

암반 불연속면이 동적 전단응력파에 미치는 영향

Effect of Rock Discontinuities on Dynamic Shear Stress Wave

손 무 락[†]

Moorak Son

Received: September 7th, 2018; Revised: October 8th, 2018; Accepted: November 14th, 2018

ABSTRACT : This paper investigates the effect of rock discontinuities on a shear stress wave that is induced by earthquake or blasting and provides the result of numerical parametric studies. The numerical tests of different conditions of rock and discontinuity have been carried out after confirming that the numerical approach is valid throughout a verification analysis from which the test results were compared with a theoretical solution. In-situ stress condition was considered as a rock condition and internal friction angle and cohesive value, which are the shear strength parameters, were considered as discontinuities condition. The joint inclination angle was also taken into account as a parameter. With the various conditions of different parameters, the test results showed that a shear stress wave propagating through a mass is highly influenced by the shear strength of discontinuities and the condition of joint inclination angle as well as in-situ stress. The study results indicate that when earthquake or blasting-induced dynamic loading propagates through a jointed rock mass or a stratified soil ground the effect of in-situ stress and discontinuities including a stratum boundary should be taken into account when evaluating the dynamic effect on nearby facilities and structures.

Keywords : Dynamic loading, Shear stress wave, In-situ stress, Discontinuity, Numerical analysis

요 지 : 본 논문은 암반에 형성되어 있는 불연속면이 지진 또는 발파에 의해 유발되어 암반을 통해 전달되는 동적 전단응력파에 미치는 영향에 대해서 수치해석적 매개변수 연구를 통해 조사하고 그 결과를 제시하는 것이다. 수치해석적 매개변수 연구를 수행하기 위해서 먼저 이론적 해를 얻을 수 있는 조건에 대해서 타당성해석을 수행하고 그 결과를 이론해와 비교한 후 암반조건 및 불연속면 조건을 달리한 경우에 대해서 매개변수해석을 수행하였다. 암반조건으로는 암반 초기 현장응력 상태가 고려되었으며 불연속면조건으로는 불연속면의 전단강도 정수인 마찰각과 점착력이 고려되었다. 또한 불연속면의 경사각 또한 매개변수로서 고려되었다. 이와 같은 다양한 조건의 매개변수연구를 통해 전단응력파의 변화를 파악한 결과, 매질을 통해 전달되는 동적 전단응력파는 암반의 초기 현장응력조건 뿐만 아니라 불연속면의 전단강도 및 경사각 조건에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 이를 통해 지진 또는 발파유발 동적하중이 절리형성 암반지층이나 서로 다른 지층으로 이루어진 토사지층을 통과할 때, 지층의 초기응력 상태와 더불어 불연속면 또는 지층경계면의 특성 등을 반드시 고려하여 주변시설물 및 구조물에 대한 동적영향을 파악해야 할 것으로 판단된다.

주요어 : 동적하중, 전단응력파, 초기 현장응력, 불연속면, 수치해석

1. 서 론

암반은 여러 가지 이유로 인해 다양한 형태(절리, 층리, 엽리, 단층 등)의 불연속면을 포함하고 있다. 이와 같은 불연속면은 암반의 강도 및 안정성에 있어서 큰 영향을 주며, 암반 내에 설치되는 대부분의 토목구조물과 시설물의 안정성은 암반 불연속면에 의해서 좌우된다고 해도 과언이 아니다. 이와 더불어 암반에 형성된 불연속면은 고정되도록 결합된 여러 형태의 인터페이스면과는 달리 불연속면의 미끄러짐이나 닫힘 또는 열림현상이 발생할 수 있는 특징이 있다. 암반은 자중 또는 원위치응력 같은 정적하중뿐만 아니라 지진이나, 발파, 진동과 같은 동적하중에 노출될 수 있으

며 이때 불연속면에서의 안정성은 더욱 감소될 뿐만 아니라 동적하중으로 유발되어 불연속면을 통해서 전달되는 다양한 파의 전달특성도 크게 영향을 받는다. 일반적으로 암반 지층에서 절리와 같은 불연속면의 존재는 파가 전달되는 동안에 전달파의 에너지를 흡수하고 감쇄시켜 지진파의 크기에 큰 영향을 미친다. 한국은 국토의 70% 이상이 산악지대로 구성되어있으면서 절리 등의 불연속면이 형성된 암반지층이 지하 얇은 깊이에서 출현하고 있으며, 다양한 형태의 발파작업이 빈번히 이루어질 뿐만 아니라 중·소 규모의 지진 또한 자주 발생하고 있다. 이와 같은 국내 지층조건 및 상황을 고려할 때 동적하중에 노출되는 지반구조물의 적절한 설계 및 안정성을 위해 관련 연구자들은 절리와 같은 불

[†] Professor, Department of Civil Engineering, Daegu University (Corresponding Author : mson@daegu.ac.kr)

연속면을 통한 동적 전달파의 전달특성 및 에너지감쇄 등에 대한 충분한 지식과 경험을 가지고 있어야 한다.

