

# 암석 및 절리특성을 고려한 암반의 탄성계수 추정에 관한 수치해석적 연구

손무락\* · 이원기\*\*

Son, Moorak\*, Lee, Wonki\*\*

## Study on Numerical Analysis of Estimating Elastic Modulus in Rockmass with a Consideration of Rock and Joint Characteristics

**ABSTRACT :** Elastic modulus in rockmass is an important factor to represent the characteristic of rock deformation and is frequently used to estimate the displacement induced due to tunnel excavation or other activities in rockmass. Nevertheless, the study to estimate the elastic modulus, which considers the rock type and joint characteristics (joint shear strength and joint inclination angle), has been done in less frequency. Accordingly, this study is aimed at estimating of elastic modulus in jointed rockmass. For this purpose, numerical parametric studies have been carried out with a consideration of rock and joint conditions. Tunnel displacement results have been used to estimate the elastic modulus of jointed rockmass using the elastic theory of circular tunnel. From this study, the results would be expected to have a great practical use for estimating the displacement induced due to tunnel excavation or other activities in jointed rockmass.

**Key words :** Elastic modulus, Rockmass, Excavation, Joint characteristics, Displacement

**초 록 :** 암반에서의 탄성계수는 암반의 변형특성을 나타내는 매우 중요한 인자로서 암반에서의 터널굴착 또는 다른 활동 등으로 인해 발생하는 변위를 파악하는데 자주 이용된다. 그럼에도 불구하고 현재까지는 암석종류 및 절리특성을 반영하여 탄성계수를 산정하는 연구는 미흡한 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구는 다양한 암석 및 절리상태에서 암반의 탄성계수를 추정하고자 한다. 이를 위해서 암석상태 및 절리특성을 고려한 수치해석 매개변수 연구를 수행하고, 조사된 변위결과를 통해 암반에서의 원형터널에 대한 탄성이론을 역이용하여 암석종류 및 절리특성이 반영된 탄성계수를 추정하는데 사용될 것이다. 본 연구를 통해 얻어진 결과는 절리가 형성된 암반에서 터널 굴착 또는 다른 활동 등으로 인해 발생하는 변위를 파악함에 있어서 그 활용도가 매우 클 것으로 기대된다.

**검색어 :** 탄성계수, 암반, 굴착, 절리특성, 발생변위

### 1. 서 론

우리나라는 지형특성상 국토전역의 약 70%이상이 산지로 되어있어 도로 및 철도공사에 있어서 터널공사는 필수적으로 동반되고 있다. 산악지형은 대부분 암반지층이 형성되어 있고, 암반지층에는 다양한 종류의 절리가 포함되어 있다. 암반내에 발달되어 있는 절리면의 전단강도, 절리각도, 절리간격 및 절리군의 수 등은 암반에서의 지반거동을 지배하는 중요한 요소들이며, 암반에서의

\* 정희원 · 교신저자 대구대학교 토목공학과 교수, 공학박사/기술사 (Corresponding Author · Department of Civil Engineering at Daegu University · mson@daegu.ac.kr)

\*\* 대구대학교 토목공학과 석사과정 (suncome2000@hanmail.net)

Received October 5 2012, Revised November 6 2012, Accepted November 23 2012

탄성계수는 암반의 변형특성을 나타내는 매우 중요한 인자로서 암반에서의 터널굴착으로 인한 내공변위를 파악하는데 이용된다. 그럼에도 불구하고 현재까지는 암석종류 및 절리특성을 반영하여 탄성계수를 산정함에 있어서 많은 애로점이 있어왔다. 따라서, 손무락 등 (2011)은 하나의 절리군이 형성된 암반에서의 탄성계수를 추정하는 방법을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 기존의 연구를 확장하여 다양한 암석의 종류 및 절리특성(절리전단강도, 절리각도 및 절리군의 수)을 고려한 암반에서의 터널굴착으로 인한 굴착면에서의 발생변위를 조사하여, 그로부터 암반의 탄성계수를 기존의 탄성이론식으로부터 역산정하기 위해 다양한 조건에서의 수치해석적 매개변수 연구를 수행하였다.

## 2. 기존 암반의 탄성계수 추정방법

기존 암반에서의 탄성계수 추정에 대한 일반적인 방법으로는 직접적인 현장측정 방법 및 간접적인 다양한 경험식들이 있다. 직접적인 현장측정 방법으로는 평판잭킹시험(PJT), 평판재하시험(PLT), 굿맨잭시험(Goodman jack test), 플레이트잭시험, 케이블잭킹시험, 레디얼잭시험, 딜라토미터시험, 및 프레셜 챔버 등이 있으며, Fig. 1은 현장측정 방법의 대표적인 방법인 평판잭킹시험(PJT), 평판재하시험(PLT) 및 굿맨잭시험(Goodman jack test)의 측정 방법을 보여주고 있다.

이러한 시험방법은 현장에서의 직접적인 측정을 통한 방법으로, 측정영역에 있어서 한계가 있을뿐만 아니라 측정에 소요되는 시간, 인력 및 비용도 상당하여 터널이 굴착되는 암반지역에

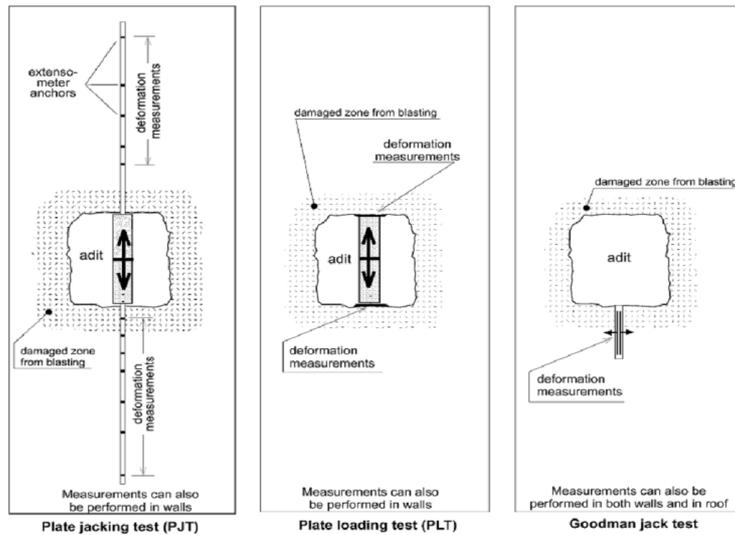


Fig. 1. Examples of direct field measurement (Palmstrom and Singh, 2001)

Table 1. Empirical expressions for estimating the elastic modulus of rock mass

Previous studies	Empirical equations	Constraints
Bieniawski (1978)	$E_m = 2RMR - 100$	$RMR > 50$
Serafim and Pereira (1983)	$E_m = 10^{(RMR - 10)/40}$	$RMR < 50$
Grimstad and Barton (1993)	$E_m = 25 \log_{10} Q$	$Q > 1$
Clerici (1993)	$E_m = E_{r\ stat} \times E_{m\ dyn} / E_{r\ dyn}$	$RMi > 0.1$
Palmstrom (1996)	$E_m = 5.6 RMi^{0.375}$	$RMi > 0.1$
Hoek and Brown (1998)	$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \times 10^{[(GSI - 10)/40]}$	$\sigma_c < 100 \text{ MPa}$
Bieniawski (1989)	$E_m = E \cdot f(RQD)$	

$E_m$  = Modulus of deformation of rock mass(in GPa),  $E$  = Modulus of deformation of rock,  $\sigma_c$  = Uniaxial compressive strength(in MPa),  $RMi$  = Rock Mass index,  $GSI$  = Geological Strength Index,  $E_{r\ stat}$  = Static elasticity modulus of intact rock,  $E_{r\ dyn}$  = Dynamic elasticity modulus of intact rock,  $E_{m\ dyn}$  = Dynamic in situ deformation modulus,  $f(RQD)$  = coefficient depending on RQD

서의 탄성계수를 추정함에 있어서 많은 제약이 따른다. 따라서 이러한 제약 및 측정방법별 오차 등의 문제점을 줄이기 위해 다양한 경험식들이 제안되었다. Table 1은 여러 연구자들에 의해 제안된 다양한 경험식들을 보여주고 있다.

