

절리암반에서의 탄성파 속도 특성

차민수*, 조계춘*1, 김재관*2, 최은석*3

1. 서론

암반(rock mass)은 내부에 절리를 가지고 있으며, 이로 인해 암반의 공학적 특성 및 거동은 연속체의 성격을 가지는 신선암(intact rock)과는 다른 경향을 나타낸다. 신선암과 같은 순수한 연속체에서는 응력이 암의 강성에 미치는 영향은 아주 작으며 따라서 탄성파 속도에 미치는 영향도 아주 작다. 그러나 암반에서는 작용하는 수직응력이 증가하면 탄성파 속도가 증가하고 댐핑(damping)이 감소한다(Fratta & Santamarina 2002). 이런 현상은 흙과 같은 입자매질에서도 두드러지는데 이는 응력에 의해 입자가 압축 또는 압밀이 되어 간극률이 작아지고 입자간 접지가 좋아져 강성이 커진데서 기인한다(Richart et al. 1970). 암반의 절리 또한 이러한 입자 매질의 성질과 비슷하다고 볼 수 있다.

절리를 가진 암반에서의 속도는 크게 변위불연속(displacement discontinuity) 모델과 유효탄성계수(effective elastic moduli) 모델로 나타낼 수 있다. 변위불연속 모델은 절리면을 탄성파 방정식의

경계조건으로 보며 절리면에서 탄성파 응력은 연속적이거나 변위는 불연속적이라고 가정한다. Pyrak-Nolte 등(1990a,b)은 변위불연속 모델을 이용하여 한 개 및 여러 개의 평행한 절리가 있는 매질에서 입사각과 주파수에 따른 탄성파 속도 및 진폭의 이방성을 연구하였다. Boadu & Long(1996)와 Boadu (1997)는 변위불연속 모델을 수정하여 절리 길이, 채움물질 성질 등 실제 절리특성을 나타내는 변수들을 고려할 수 있게 하였다. 한편 유효탄성계수 모델에서는 절리암반을 대표하는 하나의 유효탄성계수를 사용한다. 또한 탄성파의 파장이 절리 간격(joint spacing)보다 훨씬 크다고 가정하기 때문에 속도가 주파수의 영향을 받지 않아 등가연속체로 해석할 수 있다(White 1983; Fratta & Santamarina 2002).

현업에서 절리암반을 대상으로 수행된 현장 탄성파 탐사 결과를 이용하여 암반 상태를 평가하려는 많은 시도가 되어지고 있다. 그러나 암반의 역학적 거동을 좌우하는 절리의 여러 특성과 응력상태가 탄성파에 미치는 영향에 대한 연구는 전무한 실정으로서 탄성파로부터의 암반평가 결과에 대한 신뢰성이 의문시된다. 따라서 본 연구에서는 절리암반에서의 탄성파 파동인 장파 파동을 구현할 수 있는 실내 암석공진주시험 장치를 제작하고 암석공진주시험을

* 한국과학기술원 건설및 환경공학과 석사과정

*1 한국과학기술원 건설및 환경공학과 조교수
(gyechun@kaist.ac.kr)

*2 SK건설(주)부장

*3 (주)도담이앤씨 부장

통해 절리암반에서 응력상태별로 탄성과 속도가 절리의 여러 특성에 따라서 어떻게 변화하는지 알아보고자 한다. 또한 암반에서 탄성과 속도를 표현하고 예측할 수 있는 모델을 제시하여 측정된 탄성과 속도 변화를 정량화하고 비교하고자 한다. 이러한 정량화된 탄성과 속도와 절리 성질의 관계를 이용하여 암반 평가의 신뢰성을 높이고자 한다.

