

## 터널의 지진응답에 대한 암반 절리의 영향 평가

### Evaluation of Effect of Rock Joints on Seismic Response of Tunnels

유진권<sup>1</sup> Yoo, Jin-Kwon

장재훈<sup>2</sup> Chang, Jaehoon

박두희<sup>3</sup> Park, Du-Hee

사공명<sup>4</sup> Sagong, Myung

#### Abstract

In performing seismic analysis of tunnels, it is a common practice to ignore the rock joints and to assume that the rock mass surrounding the tunnel is continuous. The applicability of this assumption has not yet been validated in detail. This study performs a series of pseudo-static discrete element analyses to evaluate the effect of rock joint on the seismic response of tunnels. The parameters considered are joint intersection location, joint spacing, joint stiffness, joint dip, and interface stiffness. The results show that the joint stiffness has the most critical influence on the tunnel response. The tunnel response increases with the spacing, resulting in localized concentration of moment and shear stress. The response of the tunnel is the lowest for joints dipping at 45°. This is because large shear stresses result in rotation of the principal planes by 45°. In summary, the weathered and smooth, vertical or horizontal, and widely spaced joint set will significantly increase the tunnel response under seismic loading. The tunnel linings are shown to be most susceptible to damage due to induced shear stress, and therefore should be checked in the seismic design.

#### 요지

일반적으로 암반 터널 지진해석 시 절리의 영향을 무시하며 암반을 연속체라 가정한다. 하지만 이와 같은 가정의 적절성에 관해서는 연구된 바 없다. 본 연구에서는 응답변위법을 적용하여 지진동에 의하여 유발되는 암반 절리의 변위가 터널의 응답에 미치는 영향을 일련의 개별요소법을 이용하여 수치적으로 규명하였다. 해석에는 절리와 터널의 교차위치, 절리의 강성, 경사, 간격, 그리고 암반과 터널 사이의 인터페이스 강성이 고려되었다. 해석 결과, 절리의 강성이 터널에 가장 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 절리의 간격은 클수록 변위가 국부적으로 집중되어 응답이 증가하는 것으로 나타났다. 절리의 경사는 정적인 경우와는 상반되게 45°에서 응답이 가장 작게 계산되었다. 이는 전단변형으로 인하여 수직면과 수평면에 큰 전단응력이 작용하여 주응력면이 45°로 회전하기 때문인 것으로 판단된다. 결과적으로 절리의 경사, 간격, 강성 모두 터널의 응답에 큰 영향을 미치며 특히 간격이 큰 미끈한 수직 또는 수평방향 절리가 터널을 통과하는 경우가 가장 위험한 것으로 나타났다. 또한 터널 라이닝에는 휨응력보다는 전단응력이 큰 폭으로 증가하므로 내진설계 시 이를 반드시 검토해야 할 것으로 판단된다.

**Keywords :** Rock joint, Tunnel, Seismic response, Pseudo-static, Discrete element analysis

1 비회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

2 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 석사 (Member, Master, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

3 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ., Tel: +82-2-2220-0322, Fax: +82-2-2220-1945, dpark@hanyang.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

4 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 연구실장 (Member, Senior Researcher, Korea Railway Research Institute)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

최근 도로나 고속철도를 위한 터널 건설의 필요성 증가와 지하공간의 새로운 용도(e.g. CO<sub>2</sub> 저장소, 핵 폐기물 보관소)로의 활용은 지상공간의 부족 현상을 초래하였고, 이로 인하여 지하 공간은 현대 사회의 사회 기반의 중추적인 부분이 되었다. 이와 같이 지하공간의 중요성은 잘 인식이 되어있는 반면, 일반적으로 지하구조물은 지상구조물에 비하여 상대적으로 지진의 영향이 적다고 알려져 왔기 때문에 내진 설계의 중요성은 간과되어 왔다. 그러나 최근 계속해서 발생하고 있는 지진들은 지하구조물이 지진에 대하여 결코 안전하지만은 않는 사실을 여실히 증명하는 계기가 되었다(Asakura와 Sato, 1996; Hashash, 2002; Wang, 1993). 지하구조물의 중요성을 고려하였을 때, 지진 발생 시의 피해를 막기 위한 지하 공간에 대한 충분한 내진설계가 요구된다.

터널의 경우 주변 지반에 의해 완전히 둘러싸여 있기 때문에 자유롭게 진동하지 않고 주변 지반과 함께 거동하게 된다. 따라서 이에 대한 분석을 수행하거나 지반응답해석을 통하여 터널의 최대 전단 변형률을 계산하는 수치해석 방법인 응답변위법을 수행하는 것이 일반적이다(Hashash, 2002; Wang, 1993). 기존에 수행되었던 연구에서는 지반이 연속체라는 가정 하에 연구가 수행되었다(Amorosi and Boldini, 2009; Cilingir and Gopal Madabhushi, 2010; Sedarat et al., 2009). 이와 같은 가정은 흙에 의해서 둘러싸여 있는 터널의 경우에는

타당하다고 판단된다. 하지만 절리를 포함하고 있어 터널의 응답에 크게 영향을 미치는 암반 위에 건설되는 터널에 대해서는 적합하지가 않다. 본 연구에서는 터널의 지진 응답에 대한 암반 절리의 영향을 평가하기 위해서 불연속체 해석을 수행하였다. 또한 불연속체 해석 결과는 연속체 해석과의 비교를 통하여 연속체 해석의 적절성을 규명하였다.

## 2. 수치 해석

본 연구에는 불연속체 수치해석 시 가장 널리 이용되는 상용 개별요소해석 프로그램인 UDEC(Itasca Consulting Group, 2004)이 사용되었다. 연속체 수치해석에는 유한차분해석 프로그램인 *FLAC<sup>2D</sup>*(Itasca Consulting Group, 2008)가 사용되었다. 수치해석에 적용된 해석영역을 Fig. 1에 상세히 도시하였다. 해석 영역은 연속체, 불연속체 해석에서 동일하게 횡방향 및 연직방향의 길이가 각각 50m이며, 직경이 1m인 원형 터널을 중심에 위치시켰다. 터널 라이닝의 두께로는 0.3m를 적용하였다. 하부 경계는 수직 및 수평 변위를 모두를 구속한 반면, 측면과 상부경계에는 수직변위는 구속하되 수평변위는 허용하였다. 해석은 응답변위법을 수행하였으며 측면 및 수직경계에 변위경계조건을 Fig. 2와 같이 적용하였다.

연속체 해석과 불연속체 해석에는 모두 평면변형률(Plane Strain) 3절점 삼각형 요소가 적용되었다. 암반과 터널의 라이닝 요소는 선형 탄성체로 모델링 하였으며 터널 라이닝에는 2절점 빔 요소가 적용되었다. 절리면

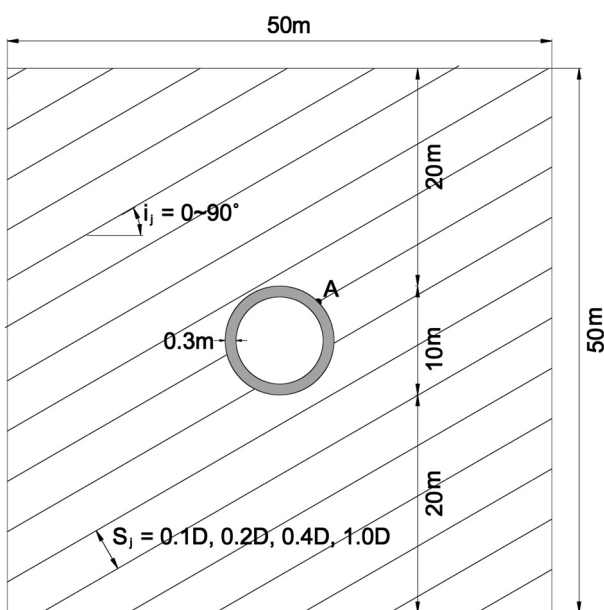


Fig. 1. Computational domain for discrete element analysis

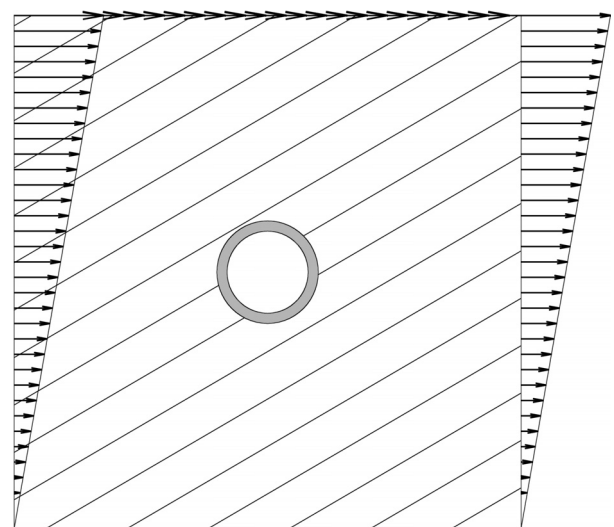


Fig. 2. Application of displacement boundary in the method of displacement

구성 모델로는 Mohr-Coulomb 모델이 사용되었다. 또한 암반과 터널의 라이닝 사이의 인터페이스는 연속체 해석과 불연속체 해석 모두 slip을 허용하였으며 축압 계수( $K_0$ )는 1.0을 적용하였다. 대상암은 사암이라고 가정하였으며 암석의 물성으로는(Kulhawy, 1975)가 154종의 암반에서 조사된 데이터를 기준으로 제시한 퇴적암(Sedimentary rock)인 쇄설암(Clastic)의 평균 물성을 적용하였다. 암반과 터널 라이닝에 적용된 물성치는 Table 1에 정리하였다.

