

한반도 중부권 지각물질의 구조와 물성연구(2) : 퇴적암류 코아시료의
탄성과 속도와 점재하 강도 비교

Structure and physical properties of Earth Crust material in the
Middle of Korean Peninsula(2) : Comparison between elastic
Velocity and point-load of core specimen
of sedimentary rocks.

송무영(Song, Moo Young)
황인선(Hwang, In Seon)

충남대 지질학과
충남대 지질학과

요약/Abstract

석회암, 사암과 셰일의 퇴적암 코아시료를 대상으로 암석의 비중, 공극률, 함수율 등을 구하고 탄성과 전파 속도와 점재하 강도 지수를 측정하였다.

이들 암석물성 사이의 관계로부터 석회암에 대한 밀도와 탄성과 속도의 관계는 $V_p=4085d^2-20747d+303$, $V_s=3899d^2-21442d+318$ 의 다소 곡선 경향을 나타낸다. 또한 밀도가 높은 셰일의 탄성과 속도가 사암에서보다 작으며 이는 셰일의 층리 영향때문인 것으로 보인다. 석회암, 사암, 셰일의 P파 속도와 S파 속도는 대체로 직선 양상을 보여주며 각 관계식은 석회암에서는 $V_s=0.26V_p+1041.6m/sec$, 사암은 $V_s=0.43V_p+424.2m/sec$, 셰일은 $V_s=0.51V_p+261.9m/sec$ 이며 상관도는 석회암에서는 $r=0.75$ 사암에서 $r=0.88$, 셰일에서는 $r=0.86$ 으로 나타났다.

석회암에 대한 점재하 강도 시험에 의하면 점재하 강도 이방성은 시료가 다소 호상구조를 보이더라도 뚜렷하지 않았다. $30^\circ-60^\circ$ 내외의 변화를 보이는 층리면 경사각은 직경방향과 축방향의 점재하 지수에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 생각된다. 점재하 강도 시험결과 점재하강도 지수가 증가하면 P파 속도도 증가하지만 상관관계가 뚜렷하지 않았다.

In order to investigate the correlation of sedimentary rock properties, specific gravity, porosity, water content, sonic wave velocity, and point-load strength index of core samples

of limestones, sandstones and shales were measured.

The relationships between density and velocity show $V_p=16300d-38719.3$, $V_s=11896.4d-29225.1$ of regression equation for sandstones and $V_p=4856d-10264.8$, $V_s=3519d-7841.3$ for shales and $V_p=4085d^2-20747d+303$, $V_s=3899d^2-21442d+318$ for limestones. Seismic wave velocity of shales which have high density is lower than that of sandstones, and this seems to be an effect of bedding in shale.

P-wave velocity and S-wave velocity of limestones, sandstones and shales show the linear relationships as a whole. The regression equations are respectively calculated $V_s=0.26V_p+1041.6\text{m/sec}$, $V_s=0.43V_p+424.2\text{m/sec}$, and $V_s=0.51V_p+261.9\text{m/sec}$ and the correlation coefficients of the velocity show $r=0.88$ in sandstones, $r=0.75$ in limestones and $r=0.86$ in shales.

According to the point-load strength test for limestones, point-load strength anisotropy was not so clear even though the specimens show generally the banded structure. Variations of dip angle of bedding within the range $30^\circ-60^\circ$ does not have much influence upon the diametral strength index and axial strength index.

From the result of point load test, P-wave velocity increases with point-load strength index but the regression equations are $V_p=98.51I_s+4082.1\text{m/sec}$, $V_p=106.4I_s+3954\text{m/sec}$ and their correlation coefficient is low.

序 言

탄성과 반응에 의한 지구내부 물질과 구조의 추정결과는 19C말 경부터 알려지기 시작하여 지구내부 과학의 가장 중요한 수단이 되었으며 소규모적인 물성차이나 구조적 특성을 파악하기 위하여 이미 각종 조건을 알고 있는 표본에 대하여 탄성과 반응이 실험 연구되어 왔다.

탄성과 반응은 속도, 감쇄, 파형, 위상 등 여러 형태로 측정할 수 있으나 그 측정의 용이성, 정밀성, 지속성 등의 면에서 탄성과 특히 P파와 S파의 속도가 가장 큰 관심의 대상이 되어왔다. 이는 다양한 성분과 구조의 매질을 대상으로 야외 탐사 측정에서도 가

능한 항목이므로 이를 실험실의 시료에 대한 탄성과속도와 함께 비교함으로써 지하구조와 물성과악에 그만큼 용이하기 때문이기도 하다.

통상 지하의 물질은 암석 혹은 암석의 변형된 형태로 간주할 수 있으며 야외 탄성과속도는 암석에 대한 탄성과 반응으로부터 출발하게 된다. 암석의 탄성과 속도에 영향을 미치는 요소로서는 암석종류, 조직, 밀도, 공극률, 압력, 함수율, 온도 등을 고려할 수 있으며(Lama & Vutakuri; 1978) 이들 각 요소들의 변화가 탄성과 속도에 각각 어떻게 영향을 미치는가가 암석표본에 대한 탄성과속도 연구의 요점이 된다.

과거의 많은 연구 결과들 중에서 특히 주

목할 만한 것은 암석의 불연속면 거동(Hoek et al, 1965), 균질 암석의 탄성과 전파 특성(King, 1966), 암석 물성에 의한 탄성과 속도 영향(齊藤德美, 阿部 司, 1974), 이방성 응력하의 P파속도(谷口敬一郎, 1989), 압축강도에 의한 암반분류(ISRM, 1985)등이 있으며 국내에서도 함수비 등에 따른 탄성과 속도(신희순외, 1986), 풍화에 따른 화강암의 물성변화(김영화 외, 1990), 화강암의 탄성과속도 변화(류미애, 1991) 등이 알려져 있다.

본 논문에서는 다소 이방성을 갖는 석회암과 사암, 셰일의 퇴적암류를 대상으로 실내에서 암석의 기본 물성중에서 공극률, 함수율, 밀도 등을 구하였으며 탄성과 속도를 측정하고 점재하 시험에 의한 강도 시험을 통해 이들 물성치간의 상호관계를 살펴보았다.

이 연구는 일부 교육부 특성화의 지원을 받아 이루어졌으므로(송무영 외, 1992) 교육부 당국에 사의를 표한다. 아울러 표품준비도와주신 한남지질 하성호과장, 태평지질의 남원희교문, 야외 조사에 참여했던 충남대학교 학생과 학부생들, 실내 측정에 참여한 정진숙, 신영춘양에게 깊은 감사를 드린다.

岩石試料

이 연구에 이용된 암석 시료는 경부고속전철 제10공구인 대구지역의 18km구간에 걸쳐 수행된 대부분 종료심도가 30-50m인 시추공에서 사암 7개와 셰일 11개로 18개의 퇴적암을 채취한 것이다. 이 지역은 지질학적으로 중생대 유라기 대보 조산운동이후 백악기에 걸쳐 현재 경상남북도 일대의 경상누층군에 포함되어 형성된 육성 퇴적분지로

보고된 바 있으며 주로 역암, 사암, 이암 등의 쇄설성 퇴적암류로 구성되어 있다. 대구 지역의 경상누층군의 지질계통을 살펴보면 하부에는 초기 백악기의 신동층군으로 사암, 셰일, 역암, 이암등으로 이루어져 있으며 그 위의 초기 백악기 말의 하양층군은 주로 셰일, 사암과 소량의 역암으로 되어 있다. 그리고 그 상부에 화산암으로 구성된 유천층군으로 구성되어 있다(장기홍, 1990).