2. 실험 연구

2.1 암석공진주시험

Fratta & Santamarina (2002)는 암반이 등가연속체로 해석될 수 있도록 여러 개의 절리를 포함하는 절리암반에 전단파 장파 파동을 실험적으로 적용하였다. 암석공진주시험 장치는 Fratta & Santamarina(2002)가 고안한 장치에서 비틀전단파와 종파를 발생시키고 측정할 수 있도록 하였다. 그림 1에 나타내어져 있는 것처럼 가운데가 뚫려진

도너츠 형태를 가진 여러 개의 암석디스크가 수직으로 쌓여져 원형봉 모양을 이루고 있다. 암석디스크의 개수는 장파가 형성되어 Brillouin 영향에 의한 분산이 없어지고 절리암반이 등가연속체로 해석될 수 있도록 12~15개 정도로 정하였다. 또한 유한 길이의 원형봉에서 생길 수 있는 P와 분산이 사라지도록 원형봉의 반지름과 파장비(r/λ)가 0.05이하가 되도록 하였다. 고정-자유단 체계를 구현하기 위해 강성이 큰 금속고정단위에 암석디스크를 안치시켰다. 상단에는 가벼운 금속캡을 설치하고 하중 재하용 로드를 달아서 암석디스크 가운데 뚫려 있는 구멍사이로 통과시켰다. 캡에 대각선 방향으로 2개의 가속도계를 설치하였다.

캡상단에 미소 변형($\gamma < 10^{-5}$)을 가하여 파를 발생시킨다. 비틀자극을 유사정적(pseudo-static)인 변형에서 해방시킴으로서 고정-자유단 체계에 비틀진동(torsional vibration)을 발생시킨다. 종파의 경우 유사정적(pseudo-static)인 변형을 가하여 공진을 일으키는데 어려움이 있어서 캡 상단에 점하중(impulse)를 준 다음 원형봉 상단과 하단의 가속도

