

절리암반에서의 압축파 전파 특성 연구

Characteristics of P-wave propagation in jointed rock mass

이종섭 (고려대학교 건축사회환경공학과 조교수)
 이민욱 (고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정)
 김욱영 (GS건설 지하공간팀 대리)
 이인모 (고려대학교 건축사회환경공학과 교수)

1. 서론

암반의 거동을 예측 및 이해하는데 있어 불연속면이라는 것은 그 자체만으로도 불확실성이 내포된다고 할 수 있겠다. 불연속면을 정확히 묘사하기도 어려울뿐더러 정량화 시켜 분석하기도 난해한 특성을 가지고 있다. 따라서 지금까지 많은 연구가 있었지만 그 특성을 파악 하는데는 한계를 가지고 있는 연구 분야이다. 따라서 전통적인 연구방식이 아닌 비파괴적인 접근방식이 새로운 하나의 해결책을 제시할 수 있을 것으로 생각되어 왔다. 특히 탄성파를 이용한 연구에서 파의 감쇠는 응력, 절리존재여부, 거칠기 등에 민감한 것으로 알려져 왔다(Butt, 2001). 이와 관련된 연구들이 있어왔지만 언급한 불확실성 때문에 이론적인 접근이나 실험적 검증에서 뚜렷한 결론은 이끌어내지는 못하고 있다(Toms 외, 2006, Zhao and Cai, 2001). 이 연구에서는 절리암반에서의 탄성파 전달 및 감쇠 특성을 실험을 수행하여 응력, 절리의 거칠기, 절리의 단합 현상 등을 연구 분석하여 그 특성을 규명하고자 한다.

2. 본론

2.1 이론적 배경

파의 전달에서 파는 매질을 통과함에 따라 진폭이 낮아지게 되는데 이를 감쇠(attenuation)라고 한다. 파 감쇠현상은 크게 3가지의 현상으로 인해 기인한다. 거리에 따라 진폭이 감쇠하는 현상인 기하학적 퍼짐(geometric spreading), 그리고 본래적 매질의 감소현상으로 인한 매질의 손실(material loss 또는 intrinsic attenuation), 마지막으로 위상의 변화나 부분적 전달에 기인한 외형적 감쇠현상(apparent attenuation)이 있다. 이 세 가지 조합에 의해 나온 거리 r_1 과 r_2 만큼 떨어진 곳에 측정된 진폭 A_1 과 A_2 의 감쇠는 다음 (1)식과 같다.

$$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^n e^{\alpha(r_2-r_1)T^{-1}} \quad (1)$$

여기서 n 은 기하학적인 모양에 따라 결정되는 값이고, T 는 전달 계수이고 α 는 감쇠 계수이다.

손상영역 혹은 경계면에서 전달, 반사 및 입사파 성분들이 혼재할 경우 복잡해지는 신호를 해석하기 위해 푸리에 변환을 사용하였다. 푸리에 변환은 모든 주기적 파동을 여러 진동수에 다른 사인파의 성분들로 나눌 수 있다는 사실로부터 출발한다. 대표적인 푸리에 변환식은 식 (2), (3)과 같다. 임의의 시간영역 $f(t)$ 에서 표현된 함수를 주파수 영역 $F(\omega)$ 으로 변화시키는 과정을 푸리에 변환이라고 하며 주기성을 갖는 신호를 여러 주파수 성분으로 나타내 주파수의 변화양상을 살펴보는데 그 의미가 있는 것이다.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (3)$$

2.2 실험적 절차 및 방법

본 연구에서 행하여진 실험은 석고로 질리를 가진 암반을 모사하여 만든 시험체에 응력을 가하면서 실험을 수행하였다. 시험체의 재료로 쓰인 석고는 타 재료에 비해 시편의 성질을 균질하게 확보할 수 있으며, 암반의 물성을 적절히 묘사할 수 있고 다루기 쉬운 재료로 선정하였다. 석고의 제원은 표1과 같다. 석고의 탄성과 속도는 P파의 경우 2750m/s, S파의 경우 약 1500m/s로 측정되었다. 시편의 길이는 200mm이며 직경은 100mm이다.

표 1. 시편제작용 석고의 제원

표준 혼수량 (%)	유입개시 시간 (분)	응결시간(분)		습인장강도 (MPa)	건조압축강도 (MPa)	팽창율 (%)	용도	특징
		시발	종결					
45	10	12	30	2	30	0.03	특수케이스용	고강도, 저팽창 작업성 양호

가진용 센서는 PZT센서를 사용하였다. PZT센서(Piezo Zirconate Titanate)는 압전물질로 이뤄진 센서로 휴대폰, TV 등 가전제품에 널리 사용되는 일종의 버저이다(그림 1). 수신용 센서로는 광대역 AE센서를 사용하였다. 가진용 센서는 커플링영향을 줄여주기 위하여 석고 시험체 속에 매설 하였으며 AE센서는 반대편에 고정시켜 파를 측정하였다. 이때 PZT센서 매설시 전류가 매질 내부로 흘러 합선이나 누화(Cross-talking)가 발생할 수 있기 때문에 접지를 위하여 센서에 보호(Shielding)처리를 하였다. 실험에 사용한 AE센서의 제원은 표2와 같다.

