

## 절리의 방향성을 고려한 암반의 동적거동 수치해석

하태욱<sup>1)\*</sup>, 양형식<sup>2)</sup>

### A Numerical Analysis of Dynamic Behavior of Rock Mass with Intense Discontinuities

Tae-Wook Ha and Hyung-Sik Yang

**Abstract** Dynamic behavior of rock structures depends largely on the dynamic characteristics of ground and input earthquake wave. For blocky rocks with intense discontinuities, the mechanical characteristics of blocks and structural and mechanical characteristics of discontinuities affect overall behavior. In this study, UDEC was adopted to evaluate the dynamic behavior of rocks with various structural characteristics. Obtained results were compared to those of FLAC<sup>2D</sup>, a continuum analysis, and the validity of the method was examined for dynamic analysis of discontinuous rocks for earthquake. Analysis considering the discontinuity showed significant changes in structural shape by the influence of joint behavior, and the behavior by continuum analysis was overestimated.

**Key words** Discontinuity, Earthquake, Dynamic behavior, UDEC, FLAC<sup>2D</sup>

**초 록** 암반구조물의 동적 거동은 구조물이 위치하는 동적 물성과 입력지진파의 특성에 따라 크게 다르며, 절리 군이 발달한 암반은 블록의 역학적 특성과 함께 불연속면의 구조적, 역학적 특성에 따라 다르다. 본 연구에서는 불연속체 해석 기법인 UDEC을 이용하여 지하구조물 주변에 발달한 불연속체의 구조적인 특징에 따라 변화하는 암반의 동적 거동을 평가하고, 이를 연속체 해석 기법인 FLAC<sup>2D</sup>의 결과와 비교를 통해 절리 암반의 지진에 대한 동적 거동의 타당성을 비교 검토하였다. 그 결과, 불연속체가 고려된 해석 결과는 절리의 거동에 의한 영향으로 구조적인 형상에 따른 변화가 나타났으며, 연속체 해석 결과는 불연속체 해석 결과에 비해 과다 평가되는 것으로 나타났다.

**핵심어** 불연속성, 지진, 동적 거동, UDEC, FLAC<sup>2D</sup>

## 1. 서 론

최근 국내외에 대규모 지진의 빈번한 발생으로 인해 지상 구조물의 지진에 대한 안정성과 함께 지하구조물에 대한 안정성도 관심이 대두되고 있다. 하지만 이전의 지진에 대한 안정성 평가 경향은 주로 지상 구조물에 대한 안정성 평가나 천부 지하 구조물의 동적 하중에 대한 안정성 평가가 주를 이루었다.

이러한 지상 및 천부 구조물들은 구조물 주변 지반의 연속체적인 거동 특성에 의하여, 동적 응답 거동 역시 연속체적인 방법이 주를 이루고 있다. 현재 수행되고 있는

지진에 대한 안정성 평가 방법들은 등가정적해석법이나 응답스펙트럼법에 의한 지반의 연속적인 응답 거동의 평가, 액상화 또는 SSI(soil-structure interaction) 등 지상 구조물의 동적 하중에 대한 안정성 평가, 유사정적 해석에 의한 사면이나 옹벽에 작용하는 토압을 계산하여 지상구조물의 안정성을 평가하는 등 주로 지상 구조물에 대한 동적 거동 평가가 주를 이루고 있으며, 상기 방법들은 지반을 연속체적인 개념으로 평가를 하는 일반적인 방법이다.

하지만 불연속면을 다수 포함하는 암반구조물의 경우, 동적뿐만 아니라 정적 상태에서의 구조물의 거동 특성 및 파괴 양상은 구조물 주변에 발달한 불연속면에 의해 크게 좌우되는 특성이 있어, 불연속체에 대한 고려가 필수적이다. 또한 현재 LPG 저장 창고나 유류비축기지 또는 도로 터널 등 반영구적인 지하 구조물들의 구축으로

<sup>1)</sup> 전남대학교 대학원 박사과정

<sup>2)</sup> 전남대학교 건설지구환경공학과 교수

\* 교신저자 : htw8646@nate.com

접수일 : 2006년 8월 8일

심사 완료일 : 2006년 10월 23일

인해 이들의 동적 하중에 대한 안정성 확보가 중요시 되고 있으며, 이에 따라 지상구조물 뿐만 아니라 지하구조물의 동적 거동 평가에 대한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 불연속면이 존재하는 암반 내의 원형 터널 구조물에 대해 불연속면의 구조적인 변화에 따른 터널 구조물의 거동 및 지보재의 지보력을 평가함으로써, 암반 구조물 주변 불연속면의 구조적인 특징에 따른 거동 특성을 수치해석을 통해 평가하였다. 또한 연속체 해석 결과와 비교를 통해 불연속체를 고려한 동적 평가가 어떤 차이를 나타내는지를 평가하였다.

## 2. 기존 연구 사례 검토

지하 구조물에 대한 동적 거동 연구는 토사층 내에 존재하는 천부 구조물에 대한 연구가 주를 이루어 활발히 진행되었다. 1973년 Okamoto 등은 천부 구조물의 대부분은 구조물의 질량보다 주변 지반의 거동에 더 큰 영향을 받는 것을 검증함으로써(Okamoto 등, 1973), 지하구조물에 대한 동적거동 평가는 지반의 거동과 구조물의 상호 작용에 대해 연구가 활발히 진행되었다. 이후 Constantopoulos 등은 지반-구조물 상호작용을 고려한 터널의 휨응력과 축방향 응력을 해석적으로 산정하였고(Constantopoulos 등, 1979), Goto 등에 의한 지하 공동의 동적 상호작용 효과를 고려한 유한요소-경계요소의 조합해석(Goto 등, 1985)을 수행하였으며, Xuehui 등은 지하 박스 구조물의 실제 지진 피해 사례를 유한요소해석을 통해 분석하는 등(Xuehui 등, 1997) 수치해석을 통한 지반-구조물 상호작용이 고려된 지진 예측의 연구가 수행되었다. 또한 Monsees 등에 의해 터널의 내진설계 기준 수립을 위한 동하중을 정하중으로 바꾸어 수행하는 기법이 제안되는 등(Monsees 등, 1988), 현재까지 천부 지하 구조물에 대한 연속체적인 접근 방법에 있어서 수치해석 및 기타 지진에 대한 해석방법에 있어 많은 연구가 수행되고 있다(윤종구 등, 2003, 김명철 등, 2004).