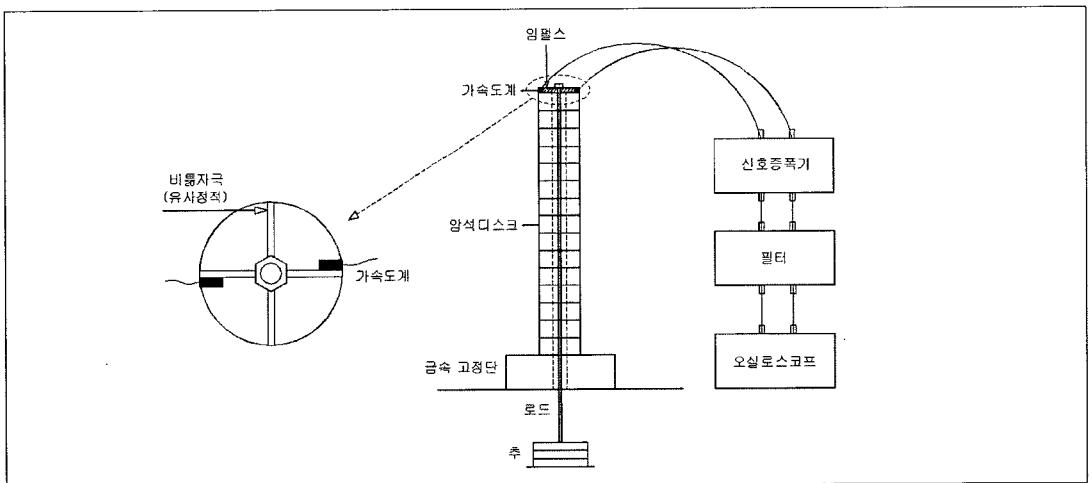


그림 1. 암석공진주시험 모식도

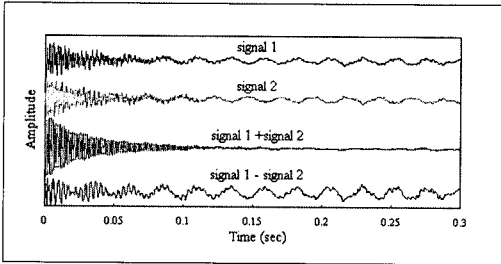


그림 2. 가속도계에 잡힌 시간영역의 신호와 합성신호

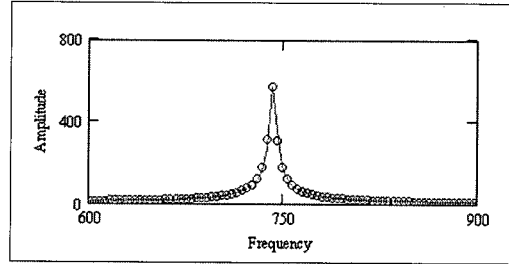


그림 3. 주파수 영역으로 처리된 신호

계에 잡힌 신호의 시간차(travel time)로 속도를 구하였다. 원주에 작용하는 응력을 변화시키기 위해 추를 재하 또는 제하하면서 하중 단계별로 실험을 실시하였다. 가속도계에서 감지된 신호는 신호증폭기(signal amplifier)와 신호필터(signal filter), 오실로스코프(oscilloscope)를 통해 저장되었다.

2.2 데이터 해석방법

저장된 신호들은 시간영역과 주파수영역에서 처리된다. 비틀 신호의 경우 휨 신호가 섞여 들어오므로 선명한 신호를 얻기 위해 가속도계 위치의 대칭성을 이용한다. 시간영역으로 저장된 원래의 두 신호(signal 1과 signal 2)는 고주파수 신호인 비틀신호와 저주파수 신호인 휨신호를 함께 포함하고 있다. 두 신호를 더하면(signal 1+signal 2) 휨신호는 사라지고 비틀신호만 나타나며, 두 신호를 빼면(signal 1-signal 2) 비틀신호가 없어지고 휨신호만 존재하게 된다(그림 2).

이와 같이 구해진 비틀 신호는 주파수 영역에서 처리된다. 주파수 응답에서 꼭지점에 해당하는 주파수가 공진주파수가 된다(그림 3). 고정-자유단 체계의 성질로부터 파장(λ)은 원주길이(L)의 4배이다($\lambda = 4L$). 따라서 전단파의 속도는 다음과 같다.

$$V = \lambda \times f_n = 4L f_n \quad (1)$$

종파는 공진주파수가 잘 잡히지 않으므로 시간차(t)로 속도(L/t)를 구하였다.

2.3 실험종류 및 방법

2.3.1 거칠기(roughness)의 영향에 관한 실험

거칠기가 탄성과 속도에 미치는 영향을 알아보기 위해 암석디스크표면에 다양한 거칠기를 만들었다. 거칠기는 Barton & Choubey(1977)가 제시한 JRC(joint roughness coefficient) 값에 따른 거칠기 단면을 사용하였다. 높이 방향 스케일은 같으며 가로 방향 길이는 시편 지름에 맞도록 축소되었다. 그림 4와 같이 알루미늄 디스크에 거칠기 단면의 형태대로 절단 가공하여 시편제작을 위한 몰드로 사용하였다. 시편 재료로는 석고와 치과석고가 사용되었으며 시편 제작 시 재료와 물의 배합비를 같게 하고 같은 조건으로 양생시켜서 모든 시편의 성질을 균일하게 하였다. 시편 및 재료의 특성을 요약하면 표 1과 같다. 거칠기면이 서로 잘 접촉되도록 하였고 채움물질은 사용하지 않았다.

2.3.2 채움물질(fillings)의 영향에 대한 실험

절리사이에 존재하는 채움물질이 탄성과 속도에

표 1. 암석 디스크 시편의 특성

암석 디스크 종류	석고	치과석고	편마암
재료 : 물 비율	1:1	3:1	-
치수	두께 : 25.4mm	두께 : 25.4mm	두께 : 25.4 mm
	내경 : 25.0mm	내경 : 25.0mm	내경 : 25.0 mm
	외경 : 52.6mm	외경 : 52.6mm	외경 : 63.2 mm
밀도	847 kg/m ³	1690 kg/m ³	2704 kg/m ³
신선암의 탄성파 속도	V _p =1920m/s	V _p =3250 m/s	V _p = 4750 m/s
	V _s =1270m/s	V _s = 2070m/s	V _s = 3100 m/s