현재까지 미끄러짐 및 분리가 발생하지 않게 고정되어 결합된 여러 형태의 인터페이스면을 통한 전달파에 관한 연구(Kolsky, 1953; Johnson, 1972)는 물론이거니와 암반에 형성된 절리면과 같이 미끄러짐과 분리가 일어날 수 있는 불연속면을 통한 전달파의 전달특성에 대한 이론 및 실험, 수치해석을 통한 많은 연구가 이루어졌다. Miller(1978), Schoenberg(1980), Myer et al.(1990)은 불연속면을 통과하는 전달 탄성파의 에너지 흡수, 반사 및 전달, 전환 등에 대한 이론 또는 해석적 방법들을 제시하였으며 Boadu & Long(1996)은 전달파의 속도와 감쇄에 대한 불연속면의 영향에 대한 이론해를 제시하였고 실험결과와 비교하였다. Cai & Zhao(2000)는 불연속면의 간격과 파장의 길이 등을 고려한 다중 평행 불연속면의 응력파의 감쇄에 대한 분석적 해를 제시하고 2차원 수치해석을 통해 그 영향을 비교 및 조사하였다. Li & Ma(2009)는 불연속면의 충전물로 인한 동적 응력-변형을 관계파악을 위한 실험적 기법을 제시하였으며 Li et al.(2011)은 불연속면에 경사져 입사하는 파의 전달속도 등에 관한 식을 제안하였다. Perino(2011)와 Deng et al.(2012) 등은 절리형성 암석에 대한 3차원 수치해석을 수행하고 절리강성 및 파의 입사각 영향 등에 대해서 조사하였으며 Wu et al.(2013)은 서로 다른 채움재 특성을 가지는 평행하게 위치한 불연속면의 지진응답 이론 및 실험결과를 제시하였다. Sebastian & Sitharam(2014)은 불연속면을 통한 탄성파의 속도감쇄 등에 관한 실험 및 3차원 수치해석을 수행하고 불연속면의 강성 및 주파수 영향 등에 대해서 조사하였으며 Huang et al.(2016)은 채움재를 통한 고응력파의 전달특성에 대해서 조사하였다.

이외에도 많은 관련 연구가 이루어졌지만 불연속면을 통한 전달파의 전달특성에 대해 다양하고 복잡한 불연속면의 특성을 모두 고려하기에는 여러 가지 한계가 있어 지속적인 추가적 연구가 필요한 실정이다. 특히 매질을 통해 전달되는 여러 가지 파에 대한 불연속면의 경사영향, 마찰각 및 점착력 등의 전단강도 영향, 원위치응력 조건 및 전단강도 정수의 연관성 영향에 대한 조사는 충분히 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 영향인자들을 중심으로 수치해석적 매개변수 연구를 수행하고 그 결과를 분석하여 지진 또는 발파하중 등에 의해 유발된 동적 전달하중에 대한 불연속면의 영향과 이에 대한 고려의 필요성을 제시하고자 하였다. 수치해석은 먼저 이론적 해를 얻을 수 있는 조건에 대해서 기본해석을 수행하고 그 결과를 이론해와 비교하여 해석방법의 타당성을 확인한 후 다양한 인자 및 조건에 대해서 매개변수해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

2. 수치해석

이론 및 실험연구가 물리적 거동을 파악함에 있어서 근본적이고 실질적인 수단을 제시할 수 있는 반면에 여러 가지 제한사항으로 인하여 다른 방법을 모색할 필요가 있는 경우가 흔히 발생한다. 이와 같은 경우 수치해석적 접근방법이 하나의 대안이 될 수 있으며 이를 통해 복잡한 경계조건 및 구현이 어려운 실험조건 등을 용이하게 모델링 할 수 있다. 또한 다양한 인자를 고려하는 매개변수해석을 빠른 시간 안에 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그럼에도 불구하고 적용하고자 하는 수치해석적 방법은 이론해나 실험적 결과와 비교하여 해석결과가 충분한 타당성을 가지고 있는지 반드시 확인하여야 한다.

본 연구에서는 절리암반을 통해 전달되는 전단응력파의 절리면에 의한 에너지 흡수, 반사 및 전달에 대한 영향을 조사하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 사용된 수치해석 코드는 3차원 공간상에서 암반지층에 형성된 다양한 절리면을 묘사하고 해석할 수 있는 범용 프로그램인 3DEC(Three Dimensional Distinct Element Code)이며, 이를 이용하여 다양한 현장 및 절리조건에 대한 수치해석적 매개변수 연구를 수행하였다. 개별요소법에 근거한 이 프로그램은 절리가 형성된 암반지층의 거동을 잘 묘사할 수 있는 특징이 있다. 암반지층을 모델링함에 있어서 암석블록은 탄성체로서 모델링 하였고 절리요소는 주어진 전단강도 또는 인장 강도이상의 응력조건에서 미끄러짐 및 분리가 일어날 수 있도록 Coulomb slip 모델을 이용하여 모델링 하였다. 이를 통해 절리면의 특성(절리면 전단강도, 경사각, 절리수 및 간격, 방향 등) 및 응력조건, 경계조건 등의 현장조건과 동적 하중에 의해 발생하는 응력파의 종류, 크기 및 주파수, 전달 방향 등의 하중조건을 달리하여 전달되는 다양한 응력파의 거동특성을 조사할 수 있는 특징이 있다.

