢰성을 예측하기 위함이다.

그림 2의 사암, 그림 3의 세일에서 일축압축강도, 탄성계수, 압열인장강도의 분포는 약간 편기되어 있으나 정규분표에 준하고 있음을 볼 수 있다. 이는 약한 암에 관심을 두고 연구를 하기 위한 목적임을 반영한 결과로 현장 시료채취는 실험용 시료로 사용함에 적절함을 보이고 있다. 또한 Schmidt hammer 타격값은 값이 큰 쪽으로 편기되어 카이(chi)분포에 가까움을 보이고 있다. 이러한 분포는 Schmidt hammer 시험자료의 특징이 아닐까 짐작이 된다. 전체적으로 볼 때 카이(chi)분포 특성을 보이는 Schmidt hammer 시험자료를 제외한 모든 역학지수의 분포는 정규분포에 가까움을 알 수 있으며 본 연구의 실험결과 값으로 해석에 임하는 데는 결과값의 신뢰에 문제가 없음을 예상할 수 있다.

그림 4의 편마암에서는 일축압축강도와 탄성계수의 분포는 정규분포에 가까우며 압열인장강도, Schmidt hammer 타격값과 취성도 분포에서 값이 큰 쪽으로 약간의 편기된 형태를 보이고 있다. 여기서도 Schmidt hammer 분포가 사암과 세일의 경우와 같이 편기되어 카이(chi)분포 특징을 보이고 있다. 취성도 분포에서 8.90~9.70 사이에 평균값이 위치하고 있으며 세일 > 사암 > 편마암 순으로 나타나고 있으며 일축압축강도 값의 순서와 반대로

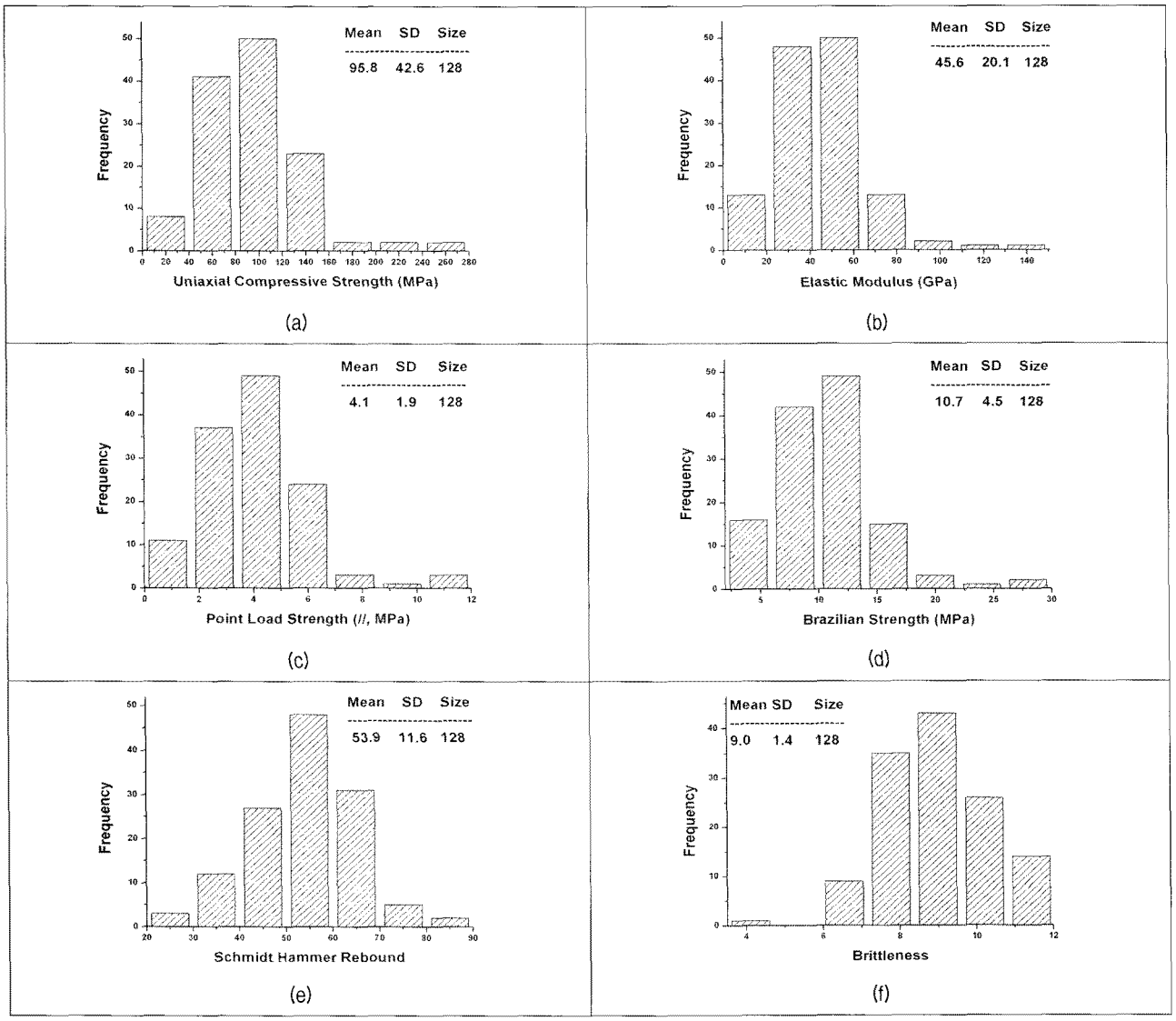


그림 3. 역학자료의 분포(세일)

배열되고 있음을 알 수 있다.

위의 분포 검정을 종합하면 본고를 위한 각종 시험자료는 해석을 위한 적절한 자료로 통계적 의미를 가지고 있으며 채집한 장소의 적절한 배분과 퇴적암의 사암, 셰일 및 변성암의 편마암은 대표값으로의 의미가 있음을 보여주고 있다. 일축압축강도, 탄성계수, 압열인장강도, 점하중강도 및 Schmidt hammer 타격값을 사암, 셰일 및 편마암별로 통계자료를 요약한 것이 표 4, 표 5 및 표 6이며 개별 공학지수의 시험 결과값의 분포를 그림 2, 그림 3 및 그림 4에 각각 요약하였다.