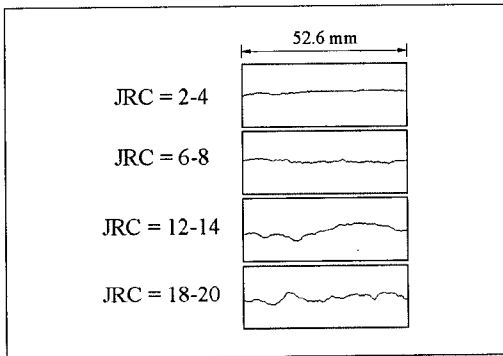


그림 4. 사용된 거칠기 (JRC 단면에서 가로방향으로 52.6/100 축소)

표 2. 채움물질

모래	두께 : 0.5mm, 1mm, 1.5mm
	C _e =1.0, C _u =1.3, G _s =2.65, w=0.58%
점토	두께 : 0.5mm, 1mm, 1.5mm
	LI=52, PI=23, G _s =2.70, w=3.67%

미치는 영향을 알아보기 위해 절리 사이에 여러 종류의 채움물질을 넣고 실험을 실시하였다. 사용된 암석 시편은 현장에서 시추한 편마암 코아를 표 1과 같은 치수로 가공한 것이며 채움물질은 표 2와 같다.

2.3.3 절리간격과 절리고결의 영향에 대한 실험

절리간격이 변함에 따라 탄성파 속도 변화 추이를 알아보는 실험을 수행하였다. 디스크는 아세탈을 높

이 20mm, 25mm, 30mm로 가공하여 사용하였고 개수는 각각 13개로 하였다.

보강처리 등으로 인하여 절리가 고결됨에 따라 탄성파 속도가 변화하는 추이를 알아보는 실험에 있어서는 석고시편을 사용하였으며 강력접착제로 절리를 고결시켰다. 고결정도를 변화시키기 위해 고결시킨 석고디스크의 개수를 늘려가면서 실험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 절리면 거칠기의 영향

그림 5와 그림 6은 실험으로부터 구한 절리면 거칠기의 변화에 따른 탄성파 속도의 영향을 보여준다. 실험 결과에서 평면 접촉면을 가지는 시편에서의 속도와 거칠기가 있는 시편에서의 속도는 확실히 차이가 있다. 절리에 존재하는 거칠기는 절리의 강성을 증가시켜서 탄성파 속도를 증가시키는 반면 매끈한 평면 접촉면의 시편에는 거칠기에 의한 구속 효과가 없기 때문에 상대적으로 강성이 작고 탄성파 속도가 작다. 종파(P파)와 전단파(S파)는 거칠기가 클수록 탄성파 속도 모델의 α 가 커지고 β 가 작아진다. 따라서 초기 응력 상태에서는 거칠기가 클수록

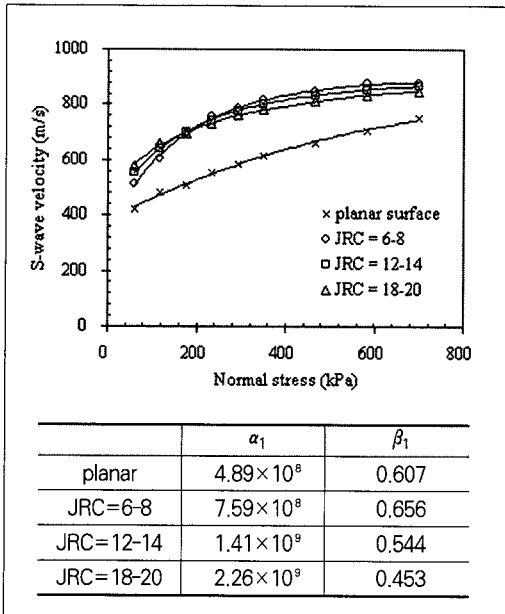


그림 5. 절리면 거칠기의 영향-석고
($G=1.37\text{GPa}$, $\rho=847\text{kg/m}^3$, $S=0.025\text{m}$)