이러한 경험식들은 다양한 현장에서 실시한 현장계측 결과를 수집하고, 분석하여 얻어진 것들로서, 현장측정 방법보다 용이하게 암반지역의 탄성계수를 추정할 수 있지만, 실제 암반지형의 다양한 절리특성을 충분히 반영하지 못한다는 점과 Q 및 RMR값의 산정방법 및 측정범위에 한계가 있다.

이상의 직접적인 현장측정 방법이나 간접적인 경험식들은 다양한 암석 및 절리특성(절리전단강도, 절리각도, 절리간격 및 절리군의 수 등)을 가진 암반의 탄성계수를 추정하는데 있어서 여러 한계점이 있다. 따라서 본 연구에서는 암석종류 및 다양한 절리특성을 반영한 암반의 탄성계수를 추정하기 위해 UDEC을 이용한 불연속체 수치해석을 수행하고, 수치해석을 통한 발생변위를 이용하여 암석 및 절리특성에 따른 탄성계수를 추정하는 방법과 그 결과를 제시하고자 한다.

### 3. 수치해석적 매개변수 연구

본 연구에서는 암반에서 발달된 불연속면을 고려하여 암석블록 자체의 거동보다 절리의 거동에 의해 전체적인 거동이 지배되는 암반특성을 평가하기 위해 개별요소법에 근거한 UDEC (Universal Distinct Element Code)을 사용하였고, 해석에 사용된 암반블록은 탄성체로 모델링 하였으며, 절리면의 거동은 Coulomb Slip Model을 이용하여 모델링 하였다.

수치해석에 사용된 해석영역은 가로 및 세로를 각각 60m로 설정 하였으며, 절리간격은 1m, 굴착터널의 깊이 및 직경은 각각 30m 및 6m로 설정하였고, 암반의 자중을 고려하지 않는 대신  $K_0 = 1$ 의 상태로 가정하여 암반의 초기응력  $\sigma_v = \sigma_h = 780 \text{ kPa}$ 을 해석모델의 경계면에 부여하였다. 이와 같은 해석 모델을 통하여 터널을 굴착하고 이로부터 발생하는 변위를 조사하였다 (Fig. 2참조).

다양한 매개변수 해석을 위해 암반블록의 종류를 경암, 연암, 풍화암 및 완전풍화암으로 구분하였고, 각 암반에 해당되는 절리 물성치는 양호, 보통, 불량 및 매우불량에 해당되는 물성치를 부여하였으며, 해석에 사용된 암석 및 절리 물성치 (Table 2)는 다양한 자료 (Coulson, 1970, Barton, 1976, Serafim & Pereira, 1983, Goodman, 1989 등)를 참조하여 산정되었다. 각 해석경우에 있어서 절리각도 및 절리군의 수를 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 90° 및 절리군 1개, 절리군 2개로 달리하여 해석을 수행하였고, 절리간격은 모든 경우에 있어서 1m로 가정하였다 (Fig. 3참조).

Table 2에서 경암의 경우 절리특성이 양호하며, 절리간격 1m에 해당하는 RMR값 85를(Hoek & Brown, 1988)가정하여  $E_m = 2RMR - 100$  (Bieniawski, 1976)의 관계로부터 절리를 포함한 암반의 탄성계수( $E_m$ )를 결정한 후에 아래의 식 (1) 및 식 (2)를(Goodman, 1989) 이용하여 수직강성계수( $k_n$ ) 및 전단강성계수( $k_s$ )를 결정하였다.

$$\text{수직강성계수} : k_n = \frac{E_m E_r}{s(E_r - E_m)} \quad (1)$$

$$\text{전단강성계수} : k_s = \frac{G_m G_r}{s(G_r - G_m)} \quad (2)$$

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.

위의 식에서 암반의 전단탄성계수( $G_m$ )는 아래의 식 (3)의 E항에 암반의 탄성계수( $E_m$ )을 적용하여 결정하였고, 암석의 전단탄성계수( $G_r$ )는 암석의 탄성계수( $E_r$ )를 적용하여 결정하였다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

나머지 암반들에 대하여는 암반의 탄성계수( $E_m$ )를 경암을 기준으로 일반적인 암석의 탄성계수 비의 범주에 속하도록

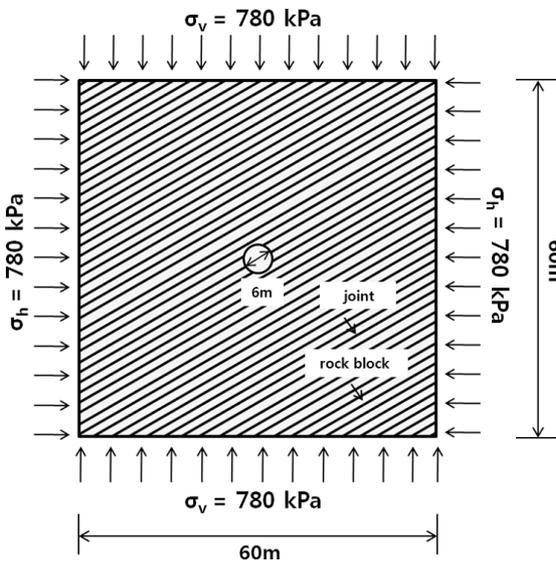


Fig. 2. Boundary condition at  $K_0 = 1$  (in case of joint angle=30°)