본 연구는 절리형성 암반지층에서 전달되는 전단응력파의 전달특성을 파악하는 것으로서 수치해석을 수행함에 있어서 직접 측정된 지진파가 아닌 진폭의 크기가 1.0MPa이고 주파수가 1Hz인 Sine 정현파의 전단응력을 사용하였다. 전단응력 정현파는 해석모델의 최 하단 경계면에 접선방향으로 적용하였으며(Fig. 1 참조), 이때 최하단면과 최상단면은 반사되는 응력파의 영향을 해소하기 위하여 점성(Viscous) 경계조건을 적용하였다. 전단응력파는 최하단에서 최상단 방향으로 수직으로 전달되며 입자이동은 전단응력파 전달 방향에 직각인 방향으로 움직이므로 이 방향에 대하여 변위가 발생할 수 있도록 모델링하였다. 더 나아가 평면 전단응력파 조건을 묘사하기 위하여 파가 전달되는 방향(z 방향)으로의 변위를 구속하였으며 평면 변형조건을 유지하기 위

Table 1. Properties and conditions in the numerical simulations

Case	Material properties				Joint conditions						
	E (MPa)	ν	ρ (kg/m ³)	In-situ stress (MPa)	ϕ (°)	c (MPa)	σ_t (MPa)	K_n (MPa/m)	K_s (MPa/m)	Joint inclination angle (°)	
Numerical verification	2.4×10^4	0.2	2,650	0	0	0.5, 0.1, 0.01	1.0e12	1.0×10^4	1.0×10^4	0	
Parametric study	2.4×10^4	0.2	2,650	0, 1	0, 30, 40	0.1	0	1.0×10^4	1.0×10^4	0 - 90	

E: Elastic modulus, ν : Poisson's ratio, ρ : Density, ϕ : Joint friction angle, c: joint cohesive strength, σ_t : joint tensile strength, k_n : Joint normal stiffness, k_s : Joint shear stiffness

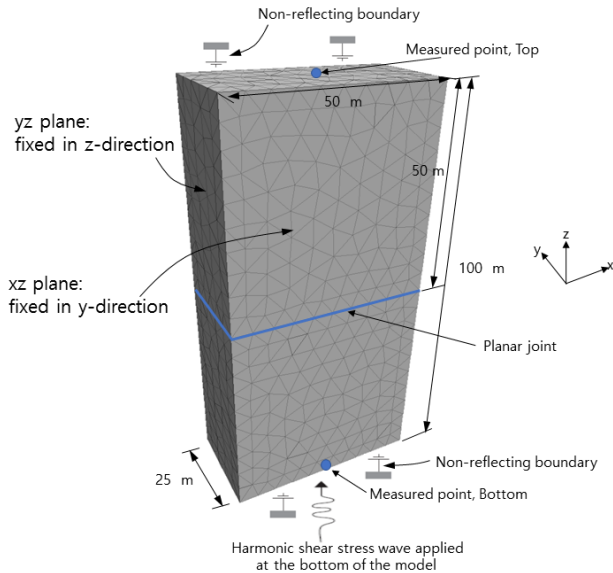


Fig. 1. Model of wave propagation in a mass containing a planar joint

하여 입자이동이 일어나는 방향과 직각인 방향(y 방향)에서의 변위를 구속하였다(Fig. 1). 해석에 사용된 물성치 및 해석조건은 Table 1에 정리하여 나타냈다. 해석조건은 크게 원위치응력, 절리 전단강도 정수(마찰각 및 점착력) 및 절리면 경사의 영향으로 나누어 구분하였다.

절리가 형성된 암반지층에서 절리면의 특성치인 수직강성계수(k_n) 및 전단강성계수(k_s)는 시험을 통해 절리면에 대한 수직응력과 변위관계, 전단응력과 전단변위 관계로부터 직접 산정할 수 있지만, Goodman(1989)은 Eq. (1)과 같은 해석적 방법을 제시하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{수직강성계수} : k_n &= \frac{E_m E_r}{s(E_r - E_m)} \\
 \text{전단강성계수} : k_s &= \frac{G_m G_r}{s(G_r - G_m)}
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

여기서, E_m 은 암반의 탄성계수를 나타내며, G_m 은 암반의 전단탄성계수, E_r 은 암석의 탄성계수, G_r 은 암석의 전단탄성계수, s 는 절리간격을 나타낸다.

매개변수 해석을 수행하기 전 해석모델의 적정성 및 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 답(이론해)을 알 수 있는 알 수 있는 조건(Miller, 1978)에 대하여 수치해석을 실시한 후 그 결과를 이론해와 비교하였다. Miller는 평면 고조 전단파가 절리와 같은 평면 경계면을 만날 때 발생하는 에너지의 전달(Transmission, T), 반사(Reflection, R) 및 흡수(Absorption, A)에 관한 분석해와 관련계수를 Eq. (2)와 같이 제시하였다.

$$\begin{aligned}
 T &= \sqrt{\gamma_1/\gamma_2} \times \sqrt{E_T/E_I} \\
 R &= \sqrt{E_R/E_I} \\
 A &= \sqrt{E_A/E_I} = \sqrt{[1 - R^2 - (\frac{\gamma_1}{\gamma_2}) T^2]}
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

여기서, T = 전달계수(경계면을 통과해 전달된 에너지), R = 반사계수(경계면에서 반사된 에너지), A = 흡수계수(경계면에서 흡수된 에너지)이며, E_I , E_R , E_T 는 각각 입사파, 반사파, 전달파와 연관된 에너지 플럭스(Energy flux)이고, γ_1 , γ_2 는 각각 평면 경계면을 기준으로 입사파 쪽 매질 1 및 반대쪽 매질 2의 전단탄성계수 (G)와 밀도(ρ)의 향으로 표현된 $(G_1\rho_1)^{1/2}$, $(G_2\rho_2)^{1/2}$ 이다. 만일 단일지층으로 이루어진 지층일 경우 하나의 값을 가진다. 입사파의 에너지 플럭스 E_I 는 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_I = \int_{t_1}^{t_1+T} \sigma_s v_s dt = \rho c \int_{t_1}^{t_1+T} v_s^2 dt
 \quad (3)$$