표 4, 표 5 및 표 6의 결과에서 편마암의 공학지수가 사암과 셰일의 공학지수에 비해 분포 범위가 좁게 나타

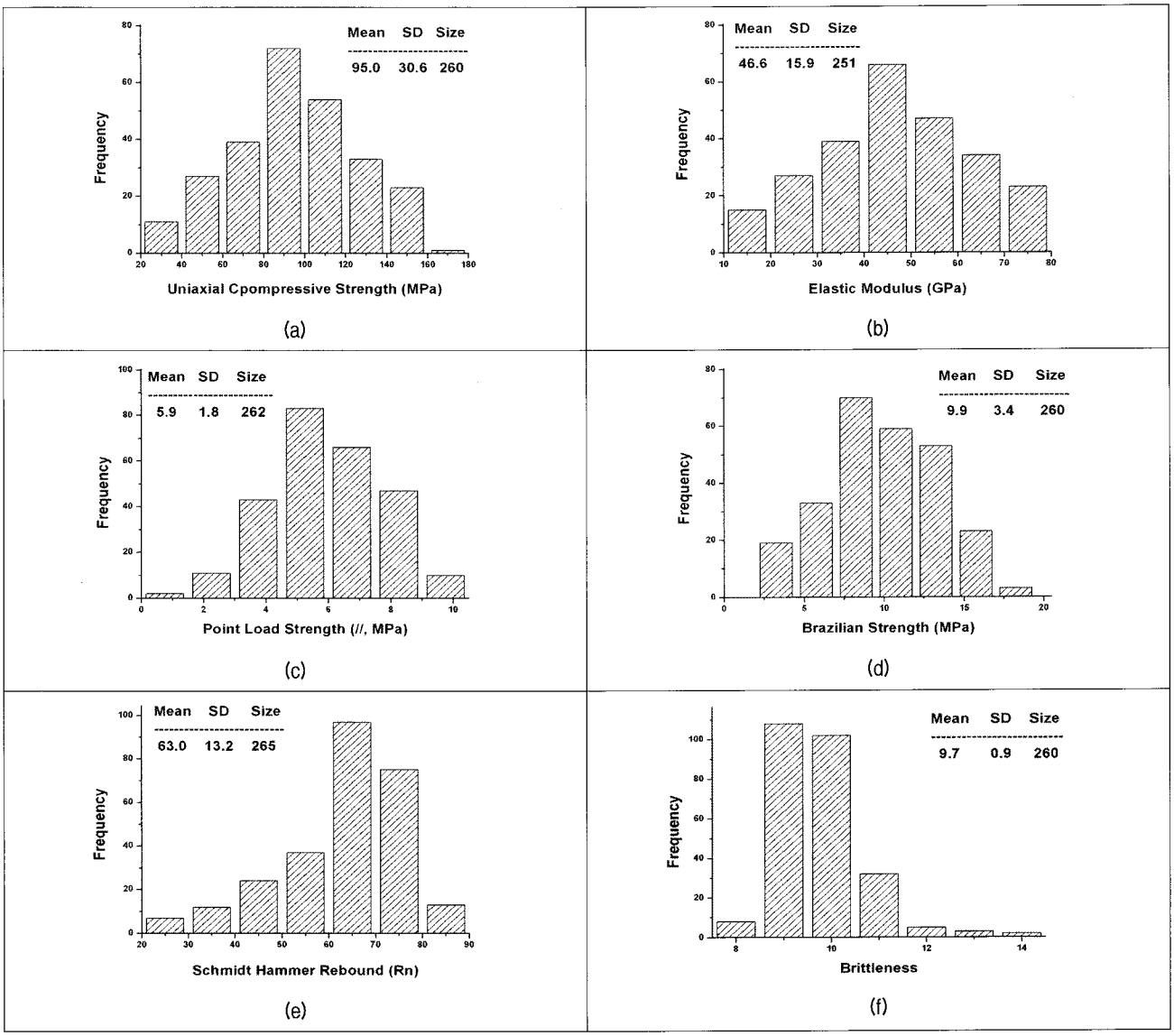


그림 4. 역학자료의 분포(편마암)

표 4. 역학자료의 통계(사암)

	Unit	No. of Sample	Strength		표준편차(SD)	중위값(Median)
			Range	Mean		
UCS	MPa	131	34.8~250.7	111.2	49.2	107.8
PLS	MPa	131	2.1~15.3	6.9	2.7	6.3
BRZ	MPa	131	3.0~27.7	12.3	5.3	11.8
SCH	Rn	131	25.6~79.7	57.8	11.9	58.2
E	GPa	131	18.3~124.4	51.8	22.2	50.4

표 5. 역학자료의 통계(세일)

	Unit	No. of Sample	Strength		표준편차(SD)	중위값(Median)
			Range	Mean		
UCS	MPa	128	18.5~268.5	95.8	42.6	92.0
PLS	MPa	128	1.2~16.6	5.6	2.5	5.3
BRZ	MPa	128	2.8~29.4	10.7	4.5	10.4
SCH	Rn	128	20.1~87.1	53.9	11.6	55.5
E	GPa	128	8.2~143.8	45.6	20.1	43.5

표 6. 역학자료의 통계(편마암)

	Unit	No. of Sample	Strength		표준편차(SD)	중위값(Median)
			Range	Mean		
UCS	MPa	260	24.7~163.0	95.0	30.6	95.5
PLS	MPa	262	0.0~10.4	5.9	1.8	5.8
BRZ	MPa	260	2.5~18.2	9.9	3.4	9.9
SCH	Rn	265	21.3~83.8	63.0	13.2	65.9
E	GPa	251	11.1~78.1	46.6	15.9	47.3

나고 있으며 특히 일축강도분포와 탄성계수분포가 매우 좁게 나타났다. 또한 일축압축강도의 평균값은 사암이 제일 크게 나타났다.

6. 자료의 해석

일축압축강도와 탄성계수를 간단한 방법으로 추정하기 위하여 압열인장강도를 매개로 하였다. 이 값이 타 방법에 비해 효율적인지 비교하기 위하여 간접 추정방법중 가장 보편적으로 사용하는 점하중강도법과, 참값에 가장 근접하게 추정되는 Schmidt hammer 타격법을 동일한 시료를 대상으로 시행한 시험 결과값과 대비하였다.

사암, 세일 및 편마암의 시료를 대상으로 일축압축시험, 압열인장시험, 점하중시험 및 Schmidt hammer 타격시험을 시행하여 각 결과값으로 상호간의 상관성 해석을 시행하였다.