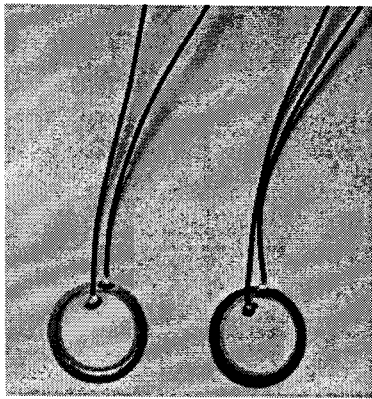


그림 1. 가진용 PZT센서

응력은 연직응력을 가해주었으며 0 kPa~ 611 kPa까지 재하 및 제하를 반복하여 실험하였다. 실험을 수행한 시편의 종류는 표3과 같이 3가지 경우로 나누어 실험하였다.

표 2 AE센서의 제원

Dimensions (dia. x ht.)	Weight (grams)	Operating Temperature (°C)	Peak Sensitivity V/(m/s) (dB)	Operating Frequency Range (kHz)
18 x 17	20	-65 to 177	64	60 - 1000

표 3. 시험체의 구분

	조건	비고
Case1	신선한(intact) 시험체	절리 없음
Case2	절리면이 평평한 시험체	JRC=0~2 / 틈새=0.1mm
Case3	절리면에 거칠기가 있는 시험체	JRC =2~4 / 틈새=0.15mm

실험방법은 신호생성기를 통해 입력파를 주어 석고 속에 매설된 PZT센서를 가진시키고 시험체에 연직 응력을 가해주면서 시편을 통과해 전달된 파를 AE센서로 측정하여 이를 필터링을 거쳐 데이터를 획득하는 방식으로 진행하였다. 전체적인 실험 개요도는 그림 2와 같다.

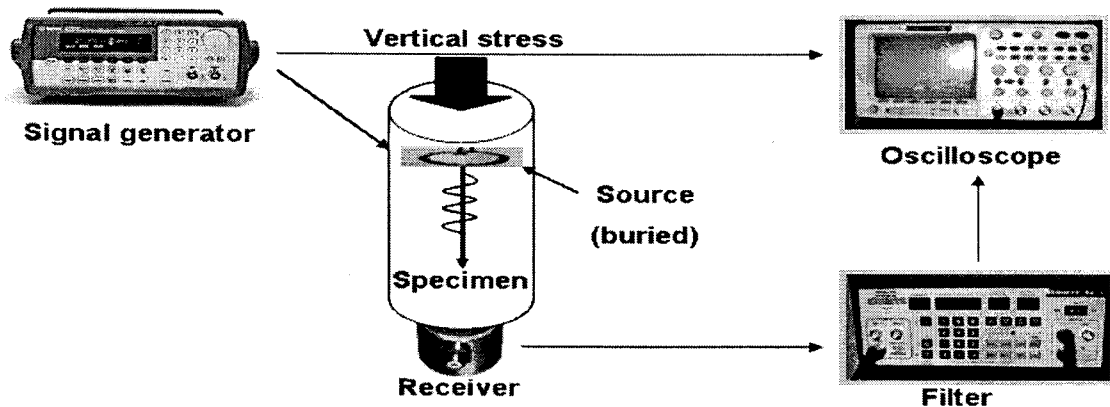


그림 2. 전체적인 실험 개략도

2.3 실험 결과 및 분석

2.3.1 반복적인 하중재하에 의한 영향

그림 3. 신선한 시편과 평평한 절리를 가지는 시편의 대표적인 파형 (응력조건: 83.95kPa)
탄성파가 암반을 통과할 때 암반의 성질에 따라 파의 진폭크기에서부터 큰 차이를 나타낸다(그림 3). 따라서 이 논문에서는 파의 최대와 최소의 진폭 크기 차이를 이용하여 파의 감쇠정도를 파악하였다.