암반 절리의 영향 규명을 위해서 다양한 조합의 절리 교차지점, 절리 간격, 절리 강성 및 강도, 경사, 암반-터널 라이닝 인터페이스 강성이 적용되었으며 해석 매트릭스는 Table 4에 정리하였다. 표에 회색 배경으로 표시된 사례가 기본 케이스다. 암반 절리와 터널의 교차 지점의 영향을 규명하기 위해서 천단부로부터 시계방향으로 0°, 45°, 90° 지점을 각각 통과하는 사례를 포함하였다. 절리 간격은 1m(0.1D), 2m(0.2D), 4m(0.4D), 10m(1.0D)를 적용하였다. 절리의 경사는 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90°까지 총 7가지를 적용하였다. 절리의 강성과 강도는 포괄적인 문헌조사를 통하여 산정하였다. 절리의 수직 강성( $K_n$ , normal stiffness) 및 전단 강성( $K_s$ , shear stiffness)은 Bandis et al.(1983)과 FLAC<sup>2D</sup> 매뉴얼에 제

시된 값을 참고하여 산정하였다. Bandis et al.(1983)은 절리의 상태를 1) 풍화되지 않았거나 약간 풍화(Fresh to slightly weathered), 2) 중간 정도로 풍화(Moderately weathered), 3) 풍화(Weathered) 3가지 세가지로 분류하였으며 각각의 상태에 대한 절리 강성의 범위를 제시하였다(Table 2). 수직 강성은 전단 강성에 비하여 항상 크며 대체적으로 전단 강성은 수직 강성의 1/4 - 1/10 크기인 것으로 제시되었다. Table 3에는 Table 2를 기반으로 산정된 절리 상태별 수직 및 전단강성을 정리하였다. 또한, FLAC<sup>2D</sup> 매뉴얼에 제시된 값을 기반으로 점토로 충전된 절리의 수직 및 전단 강성을 각각 0.1과 0.025 GPa/m로 적용하였다.

절리의 Mohr-Coulomb 강도정수는 Barton-Bandis의 경험식(Barton, 1976)(식 (1))을 통해 유도되었다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ JRC \log \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (1)$$

여기서  $\sigma_n$  = 수직응력, JCS(Joint compressive strength) = 불연속면에서의 압축강도, JRC(Joint roughness coefficient) = Barton의 거칠기 계수이다. JCS와 JRC는 Bandis et al. (1983)이 제시한 사암의 절리 상태 별 실측 데이터를 적용하였으며, 수직응력은 0.2~2.0MPa의 범위를 적용하여 이에 대한 대표  $c'$ ,  $\phi'$ 을 적용하였다. 적용된 절리 강도 정수는 Table 3에 정리하였다. 인터페이스 강성으로는 기준값인  $K_n=5\text{GPa/m}$ ,  $K_s=1.3\text{GPa/m}$ 가 적용되었다.

일반적으로 터널 라이닝과 주변 지반은 부착되어 상대변위가 발생할 수 없다고 가정하며 이를 No-Slip 조건

Table 1. Properties applied to the rock and tunnel lining

	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Elastic modulus (GPa)	Poisson ratio
Rock block	2320	19.3	0.15
Tunnel lining	2000	15	0.2

Table 2. Normal ( $K_n$ ) and shear ( $K_s$ ) stiffness of rock joints

	Joint type	Reference	$K_n$ (GPa/m)	$K_s$ (GPa/m)
Jointed rock mass (Sandstone)	Fresh to slightly weathered	Bandis et al. (1983)	3.6 ~ 22.7	0.25 ~ 2.36
	Moderately weathered	Bandis et al. (1983)	4.3 ~ 22.5	0.47 ~ 1.73
	Weathered	Bandis et al. (1983)	2.3 ~ 4.7	0.56 ~ 1.35
Filled joint	Soft-clay in-filling	FLAC Manual (Itasca, 2008)	0.01 ~ 0.1	0.01 ~ 0.1

Table 3. Properties applied for the rock joints

	Joint type	$K_n$ (GPa/m)	$K_s$ (GPa/m)	C (MPa)	$\phi$ (°)
Jointed rock mass (Sandstone)	Fresh to slightly weathered	20	2	0.2	49
	Moderately weathered	5	1.3	0.1	40
	Weathered	2 1	0.5 0.25	0.05 0.04	36 35
Filled joint	Soft-clay in-filling	0.1	0.025	0.03	33

이라고도 한다. 하지만 터널과 주변지반은 실제로는 분리되어 있으며 이를 고려하지 않을 경우, 축력을 과대에 측할 수 있다(Hashash, 2002). 본 연구에서는 라이닝과 주변의 경계면을 나타내는 인터페이스의 영향을 평가하였다. 인터페이스의 강성 범위는 절리와 동일하게 적용하였다. 불연속체 해석과의 비교를 위하여 수행된 유한차분해석은 해석영역, 경계조건, 암반과 터널 라이닝이 동일하게 적용되었다. 인터페이스 강성은 기준값이 적용되었다.

응답변위법 수행 시 지반에 중력을 적용하지 않았다. 따라서 아래의 해석결과는 전단변형에 의한 응답을 나타내며 정적 하중 및 터널 굴착에 의하여 발생하는 응력은 포함되지 않았다. 해석에 적용된 전단변형률의 크기는

DEEPSOIL(Hashash and Park, 2001)을 이용한 1차원 등가선형 지반응답해석을 수행하여 산정하였다. 이를 위하여 총 6개의 주상도에 대한 동적해석을 수행하여 암반에서의 전단변형률을 계산하였다. Fig. 3(a)-(c)는 토층 하부에 기반암이 위치한 주상도이며 Fig. 3(d)-(f)는 암반 노두 주상도이다. Fig. 4에는 1차원 지반응답해석에 사용된 입력지진파의 시간이력 곡선을 도시하였다. 국내에서 널리 사용되고 있는 Ofunato에서 기록된 지진파와 SIMQKE를 사용하여 국내 설계응답스펙트럼에 맞추어 제작된 인공지진파(Synthetic wave)를 재현주기 1000년의 최대지반가속도(PGA) 0.154g로 스케일링하여 적용하였다.

해석에 적용된 동적곡선은 Fig. 5에 도시하였다. 암반

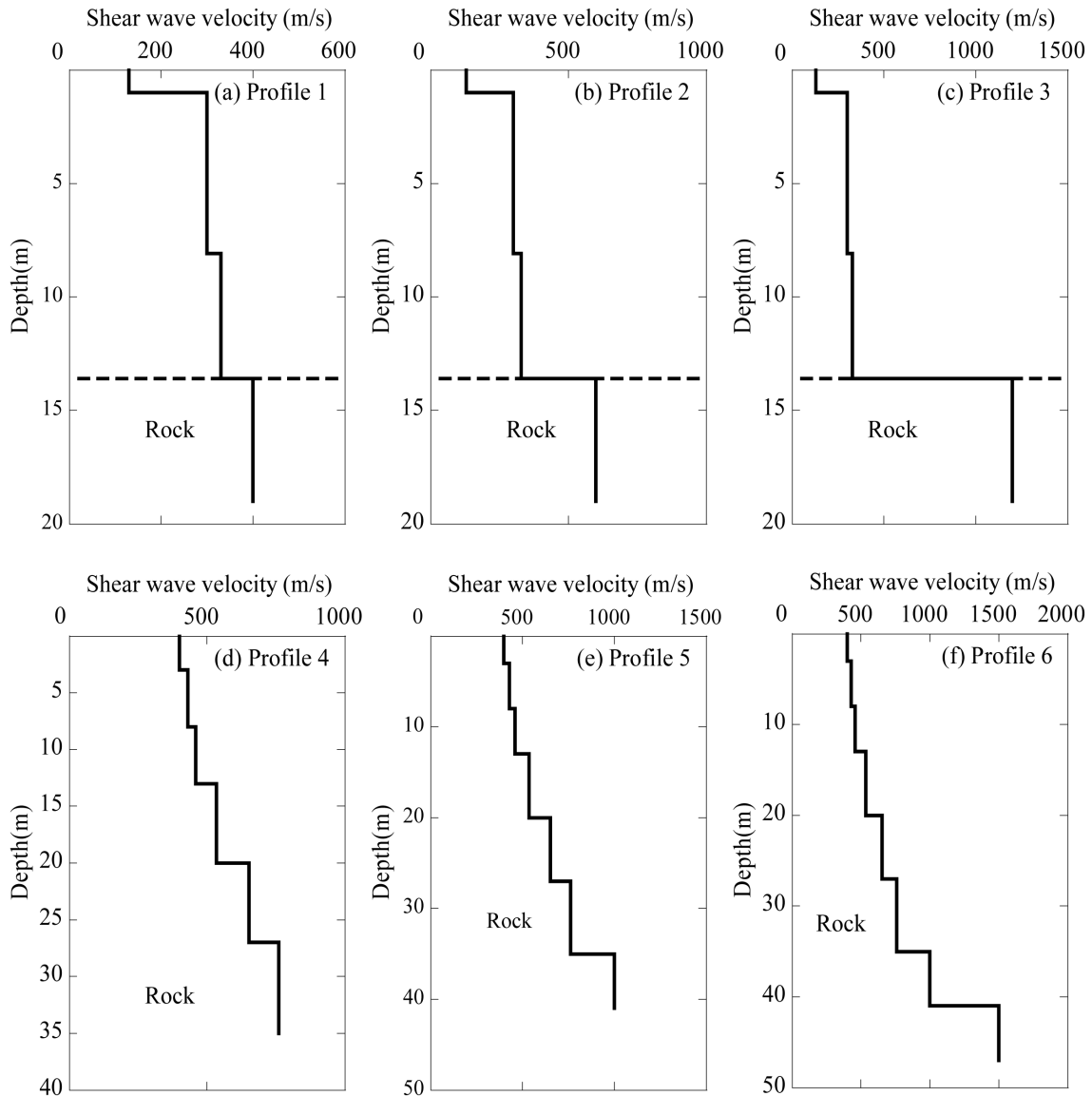


Fig. 3. Vs profiles used to perform site response analyses for estimation of representative maximum shear strain in rocks

