

해저터널 주변 그라우팅 보강암반의 탄성과 전달특성 평가

김지원¹ · 홍은수² · 조계춘^{3*}

¹비회원, 카이스트 건설 및 환경공학과 박사과정

²정회원, 카이스트 건설 및 환경공학과 연구부교수

³정회원, 카이스트 건설 및 환경공학과 교수

Assessment of elastic-wave propagation characteristics in grouting-improved rock mass around subsea tunnels

Ji-Won Kim¹, Eun-Soo Hong², Gye-Chun Cho^{3*}

¹KAIST, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Ph.D. Candidate

²KAIST, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Research Associate Professor

³KAIST, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Professor

ABSTRACT: Grouting is frequently used before the construction of subsea tunnels to mitigate problems that can occur in weak ground zones such as joints, faults or unconsolidated settlements during construction. The grout material injected into rock mass often flows through the discontinuities present in the host rock and hence, joint properties such as its distribution, roughness and thickness greatly affect the properties of grouting-improved rocks. The grouting-improved zones near subsea tunnels are also subjected to high water pressures that can cause long-term weathering in the form of changes in grout microstructure and crack formation and lead to subsequent changes in ground properties. Therefore, an assessment method is needed to accurately measure changes in the grouting-improved zones near subsea tunnels. In this study, the elastic wave propagation characteristics in grouting-improved rocks were tested for various axial stress levels, curing time, joint roughness and thickness conditions under laboratory conditions and the results were compared with wave velocity standards in different Korean rock mass classification systems to provide a basis for inferring improvement in grouted rock-mass.

Keywords: Grout, Rock grouting, Elastic wave surveying, Subsea tunnel

초 록: 해저터널 시공 중 단층, 파쇄대 및 미고결층 등의 취약한 지반조건에서 일어나는 문제점을 극복하기 위해 시공 중 그라우팅을 진행한다. 암반에서 그라우팅은 주로 불연속면을 따라 주입되므로 절리의 분포, 거칠기 또는 폭과 같은 절리 인자들이 그라우팅 보강암반의 물성에 지대한 영향을 미친다. 해저터널 주변의 그라우팅 보강암반은 해저환경에서 정수압을 다 부담하여 장기적인 열화와 미세구조변화 및 균열 등이 발생하며 암반물성이 시간에 따라 변하므로 그라우팅으로 인한 해저터널 주변암반의 장기적인 거동평가가 요구된다. 본 연구에서는 실내실험을 통해 다양한 축 응력, 양생기간 및 절리조건에서 그라우팅 보강암반의 탄성파 전달특성을 분석하였고 국내에서 사용되는 다양한 암반분류법들의 탄성파 기준을 고려하여 그라우팅 보강암반의 보강정도를 탄성파 속도로 추론하였다.

주요어: 그라우트, 암반 그라우팅, 탄성파 탐사, 해저터널

1. 서론

해저터널 시공 중 발생하는 문제점들은 단층, 파쇄

대 및 미고결층 등의 취약구간에서 자주 일어나며 막장면 붕괴, 지하수 유출, 터널 침수, 심각한 경우 시공 중단 등을 초래한다(Holzhauser et al., 2006). 다수의 해저터널의 시공사례를 보면 대부분의 취약구간은 폭 10 m~15 m 내외의 파쇄암 및 점토광물 혼합체로 구성되어있고, 이런 취약구간을 통한 해수

*Corresponding author: Gye-Chun Cho
E-mail: gyechun@kaist.edu

Received March 10, 2016; Revised March 21, 2016;
Accepted March 22, 2016

유입은 터널 시공 중에 큰 어려움을 일으킨 것으로 나타났다(Dahlö & Nilsen, 1994). 이러한 취약구간들은 탄성과 굴절법 탐사에서 상대적으로 낮은 탄성과 속도를 보여 3,500 m/s보다 낮은 탄성과 속도지역은 잠재적인 안정성 문제를 유발할 수 있다는 결론이 나왔다. 취약구간의 위치는 탄성과 굴절법 등의 비파괴검사 또는 파일롯 터널 시공 중의 지반조사를 통해 발견되고, 본선터널 시공 전에 취약한 암반의 변형성 및 강도를 개량할 목적으로 시멘트나 약액 등을 주입하는 프리그라우팅 공법이 널리 사용된다. 그라우팅 보강암반은 해저환경에서 정수압이 작용하므로 시공 후 장기적으로 열화가 발생하고 미세구조변화 및 균열발생 등으로 인해 지반특성치가 열화될 수 있어, 이러한 변화를 평가할 수 있는 정량적인 방법을 수립하는 것이 요구된다.