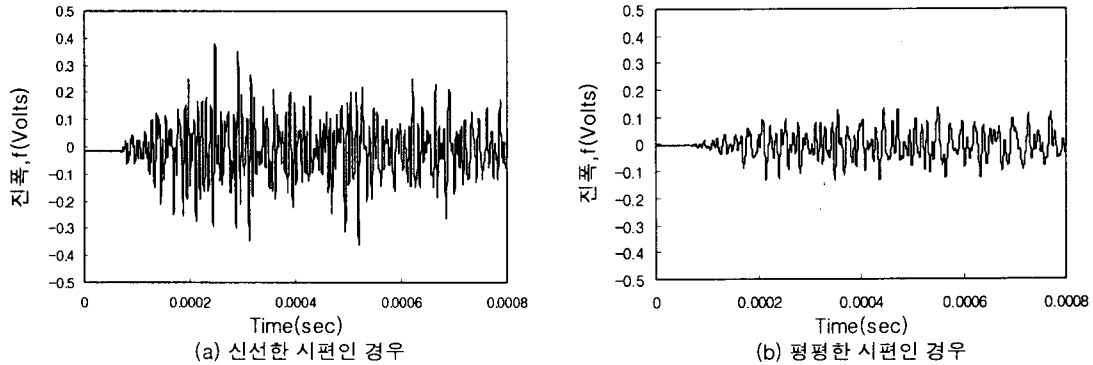


그림 3. 신선한 시편과 평평한 절리를 가지는 시편의 대표적인 파형 (응력조건: 83.95kPa)

본 연구의 실험에서는 하중의 재하와 제하를 반복하여 실험을 수행하였다. 그림 4는 Case3에 대하여 응력의 재하와 제하의 반복에 따른 영향을 나타내고 있다. 응력의 재하와 제하의 반복횟수가 늘어갈수록 재하 시와 제하 시의 격차가 줄어들어 가는 모습을 나타내고 있다. 이는 시험체가 완전 탄성체가 아니기 때문에 응력의 증가에 따른 단립 현상이 누적되고 있음을 보여준다. 신선한 시편이나 평평한 절리를 가지는 시편의 경우도 비슷한 경향을 나타내었다.

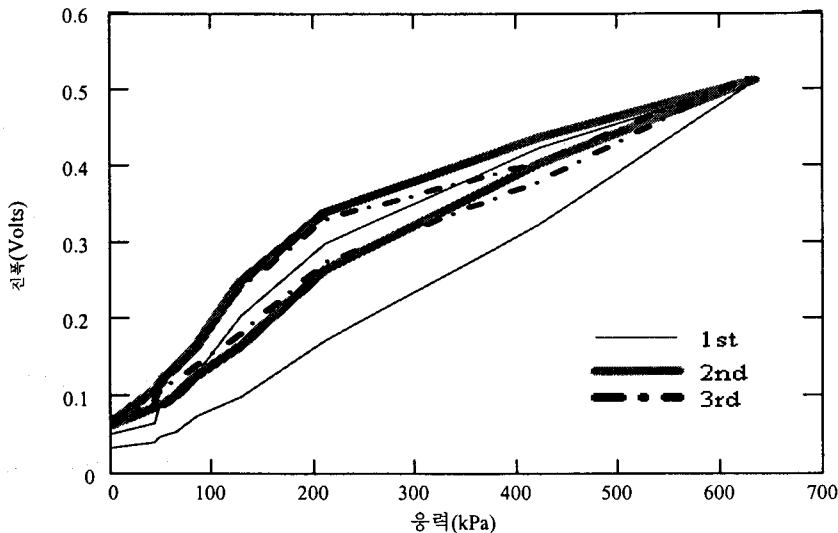


그림 4. 반복적인 하중재하에 따른 결과 (Case3)

또한 시편별로 응력재하 반복횟수에 따른 영향을 알아보았다. 각 case별 시편 모두 응력 재하의 반복횟수가 증가할수록 전체적인 크기가 커짐을 알 수 있다(그림 5).