다른 암석시료로는 충남 금산군 진산면 읍내리에서 온천개발을 위한 종료심도가 500m인 시추공에서 38개의 석회암과 5개의 화강암을 채취, 총 61개를 준비하였다. 1978년도 한국지질도 금산도폭에 따르면 선캠브리아기의 편마암류와 시대 미상의 옥천층군, 이를 관입한 유라기 화강암과 백악기의 퇴적암류, 화성암류 그리고 이들을 부정합으로 피복한 제4기 충적층으로 구성되어 있다. 본 실험시료는 옥천층군 마전리층의 석회 규산염암과 석회암으로 구성되어 있으며 암녹색, 암회색과 백색부분이 경사각 30°-50°의 호상구조를 보이며 대부분 결정질이다.

코아 상태의 표품을 다이아몬드 톱으로 양단면을 장축에 수직으로 절단하였으며 양단면에서 측정단자의 접촉상태를 높이고 측정오차를 줄이기 위하여 100, 600, 1000, 1200 mesh의 Carborundum 분말로 연마하여 시료단면의 수평정도를 $\pm 0.02\text{mm}$ 로 유지하였다.

점재하 시험을 위해서는 탄성과 속도를 측정할 시료중에서 석회암 시료 25개를 선택하여 일차적으로 직경방향의 점재하 시험을 하였으며 양분된 시료를 다시 직경 높이의 비를 대개 1:0.5의 원주형으로 절단하여 축방향의 점재하강도지수를 구하였다.

현미경 관찰 결과 전체 시료는 암상에 따라

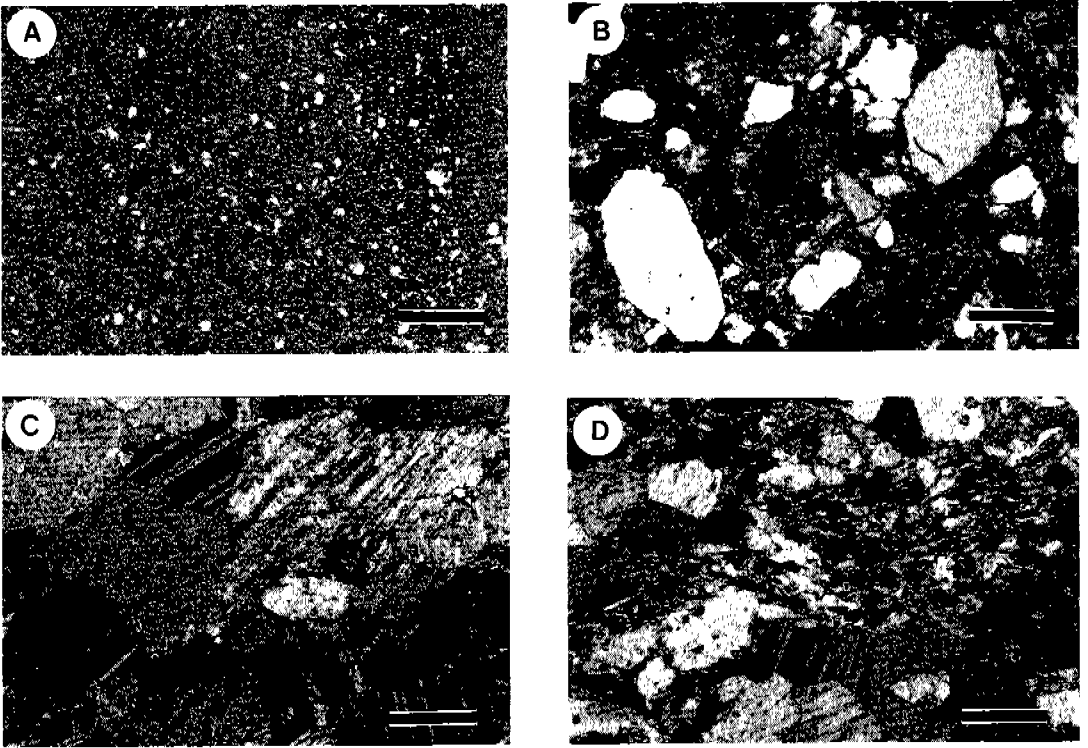


Fig. 1 Microphotographs of specimens(scalebar is 400microns).
(A)Shale, (B)Sandstone, (C) and (D) are limestones.

4개로 구분되었다. 배율은 400microns로 하였으며 표품의 대표적인 박편 사진은 Fig. 1에 나열하였다. 이들은 실트 크기의 석영입자가 들어있는 흑색셰일(A), 석영, 사장석, 처어트를 함유하는 적색사암(B), 방해석 결정으로 구성된 조립질 석회암(C), 및 약간 변질받은 호상구조의 석회암(D)등이다.

研究方法

암석의 물리적 성질 중 기본 물성으로서 밀도(비중), 함수율, 공극률 등을 구하고 탄성과 P파 속도 및 S파 속도를 측정하였으며

역학적 성질로서 점재하 실험에 의한 강도 지수를 구하였다.

기본 물성(Index properties)측정

기본 물성의 측정은 ISRM(1979)의 표준 시험법에 따랐다. 암석 각 시료의 크기를 Caliper로 0.05mm까지 측정하였으며 시료의 중량은 0.01g까지 측정 가능한 디지털식 천평(Electric balance, Sartorius CO., Type L2200p, Germany)를 사용하여 측정하였다. 또한 건조와 습윤 등의 상태에 따른 중량을 구하기 위해 $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 를 유지할 수 있는 건조기(Dry

oven)를 이용하였다.

기본 물성을 구하기 위한 기본적인 방법으로 각 상태의 중량을 구하였다.

- ① 자연상태의 중량(W_1)
- ② 건조상태의 중량(W_2)
- ③ 포화상태의 중량(W_3)
- ④ 시료의 수중중량(W_4)

함수율은 위와 같은 상태에서 측정된 중량치로서 다음과 같은 식에 의해 구해진다.

$$W(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100$$

- W_w : Mass of pore water
- W_s : Grain mass of sample
- W_1 : Mass of natural sample
- W_2 : Mass of dried-sample in dry oven during 24 hours

밀도 시험은 시료의 질량과 체적의 측정이 기본이며 자연상태, 건조상태 및 습윤상태 세가지의 상태에 따라 질량을 측정하여 다음과 같은 방법으로 구하였다.

$$\text{Dry density}(\rho_d) = \frac{W_s}{V} = \frac{W_2}{V}$$

$$\text{Saturated density}(\rho_s) = \frac{W_{\text{sat}}}{V} = \frac{W_3}{V}$$

$$\text{Bulk density}(\rho) = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{W_1}{V}$$

- W_{sat} : Saturated-surface-dry mass of sample
- W_2 : Mass of water
- W_3 : Mass of sample in saturated state

시료 내부의 공극에는 공기나 물이 통하지

않는 부분이 있기 때문에 시험상 모든 공극의 체적을 파악하기 어려우므로 외부와 통하고 있는 공극만을 생각하고 이것을 유효공극률이라고 구별하여 구한다. 이하 본 연구에서의 공극률은 유효공극률을 의미한다. 일반적으로 공극률은 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$n(\%) = \frac{V_v}{V} \times 100 = \frac{W_3 - W_2}{W_3 - W_4} \times 100$$

- V : Bulk sample volume
- V_v : pores volume
- W_4 : Mass of sample submerged in water

탄성과 전파속도 시험

암석의 탄성과 전파속도는 암석의 탄성계수, 강성률, 포와송비 및 밀도에 크게 의존을 하고 있으므로, 속도로부터 암석의 물성을 알고 암석의 역학적 특성을 비교할 수 있다.