6.1 사암의 일축압축강도와 탄성계수

6.1.1 압열인장강도로 해석

사암에서 압열인장강도를 독립변수로 하고 일축압축강도를 종속변수로 잡아 선형 회귀분석을 시행하여 식 (2)와 그림 5(a)를 도출하였다. 같은 방법으로 탄성계수 추정식을 도출하여 식 (3)과 그림 5(b)에 이를 나타내었다. 이들은 자료의 분산도 작으며 실측한 일축압축강도값, 탄성계수값과 높은 상관성을 보여주고 있다.

$$\sigma_c = 8.88*\sigma_t + 2.00 \quad (2)$$

(R = 0.961, SD = 13.67, CoV = 0.12, N = 131)

$$E = 3.97*\sigma_t + 3.04 \quad (3)$$

(R = 0.951, SD = 6.91, CoV = 0.13, N = 131)

6.1.2 점하중강도로 해석

ISRM(1985), ASTM(D 5731-95)에서 권장한 직경방향 압축으로 얻은 자료를 사용하여 일축압축강도와 탄성계수를 추정할 식을 도출하였다. 이들도 선형 회귀분석에 최적의 상관성을 나타내고 있으나 상관계수가 타 방법에 비해 다소 낮으며 분산이 크다. 일축압축강도와 탄성계수를 추정할 식을 식 (4)와 식 (5)에, 그림 5(c)와 그림 5(d)에 각각 나타내었다.

$$\sigma_c = 19.32*I_{s(50-//)} + 6.08 \quad (4)$$

(R = 0.859, SD = 25.27, CoV = 0.23, N = 131)

$$E = 8.51*I_{s(50-//)} + 5.53 \quad (5)$$

(R = 0.838, SD = 12.17, CoV = 0.23, N = 131)

민덕기 등(2006a)은 울산 퇴적암(사암, 세일, 이암)을 대상으로 일축압축강도 추정을 위한 경험식을 발표한 바 있다. 그 결과와 본 연구결과에는 약간의 차이가 보인다. 이는 본 연구의 결과는 보다 넓은 범위의 암반에 대한 시험 결과로 변환상수값은 작은 모집단의 도출값보다 약간 크게 나타났다.

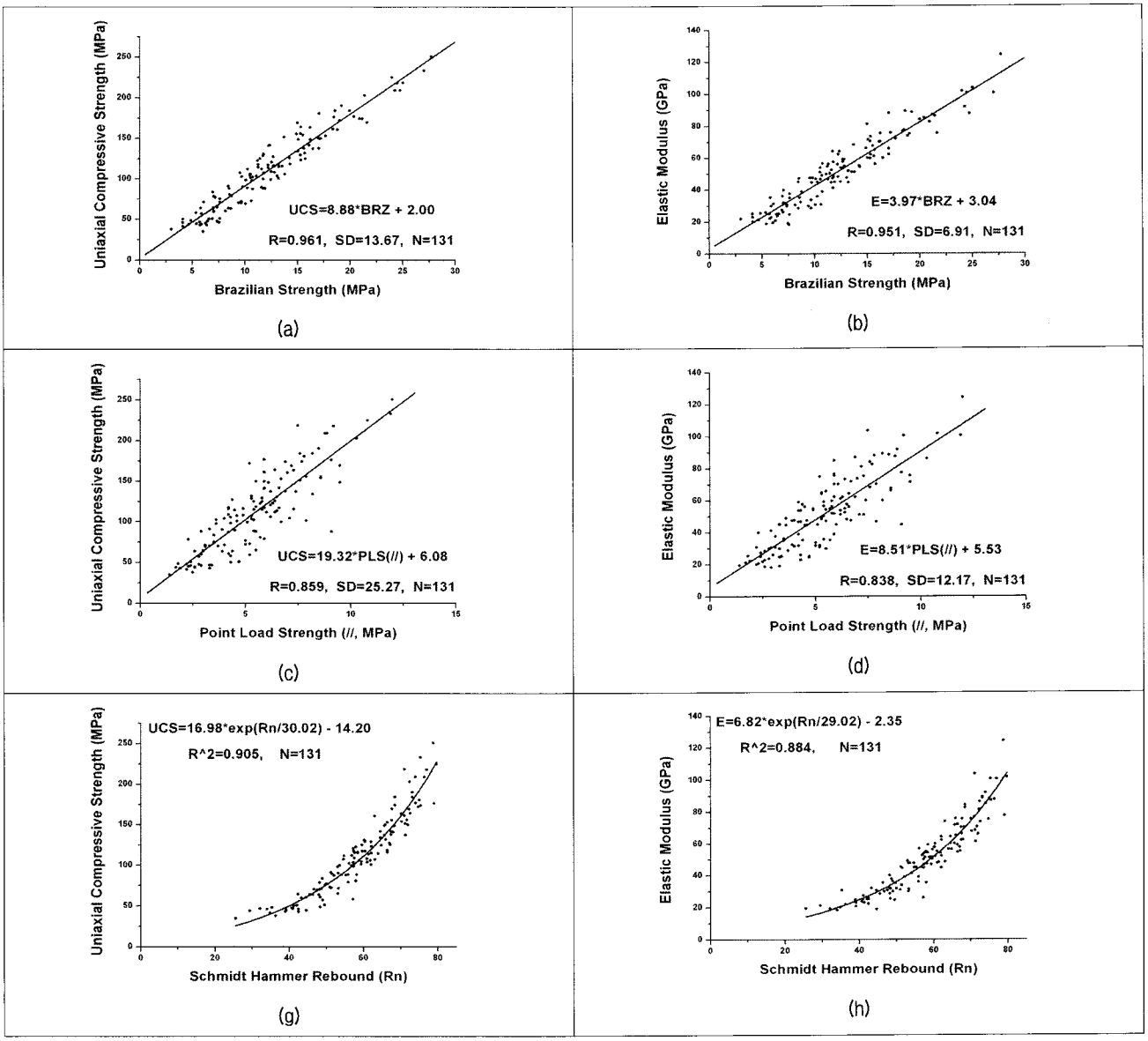


그림 5. 상관성의 해석(사암)

6.1.3 Schmidt Hammer 타격값으로 해석

N-type hammer를 사용하여 ASTM(5873-00)을 참고하며 ISRM(1978)시험법에 준하여 시행한 결과값으로 일축압축강도 식 (6)과 탄성계수 식 (7)을 추정할 수 있는 경험식을 유도하였다. 이들의 상관성 해석에는 Exponential growth 함수에 최적의 상관성을 보여주고 있다. 여기서는 분산도 작고 상관지수도 매우 높게 나타났다. 그림 5(e)와 그림 5(f)에 이들의 함수관계를 표현하였다.

$$\sigma_c = 16.98*\exp(Rn/30.02)-14.20 \quad (6)$$
$$(R^2 = 0.905,\ N = 131)$$

$$E = 6.82*\exp(Rn/29.02) - 2.35 \quad (7)$$
$$(R^2 = 0.884,\ N = 131)$$

Schmidt hammer 타격값으로 일축 압축강도값을 추정할 수 있는 경험식을 민덕기 등(2006b)은 울산지역 퇴적암 시료 77개를 대상으로 시행한 바 있다. 여기서도 본 연구의 자료개수의 차이와 강도 분포범위의 차이에 따른 변환상수 값의 차이가 약간 나타난다.