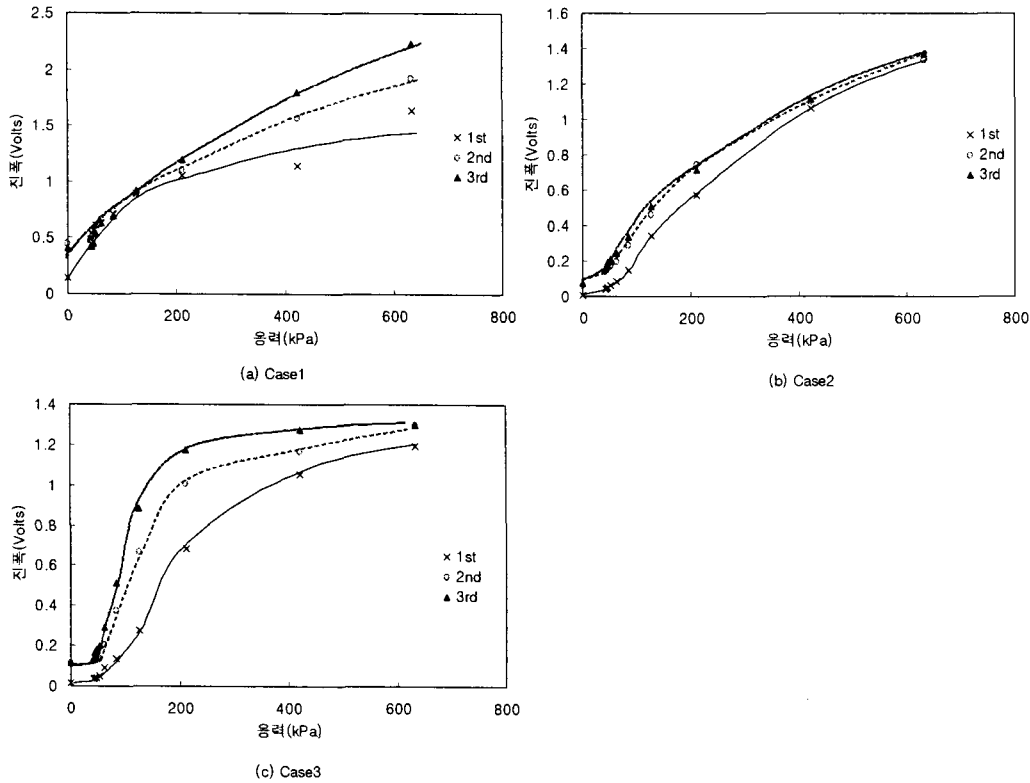


그림 5. 시편별 응력재하 횟수에 따른 영향

응력재하횟수에 따른 진폭크기의 증가정도를 보기 위해 AR(Amplitude Ratio)을 정의하였으며 이는 식(4)와 같다.

$$AR(\%) = \frac{Amplitude_n - Amplitude_i}{Amplitude_i} \times 100 \quad (4)$$

여기서, $Amplitude_n$ = 응력재하 반복횟수가 n일 때의 진폭

$Amplitude_i$ = 첫 번째 응력 재하일 때의 진폭

Case3번의 경우 반복횟수가 3일 때의 AR값을 계산해 본 결과 응력이 적게 작용하는 경우는 최대 약 132%의 크기 증가를 보였다. 이때 응력의 증가와 응력재하 반복횟수에 따른 크기증가(AR값)는 반비례하는 경향을 나타내면서 큰 응력 하에서는 변화가 거의 없는 모습을 보였다(그림 6). 이는 응력재하의 반복에 따른 단힘 현상이 누적되는 것과 동시에 돌출부의 손상에 의해 틈새가 감소되어 진폭의 크기 증가가 나타난다고 판단된다. 3회 이상의 반복에서는 큰 차이가 나타나지 않아 반복횟수는 3회로 제한하였다.

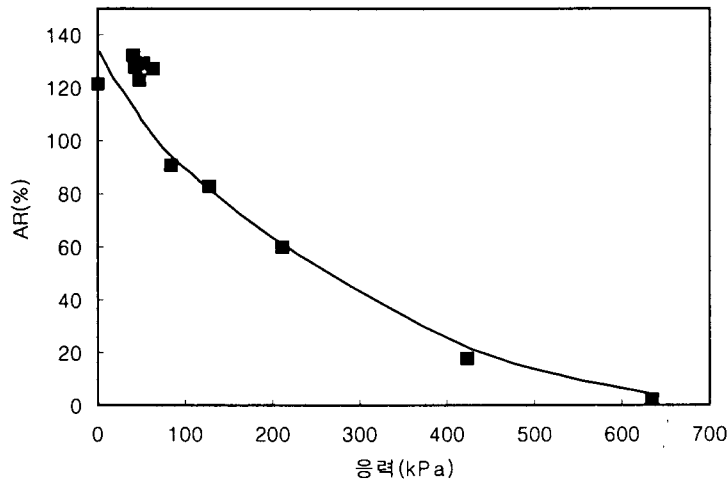


그림 6. 응력재하 반복에 따른 탈힘 현상의 증가비 (Case3)

2.3.2 PZT센서 조건에 따른 영향

모든 탄성파를 이용한 실험에 있어서 커플링문제는 파의 전달 및 반사에 있어 많은 영향을 끼친다. 이에 커플링문제의 해결을 위하여 가진용 PZT센서를 시험체 속에 매설하여 실험을 수행하였다. PZT센서를 매설하였을 때와 PZT센서를 표면에 부착한 경우를 비교하였으며 이를 그림 7에 수록하였다. 왼쪽과 같이 PZT센서를 매설한경우가 표면에 부착한 경우보다 파의 전달이라는 측면에 있어서도 약 20배 이상 효율적이며 더 좋은 경향성을 나타낼 수 있다.