초음파 속도 시험은 암석의 물리적 특성을 파악하기 위하여 초음파를 이용하여 탄성과 속도를 측정하는 방법이다. 속도 측정 방법은 초음파 펄스가 암석 시료를 전파하는 속도를 직접 측정하는 투과법과 경계면에서의 반사 펄스를 이용하는 반사법, 그리고 종진동이나 횡진동 등의 공진 주파수를 구하는 것을 기본으로 한 공진법이 있다. 일반적으로 세가지 방법중에서 투과법이 흔히 사용되고 있고 그 원리는 펄스가 시료의 양쪽에 부착되어 있는 수신자와 발진자 사이를 통과한 시간을 측정하는 것이다. 즉 암석 시료 길이(Transducer 사이의 거리)를 측정된 투과시간으로 나누면 속도가 산출되며 이것은 암석 시료 매질의 물성에 대한 추측을 가능하게 한다. 또한 이 방법에서 파동의 감쇄정도가 물성, 불균질성,

유체 등의 전달 매질의 특성을 반영한다.
 본 연구에서도 암석 시료에 대해 투과법을

이용하여 탄성파의 P파 속도와 S파 속도를 측정하였다. 측정기기는 Ultrasonic pulse velocity meter, transducer, oscilloscope 등 크게 세가지 부분으로 구성되어 있으며 기본구성 원리는 Fig. 2와 같다. 측정기기에 대한 규격은 Table 1과 같다.

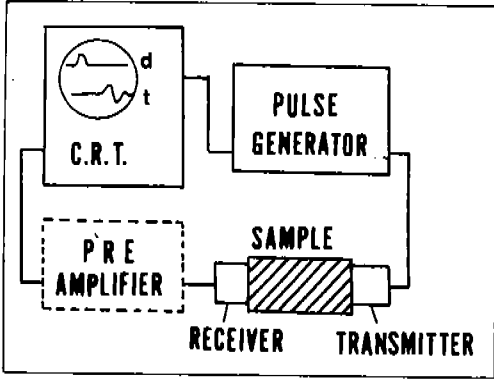


Fig. 2 Diagram of Typical apparatus of ultrasonic velocity measuring. Components shown by dashed lines are option.

측정한 탄성파 속도와 이들의 측정치를 조합하면 각종 탄성률 즉, 영률, 강성률, 포와송비 등의 산출이 가능하며 이러한 음파 속도 측정으로부터 구해지는 탄성률을 동적 탄성률이라고 한다. 이들 탄성률을 음파속도로부터 구하기 위해서는 다음의 관계식을 이용한다.

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}$$

Table 1 Specification of Ultrasonic pulse velocity measuring device.

<p>▶Ultrasonic pulse velocity meter</p> <p>Size(cm) : 23.5×20×5</p> <p>Weight(kg) : about 2</p> <p>Output voltage : 800V</p> <p>Repetition rate : 1-250 pulse/sec</p> <p>Power requirement : 12V</p>
<p>▶Oscilloscope</p> <p>Model : 3channel 8trace Oscilloscope 5506(Hung Chang)</p> <p>Frequency range : 60khz</p> <p>Power requirement : AC 100V, 50-60khz</p>
<p>▶Transducers</p> <p>Model : Sonicviewer Optional Accessories(OYO Co.)</p> <p>P-Wave transducer, 5211</p> <p>S-Wave Transducer, 5212</p> <p>Resonance Frequency</p> <p>P-Wave transducer, 63khz</p> <p>S-Wave Transducer, 33khz</p>

Table 2 Physical properties and dynamic elastic constants of rock samples. (Mean values)

Sample name	Jinsan Granite	Jinsan Limestone	Taegu Sandstone	Taegu Shale
No. of Specimens	5	33	5	9
Density Lab (g/cm ³)	2.628	2.839	2.689	2.720
Porosity (%)	0.734	0.367	0.554	1.009
Water cont. (%)	0.229	0.071	0.137	0.408
P-wave velocity (m/sec)	4064	4682	5230	2982
S-wave velocity (m/sec)	2041	2228	2719	1710
V _p /V _s	1.98	1.90	1.88	1.68
Young's modulus (×10 ⁹ kg/cm ²)	2.936	3.768	5.256	1.985
Shear modulus (×10 ⁹ kg/cm ²)	1.119	1.429	2.004	0.811
Bulk modulus (×10 ⁹ kg/cm ²)	2.885	3.888	4.330	1.325
Poisson's ratio	0.331	0.320	0.303	0.209

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

$$G = \rho V_s^2$$

$$K = \rho(V_p^2 - 4V_s^2/3)$$

- E = Young's modulus
- ρ = Density
- ν = Poisson's ratio
- V_p = P-wave velocity
- G = Shear modulus
- V_s = S-wave velocity
- K = Bulk modulus

본 실험 암석시료의 탄성과 속도와 그로부터 산출된 각 탄성률은 Table 2에 요약되어 있다.

점재하 시험(Point-load test)

암석의 기본물성 중에서 강도는 암석의 역학적 특성의 중요한 요소이다. 본 시험에서는 암석의 강도 분류를 위해 현장에서 신속하게 이용할 수 있는 점재하 시험법(point-load strength test method)을 채택하였다. 이 시험은 재하점 사이를 직경으로 하는 구의 응력 상태로 인장 파괴면이 생성되기 때문에 일축 압축강도의 예측도 가능하게 한다 (ISRM, 1985).

점재하 시험을 위한 시료 성형은 코아의 직경(d)과 길이(W)의 비를 가능한 한 일정하게 유지하였으며 종전의 압축강도 변화와 시험기술에 따라 상당한 분산을 나타내는 결점을 보완하고 신뢰성 있는 측정을 위한

시험방법에 의하였다(ISRM, 1985). 점재하 시험에 의한 강도는 재하 방향에서 압축 응력에 수반하여 발생하므로 시료의 중앙에서 발생하는 최대 인장응력이 재하중(P)과 재하점 사이의 거리(d)에 따라 변한다. 강도는 가압점 사이의 거리 제곱(d^2)에 대한 재하중(P)의 비로써 표시되며 시료의 형태(shape) 및 크기(size)의 영향에 따라 시험 방법이 다르다(ISRM, 1985). 코아모양으로 얻어진 암석시료를 반경 방향에 재하할 때는 코아 직경을 D로 표시하면, 강도는 다음과 같은 식에서 구할 수 있다(ISRM, 1985).

$$I_s = \frac{P}{D_c^2}$$

직경 방향 시험의 경우는 $D_c^2 = D^2$ 이고, 축 방향이나 불럭, 불규칙 압괴 시험의 경우는 $D_c^2 = 4A/\pi$ 이며 여기서 A는 양재하점을 포함하는 시료 단면 중에서 면적이 최소로 되는 면의 면적이며 $A = WD$ 로 된다.