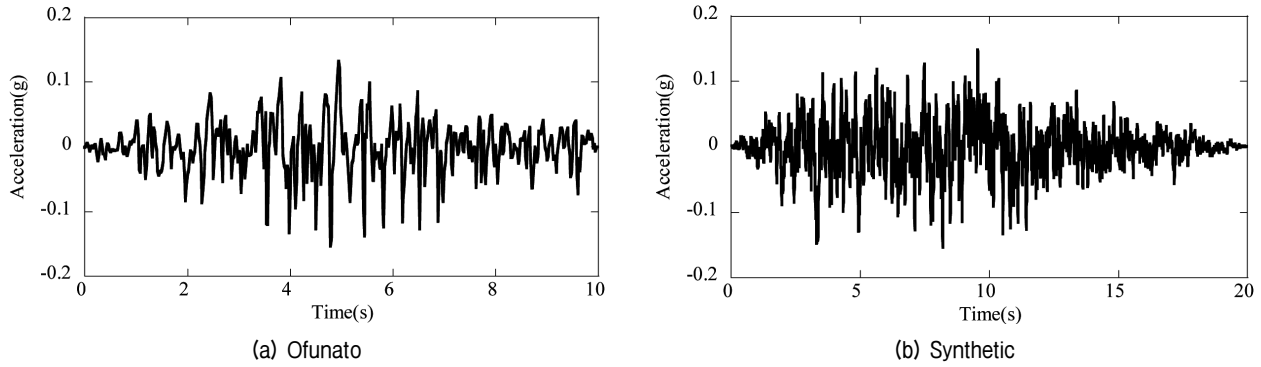


Fig. 4. Input ground motion acceleration time series used to perform 1D site response analyses

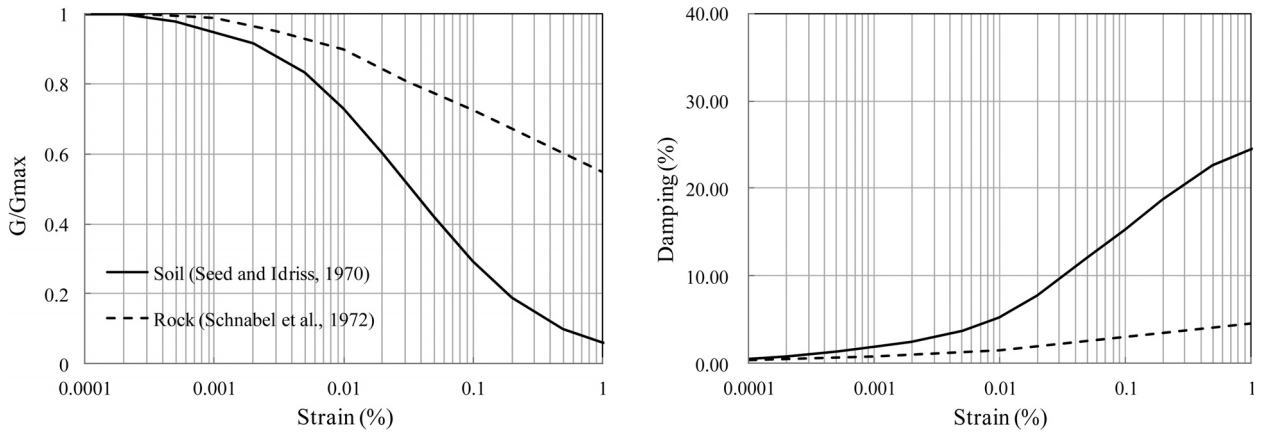


Fig. 5. Dynamic curves used

층을 제외한 모든 토층에는 Seed and Idriss(1970)의 평균 곡선을 적용하였고, 암반층에는 Schnabel et al.(1972) 곡선을 적용하였다. 1차원 지반응답 해석으로 계산된 최대 전단변형률 주상도는 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6의 결과를 분석해 보면 국내에서 널리 사용되고 있는 Ofunato 지진파와 인공지진파를 적용하였을 경우 암반층에서 계산된 최대 전단변형률은 0.002-0.024%로 나타났다. 암반층에서 전단파 속도가 1000m/s를 초과할 경우에는 전단변형률이 0.01%보다 작게 발생하는 반면, 상대적으로 연약한 암반층에서는 전단변형률이 0.024%까지 발생하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 0.01%의 전단변형률을 기본값으로 적용하였다.

### 3. 분석 결과

전절에서 자세하게 설명한 방법으로 불연속체 해석을 수행하였으며 각 사례별로 터널 라이닝에서의 축력, 모멘트, 전단력(응력), 그리고 휨응력을 계산하였다. 불연속체 해석과 더불어서 수행된 연속체 해석 결과는

Fig. 7에 도시하였다. 최대축력과 모멘트는 터널 어깨부(터널 천단부로부터 시계방향으로 45°와 225° 부근)에서 발생하며 각각 크기는 391kN/m과 3.35kN-m/m인 것으로 계산되었다. 전단력은 천정부 - 측벽부에 고르게 분포하며 최대값은 1.67kN/m로 계산되었다. 연속체 해석 결과는 아래에서 불연속체 해석결과와 비교되었으며 암반 절리의 영향을 평가하는데 사용되었다.

#### 3.1 절리와 터널의 교차 지점의 영향

절리와 터널의 교차 지점의 영향을 규명하기 위해서 해석조건, 절리의 간격 및 경사, 강성 및 강도, 인터페이스 강성 등 모든 조건을 일치시킨 상태에서 절리와 터널의 교차 지점만을 다르게 적용한 총 3가지 사례에 대한 수치해석을 수행하였다. 1개의 절리만이 터널을 관통하도록 절리 간격은 1.0D를 적용하였으며 경사는 기본값인 30°를 적용하였다. 불연속면은 터널의 천단부로부터 시계방향으로 0°(천정부), 45°(어깨부), 90°(측벽부)를 통과하며 이들은 각각 Table 4의 사례 1, 2, 3에 해당하는

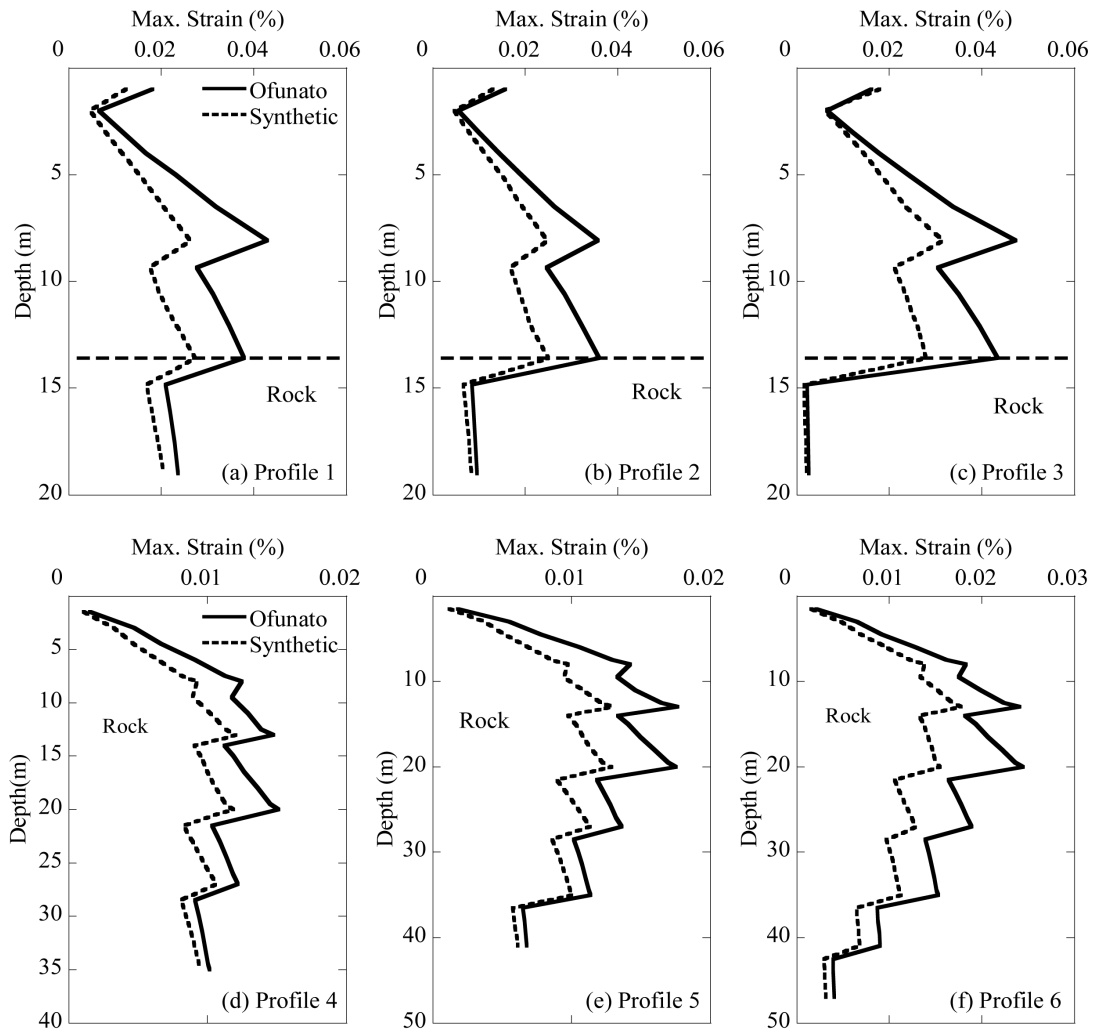


Fig. 6. Comparison of calculated maximum shear strain profiles

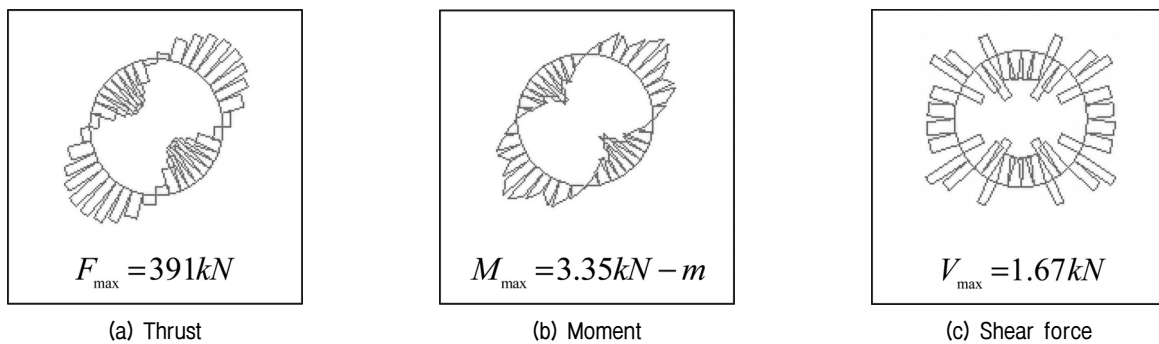


Fig. 7. Calculated maximum thrust, moment, and shear force

다. Table 4에는 해석 시 적용한 절리 및 인터페이스 강성도 제시되었다. 불연속체 해석을 통해 계산된 터널 라이닝에서의 축력, 모멘트 그리고 전단력의 분포는 Fig. 9에 도시하였다. 연속체 해석과 불연속체해석에서 계산된 최대 축응력, 모멘트, 휨응력, 그리고 전단응력은 Fig. 10에 도로설계편람 터널편(MOCT, 2010)에서 제시된 허용응력을 함께 비교하였다.