6.2 셰일의 일축압축강도와 탄성계수

6.2.1 압열인장강도로 해석

압열인장강도를 매개로 하여 일축압축강도와 탄성계수를 추정할 식을 회귀분석으로 도출하였다. 여기서도 직선 회귀분석법에 최상의 상관계수를 표출하였다. 식 (8)과 그림 6(a)에 일축강도를, 식 (9)와 그림 6(b)에 탄성계수 추정식과 그림을 각기 나타내었다.

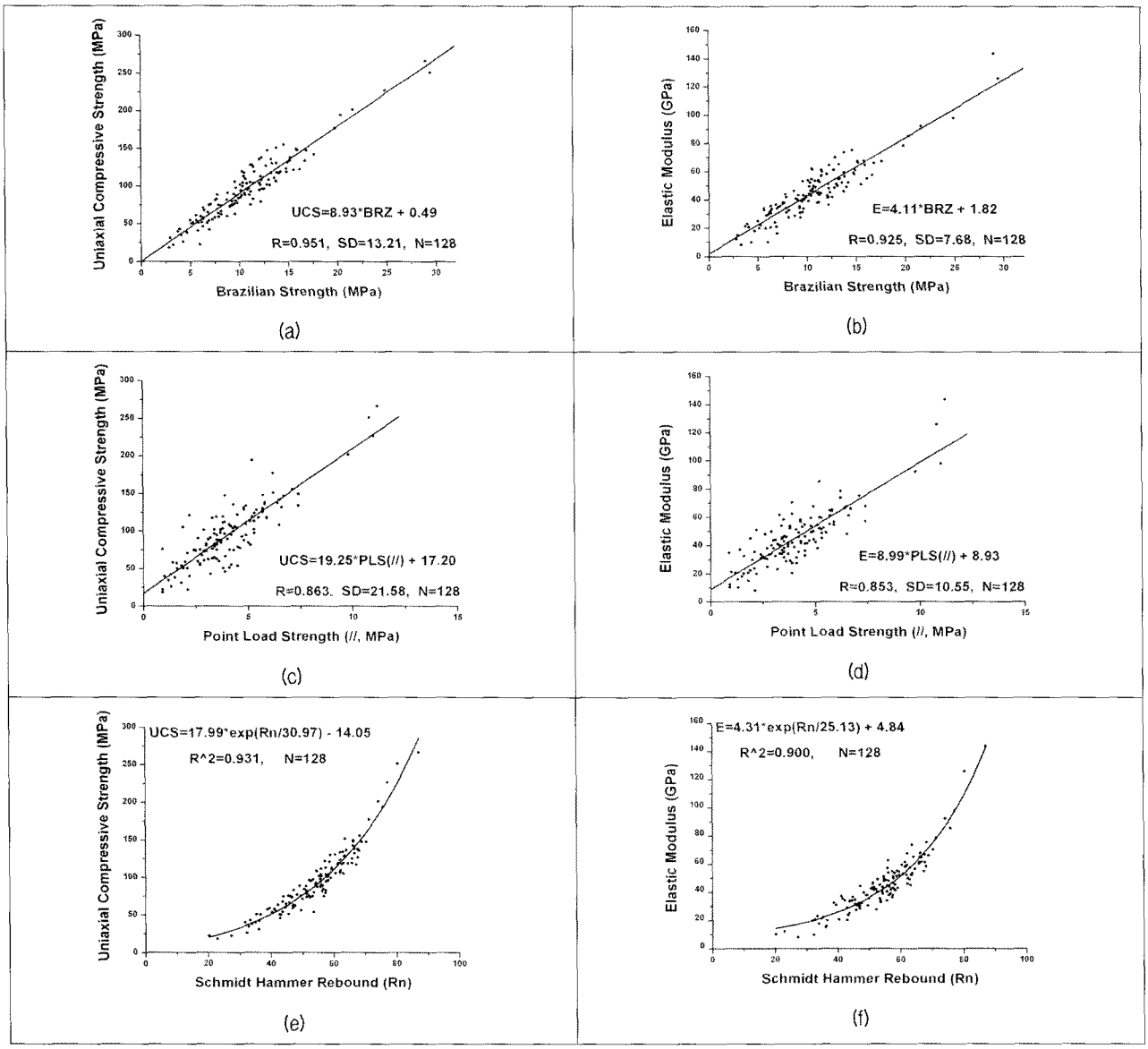


그림 6. 상관성의 해석(세일)

분산도 작고 상관계수도 높게 나타나고 있으며 변동계수값도 아주 낮게 산출되므로 해석결과의 신뢰성이 높음을 알 수 있다.

$$\sigma_c = 8.93*\sigma_t + 0.49 \quad (8)$$

(R = 0.951, SD = 13.21, CoV = 0.14, N = 128)

$$E = 4.11*\sigma_t + 1.82 \quad (9)$$

(R = 0.925, SD = 7.68, CoV = 0.17, N = 128)

6.2.2 점하중강도로 해석

점하중강도는 층리의 직경방향 압축값으로 얻은 자료를 사용하여 일축압축강도와 탄성계수를 추정할 식을 도출하였다. 상관성은 선형 회귀분석법에 최적의 상관계수을 나타내고 있으나 상관계수가 타 방법에 비해 다소 낮으며 분산이 크고 변동계수값이 커서 신뢰성이 상대적으로 약간 떨어진다. 일축압축강도 및 탄성계수 추정식을 식 (10)과 식 (11)에, 그림 6(c)와 그림 6(d)에 각각 표현하였다.

$$\sigma_c = 19.25*I_{s(50-//)} + 17.20 \quad (10)$$

(R = 0.863, SD = 21.58, CoV = 0.23, N = 128)

$$E = 8.99*I_{s(50-//)} + 8.93 \quad (11)$$

(R = 0.853, SD = 10.56, CoV = 0.23, N = 128)

6.2.3 Schmidt Hammer 타격값으로 해석

앞장과 같은 방법으로 일축압축강도 식 (12)와 탄성계수 식 (13)을 추정할 수 있는 경험식을 유도하였다. 상관성 해석에는 Exponential growth 함수에 최적의 상관성을 보여주고 있다. 분산도 작고 상관지수도 매우 높게 나타났다. 그

림 6(e)와 그림 6(f)에 이들의 함수관계를 표현하였다.