본 연구에서 사용한 실험기기는 시료 직경크기 범위가 100mm까지 가능한 Model PLT-10(Structural Behavior Engineering Laboratories, Inc.)을 사용하여 직경방향의 시험과 축방향으로 시험하여 강도지수를 구하였다.

실험결과 및 고찰

암석의 중요한 물성으로 밀도, 함수율, 공극률 등을 구하고 탄성과 속도를 측정하였으며 점재하 시험에 의해 그의 강도지수를 구하였다. 이들 기본물성 사이의 상호관계, 탄성과속도와 기본물성 사이의 상호관계 및 점재하 강도지수와 관계등을 통해 역학적

특성을 조사하여 보았다.

물성사이에 나타나는 일반적인 상관관계는 직선관계, 곡선관계, 및 Zone의 형태로 분류될 수 있다. 그러나 이론적으로 양호간 상관관계가 기대되는 몇 개의 탄성계수 상호간이나 특정한 물성간의 관계를 제외한 대부분의 경우는 Zone 형태를 보인다(Judd and Huber, 1961). 따라서 선택되는 물리적 특성치의 종류에 따라서 상관의 정도가 크게 달라지며 압중에 따라 큰 차이를 보인다(김영화, 홍순호, 1990).

밀도와 탄성과 속도와의 관계

사암과 셰일에 대한 밀도와 탄성과 속도의 관계는 Fig. 3과 같다. 대체로 밀도 증가에 따라 P파 속도와 S파 속도는 증가하는 경향을 나타내며, 사암에서는 $V_p = 16300d - 38719.3$, $V_s = 11896.4d - 29225.1$ 과 셰일에서는 $V_p = 4856d - 10264.8$, $V_s = 3519d - 7841.3$ 의 관계식을 산출하였다. 이들의 상관도는 사암이 0.8 내외로 비교적 높은 편이나 셰일은 0.25내외로 분산이 심한 관계를 보이면서 사암의 밀도에 대한 P파 속도 및 S파 속도가 셰일의 경우보다 뚜렷하게 증가하는 경향을 보이고 있다.

밀도의 평균값은 셰일은 2.72, 사암은 2.68이며 셰일의 밀도는 사암보다 높아도 속도는 사암보다 낮게 나타나는데 이는 퇴적암에 존재할 수 있는 층리에 의한 이방성의 영향으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 이방성에 관한 연구를 별도로 하지 않았지만 일반적으로 이방성 암석은 층리의 수직방향에 대한 속도와 수평방향에 대한 속도가 다르며, Lama와 Vutukuri(1978)가 정리한 내용(Table 3)에 의하면 사암은 이방성이 없고 석회암은

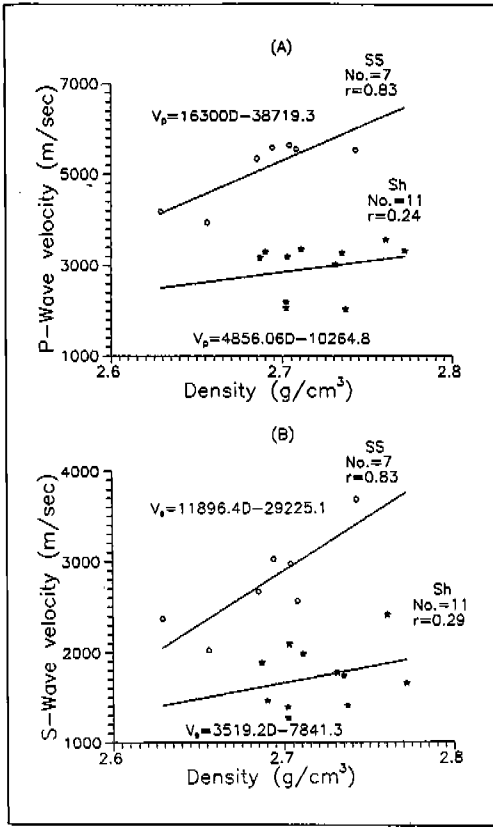


Fig. 3 The relationship between density and (A) P-wave velocity, (B) S-wave velocity in sandstone and shale. Solid lines represent regression lines of the data set. The regression equations are shown with their correlation coefficient(r).

1.08, 셰일은 1.14로 이방성 지수가 발표된 바 있는데, 본 실험의 셰일은 P파 속도 측정방향에 수직으로 층리가 발달하여 속도에 불리한 영향을 미친 것으로 생각된다.

Fig. 4는 석회암의 밀도와 탄성과 속도의 관계이다. 밀도 증가에 따라 탄성과 속도의 증가는 사암이나 셰일과 같이 크지는 않지만 점차 증가하는 경향이다. 밀도의 평균값은 2.84로 사암, 셰일보다 높으며 시료의 수가 사암이나 셰일보다 훨씬 많아 좀 더 뚜렷한

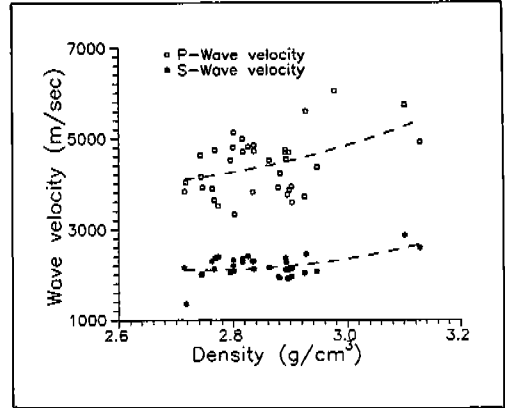


Fig. 4 The relationship between density and wave velocities for limestones. The relationships show curvilinear trends P-wave velocity (square), S-wave velocity(star).

경향을 나타낸다.

사암이나 셰일과 다른 점은 밀도에 대한 탄성과 속도의 상관관계가 약간 분산이 있지만 직선보다는 곡선의 관계를 나타내는 경향을 보인다. 이들로부터 $V_p = 4085d^2 - 20747d + 303$, $V_s = 3899d^2 - 21442d + 318$ 의 산출식을 유도하였다. Rzhevsky와 Novik(1971)의 석회암에 대한 밀도와 P파 속도와와의 연구 결과에서도 서로의 관계가 직선보다는 곡선의 증가 경향을 나타내며, 본 실험 대상의 석회암도 분산된 형태에서 곡선의 증가 경향을 보인다.

Lama와 Vutukuri(1978)는 일반적으로 탄성과 속도의 변화는 치밀하고 단단한 암석에서의 속도가 더 크며, 특히 석회암의 경우 P파 속도의 변화 범위가 2-6km/sec로 다양한데 이 변화는 석회암의 조직의 영향일 것으로 해석하였다.