암반 절리가 터널 천단부를 통과하는 경우, 최대 축력은 연속체 해석과 유사한 것을 확인할 수 있다. 이는 최대 축력은 어깨부에서 발생을 하며 천단부에서는 축력이 매우 작기 때문에 절리와 접하는 부분에서 축력이 증가 하지만 최대값에 미치는 영향은 미비한 것을 확인할 수 있다. 반면, 모멘트와 전단력은 크게 증가하였으며 연속체에 비하여 각각 7.6배, 45배 큰 것으로 계산되

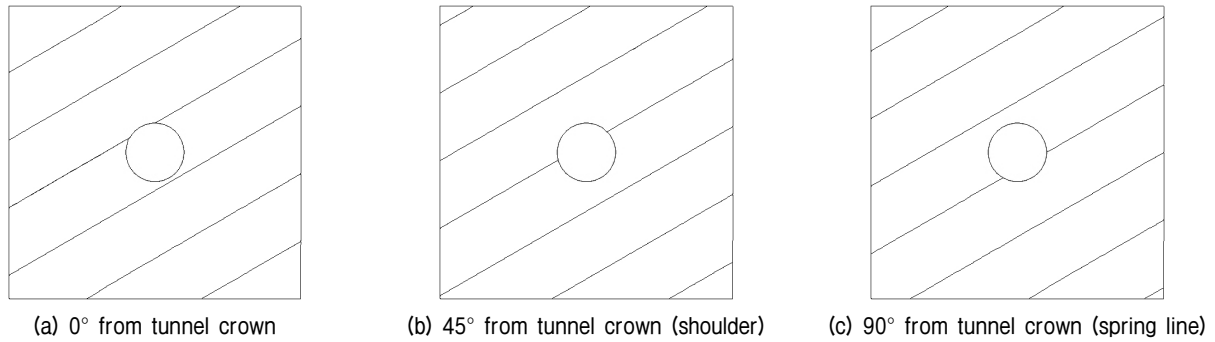


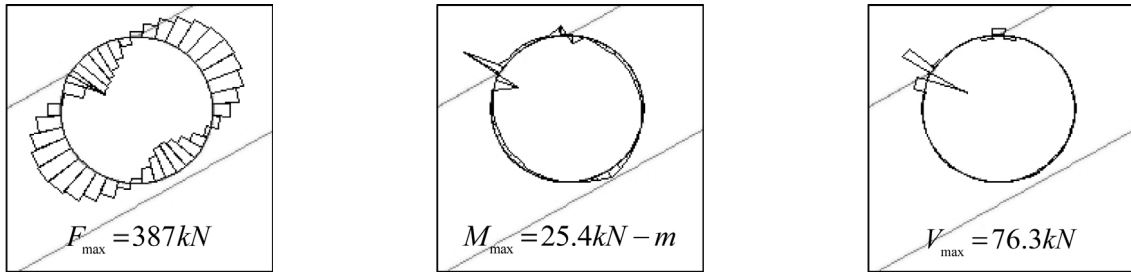
Fig. 8. Modeling for evaluation of effect of joint intersection location

Table 4. Matrix of analyses

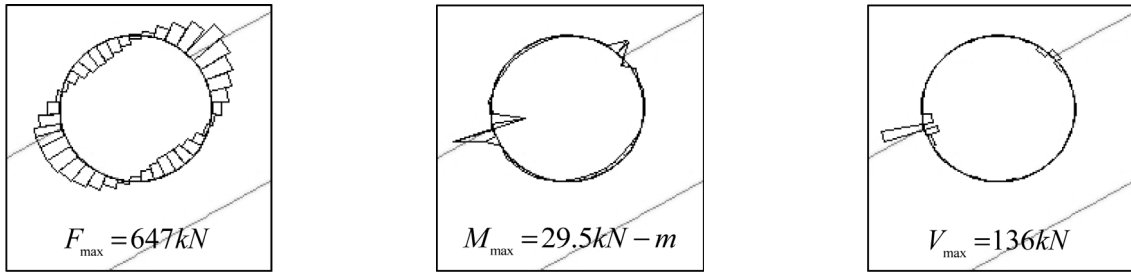
Parameters		Case																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Joint intersection (°)	0	○																	
	45		○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	90			○															
Joint Spacing (m)	1 (0.1D)				○														
	2 (0.2D)					○													
	4 (0.4D)						○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	10 (1.0D)	○	○	○															
Joint stiffness (GPa/m)	$K_n$	$K_s$																	
	20	2						○											
	5	1.3	○	○	○	○	○	○				○	○	○	○	○	○	○	○
	2	0.5							○										
	1	0.25								○									
	0.1	0.025									○								
Interface stiffness (GPa/m)	$K_n$	$K_s$																	
	20	2									○								
	5	1.3	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○	○	○	○
	1	0.25										○							
Joint orientation (°)	90													○					
	75														○				
	60															○			
	45																○		
	30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
	15																		○
	0																		○

었다. 이는 절리에서 발생한 작은 크기의 변형이 국부적인 휨을 유발하며 이로 인하여 현저하게 큰 집중된 모멘트와 전단력을 유발한 것으로 판단된다. 절리가 어깨부를 통과하는 경우에는 최대축력이 연속체 해석에 비하여 65% 증가하였다. 최대 모멘트는 29.5kN-m로 천단부를 통과하는 경우와 유사하지만 전단력은 135kN/m로 2배 가량 큰 것으로 나타났다. 측면부를 통과하는 경우는 좌측 하부 어깨부를 통과하기에 축력도 연속체 해

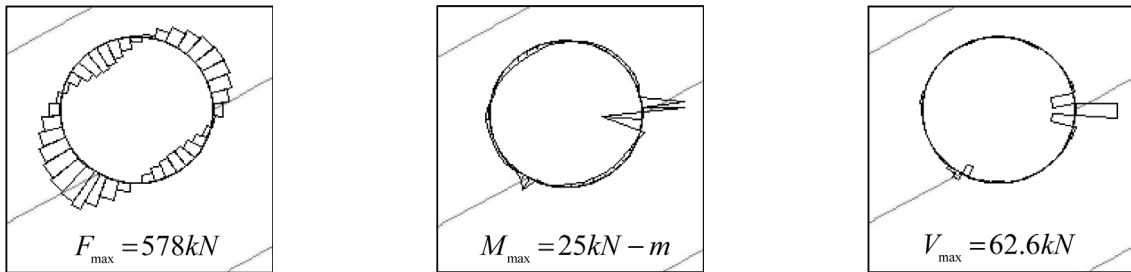
석에 비하여 증가하였다. 계산된 최대응답은 Fig. 10에 비교하였다. 앞에서 설명한 바와 같이 연속체과 불연속체 해석 결과는 축력보다는 모멘트와 전단력에서 큰 차이가 발생하였다. 설계 요소인 최대 휨응력과 전단응력의 경우, 연속체보다 불연속체 해석에서 크게 계산되었지만 설계기준의 허용응력보다는 작은 것으로 나타났다. 그림에서 주의해야 할 것은 해석 시 중력을 적용하지 않았으므로 계산된 휨 및 전단응력은 전단변형으로 인하



(a) Thrust, moment, and shear force for 0° from tunnel crown (case 1)

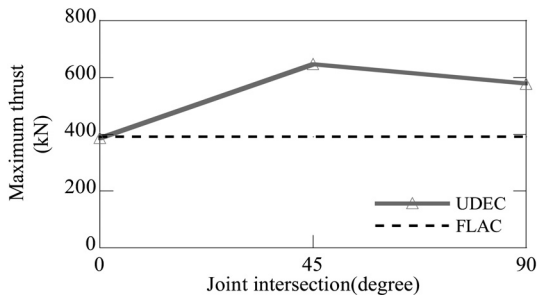


(b) Thrust, moment, and shear force for 45° from tunnel crown (case 2)

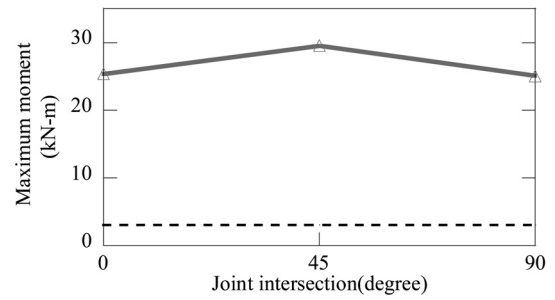


(c) Thrust, moment, and shear force for 90° from tunnel crown (case 3)