육상현장에서 그라우팅 보강지반의 물성변화 평가 및 안정성 해석에 필요한 인자인 탄성계수와 전단강도는 공내재하시험 또는 공내전단시험을 통해 계측한다. 그러나, 고수압이 작용하는 초장대 해저터널 현장에 라이닝 외부로 시추공을 뚫고 적용하기에 많은 제약이 있다. 따라서 최근에는 비파괴 탐사 방법인 탄성과 탐사를 이용한 그라우팅의 보강효과를 추론하는 연구가 많이 진행되었다. 지반탐사에 사용되는 탄성파는 크게 P파와 S파로 나누어진다. S파는 P파 뒤에 따라오므로 도달시간을 정확히 측정하는데 난점이 있고 S파 신호 발생과 수신에 P파보다 복잡하기 때문에 대부분의 탄성과 탐사에서 P파 속도가 사용된다. 여러 육상 현장의 탄성과 계측 값으로부터 그라우팅으로 인한 탄성과 속도증가가 보고되었으며(Lee et al., 1999; Hwang et al., 2000; Cho & Kang, 2003), Barton (2007)은 탄성과 속도와 암반조건간의 관계를 도출하였다. 그라우팅의 효과로 Q-system의 변수들 중, 그라우팅으로 인해 Q_D (암질지수), J_n (절리 수), J_r (절리 거칠기), J_a (절리 변질계수) 및 J_w (지하수 계수)가 Q값이 상승하는 것으로 나타났다. 이처럼 암반에서 그라우팅은 주로 단층, 파쇄대 등의 불연속

면을 따라 주입되므로 절리의 분포, 거칠기 또는 폭과 같은 절리 인자들이 그라우팅 보강암반의 물성에 지대한 영향을 미친다. 따라서 절리특성이 그라우팅 보강암반의 탄성과 전달 특성에 미치는 영향을 파악해야 한다.

본 연구에서는 마이크로시멘트 그라우트와 암석 디스크를 이용한 보강암반 시편을 제작하여 실내 탄성과 시험을 진행하였다. 절리암반 시편의 그라우팅으로 인한 탄성과 속도 변화를 측정하였고, 절리 거칠기와 그라우팅 된 절리 폭 등의 절리조건이 그라우팅 보강암반의 탄성과 전달 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 그라우트 양생기간에 따른 탄성과 속도 변화를 보기 위해 그라우트재 시편을 제작하여 보강암반 시편과 함께 7, 14, 28일간 수중 양생하여 탄성과 속도를 측정하였다. 각 시편의 탄성과 속도는 Fratta & Santamarina (2002) 에서 제시한 유사 정적 공진주 시험기(QSRC)를 통해 얻었고, 결과값을 국내 암반분류법의 탄성과 기준치와 비교하여 절리조건 및 양생기간을 고려한 그라우팅 보강암반의 보강정도를 추론하였다.

2. 암반의 등가연속체 모델

현장에서 계측된 탄성과 속도값은 현장응력조건, 지하수위, 절리분포 등 여러 변수에 의해 정해지므로 응력 또는 절리특성이 탄성과 전달에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 힘들다. 절리특성을 고려한 그라우팅 보강암반에 대한 실내실험 연구는 대부분 직접전단시험을 이용한 전단거동과 관련된 연구가 주를 이루며(Chun et al., 2002; Chun & Choi, 2003) 탄성과 전달특성은 그라우팅 보강암반이 아닌 그라우트재에 대한 연구만 진행되어 그라우팅 보강암반의 탄성과 전달특성에 대한 규명이 필요한 실정이다. 그라우팅 전의 취약구간 암반은 절리 및 파쇄대 등의 불연속면이 존재하는 매질이고 이러한 불연속면이 암반의 변형특성 및 탄성과 전달 특성을 지배한다. 불연속면에

서 탄성파의 감쇠 및 분산 등이 일어나므로 그라우팅 보강 전후 절리암반의 탄성과 전달 특성을 정확히 파악하기 위해선 불연속 매질에서의 탄성과 전달 모델이 필요하다.

절리암반에서의 탄성과 이론은 크게 불연속모델과 유효변형계수 모델로 나눌 수 있다. 불연속 모델은 절리를 파동 방적식의 경계조건으로 고려하고, 탄성 파에 의한 응력은 연속적이고 변형은 불연속적이라 가정한다. 불연속 모델을 이용한 탄성과 전달은 하나의 절리, 다수의 절리 및 채움물질 등의 절리특성을 고려한 연구가 많이 진행되었다(Pyarak-Nolte et al, 1990a; 1990b; Boadu, 1997). 반면 유효 변형계수 모델은 절리암반을 등가연속체로 가정하여 등가 유효 변형계수를 고려한다. Brillouin (1946)는 Fig. 1와 같이 일정한 질량 m 을 가진 입자들이 주기적으로 서로 s 만큼 떨어져 있고 강성 k 의 스프링으로 직렬연결 모델을 제시하였다. 여기서 k 는 선형적인 힘변위관계를 가지고 있고 두 스프링 사이 한 입자의 자유진동 공진주파수를 $\sqrt{k/m}$ 으로 나타내었다. 이 시스템에서 파장이 내부단위길이인 s 보다 매우 큰 장파가 전달 될 경우, 입자들 간의 위상차이가 적어 파가 불연속매질에서 연속체처럼 전파된다. Fratta & Santamarina (2002)는 이 모델을 이용하여 일정한 절리간격을 가진 절리암반 시편 내 전파되는 탄성파의 파장이 절리의 폭과 암반의 두께의 합보다 매우 클 경우, 탄성파가 장파운동을 고려할 수 있고 이때 절리암반을 등가연속체로 해석할 수 있다고 제시하였다. 또한 거칠기가 거의 없는 평절리가 등간격으로 일정하게 존재하는 절리암반 시편을 이용하여 등가연속체 암반시편을 모사한 실내시험을 진행하였다. Cha et al. (2009)는