암종에 따른 공극률과 P파 속도와와의 관계

Table 3 Anisotropy coefficients for various rocks(Lama & Vutukuri, 1978).

Rock	*Anisotropy coefficient	Reference
Austin chalk	1.17	Tocher(1957)
Homogeneous anhydrite	1.16	Dunoyer de Segonzac and Laherrere(1959)
Anhydrite with intercalated limestones	1.12 to 1.14	Dunoyer de Segonzac and Laherrere(1959)
Limestone	1.08 to 1.10	Dunoyer de Segonzac and Laherrere(1959)
Arbuke limestone	1.30	Uhrig and Von Melle(1955)
Salt	no anisotropy	Dunoyer de Segonzac and Laherrere(1959)
Sandstone	no anisotropy	Dunoyer de Segonzac and Laherrere(1959)
Eagle Ford shale	1.33	Uhrig Von Melle(1955)
Pierre shale(Limon, Colo.)	1.18	Uhrig Von Melle(1955)
Pierre shale (Last chance, Colo.)	1.14	Uhrig Von Melle(1955)
Cambridge slate	1.07	Tocher(1957)
Lorraine shale	1.40	Tocher(1957)
Gneiss, Hell Gate, N. Y.	1.20	Birch(1960)
Micaschist, woodsville, Vi.	1.36	Birch(1960)
Granodiorite gneiss, Bethlehem, N. H.	1.33	Birch(1960)
Gneiss, Pelham, Mass.	1.27	Birch(1960)

* The coefficient of anisotropy may be defined as the ratio of the velocity along the layers to the velocity perpendicular to the layers.

셰일, 사암 및 석회암에 대한 공극률과 P파 속도의 관계에서는 대체로 공극률이 증가함에 따라 P파의 속도는 감소하는 경향이다(Fig. 5). 중량의 측정으로 계산된 공극률의 값은 석회암에서는 0.15-0.68%이고, 사암은 0.19-1.36%, 셰일은 0.74-1.34%의 범위에 있다. 석회암과 셰일의 경우 분산의 형태가 띠모양의 분포를 보이거나 사암은 직선의 경향을 보인다.

공극률이 높은 셰일에서는 역시 P파 속도의 범위가 낮게 나타났다. 본 실험에서도 석회암의 공극률에 대한 P파 속도의 변화가 사암이나 셰일보다 크게 나타났다. 또한 석회암의 공극률과 함수비 관계는 Fig. 6과 같이 서로 비례하여 $W=0.14p+0.02$ 의 경향을 보이고 상관도는 $r=0.87$ 로 비교적 양호하다. 사암과 셰일의 함수율과 p파 속도의 비교에서 함수율의 증가에 따라 P파의 속도는 감소하는

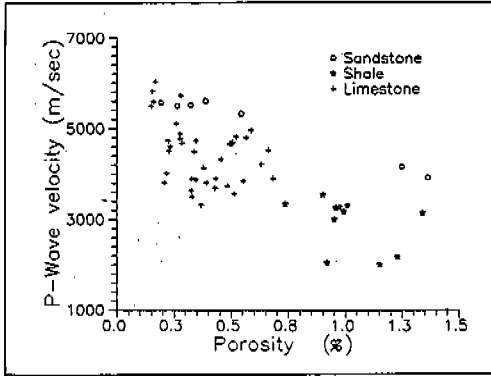


Fig. 5 The relationship between porosity and P-wave velocity. P-wave velocity decreases as the porosity of rock increases. Shales(star), limestones(cross) and sandstones(open circle)

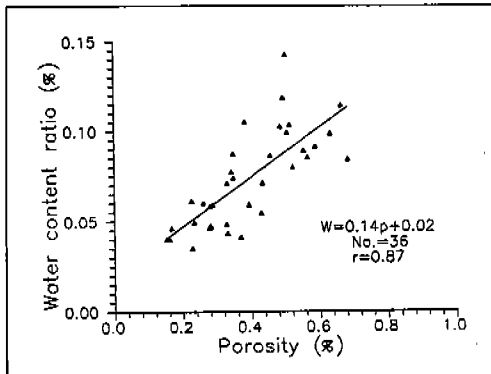


Fig. 6 The relationship between porosity and water content in limestones.

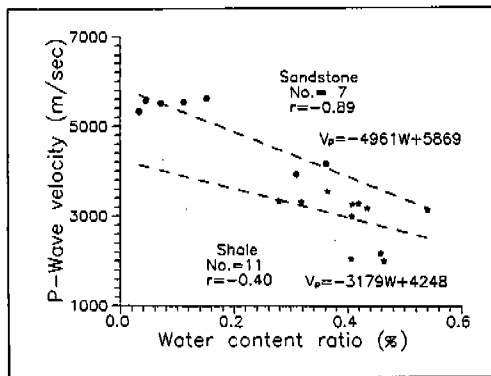


Fig. 7 The variation of water content and P-wave velocity.

경향을 보이며, 이들 관계식은 사암에서는 $V_p = -4961w + 5869$, 셰일에서는 $V_p = -3149w + 4248$ 이다(Fig. 7). 사암의 경우 상관도가 $r = -0.89$ 로 비교적 높으나 셰일의 상관도는 $r = -0.40$ 으로 낮게 산출되었다.

공극률에 대해서는 공극의 부피 및 형태에 주로 역점을 두고 연구되어 왔다. 신희순(1986)의 연구에 의하면 입상조직을 갖는 암석의 P파 속도의 변화는 균열형의 공극형태에 크게 좌우되는데 석회암은 결정질로 입상조직이며 공극의 형태도 주로 광물입자 경계의 균열형이기 때문에 큰 속도 변화를 보인다. 일반적으로 공극률이 증가하면 탄성과 속도는 감소한다. Wyllie 외(1958)는 공극의 형태를 1차적 공극과 파쇄나 용해에 의해 생긴 균열등의 2차적 공극으로 분류하였으며, 대부분의 경우 사암과 같이 균질 암석의 1차적 공극에 의한 속도 변화는 2차적 공극에서보다 훨씬 크다고 발표하였다.

본 연구에서는 이러한 연구들을 토대로 석회암 및 사암과 셰일의 공극률과 P파의 속도를 비교하여 보았다. 그 결과 공극률에 대한 P파의 속도 변화는 석회암보다 사암과 셰일의 경우가 더 크며, 그 상관계수는 석회암에서 $r = 0.45$, 사암과 셰일에서 $r = 0.77$ 이었다. 김영화와 홍순호(1990)의 연구에 의하면 탄성과 속도와 공극률의 상관 관계에서 나타나는 분산은 밀도와 암석의 이방성, 특히 공극의 형태에 기인한 것으로 판단된다고 하였다. 본 연구에서도 석회암의 낮은 상관도나 사암과 셰일에서 나타나는 분산으로 보아 이러한 탄성과 속도는 암석의 이방성에 의해 영향을 받는 것으로 생각된다.

