

## 절리암반에서의 변형률 의존적 전단파 특성에 관한 연구

이준호, 오택민, 장일한, 조계춘 (한국과학기술원)

김진섭 (한국원자력연구원)

### 1. 서론

최근 도시 공간의 효율적인 사용을 위한 지하공간의 활용에 대한 관심이 높아지고 있다. 비교적 얇은 곳에 기반암이 위치한 국내 지리여건상(30~50m 내외), 심부 지하 공간, 대심도 광역 지하철(GTX) 등 깊은 절리암반 지역에 건설되는 지하 구조물들의 신뢰성 있는 설계 및 시공을 위하여, 절리 암반 지역의 변형 특성 파악은 매우 중요하다. 절리 암반의 변형 특성은 공학적으로 가장 약한 부분인 절리들에 의하여 결정되며, 이는 변형률에 따른 전단파 특성으로 대표될 수 있다 (Goodman 1989). 그러나 기존의 전단파 측정 실험방법의 경우 대변형률(1%이상)에서 활용범위가 제한되어 미소변형에서 중간 변형률 범위의 전단파 속도 변형특성을 규명하는데 한계가 있다. 또한, 미소변형률 이상의 비선형 거동 특성을 파악하는 RC/TS(공진주/비틀전단시험)실험방법의 경우, 암석과 비슷한 지반재료인 흙과 관련된 연구만 있어 절리 암반에 관한 실험결과와 연구가 전무한 실정이다(Kim 1991). 따라서 본 연구에서는 절리 암반의 유효응력과 변형률에 따른 전단파 속도 및 감쇠비 특성을 분석하기 위해, 절리 암반의 동적 거동특성을 모사할 수 있는 Rock Mass Dynamic Test(RMDT) 장비를 이용하여 실내실험을 수행하였다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1 시료의 준비

절리 암반의 전단파 속도를 측정하기 위해, 두 개의 암반 시편을 준비하고 비교 실험을 실시하였다. 두 암반 시료는 동일한 지역의 화강암이며 절리 상태에 따른 전단파 특성을 알아보고자 절리면이 각각 인공 평탄면(G1), 자연적인 거친면(G2)으로 이루어져있다. 또한, 절리 암반에서의 Brillouin 분산효과를 고려하기 위하여 두 암반 시료는 각각 2.8 cm, 2.5 cm 높이의 암석 디스크를 10개 이상 쌓아 하나의 시편(시료 하나의 총 높이: 약 30 cm)으로 사용하였다. 또한, 등가 전단 변형률의 계산 정확도를 높이기 위해 두 암반시료는 중공형 시편(외경: 51.5 mm, 내경: 17 mm)으로 제작하여 실험하였다.

#### 2.2 실험 방법

본 연구에서는 절리 상태가 다른 두 암반 시편에 동일한 현장유효응력 상태를 재현하기 위하여 심도(30 m, 60 m, 90 m)별로 각 유효응력(776 kPa, 1552 kPa, 2328 kPa)을 계산하였다. 그리고 RMDT 장비(Kim 2008)를 이용해 시편에 축응력을 재하하여 실험하였다. 그리고 주파수 스위핑을

통하여 공진주파수 값을 얻고 이를 바탕으로 변형률에 따른 전단파 속도 값과 유효응력, 감쇠비 값을 측정한다.

### 3. 실험 결과 및 분석

실험 결과, 절리의 상태와 상관없이 전단 변형률이 증가함에 따라 절리 암반의 전단파 속도가 전단변형률 0.01%까지 약 15~20% 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 그러나, 전단 변형률 0.0001%이하의 미소 변형률 범위에서는 변형률의 크기에 따라 전단파 속도가 변하지 않는 선형적 구간이 확인되었다(그림 1.a). 그리고 절리의 상태와 무관하게 유효응력이 증가함에 따라 전단파 속도 값이 약 10±5% 증가함을 관찰할 수 있었다. 이를 통해, 절리 암반에서 유효응력이 전단파 속도에 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 동일한 유효응력에서, 절리의 상태에 따라 전단파 속도값이 다름을 확인할 수 있었다. 자연스럽게 형성된 거친 절리면을 가진 암반시편(G2)의 전단파 속도 값은, 인공적으로 평탄한 절리면을 가진 암반시편(G1)의 전단파 속도 값보다 약 350 m/sec 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 이것은 절리면의 거칠기 상태 등이 전단파 속도에 큰 영향을 준다는 것을 보여준다. 기존의 암반 지역의 수치해석 물성 데이터는 미소변형률 영역의 선형구간 전단파 속도 값이 사용되었다. 하지만, 본 연구의 실험 결과를 보면 전단변형률 0.01%까지 전단파 속도가 약 15~20% 감소하므로 기존의 수치해석을 이용한 지구구조물의 거동 분석이 동적 거동 특성을 반영하지 못하고 있었다. 따라서 실험 결과를 이용하면 변형률 영역별로 전단파 속도의 값을 적용하여 지구구조물의 동적 특성을 고려한 수치해석을 할 수 있어 신뢰성 및 정확성을 높일 것으로 기대된다. 이는 기존의 수치 해석이 정적 영역대에 국한되어 해석되는 문제를 벗어나 동적 영역대 특히 지진이나 동하중 등의 여러 문제들을 고려한 수치해석을 수행할 수 있음을 의미한다.

