

암반터널에서의 변위파악을 위한 암반 탄성계수 추정

Estimation of Elastic Modulus in Rock Mass for Assessing Displacement in Rock Tunnel

손무락* · 이소단** · 이원기***
Son, Moorak · Li, Sudan · Lee, Wonki

Abstract

Elastic modulus in rockmass is an important factor to represent the characteristic of rock deformation and is used to estimate the displacement due to tunnel excavation. 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 providing the method to estimate the elastic modulus of rockmass in the various rock and joint conditions and the results grasped from the study. For this purpose, the 2D discrete numerical analysis will be carried out and the displacements due to tunnel excavation will be investigated with the consideration of rock and joint conditions. Then the displacement results will be used to estimate the elastic modulus of rockmass in which rock and joint conditions are considered with the utilization of the elastic theory of circular tunnel. The results of elastic modulus, which considers the conditions of various rock and joint, would be expected to have a great practical use in field.

Keywords : *elastic modulus, rock tunnel, excavation, joint characteristics, displacement*

요 지

암반에서의 탄성계수는 암반의 변형특성을 나타내는 매우 중요한 인자로서 암반에서의 터널굴착으로 인한 내공변위를 파악하는데 이용된다. 그럼에도 불구하고 현재까지는 암석종류 및 절리특성을 반영하여 탄성계수를 산정하는 연구는 미흡한 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구는 다양한 암석 및 절리상태에서 암반의 탄성계수를 추정하는 방법과 그 결과를 제시하고자 한다. 이를 위해서 2차원 개별요소법에 근거한 수치해석이 수행될 것이며 이를 통해 암석과 절리상태가 고려된 터널굴착 유발 내공변위가 조사될 것이다. 조사된 변위결과는 암반에서의 원형터널에 대한 탄성이론을 역이용하여 암석종류 및 절리특성이 반영된 탄성계수를 추정하는데 사용될 것이다. 본 연구를 통해 암석종류 및 절리특성을 고려하여 추정된 탄성계수는 향후 실무에서 절리가 형성된 암반터널에서의 발생변위를 파악함에 있어서 그 활용도가 매우 클 것으로 기대된다.

핵심용어 : 탄성계수, 암반터널, 굴착, 절리특성, 발생변위

1. 서 론

최근 국토전역의 일일 생활권 확장과 물류 수송량 증가에 따른 도로 및 철도공사가 증가되고 있는 추세이며, 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 및 절리간격 등은 암반에서의 지반거동을 지배하는 중요한 요소들이며, 절리가 형성된 암반지층에서의 평균탄성계수는 암반에서 터널굴착으로

인한 내공변위를 파악하는데 중요하게 이용된다. 절리가 형성된 암반에서 탄성계수를 추정하는 기존의 방법으로 직접적인 현장측정 방법 및 간접적인 경험식들이 있으나, 이러한 방법들은 암반내 형성된 다양한 절리특성을 고려하여 탄성계수를 추정하는데 한계점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 2차원 개별요소법 프로그램인 UDEC을 이용하여, 다양한 암석종류 및 절리특성(절리전단강도 및 절리각도)을 고려한 암반에서의 터널굴착으로 인한 굴착면에서의 발생변위를 파악하고, 조사된 변위결과를 이용해 암반에서의 원형터널에 대한 탄성이론을 역이용하여 암석종류 및 절리특성을 고려한 탄성계수를 추정하는 방법과 그 결과를 제시하고자 한다.

*정회원 · 교신저자 · 대구대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 기술사 (E-mail : mson@daegu.ac.kr)

**중국 강소성 만성직단 (E-mail : lisudan_123@163.com)

***대구대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : suncome2000@hanmail.net)

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), 플레이트잭 시험, 케이블잭킹시험, 레디얼잭시험, 달라도미터시험 및 프레셀 챔버 등이 있으며, 그림 1은 현장측정 방법의 대표적인 방법인 평판잭킹시험(PJT), 평판재하시험(PLT) 및 굿맨잭 시험(Goodman jack test)의 측정 원리를 보여주고 있다.

이러한 시험방법은 현장에서의 직접적인 측정을 통한 방법으로, 측정에 소요되는 시간, 인력 및 비용도 상당하여 터널이 굴착되는 암반지역에서의 탄성계수를 추정함에 있어서 많은 제약이 따른다. 따라서 이러한 제약 및 측정방법별 오차 등의 문제점을 줄이기 위해 다양한 경험식들이 제안되었다. 표 1은 여러 연구자들에 의해 제안된 다양한 경험식들을 보여주고 있다.

이러한 경험식들은 다양한 현장에서 실시한 현장계측 결과를 수집하고, 분석하여 얻어진 것들로서, 현장측정 방법보다 간편하게 암반지역의 탄성계수를 추정할 수 있지만, 실제 암반지형의 복잡한 지질특성을 완전히 반영하지는 못한다. 그림 2는 RQD에 따른 암반의 탄성계수 감소비를 나타내고 있으며, 그림 3은 RMR과 초기변형계수와의 관계를 보여주고 있다.

이상의 직접적인 현장측정 방법이나 간접적인 경험식들은 다양한 절리특성(절리전단강도, 절리각도 및 절리간격 등)을 가진 암반의 탄성계수를 추정하는데 있어 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.