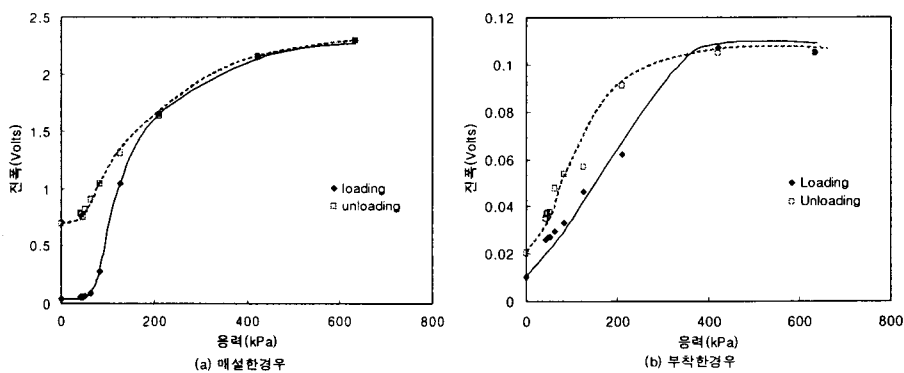


그림 7. PZT센서 매설시와 부착시의 비교

PZT센서를 매설하였기 때문에 응력의 증가가 PZT센서에 영향을 미칠 수 있으므로 이를 확인하기 위하여 추가적인 실험을 수행하였다. PZT센서는 떨면서 발생시키는 진동을 이용하여 가진하므로 이 특성을 이용하여 PZT센서의 떨림 정도를 마이크를 이용하여 측정하여 응력증가에 따른 PZT센서의 영향을 살펴보았다.

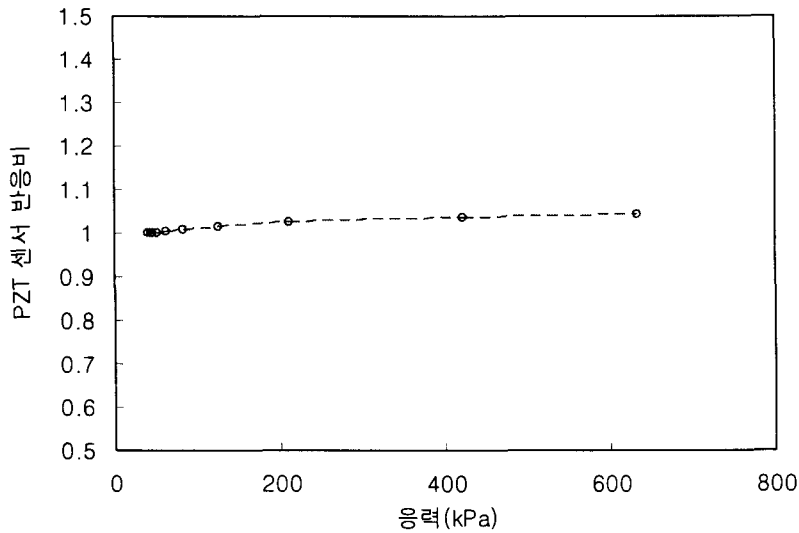


그림 8. 응력증가에 따른 매설 PZT센서의 영향

그림 8과 같이 최초 응력상태에서의 PZT센서 떨림 정도를 1이라보고 응력상태에 따른 PZT센서의 떨림 정도를 비로 나타내었다. 응력의 증가에 따라 PZT센서의 떨림 정도가 커짐을 볼 수 있다. 따라서 응력의 증가가 PZT센서에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 위에서 언급한 각 응력별 최소 응력 하에서의 떨림 정도와의 비로 원래 데이터 값을 나누어 이 영향을 고려해준 것과 원래 데이터 값을 비교해보았다. 그림 9의 결과와 같이 미소한 변화만 있을 뿐 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 따라서 응력의 증가가 PZT센서에 영향을 주는지에 대한 실험을 수행해본 결과 영향은 미치지만 그 영향은 무시해도 될 것으로 판단된다.