암석 디스크를 수직으로 쌓아올린 등가연속체 암반시편에서 장파거동이 일어나는 디스크의 개수에 대한 시험을 진행하였다. 이 시험에서 쌓아올린 디스크 개수가 9개 이상이 되면 탄성과 속도가 수렴하여 등가연속체로 가정할 수 있는 장파거동이 나타나는 것을 발견하였다.

절리암반은 절리 조건에 따라 다른 탄성과 전파 특성을 보이며 Cha et al. (2009)는 유사 정적 공진주 시험기(Quasi-Static Resonant Column Test, QSRC)을 이용하여 절리암반의 응력 의존적 탄성과 전달특성에 대한 연구를 진행하였다. 여기서 암석 디스크간 교결현상이 시편의 전단파 속도를 증가시키고 응력 민감성을 저감시킨다는 결론을 도출하였다. 그러나 시험에 사용된 시편은 암석 디스크가 아닌 아세탈 디스크였고 디스크간 교결현상을 그라우트나 접착제가 아닌 다른 두께의 디스크를 사용하여 모사하여 그라우트재와 암반간의 이방성을 표현하기에 부족하다. 따라서 본 연구에서는 등가연속체 암반 모델을 적용한 실제 암석 디스크와 그라우트재로 그라우팅된 절리를 가진 보강암반 시편을 제작하여 QSRC 시험기를 이용해 초기 그라우팅, 양생 및 절리조건이 그라우팅된 절리암반의 탄성과 전달 특성에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

3. 유사 정적 공진주 시험(QSRC)

3.1 시험장치

QSRC 시험기는 중공형 절리암반 시편의 미소변형률 범위 내 탄성파를 측정할 수 있는 시험기이며 Fig. 2와 같이 알루미늄 상부 캡, 축 응력 재하용 봉, 바닥부 및 하부 지렛대 시스템으로 구성되어 있다. 암반 시편을 임피던스가 큰 강철 바닥부위에 올린 후 시편 상부에 상부 캡을 얹어 고정-자유 경계조건을 주었고, 축 응력은 긴 봉을 이용하여 상부 캡과 하부 지렛대 시스템을 연결하여 지렛대에 무게추를 올려 재하하였다. 탄성과 신호는 가속도계(PCB 352C22) 한 쌍을 통해

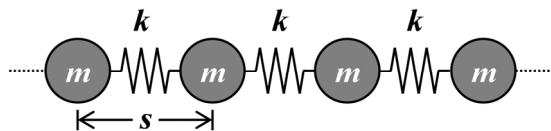


Fig. 1. Spring-mass network for modelling jointed rock

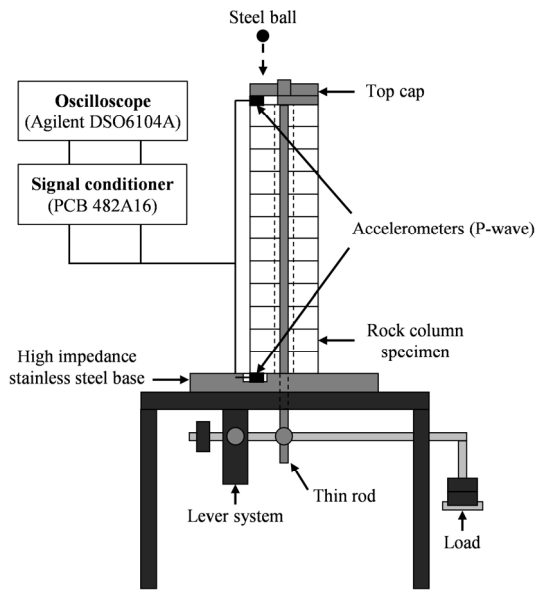


Fig. 2. Quasi-static Resonant Column (QSRC) Test Apparatus (Modified from Cha et al., 2009)

계측하였고 탄성과 계측을 위해선 Fig. 2와 같이 가속도계 하나는 시편 상부에, 다른 가속도계는 시편 바닥부에 그리스(grease)로 부착하였고 P파 신호는 지름이

10 mm인 볼 베어링을 시편 상부 기준으로 10 cm 높이에서 떨어뜨려 발생시켰다. 가속도계 신호는 신호 처리기(PCB 482A16)를 이용하여 증폭시켰고 오실로스코프(Agilent DSO6104A)를 통해 디지털 신호로 저장하였다.

