

## 퇴적암 암반의 동탄성 특성에 관한 연구

이수곤, 이벽규, 최호순 (서울시립대)

### 1. 서론

퇴적암 분포지역 중 사암과 셰일의 호층 분포지역에서 307개의 현장 취득 자료를 이용하여 동적 특성을 분석하였으며, 퇴적암은 암반 특성상 층리가 발달된 쇄설성 퇴적암과 층리가 발달하지 않는 화학적 퇴적암으로 구분되며 층리가 발달하지 않는 암반은 화강암과 유사한 성격을 띠고 있기 때문에 분석대상에서 제외하고 층리가 발달한 사암과 셰일의 호층을 대상으로 자료를 수집하여 분석을 시도하였다.

암반의 분류는 표 1, 2, 3, 4와 같고, 암반별 탄성과 속도와 동탄성은 표 5에 정리하였다.

표 1. Classification of rock masses

구분	Classification of rock masses			
Strength	S-1	S-2	S-3	S-4
Weathering grade	D-1	D-2	D-3	D-4
RQD(%)	RQD(%) > 75	75 > RQD(%) > 50	50 > RQD(%) > 25	RQD(%) < 25
Classification	Good rock masses	Fair rock masses	Poor rock masses	

표 2. Strength of intact rock material(after ISRM, 1995)

구분	Qualitative description	Compressive strength(MPa)	Point load strength(MPa)	Rating
S-1	Exceptionally strong	>250	>8	15
S-2	Very strong	100-250 50-100	4-10 2-4	12 7
S-3	Midium strong	25-50	1-2	4
S-4	Weak	5-25	Use of uniaxial compressive strength is preferred	2
S-5	Very weak Extremely weak	1-5 <1		1 0

표 3. Engineering characterization of weathering/alteration(after ISRM, 1979c)

Grade	Term for weathering /alteration	Description
D-1	Fresh	No visible sing of weathering. Rock fresh, crystals bright. Few discontinuities may show slight staining.
D-2	Slightly weathered	Penetrative weathering developed on open discontinuity surfaces but only slight weathering of rock material. Discontinuities are discoloured and dis-coloration can extend into rock up to a few mm from discontinuity surface.
D-3	Moderately weathered	Slight discoloration extend through the rock mass. The rock material is not friable(except in the case of poorly cemented sedimentary rocks). Discontinuities are stained and/or contain a filling comprising altered materials.
D-4	Highly weathered	Weathering extends throughout rock mass and the rock material is partly friable. Rock has no lustre. All material except quartz is discoloured. Rock can be excavated with geologist's pick.
D-5	Completely weathered	Rock is totally discoloured and decomposed and in a friable condition with only fragments of the rock texture and structure preserved. The external appearance is that of a soil.
Soil	Residual soil	Soil material with complete disintegration of texture, structure and mineralogy of the parent rock.

표 4. Discontinuity aperture(after Brown, 1995)

Aperture	Description	Remarks
<0.1mm	Very tight	Closed
0.1-0.25mm	Tight	
0.25-0.5mm	Partly open	
0.5~2.5mm	Open	Gaped
2.5-10mm	Moderately wide	
>10mm	Wide	
1-10cm 이상	Open	Open
10-100cm	Extremely wide	
>1m	Cavernous	

표 5. Maximum, minimum and mean values of Sandstone and Shale on the seismic velocities and the dynamic elastic modulus

Rock Masses		Min.	Max.	Mean	표준편차
Good rock masses	$V_p$ (m/sec)	3,001.00	5,015.00	3,892.78	487
	$V_s$ (m/sec)	1,038.00	2,994.00	2,191.27	395
	$E_d$ (GPa)	8.06	57.56	32.55	10.51
	$G_d$ (GPa)	2.80	24.22	13.11	4.68
	$K_d$ (GPa)	9.07	37.47	23.21	6.18
	$\nu_d$	0.06	0.44	0.26	0.07
Fair rock masses	$V_p$ (m/sec)	2,070.00	4,540.00	3,137.90	662
	$V_s$ (m/sec)	521.00	2,326.00	1,323.42	366
	$E_d$ (GPa)	2.07	32.81	13.35	6.59
	$G_d$ (GPa)	0.71	14.61	4.92	2.73
	$K_d$ (GPa)	6.73	41.25	20.13	8.80
	$\nu_d$	0.12	0.47	0.38	0.07
Poor rock masses	$V_p$ (m/sec)	527.00	2,070.00	1,368.37	355
	$V_s$ (m/sec)	182.00	1,330.00	703.27	237
	$E_d$ (GPa)	0.17	9.21	3.38	2.15
	$G_d$ (GPa)	0.06	4.18	1.33	0.92
	$K_d$ (GPa)	0.42	7.87	3.03	1.73
	$\nu_d$	0.10	0.44	0.31	0.08