Table 2. Properties of rocks and joints in the numerical analysis

Rock type	Rock		Joint							Joint set (JSet)	Joint angle (°)
	$E_r$ (MPa)	$\nu$	joint shearing condition(JSC)	c (MPa)	$\phi$ (°)	$c_r$ (MPa)	$\phi_r$ (°)	$k_n$ (MPa/m)	$k_s$ (MPa/m)		
Hard rock	$1.0 \times 10^5$	0.2	JSC 1	50	50	7.5	35	$2.33 \times 10^5$	$0.96 \times 10^5$	1	0, 15, 30, 45, 60, 90
	$1.0 \times 10^5$	0.2	JSC 2	30	40	6	32	$2.33 \times 10^4$	$0.95 \times 10^4$		
	$1.0 \times 10^5$	0.2	JSC 3	10	35	1.5	31.5	$2.33 \times 10^3$	$0.93 \times 10^3$	2	(0, 90), (15, 165), (30, 150), (45, 135), (60, 120), (90, 0)
	$1.0 \times 10^5$	0.2	JSC 4	1	30	0.1	30	$2.33 \times 10^2$	$0.92 \times 10^2$		
Soft rock	$1.0 \times 10^4$	0.22	JSC 2	30	40	6	32	$2.33 \times 10^4$	$0.95 \times 10^4$	1	0, 15, 30, 45, 60, 90
	$1.0 \times 10^4$	0.22	JSC 3	10	35	1.5	31.5	$2.33 \times 10^3$	$0.93 \times 10^3$		
	$1.0 \times 10^4$	0.22	JSC 4	1	30	0.1	30	$2.33 \times 10^2$	$0.92 \times 10^2$	2	(0, 90), (15, 165), (30, 150), (45, 135), (60, 120), (90, 0)
Weathered rock	$1.0 \times 10^3$	0.25	JSC 3	10	35	1.5	31.5	$2.33 \times 10^3$	$0.93 \times 10^3$	1	0, 15, 30, 45, 60, 90
	$1.0 \times 10^3$	0.25	JSC 4	1	30	0.1	30	$2.33 \times 10^2$	$0.92 \times 10^2$	2	(0, 90), (15, 165), (30, 150), (45, 135), (60, 120), (90, 0)
Highly weathered rock	$1.0 \times 10^2$	0.3	JSC 4	1	30	0.1	30	$2.33 \times 10^2$	$0.92 \times 10^2$	1	0, 15, 30, 45, 60, 90
										2	(0, 90), (15, 165), (30, 150), (45, 135), (60, 120), (90, 0)

$E_r$  = Elastic modulus of intact rock;  $\nu$  = Poisson's ratio; c = Joint cohesion;  $\phi$  = Joint friction angle;  $c_r$  = Joint residual cohesion;  $\phi_r$  = Joint residual friction angle;

$k_n$  = Joint normal stiffness;  $k_s$  = Joint shear stiffness

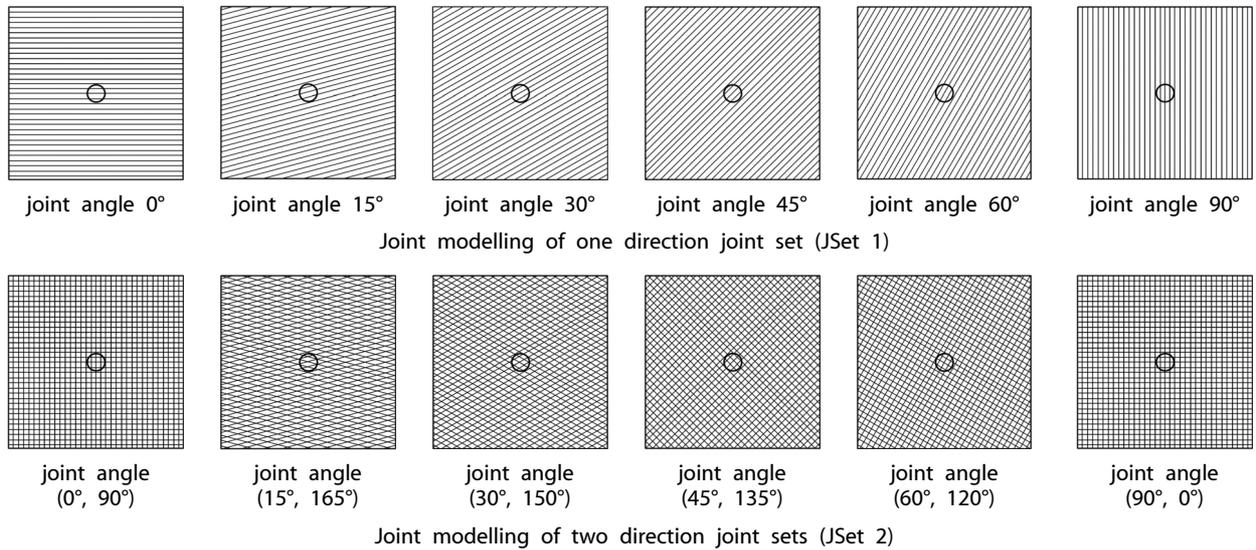


Fig. 3. Joint modeling of various joint angles and joint sets

연암은 10배, 풍화암은 100배, 완전풍화암은 1000배를 줄여서 결정하였으며, 마찬가지로 식 (1) 및 식 (2)를 이용하여 수직 및 전단강성계수를 결정하였다.

#### 4. 수치해석 결과를 이용한 탄성계수 산정

암석종류 및 절리특성(절리전단강도, 절리각도 및 절리군의

수)이 고려된 암반의 탄성계수값을 추정하기 위해 터널굴착면의 천단, 인버트 및 스프링라인의 좌, 우에서 발생한 반경방향 변위를 조사 하였으며 (Fig. 4참조), 그 중 최대 발생변위량을 이용하여 탄성계수값을 추정하였다.

탄성계수 추정은 탄성체에서 원형터널 굴착 시, 굴착 후에 터널굴착면에서의 발생하는 반경방향변위와 관련된 아래의 식을 이용하였다 (Kirsch, 1898). 비록 터널굴착으로 인한 주변

암반의 거동이 변경된 응력상태에 따라서 소성거동을 나타낼 수 있지만 본 연구에서는 암석 및 절리상태에 관계없이 터널굴착으로 인해 발생된 주변암반의 거동이 탄성거동을 나타내는 것으로 가정하였다.

$$u_r = \frac{\sigma_{vo} \cdot a^2}{4Gr} \left\{ (1 + K_o) - (1 - K_o) \left( 4(1 - \nu) - \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right\} \quad (4)$$

$$G = \frac{\sigma_{vo} \cdot a^2}{u_r \cdot 4r} \left\{ (1 + K_o) - (1 - K_o) \left( 4(1 - \nu) - \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right\} \quad (5)$$

$$E = 2G(1 + \nu) = \frac{\sigma_{vo} \cdot a^2 (1 + \nu)}{u_r \cdot 2r} \left\{ (1 + K_o) - (1 - K_o) \left( 4(1 - \nu) - \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right\} \quad (6)$$

여기서,  $u_r$ 은 반경방향변위,  $\sigma_{vo}$ 는 연직방향 초기지중응력,  $\nu$ 은 프와송비,  $K_o$ 는 측압계수이다.

적용된 수치해석 방법의 타당성을 검증하기 위해 절리가 없는 탄성지반에서의 원형터널굴착에 따른 변위와 탄성이론에 근거하여 계산된 변위를 비교하였다. 절리가 없는 탄성지반의 경우에 탄성이론식과(식 6참조) 수치해석 결과로부터 추정된 변위량을 Table 3에 정리하였다.

절리가 없는 탄성지반의 경우에 있어서 탄성이론식에 의해 결정된 변위량과 수치해석을 통해서 발생된 변위량을 비교한

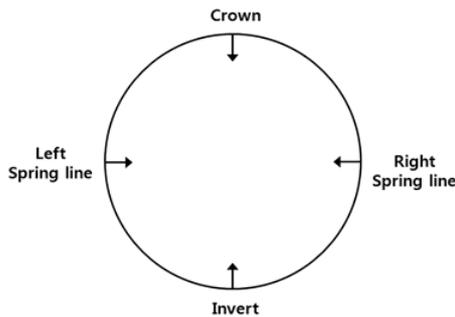


Fig. 4. Locations of displacement measurement

#### 4.1 경암에서의 탄성계수 비교

Fig. 5는 경암에서 절리간격 1m에서의 절리군 1개 및 절리군 2개에 대한 절리각도와 절리특성에 따른 탄성계수의 변화를 비교한 것이다.