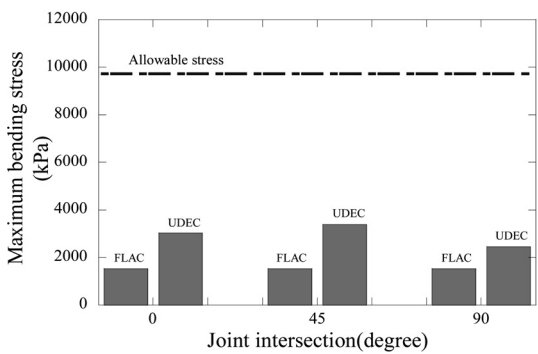
Fig. 9. Effect of location of joint intersection on calculated thrust, moment, and shear force (Case 1~3)



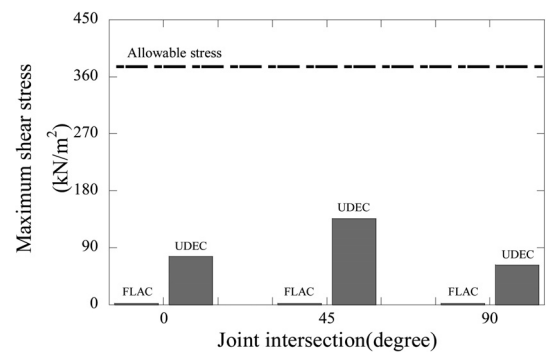
(a) Maximum thrust



(b) Maximum moment



(c) Maximum bending stress



(d) Maximum shear stress

Fig. 10. Effect of location of joint intersection on calculated (a) thrust, (b) moment, (c) bending stress, and (d) shear stress (Case 1~3)

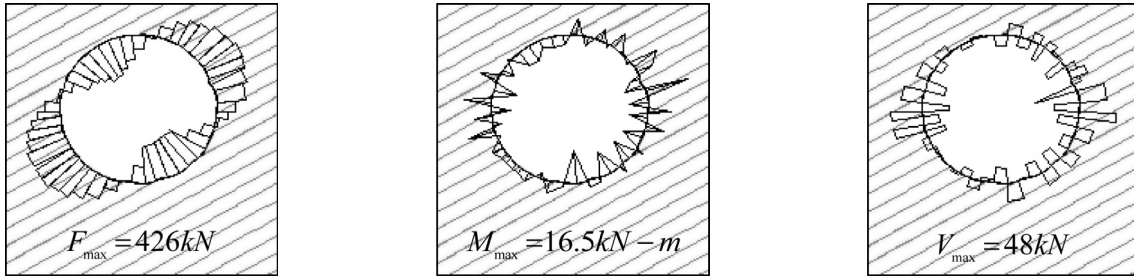


여 발생하는 응력이며 이는 터널링으로 인하여 발생하는 응력에 추가적으로 발생한다는 것이다. 즉, 허용응력보다 작다고 해서 터널의 안전성이 보장되지 않으며 이는 다음 절들에 제시되는 결과에도 동일하게 적용된다.

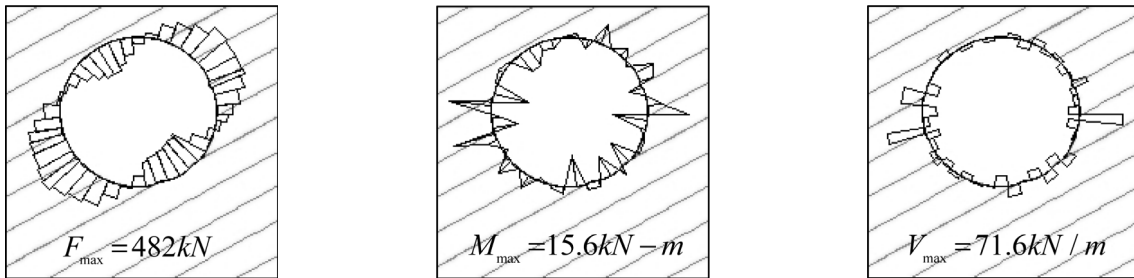
### 3.2 절리의 간격의 영향

절리 간격의 영향을 평가하기 위하여 0.1D(사례 4), 0.2D(사례 5), 0.4D(사례 6) 그리고 1.0D(사례 2), 4가지 간격의 30° 경사 절리를 생성하여 수치해석을 수행하

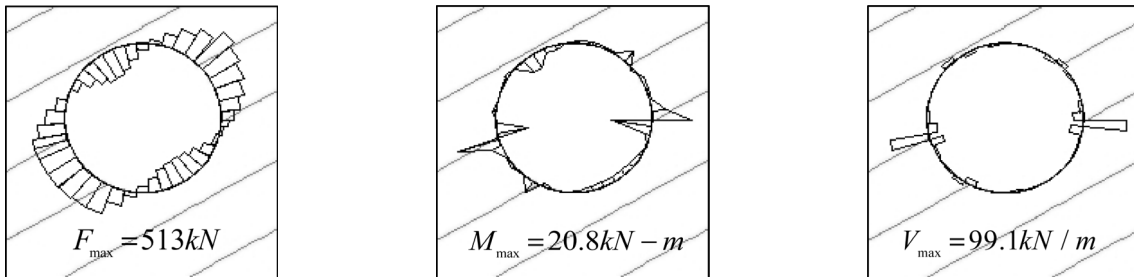
였다. 전절에 기술한 바와 같이 절리와 터널이 접하는 위치에 따라 계산된 응답이 달라지므로 이의 영향을 최소화하기 위해 생성된 절리 1개는 반드시 Fig. 1의 A 점(터널 라이닝 어깨부)을 통과하도록 모델링 하였다. Fig. 11에는 절리의 간격에 따른 터널 라이닝에서의 축력, 모멘트 그리고 전단력의 분포를 도시하였다. 절리 간격이 작을수록 특정 위치에 변형이 집중되지 않아 상대적으로 응답이 작아지는 것으로 나타났다. 축력, 모멘트, 전단력은 절리 간격이 0.1D인 경우에 비하여 0.1D인 경우가 각각 50%, 79% 그리고 183% 가량 크



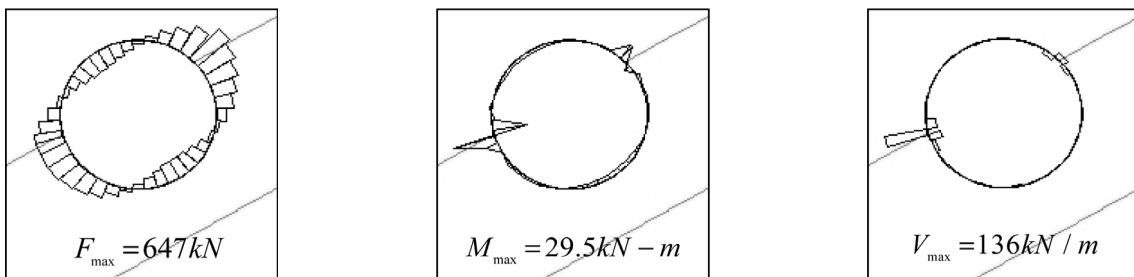
(a) Thrust, moment, and shear force for 0.1D (case 4)



(b) Thrust, moment, and shear force for 0.2D (case 5)



(c) Thrust, moment, and shear force for 0.4D (case 6)



(d) Thrust, moment, and shear force for 1.0D (case 2)

Fig. 11. Effect of joint spacing on calculated thrust, moment, and shear force (Case 2, 4, 5, 6)

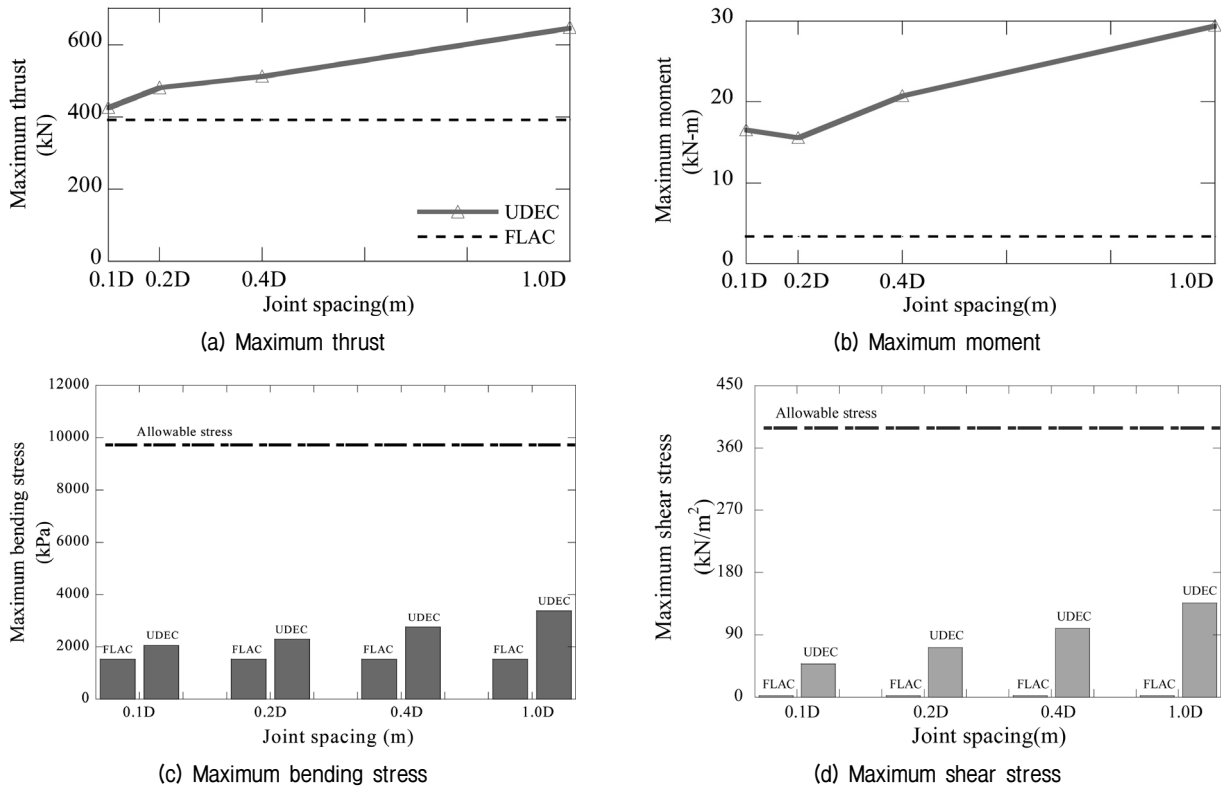


Fig. 12. Effect of joint spacing on calculated (a) thrust, (b) moment, (c) bending stress, and (d) shear stress (Case 2, 4, 5, 6)