이후 국내 터널의 내진설계는 굴착 시공에 의한 터널에 대해서는 내진설계를 수행하지 않는 것을 원칙으로 하며, 내진 설계 수행 시 응답면위법과 선형 및 비선형 응답해석법을 적용하도록 규정하고 있다(사)대한터널협회, 1999).

암반 내에 존재하는 불연속면은 반복 하중에 대해 반복 회수와 재하되는 하중에 의해 비선형적인 거동을 나타내지만(이희석, 1999), 지진에 대한 안정성 해석 시 암반 불연속면이 고려된 연구는 상대적으로 미비하다. Meyer 등은 탄성파의 전달 과정에 있어 단일 절리의 역학적 및 구조적 특성에 따른 영향을 규명하였고(Meyer 등, 1990), Lemo는 동적 하중에 대한 불연속면의 특성과 지상 구조

물에 대한 불연속면의 영향을 평가하였다(Lemo, 1987). 그 이후 절리군이 발달한 암반의 동적 안정성 평가는 물리탐사와 수치해석을 병행하여 지하 저장소의 동적 거동을 평가 후 저장소 주변의 파괴 양상을 예측하거나(Zhao 등, 1999), 불연속면이 발달한 대규모 지하 공동 주변의 동적 파괴 양상을 예측한 연구 사례들이 발표되었다(Chryssanthakis 등, 1997). 또한 Wang 등은 1999년 타이완에 발생한 Chi-Chi 지진에 의한 터널이 붕괴 양상을 정리함으로써, 불연속체가 존재하는 암반 내의 터널 구조물의 파괴 양상을 분류하여 지진 발생시 암반 불연속면에 의한 파괴를 규명하였다.

실제 암반 내 구조물에 대한 불연속면의 영향을 평가한 연구 결과는 암반 구조물 천단 및 측벽에 불연속면에 의해 생성된 키블록들의 박탈 등 구조물의 파괴가 나타남으로써, 동적 하중에 대한 구조물의 안정성에 불연속면의 영향이 미침을 알 수 있다.

## 3. 수치해석

### 3.1. 해석 모델

수치해석에 사용된 구성모델은 Mohr-Coulomb 모델이 적용되었다. Mohr-Coulomb 모델은 암반의 비선형적 거동을 정확히 모사할 수 없다는 단점이 있지만, 역학적 변수의 산정이 용이하고, 비교적 간편하게 암반의 거동을 평가할 수 있다는 장점이 있다. UDEC에 적용된 암반의 물성은 실험실 실험 결과가 그대로 사용되었으며, UDEC과의 비교를 위한 FLAC model에 사용된 물성 역시 실험실 실험 결과가 이용되었다. 절리군이 포함된 UDEC 모델과 비교를 위한 FLAC 모델에서는 현지 암반 조건에 맞도록 수정된 물성이 이용되었다. 탄성계수는 Bieniawski(식 1)에 의해, 점착력과 내부마찰각은 Trueman(식 2, 3)에 의해 보정된 값을 사용하였다. 본 해석에 적용된 암반 물성을 표 1에 나타내었다.

$$E_{rm} = 2(RMR) - 100 \text{ (GPa)} \quad (1)$$

$$C_{rm} = 0.25 \exp(0.05RMR) \text{ (MPa)} \quad (2)$$

$$\Phi_{rm} = 0.5RMR + 5 \text{ (degree)} \quad (3)$$

본 해석에 사용된 절리 모델은 Coulomb Slip Model을 사용하였으며, 적용된 물성은 표 2에 정리하였다. Coulomb Slip Model은 Barton-Bandis Model에 비하여 불연속면의 거동을 실제 암반 불연속면의 거동 특성을 유사하게 나타내지 못하는 단점이 있다. 하지만, Barton-Bandis 모델은 입력변수에 민감한 단점이 있고, 불연속면의 구조적인 변화에 의한 암반 구조물의 거동 특성을 평가하기 위해서는 역학적인 특성 변화에도 동일 거동

표 1. 수치해석에 사용된 암반의 입력물성

Property	Unit	Value	
Density	ton/m <sup>3</sup>	2.6	
RMR		60	
Intact Rock	E	kgf/cm <sup>2</sup>	4.1e5
	v		0.21
	c	kgf/cm <sup>2</sup>	84.0
	Φ	degree	47.0
Rock mass	σt	kgf/cm <sup>2</sup>	48.0
	Em	kgf/cm <sup>2</sup>	2.0e5
cm	kgf/cm <sup>2</sup>	51.2	

표 2. 수치해석에 사용된 절리의 입력물성

Property	Units	Value
Jkn	MPa/m	4,263.0
Jks	MPa/m	735.0
Jcohesion	MPa	0.1
Jtension	MPa	4.7
Jfriction	degree	26.9

특성을 나타내어야 하므로, 역학적인 면에서 상대적으로 안정한 Coulomb Slip 모델을 적용하였다.

수치해석을 위한 암반의 영역은 횡방향 및 연직방향의 길이가 각각 50 m씩의 정방형 모델을 모사하였다. 암반 내 구조물은 모델의 중심에 반경 4 m의 원형공동으로 가정하였고, 구조물의 위치는 해석 모델의 중앙에 위치하도록 모델링하였다. 원형 구조물에는 각각 10 cm 두께의 빔요소를 적용하여 슛크리트 지보를 모사하였으며, 지보재 요소는 탄성체로 가정하였다.