본 연구에서는  $K_o = 1$ 인 응력 조건을 가정하였기 때문에 절리각도  $0^\circ$  및  $90^\circ$ 와 절리각도  $30^\circ$  및  $60^\circ$ 인 경우에는 각각 동일한 탄성계수값이 얻어졌으며, 이와 마찬가지로 본 연구에서는 해석되지 않았지만 절리각도  $75^\circ$ 에서는 절리각도  $15^\circ$ 에서의와 동일한 탄성계수값이 얻어질 것이다.

절리군 1개에서 절리상태가 양호한 경우(절리특성 1) 절리각도가  $0^\circ(90^\circ$  포함) 및  $30^\circ(60^\circ$  포함)에서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 71%로 나타났고, 절리각도  $15^\circ(75^\circ$  포함)에서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 66%로 나타났으며, 절리각도  $45^\circ$ 에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 78%로 나타났다. 즉 절리상태가 양호한 경우(절리특성 1)에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 66~78%의 범위에 있는 것으로 나타났다. 이와 더불어 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 다른 절리상태의 경우와 비교하여 가장 큰 것으로 나타났다.

절리상태가 보통인 경우(절리특성 2) 절리각도가  $0^\circ(90^\circ$  포함) 및  $30^\circ(60^\circ$  포함)에서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 각각 약 20% 및 21%로 거의 비슷하게 나타났고, 절리각도  $15^\circ(75^\circ$  포함)에서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 17%로 나타났으며, 절리각도  $45^\circ$ 에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 27%로 나타났다. 다시말해 절리상태가 보통인 경우(절리특성 2) 절리가 없는 상태와 비교하여 탄성계수가 크게 감소하였고, 그 범위는 절리가 없는 상태의 약 17~27% 사이에 있는 것으로 나타났다.

절리상태가 불량한 경우(절리특성 3) 탄성계수는 절리각도에

Table 3. Comparison of displacements between theoretical equation and numerical analysis

Rock sort	Elastic modulus (MPa)	Displacement calculated from theoretical equations (mm)	Displacement resulted from numerical analysis (mm)
Hard rock	$1.0 \times 10^5$	0.0281	0.0286
Soft rock	$1.0 \times 10^4$	0.2855	0.2866
Weathered rock	$1.0 \times 10^3$	2.9250	2.9290
Highly weathered rock	$1.0 \times 10^2$	30.420	30.460

따라 약간의 차이가 있지만 절리가 없는 상태와 비교하여 약 2~4%로 나타나, 탄성계수가 크게 작아지는 것으로 나타났다.

절리상태가 매우불량한 경우(절리특성 4) 탄성계수는 절리각도에 상관없이 절리가 없는 상태의 약 0.5%만의 탄성계수가 나타났다. 다시말해서 같은 암석상태라 할지라도 절리상태가 나빠질수록 탄성계수가 급격히 감소한다는 것을 파악하였으며, 절리상태가 양호한 경우에 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 보다 크다는 것을 알 수 있었다.

절리군 2개에서 절리상태가 양호한 경우(절리특성 1) 탄성계수는 절리군 1개에서 절리상태가 양호한 경우(절리특성 1)와 비교하여 약 11~18% 감소하는 것으로 나타났고, 절리각도에

따른 탄성계수 차이 비는 약 20%로 나타났다. 다시말해 절리군 2개에서 절리상태가 양호한 경우(절리특성 1) 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 보다 크게 나타났다. 또한 절리각도에 따른 탄성계수는 절리군 1개에서와 같이 절리각도 15°(75° 포함)에서 가장 작게 나타났고, 절리각도 45°에서 가장 크게 나타났다.

절리상태가 보통인 경우(절리특성 2) 탄성계수는 절리군 1개에서 절리상태가 보통인 경우(절리특성 2)와 비교하여 약 7~10% 감소하는 것으로 나타났고, 절리각도에 따른 탄성계수 차이 비는 각 약 8%로 나타나, 절리군 2개에서 절리상태가 보통인 경우(절리특성 2)에서는 탄성계수에 대한 절리각도의 수의 영향이 더 크게 나타났다. 또한 절리각도에 따른 탄성계수는

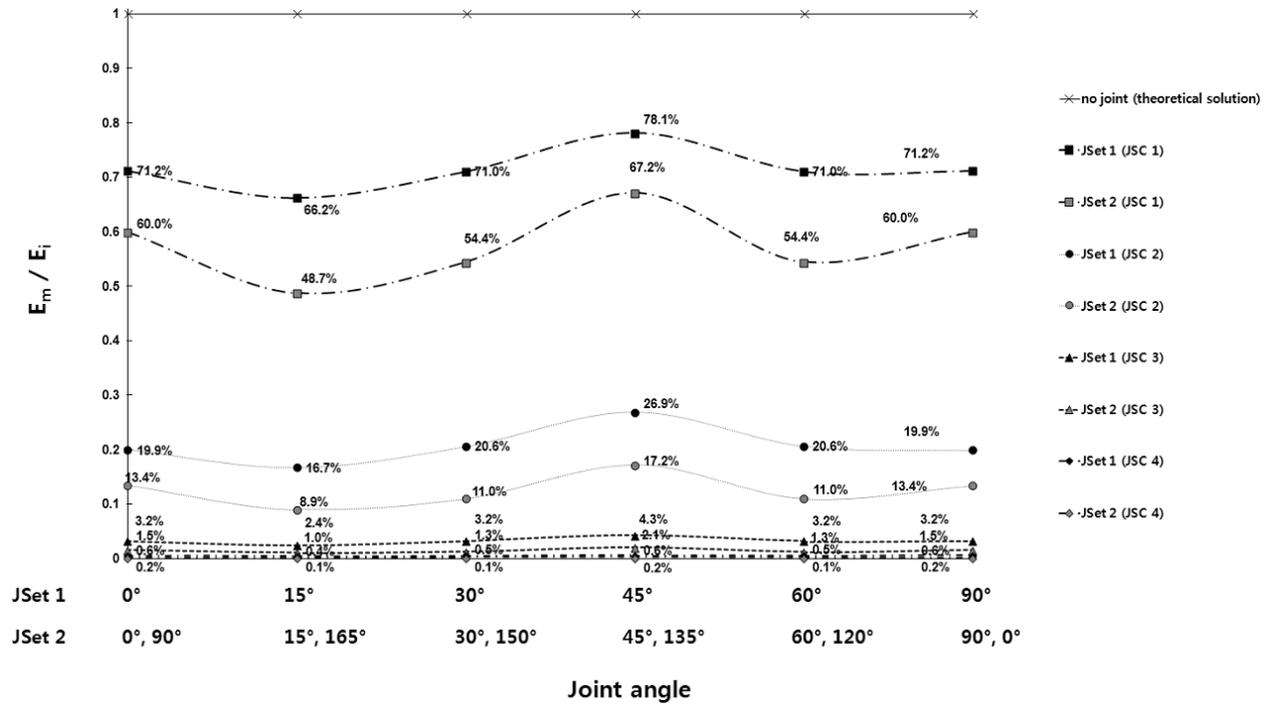


Fig. 5. Ratio of elastic modulus in hard rock ( $E_m$ : elastic modulus of rock mass,  $E_i$ : elastic modulus of intact rock)