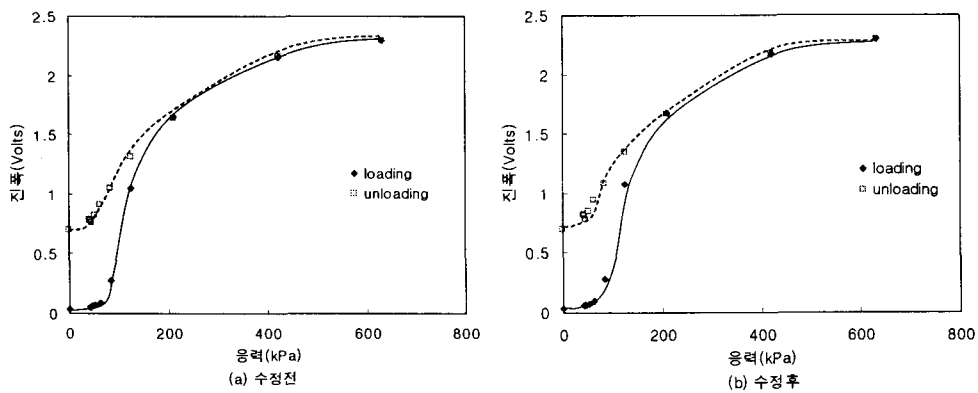


그림 9. 응력에 따른 PZT센서의 영향을 고려해준 것과 고려해주지 않은 시편의 결과

2.3.3 절리의 거칠기에 따른 영향

다음 그림 10은 거칠기에 따른 비교이다. 절리면의 거칠기가 증가할수록 파의 감쇠가 더 많이 일어나 크기가 줄어드는 모습을 잘 나타내고 있다. 이때 응력을 증가시킬수록 미세틈새와 절리의 닫힘 현상이 발생하여 파의 전달이 더 원활히 이뤄지면서 파의 감쇠가 줄어드는 것을 곡선의 기울기변화로써 쉽게 확인할 수 있다.