$$\sigma_c = 17.99*\exp(Rn/30.97) - 14.05 \quad (12)$$
$$(R^2 = 0.931,\ N = 128)$$

$$E = 4.31*\exp(Rn/25.13) - 4.84 \quad (13)$$
$$(R^2 = 0.900,\ N = 128)$$

6.3 편마암의 일축압축강도와 탄성계수

6.3.1 압열인장강도로 해석

우리나라에 분포하는 변성암중 절대적 분포면적을 차지하는 편마암을 대상으로 시험을 시행하였다. 압열인장강도를 매개로 일축압축강도와 탄성계수를 추정할 경험식을 유도하여 점하중강도법과 Schmidt Hammer 타격법으로 도출한 값과 비교하였다. 압열인장강도와 일축압축강도 사이에 높은 상관성이 있음을 보여주며 탄성계수 추정식 역시 상관계수가 매우 높게 나타났다. 분산과 변동계수도 아주 적음을 알 수 있다. 식 (14)와 식 (15)는 각 각의 경험식을 표현한 것이며 그림 7(a)와 그림 7(b)는 이들의 상관관계를 나타낸 것이다.

$$\sigma_c = 8.75*\sigma_t + 8.43 \quad (14)$$
$$(R = 0.982,\ SD = 5.8,\ CoV = 0.06,\ N = 260)$$

$$E = 4.52*\sigma_t + 1.50 \quad (15)$$
$$(R = 0.968,\ SD = 4.0,\ CoV = 0.09,\ N = 251)$$

6.3.2 점하중강도로 해석

편마암에 대해 실시한 점하중강도와 일축압축강도

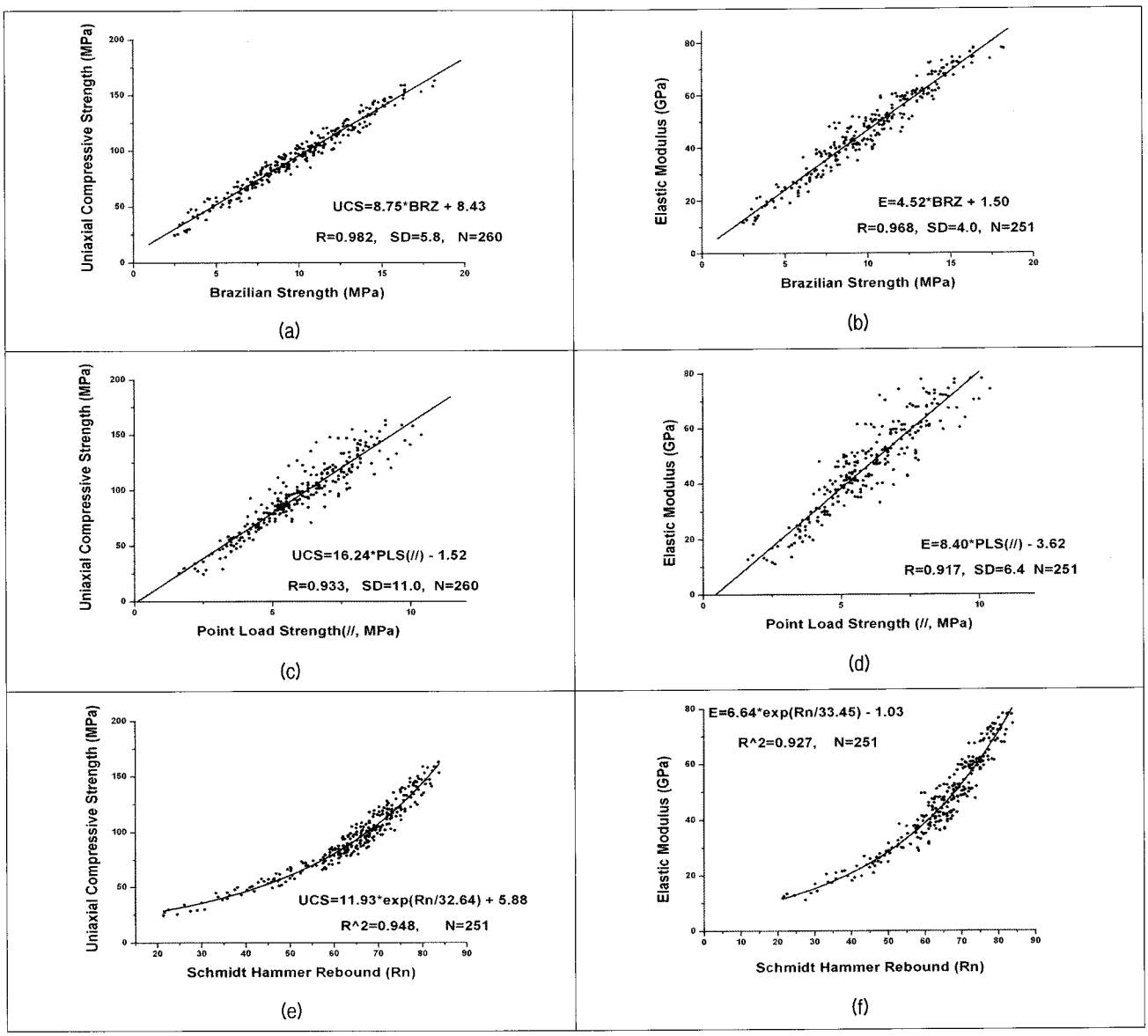


그림 7. 상관성의 해석(편마암)

사이의 관계는 그림 7(c) 및 그림 7(d)에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 80MPa 이상의 값과 탄성계수 32GPa 이상의 값에서는 분산이 매우 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 선형 회귀분석에 최적의 상관성을 보여주고 있으며 상관계수는 비교적 높게 나타났다. 도출된 경험식은 식 (16)과 식 (17)에 나타내었다.

$$\sigma_c = 16.24 * I_{s(50-//)} - 1.52 \quad (16)$$

(R = 0.933, SD = 11.0, CoV = 0.12, N = 260)

$$E = 8.40 * I_{s(50-//)} - 3.62 \quad (17)$$

(R = 0.917, SD = 6.4, CoV = 0.14, N = 251)

6.3.3 Schmidt Hammer 타격값으로 해석

Schmidt hammer 타격값과 일축압축강도 및 탄성계수 사이의 상관관계는 Exponential growth 함수에서 최적의 상관성을 보여주고 있다. 곡선 형태도 부드러운 점진 증가형으로 타격값 20~90부근까지 변곡점 없이 잘 발달되어 있어 일축압축강도와 탄성계수를 높은 강도까지 추정함에 무리가 없음을 보여주고 있다. 식 (18), 식 (19)와 그림 7(e), 그림 7(f)로 이들의 상관성을 표현하였다.