QSRC에서의 탄성과 속도 V_P^{QSRC} 는 두 가속도계 신호 간의 시차 Δt 와 시편높이 L 을 이용하여 다음 식 (1)로 구한다.

$$V_P^{QSRC} = \frac{L}{\Delta t} \quad (1)$$

3.2 그라우트 및 그라우팅 보강암반 시편

본 연구에서 사용된 그라우트재는 물시멘트비 100%의 마이크로시멘트 밀크 그라우트이며 배합비는 Table 1과 같다. 마이크로시멘트는 평균입자크기가 5 μm 이내로 침투성이 좋아 미세균열까지 충전하므로 암반 및 연약지반의 주입재로 광범위하게 사용된다. 시멘트 중량의 5%만큼 추가된 무기계 급결제인

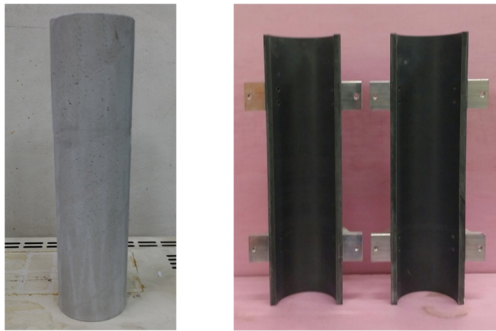
Table 1. Properties and mix ratio of microcement grout

Agents used	Manufacturer	W/C (%)	Water (g)	Cement (g)	Setting agent (g)
MICEM8000 (Microcement)	Ssang Yong Cement	100	150	150	7.5
Supercrete (Setting agent)	Union Corp.				

Table 2. Specification of grout and grouted rock specimens used in this study

Configuration	Geochang granite			Machun granite		Grout
	Grout curing	Joint roughness		Joint thickness		
Joint condition	Planar	Planar	Rough	Planar	Planar	-
Joint thickness (mm)	1.5	1.5	1.5	2.0	4.5	-
Outer diameter (mm)	67.0	51.5	51.7	63.0	63.0	62.4
Inner diameter (mm)	26.0	15.0	15.0	24.0	24.0	25.0
Length (mm)	311.0	301.5	309.0	268.5	291.0	295.0
Density (kg/m^3)	2295	2600	2628	2797	2714	1859
Wave velocity of intact rock specimen* (m/s)	4054	4065		4918		-
Number of discs in column	12	12	12	10	10	-

Wave velocities were obtained from free-free resonant column tests

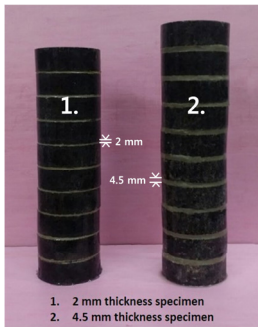


(a) Hollow cylindrical grout specimen (b) Mold for grout specimen

Fig. 3. Preparation of grout specimen



(a) Grout curing experiment (b) Joint roughness experiment



(c) Joint thickness experiment

Fig. 4. Grouted rock specimens used in this study

C₁₂A₇은 숏크리트 급결제로 널리 사용되며 그라우트의 젤타임을 급격히 단축시키는 역할을 한다.

보강암반과 별도로 그라우트재 자체의 수중양생에 따른 탄성과 전달특성을 보기 위해 PVC로 제작된

몰드를 이용하여 그라우트 공시체를 제작하였다. 그라우트 공시체는 중앙에 구멍이 뚫린 중공형 원통 시편으로 시편 중앙의 구멍은 몰드 하부에 직경 25 mm의 PVC 봉을 꽂아 시편을 제작하였다. 그라우팅 보강암반 시편은 중공형 암석 디스크 사이를 그라우트재로 접합하여 제작하였고 본 연구에서 사용된 암반시편의 특성은 Table 2에 명시되어있다. 사용된 암석 디스크는 두 종류의 화강암이다. 거친 절리를 가진 디스크는 암석절단기로 원통형 암반시편의 테두리를 일정한 간격마다 작은 홈을 낸 뒤, 비틀림 취성파괴를 일으켜 디스크간 표면이 거칠게 분할되도록 제작하였다. 이로 인해 연이은 디스크간의 거칠기면은 서로 맞물리게 된다. 그라우팅된 절리의 폭이 다른 시편은 디스크 사이를 접합하는 그라우트의 양을 조절하여 제작하였다. Fig. 4은 본 연구에서 사용된 그라우트 및 그라우팅 보강암반 시편의 사진이다. 그라우트와 그라우팅 보강암반 시편은 제작 후, 수중 양생하여 해저지반에 주입된 보강암반을 모사하였다.