그림 1과 그림 2는 연속체 및 불연속체 해석을 위한 대표모델이다. 암반의 동적 응답 거동에 불연속면이 작용하는 영향을 평가하고자 불연속면은 단일 절리와 하나의 절리군이 존재하는 것으로 가정하였다. 절리의 경사는 단일 절리와 절리군 모두 0°, 30°, 45°, 60°, 90°의 다섯 가지의 경우를 고려하였으며, 절리군을 모사하는 경우는 절리간격을 5 m로 일정한 값을 사용하였다.

### 3.2. 입력지진파

1997년 건설교통부에서 발간한 내진설계기준연구(II)에서는 설계지반운동수준의 결정을 위해 지반의 종류를 전단파 전달 속도를 기준으로 표 3과 같이 6등급으로 분류하였다(건교부, 2000). 또한 국내의 각 지역을 지진재해도에 따라 표 4와 같이 두가지의 지진구역으로 분류하였으며, 구조물의 중요도에 따라 지진 재해에 저항할 수 있는 수준을 기능 수행 수준과 붕괴 방지 수준으로 구분하였고 등급별 내진성능목표는 표 5, 각 수준별 설계거동 한계는 표 6과 같다. 이때 보통암 지반인 S<sub>B</sub> 지역의 지표면에서의 최대지진지반가속도의 크기는

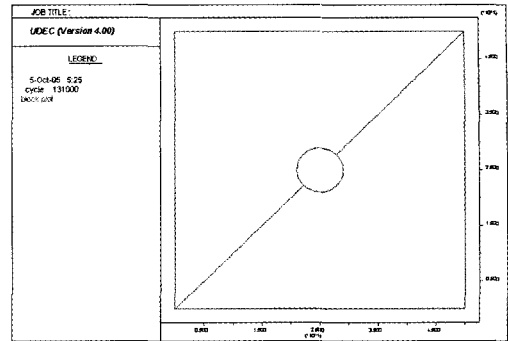


그림 1. 불연속체 시간 이력해석을 위한 대표 모델(경사 45°의 경우)

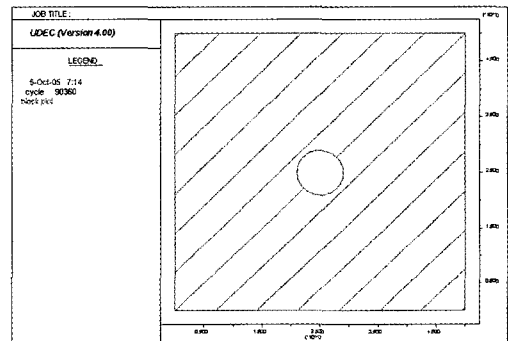


그림 2. 연속체 시간이력 해석을 위한 대표 모델

식 (4)와 같이 가속도계수(A)에 중력가속도(g)를 곱한 값과 같으며, 가속도계수(A)는 구역계수(Z)에 지진위험도계수(I)를 곱한 값으로 표현이 가능하다.

$$A = Z \times I \tag{4}$$

본 연구에서 사용된 입력지진파는 1940년에 멕시코 El Centro 지방에서 발생한 El Centro 지진에 대한 최대지진가속도를 사용하였다. 구조물의 위치는 서울 근교의 1구역에 속하는 지역에 존재하며, 내진성능 목표

표 3. 내진설계기준연구(II)에 따른 지반 분류

지반 종류	지반종류의 호칭	상부 30.480 m에 대한 평균 지반 특성		
		전단파 속도 (m / sec)	표준관입시험 N (blow / foot)	비배수 전단강도 (kPa)
S <sub>A</sub>	경암 지반	1500 초과	-	-
S <sub>B</sub>	보통암 지반	760에서 1500		
S <sub>C</sub>	매우 조밀한 토사지반 또는 연암 지반	360에서 760	> 50	> 100
S <sub>D</sub>	단단한 토사 지반	180에서 360	15~50	50~100
S <sub>E</sub>	연약한 토사지반	180 미만	< 15	< 50
S <sub>F</sub>	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

표 4. 지진 구역 구분

지진구역	지진구역계수 (Z)	행정구역	
I	0.11	시	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시
		도	경기도, 강원도 남부, 충청북도, 충청남도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부
II	0.07	도	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도

표 5. 등급별 내진 성능 목표

등급	내진 성능 목표
기능수행 수준	구조물에 심각한 구조적 손상이 발생하지 않고 지진시나 지진 경과 후에도 시설과 구조물의 기능은 정상적으로 유지할 수 있는 수준
붕괴방지 수준	구조물에 제한적인 구조적 피해는 발생하나 긴급보수를 통해 단기간에 시설로서 역할을 할 수 있는 수준

표 6. 각 내진성능 목표에 따른 위험도 계수

설계지진	성능수준	기능수행수준	붕괴방지수준	위험도계수(I)
	재현주기			
	50년	II등급	-	0.4
	100년	I등급	-	0.57
	200년	특등급	-	0.73
	500년	-	II등급	1
	1000년	-	I등급	1.4
	2400년	-	특등급	2

는 재현주기 1000년의 붕괴방지수준의 구조물으로써, 보통암 노두의 최대지진지반가속도는 0.154 g로 설정하였다. 모델에 적용된 감쇠비는 5%로 일률적인 감쇠비가 적용되었다. 그림 3은 본 연구에서 사용된 지진파의 최대지진지반가속도와 주파수 특성을 나타낸 것이다.