표 5. 에서 보여주듯이 사암과 셰일의 호층을 암반분류상 경암반, 보통암반, 연암반 이하로 구분하여 각 암반별 물성을 계산한 결과,

- 1) 경암반에서는  $V_p=3,001\text{m/sec}\sim 5,015\text{m/sec}$ 의 범위에,  $V_s=1,038\sim 2,994\text{ m/sec}$ 의 범위에,  $E_d=8.06\text{GPa}\sim 57.56\text{GPa}$ ,  $G_d=2.80\text{GPa}\sim 24.22\text{GPa}$ ,  $K_d=9.07\text{ GPa}\sim 37.471\text{GPa}$ ,  $\nu_d=0.06\sim 0.44$ 의 범위에 속하고 있다.
- 2) 보통암반에서는  $V_p=2,070\text{m/sec}\sim 4,540\text{m/sec}$ 의 범위에,  $V_s=521\sim 2326\text{ m/sec}$ 의 범위에,  $E_d=2.07\text{GPa}\sim 32.81\text{GPa}$ ,  $G_d=0.71\text{GPa}\sim 14.61\text{GPa}$ ,  $K_d=6.73\text{ GPa}\sim 41.25\text{GPa}$ ,  $\nu_d=0.12\sim 0.47$ 의 범위에 속하고 있다.
- 3) 연암반 이하에서는  $V_p=527\text{m/sec}\sim 2070\text{m/sec}$ 의 범위에,  $V_s=182\sim 1,330\text{ m/sec}$ 의 범위에,  $E_d=0.17\text{GPa}\sim 9.21\text{GPa}$ ,  $G_d=0.06\text{GPa}\sim 4.18\text{GPa}$ ,  $K_d=0.42\text{ GPa}\sim 7.87\text{GPa}$ ,  $\nu_d=0.10\sim 0.44$ 의 범위에 속하고 있다는 것을 볼 수 있다.

## 2. 압축파속도와 전단파속도와의 상관관계 ( $V_p/V_s$ )

전단파속도를 압축파속도와 비교 분석하면 암석의 여러 공학적 특성을 해석할 수 있다. 실험에 의하면 전단파속도는 압축파속도에 비하여 암석 내에 발달되어 있는 파쇄나 절리에 민감한 반응을 나타내는 것으로 알려져 있다. 전단파는 파쇄대를 전파할 때 압축파에 비하여 더

속 심하게 감소되므로 전단파 단면도 상에는 진폭의 변화가 나타난다. 따라서 어떤 특정한 층서 단위 내에서 전단파속도 또는  $V_s/V_p$  의 수평적 변화를 검토하면 미 고결화(Cementation)나 파쇄의 정도, 또는 절리의 발달상태 등을 추정하는데 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있다(민경덕, 1987).

사암과 셰일의 호층의 전체평균은  $V_s=0.5430 \times V_p$ 의 상관관계식이 도출되었으며, 이때의 결정계수는 0.9662로 매우 높은 상관도를 보이고 있다(그림 1).

사암과 셰일의 호층에서의 압축파와 전단파속도와의 상관성을 정리하면 다음의 관계식과 같다.

$$\text{전체 평균} ; V_s = 0.5430 \times V_p \quad (1.1)$$

$$\text{경암반} ; V_s = 0.5645 \times V_p \quad (1.2)$$

$$\text{보통암반} ; V_s = 0.4208 \times V_p \quad (1.3)$$

$$\text{연암반 이하} ; V_s = 0.5188 \times V_p \quad (1.4)$$

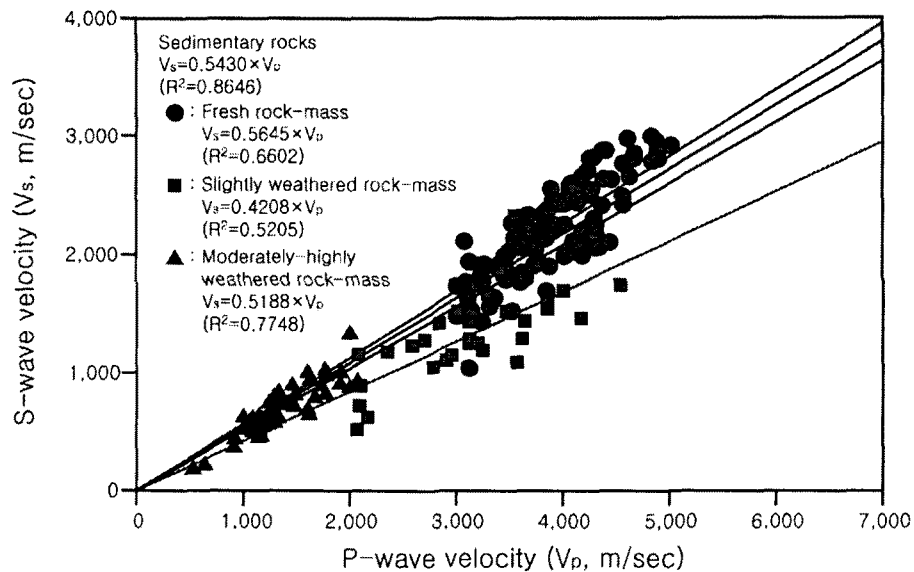


그림. 1. Relationship between P-wave velocity( $V_p$ ) and S-wave velocity( $V_s$ ) of Sandstone and Shale

### 3. 압축파 속도와 동적 특성과의 상관관계

압축파속도와 암질별 동적 특성을 종합하여 도시한 결과는 부록2에 정리하여 첨부하였으며, 본 연구에서 적용된 단위는 SI단위로서  $E_d$ ,  $G_d$ ,  $K_d$ 는 GPa를 사용하였고, 탄성파속도( $V_p$ ,  $V_s$ )는 m/sec를 사용하였다.

#### 3.1 압축파속도와 동탄성계수와의 비교( $E_d/V_p$ )

사암과 셰일의 호층 중 경암반에서의 압축파속도와 동탄성계수 간의 상관성을 분석한 결과는 그림. 2에서 보여주는 것처럼,

$$E_d = 2.66 \times 10^{-6} \times V_p^2 - 1.80 \times 10^{-3} \times V_p - 1.35 \quad (3,000 \leq V_p \leq 5,100) \quad (2.1)$$

와 같이 2차함수로 관계식이 유도되고, 결정계수도 0.7821로 신뢰성이 있는 관계식이 도출되었다. 한편 보통암반에서는

$$E_d = -1.66 \times 10^{-6} \times V_p^2 + 1.77 \times 10^{-2} \times V_p - 25.00 \quad (2,000 \leq V_p \leq 4,600) \quad (2.2)$$