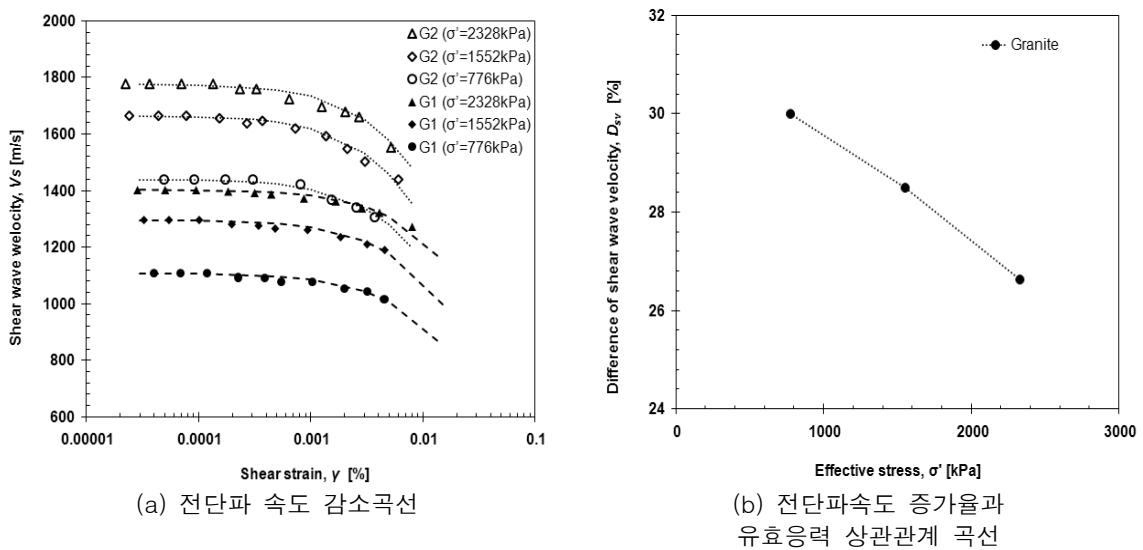
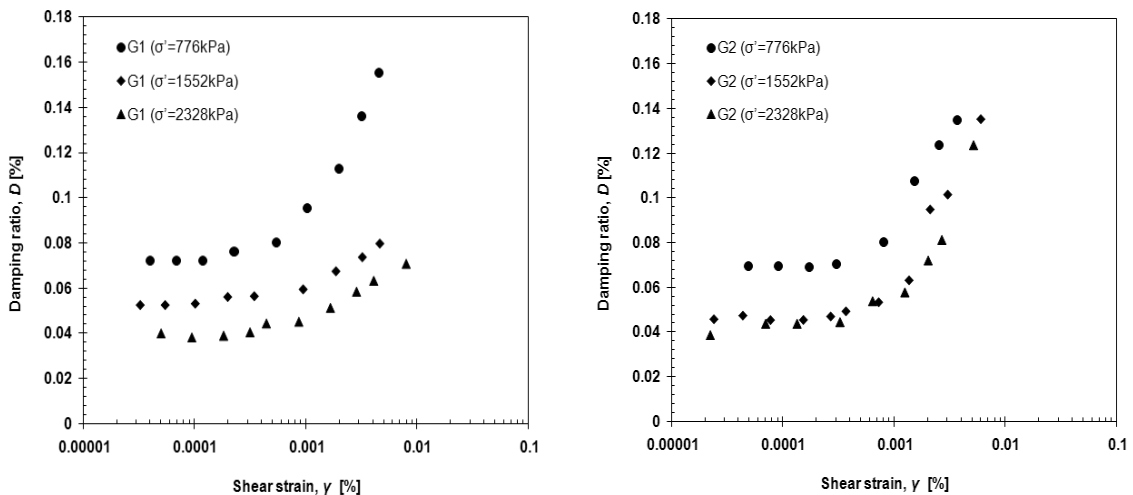