여기서 t_1 =입사의 시점에서의 시간, T=입사파의 주기($2\pi/\omega$), σ_s =전단응력, v_s =파의 진행방향 수직방향에서의 입자속도, ρ =입사파 쪽 매질의 밀도, c =전단 전단파의 속도($\sqrt{\frac{G}{\rho}}$), ω =입사파의 주파수(radian/sec)이다. E_I 는 경계면에서 슬립이 발생하지 않을 조건에서 입사파 쪽 매질의 최하단 중심점에서 측정된 입자속도를 토대로 결정되며, E_T 는 경계면에서 슬립이 발생한 조건에서 경계면을 기준으로 입사파 반대쪽 매질의 최상단 중심점에서 측정된 입자속도를 토대로 결정

된다. E_R 은 경계면에서 슬립이 일어난 조건에서 측정된 입사파 쪽 매질의 최하단 중심점에서 측정된 입자속도와 슬립이 일어나지 않은 조건에서 측정된 동일한 지점에서의 입자속도의 차이로부터 결정된다.

Fig. 2는 진폭의 크기가 1.0MPa이고 주파수가 1Hz인 Sine 정현파의 전달응력이 해석모델의 바닥면에 부과되었을 때 평면 절리경계면에서 점착력이 각각 0.5MPa, 0.1MPa, 0.01MPa 인 조건에서 얻어진 전달계수, 반사계수 및 흡수계수에 대한 Miller의 이론해와 수치해석 결과 값들을 서로 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 이론해와 수치해석 결과가 매우 유사하다는 것을 파악할 수 있으며, 이로부터 수치해석 모델링 및 방법은 매개변수연구를 수행하기에 충분한 타당성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 이를 토대로 다양한 조건에 대하여 아래와 같이 매개변수 연구를 수행하고 그 결과를 비교 및 분석하였다.

3. 다양한 조건에 대한 매개변수해석

3.1 원위치응력 및 마찰각의 영향

원위치응력 및 경계면의 마찰조건을 달리할 때 발생하는 에너지의 전달, 반사 및 흡수를 파악하기 위해 매개변수 해석을 수행하였다. 절리경계면에 마찰각이 없는 상태에서 서로 다른 원위치응력 조건에 대한 해석결과는 Fig. 3과 같다.

원위치응력을 고려하지 않은 상태에서 얻어진 전달응력은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 모델의 하단(Bottom)과 상단(Top) 모두에서 시간에 따라 큰 차이를 나타내지 않았으며 산정한 반사계수, 흡수계수 및 전달계수는 원위치응력이 없는 상태에서 각각 0.82, 0.56, 0.13 이었으며 원위치응력을 1.0MPa로 증가한 경우에도 각각 0.87, 0.47, 0.14로 절리경계면에서 흡수계수가 약간 감소한 경우 외에는 큰 차이를 나타내지 않았다. 하지만, 절리경계면에 마찰각이 있을 경