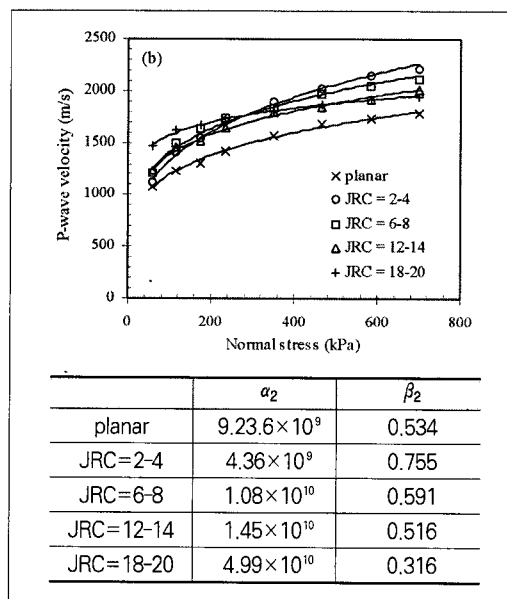
속도가 상대적으로 크고 수직응력이 커짐에 따라 속도가 응력의 영향을 덜 받아서 그래프가 완만하다.

3.2 채움물질이 탄성과 속도에 미치는 영향

그림 7과 그림 8은 절리면 채움물질이 탄성과 속도에 미치는 영향을 보여준다. 절리에 채움물질이 있는 시편에서 탄성과 속도가 현저하게 작고 채움물질 두께가 커질수록 속도가 작다. 다만 채움물질 0.5mm의 경우는 예외인데 초기에는 상대적으로 느리다가 응력이 증가함에 따라 탄성과 속도가 상대적으로 빠르게 증가한다. 이는 응력이 증가하면서 절리 사이의 미세한 틈이 얇은 층의 채움물질로 효과적으로 채워져 강성이 증가하여 속도가 상대적으로 빨리 증가한 것이다. 특히 모래 0.5mm의 경우 입자 층은 단층이 되고 탄성과 전파 시 입자층에서 미끌

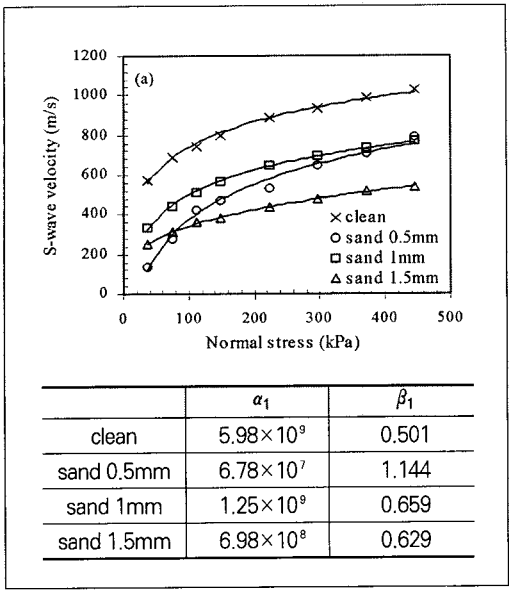
	α_1	β_1
planar	7.56×10^9	0.602
JRC=2-4	1.57×10^9	0.639
JRC=6-8	1.56×10^9	0.578
JRC=12-14	2.47×10^9	0.535
JRC=18-20	9.37×10^9	0.304

(a)전단파 속도

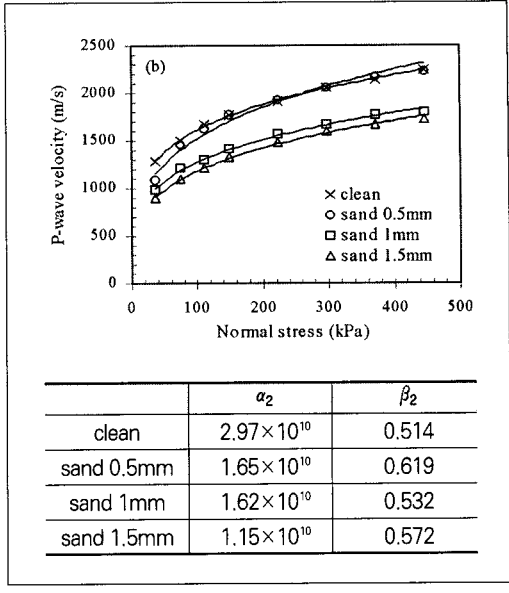


(b)종파 속도

그림 6. 절리면 거칠기의 영향-치과석고 ($G=8.48\text{GPa}$, $E=17.9\text{GPa}$, $\rho=1690\text{kg/m}^3$, $S=0.025\text{m}$)