상관 관계식을 가지며 결정계수는 0.5486으로 다소 신뢰성 있는 결과를 도출하였다(그림. 3). 연암반 이하의 경우 압축과속도에 대한 동탄성계수의 상관관계식은,

$$E_d = 5.46 \times 10^{-3} \times V_p - 4.09 \quad (750 \leq V_p \leq 2,200) \quad (2.3)$$

이때의 결정계수( $R^2$ )는 0.8091로 신뢰성 있는 결과를 도출하였다.(그림. 4)

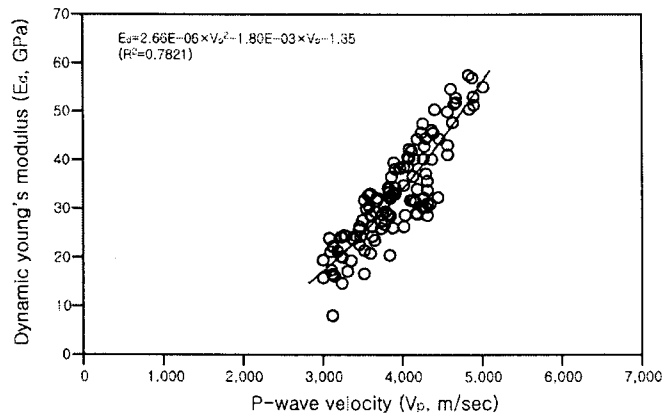


그림. 2. Relationship between  $V_p$  and  $E_d$  in good rock masses of Sandstone and Shale

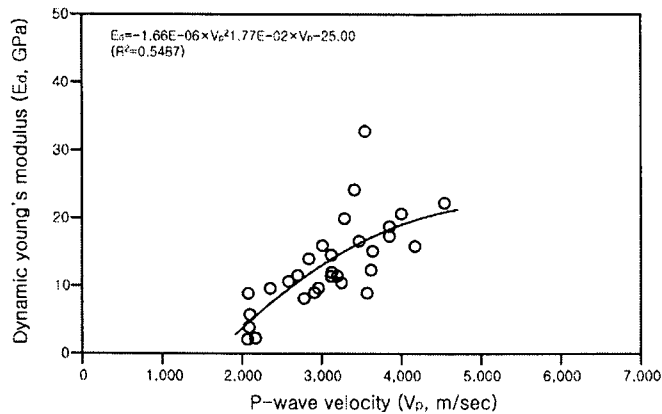


그림. 3. Relationship between  $V_p$  and  $E_d$  in fair rock masses of Sandstone and Shale

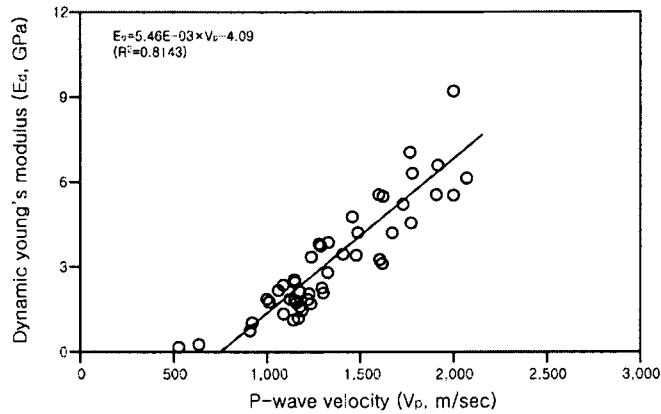


그림. 4 Relationship between  $V_p$  and  $E_d$  in poor rock masses of Sandstone and Shale

### 3.2 압축파 속도와 동전단계수와의 상관관계( $G_d/V_p$ )

사암과 셰일의 호층 중 경암반에서의 압축파속도와 동전단계수간의 상관성을 분석한 결과는 그림. 5에서 보여주는 것처럼 2차 함수로 관계식이 유도되며,

$$G_d = 1.08 \times 10^{-6} \times V_p^2 - 5.34 \times 10^{-4} \times V_p - 1.36 \quad (3,000 \leq V_p \leq 5,100) \quad (2.4)$$

과 같이 2차함수로 관계식이 유도되고 결정계수도 0.6784로 신뢰성이 있는 것으로 분석되었다. 보통암반인 경우 압축파속도에 대한 동전단계수와의 상관관계는

$$G_d = -7.80 \times 10^{-7} \times V_p^2 + 7.51 \times 10^{-3} \times V_p - 10.63 \quad (2,000 \leq V_p \leq 4,700) \quad (2.5)$$

의 상관 관계식을 가지며 결정계수는 0.9185로 신뢰성 있는 결과를 도출하였다.(그림. 6) 연암반의 경우 압축파속도에 대한 동전단계수의 상관관계식은 (그림. 7)

$$G_d = 2.21 \times 10^{-3} \times V_p - 1.70 \quad (750 \leq V_p \leq 2,200) \quad (2.6)$$

이때의 결정계수( $R^2$ )는 0.6945로 다소 신뢰성 있는 결과를 도출하였다.(그림. 7).

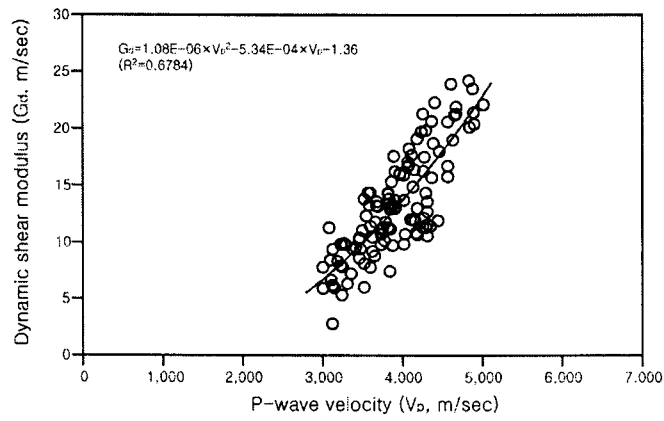


그림. 5 Relationship between  $V_p$  and  $G_d$  in good rock masses of Sandstone and Shale