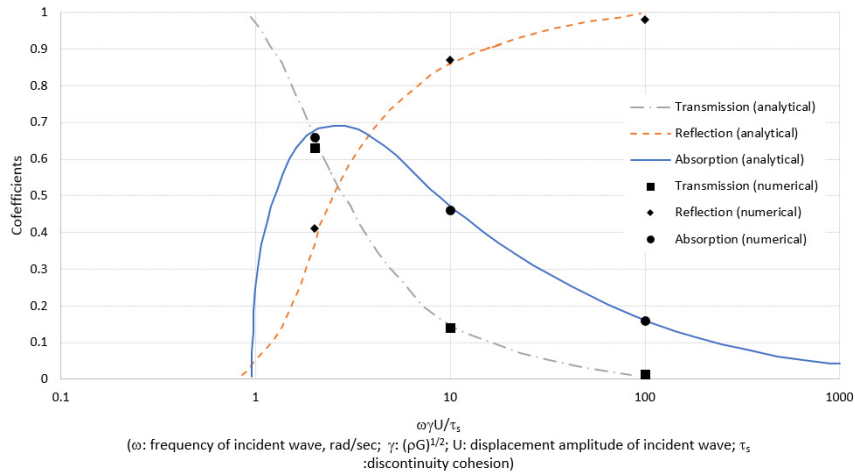


Fig. 2. Comparison of Miller's analytical solutions and numerical tests

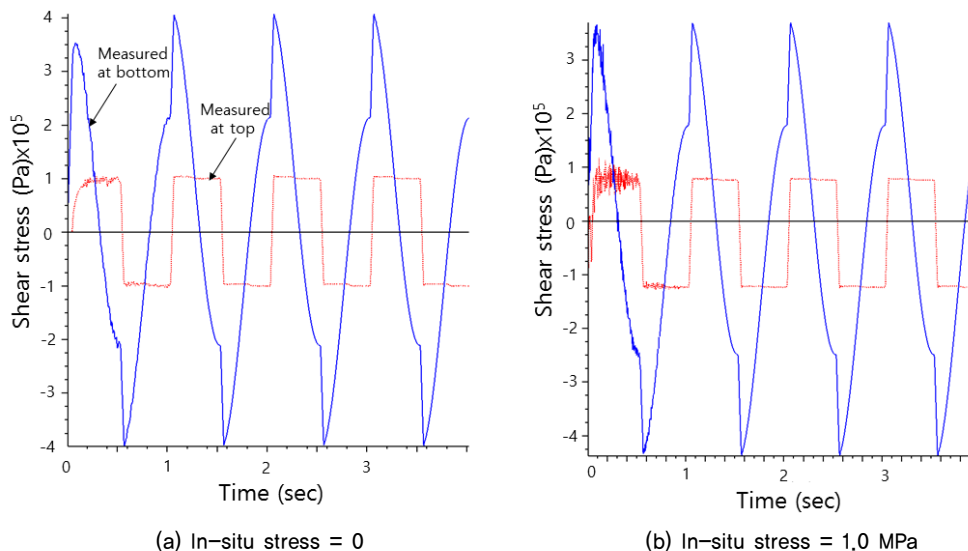


Fig. 3. Effect of in-situ stress ($\phi = 0$, $c = 0.1$ MPa, $\alpha_1 = 0$)

우 해석결과는 Fig. 4와 같이 매우 다른 양상을 나타냈다.

절리경계면에서 마찰각이 증가할수록 모델의 상단에서 발생하는 전단응력은 크게 증가하는 것으로 나타났다. 마찰각이 없을 경우 산정한 반사계수, 흡수계수 및 전달계수는 앞에 언급한 바와 같이 각각 0.87, 0.47, 0.14로 나타났으나 마찰각을 30°로 증가하면 그 값들은 각각 0.48, 0.68, 0.55로 나타나 반사계수는 줄어들고 전달계수는 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이와 더불어 흡수계수도 약간 증가하는 것으로 나타났다. 마찰각을 40°로 더 증가시키면 반사계수는 0.34로 더 줄어들고 전달계수는 0.69로 더 증가하며, 흡수계수는 0.64로 큰 변화를 나타내지 않았다. 이를 통해 원위 치응력이 있는 상태에서 마찰각의 증가는 절리 경계면에서 전단강도를 증가시켜 전파되는 전단응력에 의한 미끄러짐 현상이 줄어들고 더 큰 전단응력을 모델의 상단까지 전달시킨다는 것을 알 수 있었다.

3.2 절리경계면의 점착력 영향

절리경계면에서 점착력 조건을 달리할 때 발생하는 에너지의 전달, 반사 및 흡수를 파악하기 위해 매개변수 해석을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 5와 같다.

절리경계면에서 점착력이 증가할수록 모델의 상단(Top)에서 발생하는 전단응력 또한 크게 증가하는 것으로 나타났다. 점착력이 0.1MPa일 경우 산정한 반사계수, 흡수계수 및 전달계수는 앞에 언급한 바와 같이 각각 0.48, 0.68, 0.55로 나타났으나 점착력을 0.5MPa로 증가하면 그 값들은 각각 0.1, 0.38, 0.92로 나타나 반사계수는 크게 줄어들고 전달계수는 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이와 더불어 흡수계수도 감소하는 것으로 나타났다. 점착력을 전파되는 전단응력의 크기와 같은 1.0MPa로 더 증가시키면 반사계수는 없어지고 전달계수는 1.0으로 나타나 전파되는 전단응력이 절리경계면에서 아무런 영향 없이 모델의 상단부로 모두 전달

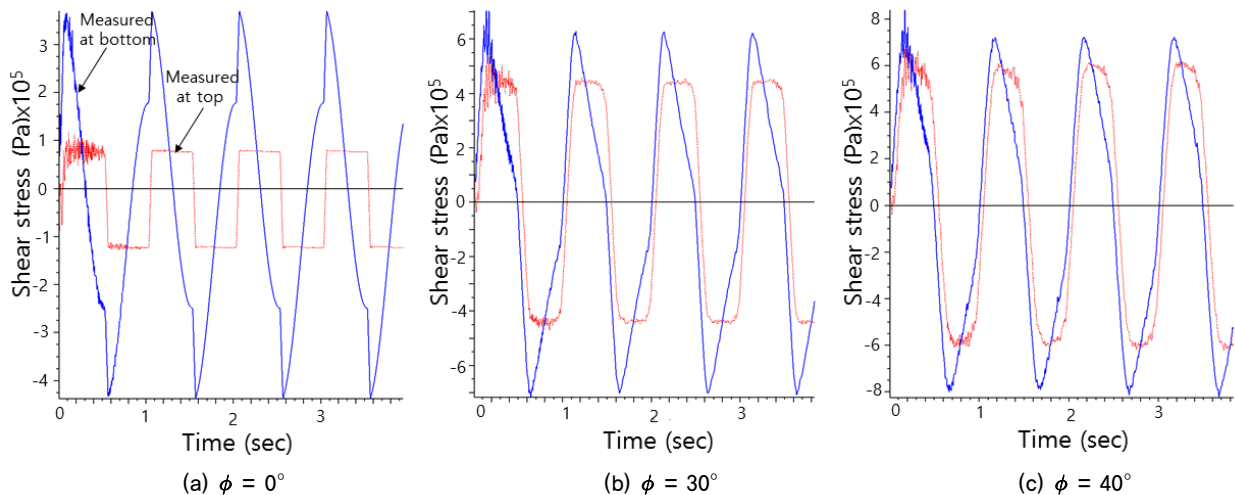


Fig. 4. Effect of friction angle at joint (In-situ stress = 1.0 MPa, $c = 0.1$ MPa, $\alpha_1 = 0$)