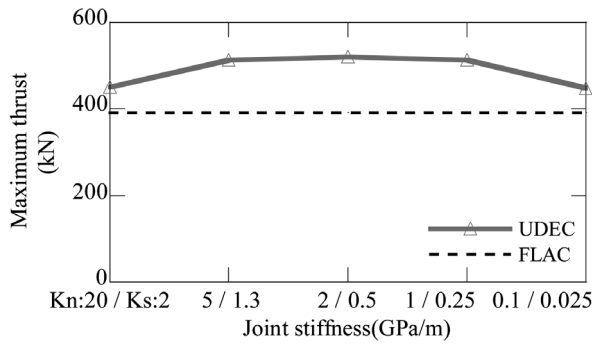
계 계산되었다. 축력 분포 형상은 연속체 해석과 불연속체 해석이 유사한 반면, 모멘트와 전단력은 상이한 것으로 나타났다. 간격이 0.1D - 0.2D일 경우에는 모멘트와 전단력이 비교적 일정하게 분포한 반면 그 이상의 간격에서는 특정 접점에서 응답이 집중되는 것으로 계산되었다.

Fig. 12에는 연속체와 불연속체 해석 결과를 비교하였다. 축력은 간격이 0.1D일 경우 연속체와 거의 동일하며 모멘트는 모든 경우에서 연속체 해석결과보다 크게 계산되었다. 휨응력의 경우 모든 경우에서 불연속체 해석이 크게 계산되지만 허용응력 보다는 현저하게 작은 것으로 나타났으며 절리간격이 0.1D에서 1.0D로 상승함에 따라 휨응력은 64% 증가하였다. 전단응력 또한 불연속체 해석이 연속체 해석 대비 최대 81배 크게 계산되었으나 허용응력보다는 작은 수치를 나타냈다.

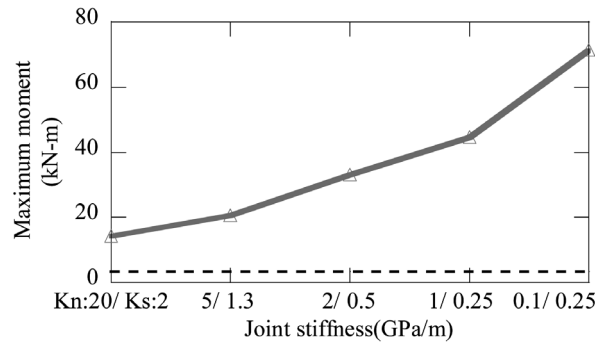
### 3.3 절리 강성 및 강도의 영향

Fig. 13에는 암반 절리의 강성 및 강도의 영향을 연속체 해석과 비교하여 제시하였다(사례 6~10). 당연한 결과지만 절리의 강성 및 강도가 감소할수록 터널

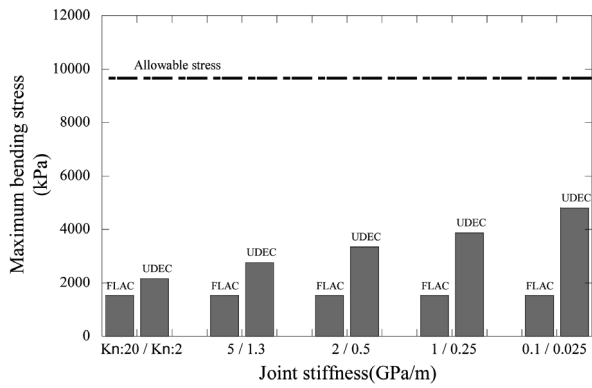
라이닝의 응답은 증가하는 것으로 나타났다. 사암이 풍화되지 않은 상태를 나타내는  $K_n=20\text{GPa/m}$ ,  $K_s=2\text{GPa/m}$ 의 경우 slip을 허용한 연속체 해석 대비 모멘트는 약 4.3배, 전단력은 약 37.5배가 증가하는 모습을 보였다. 이 때, 축력은 모멘트나 전단력에 비하여 절리 강성의 차이로 인한 영향이 적은 것으로 나타났다. 또한 절리가 충전물로 충전되어 있는 상태를 나타내는  $K_n=0.1\text{GPa/m}$ ,  $K_s=0.025\text{GPa/m}$ 의 경우에는 연속체 해석 대비 모멘트는 약 21.3배, 전단력은 약 216배 증가하는 것으로 나타났으며 앞선 경우와 마찬가지로 축력에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 전체적인 경향을 분석해보면 절리의 강성이 커질수록 연속체 해석과 유사한 터널에서의 응답 결과를 보였는데 이는 절리의 강성이 증가함에 따라 암반이 무결암(intact rock)의 특성에 가까워지며 연속체와 유사한 거동을 보이기 때문이다. 반대로 절리의 강성이 감소하게 되면 절리에서 변형이 집중되며 이로 인하여 터널에서의 모멘트 및 전단력, 휨응력은 큰 폭으로 증가하며 특히 전단응력이 현격하게 증가하여 허용전단응력에 매우 근접한 수치를 나타냈다.



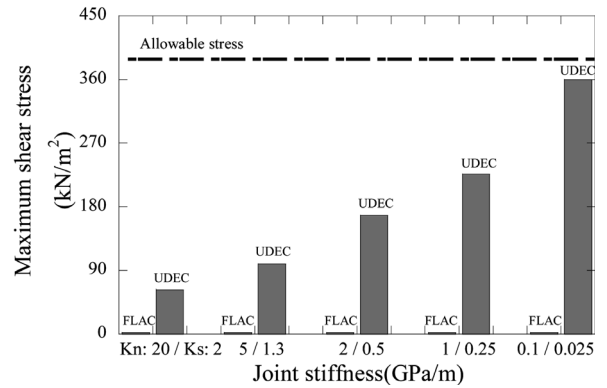
(a) Maximum thrust



(b) Maximum moment

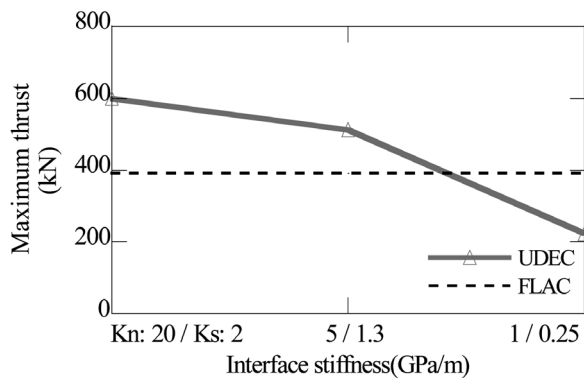


(c) Maximum bending stress

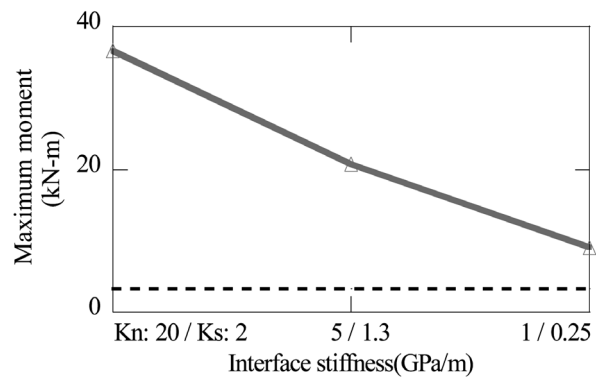


(d) Maximum shear stress

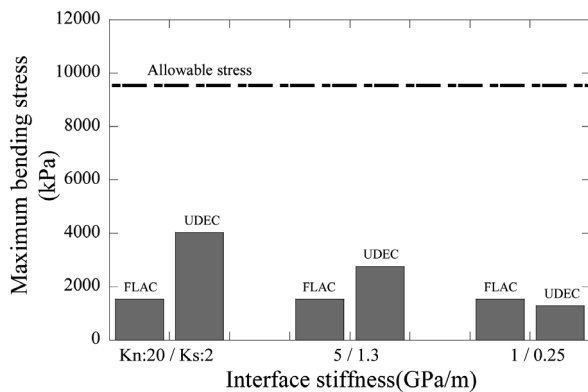
Fig. 13. Effect of joint stiffness on calculated (a) thrust, (b) moment, (c) bending stress, and (d) shear stress (Case 6, 7, 8, 9, 10)



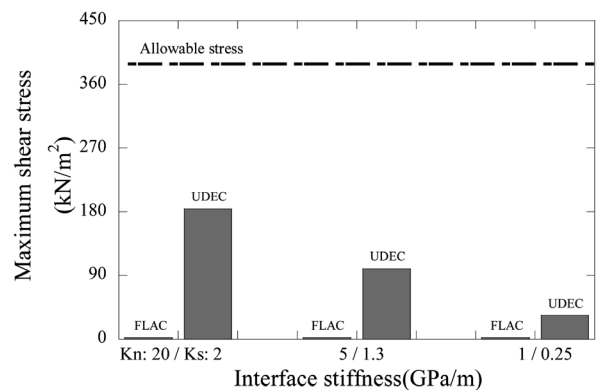
(a) Maximum thrust



(b) Maximum moment



(c) Maximum bending stress



(d) Maximum shear stress

Fig. 14. Effect of interface stiffness on calculated (a) thrust, (b) moment, (c) bending stress, and (d) shear stress (Case 6, 11, 12)

### 3.4 인터페이스 강성의 영향

Fig. 14에는 인터페이스 강성에 따른 최대 축력, 모멘트, 휨응력 그리고 전단응력의 결과를 도시하였다. 기존의 연구(Hashash, 2002; Wang, 1993)에서 full-slip 조건에서는 터널 라이닝의 축력을 과소 예측한다고 제시되었다. 불연속체 해석에서 인터페이스 강성을  $K_n=20\text{GPa/m}$ ,  $K_s=2\text{GPa/m}$ 에서  $K_n=5\text{GPa/m}$ ,  $K_s=1.3\text{GPa/m}$ 로 감소시켰을 시에 축력과 모멘트는 각각 14.5%와 43% 감소하며  $K_n=1\text{GPa/m}$ ,  $K_s=0.25\text{GPa/m}$  적용 시, 축력과 모멘트는 각각 63%와 75% 감소한다. 인터페이스 강성 감소에 따라서 최대휨응력과 전단응력은 각각 약 32%~68% 그리고 46%~81% 감소하는 것으로 계산되었다. 즉, 인터페이스의 강성을 No-slip 조건에 가깝게 크게 적용하는 것은 매우 보수적인 것으로 나타났다.