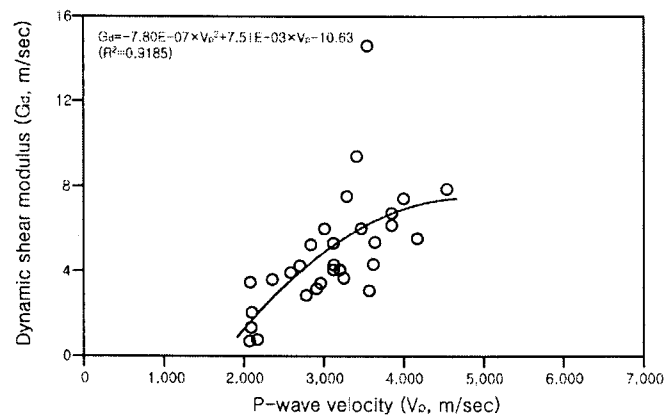


그림. 6 Relationship between  $V_p$  and  $G_d$  in fair rock masses of Sandstone and Shale

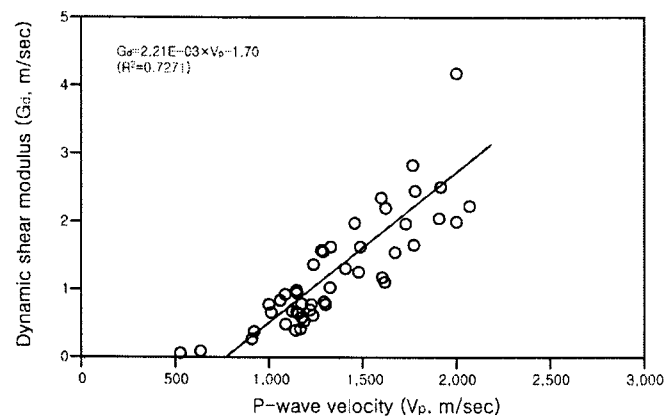


그림. 7 Relationship between  $V_p$  and  $G_d$  in poor rock masses of Sandstone and Shale

### 3.3 압축파 속도( $V_p$ )와 동체적계수( $K_d$ )의 상관관계

압축파속도와 동체적계수간의 상관성을 분석한 결과 경암반에서는

$$K_d = 1.30 \times 10^{-6} \times V_p^2 + 2.79 \times 10^{-4} \times V_p + 2.15 \quad (2,800 \leq V_p \leq 5,000) \quad (2.7)$$

과 같이 2차함수로 관계식이 유도되고 결정계수( $R^2$ )도 0.6827로 신뢰성이 있는 것으로 분석되었다.(그림. 8)

보통암반인 경우 압축파속도에 대한 동체적계수와의 상관관계는

$$K_d = 2.89 \times 10^{-6} \times V_p^2 - 5.56 \times 10^{-3} \times V_p + 7.92 \quad (2,000 \leq V_p \leq 4,700) \quad (2.8)$$

의 상관 관계식을 가지며 결정계수( $R^2$ )는 0.9023으로 매우 신뢰성 있는 결과를 도출하였다.(그림. 9).

연암반 이하의 경우 압축파속도에 대한 동탄성계수의 상관관계식은

$$K_d = 1.57 \times 10^{-6} \times V_p^2 - 1.62 \times 10^{-5} \times V_p - 0.08 \quad (500 \leq V_p \leq 2,200) \quad (2.9)$$

이고, 이때의 결정계수( $R^2$ )는 0.9260으로 매우 신뢰성 있는 결과가 도출되었다. (그림. 10)

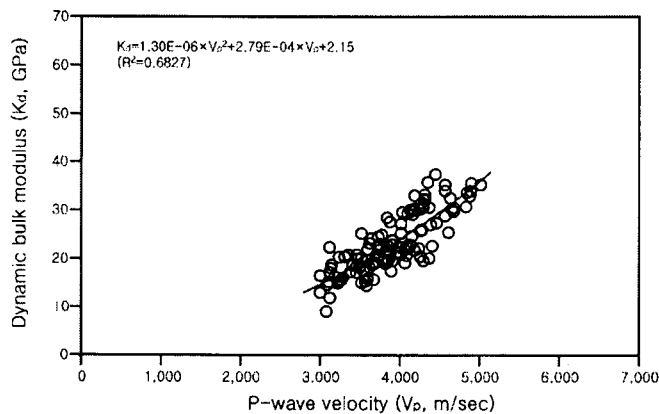


그림. 8 Relationship between  $V_p$  and  $K_d$  in good rock masses of Sandstone and Shale



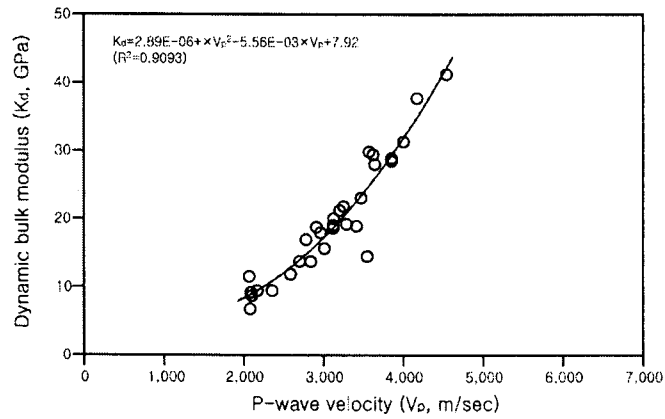


그림. 9 Relationship between  $V_p$  and  $K_d$  in fair rock masses of Sandstone and Shale