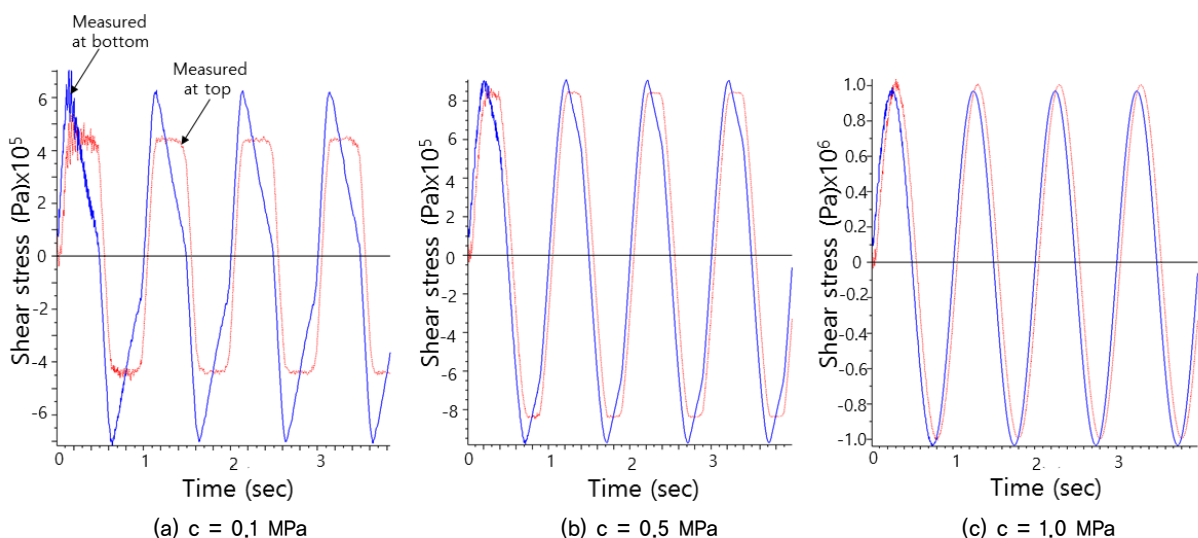


Fig. 5. Effect of friction angle at joint (In-situ stress = 1.0 MPa, $\phi = 30^\circ$, $\alpha_1 = 0$)

된다는 것을 알 수 있었다. 이와 더불어 흡수계수 또한 0.04로 나타나 절리경계면에서 에너지는 거의 흡수되지 않은 것으로 나타났다. 이를 통해 마찰각과 마찬가지로 절리경계면에서 점착력의 증가는 전단강도를 증가시켜 전파되는 전단응력에 의한 미끄러짐 현상이 줄어들고 더 큰 전단응력을 모델의 상단(Top)까지 전달시킨다는 것을 알 수 있었다. 마찰각의 영향과는 다르게 원위치응력이 없더라도 점착력의 증가는 유사한 결과를 발생시킨다는 것을 알 수 있었다.

3.3 절리경계면의 경사각 영향

절리경계면의 경사각을 달리할 때 발생하는 에너지의 전달, 반사 및 흡수를 파악하기 위해 매개변수 해석을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 6과 같다.

절리경계면이 수평이면서 경사지지 않아 전파되는 전단응력의 방향과 평행할 때 모델의 하단(Bottom)과 상단(Top)에서 발생하는 전단응력은 시간에 따라 대칭적 구조를 이루는 것으로 나타났으나 절리경계면이 전단응력의 방향과 경사져 있을 경우에는 시간에 따라 발생한 전단응력은 비대칭적 구조를 이루는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라, 절리경계면의 경사가 전파되는 전단응력의 방향과 비교하여 더 커질수록 응력발생 주기가 더 길어지는 것으로 나타났다. 절리경계면의 경사가 수평일 경우 산정한 반사계수, 흡수계수 및 전달계수는 각각 0.48, 0.68, 0.55로 나타났으나 절리경계면의 경사를 30°로 증가하면 그 값들은 각각 0.71, 0.01, 0.71로 나타나 반사계수 및 전달계수는 증가하고 흡수계수는 크게 감소하는 것으로 나타났다. 절리경계면의 경사를