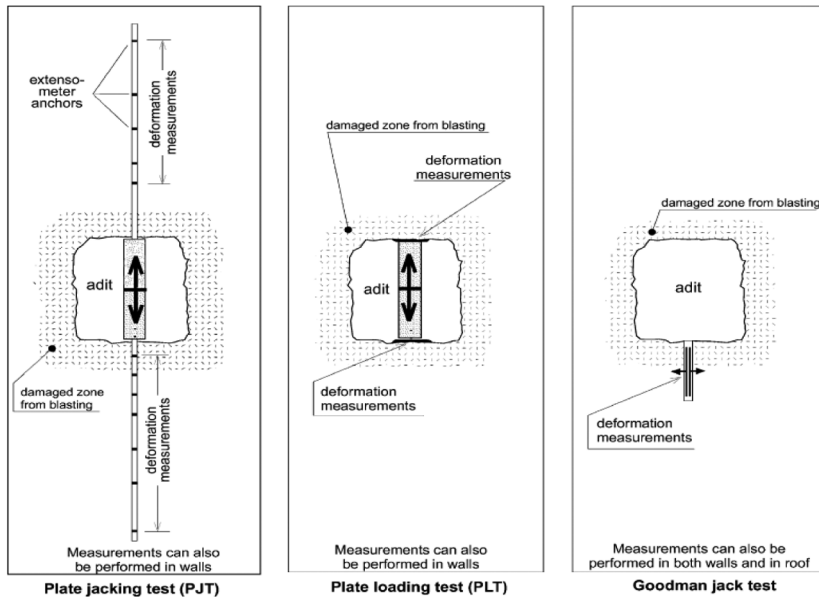


그림 1. 대표적인 현장측정 방법의 측정 원리(Palmstrom and Singh, 2001)

표 1. 암반의 탄성계수 추정을 위한 다양한 경험식

학자	경험식	제약조건
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	$E_m = \frac{\sqrt{\sigma_c}}{100} \times 10^{[(GSI-10)/40]}$	$\sigma_c < 100 \text{ MPa}$
Bieniawski, 1989	$E_m = E \cdot f(RQD)$	

참조 : E_m = 암반의 탄성계수, E = 암석의 탄성계수, σ_c = 일축압축강도, RMi = 암석지수, GSI = 지질강도지수, $E_{r\ stat}$ = 암석의 정적탄성계수, $E_{r\ dyn}$ = 암석의 동적탄성계수, $E_{m\ dyn}$ = 암반의 동적탄성계수, $f(RQD)$ = RQD값에 따른 감소계수, E_m 단위 = GPa, σ_c 단위 = MPa

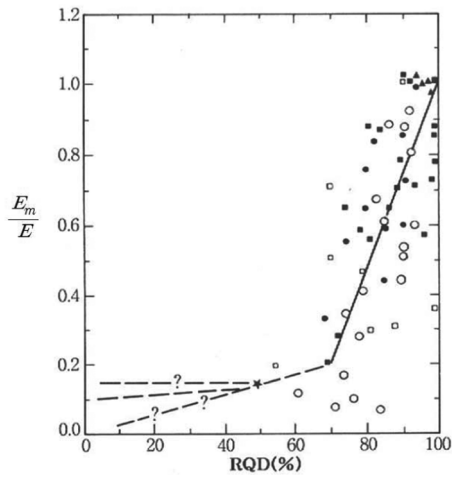


그림 2. RQD에 따른 탄성계수 감소비(Bieniawski, 1989)

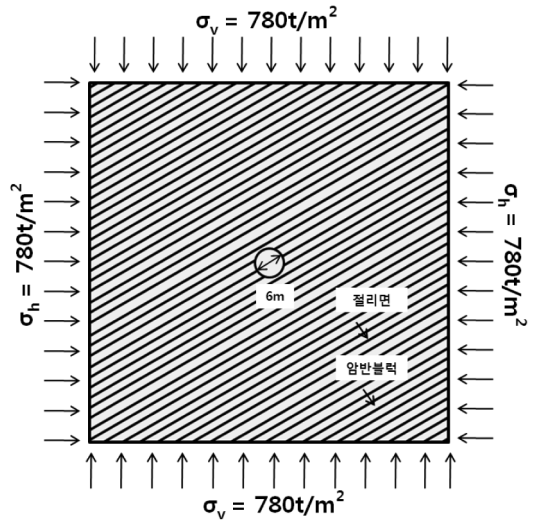


그림 4. $K_0=1$ 에서 경계조건(절리각도 30°인 경우)

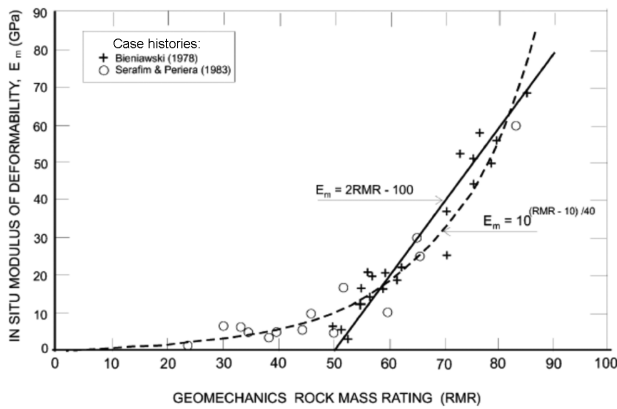


그림 3. RMR과 초기변형계수와의 관계(Serafim and Pereira, 1983)

3. 수치해석적 매개변수 연구

본 연구에서는 암반에서 발달된 불연속면을 고려하여 암석

블록 자체의 거동보다 절리의 거동에 의해 전체적인 거동이 지배되는 암반특성을 평가하기 위해 개별요소법에 근거한 UDEC(Universal Distinct Element Code)을 사용하였고, 해석에 사용된 암석블록은 탄성체로 모델링 하였으며, 절리면의 거동은 Coulomb Slip Model을 이용하여 모델링 하였다.

수치해석에 사용된 해석모델은 넓이 및 높이를 각각 60m로 설정 하였으며, 절리간격은 1m, 굴착터널의 직경은 6m로 설정하였다 (그림 4참조).

$K_0 = 1$ 의 상태로 가정하여 암반의 초기응력 $\sigma_v = \sigma_h = 780t/m^2$ 를 해석모델의 경계면에 부여한 다음, 터널을 굴착하고 이로부터 발생하는 변위를 조사하였다.