### 3.5 절리 경사의 영향

절리의 경사의 영향을 평가하기 위해서 경사 각도를  $90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ, 15^\circ, 0^\circ$ 로 변경하여 불연속체 해석을 수행하였다. 불연속면과 터널간의 교차 지점의 영향을 최소화하기 위해 생성된 절리 중 1개는 터널의 우측 어깨부(천단부로부터  $45^\circ$ , Fig. 1의 A 점)를 통과하도록 모델링하였으며 절리의 간격은 기본값인  $0.4D$ 를 적용하였다. Fig. 15에는 절리의 경사에 따른 터널 라이닝에서 계산된 축력, 모멘트, 전단력의 분포를 도시하였다. 결과를 살펴보면 모든 절리 경사에서 터널과 절리의 교차지점에서 모멘트와 전단력이 집중되며 터널 라이닝의 다른 위치에 비해서 큰 응답이 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 16에는 경사별 최대값을 연속체 해석과 비교하였다. 축응력의 경우, 경사의 영향이 제한적이며 모멘트의 경우도 응답이 유사하지만 경사가  $45^\circ$ 인 경우

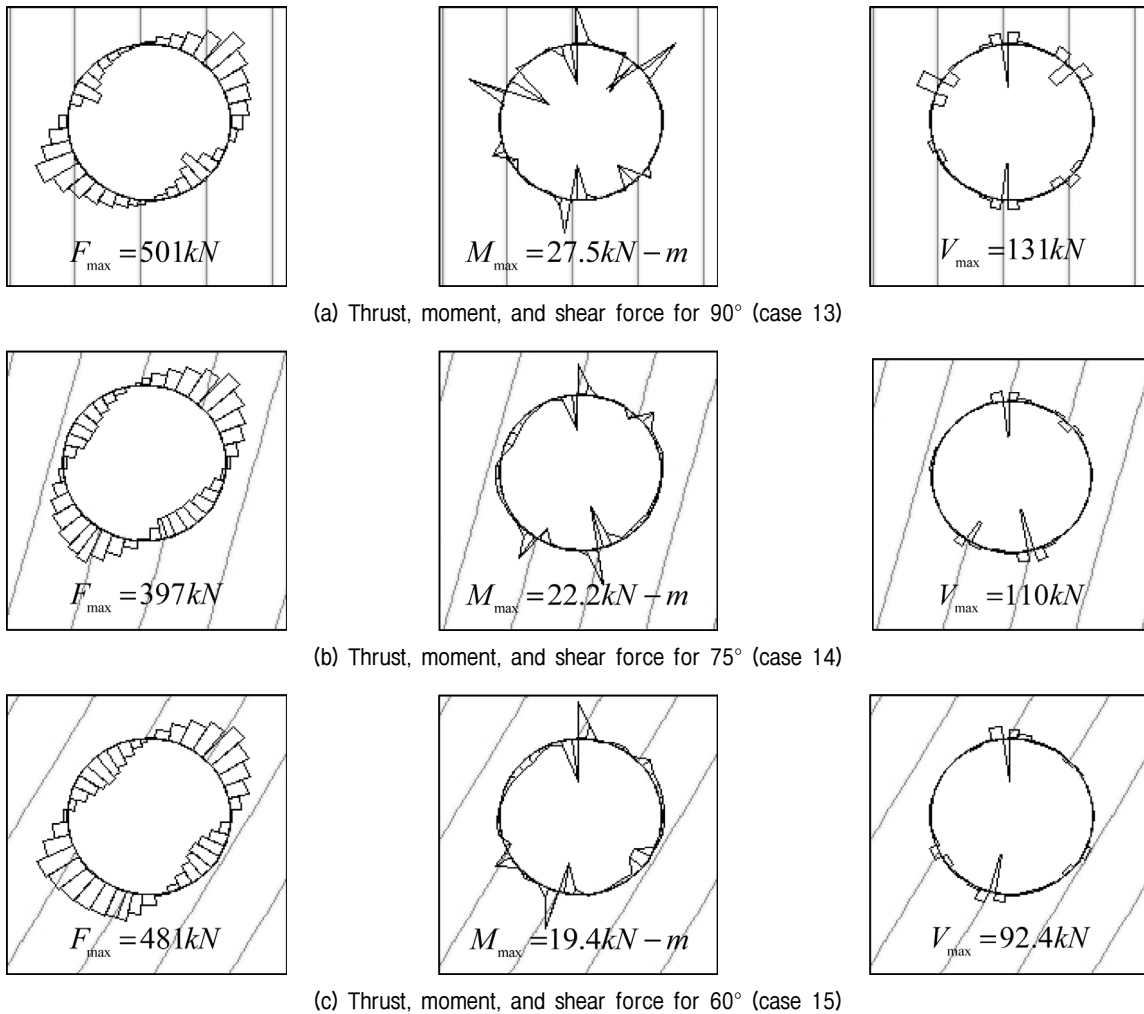
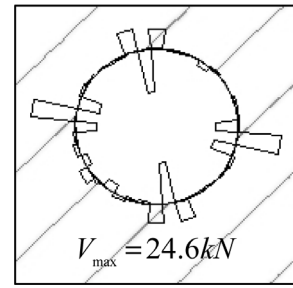
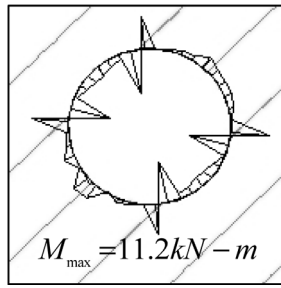
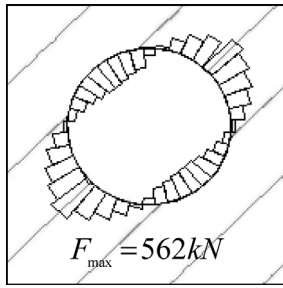
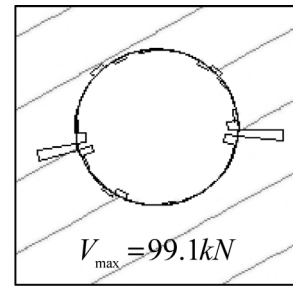
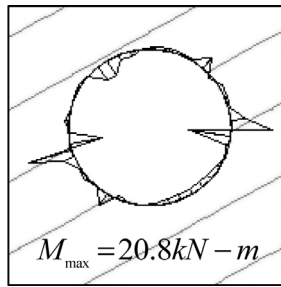
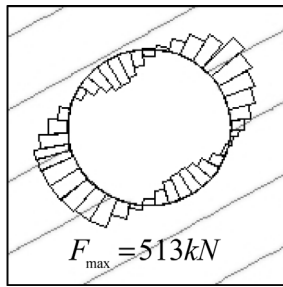


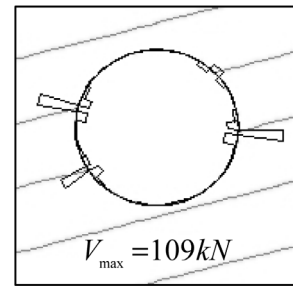
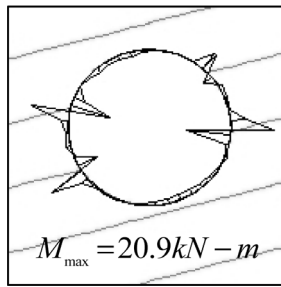
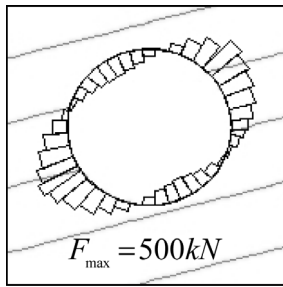
Fig. 15. Effect of joint dip on calculated thrust, moment, and shear stress (Case 6, 13, 14, 15, 16, 17, 18) (Continued)



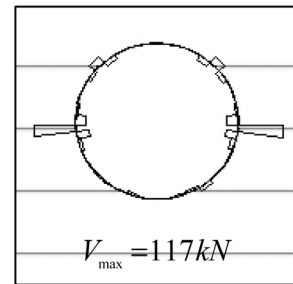
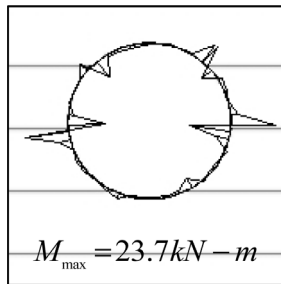
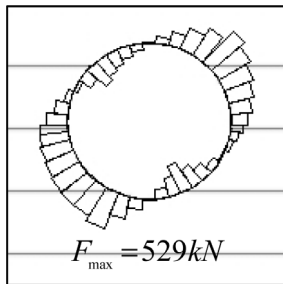
(d) Thrust, moment, and shear force for 45° (case 16)



(e) Thrust, moment, and shear force for 30° (case 6)



(f) Thrust, moment, and shear force for 15° (case 17)



(g) Thrust, moment, and shear force for 0° (case 18)