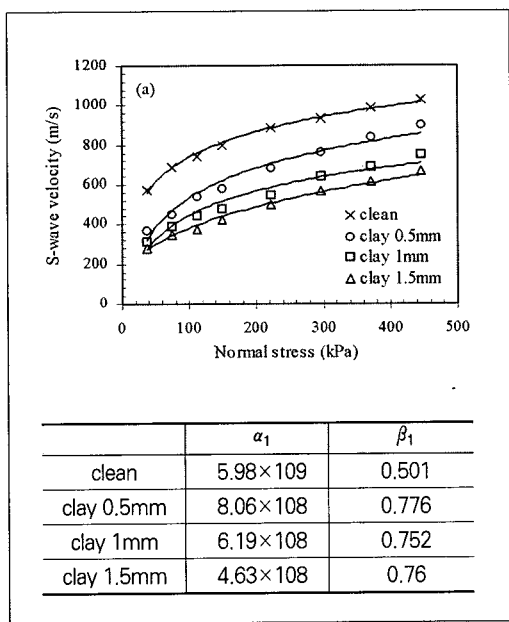


(a) 전단파 속도

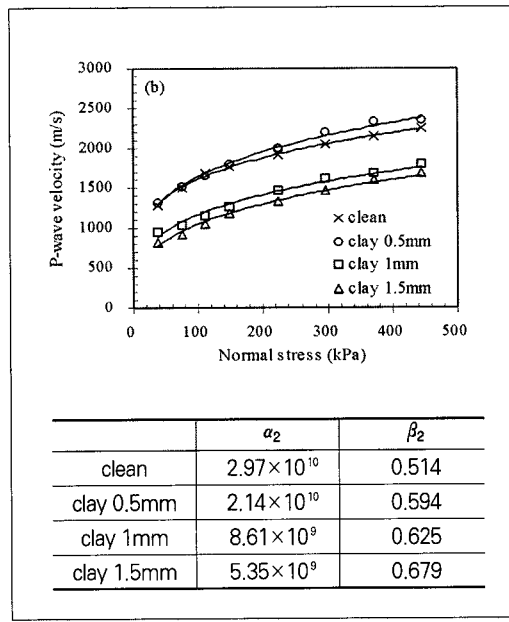


(b) 종파 속도

그림 7. 질리면 채움물질(모래)의 영향: 압식디스크-편마암 ($G=8.48\text{GPa}$, $E=17.9\text{GPa}$, $\rho=1690\text{kg/m}^3$, $S=0.025\text{m}$)