P파 속도와 S파 속도의 관계

석회암, 사암, 셰일에 대한 P파 속도와 S파 속도의 관계는 Fig. 8와 같으며 모든 암석에서 P파의 속도가 증가할수록 S파의 속도도 증가하는 경향을 보인다. 석회암의 P파 속도는 3320~5830m/sec, S파 속도는 1990~2860m/sec의 범위이다. 사암의 P파 속도는 3930~5626m/sec, S파 속도는 2020~3680m/sec, S파 속도의 1390~2410m/sec의 범위에 있다. 회

귀분석에 의하면 석회암의 상관관계는 $V_s=0.26V_p+1041.6$ ($r=0.75$, $N=33$)로 산출되었다. 사암과 셰일에 대한 상관관계식은 각각 $V_s=0.43V_p+424.2$, $V_s=0.51V_p+261.9$ m/sec이고 상관도는 셰일이 0.86, 사암이 0.88로 비교적 높게 나타난다. 이들 퇴적암류의 P파 속도와 S파 속도의 평균속도를 보면 사암의 P파 속도와 S파 속도 평균값이 5230 m/sec와 2719m/sec로 가장 높게 나타났으며, 석회암의 P파 속도는 4682m/sec, S파 속도는 2228m/sec이고 셰일은 P파 속도가 2982m/sec, S파 속도가 1710m/sec이다. 속도의 크기를 보면 사암이 가장 크고 그 다음에 석회암, 셰일의 순서로 나타났다.

Lama와 Vutukuri(1978)가 발표한 암종에 대한 P파의 평균속도는 화강암이나 돌로마이트, 반려암 등과 같이 고화된 암석은 P파 속도가 5~7km/sec의 범위이며 석회암, 사암, 셰일과 같이 약간 고화된 암석의 P파 속도는 3~4km/sec, 고화되지 않은 충적층, 모래 같은 암석에서는 0.5~1km/sec이다. 또한 그 후 1971년에 Rzhnevsky와 Novik가 발표한 암석과 광물의 역학적 물성에서 석회암의 P파 속도는 3200~5500m/sec, 사암은 2000~3600m/sec이며 셰일은 1610~2250m/sec로 암종에 따른 P파 속도의 분포를 알 수 있다. 본 시료인 석회암의 평균 P파 속도는 4682m/sec, 사암은 5230m/sec, 셰일은 2982m/sec로 나타났으며 위 두 연구의 결과와 비교하여 보면 사암의 경우에서 크게 나타났다.

일반적으로 포와송비가 0.25일때 암석의 P파 속도는 S파 속도의 약 1.7배가 된다(Danbom & Domenico, 1987). 본 시료의 S파 속도에 대한 P파 속도의 변화는 석회암이 1.90, 사암이 1.88이고 셰일이 1.68로 나타났다(Ta-

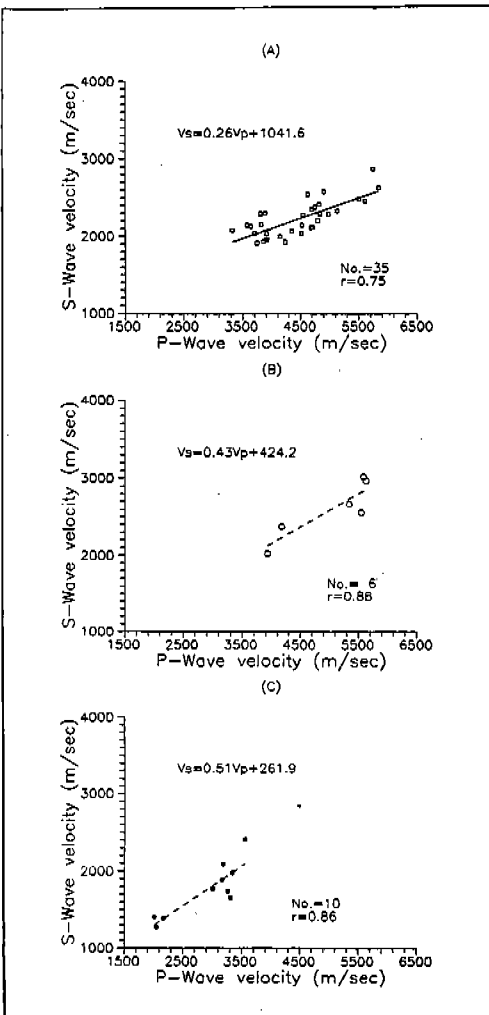


Fig. 8 The relationship between P-wave velocity and S-wave velocity. (A)limestones, (B)sandstones, (C)shales.

ble 2). 이러한 V_p/V_s 의 변화는 암석 풍화정도나 고결상태 등에 따라 차이가 생긴다(齊藤德美, 1974). 본 연구에서 석회암과 사암의 V_p/V_s 는 일반 암석보다는 크게, 세일은 작게 나타났다. 이와 같은 결과는 암종의 차이에 따른 결과로 생각된다.

점재하 시험에 의한 강도지수 비교

점재하 강도지수는 석회암 25개를 선택하여 축방향 시험에 의한 점재하 강도지수 I_{sa} 와 직경방향 시험에 의한 강도지수 I_{sd} 를 구하였다. 모든 암석 내에는 취약면으로 인한 어느 정도의 이방성이 존재하며 이러한 취약면의 방향과 재하 방향에 따라 점재하 강도 지수가 달라지므로 암석의 강도 분류에 차이를 가져온다(Broch, 1983). 이에 따라 본 실험 대상시료중 일부 석회암은 호상구조(banded structure)가 다소 존재하여 강도 이방성 지수를 계산하였다. 점재하 강도 시험에서 강도 이방성지수(point-load strength anisotropy index : I_a)는 일반적으로 최소치에 대한 최대치의 비($I_s \text{ Max.}/I_s \text{ Min.}$)로 나타내며 일반적으로 암석의 이방성 지수는 1.05~5.7의 범위를 보인다(Greminger, 1982).

점재하 강도 이방성 지수는 수직 및 수평 방향 각각에서 구한 값에 대한 비교 즉, 직경방향 점재하 강도 지수에 대한 축방향 점재하 강도의 비($I_a = I_{sa}/I_{sd}$)를 강도 이방성 지수로 표시하고 그 값에 대한 특성을 알아 보았다. Table 4는 25개의 석회암에 대한 직경방향의 점재하 강도지수와 축방향 점재하 강도 및 이방성 지수이다.

석회암에서 점재하 방향에 따라 구한 강도 이방성 지수는 0.5~4.1범위를 보이지만 주분

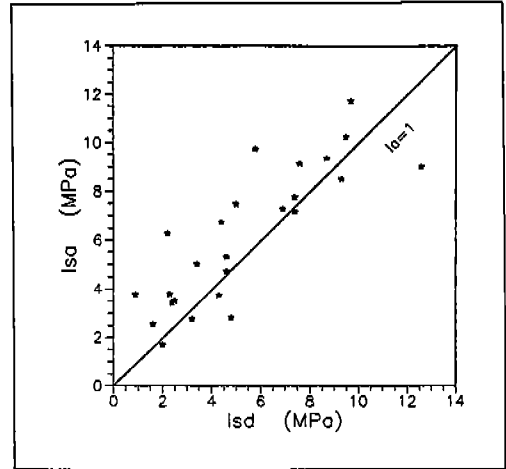


Fig. 9 The variation of point-load strength anisotropy in limestones.