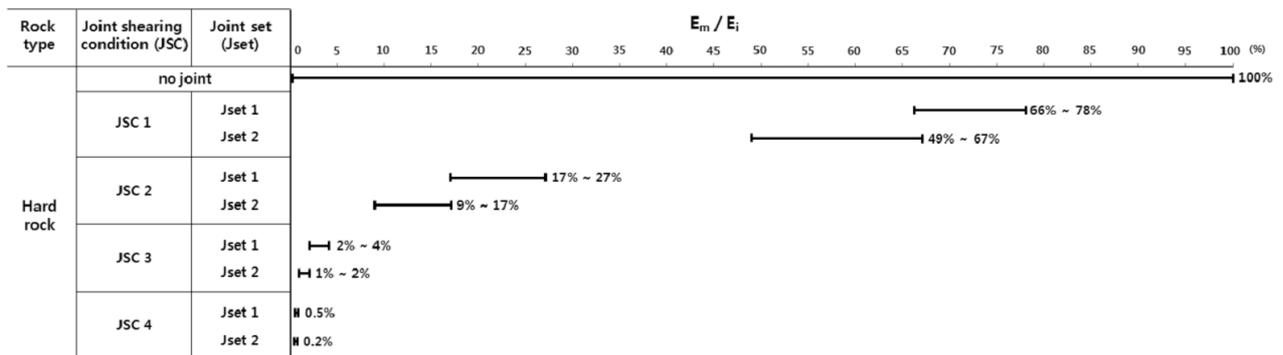


Fig. 6. Variation of elastic modulus in hard rock with different joint and number of joint set conditions ( $E_m$ : elastic modulus of rock mass,  $E_i$ : elastic modulus of intact rock)

절리상태가 양호한 경우(절리특성 1)와 같은 각도에서 가장 큰 값 및 작은 값이 나타났다.

절리상태가 불량한 경우(절리특성 3) 및 매우불량한 경우(절리특성 4)에서 탄성계수는 절리군 1개에서 절리상태가 불량한 경우(절리특성 3) 및 매우불량한 경우(절리특성 4)와 비교해 약 1~2% 및 약 0.4% 감소하고, 절리각도에 따른 탄성계수 차이 비 역시 약 1% 및 0.1%로 나타나, 같은 경암이라 할지라도 절리상태가 나빠질 경우 탄성계수는 절리군의 수 및 절리각도에 크게 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있었다.

경암에서의 절리특성, 절리각도 및 절리군의 수에 따른 탄성계수의 변화를 요약하면, 절리상태가 나빠질수록 탄성계수는 급격히 감소하였고, 절리상태가 양호할수록 절리각도 및 절리군의 수의 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다. 절리상태가 매우 불량한 경우(절리특성 4) 탄성계수는 절리각도 및 절리군의 수의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다. 즉 암반의 탄성계수는 동일한 암석상태라 할지라도 절리상태가 나빠질수록 절리각도 및 절리군의 수에 따른 영향이 줄어드는 것으로 나타났다.

이와같은 경암에서 절리간격 1m에서의 절리조건 및 절리군의 수에 따른 탄성계수 변화정도를 Fig. 6에 나타내어 표시하였다.

#### 4.2 연암에서의 탄성계수 비교

Fig. 7은 연암에서 절리간격 1m에서의 절리군 1개 및 절리군

2개에 대한 절리각도와 절리특성에 따른 탄성계수의 변화를 비교한 것이다.

절리군 1개에서 절리상태가 보통인 경우(절리특성 2) 절리각도가 0°(90° 포함) 및 30°(60° 포함)에서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 71%로 나타났고, 절리각도 15°(75° 포함)에서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 66%로 나타났으며, 절리각도 45°에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 78%로 나타났다. 즉 절리상태가 보통인 경우(절리특성 2)에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 66~78%의 범위에 있는 것으로 나타났다. 이와 더불어 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 경암에서와 마찬가지로 절리상태가 보다 나쁜 경우와 비교하여 가장 큰 것으로 나타났다.

절리상태가 불량한 경우(절리특성 3) 절리각도가 0°(90° 포함) 및 30°(60° 포함)에서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 각각 약 20% 및 21%로 거의 비슷하게 나타났고, 절리각도 15°(75° 포함)에서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 17%로 나타났으며, 절리각도 45°에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 27%로 나타났다. 다시말해 절리상태가 불량한 경우(절리특성 3) 탄성계수가 크게 감소하였고, 그 범위는 절리가 없는 상태와 비교하여 17~27% 사이에 있는 것으로 나타났다.

절리상태가 매우불량한 경우(절리특성 4) 탄성계수는 절리각도에 따라 약간의 차이가 있지만 절리가 없는 상태와 비교하여

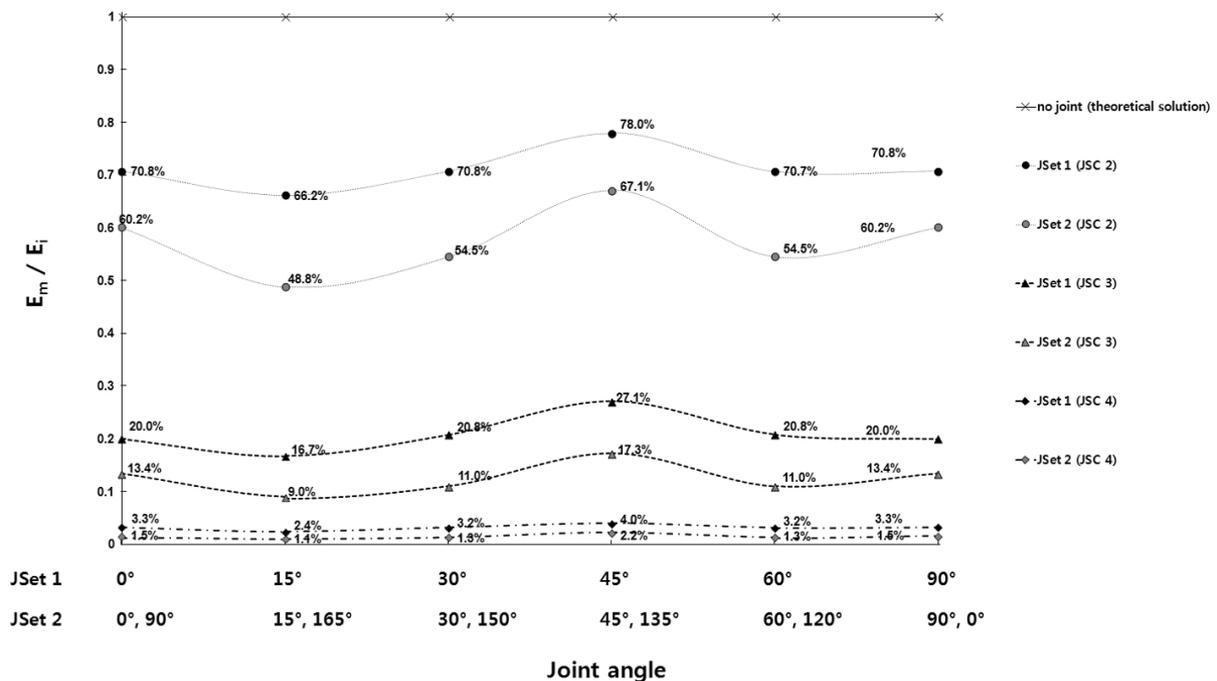


Fig. 7. Ratio of elastic modulus in soft rock ( $E_m$ : elastic modulus of rock mass,  $E_i$ : elastic modulus of intact rock)