다양한 매개변수 해석을 위해 암석블록의 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 물성치를 표 2에 나타내었다. 각 해석경우에 있어서 절리각도를 0°, 15°, 30°, 45°, 60° 및 90°로 달리하여 해석을 수행

표 2. 해석에 사용된 암석 및 절리 물성치

암석 블록	case case	암 석			절 리						비 고	
		E_r (MPa)	ν	γ_t (t/m ³)	C (MPa)	ϕ (°)	C_r (MPa)	ϕ_r (°)	k_n (MPa/m)	k_s (MPa/m)	절리특성 (절리전단강도)	절리각도 (°)
경암	1	1.0×10^5	0.2	2.7	50	50	7.5	35	2.33×10^5	0.96×10^5	절리특성 1	0, 15, 30, 45, 60, 90
	2	1.0×10^5	0.2	2.7	30	40	6	32	2.33×10^4	0.95×10^4	절리특성 2	0, 15, 30, 45, 60, 90
	3	1.0×10^5	0.2	2.7	10	35	1.5	31.5	2.33×10^3	0.93×10^3	절리특성 3	0, 15, 30, 45, 60, 90
	4	1.0×10^5	0.2	2.7	1	30	0.1	30	2.33×10^2	0.92×10^2	절리특성 4	0, 15, 30, 45, 60, 90
연암	5	1.0×10^4	0.22	2.6	30	40	6	32	2.33×10^4	0.95×10^4	절리특성 2	0, 15, 30, 45, 60, 90
	6	1.0×10^4	0.22	2.6	10	35	1.5	31.5	2.33×10^3	0.93×10^3	절리특성 3	0, 15, 30, 45, 60, 90
	7	1.0×10^4	0.22	2.6	1	30	0.1	30	2.33×10^2	0.92×10^2	절리특성 4	0, 15, 30, 45, 60, 90
풍화암	8	1.0×10^3	0.25	2.5	10	35	1.5	31.5	2.33×10^3	0.93×10^3	절리특성 3	0, 15, 30, 45, 60, 90
	9	1.0×10^3	0.25	2.5	1	30	0.1	30	2.33×10^2	0.92×10^2	절리특성 4	0, 15, 30, 45, 60, 90
완전 풍화암	10	1.0×10^2	0.3	2.4	1	30	0.1	30	2.33×10^2	0.92×10^2	절리특성 4	0, 15, 30, 45, 60, 90

참조 : E_r = 암석의 탄성계수; ν = 프와송비; γ_t = 암석의 단위중량; C = 절리 점착력; ϕ = 절리 마찰각; C_r = 절리 잔류점착력; ϕ_r = 절리 잔류마찰각; k_n = 절리 수직강성계수; k_s = 절리 전단강성계수

하였고, 절리간격은 모든 경우에 있어서 1m로 가정하였다.

표 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, 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)을 적용하여 결정하였다.

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

나머지 암반들에 대하여는 암반의 탄성계수(E_m)를 경암을 기준으로 연암은 10배, 풍화암은 100배, 완전풍화암은 1000배를 줄여서 결정하였으며, 마찬가지로 식 (1, 2)를 이용하여 수직 및 전단강성계수를 결정하였다.

4. 수치해석 결과를 이용한 탄성계수 추정

암석종류 및 절리특성(절리전단각도 및 절리각도)이 고려된 암반의 탄성계수값을 추정하기 위해 터널굴착면의 천단, 인버트 및 스프링라인의 좌, 우에서 발생한 반경방향 변위를 조사하였으며 (그림 5 및 표 3), 그 중 최대 발생 변위량을 이용하여 탄성계수값을 추정하였다. 발생변위량은 절리각도가 30° 이하인 경우에는 터널의 상·하부에서 보다 큰 변위가 발생하였으며, 절리각도가 60° 이상인 경우에는 터널의 좌·우 측벽부에서 보다 큰 변위가 발생하였다. 절리각도가 45° 인 경우에는 터널의 상·하부 중 한 곳과 좌·우 측벽부 중 한 곳의 변위값이 유사하게 발생하였다.

탄성계수 추정은 탄성체에서 원형터널 굴착 시, 굴착 후에

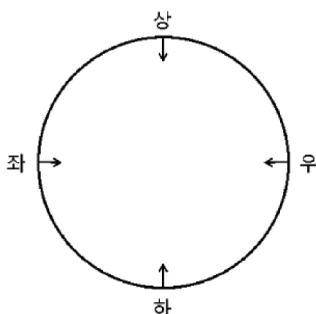


그림 5. 발생변위 조사위치

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 발생한 주변암반의 거동이 최종 변위수렴에 도달될 때까지 탄성거동을 나타낸 것으로 가정하였다.

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

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

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

여기서, u_r 은 반경방향변위, σ_{vo} 는 연직방향 초기지중응력, ν 은 프와송비, K_o 는 토압계수이다.

4.1 경암에서의 탄성계수 비교

그림 6은 경암에서 절리간격 1m에서의 절리각도와 절리특성에 따른 탄성계수의 변화를 비교한 것이다.

본 연구에서는 $K_o = 1$ 인 응력 조건을 가정하였기 때문에 절리각도 0° 및 90°와 절리각도 30° 및 60°인 경우에는 각각 동일한 탄성계수값이 얻어졌다.

경암에서 절리상태가 양호한 경우(절리특성 1) 절리각도가 0°~30°로 변화 하면서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 91%에서 약 83%로 조금씩 감소하였고, 절리각도가 30°~60°인 경우에는 탄성계수가 크게 변화 하지 않았으며, 절리각도가 60°~90°인 경우에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 83%에서 약 91%로 탄성계수가 조금씩 다시 증가하는 것으로 나타났다. 즉 절리상태가 양호한 경우(절리특성 1)에서의 탄성계수는 절리가 없는 경우보다 탄성계수가 조금 작아지는 것으로 나타났고, 절리각도 30° 및 60°에서 탄성계수가 절리각도 0° 및 90°에서 보다 조금 작게(탄성계수 차이 비: 약 9%) 나타났다.