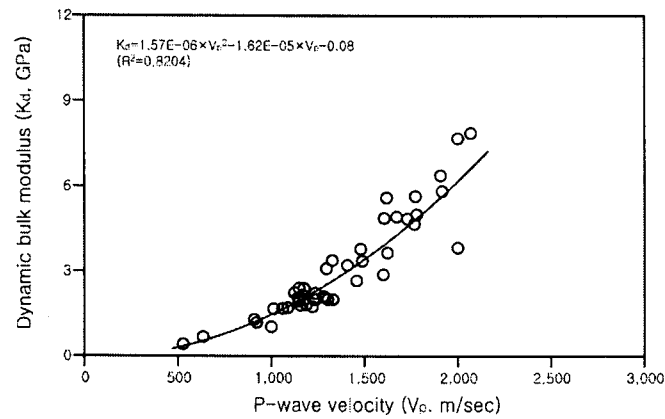


그림. 10 Relationship between  $V_p$  and  $K_d$  in poor rock masses of Sandstone and Shale

#### 4. 전단파 속도와 동적 특성과의 상관관계

전단파속도와 암질간의 종합 비교 분석 결과는 부록2에 정리하였으며, 본 연구에서 적용된 단위는 SI단위로서  $E_d$ ,  $G_d$ ,  $K_d$ 는 GPa를 사용하였으며, 탄성파속도( $V_p$ ,  $V_s$ )는 m/sec를 사용하였다.

##### 4.1 전단파 속도와 동탄성계수와의 상관관계 ( $E_d/V_s$ )

사암과 셰일의 호층에서의 전단파속도와 동탄성계수 간의 상관성을 분석한 결과는 그림. 11 그림. 12, 그림. 13에서 보여주는 것처럼 모든 암반에서 2차 함수로 관계식이 유도되었다,

$$E_d = 4.95 \times 10^{-6} \times V_s^2 + 4.49 \times 10^{-3} \times V_s - 1.81 \quad (1,000 \leq V_s \leq 3,000) \quad (3.1)$$

$$E_d = 3.58 \times 10^{-6} \times V_s^2 + 8.17 \times 10^{-3} \times V_s - 4.21 \quad (500 \leq V_s \leq 2,400) \quad (3.2)$$

$$E_d = 3.01 \times 10^{-6} \times V_s^2 + 4.29 \times 10^{-3} \times V_s - 1.29 \quad (250 \leq V_s \leq 1,400) \quad (3.3)$$

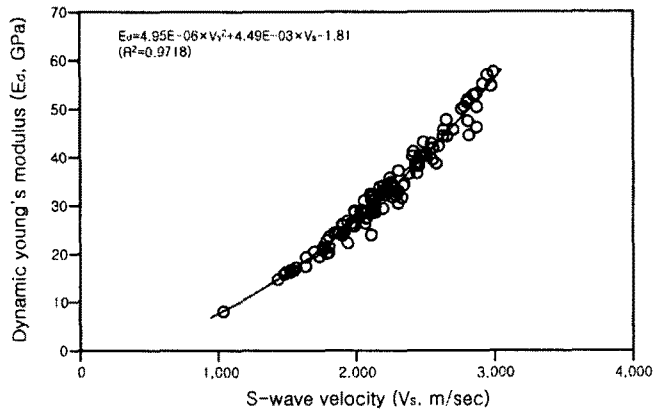


그림. 11 Relationship between  $V_s$  and  $E_d$  in good rock masses of Sandstone and Shale

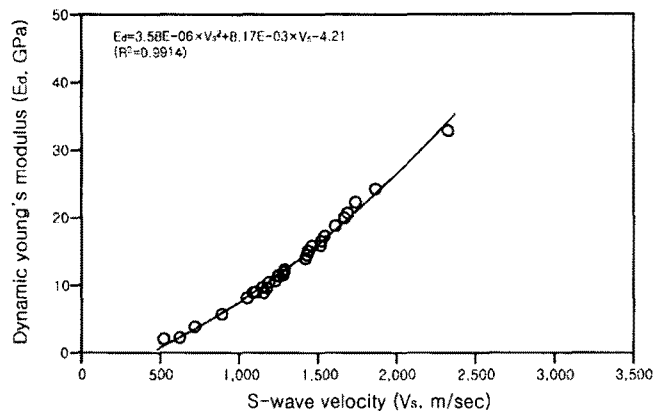


그림. 12 Relationship between  $V_s$  and  $E_d$  in fair rock masses of Sandstone and Shale

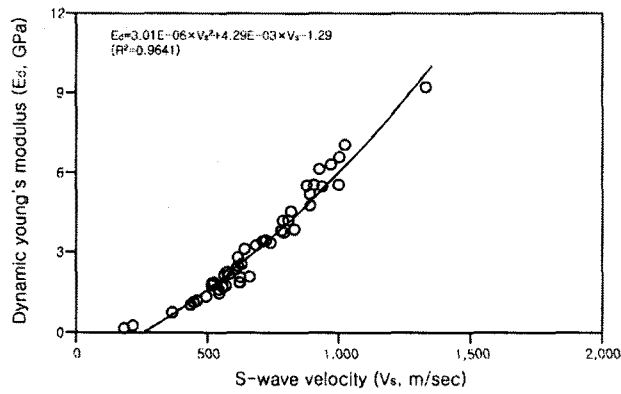


그림. 13 Relationship between  $V_s$  and  $E_d$  in poor rock masses of Sandstone and Shale

#### 4.2 전단파 속도와 동전단계수와의 상관관계( $G_d/V_s$ )

사암과 셰일의 호층에서의 전단파속도와 동전단계수 간의 상관성을 분석한 결과는 그림. 14 그림. 15, 그림. 16에서 보여주는 것처럼 모든 암반에서 2차 함수로 관계식이 유도되었다,

$$G_d = 2.77 \times 10^{-6} \times V_s^2 - 3.84 \times 10^{-3} \times V_s + 0.22 \quad (1,000 \leq V_s \leq 3,000) \quad (3.4)$$

$$G_d = 2.87 \times 10^{-6} \times V_s^2 - 4.81 \times 10^{-4} \times V_s + 0.16 \quad (500 \leq V_s \leq 2,400) \quad (3.5)$$

$$G_d = 2.15 \times 10^{-6} \times V_s^2 + 5.43 \times 10^{-4} \times V_s - 0.24 \quad (250 \leq V_s \leq 1,400) \quad (3.6)$$

과 같이 2차함수로 관계식이 유도되고 결정계수도 0.9923, 0.9992, 0.9876으로 매우 신뢰성이 높게 분석되었다.