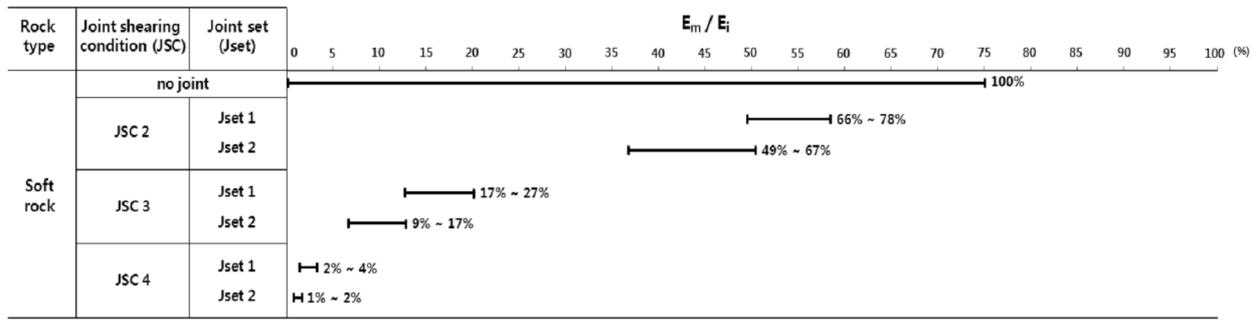


Fig. 8. Variation of elastic modulus in soft rock with different joint and number of joint set conditions ( $E_m$ : elastic modulus of rock mass,  $E_i$ : elastic modulus of intact rock)

약 2~4%로 나타나, 탄성계수가 크게 작아지는 것으로 나타났다. 즉 절리상태가 나빠질수록 탄성계수가 급격히 감소한다는 것을 파악하였다.

절리군 2개에서 절리상태가 보통인 경우(절리특성 2) 탄성계수는 절리군 1개에서 절리상태가 보통인 경우(절리특성 2)와 비교하여 약 11~17% 감소하는 것으로 나타났고, 절리각도에 따른 탄성계수 차이 비는 약 18%로 나타났다. 다시말해 절리군 2개에서 절리상태가 보통인 경우(절리특성 2) 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 약간 크게 나타났다. 또한 절리각도에 따른 탄성계수는 절리군 1개에서와 같이 절리각도 15°(75° 포함)에서 가장 작게 나타났고, 절리각도 45°에서 가장 크게 나타났다.

절리상태가 불량한 경우(절리특성 3) 탄성계수는 절리군 1개에서 절리상태가 불량한 경우(절리특성 3)와 비교하여 약 7~10% 감소하는 것으로 나타났고, 절리각도에 따른 탄성계수 차이 비는 약 8%로 나타나, 절리상태가 불량한 경우(절리특성 3)에서는 탄성계수에 대한 절리군의 수의 영향이 더 크게 나타났다. 또한 절리각도에 따른 탄성계수는 절리상태가 보통인 경우(절리특성 2)와 같은 각도에서 가장 큰 값 및 작은 값이 나타났다.

절리상태가 매우불량한 경우(절리특성 4) 탄성계수는 절리군 1개에서 절리상태가 매우불량한 경우(절리특성 4)와 비교해 약 1~2%로 감소하고, 절리각도에 따른 탄성계수 차이 비 역시 약 1%로 나타나, 같은 암석상태라 할지라도 절리상태가 나빠질 경우 탄성계수는 절리군의 수 및 절리각도에 크게 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있었다.

연암에서의 절리특성, 절리각도 및 절리군의 수에 따른 탄성계수의 변화를 요약하면, 경암에서와 마찬가지로 절리상태가 나빠질수록 탄성계수는 급격히 감소하였고, 동일한 암석상태라 할지라도 암반의 탄성계수는 절리상태가 나빠질수록 절리각도 및 절리군의 수에 따른 영향이 줄어드는 것으로 나타났다.

이와같은 연암에서 절리간격 1m에서의 절리조건 및 절리군의 수에 따른 탄성계수 변화정도를 Fig. 8에 나타내어 표시하였다.

### 4.3 풍화암에서의 탄성계수 비교

Fig. 9는 풍화암에서 절리간격 1m에서의 절리군 1개 및 절리군 2개에 대한 절리각도와 절리특성에 따른 탄성계수의 변화를 비교한 것이다.

절리군 1개에서 절리상태가 불량한 경우(절리특성 3) 절리각도가 0°(90° 포함) 및 30°(60° 포함)에서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 71%로 나타났고, 절리각도 15°(75° 포함)에서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 67%로 나타났으며, 절리각도 45°에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 78%로 나타났다. 즉 절리상태가 불량한 경우(절리특성 3)에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 67~78%의 범위에 있는 것으로 나타났다.

절리상태가 매우불량한 경우(절리특성 4) 절리각도가 0°(90° 포함) 및 30°(60° 포함)에서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 각각 약 20% 및 21%로 거의 비슷하게 나타났고, 절리각도 15°(75° 포함)에서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 17%로 나타났으며, 절리각도 45°에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 27%로 나타났다. 즉 절리상태가 매우불량한 경우(절리특성 4) 탄성계수는 크게 감소하였고, 그 범위는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 17~27% 사이에 있는 것으로 나타났다.

절리군 2개에서 절리상태가 불량한 경우(절리특성 3) 탄성계수는 절리군 1개에서 절리상태가 불량한 경우(절리특성 3)와 비교하여 약 11~17% 감소하는 것으로 나타났고, 절리각도에 따른 탄성계수 차이 비는 약 18%로 나타났다. 다시말해 절리군 2개에서 절리상태가 불량한 경우(절리특성 3) 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 약간 크게 나타났다. 또한 절리각도에 따른 탄성계수는 절리군 1개에서와 같이 절리각도 15°(75° 포함)에서 가장 작게 나타났고, 절리각도 45°에서 가장 크게 나타났다.