절리상태가 보통인 경우(절리특성 2)에서는 절리각도가 0°~30°로 변화 하면서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 59%에서 약 35%로 크게 감소하였고, 절리각도가 30°~60°인 경우에는 탄성계수가 크게 변화 하지 않았으며, 절리각도가 60°~90°인 경우에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 35%에서 약 59%로 탄성계수가 크게 다시 증가하는 것으로 나타나, 절리상태가 보통인 경우(절리특성 2)에 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 절리상태가 보통인 경우(절리특성 2)에서 탄성계수는 절리가 없는 경우보다 탄성계수가 크게 작아지는 것으로 나타났고, 절리각도 30° 및 60°에서 탄성계수가 절리각도 0° 및 90°에서 보다 조금 작게(탄성계수 차이 비: 약 24%) 나타났다.

절리상태가 불량인 경우(절리특성 3)에서는 절리각도가

표 3. 발생변위량

Case	암석종류	절리특성			변위량(mm)			
		각도(°)	간격(m)	상태	상	하	좌	우
1	경암	0	1	절리특성 1	0.04	0.04	0.03	0.03
2	경암	15	1	절리특성 1	0.04	0.04	0.03	0.03
3	경암	30	1	절리특성 1	0.04	0.04	0.03	0.03
4	경암	45	1	절리특성 1	0.03	0.04	0.03	0.04
5	경암	60	1	절리특성 1	0.03	0.03	0.04	0.04
6	경암	90	1	절리특성 1	0.03	0.03	0.04	0.04
7	경암	0	1	절리특성 2	0.14	0.14	0.05	0.05
8	경암	15	1	절리특성 2	0.17	0.17	0.06	0.06
9	경암	30	1	절리특성 2	0.13	0.14	0.08	0.08
10	경암	45	1	절리특성 2	0.08	0.10	0.08	0.10
11	경암	60	1	절리특성 2	0.08	0.08	0.14	0.14
12	경암	90	1	절리특성 2	0.05	0.05	0.14	0.14
13	경암	0	1	절리특성 3	0.87	0.88	0.17	0.17
14	경암	15	1	절리특성 3	1.13	1.14	0.26	0.26
15	경암	30	1	절리특성 3	0.87	0.87	0.42	0.42
16	경암	45	1	절리특성 3	0.66	0.42	0.66	0.42
17	경암	60	1	절리특성 3	0.42	0.42	0.78	0.88
18	경암	90	1	절리특성 3	0.17	0.17	0.87	0.87
19	경암	0	1	절리특성 4	4.70	4.91	1.39	1.39
20	경암	15	1	절리특성 4	6.72	6.70	1.80	1.79
21	경암	30	1	절리특성 4	5.42	5.43	2.66	2.68
22	경암	45	1	절리특성 4	4.57	2.25	4.56	2.28
23	경암	60	1	절리특성 4	2.66	2.68	5.41	5.43
24	경암	90	1	절리특성 4	1.39	1.39	4.85	4.76
25	연암	0	1	절리특성 2	0.40	0.40	0.32	0.32
26	연암	15	1	절리특성 2	0.43	0.43	0.34	0.34
27	연암	30	1	절리특성 2	0.40	0.40	0.35	0.35
28	연암	45	1	절리특성 2	0.37	0.34	0.37	0.34
29	연암	60	1	절리특성 2	0.35	0.35	0.40	0.40
30	연암	90	1	절리특성 2	0.32	0.32	0.40	0.40
31	연암	0	1	절리특성 3	1.43	1.41	0.48	0.48
32	연암	15	1	절리특성 3	1.69	1.70	0.65	0.65
33	연암	30	1	절리특성 3	1.37	1.37	0.82	0.82
34	연암	45	1	절리특성 3	1.05	0.79	1.05	0.79
35	연암	60	1	절리특성 3	0.82	0.82	1.37	1.37
36	연암	90	1	절리특성 3	0.48	0.48	1.43	1.41
37	연암	0	1	절리특성 4	8.74	8.79	1.73	1.73
38	연암	15	1	절리특성 4	11.32	11.33	2.64	2.64
39	연암	30	1	절리특성 4	8.88	9.01	4.33	4.42
40	연암	45	1	절리특성 4	7.10	4.66	7.09	4.68
41	연암	60	1	절리특성 4	4.36	4.40	8.89	8.89
42	연암	90	1	절리특성 4	1.72	1.73	8.77	8.75
43	풍화암	0	1	절리특성 3	4.11	4.11	3.23	3.23
44	풍화암	15	1	절리특성 3	4.39	4.38	3.44	3.44
45	풍화암	30	1	절리특성 3	4.11	4.11	3.56	3.56
46	풍화암	45	1	절리특성 3	3.74	3.51	3.74	3.51
47	풍화암	60	1	절리특성 3	3.56	3.56	4.11	4.11
48	풍화암	90	1	절리특성 3	3.23	3.23	4.10	4.11
49	풍화암	0	1	절리특성 4	14.43	14.37	4.99	4.99
50	풍화암	15	1	절리특성 4	17.19	17.20	6.62	6.62
51	풍화암	30	1	절리특성 4	14.01	13.88	8.39	8.35
52	풍화암	45	1	절리특성 4	10.66	8.01	10.63	8.17
53	풍화암	60	1	절리특성 4	8.39	8.35	14.01	13.88
54	풍화암	90	1	절리특성 4	4.93	4.96	14.49	14.40
55	완전풍화암	0	1	절리특성 4	42.35	42.36	33.49	33.45
56	완전풍화암	15	1	절리특성 4	45.05	45.19	35.46	35.43
57	완전풍화암	30	1	절리특성 4	42.35	42.28	36.74	36.72
58	완전풍화암	45	1	절리특성 4	38.48	36.23	38.50	36.22
59	완전풍화암	60	1	절리특성 4	36.72	36.70	42.36	42.29
60	완전풍화암	90	1	절리특성 4	33.44	33.45	42.48	42.24