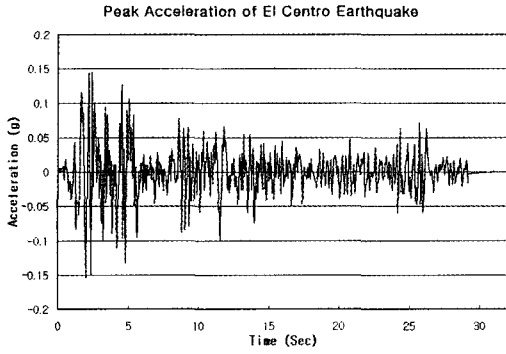
#### 4. 결과 및 고찰

그림 4와 같이 경계조건 및 하중 조건이 설정된 해석

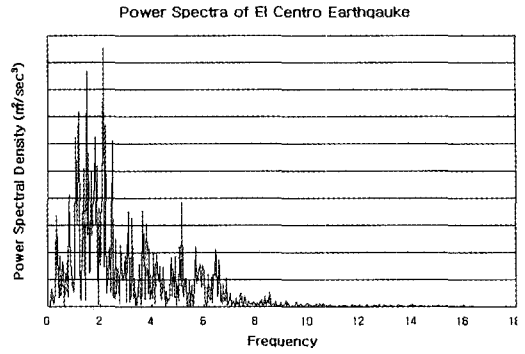
모델에서의 지진에 대한 불연속면의 영향을 평가하기 위해 암반 내의 각 지점에서의 변위 발생량과 터널 주변의 변위 및 지보재의 지보력을 고찰하였다. 지반의 변위는 그림 4에서 모델 중심을 기준으로 좌측 하단 및 지표, 우측 하단에서의 수평변위를 살펴보았다.

각 측정에서의 시간 이력에 따른 수평변위를 살펴보면 그림 5와 같다.

모델 좌측 하부(측점 1)에 발생하는 수평변위의 양상은 연속체 해석 및 불연속체의 해석 결과가 거의 유사



(a) El Centro 지진의 가속도 이력 곡선



(b) El Centro 지진의 FFT 결과

그림 3. 규모가 보정된 입력 지진 하중

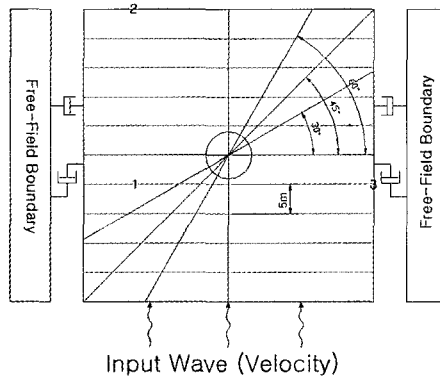
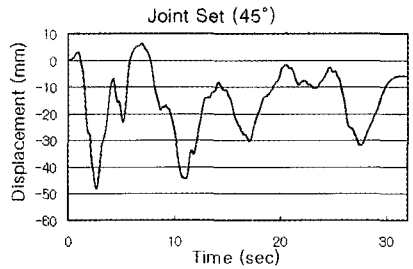
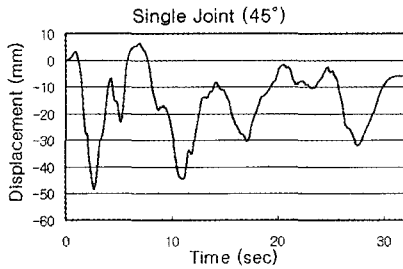
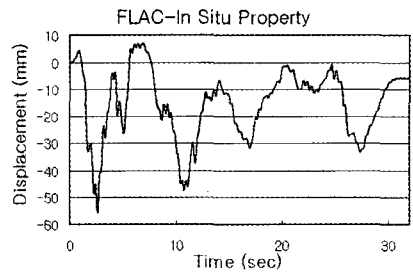
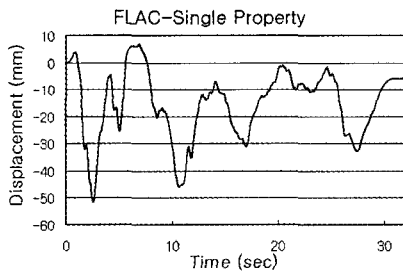
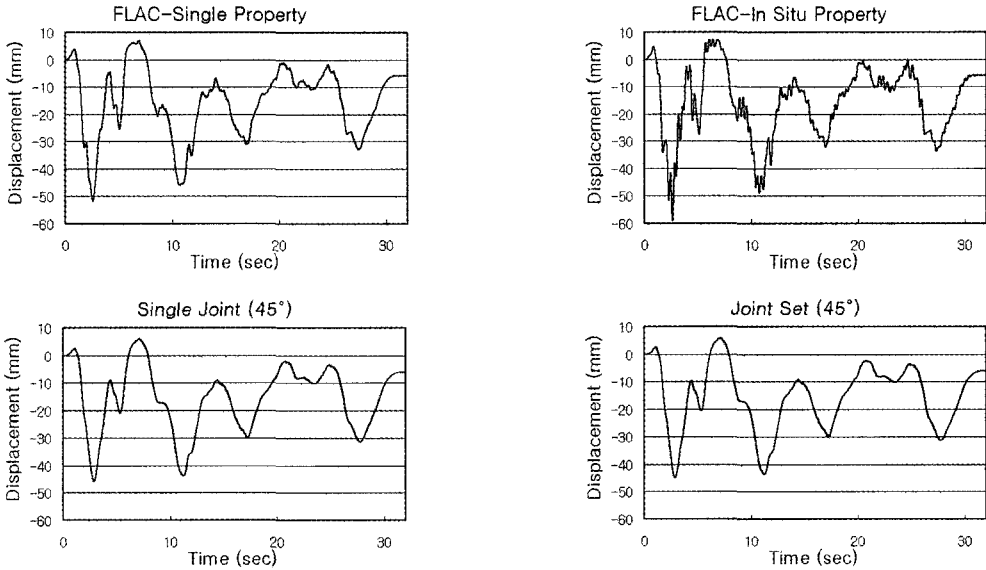