절리상태가 매우불량한 경우(절리특성 4) 탄성계수는 절리군 1개에서 절리상태가 매우불량한 경우(절리특성 4)와 비교하여

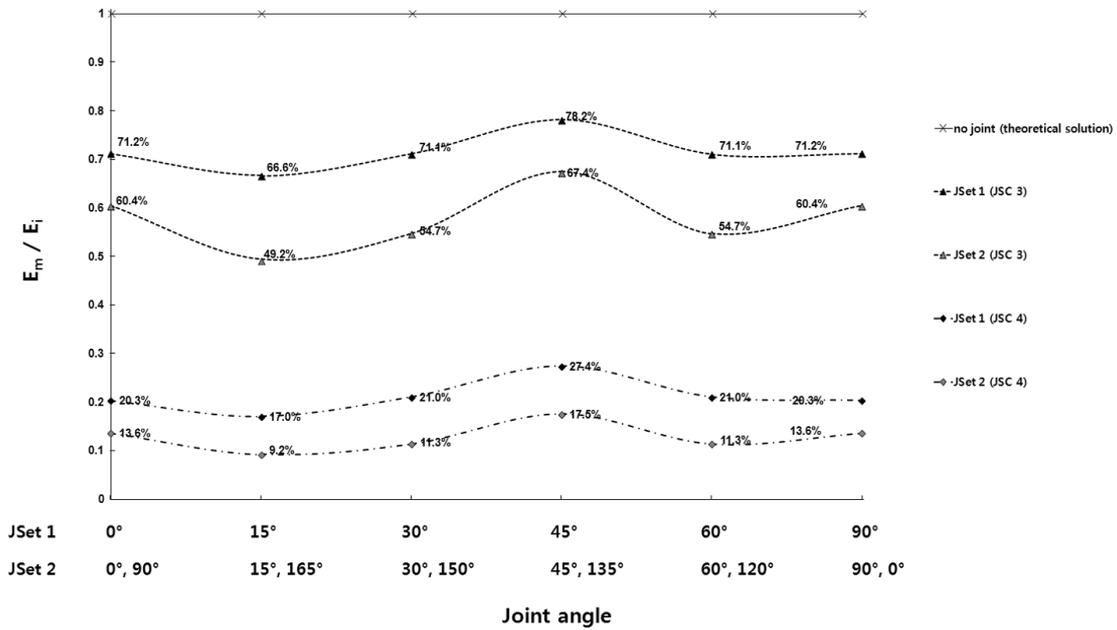


Fig. 9. Ratio of elastic modulus in weathered rock ( $E_m$ : elastic modulus of rock mass,  $E_i$ : elastic modulus of intact rock)

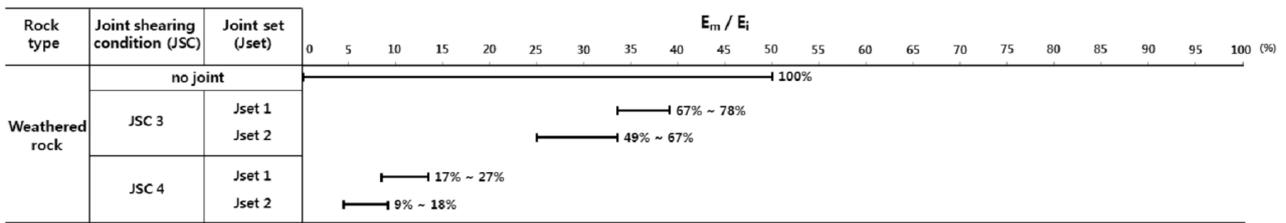


Fig. 10. Variation of elastic modulus in weathered rock with different joint and number of joint set conditions ( $E_m$ : elastic modulus of rock mass,  $E_i$ : elastic modulus of intact rock)

약 7~10% 감소하는 것으로 나타났고, 절리각도에 따른 탄성계수 차이 비는 약 8%로 나타나, 절리군 2개에서 절리상태가 매우불량한 경우(절리특성 4)에서는 탄성계수에 대한 절리군의 수의 영향이 더 크게 나타났다. 또한 절리각도에 따른 탄성계수는 절리상태가 불량한 경우(절리특성 3)와 같은 각도에서 가장 큰 값 및 작은 값이 나타났다.

풍화암에서의 절리특성, 절리각도 및 절리군의 수에 따른 탄성계수의 변화를 요약하면, 절리상태가 나빠질수록 탄성계수가 크게 감소하지만, 경암 및 연암과 비교하여 절리가 없는 상태에서의 탄성계수에 대한 감소율이 상대적으로 작게 나타났다.

이와같은 풍화암에서 절리간격 1m에서의 절리조건 및 절리군의 수에 따른 탄성계수 변화정도를 Fig. 10에 나타내어 표시하였다.

#### 4.4 완전풍화암에서의 탄성계수 비교

Fig. 11은 완전풍화암에서 절리간격 1m에서의 절리군 1개

및 절리군 2개에 대한 절리각도와 절리특성에 따른 탄성계수의 변화를 비교한 것이다.

절리군 1개에서 절리상태가 매우불량한 경우(절리특성 4) 절리각도가 0°(90° 포함) 및 30°(60° 포함)에서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 72%로 나타났고, 절리각도 15°(75° 포함)에서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 67%로 나타났으며, 절리각도 45°에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 79%로 나타났다. 즉 절리상태가 매우불량한 경우(절리특성 4) 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 67~79%의 범위에 있는 것으로 나타났다.

절리군 2개에서 절리상태가 매우불량한 경우(절리특성 4) 탄성계수는 절리군 1개에서 절리상태가 매우불량한 경우(절리특성 4)와 비교하여 약 10~17% 감소하는 것으로 나타났고, 절리각도에 따른 탄성계수 차이 비는 약 18%로 나타나, 절리군 2개에서 절리상태가 매우불량한 경우(절리특성 4) 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 약간 크게 나타났다. 또한 절리각도에

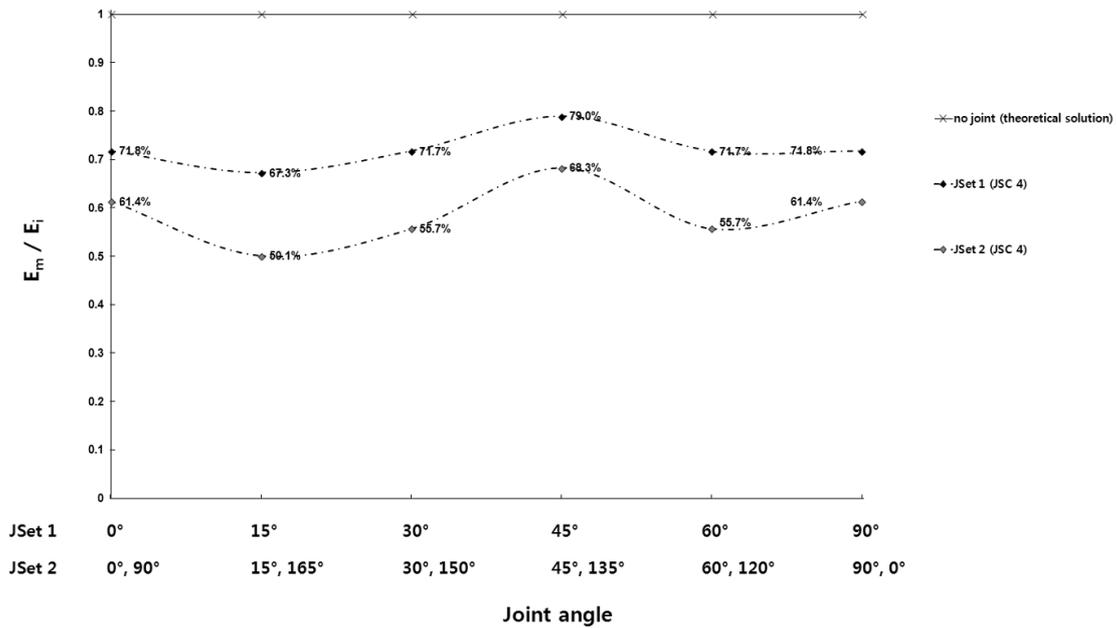


Fig. 11. Ratio of elastic modulus in highly weathered rock ( $E_m$ : elastic modulus of rock mass,  $E_i$ : elastic modulus of intact rock)