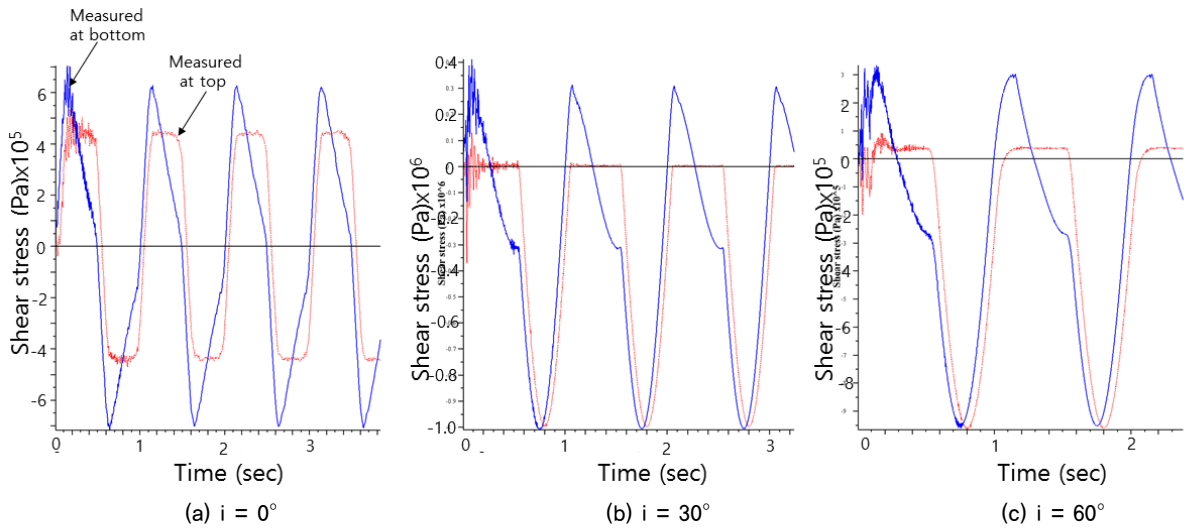


Fig. 6. Effect of joint inclination angle (In-situ stress = 1.0 MPa, $\phi = 30^\circ$, $c = 0.1$ MPa, $\alpha = 0$)

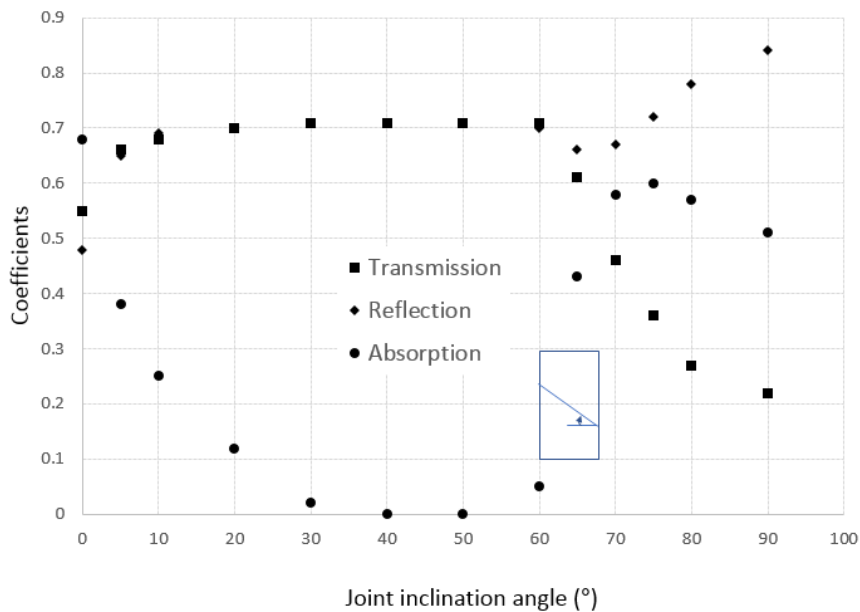


Fig. 7. Change of transmission, reflection, and absorption coefficients with joint inclination

60°로 더 증가시키더라도 반사계수(0.70), 흡수계수(0.05) 및 전달계수(0.71)는 절리경계면의 경사가 30°인 경우와 비교하여 모델의 상단에 발생하는 전단응력의 부호에 약간의 차이가 있는 것을 제외하고는 큰 차이를 나타내지 않았다. 이와 같은 결과는 절리경계면이 경사져 전파되는 전단응력에 의한 미끄러짐 현상이 수평으로 일어날 수 없는 조건에 기인한 것으로 판단된다. 절리경계면의 경사에 따른 전달, 반사 및 흡수계수의 변화를 Fig. 7에 나타냈다. 보는 바와 같이 절리경사각이 증가할수록 전달계수는 절리경사각 20°까지 증가하다가 이후 60°까지 큰 변화가 없었으며 60° 이후에는 다시 감소하는 것으로 나타났다. 반사계수도 비슷한 경향을 가지나 절리경사각이 90°에 가까워질수록 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 흡수계수는 절리경사면의 각이 증가함에 따라 감소, 증가, 감소패턴을 나타냈으나 절리경계면이 수평인 경우와 비교하여 모두 더 작은 값을 가지는 것으로 나타났다. 이를 통해 절리면 통과 시 에너지 흡수는 전단응력파의 방향과 평행한 절리면에서 가장 많이 일어나는 것으로 나타났다.

이와 같은 결과를 통해서 매질을 통해 전파되는 전단응력의 방향과 절리경계면의 상대적인 방향에 따라서 매질에서 발생하는 전단응력은 매우 다른 값들을 나타낼 수 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 절리 또는 층리, 단층 등의 불연속면이 형성된 암반지층이나 서로 다른 지층으로 이루어진 토사지층을 전단파가 통과될 때, 형성된 절리나 지층경계면의 방향과 비교하여 전달되는 전단파의 상대적인 방향을 반드시 고려하여 전달파에 대한 분석을 수행해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 원위치응력 및 절리경계면의 마찰조건을 달리할 때 발생하는 에너지의 전달, 반사 및 흡수를 파악하기 위해 매개변수 해석을 수행한 결과, 절리경계면의 마찰각이 없는 상태에서는 원위치응력의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 하지만, 절리경계면의 마찰각을 고려하면 원위치응력의 영향은 매우 큰 것으로 나타났으며 마찰각의 값이 클수록 전달계수는 증가하고 반사계수는 감소하는 것으로 나타났다. 이를 통해 원위치응력이 있는 상태에서 마찰각의 증가는 절리 경계면에서 전단강도를 증가시켜 전파되는 전단응력에 의한 미끄러짐 현상

이 줄어들고 더 큰 전단응력을 전달시킨다는 것을 알 수 있었다.