3.3 시험조건

양생기간에 따른 그라우트의 특성변화 및 그라우팅이 절리암반의 동적 특성 미치는 영향을 파악하기 위해 그라우트 및 그라우팅 보강암반 시편을 제작하여 7, 14, 28일 동안 수중양생하였다. 또한 절리 거칠기와 절리 폭 등의 절리조건이 그라우팅 보강암반의 탄성과 전파특성에 미치는 영향을 보기 위해 디스크 절리면이 서로 맞물리는 거친절리(rough joint) 암반 시편을 제작하였고, 그라우팅된 평절리(planar joint) 폭이 2 mm와 4.5 mm인 시편과 함께 그라우팅 후 7일간 수중양생한 다음 탄성과 속도를 측정하였다. 그라우트 및 그라우팅 보강암반 시편은 QSRC 시험기 하부판에 고정시킨 후, 시편 상부에 상부 캡과 축응력 재하 봉을 연결하여 시편이 파괴되지 않는 범위 내인 250, 500, 750, 1,000 kPa의 축 응력을 재하하여 응력에 따른 각 시편의 P와 속도를 측정하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 양생기간에 따른 그라우트 및 그라우팅 보강암반 시편의 탄성과 전파특성 변화

Fig. 5는 거칠기가 거의 없는 평절리를 가진 등가연속체 절리암반 시편과 이를 그라우팅하여 7, 14, 28일간 수중 양생한 그라우팅 보강암반 시편 및 그라우트만으로 제작된 그라우트 공시체의 응력에 따른 탄성과 속도 결과이다. 불연속면이 없는 중공형 그라우트 시편의 탄성과 속도는 2,479~2,710 m/s 범위 내에 형성되고 응력에 따른 탄성과 속도 변화가 크지 않음을 확인할 수 있었다. 7일과 28일간 양생된 그라우트 시편의 탄성과 속도를 비교하였을 때, 지속된 시멘트 수화 및 경화로 인해 탄성과 속도가 증가하나 평균적으로 2.9%만 증가하여 양생으로 인한 탄성과 증가는 미미함을 알 수 있다. 반면 그라우팅이 되지 않은 초기 절리암반 시편은 불연속면 내 감쇠로 인해 탄성과 속도가 그라우트 시편보다 낮은 1,152~1,600 m/s 범위 내에 형성되었고, 축 응력증가로 인해 암석 디스크간 접촉면적 증가하여 그라우트 시편보다 상대적으로 큰 응력민감도를 보였다.

절리암반 시편을 그라우팅한 보강암반 시편의 탄성

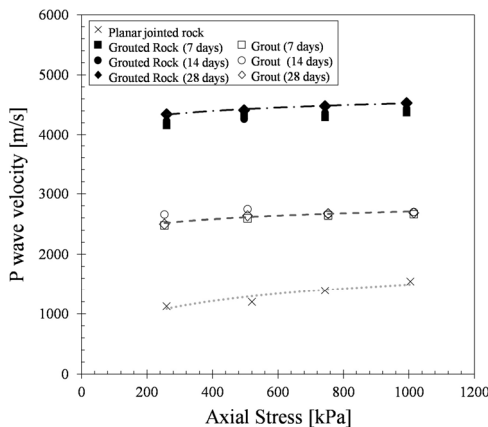


Fig. 5. P wave velocity vs. axial stress for grout and grouted rock specimens with curing time

파 속도는 초기 절리암반 조건보다 크게 증가하였고, 이는 그라우트가 절리를 채우고 암석 디스크 간을 접합함으로써 절리의 강성이 크게 증가함에 기인한다. 그라우팅으로 인해 그라우팅 보강암반의 탄성과 속도는 그라우팅 전 초기 절리암반 조건의 1,152~1,600 m/s 범위에 비해 각 응력조건에서 평균적으로 208.2% 증가하여 4,065~4,231 m/s 범위 내에 형성되었으며 초기 그라우팅으로 인한 암반의 탄성과 속도 증가를 확인하였다. 양생기간 7일과 28일을 비교하였을 때, 양생기간이 증가할수록 그라우트와 암석 디스크간의 연결강화 및 그라우트의 경화로 인해 탄성과 속도가 평균적으로 7.4% 증가하였으나, 양생으로 인한 탄성과 증가는 상대적으로 미미하였다. 28일 양생기간 데이터의 경향선을 보면 보강암반시편은 그라우트 시편과 유사한 낮은 응력민감도를 보인다.