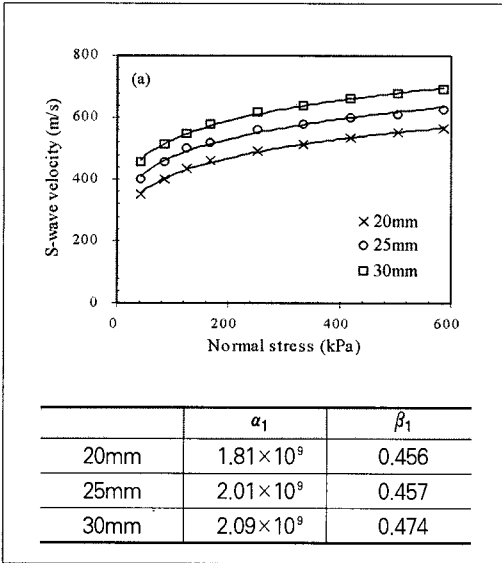


(a) 전단파 속도

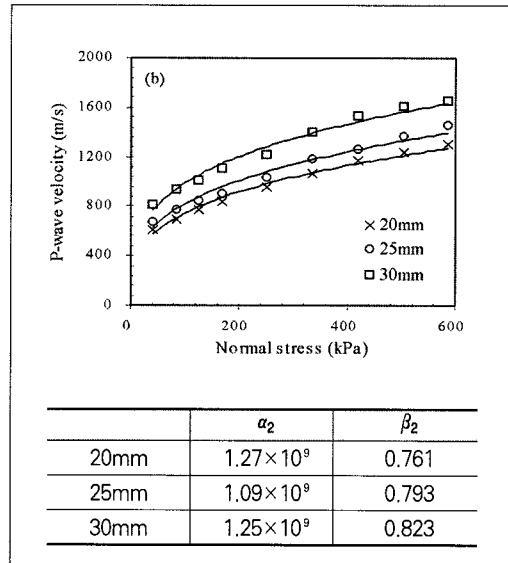


(b) 종파 속도

그림 8. 질리면 채움물질(점토)의 영향: 압식디스크-편마암 ($G=8.48\text{GPa}$, $E=17.9\text{GPa}$, $\rho=1690\text{kg/m}^3$, $S=0.025\text{m}$)



(a) 전단파 속도



(b) 종파 속도

그림 9. 절리 간격의 영향

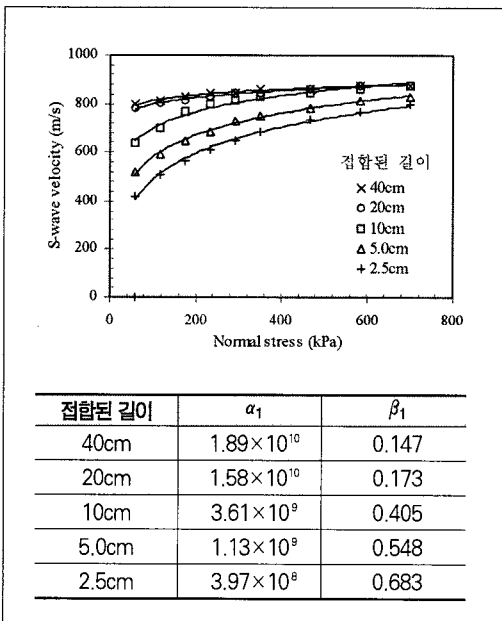


그림 10. 절리 고결의 영향

(디스크: 석고-G=1.37GPa, $\rho=847\text{kg/m}^3$, S=0.025m)

림이 일어나 속도가 작지만 응력이 증가하면서 미끌림이 억제되면서 속도가 상대적으로 빨리 증가했다.

아주 얇은 층의 채움물질을 제외하면 전체적으로 채움물질의 두께가 커질수록 탄성과 속도가 작아짐을 알 수 있다.

3.3 절리 간격의 영향

그림 9는 절리간격에 의한 탄성과 속도의 영향을 나타낸다. 절리 간격이 커지면 탄성과 속도가 전체적으로 증가한다. α 와 β 는 절리면 상태에만 영향을 받는 변수들이다. 그림 9에서 절리 간격에 상관없이 α 와 β 의 값이 상당히 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다.

3.4 절리 고결의 영향

절리면이 그라우팅이나 보강처리로 인해 고결이



되면 탄성과 속도 패턴이 변화한다. 그림 10은 절리 고결에 의한 탄성과 속도의 변화를 보여준다. 고결 정도가 크면 전체적으로 탄성과 속도가 크고 응력 증가에 대한 속도 증가분이 작다. 탄성과 속도의 전체적 변화와 응력변화에 따른 속도 변화 차이라는 두 가지 측면에서 뚜렷한 추세를 관찰할 수 있다. 절리의 접합된 길이가 길수록 즉, 고결 정도가 클수록 α 가 크고 β 가 작다. 즉 고결 정도가 클수록 낮은 응력상태에서 속도가 크고 응력변화에 대한 속도 증가가 적다. 고결 정도가 작으면 낮은 응력상태에서 탄성과 속도가 작고 응력이 커짐에 따라 속도가 상대적으로 많이 증가한다.