그림 4. 수치해석에 설정된 경계조건

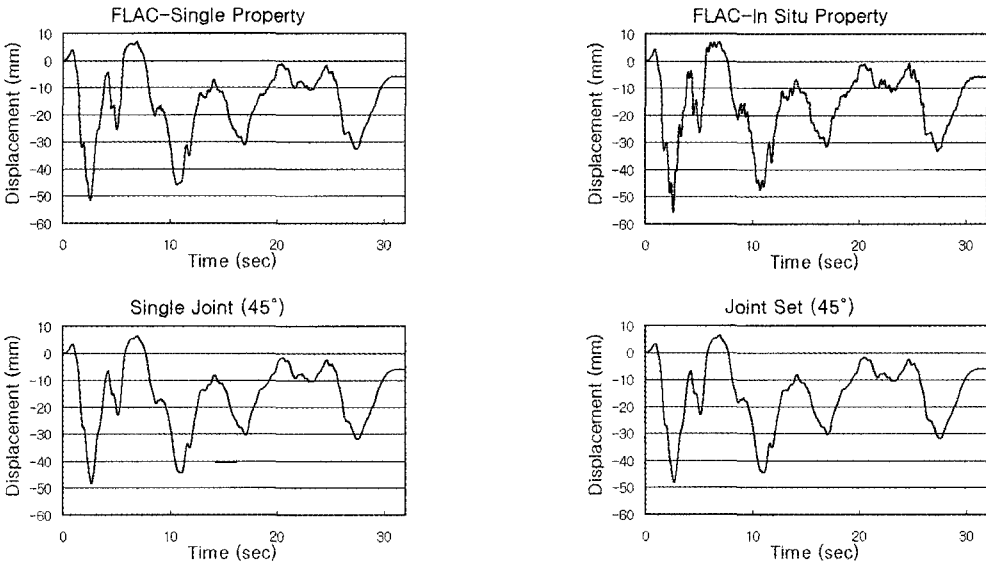


(a) 축점 1에서의 각 조건별 변위 이력 곡선 (절리 경사 45°인 경우)

그림 5. 각 축점별 변위 이력 곡선 (계속)



(b) 측정 2에서의 각 조건별 변위 이력 곡선 (절리 경사 45°인 경우)



(c) 측정 3에서의 각 조건별 변위 이력 곡선 (절리 경사 45°인 경우)

그림 5. 각 측정별 변위 이력 곡선

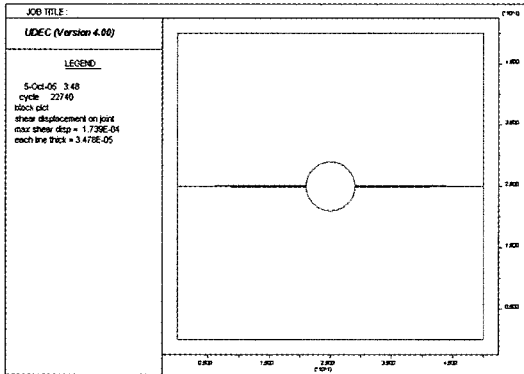
하다. 단, 현지 암반 상태를 고려한 물성을 적용하는 경우, 강성의 변화로 인한 지반의 동적 응답이 다소 크게 발생하였다. 하지만 지표면(측점 2)에서는 연속체 해석에 의한 결과는 변위 발생 경향이 다소 증가를 하는 반면, 불연속체 해석 결과는 모든 경우에 지표면의 변위가 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 동적하중에 의해

불연속면의 변형이 발생하며 동적 에너지의 감소가 이루어지기 때문으로 사료된다. 또한, 동일 심도에서의 절리의 영향은 불연속면의 존재 유무에 따라 매우 작은 값의 변화가 발생하였다.

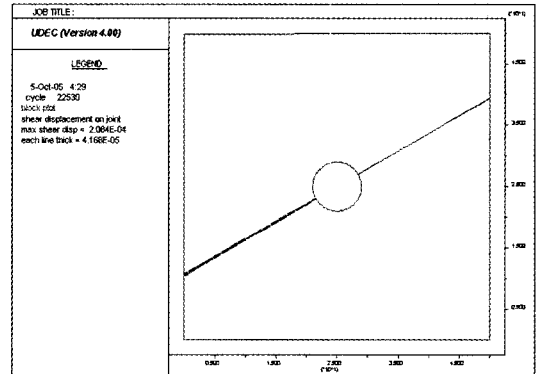
최대 수평변위의 발생 시간은 절리의 경사에 따라 다소 차이가 있으나 블록에서 나타나는 최대 변위 발생

시간과 질리의 최대 전단변위 발생 시간에 차이가 발생한다. 암반 블록에서는 연속체 및 불연속체 모두 약 2.6 초 정도에서 최대 수평 변위가 발생하나 불연속면의 최대 전단 변위는 약 3~4초에서 발생하였다. 이는 불연속면의 동하중 응답에 대한 비선형성에 기인한 것이며,

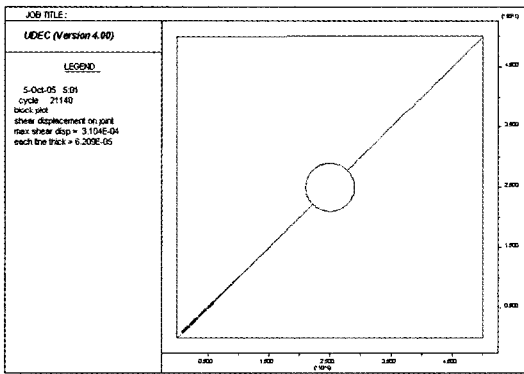
지진 동하중의 수평 방향 거동에 의해 연속체에서는 전단변형률에 의한 수평변위가 주로 발생하나, 불연속면은 구조적인 특성에 따라 수직 및 전단 변위가 동시에 발생하기 때문이다. 그림 6은 불연속체 해석 시 각 Case 별 최대 질리전단변위 발생 결과를 나타낸 그림이다.