4.2 절리 거칠기에 따른 그라우팅 보강암반의 탄성과 전파특성 변화

Fig. 6는 거친절리를 가진 암반시편과 평절리를 가진 암반시편의 그라우팅 전후 응력에 따른 탄성과 속도 결과이다. 거친절리를 가진 암반시편의 초기 탄성과 속도는 2,123~2,716 m/s 범위 내에 형성되어

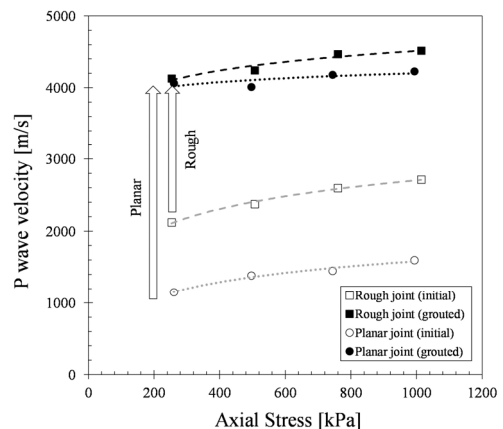


Fig. 6. P wave velocity vs. axial stress for planar-jointed and rough-jointed grouted rock specimens

탄성과 속도가 1,132~1,550 m/s 사이 존재하는 평절리 암반시편보다 큰 탄성과 속도를 보인다. 이는 암석 디스크간의 물립으로 인한 접촉면 증가로 탄성과 전달이 증가되어 속도가 증가하기 때문이다. 절리를 그라우팅한 두 암반시편 모두 탄성과 속도가 증가하고 거친절리 보강암반과 평절리 보강암반 시편의 탄성과 속도가 유사한 범위 내에 형성된다. 그러나, 평절리 암반시편이 그라우팅으로 인해 낮은 응력민감도를 보인 반면 거친절리 암반시편의 응력민감도는 그라우팅 전과 유사한 거동을 보인다.

암반절리의 거칠기는 JRC (Joint Roughness Coefficient) 등을 이용하여 정량화할 수 있으나, 대개 정량적으로 평가하기 힘든 인자이다. 따라서 본 연구에서는 등가 연속체 탄성과 속도 모델을 사용하여 그라우팅 전후 절리 거칠기의 영향을 절리의 수직강성 k_n 으로 나타내어 분석하였다. Fig. 7과 같이 탄성계수 E 를 가진 암반에서 수직강성 k_n 을 가진 절리가 일정한 간격 S 으로 분포되어있다고 가정하면, 장파거동 시 절리암반은 등가연속체로서 등가 탄성계수인 E_{eq} 를 가진다. 수직 응력 σ 이 작용할 때, 연속체에서의 변형은 암석 블록에서의 변형(σ/E)S 과 절리에서 변형 (σ/k_n)의 합으로 볼 수 있고 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{E_{eq}} = \frac{1}{E} + \frac{1}{k_n S} \quad (2)$$

절리암반 및 그라우팅 보강암반의 등가 탄성계수는

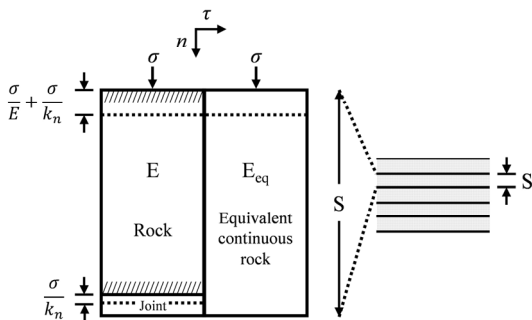


Fig. 7. Equivalent continuum model for jointed rocks (from Goodman, 1989)

탄성과 시험에서 얻은 P파 속도를 이용하여 다음 식으로 찾을 수 있다.

$$E_{eq} = \rho \times V_p^2 \quad (3)$$

이 때, ρ 는 암석의 밀도이다. 탄성과 시험값을 이용하여 절리의 수직강성을 계산한 결과, 그라우팅 전 평절리는 평균 7.44 GPa/m, 그라우팅 전 거친절리는 평균 1.77 GPa/m의 값을 보여 Pariseau (2011)가 제시한 절리암반의 수직강성 범위 내에 형성된다. 그라우팅 전의 평절리 시편과 거친절리 시편은 상이한 절리 수직강성을 보이나, 그라우팅 후 평절리의 수직강성은 평균 0.82 GPa/m로 그라우팅 후 평균 0.79 GPa/m 값의 수직강성을 가진 거친절리와 유사한 값을 보인다. 그러나 그라우팅 된 보강암반은 암석 디스크간 접합으로 인해 더 이상 불연속 매질로 보기 어려우므로 이 모델은 제한적이고 그라우팅으로 인한 절리충진 및 교결을 표현할 수 있는 새로운 모델이 요구된다.