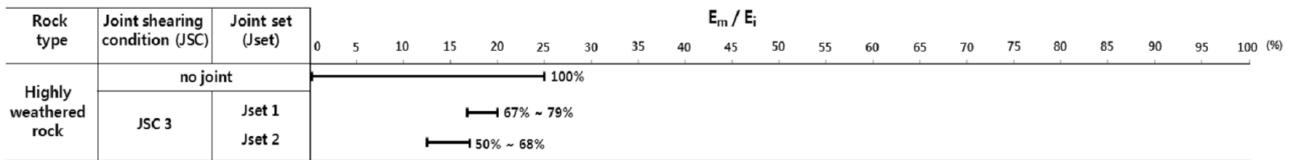


Fig. 12. Variation of elastic modulus in highly weathered rock with different joint and number of joint set conditions ( $E_m$ : elastic modulus of rock mass,  $E_i$ : elastic modulus of intact rock)

따른 탄성계수는 절리군 1개에서와 같이 절리각도 15°(75° 포함)에서 가장 작게 나타났고, 절리각도 45°에서 가장 크게 나타났다.

요약하면, 완전풍화암에서는 절리특성, 절리각도 및 절리군의 수가 암반의 탄성계수에 미치는 영향이 다른 암석상태들과 비교하여 미치는 영향이 상대적으로 작게 나타난다는 것을 알 수 있었다.

이와같은 완전풍화암에서 절리간격 1m에서의 절리조건 및 절리군의 수에 따른 탄성계수 변화정도를 Fig. 12에 나타내어 표시하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 암석종류 및 다양한 절리특성을 반영한 암반의 탄성계수를 추정하기 위해 UDEC을 이용한 불연속체 수치해석을 수행하고, 수치해석을 통한 발생변위를 이용하여 암석 및 절리특성에 따른 탄성계수를 추정하는 방법과 그 결과를 제시하였다.

- (1) 다양한 암석 및 절리조건에서의 암반의 탄성계수 추정은 암반에서의 원형터널에 대한 탄성이론 (Kirsh, 1898)을 역이용하였으며, 수치해석에서 발생된 변위결과를 이용하여 암석종류 및 절리특성이 고려된 암반의 탄성계수를 추정할 수 있었다.
- (2) 경암에서의 절리특성, 절리각도 및 절리군의 수에 따른 탄성계수의 변화를 분석한 결과, 절리상태가 나빠질수록 탄성계수는 급격히 감소하였고, 절리상태가 양호할수록 절리각도 및 절리군의 수의 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다. 절리상태가 매우 불량한 경우 탄성계수는 절리각도 및 절리군의 수의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.
- (3) 연암에서의 절리특성, 절리각도 및 절리군의 수에 따른 탄성계수의 변화를 분석한 결과, 경암에서와 마찬가지로 절리상태가 나빠질수록 탄성계수는 급격히 감소하였고, 동일한 암석상태라 할지라도 암반의 탄성계수는 절리상태가 나빠질수록 절리각도 및 절리군의 수에 따른 영향이 줄어드는 것으로 나타났다.
- (4) 풍화암에서의 절리특성, 절리각도 및 절리군의 수에 따른

탄성계수의 변화를 분석한 결과, 절리상태가 나빠질수록 탄성계수가 크게 감소하지만, 경암 및 연암과 비교하여 절리가 없는 상태에서의 탄성계수에 대한 감소율이 상대적으로 작게 나타났다. 완전풍화암에서는 절리특성, 절리각도 및 절리군의 수가 암반의 탄성계수에 미치는 영향이 다른 암석상태들과 비교하여 미치는 영향이 매우 작게 나타났다.

- (5) 절리각도에 따른 탄성계수 변화를 분석한 결과, 절리각도의 영향은 절리군 1개에서보다 절리군 2개에서 상대적으로 크게 받는 것으로 나타났고, 절리군 1개 및 절리군 2개에서 절리각도에 따른 탄성계수는 절리각도 15°(75° 포함)에서 가장 작게 나타났으며, 절리각도 45°에서 가장 크게 나타났다.
- (6) 암석 및 절리특성에 따른 탄성계수의 변화정도가 분석되어 제시되었으며, 전반적으로 절리특성이 불량 할수록 탄성계수는 감소하는 것으로 나타났으며, 경암 및 연암과 같이 암질이 좋은 암반의 경우에는 절리특성이 암반의 탄성계수에 미치는 영향은 크게 나타났지만, 풍화암 및 완전풍화암과 같이 암질이 좋지 않은 암반의 경우에는 절리특성이 암반의 탄성계수에 미치는 영향이 크게 줄어드는 것으로 나타났다.

## References

- Son, M, Lee, S, and Lee, W (2011), "Estimation of Elastic Modulus in Rock Mass for Assessing Displacement in Rock Tunnel" Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE, Vol. 31(2C), pp. 83-92.
- Barton, N.R. (1976). The shear strength of rock and rock joints, *Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 13(10), pp. 1-24.
- Bieniawski, Z.T. (1976), *Rock mass classification in rock engineering*, John Wiley & Sons, NY.
- Bieniawski, Z.T. (1978), Determining rock mass deformability: experience from case histories. *Int. J. Rock Mechanics Miner. Sci. and Geomechanics Abstr.*, Vol. 15(5), pp. 237-247.
- Bienniawski, Z.T. (1989), *Engineering Rock Mass Classification*, John Wiley & Sons, NY.
- Clerici, A. (1993), Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses-case histories. *Proc. Symp. EUROCK, Rotterdam, A.A.Balkema, eds. L. M. Riberio e Sousa, and N. F. Grossman*, pp. 509-517.
- Coulson, J.H. (1970), *The Effects of Surface Roughness on the Shear Strength of Joints in Rock*, Ph.D Dissertation, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign.
- Goodman, R.E. (1989), *Introduction to rock mechanics*. John Wiley & Sons, New York.
- Grimstad, E. and Barton, N. (1993), Updating the Q-system for NMT. *Proc. Int. Symp. on Sprayed Concrete*, Fagernes, Norwegian Concrete Association, Norway, pp. 44-66.
- Hoek, E. and Brown, E.T. (1998), Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 34(8), pp. 1165-1186.
- Kirsch, G (1898), Die theorie der elastizitat und die bedurfnisse der festigkeitslehre, *Veit. Ver. Deut. Ing.*, Vol. 42(28), pp 797-807.
- Palmstrom A. (1996), Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering, Part 1: the development of the rock mass index (RMI), *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 11(2), pp. 175-186.
- Palmstrom, A and Singh, R. (2001), The deformation modulus of rock masses-comparisons between in situ tests and indirect estimates, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 16, pp. 115-131.
- Serafim, J.L. and Pereira, J.P. (1983), Considerations on the Geomechanical Classification of Bieniawski, *Proc. Symp. on Engineering Geology and Underground Openings*, Lisboa, pp. 1133-1144.
- UDEC User's Manual. (2004), ITASCA Consulting Group, Minnesota, U.S.A 2004.