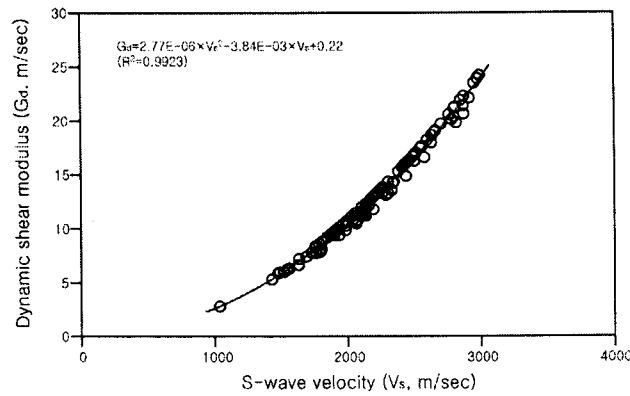


그림. 14 Relationship between  $V_s$  and  $G_d$  in good rock masses of Sandstone and Shale

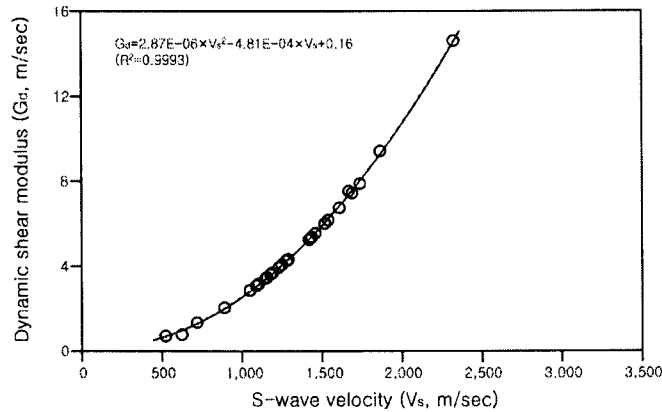


그림. 15 Relationship between  $V_s$  and  $G_d$  in fair rock masses of Sandstone and Shale

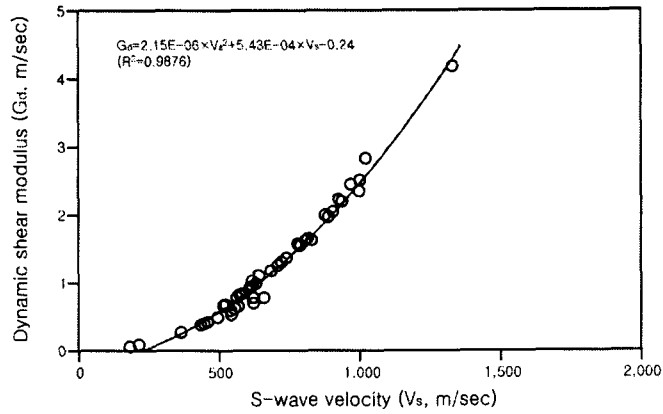


그림. 16 Relationship between  $V_s$  and  $G_d$  in poor rock masses of Sandstone and Shale

#### 4.3 전단파속도와 동체적계수간의 상관관계( $V_s/K_d$ )

사암과 셰일의 호층에서의 전단파속도와 동체적계수와의 상관성을 회귀분석을 하기 위하여 XY 좌표에 데이터를 도시한 결과 모든 암반조건에서 분산도가 너무 심하여 상관관계식의 도출에 신뢰도가 약하다고 판단되어 상관관계식을 도출하지 않았다.(그림. 17 그림. 18, 그림. 19 참조)

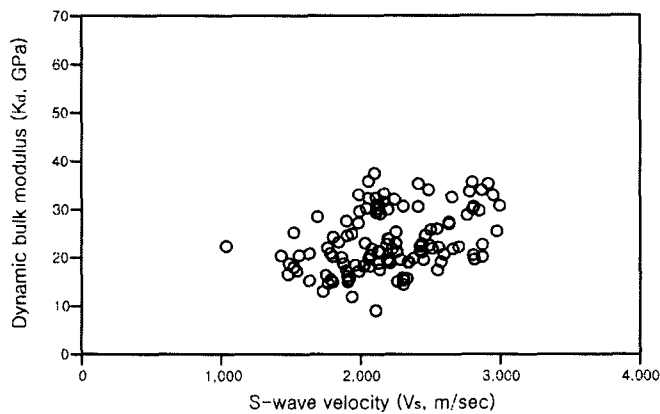


그림. 17 Relationship between  $V_s$  and  $K_d$  in good rock masses of Sandstone and Shale

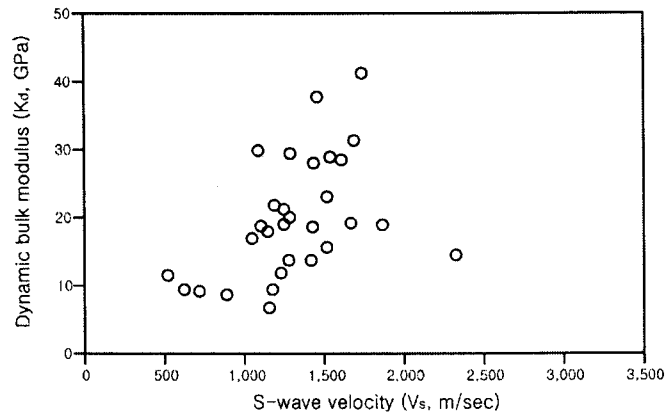


그림. 18 Relationship between  $V_s$  and  $K_d$  in fair rock masses of Sandstone and Shale