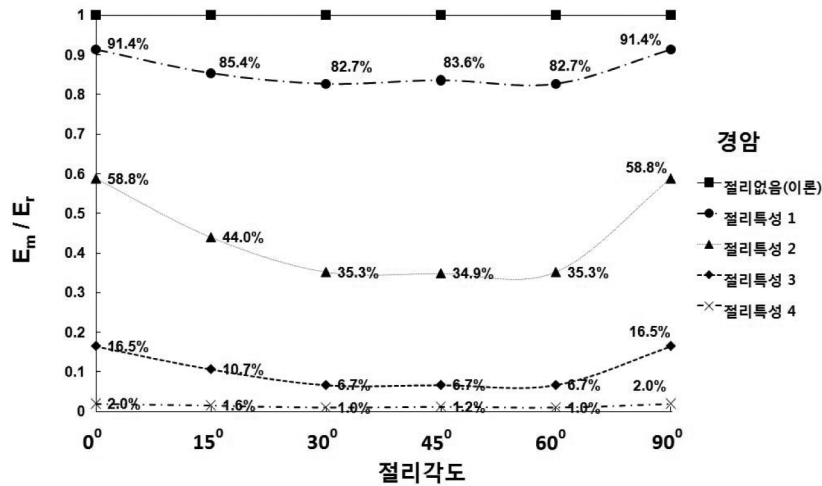


그림 6. 경암에서의 탄성계수 비 (E_m : 암반의 탄성계수, E_r : 암석의 탄성계수)

0°~30° 및 60°~90°로 변화 하면서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 조금씩 감소 및 증가하였고, 절리각도가 30°~60°인 경우에는 탄성계수가 크게 변화하지 않은 것으로 나타났다. 또한 절리상태가 불량인 경우에서 탄성계수는 절리가 없는 상태의 값의 약 7~17%로 나타나 탄성계수가 상당히 작아지는 것으로 나타났고, 절리각도 30° 및 60°에서 탄성계수가 절리각도 0° 및 90°에서 보다 조금 작게(탄성계수 차이 비: 약 10%) 나타났다.

절리상태가 매우불량인 경우(절리특성 4)에서의 탄성계수는 절리각도에 상관없이 절리가 없는 상태의 값의 약 1~2%만의 탄성계수가 나타나 다른 절리특성인 경우의 탄성계수에 비해 가장 크게 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 같은 암석상태라 할지라도 절리상태가 나빠질수록 탄성계수가 급격히 감소하는 결과가 나타났다.

경암에서의 절리각도와 절리특성에 따른 탄성계수의 변화를 요약하면, 절리각도 0° 및 90°에서 가장 큰 탄성계수가 나타났고, 절리각도 30° 및 60°에서 가장 작은 탄성계수가 나타났다. 또한 절리각도 0°~30° 및 60°~90°에서는 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 다소 영향을 미치는 것으로 나타난 반면, 절리각도 30°~60°에서는 탄성계수에 대한 절리

각도의 영향이 미미하였다.

절리특성에 따라서는 절리상태가 나빠질수록 탄성계수는 급격히 감소하였고, 절리상태가 보통인 경우(절리특성 2)에서 탄성계수에 대한 절리각도의 영향을 가장 크게 받았으며, 절리상태가 매우 불량인 경우(절리특성 4)에서는 탄성계수에 대한 절리각도의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

4.2 연암에서의 탄성계수 비교

그림 7은 연암에서 절리간격 1m에서의 절리각도와 절리특성에 따른 탄성계수의 변화를 비교한 것이다.

연암에서 절리상태가 보통인 경우(절리특성 2) 절리각도가 0°~30°로 변화 하면서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 90%에서 약 82%로 조금씩 감소하였고, 절리각도가 30°~60°인 경우에는 탄성계수가 크게 변화 하지 않았으며, 절리각도가 60°~90°인 경우에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 82%에서 약 90%로 탄성계수가 조금씩 다시 증가하는 것으로 나타났다. 즉 절리상태가 보통인 경우(절리특성 2)에서의 탄성계수는 절리가 없는 경우보다 탄성계수가 조금 작아지는 것으로 나타났고, 절리각도 30° 및 60°에서 탄성계수가 절리각도 0° 및 90°에서 보다

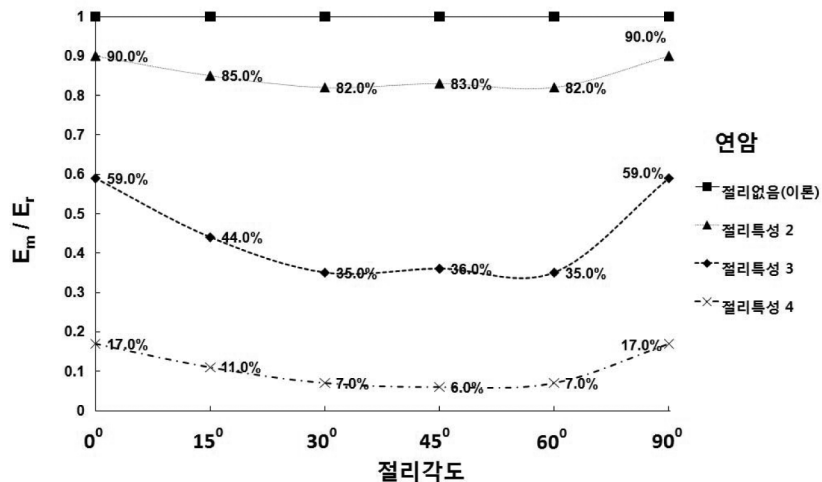


그림 7. 연암에서의 탄성계수 비 (E_m : 암반의 탄성계수, E_r : 암석의 탄성계수)

조금 작게(탄성계수 차이 비: 약 8%) 나타났다.

절리상태가 불량인 경우(절리특성 3)에서는 절리각도가 0°~30°로 변화하면서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 59%에서 약 35%로 크게 감소하였고, 절리각도가 30°~60°인 경우에는 탄성계수가 크게 변화하지 않았으며, 절리각도가 60°~90°인 경우에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 35%에서 약 59%로 탄성계수가 크게 다시 증가하는 것으로 나타나, 절리상태가 불량인 경우(절리특성 3)에 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 절리상태가 불량인 경우(절리특성 3)에서 탄성계수는 절리가 없는 경우보다 탄성계수가 크게 작아지는 것으로 나타났고, 절리각도 30° 및 60°에서 탄성계수가 절리각도 0° 및 90°에서 보다 조금 작게(탄성계수 차이 비: 약 24%) 나타났다.