- (2) 절리경계면의 점착력 조건에 대한 해석결과, 점착력이 증가할수록 원위치응력과 마찰각에 관계없이 전달계수는 증가하고 반사계수는 감소하는 것으로 나타났다. 점착력을 전파되는 전단응력의 크기와 같은 값으로 증가시키면 반사계수는 없어지고 전달계수는 1.0으로 나타나 전파되는 전단응력이 절리경계면에서 아무런 영향 없이 전달된다는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 마찰각과 마찬가지로 절리경계면에서 점착력의 증가는 전단강도를 증가시켜 전파되는 전단응력에 의한 미끄러짐 현상이 줄어들고 더 큰 전단응력을 전달시킨다는 것을 알 수 있었다. 마찰각의 영향과는 다르게 원위치응력이 없더라도 점착력의 증가는 유사한 결과를 발생시킨다는 것 또한 알 수 있었다.
- (3) 절리경계면이 전단응력의 방향과 평행할 때 발생하는 전단응력은 시간에 따라 양 및 음의 값의 대칭적 구조를 이루는 것으로 나타났으나 절리경계면이 전단응력의 방향과 경사져 있을 경우에는 시간에 따라 발생한 전단응력은 비대칭적 구조를 이루는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라, 절리경계면의 경사가 전파되는 전단응력의 방향과 비교하여 더 커질수록 응력발생 주기가 더 길어지는 것으로 나타났다. 또한, 절리면 통과 시 전달 에너지의 전달, 반사 및 흡수는 절리경계면의 경사각에 따라 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며 흡수에너지는 전단응력파의 방향과 평행한 절리면에서 가장 많이 일어나는 것으로 나타났다.
- (4) 본 연구결과를 통해 매질을 통해 전파되는 전단응력의 방향과 절리경계면의 상대적인 방향에 따라서 매질에서 발생하는 전단응력은 매우 다른 값들을 나타낼 수 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 절리 또는 층리, 단층 등의 불연속면이 형성된 암반지층이나 서로 다른 지층으로 이루어진 토사지층을 전단파가 통과될 때, 형성된 절리나 지층경계면의 방향과 비교하여 전달되는 전단파의 상대적인 방향을 반드시 고려하여 전달파에 대한 분석을 수행해야 할 것으로 판단된다.
- (5) 향후 지진 또는 발파 유발 동적하중이 불연속면이 형성된 암반지층이나 서로 다른 지층으로 이루어진 토사지층을 통과할 때, 전파되는 응력파의 응력수준이 불연속면 또는 지층경계면의 특성에 의해 영향을 받거나 또는 영향을 미칠 때 이를 고려하여 주변시설물이나 구조물에 대한 영향을 파악해야 할 것으로 나타났다.

References

1. Boadu, F. K. and Long, T. L. (1996), Effects of fractures on seismic wave velocity and attenuation, *Int. J. Geophysics*, Vol. 127, pp. 86~110.
2. Cai J. G. and Zhao, J. (2000), Effects of multiple parallel fractures on apparent wave attenuation in rock masses, *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 37(4), pp. 661~682.
3. Deng, X. F., Zhu, J. B., Chen, S. G. and Zhao, J. (2012), Some fundamental issues and verification of 3DEC in modeling wave propagation in jointed rock masses, *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 45(5), pp. 943~951.
4. Huang, X., Qi, S., Xia, K., Zheng, H. and Zheng, B. (2016), Propagation of high amplitude stress waves through a filled artificial joint: An experimental study, *J. Appl. Geophys.* Vol. 130, pp. 1~7.
5. Johnson W. (1972), *Impact Strength of Materials*, Published by Edward Arnold, London, 361p.
6. Kolsky, H. (1953), *Stress Waves in Solids*, Clarendon Press, Oxford, 212 p.
7. Li, J. C. and Ma, G. W. (2009), Experimental study of stress wave propagation across a filled rock joint, *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 46, pp. 471~478.
8. Li, Y., Zhu, Z., Li, B., Deng, J. and Xie, H. (2011), Study on the transmission and reflection of stress waves across joints, *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 48, pp. 364~371.
9. Miller, R. K. (1978), The effects of boundary friction on the propagation of elastic waves, *Bull. Seis. Soc. America*, Vol. 68(4), pp. 987~998.
10. Myer, L. R., Pyrak-Nolte, L. J. and Cook, N. G. W. (1990), Effects of single fractures on seismic wave propagation, *Proc. of the International Symposium on Rock Joints*, A. A. Balkemapp, Rotterdam, pp. 413~422.
11. Perino, A. (2011), *Wave propagation through discontinuous media in rock engineering*, Ph.D. thesis, Polytechnic University of Turin, Italy.
12. Schoenberg, M. (1980), Elastic wave behavior across linear slip interfaces, *J. Acoust. Soc.*, Vol. 68(5), pp. 1516~1521.
13. Sebastian, R. and Sitharam, T. (2014), Transmission of elastic waves through a frictional boundary, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 66, pp. 84~90.
14. Wu, W., Li, J. and Zhao, J. (2013), Seismic response of adjacent filled parallel rock fractures with dissimilar properties, *J. Appl. Geophys.*, Vol. 96, pp. 33~37.