4. 결론

암석공진주실험을 통하여 절리 암반에서 미소변형 상태의 탄성과 속도 특성을 알아볼 수 있었다. 대표적인 절리특성인 거칠기, 채움물질, 절리간격과 절리 고결 등이 탄성과 속도에 미치는 영향을 알아 보았다. 전단파 속도가 종파 속도에 비하여 상대적으로 절리특성에 뚜렷한 변화를 나타내었다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다:

- 절리암반에서의 탄성과 속도는 응력에 크게 좌우된다. 즉 응력이 증가할수록 절리암반의 탄성과 속도는 증가한다.
- 절리면의 거칠기로 인해 속도가 증가하고 거칠수록 속도가 응력변화에 둔감하다.
- 절리에 채움물질이 존재하면 속도가 감소하고 채움물질이 두꺼워질수록 속도가 감소한다.
- 절리간격이 클수록 전체적인 속도가 증가한다.
- 절리고결의 정도가 클수록, 낮은 응력 상태에서

의 속도가 증가하고 응력변화에 대해서 둔감하다.

- 탄성과 속도 모델을 이용하여 절리 성질에 따른 속도변화를 정량화 할 수 있다.

이 연구를 통하여 절리암반에서 절리의 여러 특성에 따른 탄성과 속도 변화를 응력 상태별로 알아보고 절리암반에서의 탄성과 속도 변화를 탄성과 속도 모델을 이용해 정량화하고 비교하였다. 절리를 가지는 암반의 탄성과 속도는 응력에 의해 지배되므로 암반평가나 해석 시 이에 대하여 고려해야 한다. 또한 거칠기, 채움물질, 절리간격 등의 절리 특성들은 암반분류 기준과 직접적으로 관계되므로 탄성과 속도와 암반분류의 관계를 도출할 수 있다. 그리하여 현장 탄성과 탐사에서 나온 탄성과 속도와 비교하여 현장 암반분류의 신뢰성을 높일 수 있다. 또한 고결 정도에 따른 탄성과 속도 변화 특성을 이용하여 현장 암지반의 그라우팅이나 보강처리 평가에 적용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단의 2003년 신진교수연구지원사업(D00470)에 의해 연구되었으므로 해당 기관에 감사드립니다.

참고문헌

1. Achenbach, J.D. (1975), "Wave Propagation in Elastic Solids", North-Holland, Amsterdam, 425 pp.
2. Barton, N.R. and Choubey, V. (1977), "The



- shear strength of rock joints in theory and practice", *Rock mech.* 10(1-2), 1-54.
3. Boadu, F.K., Long, T.L. (1996), "Effects of fractures on seismic wave velocity and attenuation", *Geophys. J. Int.* 127, 86-110
 4. Boadu, F.K. (1997), "Fractured rock mass characterization parameters and seismic properties: Analytical studies". *Journal of Applied Geophysics* 36, 1-19
 5. Brillouin, L. (1946), "Wave propagation in periodic structures", New York: McGraw-Hill.
 6. Fratta, D. and Santamarina, J.C. (2002), "Shear wave propagation in jointed rock: state of stress", *Geotechnique* 52, No. 7, 495-505
 7. Goodman, R.E. (1989), "Introduction to rock mechanics", 2nd edn. New York: John Wiley & Sons.
 8. Kolsky, H. (1963), "Stress waves in solids", Dover, New York.
 9. Pyrak-Nolte, L.U., Myer, L.R., and Cook, N.G. (1990a), "Transmission of seismic wave across single natural fracture", *Journal of Geophysical research.* Vol. 95. No. B6. pp. 8617-8638.
 10. Pyrak-Nolte, L.U., Myer, L.R., and Cook, N.G. (1990b), "Anisotropy in seismic velocities and amplitudes from multiple parallel fractures", *Journal of geophysical research*, Vol. 95, No. B7, pp. 11345-11358.
 11. Richart, F.E., Hall, J.R., and Woods, R.D. (1970), "Vibrations of soils and foundations", Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall.
 12. Santamarina, J.C., Klein, K.A. & Fam, M.A. (2001), "Soils and waves", New York: John Wiley & Sons
 13. White, J.E. (1983), "Underground sound: Application of seismic waves", Amsterdam: Elsevier.