4.3 그라우팅된 절리 폭에 따른 그라우팅 보강암반의 탄성과 전달특성 변화

Fig. 8은 7일간 수중 양생한 2 mm 절리폭과 4.5

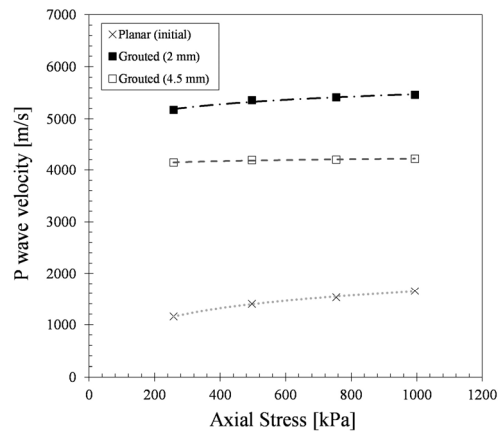


Fig. 8. P wave velocity vs. axial stress for grouted rock specimens of different grouted joint thickness

mm 절리 폭을 가진 그라우팅 보강암반 시편의 응력에 따른 탄성과 속도 결과이다. 두 시편 모두 그라우팅으로 인해 탄성과 속도가 증가하나, 값들이 폭에 따른 서로 다른 범위 내에 형성되었다. 2 mm 절리폭 보강암반의 탄성과 속도는 5,517~5462 m/s 범위 내에 형성되어 탄성과 속도가 4,142.5~4,217 m/s 내에 존재하는 4.5 mm 절리폭 보강암반보다 큰 탄성과 속도 증가량을 보인다. 이는 그라우팅 된 절리의 충진 효과와 교결 효과의 차이에 기인한다.

그라우팅된 절리는 충진 효과와 교결 효과를 가지고 있고, 전단거동에 큰 영향을 미치는 교결효과는 디스크와 그라우트 간의 접촉면 근처 구간에서 일어난다. 이 구간을 제외한 나머지 구간은 절리충진 구간으로 이 절리충진 구간이 커질수록 암석보강 시편에 그라우트의 특성이 더욱 반영되고, 그라우트는 암석 디스크보다 낮은 탄성과 속도를 가지고 있으므로 그라우팅된 절리의 폭이 커질수록 더욱 낮은 탄성과 속도를 보인다.

4.4 현장적용 및 암반분류 기준

현장 암반의 공학적 특성을 정확히 판단하기 위해 암반분류를 실시한다. 현재 국내에서 사용되는 여러

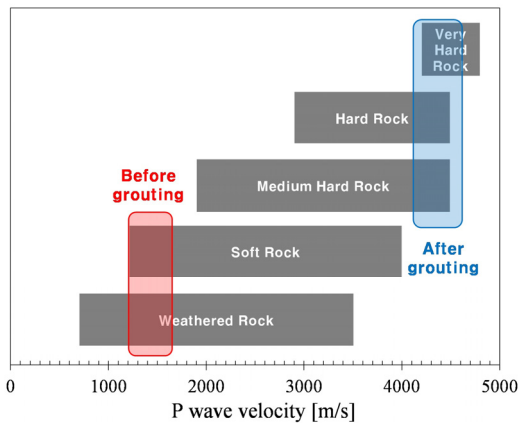


Fig. 9. P wave velocity ranges for Korean rock mass classification systems and ranges for rock specimens before and after grouting

암반분류법 중, 탄성과 속도를 분류요소로 활용하는 분류 기준은 건설표준품셈, 지질조사표준품셈, 한국도로공사 기준, 서울지하철공사 기준, 한국고속철도 건설공단 기준 등이 있고, 이 기준들의 암종별 탄성과 속도범위는 Fig. 9에 명시되어있다(Kim & Lee, 2008). 본 연구에서 사용된 초기 절리암반 시편들의 탄성과 속도는 풍화암과 연암의 범위 내에 존재한다. 그러나, 그라우팅으로 인해 중경암 또는 경암의 범위내로 들어오게 되고 분류기준에 따라 극경암으로 분류되기도 한다. 분류법에 사용되는 현장의 탄성과 속도는 현장의 응력조건, 지하수위, 절리분포 등 여러 변수를 포함한 계측값이므로 실내 시험값과 상이한 결과를 보일 수 있다. 그라우팅에 의한 탄성과 속도의 분포범위가 넓어서 암반의 공학적인 특성을 일반적인 기준으로 잡아서 적용하는 것은 쉽지가 않다. 그러나, 절리암반의 다양한 절리조건 및 양생기간 등의 인자들이 탄성과 전달특성에 미치는 영향을 파악하여 그라우팅 보강암반의 보강정도를 탄성과 속도로 추론이 가능할 것으로 생각된다.