절리상태가 매우불량인 경우(절리특성 4)에서는 절리각도가 0°~30° 및 60°~90°로 변화하면서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 조금씩 감소 및 증가하였고, 절리각도가 30°~60°인 경우에는 탄성계수가 크게 변화하지 않은 것으로 나타났다. 또한 절리상태가 매우불량인 경우에서 탄성계수는 절리가 없는 상태의 값의 약 6~17%로 나타나 탄성계수가 가장 크게 감소하는 것으로 나타났고, 절리각도 30° 및 60°에서 탄성계수가 절리각도 0° 및 90°에서 보다 조금 작게(탄성계수 차이 비: 약 10%) 나타났다.

연암에서의 절리각도와 절리특성에 따른 탄성계수의 변화를 요약하면, 절리각도 0° 및 90°에서 가장 큰 탄성계수가 나타났고, 절리각도 30° 및 60°에서 가장 작은 탄성계수가 나타났다. 또한 절리각도 0°~30° 및 60°~90°에서는 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 다소 영향을 미치는 것으로 나타난 반면, 절리각도 30°~60°에서는 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 미미하였다.

절리특성에 따라서는 절리상태가 나빠질수록 탄성계수는 급격히 감소하였으며, 절리상태가 불량인 경우(절리특성 3)에서 탄성계수에 대한 절리각도의 영향을 가장 크게 받은 것으로 나타났다.

4.3 풍화암에서의 탄성계수 비교

그림 8은 풍화암에서 절리간격 1m에서의 절리각도와 절리특성에 따른 탄성계수의 변화를 비교한 것이다.

풍화암에서 절리상태가 불량인 경우(절리특성 3) 절리각도가 0°~30°로 변화하면서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 90%에서 약 82%로 조금씩 감소하였고, 절리각도가 30°~60°인 경우에는 탄성계수가 크게 변화하지 않았으며, 절리각도가 60°~90°인 경우에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 82%에서 약 90%로 탄성계수가 조금씩 다시 증가하는 것으로 나타났다. 즉 절리상태가 불량인 경우(절리특성 3)에서의 탄성계수는 절리가 없는 경우보다 탄성계수가 조금 작아지는 것으로 나타났고, 절리각도 30° 및 60°에서 탄성계수가 절리각도 0° 및 90°에서 보다 조금 작게(탄성계수 차이 비: 약 8%) 나타났다.

절리상태가 매우불량인 경우(절리특성 4)에서는 절리각도가 0°~30°로 변화하면서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 59%에서 약 36%로 크게 감소하였고, 절리각도가 30°~60°인 경우에는 탄성계수가 크게 변화하지 않았으며, 절리각도가 60°~90°인 경우에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 35%에서 약 59%로 탄성계수가 크게 다시 증가하는 것으로 나타나, 절리상태가 매우불량인 경우(절리특성 4)에서 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 또한 절리상태가 매우불량인 경우에서 탄성계수는 절리가 없는 상태의 값의 약 35~59%로 나타나 탄성계수가 크게 작아지는 것으로 나타났고, 절리각도 30° 및 60°에서 탄성계수가 절리각도 0° 및 90°에서 보다 조금 작게(탄성계수 차이 비: 약 24%) 나타났다.

풍화암에서의 절리각도와 절리특성에 따른 탄성계수의 변화를 요약하면, 절리각도 0° 및 90°에서 가장 큰 탄성계수가 나타났고, 절리각도 30° 및 60°에서 가장 작은 탄성계수가 나타났다. 또한 절리각도 0°~30° 및 60°~90°에서는 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 다소 영향을 미치는 것으로 나타난 반면, 절리각도 30°~60°에서는 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 미미하였다.

절리특성에 따라서는 절리상태가 나빠질수록 탄성계수가 크게 감소하였고, 절리상태가 매우불량인 경우(절리특성 4)에서 탄성계수에 대한 절리각도의 영향을 상대적으로 크게

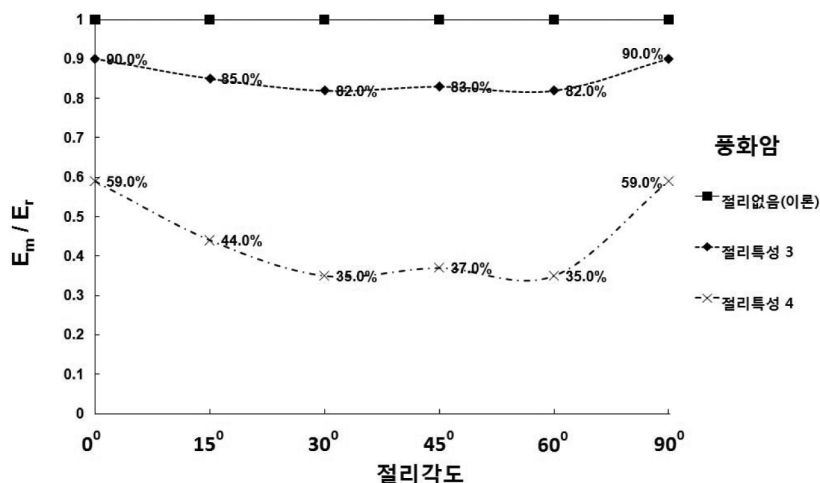


그림 8. 풍화암에서의 탄성계수 비 (E_m : 암반의 탄성계수, E_t : 암석의 탄성계수)

받은 것으로 나타났다.

4.4 완전풍화암에서의 탄성계수 비교

그림 9는 완전풍화암에서 절리간격 1m에서의 절리각도와 절리특성에 따른 탄성계수의 변화를 비교한 것이다.