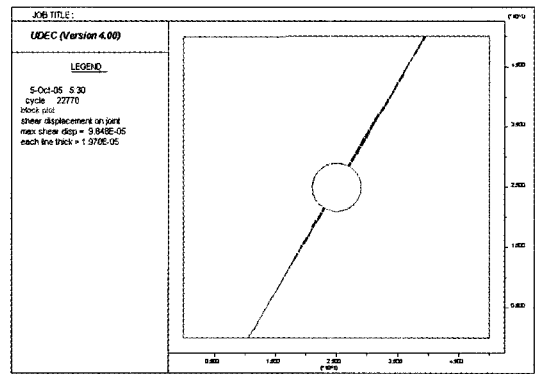
(a) 4sec



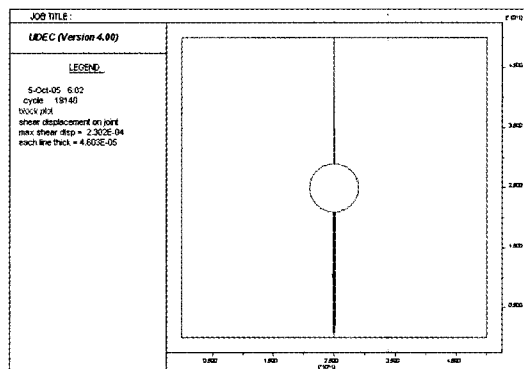
(b) 4sec



(c) 4sec

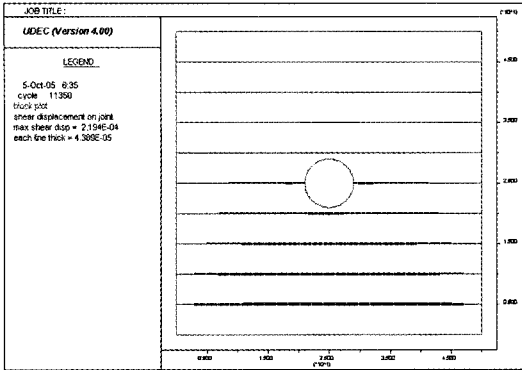


(d) 4sec

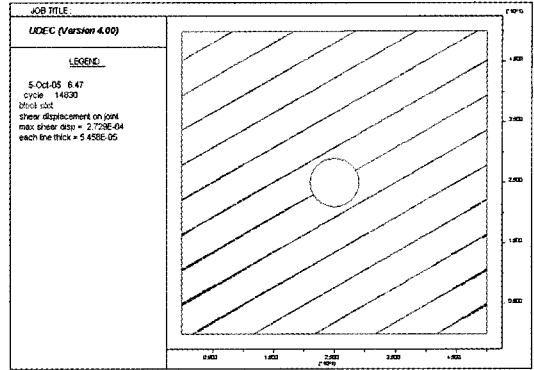


(e) 3sec

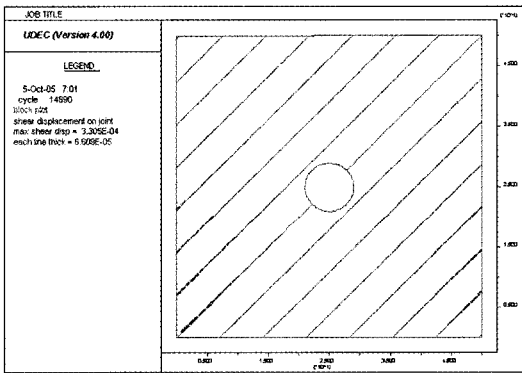
그림 6. 불연속체 해석 시 최대 질리 전단 변위 결과 (계속)



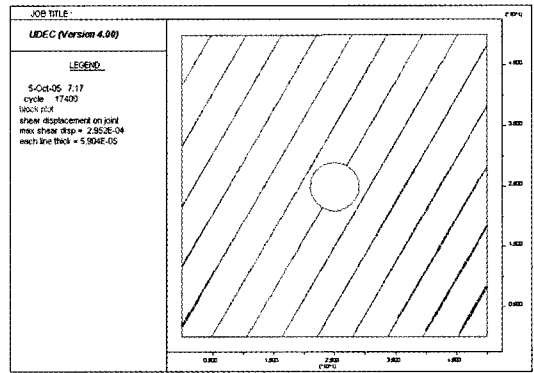
(f) 3sec



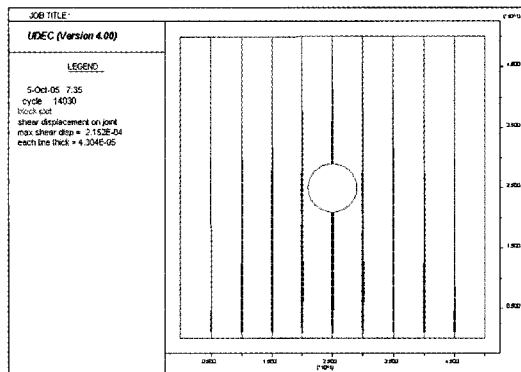
(g) 4sec



(h) 4sec



(i) 4sec



(a) 4sec

그림 6. 불연속체 해석 시 최대 절리 전단 변위 결과

표 7과 표 8은 원형 터널 주변의 각 위치별 최대 수평변위 발생량을 나타낸 것이고, <그림 7>은 각 위치별 최대 수평변위를 도시한 그래프이다. 단일절리 생성 시 터널 내의 각 위치별 최대수평변위는 절리의 경사에 다소 차이가 있기는 하지만 거의 유사한 발생 경향을 나

타내었다. 그러나 절리군이 모사된 경우에 있어서는 경사별에 따라 상대적으로 큰 변화를 보이며, 특히 천단부의 수평변위는 절리 경사가 30~60° 사이의 구조물에 다소 불리한 방향으로 불연속면이 존재하는 경우에 있어 그 변화정도가 그렇지 못한 경우에 비해 크다는



표 7. 단일 절리 고려 시 변위 (mm)