5. 결론

본 연구에서는 그라우팅 보강 및 그라우트의 수증양생이 절리암반의 탄성과 전달특성에 미치는 영향과 암반의 절리특성이 그라우팅 보강암반의 탄성과 전달특성에 미치는 영향을 분석하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 초기 절리조건과 관계없이 그라우팅으로 인해 절리 충진과 암석 디스크간 교결이 일어나 암반시편의 탄성과 속도가 증가하고 응력민감도가 감소한다.
2. 그라우트와 그라우팅 보강암반의 탄성과속도는 양생기간에 따른 시멘트 수화로 점점 증가하는 경향을 보이나, 초기 그라우팅으로 인한 증가율보다 영향이 미미하다.
3. 절리 거칠기는 그라우팅 전 절리암반의 탄성과 전달 특성에 영향을 미치나, 그라우트 주입 후 보강

- 암반의 탄성과 전달 특성에 미치는 영향은 미미하다.
4. 그라우팅된 절리의 폭이 커질수록 그라우트재의 특성이 반영되어 그라우팅된 보강암반의 탄성과 속도는 상대적으로 감소한다.
 5. 국내 암반분류법의 탄성과 분류기준에 따라 절리 암반의 그라우팅으로 인한 보강효과를 확인하였고 탄성과 속도로 절리암반의 보강정도를 추론할 수 있다.

향후 다양한 암석시편, 응력 조건 및 그라우트재를 이용한 추가실험을 통해 실제 해저터널 현장 조건을 고려한 그라우팅 보강암반의 탄성과 전달 데이터베이스를 구축하고, 해저터널 주변 그라우팅 보강암반의 보강효과 평가 및 설계 지반 특성치 결정에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발(13SCIP-B06-6321-01)’ 연구단과 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20131010501790). 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Barton, N. (2007), Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy, CRC press, London, pp. 170-177.
2. Boadu, F.K. (1997), “Fractured rock mass characterization parameters and seismic properties: Analytical studies”, Journal of Applied Geophysics, Vol. 36, pp. 1-19.
3. Brillouin, L., (1946), Wave Propagation in Periodic Media, Dover, New York.
4. Cha, M., Cho, G.C., Santamarina, J.C. (2009), “Long-wavelength P-wave and S-wave propagation in jointed rock masses”, Geophysics, Vol. 74, No. 5, E205-E214.
5. Cho, M.R., Kang, T.H. (2003), “Application of the SASW method to the evaluation of grouting performance for a soft ground of a tunnel”, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 19, No. 6, pp. 273-283.
6. Chun, B.S., Kim, D.Y., Lee, Y.N. (2002), “Shear characteristic of the cement grouted sawtoothed joints”, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 22, No. 5-C, pp. 469-478.
7. Chun, B.S., Choi, J.K. (2003), “A study on the reinforcement of rock faults by grouting”, Korean Geo-Environmental Society, Vol. 4, No. 4, pp. 45-51.
8. Dahlø, T.S., Nilsen, B. (1994), “Stability and rock cover of hard rock subsea tunnels”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 9, No. 2, pp. 151-158.
9. Fratta, D., Santamarina, J. (2002), “Shear wave propagation in jointed rock: State of stress”, Géotechnique, Vol. 52, No. 7, pp. 495-505.
10. Goodman, R.E. (1989), Introduction to Rock Mechanics, Vol. 2, Wiley, New York.
11. Holzhäuser, J., Hunt, S., Mayer, C. (2006), “Global Experience with Soft Ground and Weak Rock Tunneling under Very High Groundwater Heads”, Paper presented at the Proc. of the North American Tunneling Conference in Chicago.
12. Hwang, Y.C., Kim, N.Y., You, B.O., Kim, S.H., Choi, Y.K. (2000), “Evaluation of Grouting Effects using FRP Pipe in Soil Slope”, Korean Society of Civil Engineers, No. 2, pp. 571-574.
13. Kim, M.G., Lee, Y.S. (2008), “A suggestion of a new rock mass classification system”, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 24, No. 11, pp. 43-53.
14. Lee, J.S., Bang, C.S., Mok, Y.J., Joh, S.H. (1999), “Verification of the grouting effect using seismic tests and back analysis”, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 19, No.

- 3-6, pp. 1135-1142.
15. Pariseau, W.G. (2011), Design Analysis in Rock Mechanics, Second Edition, CRC Press, London, pp. 507-511.
16. Pyrak-Nolte, L.U., Myer, L.R., Cook, N.G. (1990a) "Transmission of seismic wave across single natural fracture" Journal of Geophysical Research, Vol. 95, pp. 8617-8638.
17. Pyrak-Nolte, L.U., Myer, L.R., Cook, N.G. (1990b) "Anisotropy in seismic velocities and amplitudes from multiple parallel fractures" Journal of Geophysical Research, Vol. 95, pp. 11345-11358.