포 범위는 0.7~1.6에 속한다. 평균 1.4를 나타내며 최대값 4.1과 최소값 0.5를 제외하면 $I_a=1$ 로 선형 비례관계를 나타낸다(Fig. 9).

우선 일부 시료에 존재한 취약면의 영향으로 발생하는 직경방향 및 축방향의 강도 지수의 변화를 분석하여 보았다. 점재하 강도지수의 이방성 정도는 취약면의 법선방향과 코아 시료의 축과 이루는 각, 옆리면의 경사각(β)의 크기에 영향을 받는다. 이는 β 의 크기에 따라 I_{da} 와 I_{sa} 가 변하여 결국 β 가 0° 또는 90° 에 가까울수록 이방성에 큰 영향을 미치기 때문이다(배대석, 1991). 이는 본 석회암 시료의 취약면의 각도가 축방향에 대해 $30^\circ \sim 50^\circ$ 범위(Table 4)이나 대부분 45° 범위로 일정한 편이었기 때문으로 생각된다. 이러한 결과는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 $I_a=1$ 로 선형 비례관계로 배열되는 이방성 분석결과와도 일치하는 것으로 생각된다. 본 연구에서는 축방향 및 직경 방향에 대한 점재하 강도지수와 취약면이 이루는 각 사이에 대한 관계(Fig. 10)를 고찰한 결과, 축방향 및 직경방향의

Table 4 Point-Load Strength Index.

Sample No.	D (mm)	W (mm)	Pd (KN)	Isd (MPa)	Pa (KN)	I _{sa} (MPa)	l _a	β
J- 6	36.0	23.9	12.0	9.3	9.3	8.49	0.913	—
J- 7	36.0	23.7	9.9	7.6	9.9	9.13	1.201	—
J- 8	36.0	20.9	6.0	4.6	4.5	4.71	1.024	—
J- 11	36.0	23.7	12.3	9.5	11.1	10.21	1.075	—
J- 13	36.0	26.2	16.3	12.6	10.8	8.99	0.713	45°
J- 14	47.4	27.1	3.6	1.6	4.2	2.57	1.606	45°
J- 16	47.4	29.0	5.4	2.4	6.0	3.43	1.429	30°
J- 19	47.3	29.8	7.5	3.4	9.0	5.02	1.476	50°
J- 20	47.3	29.3	9.6	4.3	6.6	3.74	0.870	—
J- 21	47.3	19.3	9.9	4.4	7.8	6.72	1.527	45°
J- 22	47.4	26.7	15.6	6.9	11.7	7.26	1.052	30°
J- 24	47.2	28.8	11.1	5.0	12.9	7.46	1.492	45°
J- 25	47.3	24.1	5.7	2.5	5.1	3.51	1.404	45°
J- 26	45.6	28.8	4.5	2.2	10.5	6.28	2.855	30°
J-100	36.1	25.3	9.7	7.4	9.0	7.75	1.047	—
J-101	36.0	26.2	1.2	0.9	4.5	3.75	4.167	45°
J-102	36.1	26.5	9.6	7.4	8.7	7.15	0.966	—
J-103	36.0	24.9	7.5	5.8	11.1	9.72	1.676	50°
J-104	36.2	23.0	11.4	8.7	9.9	9.35	1.075	30°
J-109	47.4	26.2	4.5	2.0	2.7	1.71	0.855	25°
J-110	47.3	24.3	21.6	9.7	17.1	11.70	1.206	45°
J-111	47.2	28.3	10.8	4.8	4.8	2.83	0.590	45°
J-112	47.3	19.8	7.2	3.2	3.3	2.77	0.866	—
J-113	47.2	21.1	5.1	2.3	4.8	3.78	1.643	—
J-116	47.3	31.0	10.2	4.6	9.9	5.31	1.154	45°

l_a : Point-load strength anisotropy index(I_{sa}/I_{sd})

β : Dip angle the weakness plane.

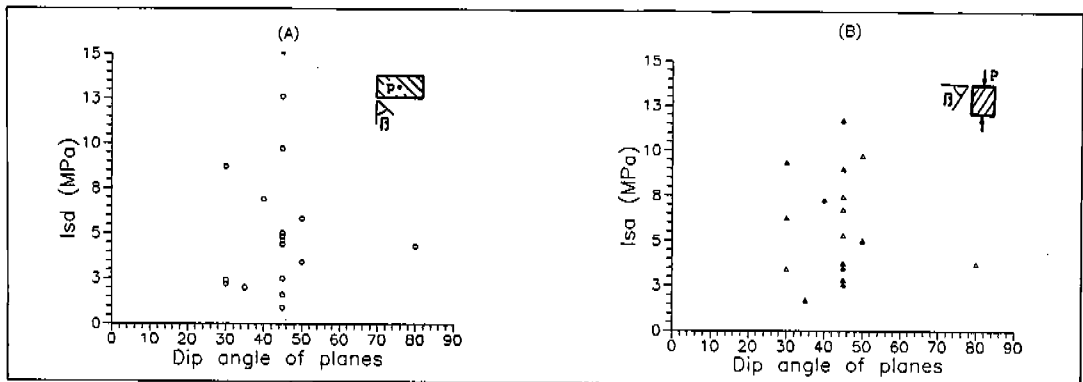


Fig. 10 The variation of (A) diametral P/L strength index, (B) axial P/L strength with the dip angle of bedding in Limestones.

점재하 강도지수는 취약면의 경사각에 대해서 뚜렷한 변화가 보이지 않았다.

탄성과 속도와 점재하 강도지수 관계

P파 속도 및 S파 속도와 점재하 강도지수 관계는 Fig. 11과 같다. 직경방향의 점재하 강도지수(I_{sd})와 탄성과 속도, 축방향의 점재하 강도지수(I_{sa})와 탄성과 속도 관계에서 강도지수 증가에 따라 P파 속도는 다소 증

가하는 경향을 나타내지만 S파 속도는 강도 지수의 영향을 별로 받지 않는 것으로 보인다. 비록 직경방향의 점재하 강도지수와 축방향의 점재하 강도지수에 대한 P파의 속도가 비례 관계(직경방향의 경우 ; $V_p=98.5I_{sd}+4082.1$ m/sec, 축방향의 경우 ; $V_p=106.4I_{sa}+3954$ m/sec)를 보이나 분산이 심하며 상관관계는 $r=0.4$ 내외로 낮게 나타났다. 또한 직경방향의 점재하 강도지수와 축방향의 점재하 강도지수에 대한 S파 속도의 상관도는 $r=0.1$ 내외로 서로 무관한 것으로 생각된다.

최근에는 이방성 암석의 응력하에서 탄성과 속도의 변화에 관한 연구(谷口敬一郎, 1989)가 발표된 바 있으며 이러한 응력 변화에 따른 탄성과 속도 변화는 암석시료에 존재하는 균열의 존재를 입증하는 것이다. 실제로 암석에는 균열이 존재하므로 앞으로 강도시험과 탄성과 속도와의 비교연구 방향은 이러한 응력변화에 역점을 두어야 할 것이다.

結 論

사암, 세일, 석회암의 퇴적암류에 대한 기본 물성들을 구하고 탄성과 전파속도와 점재하 강도지수를 비교하였으며 이들의 상호관계를 다음과 같이 정리하였다.