Fig. 15. Effect of joint dip on calculated thrust, moment, and shear stress (Case 6, 13, 14, 15, 16, 17, 18)

가장 작게 계산되었음을 확인할 수 있다. 최대휨응력은 축응력과 모멘트의 변화가 크지 않으므로 당연히 경사의 영향이 작은 것으로 나타났다. 전단응력의 경우, 모멘트와 유사하게 45°에서의 응답이 다른 각도에 비하여 현저하게 작은 것으로 나타났으며 이는 45°에서 최대전단응력이 작용하는 일반적인 경우와 결과가 상반된다. 이는 지진하중으로 인하여 지반에 발생하는 응력 변화가 타 경우와는 다르기 때문이다. 일반적인 사례에서는 수직 또는 수평방향으로 응력이 증감하며 이 때

주응력면은 회전하지 않거나 90° 회전하게 된다. 하지만 수직방향으로 전파되는 전단파에 의해서 수직응력에는 큰 변화가 발생하지 않지만 수직 및 수평 경계면에 매우 큰 전단응력이 작용하게 된다. 따라서 수직-수평면은 더 이상 주응력면이 아니며 전단응력이 충분히 커지면 이들이 최대전단응력이 작용하는 면이 될 수 있다. 본 연구에서도 큰 전단응력이 경계면에 작용하여 경사 45°의 면이 주응력면이 되었으므로 여기서의 전단응력과 이에 상응하는 전단변형이 최소화되어 응답이 가

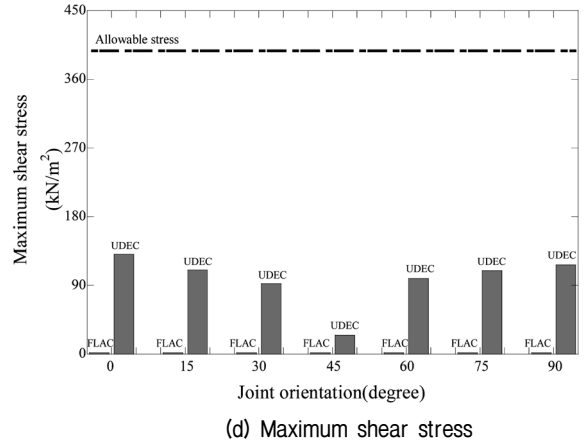
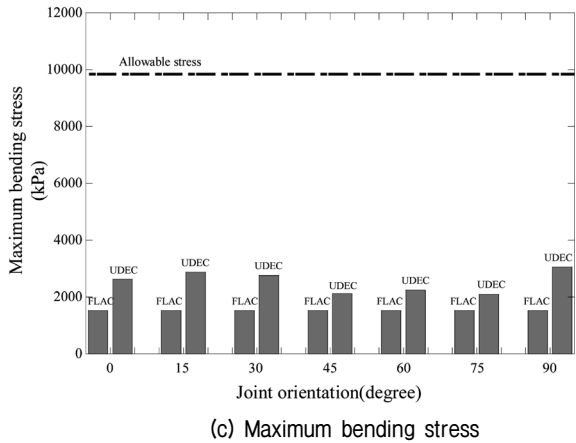
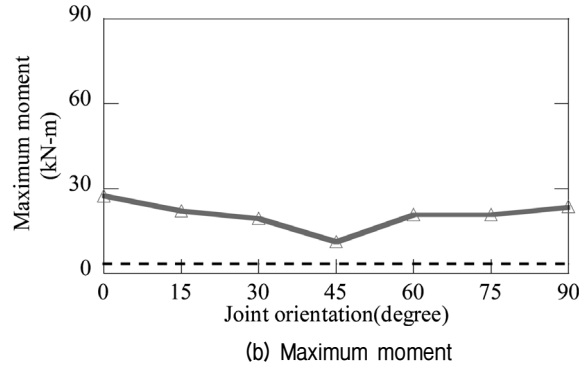
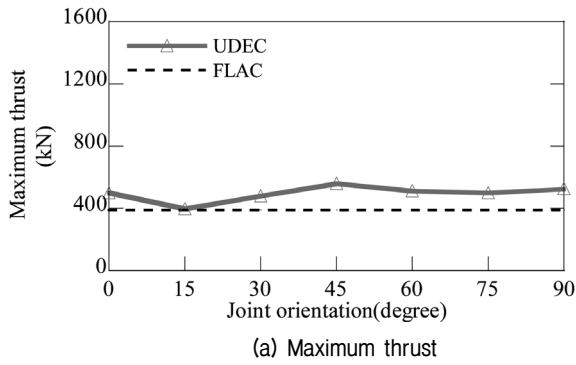


Fig. 16. Effect of joint dip on calculated (a) thrust, (b) moment, (c) bending stress, and (d) shear (Case 6, 13, 14, 15, .016, 17, 18)

장 작게 계산되었다. 즉, 절리의 경사가 확실하지 않을 경우, 이를 45°로 가정하여 불연속체 해석을 수행하는 것은 실제 응답을 크게 과소예측할 수 있으므로 유의하여야 할 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 지진 시 암반의 절리가 터널의 응답에 미치는 영향을 일련의 불연속체 해석을 통하여 규명하였다. 불연속체 해석에는 개별요소법이 적용되었으며 상용 해석 프로그램인 UDEC이 사용되었다. 또한 결과 비교를 위하여 연속체 해석을 수행하였으며 유한차분 해석법이 적용된 FLAC<sup>2D</sup>를 사용하였다. 해석에는 절리와 터널의 교차 위치, 간격, 강성, 인터페이스 강성, 그리고 절리 경사가 영향인자로 고려되었다. 절리에 사용된 물성은 포괄적인 문헌조사를 통하여 적용하였으며 적용된 전단변형률의 크기도 직접 일련의 동적해석을 수행하여 산정하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 해석 결과, 절리의 강성이 터널에 가장 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 절리의 전단강성이 1 GPa/m보다 작을 경우, 터널의 응답에 큰 영향을 미치며 라이닝의 허용응력에 근접하는 큰 수치를 나타낼 수 있으므로 설계 시 이를 평가해야 한다. 또한, 충전된 절리는 지진에 대하여 크게 취약한 것으로 나타났다.
- (2) 절리와 터널이 터널의 어깨부와 교차할 경우가 가장 취약한 것으로 나타났다. 교차 위치는 축력과 모멘트보다 전단력에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (3) 본 연구에서 총 4가지 절리의 간격(0.1D, 0.2D, 0.4D, 1.0D)을 적용하여 이의 영향을 평가한 결과, 절리의 간격이 클수록 응답이 증가하는 것으로 계산되었다. 이는 간격이 클수록 변위가 국부적으로 집중되어 응답이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.
- (4) 절리의 경사는 일반적인 경우와는 상반되게 45°에서 응답이 가장 작게 계산되었다. 이는 전단변형으로 인하여 수직면과 수평면에 큰 전단응력이 작용하여 주응력면이 수직-수평면으로부터 45°-135°면

으로 회전하기 때문인 것으로 판단된다.

- (5) 결과적으로 절리의 경사, 간격, 강성 모두 터널의 응답에 큰 영향을 미치며 특히 간격이 큰 미끈한 절리가 터널을 통과하는 경우가 가장 위험한 것으로 나타났다. 또한 전체적으로 터널 라이닝에 작용하는 휨응력보다는 전단응력이 큰 폭으로 증가하며 경우에 따라서는 허용응력을 초과할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 설계 시 터널 라이닝은 전단응력에 대해서 검토해야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2011년도 한국건설기술연구원의 지원을 받아 수행된 연구(운영 중인 터널의 내진 타당성 검토: No. 2011-000-0000-1762)이며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Amorosi, A. and Boldini, D. (2009), "Numerical modelling of the transverse dynamic behaviour of circular tunnels in clayey soils", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.29, No.6, pp. 1059-1072.
2. Asakura, T. and Sato, Y. (1996), "Damage to mountain tunnels in hazard area", *Soils and foundations*, pp.301-310.
3. Bandis, S., Lumsden, A., and Barton, N. (1983), "Fundamentals of rock joint deformation": Elsevier, 20, pp.249-268.
4. Barton, N. (1976), "The shear strength of rock and rock joints": Elsevier, 13, pp.255-279.
5. Cilingir, U. and Gopal Madabhushi, S. (2010), "A model study on the effects of input motion on the seismic behaviour of tunnels", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
6. Hashash, Y.M.A. (2002), "Seismic design of underground structures: role of numerical modeling", *North American Tunneling*.
7. Hashash, Y.M.A. and Park, D. (2001), "Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment", *Engineering Geology*, Vol.62, No.1-3, pp.185-206.
8. Itasca Consulting Group, I. (2004), *UDEC Universal Distinct Element Code, User's Manual*, Itasca Consulting Group, Inc.
9. Itasca Consulting Group, I. (2008), "FLAC (Fast Lagrangian Analyses of Continua) v. 6.0", *Ontario, Canada*.
10. Kulhawy, F.H. (1975), "Stress deformation properties of rock and rock discontinuities", *Engineering Geology*, Vol.9, No.4, pp.327-350.
11. MOCT (2010), *The Revision of the Road-Design Guideline (The Chapter of Tunnel)*. Ministry of Construction and Transportation, pp.607-15~607-18.
12. Schnabel, P.B., Lysmer, J.L., and Seed, H.B. (1972), *SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*, EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA.
13. Sedarat, H., Kozak, A., Hashash, Y., Shamsabadi, A., and Krimotat, A. (2009), "Contact interface in seismic analysis of circular tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.24, No.4, pp.482-490.
14. Seed, H.B., Idriss, I., Shannon, Wilson, and Associates, A.-J. (1970), "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses".
15. Wang, J. (1993), "Seismic design of tunnels: a state-of-the-art approach, Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas", *Inc., New York, NY, Monograph*, Vol.7.

Received : August 11<sup>th</sup>, 2014

Revised : September 18<sup>th</sup>, 2014

Accepted : September 19<sup>th</sup>, 2014