완전풍화암에서 절리상태가 매우불량인 경우(절리특성 4) 절리각도가 0°~30°로 변화하면서 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 91%에서 약 83%로 조금씩 감소하였고, 절리각도가 30°~60°인 경우에는 탄성계수가 크게 변화하지 않았으며, 절리각도가 60°~90°인 경우에서의 탄성계수는 절리가 없는 상태와 비교하여 약 83%에서 약 91%로 탄성계수가 조금씩 다시 증가하는 것으로 나타났다. 또한 절리상태가 매우불량인 경우에서 탄성계수는 절리가 없는 상태의 값의 약 83~91%로 나타나 탄성계수가 조금 작아지는 것으로 나타났고, 절리각도 30° 및 60°에서 탄성계수가 절리각도 0° 및 90°에서 보다 조금 작게(탄성계수 차이 비: 약 8%) 나타났다.

요약하면, 완전풍화암에서는 절리각도 및 절리특성의 영향이 암반의 탄성계수에 크게 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다.

4.5 종합적 분석

그림 10은 각각의 암석에 대한 절리간격 1m에서의 절리각도와 절리특성에 따른 탄성계수의 변화를 종합적으로 비교한 것이다.

암석종류별 탄성계수의 변화를 비교한 결과 암반의 탄성계수는 경암, 연암, 풍화암 및 완전풍화암의 모든 경우에서 절리각도 0° 및 90°에서 가장 큰 탄성계수가 나타났고, 절리각도 30° 및 60°에서 가장 작은 탄성계수가 나타났다. 전반적으로 절리각도 0°~30° 및 60°~90°에서는 탄성계수에 대해 절리각도가 다소 영향을 미친 반면에 절리각도 30°~60°에서는 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 미미하였다. 경암에서는 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 절리상태가 보통인 경우(절리특성 2)에 제일 큰 것으로 나타났고, 연암에서는 절리상태가 불량인 경우(절리특성 3)에 탄성계수에 대한

절리각도의 영향이 제일 큰 것으로 나타났다. 또한 풍화암에서는 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 절리상태가 매우 불량인 경우(절리특성 4)에서 상대적으로 큰 것으로 나타났으며, 완전풍화암에서는 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 크게 미치지 않는 것으로 나타났다.

전반적으로 절리상태가 나빠질수록 탄성계수가 작아지는 것으로 나타났으며, 경암 및 연암에서 처럼 암질이 좋은 암반에서는 절리상태가 나빠질수록 탄성계수가 급격히 감소되는 경향이 있는 반면, 상대적으로 암질이 좋지 않은 풍화암에서는 절리상태가 나빠질수록 탄성계수의 감소율이 상대적으로 작게 나타났다. 또한 암질이 매우불량한 완전풍화암에서는 절리특성의 영향이 암반의 탄성계수에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

요약하면, 경암에서는 절리상태가 나빠짐에 따라 암반의 탄성계수는 급격히 감소하였고, 절리특성 4인 경우의 탄성계수값은 절리가 없는 상태의 값의 약 1~2%의 탄성계수값을 나타내고 있으며, 이와같은 절리상태가 매우불량인 경우에 있어서 암반의 탄성계수에 대한 절리각도의 영향은 미미한 것으로 나타났다. 연암에서 역시 경암과 같이 절리상태가 나빠짐에 따라 암반의 탄성계수는 급격히 감소하고, 절리특성 4인 경우의 탄성계수값은 절리가 없는 상태의 값의 약 7~17%의 탄성계수값을 나타내고 있으며, 암반의 탄성계수에 절리각도가 약간 영향을 미친 것으로 나타났다. 풍화암의 경우에는 절리상태가 나빠짐에 따라 경암 및 연암과 비교하여 절리가 없는 상태에서의 탄성계수에 대한 감소율이 상대적으로 작게 나타났고, 절리특성 4인 경우의 탄성계수값은 절리가 없는 상태의 값의 약 35~59%의 탄성계수값을 나타내고 있으며, 암반의 탄성계수에 절리각도가 약간 영향을 미친 것으로 나타났다. 완전풍화암에서는 절리특성 4인 경우의 탄성계수값이 절리가 없는 상태의 값의 약 83~90%의 탄성계수값을 나타내고 있으며, 절리각도 및 절리특성이 암반의 탄성계수에 크게 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다.

결과적으로 암질이 좋은 암반의 경우에는 절리특성이 암반의 탄성계수에 큰 영향을 미치지 않지만, 암질이 좋지 않은 암

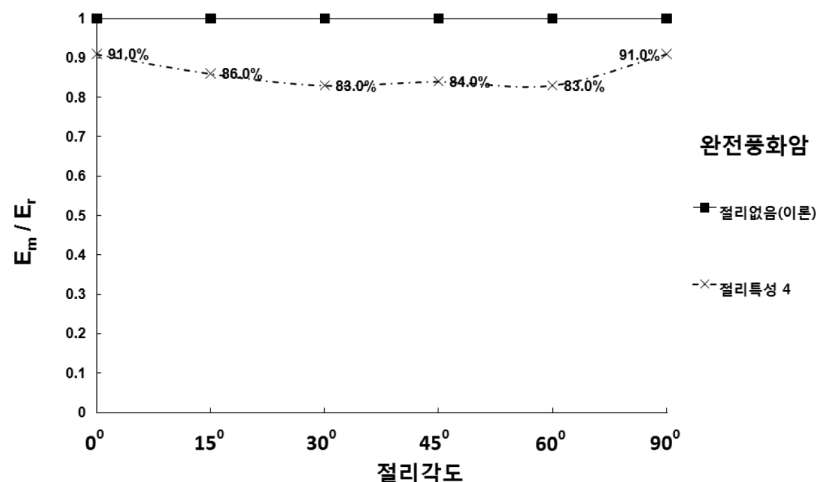


그림 9. 완전풍화암에서의 탄성계수 비 (E_m : 암반의 탄성계수, E_t : 암석의 탄성계수)