(1) 밀도와 탄성과 속도의 관계에서 각 관계식은 사암에서는 $V_p=16300d-38719.3$, $V_s=11896.4d-29225.1$, 세일에서는 $V_p=4856d-10264.8$, $V_s=3519d-7841.3$ 이며, 석회암은 $V_p=4085d^2-20747d+303$, $V_s=3899d^2-21442d+318$ 의 관계식으로서 직선보다는 곡선형의 증가 경향을 보이며 밀도가 큰 세일의 탄성과 속도가 사암보다 작은 것은 세일의 층리면의 영향으로 보인다.

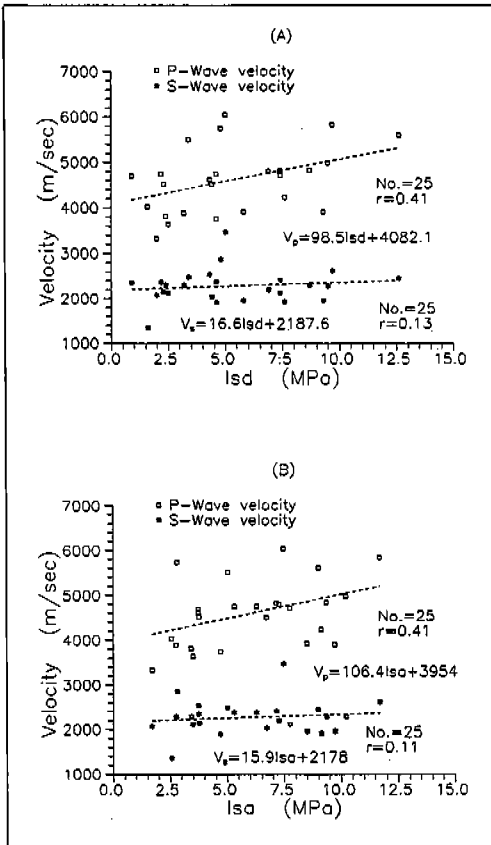


Fig. 11 The variation of velocity and (A)point-load strength index for diametral direction test, (B)point-load strength index for axial direction test.

(2) 석회암, 사암, 세일에 대한 P파 속도와 S파 속도의 변화는 서로 비례관계를 보이고 각 관계식은 $V_s=0.26V_p+1041.6m/sec$, $V_s=0.43V_p+424.2m/sec$, $V_s=0.51V_p+261.9m/sec$ 이며 상관도는 각각 $r=0.88$, $r=0.75$, $r=0.86$ 으로 산출되었으며 속도의 크기는 사암, 석회암, 세일의 순으로 나타났다.

(3) 석회암에 대한 점재하 강도시험 결과, 일부 호상구조를 보이는 암석에서 흔히 보이는 강도 이방성 현상이 거의 나타나지 않았다. 이는 층리면 경사각의 크기가 대부분 45°의 범위로 일정한 편이어서 층리면 경사각의 크기변화가 직경방향의 강도지수와 축방향의 강도지수에 뚜렷한 영향을 미치지 않았기 때문으로 생각된다.

(4) 점재하 강도시험 결과, 점재하 강도지수 증가에 따라 P파 속도는 증가하는 경향을 보이지만 관계식은 $V_p=98.5I_s+4082.1m/sec$, $V_p=106.4I_d+3954m/sec$ 으로 $r=0.4$ 내외의 상관관계가 낮게 나타났다.

(5) 암석의 물성 비교는 비교적 객관적이고 정량적 기준이 된다는 측면에서 암반 분류의 표준자료가 될 수는 있으나 매질의 성분과 조직상의 미세한 차이, 측정상의 약간의 조건차이등이 많은 결과차이를 나타내므로 심도 깊은 정밀 측정 연구가 요망된다.

參考文獻

김영화, 홍순호, 1990, 풍화현상에 수반되는 화강암의 물성변화에 관한 연구, 대한광산지질학회지, 23, pp.221-232.
 류미애, 1991, 화강암의 탄성과 전파속도와 역학적 물성과의 비교, 충남대학교대학원 석사학위논문, 76p.

배대석, 1991, 충남 청양군 일원에 분포되는 편마암의 암석역학적 특성, 충남대학교 대학원 석사학위논문, 85p
 송무영, 우영균, 1992, 한반도 중부권 지각물질의 구조와 물성연구(1) : 천수만 주변의 지질, 한국지구과학회지, 13, pp.53-65.
 신희순, 현병구, 1986, 함수 및 온도에 따른 암석의 탄성과 파속도와 동탄성계수의 변화에 관하여, 대한광산학회지, 23, pp. 382-391
 장기홍, 손진담, 1990, 경상분지 야외지질 조사-백악기 경상계층군의 층서 및 퇴적 지질, 90년도 제2차 석유개발기술강연회, 127p.
 홍순호, 최위찬, 1978, 한국지질도 금산도폭(1 : 50,000), 자원개발연구소.
 穀口敬一郎, 楠見晴重, 1989, 異方性 岩石の 軸差應力下에서의 縱波傳播速度에 관한 研究. 物理探査, 42, pp. 271-278.
 齊藤德美, 阿部司, 九里尚一, 1974, 火山岩の 風化に 關する 研究(II)-彈性波 速度・ 見掛密度・有效空隙率・1軸壓縮 強さ相互の關について-, 물리탐광, 27, pp.16-26.
 Brock, E., 1983, Estimation of strength anisotropy using the Point-Lord Test, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., 20, pp. 181-187.
 Danbom, S.H. and Domenico, S.N., 1987. Shear-Wave Exploration, Geophysical Development Series, 1, pp. 3-17.
 Greminger, M., 1982, Technical Note : Experimental studies of the influence of rock anisotropy on size and shape effects in point-loading testing, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 19, pp. 241-246.

- Hoek, E., Bieniawski, Z.T., 1965, Brittle fracture propagation in rock under compression, *Journal of Fracture Mech.*, 1, pp. 137-155.
- ISRM, 1979, Suggested methods for determining water content, porosity, density absorption and related properties and swelling and slakedurability index properties, *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstra.*, 16, pp. 141-156.
- ISRM, 1985, Suggested method for determining point load strength, *Int. J. Rock Mech. Min. SCI. & Geomech Abstr.*, 22, pp. 53-59.
- Judd, W. and Huber, C., 1961, Correlation of rock properties by statistical method, *Int. Symp. Mining Res., Missouri Sch, Mines, Rolla, Mo.*
- King, M.S., 1966, Wave velocities in rock as a function of changes in overburden pressure and pore fluid saturations, *Geophysics*, 31, pp. 50-73.
- Lama, R.D. & Vutukuri, V.S., 1978, *Handbook on mechanical properties of rocks*, Trans Tech Publications, 2, pp. 236-307.
- Rzhevsky, V. and Novik, G., 1971, *The physics of rocks*, Mir Publishers, Moscow, pp. 107-131.
- Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R. and Gardner, G.H. F., 1958, An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media, *geophysics*, 23, pp. 459-493.
-
- 송무영, 황인선
충남대학교 자연과학대학, 지질학과
대전직할시 유성구 궁동 220
305-764
TEL : (042)861-6423