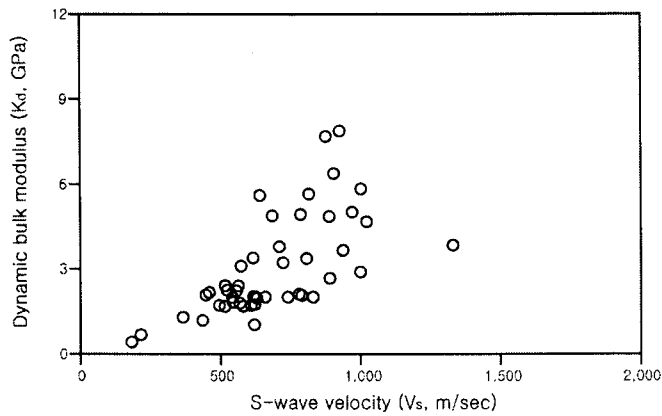


그림. 19 Relationship between  $V_s$  and  $K_d$  in poor rock masses of Sandstone and Shale

## 5. 결 론

국내 28개 지역에서 수행한 원위치 시험을 통하여 수집된 1500여개의 압축파속도와 전단파속도 및 원위치 밀도를 이용하여 전산처리를 통한 탄성과 속도와 암반의 동적 특성간의 상관성을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 압축파(종파, Compressional wave,)속도와 전단파(횡파, Shear wave,)속도와의 상관성을 분석한 결과, 사암과 셰일의 호층에서는  $V_s=0.5645 \times V_p$ 에서  $V_s=0.5188 \times V_p$ 로 풍화의 정도와 반드시 일치하지는 않는다는 결과가 도출되었다.
- 2) 압축파속도( $V_p$ )와 암반의 동적 특성( $E_d$ )과의 상관성을 분석한 결과는 다음과 같다.  
경암반에서  $E_d=2.66 \times 10^{-6} \times V_p^2 - 1.80 \times 10^{-3} \times V_p - 1.35$ 와 보통암반에서는  $E_d=-1.66 \times 10^{-6} \times V_p$

$^2+1.77\times 10^{-2}\times V_p-25.00$ 와 연암반 이하에서는  $E_d=5.46\times 10^{-3}\times V_p-4.09$ 의 상관관계식이 도출되었다.

3) 전단파속도( $V_s$ )와 암반의 동적 특성( $E_d$ ) 간에는 .

경암반에서  $E_d=4.95\times 10^{-6}\times V_s^2+4.49\times 10^{-3}\times V_s-1.81$ 와 보통암반에서는  $E_d=3.58\times 10^{-6}\times V_s^2+8.17\times 10^{-3}\times V_s-4.21$ 와 연암반 이하에서는  $E_d=3.01\times 10^{-6}\times V_s^2+4.29\times 10^{-3}\times V_s-1.29$  상관관계식이 도출되었다.

4) 탄성파속도와 암반의 동탄성과의 상관관계는 암반을 분류하지 않고 상관성을 대비하는 것 보다는 암반을 경암반, 보통암반, 연암반 이하로 구분하여 대비하는 것이 각 상관 인자간의 상관성을 높일 수 있다는 결론을 얻었다.

5) 전단파속도와 동체적계수와의 분산도가 심하여 상관성이 거의 없는 것으로 분석되었는데 이는 본 연구 대상 중 사암과 셰일의 호층이 지층구조가 경사 15도 내외의 수평층이며, 사암과 셰일이 불규칙한 호층구조로 암반의 풍화정도가 차이내기 때문으로 분석되었다.

## 사 사

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(사면붕괴 예측 및 대응기술 개발) 연구비의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 고광범, 하희상, 임해룡, 2005, 터널구간 암반분류를 위한 탄성과 기준 속도비의 제안, 한국물리탐사학회, pp.39-42.
2. 고정민, 2006, 편마암 지역에서의 전단파 속도와 암질과의 상관성 연구, 서울시립대학교 석사 논문, pp.11-12, pp.33-34.
3. 권병두 정도홍, 이치용, 1993, 제주도에 분포하는 화산암류의 물리적 특성, 지구과학회지, 제14권 제2호, pp.348-357.
4. 권병두, 진홍성, 1987, 탄전지역에 분포하는 퇴적암류의 물리적 특성 연구, 지구과학회지, 제18권, 제3호, pp.133-142.
5. 김교원 외, 2006, 한반도의 암종별 공학적 특성의 상관성 분석, 지질공학회, 제16권, 1호, pp.59-68.
6. 목영진 외, 2005, 횡방향 발진 크로스홀 탄성과 시험을 이용한 지반의 동적 특성 평가, 한국물리탐사학회 제7회 특별 심포지움, pp.155-174.
7. 민경덕 외, 1987, 응용지구물리학, 우성문화사, pp.660-665.