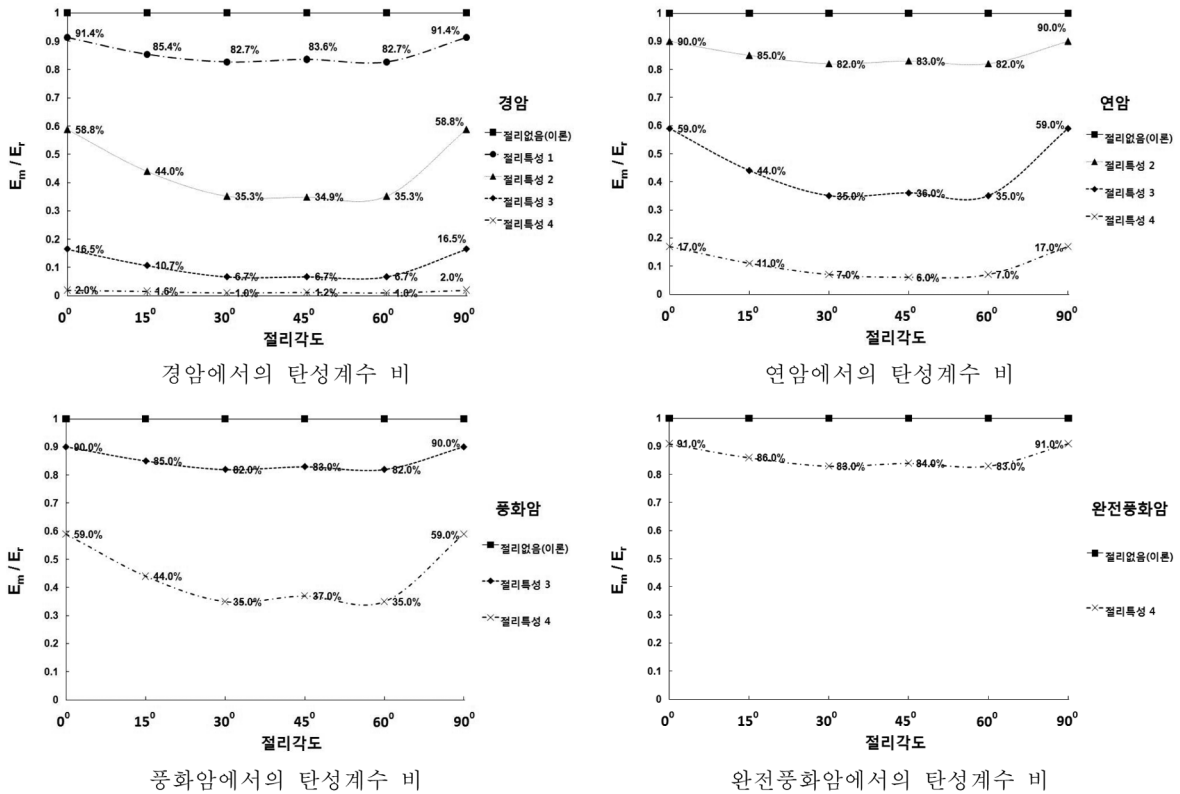


그림 10. 암반종류별 탄성계수 비 (E_m : 암반의 탄성계수, E_r : 암석의 탄성계수)

반의 경우에는 절리특성이 암반의 탄성계수에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 암석의 종류 및 절리특성에 따른 암반에서의 터널굴착으로 인한 발생변위와 그로부터 암반의 탄성계수 추정에 대한 수치해석적 매개변수 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 절리각도에 따른 탄성계수 변화를 분석한 결과, 절리각도 30° 및 60°에서 탄성계수가 가장 작게 나타났고, 절리각도 0° 및 90°에서 탄성계수가 가장 크게 나타났다. 또한 절리각도 0°~30° 및 60°~90°에서는 탄성계수에 대해 절리각도가 다소 영향을 미치는 것으로 나타난 반면, 절리각도 30°~60°에서는 탄성계수에 대한 절리각도의 영향이 미미한 것으로 나타났다.
2. 절리특성에 따른 탄성계수 변화를 분석한 결과, 절리특성이 불량 할수록 탄성계수는 작아지는 것으로 나타났고, 경암 및 연암과 같이 암질이 좋은 암반의 경우에는 절리특성이 암반의 탄성계수에 큰 영향을 미치지 않지만, 풍화암 및 완전풍화암과 같이 암질이 좋지 않은 암반의 경우에는 절리특성이 암반의 탄성계수에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.
3. 암석종류에 따른 탄성계수 변화를 분석한 결과, 경암이 동일한 절리각도 및 절리상태에 따라 가장 큰 탄성계수를 나타내고 있으나, 절리상태가 나빠질수록 다른 암석에 비해 상대적으로 탄성계수는 크게 감소하였다. 다시말해 경암이 절리특성에 따라 탄성계수에 가장 큰 영향을 받았으

며, 암석이 나빠짐에 따라 절리특성에 따른 영향은 줄어드는 것으로 나타났다.

4. 수치해석을 통한 다양한 암석종류 및 절리특성을 고려한 암반터널에서의 발생변위를 이용하여 암반의 탄성계수를 추정하는 방법 및 그 결과들을 제시하였으며, 향후 실무에서 암반터널에서의 절리가 형성된 암반지층의 탄성계수 추정 및 변위예측을 하는데 있어서 그 활용도가 매우 클 것으로 판단된다.

참고문헌

Barton, N. R. (1976) The shear strength of rock and rock joints, *Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 13, No. 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, No. 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, Norwe-

- gian Concrete Association, Norway, pp. 44-66.
- Hoek, E. and Brown, E. T. (1980) *Underground Excavations in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek, E. and Brown, E. T. (1998), Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 34, No. 8, pp. 1165-1186.
- Kirsch, G. (1898) Die theorie der elastizitat und die bedurfnisse der festigkeitslehre, *Veit. Ver. Deut. Ing.*, Vol. 42, No. 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, No. 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.
- (접수일: 2010.9.16/심사일: 2010.11.16/심사완료일: 2010.11.16)