위치	천단	우측 어깨	우측벽	우측 하부	바닥	좌측 하부	좌측벽	좌측 어깨
FLAC-Single	51.72	51.72	51.69	51.67	51.66	51.67	51.69	51.72
UDEC-S00	46.99	47.15	47.74	48.44	48.74	48.46	47.69	47.16
UDEC-S30	47.01	47.18	47.72	48.42	48.73	48.44	47.71	47.18
UDEC-S45	46.95	47.14	47.68	48.37	48.69	48.34	47.67	47.14
UDEC-S60	47.21	47.39	47.88	48.51	48.81	48.52	47.95	47.39
UDEC-S90	47.04	47.22	47.75	48.39	48.66	48.40	47.77	47.22

표 8. 절리군 고려 시 변위 (mm)

위치	천단	우측 어깨	우측벽	우측 하부	바닥	좌측 하부	좌측벽	좌측 어깨
FLAC-JSET	57.83	57.64	56.76	55.83	55.60	55.83	56.76	57.64
UDEC-JS00	46.13	46.33	46.98	47.69	48.02	47.71	47.00	46.34
UDEC-JS30	46.53	46.74	47.39	48.10	48.45	48.14	47.34	46.74
UDEC-JS45	46.61	46.85	47.48	48.23	48.57	48.19	47.44	46.82
UDEC-JS60	46.78	46.95	47.49	48.16	48.54	48.27	47.58	47.01
UDEC-JS90	46.30	46.50	47.10	47.82	48.17	47.85	47.12	46.51

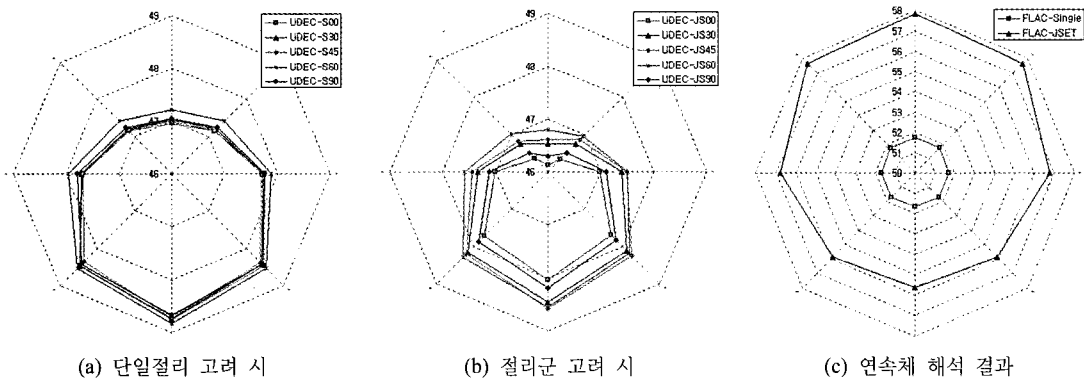


그림 7. 원형 터널 내의 수평 변위

것을 알 수 있다. 또한 연속체 해석 결과와 비교하면, 연속체의 경우는 두 Case 모두 터널 내의 각 지점에서 방사형의 유사한 결과가 나타났으나 불연속체 해석 결과는 천단부 및 어깨부와 바닥부의 변위 차이가 나타나 불연속면이 구조물에 의한 자유면과 접하는 경우 그 영향도도가 크다는 것을 확인할 수 있다.

표 9과 10은 연속체 해석 및 불연속체 해석 모델에 대한 지보재의 요소 위치와 발생 최대 힘압축응력을 나타낸 것이다. 슛크리트의 최대 힘압축응력은 모든 Case에서 측벽부 부근에 최대 힘압축응력이 발생하였다. 이는 지진동하중에 의한 암반의 거동이 수평방향으로 발

생하면서 생기는 결과이다. 그러나 발생 크기는 실험실 물성치를 사용한 연속체 해석 결과와 현장 암반의 물성으로 보정한 연속체 해석 결과와의 차이가 크게 발생하며 이는 설계정수 보정으로 인해 암반의 전단변형계수가 변한 것에 의해 기인한 것으로 판단된다. 불연속체 해석 결과 최대 힘압축응력의 발생 시간이 단일절리를 모사한 경우와 절리군을 모사한 경우에 차이가 발생하며 특히, 구조물에 불리한 조건인 45°와 60°에서 그 시간차가 크다. 이는 불연속면의 증첩에 의한 암반 블록 거동의 비선형성에 기인한 것으로 판단된다.