그림 1. 전단파 속도 특성 곡선

그림 1(b)는 인공평탄면 시료의 전단파 속도값에 비해 자연적인 거친절리면 시료의 전단파 속도값의 증가율과 유효응력간의 관계를 도시한 그림이다. 동일한 유효응력 상태에서 절리 상태에 따른 전단파 속도의 증가율은 유효응력이 증가함에 따라 약 30%에서 25%로 감소함을 알 수 있었다. 이를 통해 절리면의 상태가 유효응력이 증가함에 따라 전단파 속도값에 미치는 영향이 감소함을 확인할 수 있다. 최근에 기반 지층 아래 50~100 m 사이의 심부 지하공간을 활용하려는 계획이 추진 및 시행되고 있는 실정을 감안하여 실험결과를 이용하면, 30~90 m 심도에서의 절리 상태에 따른 전단파 속도의 특성을 이용하여 경제적이고 신뢰성 있는 설계 및 시공을 할 수 있을 것으로 기대된다(암반역학기술위원회 2003). 또한 전단파 속도의 증가율이 그림과 같이 감소하는 경향을 확인하기 위하여 추가적인 실험이 필요하다. 추가적인 실험을 통해 전단파 속도값이 절리 상태와 무관한 유효응력을 제시하여, 추후 고심도 지하구조물 설계 및 시공시 필요한 절리 암반의 동적거동특성 물성데이터를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 2는 두 암반시료의 변형률에 따른 감쇠비 곡선이다. 유효응력에 상관없이 변형률이 증가함에 따라 감쇠비가 증가함을 확인할 수 있었다. 그리고 유효응력이 증가할수록 동일한 변형률의 감쇠비가 최대 10~50%정도 감소함을 확인할 수 있었다. 이를 통해 절리 암반에서 유효응력이 감쇠비에 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 또한 실험결과를 통해서 동일한 유효응력 상태에서 두 암반시료의 절리 상태에 따라 변형률에 따른 감쇠비의 증가 정도가 다름을 확인할 수 있었다. 즉, 유효응력이 작은 경우(776 kPa) 평탄면이나 거친면의 시료 모두 비슷한 감쇠특성을 보이나, 유효응력이 증가할수록 거친면을 가진 시료의 감쇠비가 더 커짐을 확인할 수 있었다( $\sigma_v=1552$  kPa의 경우 70% 증가,  $\sigma_v=2328$  kPa의 경우 95% 증가). 이는 절리면의 상태와 그로 인한 동적마찰특성이 변형률에 따른 감쇠비에 영향을 미침을 알 수 있었다. 실험결과를 이용하면 절리면의 상태에 따라 변형률에 따른 전단파 속도의 감쇠 특성을 예측하여 지하구조물의 동적 안정성을 위한 수치 해석 기본 물성 데이터로 활용할 수 있다.



(a) 인공 평탄절리 암반시료의 감쇠비

(b) 자연 거친절리 암반시료의 감쇠비

그림 2. 두 암반시료의 감쇠비 곡선

## 4. 결 론

본 연구에서는 미소 및 중간 변형률(0.00001~0.01%)에서 절리 암반의 비선형 동적 거동특성을 모사할 수 있는 RMDT 장비를 이용하여 실내실험을 실시하였다. 이를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 유효응력과 절리면의 상태가 절리 암반의 전단파 속도에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다.
- (2) 유효응력이 증가할수록 절리면의 상태가 전단파 속도에 미치는 영향이 감소함을 확인할 수 있었다.
- (3) 유효응력과 절리면의 상태가 전단파 속도의 감쇠비에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.
- (4) 유효응력이 커질수록 절리면의 상태가 감쇠비 증가율에 미치는 영향이 증가함을 확인할 수 있었다.

실험 결과를 이용하여 지하구조물 건설시, 좀 더 안전하고 경제적인 설계 및 시공을 할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 또한 기존에 정적인 영역에 한정된 수치모델 해석에서 벗어나 지하구조물의 동적인 거동 특성까지 고려한 수치모델 해석을 할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

## 감 사 의 글

본 연구는 국토해양부의 U-City 석·박사과정 지원사업과 한국원자력연구원 원자력연구개발사업(과제코드 : 53324-11, 공학적방벽성능 실증기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 암반역학기술위원회 (2003), “암반공학분야의 최근 연구동향 및 전망( I )”, *한국지반공학회 논문집*, 제 19권, 4호, pp.8-21
2. Fratta, D. and Satamarina, J.C. (2002), “Shear wave propagation in jointed rock: state of stress”, *Geotechnique* 52, No.7, pp.495-505
3. Goodman, R.E. (1989), *Introduction to rock mechanics*, 2nd edn. New York: John Wiley & Sons
4. Kim, D.S. (1991), “Deformational Characteristics of Soils at Small to Intermediate Strains From Cyclic Tests”, *Ph.D Dissertation*, The University of Texas at Austin, Austin, Texas
5. Kim, J.W. (2008), “Development of RMDT Apparatus to Characterize Strain-dependent Elastic Wave Propagation in Jointed Rockmass”, *M.S. Dissertation*, KAIST, Korea