$$\sigma_c = 11.93 * \exp(Rn/32.64) + 5.88 \quad (18)$$

($R^2 = 0.948$, N = 260)

$$E = 6.64 * \exp(Rn/33.45) - 1.0 \quad (19)$$

($R^2 = 0.927$, N = 251)

7. 결과의 검정

7.1 결과의 검정 및 평가

압열인장시험값을 매개로 하여 일축압축강도와 탄성

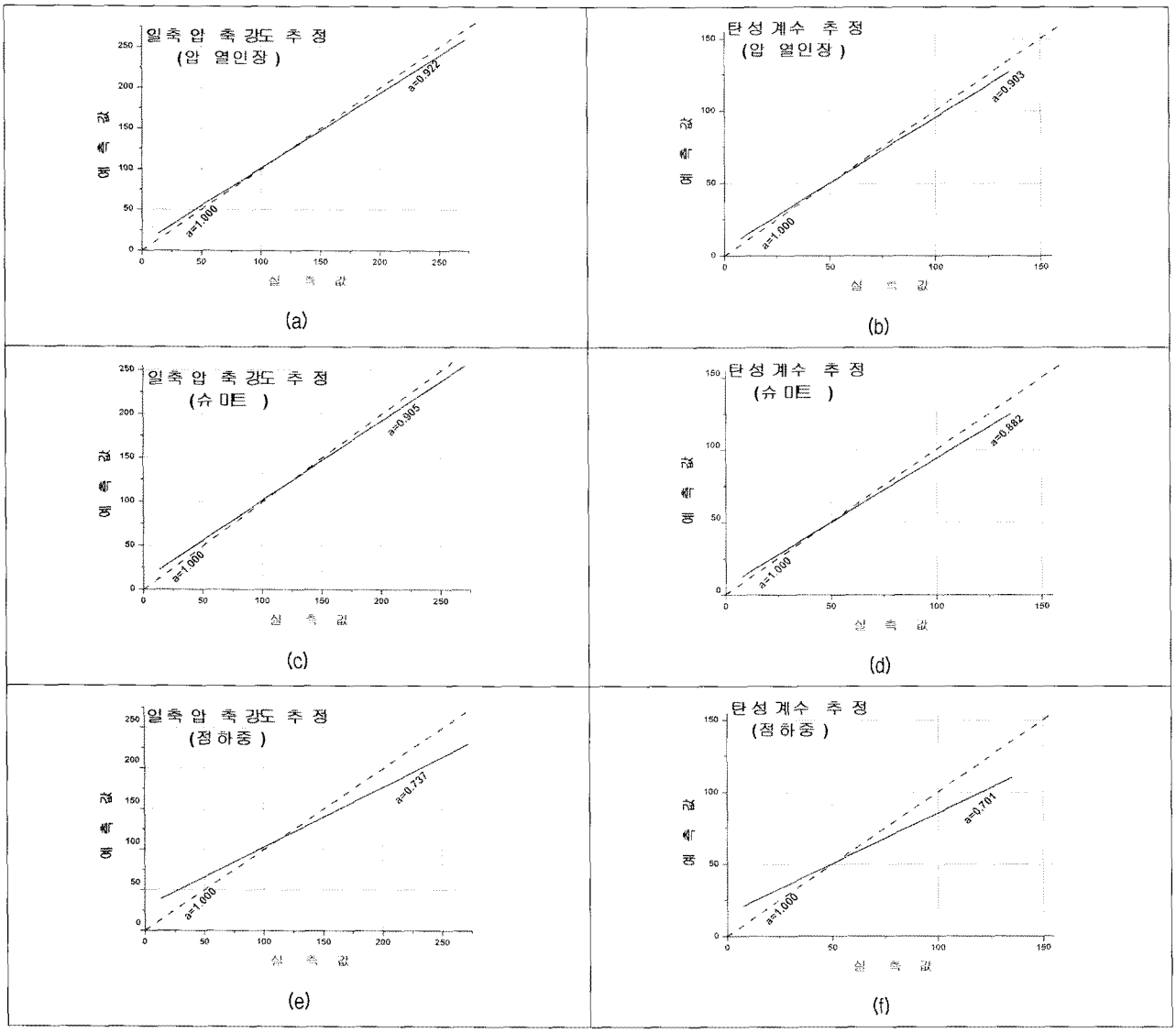


그림 8. 예측값과 실측값의 대비(사암)

계수를 추정할 수 있는 경험식을 유도하였다. 그러나 추정값이 참값과 얼마나 가까운가에 따라 유도된 경험식이 평가될 수 있다.

모든 추정값에 대하여 실측값과 대비를 하여 발생한 오차 범위의 크기로 그 유용성을 평가하였다.

실측값을 횡축에, 본 연구에서 추정한 식으로 예측한 값을 종축에 적점하여 그 값이 실측값과 일치하면 평면좌표에서 Y=ax+b의 직선식 기울기값 a=1.000에 일치할 것이나 그렇지 않을 경우는 예측값 직선이 a=1.000과 차이가 날 것이다. 그 차이가 오차범위로 간주될 수 있을 것이다.

사암을 대상으로 시험한 결과를 나타낸 그림 8(a, c, e)을 보면 일축압축강도 추정값에서 압열인장강도와 Schmidt hammer로 추정한 값은 근접성이 각각 0.922 및 0.905로 실측값에 매우 근접하고 있어나 점하중강도로 추정한 값은 근접성이 0.737로 오차범위가 상당히 크게 나타난다. 그리고 그림 8(b, d, f)에서 탄성계수 추정값도 압열인장강도와 Schmidt hammer는 각각 0.903 및 0.862로 근접하고 있으나 점하중강도로 추정한 값은 근접성이 0.701로 신뢰성이 약간 떨어짐을 보여주고 있다.

세일을 대상으로 근접성을 검토한 그림 9에서도 일축압축강도와 탄성계수 추정값의 근접성은 압열인장 강도와 Schmidt hammer 타격법으로 추정한 값이 점하중강도로 추정한 값보다 실측값에 더 근접하고 있음을 알 수 있다.

그림 10의 편마암 에서도 사암, 세일과 유사한 결과를 나타내고 있다.