표 9. 각 해석 모델 별 지보재 위치

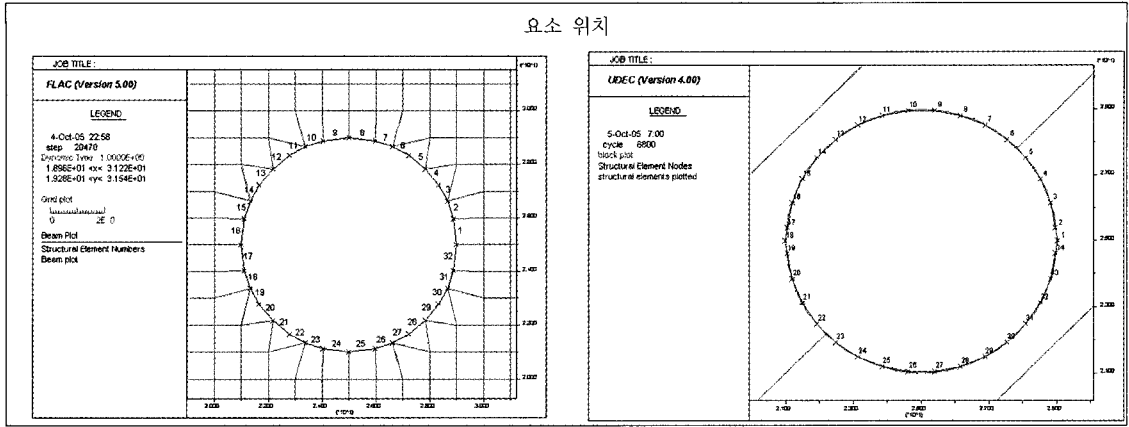


표 10. 각 경우별 최대 휨압축응력 발생 결과

단일 절리				절리군			
구분	최대값 (kgf/cm <sup>2</sup> )	발생위치	시간 (sec)	구분	최대값 (kgf/cm <sup>2</sup> )	발생위치	시간 (sec)
FLAC	2.39	좌측벽면(#17)	21	FLAC	25.28	우측바닥(#28)	3
0	13.53	우측바닥(#31)	3	0	13.46	우측벽면(#1)	2
30	11.11	좌측바닥(#22)	8	30	12.60	좌측벽면(#17)	6
45	10.59	좌측벽면(#17)	6	45	10.76	좌측벽면(#18)	13
60	11.03	우측벽면(#34)	2	60	10.31	우측벽면(#34)	11
90	10.34	우측벽면(#34)	2	90	11.59	좌측벽면(#17)	6

### 5. 결 론

불연속면이 발달한 암반 내의 지중구조물은 주변에 존재하는 불연속면의 역학적 및 구조적인 특성에 따라 나타나는 거동이 달라진다. 수치해석을 통해 지진에 의한 동적하중에 의한 암반 내 원형 터널이 보이는 동적 거동을 평가한 결과, 절리의 구조적인 특성에 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구에서 나타난 결과는 아래와 같다.

1. 불연속체를 고려한 수치해석 결과 단일 절리를 모사한 경우, 절리의 경사에 의해 터널 주변의 변위 크기와 발생 양상이 약간씩 차이가 있으나 대체로 유사한 형태를 나타내었다. 하지만 절리군을 모사한 경우, 절리의 경사에 따라 발생된 변위의 크기가 다소 차이가 있었으며 터널 내 각 위치별 변위의 발생 경향은 절리 경사의 영향을 받는 것으로 평가되었다.

2. 연속체 해석 결과와 불연속체 해석 결과에 의한 터널 내 변위 결과 비교 시, 연속체 해석의 결과는 불연속체 해석 결과에 비해 다소 과다한 평가가 되는 것으로 나타났다. 또한 변위 발생 경향 역시 연속체 해석에 의한 결과는 방사형으로 원형 터널 내의 모든 위치에서 비슷한 경향을 보였으나, 불연속체 해석 결과 바닥부의 변위가 천단부에 비해 상대적으로 컸으며, 절리의 경사에 따라 변위 발생 경향도 다소 차이가 나타났다. 이는 절리의 경사에 따른 불연속적인 감쇠의 변화에 기인한 것으로 사료된다.
3. 수평방향으로 작용하는 지진 동하중에 의한 지보재의 지보력은 측벽 부분에서 가장 큰 것으로 나타났다. 불연속체를 고려한 해석 결과는 단일 절리와 절리군을 모사한 경우 발생 시간의 차가 구조물에 불리한 경사를 갖는 경우에 크게 나타났다. 이는 비선형성을 갖는 불연속면이 중첩을 이루면서 지보재의 구조물 지지에 있어 블록과 비선형적인 거동을 나타내는 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. Okamoto, S., Tamura, C., Kato, K., and Hamada, M., 1973, Behaviors of Submerged tunnels during Earthquakes, Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 1, pp. 544-553
2. Constantopoulos, I. V., Motherwell, J. T., and Hall, J. R., 1979, Dynamic Analysis of Tunnels, 3rd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, pp.841-848
3. Goto, K., Matsumoto, M., and Urayama, M., 1985, Earthquake-Resistance Analysis by Finite Element-Boundary Element Hybrid Method, 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, pp.1519-1524
4. Xuehui An. and Maekawa, K., 1997, Failure Anlysis of Underground RC Frame Subjected to Seismic Action, Journal of Materials, Concrete, Structure, Pavement, JSCE, pp.251-261
5. Monsees, J. E. and Merritt, J. L., Seismic Modeling and Design of Underground Structures, Numerical Methods in Geomechanics, pp. 1833-1841
6. 윤종구, 김동수, 유제남, 2003, 지중구조물 내진설계를 위한 기반면의 속도 응답스펙트럼 및 응답변위 산정기법에 대한 연구, 한국지반공학회지, Vol. 19, No. 4, pp.211-221
7. 김명철, 김영일, 조우연, 김문걸, 2004, 국내특성이 반영된 지하구조물의 내진설계를 위한 수정응답변위법, 한국지진공학회지, Vol.8, No.2, pp.83-93
8. (사)대한터널협회, 1999, 터널설계기준
9. 이희석, 1999, 주기전단 하중하의 암석 절리의 역학적 및 수리학적 거동 연구, 서울대학교 대학원 박사학위 논문
10. Meyer, L. R., L. J. Pyrak-Nolte and N. G. W. Cook., 1990, Effects of Single Fractures on seismic Wave Propagation, International Symposium on Rock Joints, pp.413-422
11. Lemos, J., 1987, A Distinct Element Model for Dynamic Analysis of Jointed Rock with Application to Dam Foundations and Fault Motion, Ph.D. Thesis, University of Minnesota.
12. Zhao, J., et al, 1999, Rock Dynamics Research Related to Cavern Development for Ammunition Storage, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 14, pp.513-526
13. W. L. Wang, T. T. Wang, J. J. Su, C. H. Lin, C. R. Seng and Huang, T. H., 2001, Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.16, pp.133-150
14. 건설교통부, 1997, 내진설계기준연구 (II)

## 하 태 옥



2000 전남대학교 공과대학 자원공학과 학사  
2003 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 석사

Tel: htw8646@nate.com

E-mail:

현재 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 박사수료

## 양 형 식



1979 서울대학교 공과대학 자원공학과 학사  
1981 서울대학교 대학원 자원공학과 석사  
1987 서울대학교 대학원 자원공학과 박사

Tel: 062-530-1724

E-mail: hsyang@jnu.ac.kr

현재 전남대학교 건설지구환경공학부 교수