8. 박연준 외, 2003, 동결-융해 시험에 의한 화강암의 풍화 특성 연구, 터널과 지하공간, 제 13권, 제3호, pp.215-224.
9. 박충화 외, 2002, 시추공 물리탐사를 이용한 동탄성계수와 암상과의 상관성 분석, 한국지구과학회지, 제23권, 제6호, pp.507-513.
10. 선창국 외, 2005, 인홀 탄성과 시험을 이용한 암반의 동적 강성 평가, 지질공학회지, 제 15권, 3호, pp.309-323.
11. 손호웅, 1998, 지반환경 물리탐사, 시그마프레스, pp.17-20.
12. 이벽규 외, 2004, 암종별 동탄성계수 특성, 2004 대한지질공학회 정기총회 및 학술발표회, pp.59-65.
13. 이벽규, 2003, 암반분류별 동탄성계수 특성 연구, 서울시립대학교, 석사 논문, pp.63-65.
14. 이벽규, 이수곤, 임백만, 2007, 화강암 암반의 암질에 따른 동탄성 특성에 관한 연구, 한국암반공학회지, Vol.17, (발간중).
15. 이벽규, 이수곤, 임백만, 2007, 편마암의 동탄성 특성에 관한 연구, 대한지질공학회지, Vol.17, (발간중).
16. 이수곤, 이벽규, 최우일, 2003, 화강암의 동탄성계수 특성 연구, 2003년도 대한토목학회, 정기학술대회 초청 및 구두 발표논문 초록집 p.249.
17. 이영국, 1999, 서울지역 지반특성 및 지하철 암반정의 개선방안에 관한 연구, 서울시립대학교, 석사 논문, pp.23-31.
18. 이희근, 1987, 응용암석역학, 서울대 출판부, pp.39-54.
19. 장현삼 외, 2005, 시추공 탄성과탐사 및 이의 토목공학적 응용, 한국물리탐사학회, 제7회 특별 심포지움, pp.176-201.
20. 조철현, 변중무, 황세호, 2005, 속도 검층에서의 난제들, 한국물리탐사학회, pp.43-53.
21. 지질공학회, 2005, 물성연구(2) : 퇴적암류 코아시료의 탄성과 속도와 접하중강도 비교, 지질공학회지, vol 3, pp.21-37.
22. 하광현, 이강복, 정성재, 2001. 지하굴착과 지보, 이엔지북, pp.49-74.
23. 한국지반공학회, 1997, 진동 및 내진설계, 구미서관, p.71, pp.255-273.
24. 한국지반공학회, 2000, 토목기술자를 위한 암반공학Ⅱ, 구미서관, pp.216-270.
25. 현병구, 1995, 물리탐사 용어사전, 신일문화사.
26. 出雲谷聰, 1996, 縦波速度と横波速度を用いた岩石の孔隙率の評価について(1), 物理探査, 第49巻, 第2號, pp.197-209.
27. 出雲谷聰, 1997, 縦波速度と横波速度を用いた岩石の孔隙率の評価について(2), 物理探査, 第50巻, 第2號, pp.132-143.

28. 松枝 富士雄 外, 1996, サスペンション式PS検層による弾性波速度( $V_p$ ,  $V_s$ )と地質との対比, 物理探査 Vol.49, No.5, pp.360-371.
29. 阿部 司, 齊藤徳美, 1973, 火成岩의 含水에 따른 弾性波速度의 變化(1), 物理探査, vol.26, pp.195-205.
30. Barton, H. R. et al., Engineering classification of rock mass for the design of tunnel, Rock Mech 6, pp.189-239.
31. Barton, N., 1998, NMT support concepts for tunnel in weak rocks, Tunnel and metro polisers NEGRO Ferreeira Balkena Rotter dam.
32. Barton, N., 1999, Geotechnical Design, World Tunneling NOV 1991, pp.410-416.
33. Baule, H. and M. V. M. S. Rao, 1979, Seismoacoustic activity in a coal seam in Relevance to destressing, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.11, No.3, pp.177-187.
34. Bieniawski, Z. T., 1973, Engineering Classification of rock masses for the design tunnel supports, Rock. Mech. springer-verlag V.16, pp.189-216.
35. Bieniawski, Z. T., 1989, Engineering rock mass classification, John wiley Roter dam, p.251.
36. Bozozur, M., 1963, The Modulus of Elasticity of Lead Clay from Field Measurements, Canadian Geotechnical Journal, vol 1, No.1, pp.43-51.
37. Brown, E. T., 1995, Rock characterization testing and monitering ISRM suggested method, Pergamon press, pp.62-65, pp.107-136.
38. Bullen, K. E., 1954, Seismology : Methuen and Wiley. 1963 An introduction to the theory of seismology: Cambridge Univ. press.
39. Castagna, J. P., Batzel, M. L. and Eastwood, R. L., 1985. Relationship between compressional wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks, Geophysics, vol. 50, No.4, pp.571-581.
40. Catrin Edelbro, 2003, Rock masses Strength, A Review Department of civil Engineering Division of Rock Mechanics, pp.2-4, pp.47-66.
41. Deere, D. U., Miller, R. P., 1966, Engineering Classification and index properties for intack rocks, Technical Report No AFLTRE65-116 airface weapanis Laboratory, New Mexico, p.308.
42. Prange, B., 1978, Dynamic methods in soil and rock mechanics, A.A. BALKEMA.
43. Sassa, K., 1988, Suggested methods for seismic testing within and between



- boreholes, International journal of rock mechanics, vol.25, no.6, pp.447-459.
44. Shlumberger, 1989, Comparison of P-wave and S-wave velocities and Q's from vsp and sonic log data, Geophysics 59, pp.1512-1529.
  45. Telford, W.M, Geldart L.P., and Sheriff R.E., 1990, Applied geophysics 2nd ed, Cambridge Univ. press, p.770.
  46. Winterstein, D.F and Meadow, M.A, 1994, Comparison of p and s-wave velocities and Q's from vsp and sonic log data, Geophysics 59, pp.1512-1529.
  47. Wylie, M.R.J Gregory A.R and Gardamer G.H.F, 1958, An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media, V23, pp.439-493.
  48. Yoshikaeak, Shigera M, Tadao H, and Kiyoshi M., 1997, Correlation between the results of geophysical prospecting and geotechnical properties Soil and Foundation, The Japan Geotechnical Society, 45(9) Ser No 476, pp.11-14.