이상에서 검토한 암종별로 각각의 역학지수 추정과

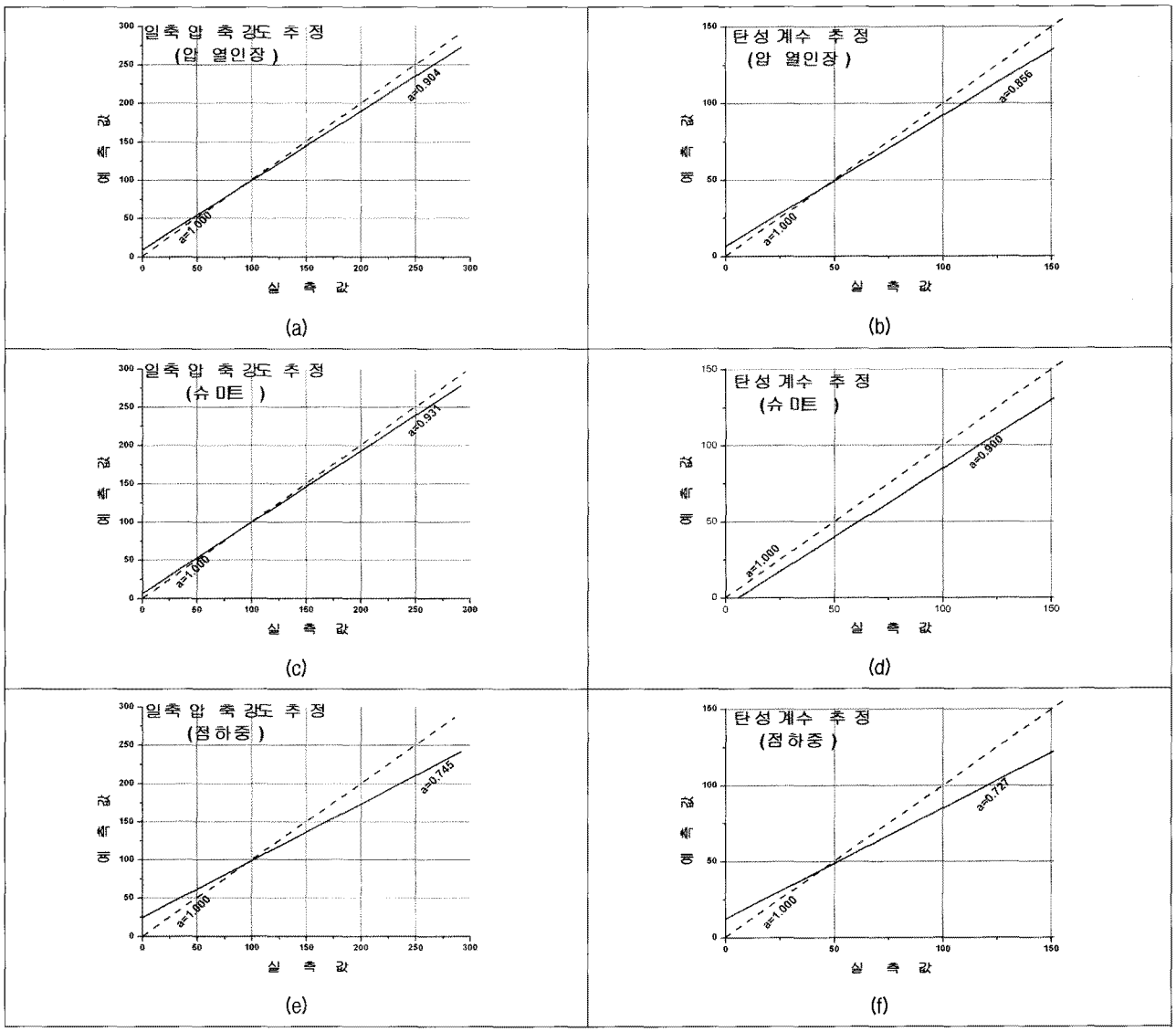


그림 9. 예측값과 실측값의 대비(세일)

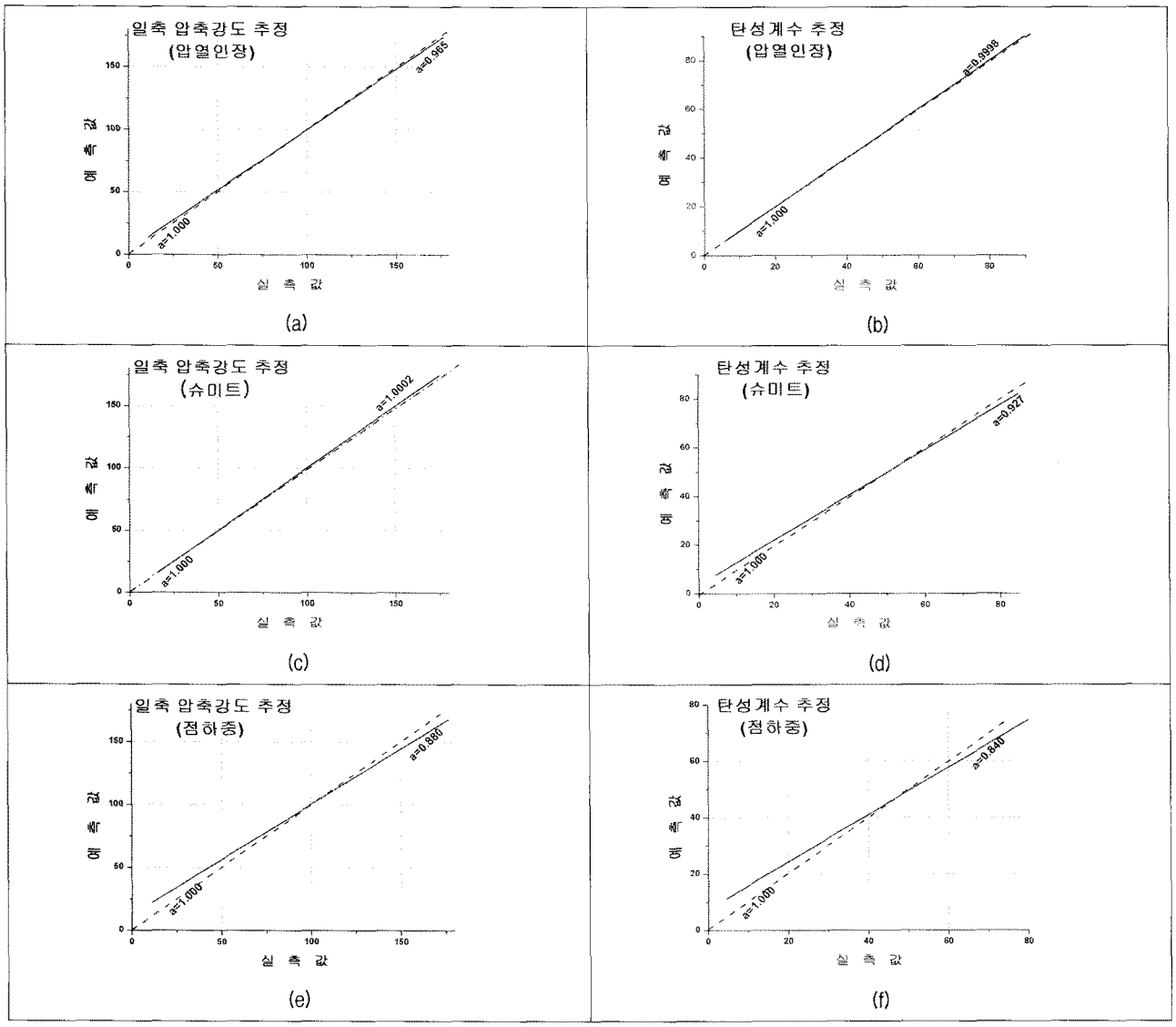


그림 10. 예측값과 실측값의 대비(편마암)