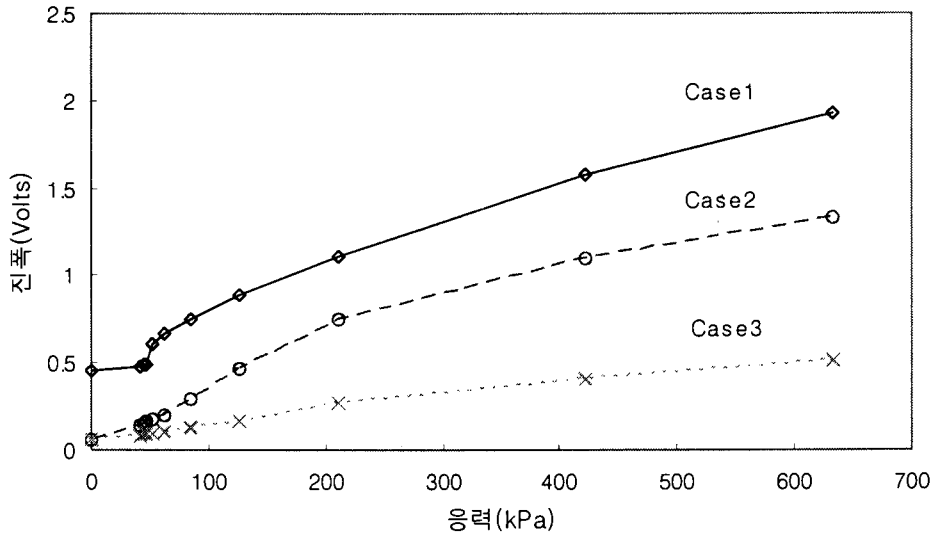


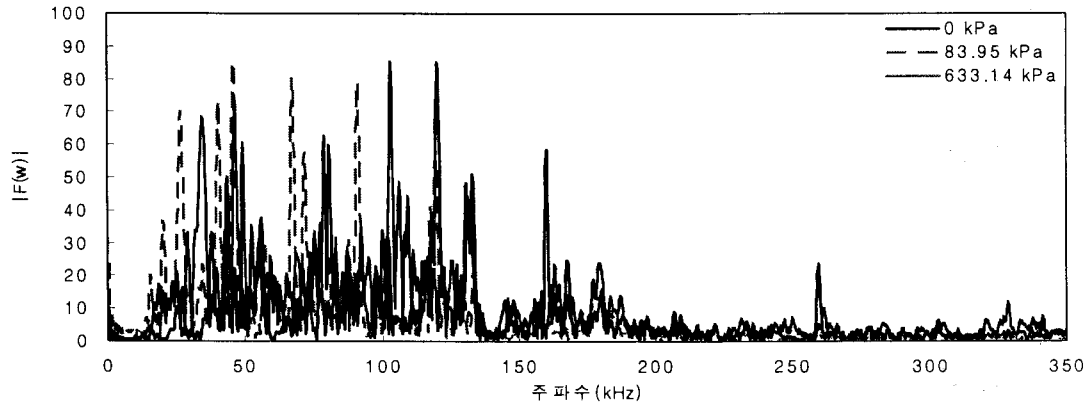
그림 10. 절리의 거칠기에 따른 영향

2.3.4 푸리에 변환 및 분석

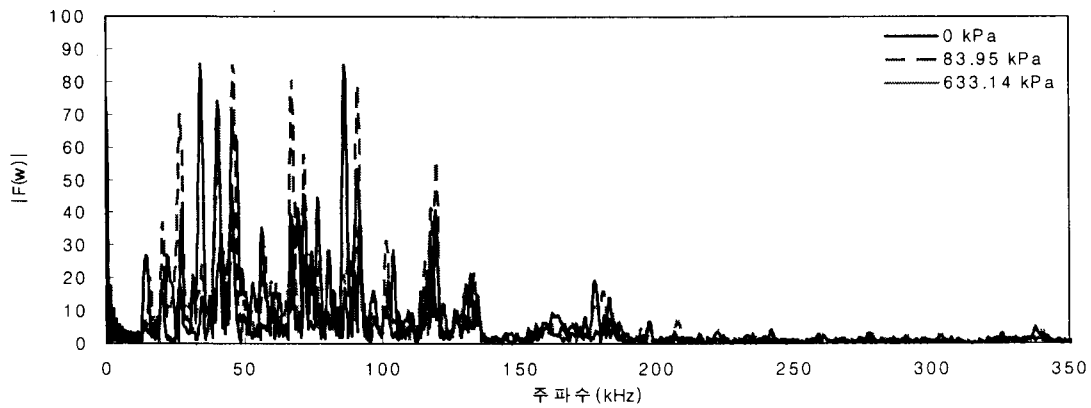
절리 암반을 모사한 시험체에서 응력의 증가에 따라 나타난 변화는 이러한 탄성파의 진폭 크기의 감쇠뿐만 아니라 주파수대역에 있어서도 변화를 확인할 수 있다. 이를 위하여 그림 11과 같이 푸리에 변환을 이용하였다.

푸리에 변환 해석을 한 결과, 350kHz까지는 공통적으로 주파수가 나타나며 거칠기의 증가에 따라 저주파성분이나 고주파 성분이나 에너지의 감소를 보이는데 이때 저주파보다는 상대적으로 고주파성분이 더 많이 감쇠되는 것으로 추정된다. 절리의 거칠기가 심해질수록 저주파 특성, 즉 상대적으로 주파수 150kHz이하의 에너지가 증가하는 경향을 보인다. 이를 정량적으로 알아보기 위해 주파수 영역에서 전체 (0kHz~ 350kHz)에너지에 대한 저주파 대역(0kHz~150kHz)까지의 에너지의 상대적인 비를 FR(Frequency Ratio)로 정의하였으며 이를 식으로 나타내면 식(5)와 같다.

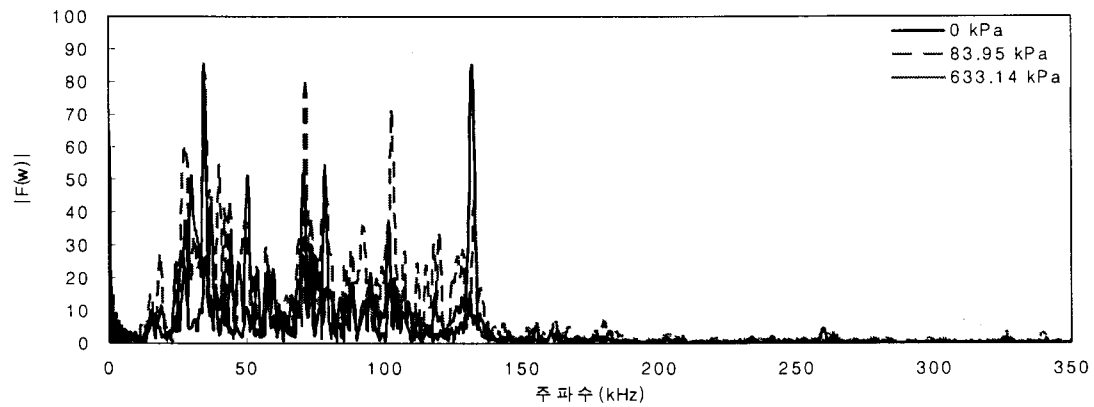
$$FR(\%) = \frac{\sum [Low\ Frequency\ Content\ Energy]^2}{\sum |} \quad (5)$$



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3

그림 11. 푸리에 변환 결과

식(5)를 이용하여 각 응력별 FR값의 변화를 그림 12에 도시하였다. 절리의 거칠기가 증가함에 따라 FR값이 상승하는 것을 볼 수 있으며, 신선한 암의 경우를 제외하고는 응력의 증가에 따라 FR값의 변화가 거의 없었다. 이것은 절리가 존재하는 경우 고주파성분이 절리에 의해 먼저 감소된 것으로 추정된다. 따라서 절리가 있는 경우에는 FR값의 증가에 있어 절리의 거칠기에 비해 응력의 증가가 보다 둔감한 것으로 판단된다.

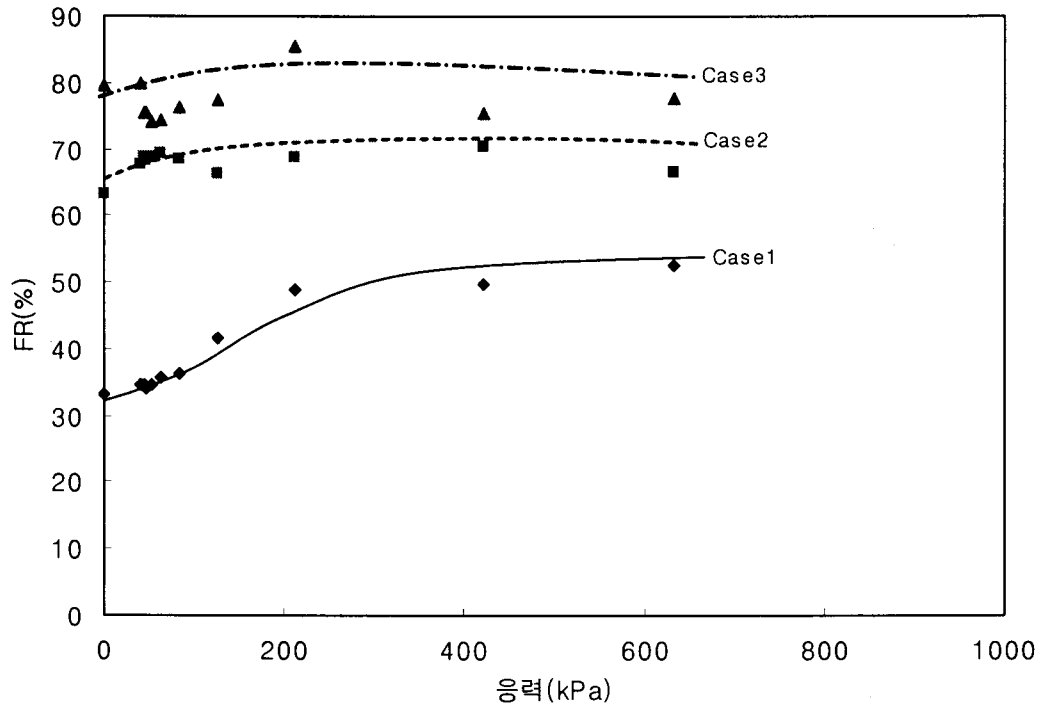


그림 12. 응력별 FR(%)값의 변화

3. 결론

본 연구에서는 석고를 이용하여 암반을 모사한 실험적 연구를 수행하여 절리암반에서의 탄성과 전달 특성에 대해 알아 볼 수 있었다. 절리암반에서의 응력증가에 따른 탄성과특성은 크게 두 가지로 파의 감쇠와 주파수의 변화로 나타난다. 이상의 연구로부터 도출된 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 하중의 재하와 제하를 반복시 단합 현상이 남아있는 것을 확인할 수 있다. 반복적인 단합 현상이 응력이 적게 작용하는 경우는 최대 약 132%의 크기 증가를 보였으나 이때 응력의 증가에 따라 크기증가의 정도는 점차 감소하는 모습을 보였다. 이는 과거 상재하중이 높고 지각 변동이 잦았던 절리 암반지역을 설계 할 때 참조할만한 결과라고 생각된다.
- 2) 센서를 이용하여 실험하는 여러 연구에 있어서 센서를 매설하는 편이 센서를 표면에 설치하여 실험하는 것보다 커플링 문제에서 좀 더 자유로울 수 있는 방안으로 판단된다.
- 3) 파의 감쇠는 진폭의 크기의 변화로 측정하였으며, 절리의 거칠기가 심해질수록 더 많은 감쇠를 보여준다. 응력이 증가할수록 점차 절리의 단합 현상이 발생하여 이로 인하여 감쇠의 정도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

- 4) 주파수의 변화는 푸리에변환을 통하여 확인할 수 있다. 거칠기의 증가에 따라 전체적인 에너지가 감소하지만 저주파보다 150kHz 이상의 고주파가 더 많이 감쇠되는 모습을 보여 상대적으로 저주파가 우세한 경향을 나타낸다. 이것은 FR값(%)를 이용하여 확인해 볼 수 있다. 전체 에너지 중에서 150kHz이하의 주파수가 전체주파수대역에 대해 차지하는 에너지 비중이 절리의 거칠기가 증가 할수록 증가한다. 이때 응력의 증가 여부는 절리가 있는 경우에는 FR값과 큰 상관관계를 가지지 않는 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 대형·대단면 지하공간 창출을 위한 지하공간 기술 연구단 04 핵심 C01과제의 일환으로 진행되었으며 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. Butt, S.D., 2001, Experimental measurement of P-wave attenuation Due to Fracture over the 100 to 300 kHz Band Width, Pure Applied Geophysics, pp.1783-1796.
2. Toms, J., Muller, T.M., Ciz, R., Gurevicha. B., 2006, Comparative review of Theoretical Models for Elastic Wave Attenuation and Dispersion in Partially Saturated Rocks, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.26, pp.548-565.
3. Zhao, J. and Cai, J.G., 2001, Transmission of Elastic P-waves across Single Fractures with a Nonlinear Normal Deformational Behavior, Rock Mech. Rock Engng. Vol.34, pp.3-22.