표 7. 신뢰성 검정

구 분		일축 압축강도 추정			탄성계수 추정		
		R	CN	CoV	R	CN	CoV
압열 인장강도	사암	0.961	0.922	0.12	0.951	0.903	0.13
	셰일	0.951	0.904	0.14	0.925	0.856	0.17
	편마암	0.982	0.965	0.06	0.968	1.000	0.09
	평균	0.965	0.930	0.11	0.948	0.920	0.13
Schmidt Hammer	사암	0.951	0.905	-	0.940	0.882	-
	셰일	0.965	0.931	-	0.949	0.900	-
	편마암	0.974	1.000	-	0.963	0.927	-
	평균	0.963	0.945	-	0.951	0.903	-
점하중강도	사암	0.859	0.737	0.23	0.838	0.701	0.23
	셰일	0.863	0.745	0.23	0.853	0.727	0.23
	편마암	0.933	0.880	0.12	0.917	0.840	0.14
	평균	0.885	0.787	0.19	0.869	0.756	0.20

정에서 본 통계적 결과는 Schmidt hammer 타격법으로 추정한 결과와 유사하며 점하중강도로 추정한 값보다는 신뢰성이나 근접성이 우월하다는 것을 알 수 있다. 이들 결과를 요약한 것이 표 7이다. 여기서 Exponential growth 함수에서 보여준 상관성은 지수형태로 보였기 때문에 평방근으로 통일하여 비교하였다.

표 7은 암종에 관계없이 일축압축강도와 탄성계수를 추정하기 위해서는 압열인장강도를 매개로 하는 방법이 상관성, 변동계수 및 근접성에서 점하중강도법으로 추정한 결과보다 우수함이 입증되고 있음을 보여주고 있다. Schmidt hammer 타격법에서는 Exponential growth 방법에서 최적의 상관성을 보이며 이 방법에서는 변동계수는 적시되지 않으므로 추정값의 상관성과 근접성으로 판단할 수 있다. 여기서도 일축압축강도값 추정에서는 Schmidt hammer 타격법이 타 방법보다 우수함을 보이며 탄성계수값 추정에서는 압열인장강도를 매개로 한 방법이 가장 우수함을 보인다. 이상의 결과를 종합하면 압열인장강도를 매개로 일축압축강도와 탄성계수를 추정하는 방법은 신뢰성이 높은 또 다른 좋은 간접방법임을 확인할 수 있다.

7.2 기존 연구결과와 비교

본 연구에서 압열인장강도를 매개로 하여 도출된 식과 기존의 연구결과를 비교하기 위하여 국내외의 문헌을 조사하였다.

그러나 일축압축강도와 탄성계수를 추정하기 위하여 압열인장강도를 활용한 연구실적은 찾을 수가 없었다.

본 연구 성과에서는 압열인장강도와 일축압축강도, 압열인장강도와 탄성계수는 일차함수인 직선 관계를 표출하므로 활용이 용이한 장점이 있다.

본 연구의 시료채취는 지질도에 의한 동종암의 균등면적 배분으로 전국적인 채집을 하였으며 시료성형 및 시험시행은 ASTM 및 ISRM의 각종 시험 규정을 준수하여 시행한 후 시험자료의 통계적 검정을 거쳐서 역학적 해석을 시행하였다. 해석된 결과값의 유용성 여부는 예측값과 실측값 대비로 신뢰성의 수준을 검정하였다.

8. 결 론

전국에 산재한 변성암의 대종인 편마암 시료 260개 블록과 경상분지 퇴적암인 사암과 셰일 265개 블록을 대상으로 각종 역학시험을 시행하여 압열인장강도를 매개로 하여 일축압축강도와 탄성계수를 추정할 경험식을 암종별로 유도하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

압열인장강도를 매개로 신속하고 저렴하며 간편하게 암석의 일축압축강도와 탄성계수를 간접 방법으로 도출할 수 있으며 기존의 타 방법들에 비해서 신뢰도가 매우 높게 나타났다.

향후 화성암에 대한 동일한 시도가 이행되어 좋은 결과가 도출된다면 보편성을 가지는 경험식이 될 수 있을 것이다. 이는 또 하나의 신뢰성 높은 간접방법으로 활용이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. 민덕기, 문종규 (2006a), "울산지역 퇴적암의 강도 추정법 연구 (점 하중 강도지수로 일축 압축강도 추정)", *한국지반공학회 논문집*, 제22권, 8호, pp.63-75.
2. 민덕기, 문종규 (2006b), "Schmidt hammer 반발지수로 울산지역 퇴적암의 공학적 특성을 추 정하기 위한 연구", *한국지반공학회 논문집*, 제22권, 10호, pp.139-150.
3. 민덕기, 문종규, 이상일 (2007), "퇴적암의 공학지수를 추정하기 위한 L.A. 마모율시험", *한국지반공학회 논문집*, 제23권, 11호, pp.15-26.
4. ASTM (D 2938-95), "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens", *Annual Book of ASTM Standards 2005.*
5. ASTM (D 3967-95a), "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens", *Annual Book of ASTM Standards 2005.*
6. ASTM (D 4543-01), "Practices for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances", *Annual Book of ASTM Standards 2005.*
7. ASTM (D 5731-95), "Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock", *Annual Book of ASTM Standards 2005.*
8. ASTM (D 5873-00), "Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method", *Annual Book of ASTM Standards 2005.*
9. ISRM (1978a), "Suggested Methods for Determining Indirect Tensile Strength by the Brazilian test", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.15, pp.99-103.
10. ISRM (1979), "Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials", *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.16, No.2, pp.135-140.
11. ISRM (1985), "Suggested method for determining point load strength", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.22, pp.53-60.
12. ISRM (1981b), "Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol.15, pp.89-97.

(접수일자 2008. 7. 5, 심사완료일 2008. 9. 17)