

# 터널 슛크리트 라이닝 파괴 메커니즘에 대한 수치해석적 고찰

## Numerical Study on Failure Mechanism of Tunnel Shotcrete Lining

신 휴 성<sup>†</sup> · 신 동 인<sup>1)</sup> · 배 규 진<sup>2)</sup> · 김 동 규<sup>3)</sup>

Shin, Hysoung · Shin, Dongin · Bae, Gyu-jin · Kim, Donggyu

**ABSTRACT** : This study investigates a failure mechanism of a tunnel shotcrete lining with respect to a concentrated load due to blocky rock mass. First of all, it is carried out to survey relevant researches to shotcrete failures by literature reviews and to numerically re-investigate the failure modes of shotcrete lining given by previous researches. Through this study, the failure modes are relocated with the conditions which induce each failure mode newly proposed by this study. In addition to this, the arching shape of tunnel lining, which has not been considered in the previous research despite of inherent geometrical characteristics in tunnels, is taken into consideration in numerical investigation on lining failure in this study. As a result, it is shown that more simplified failure modes can be found on the tunnel boundary condition and the corresponding failure condition to each mode can be different from ones of the previous study due to a tunnel arching effect.

**Keywords** : Failure modes, Tunnel shotcrete lining, Arching effect, Finite element analysis, Rock-shotcrete interface, Bonding strength

**요 지** : 본 연구에서는 터널 붕괴붕락의 유형 중 국부 압괴하중에 의한 슛크리트 라이닝의 파괴특성을 유한요소 해석을 통해 고찰하였다. 우선, 기존 터널 라이닝 파괴특성을 보다 체계적으로 파악하기 위하여 암반과 슛크리트체 강성비와 부착강도의 특성에 변화를 주어 총 9가지의 조건을 설정하였다. 각 조건에 대한 블록낙하실험(falling block test) 환경에서 수치해석을 수행하여 파괴양상을 고찰해 보고 기존의 이론적 파괴 메커니즘과 비교/평가하여 보았다. 결과적으로, 기존 문헌에서 언급된 4가지 파괴모드(점착파괴(adhesive failure), 직접전단파괴(direct shear failure), 휨인장파괴(flexural failure) 및 휨전단파괴(punching shear failure))가 모두 구현되긴 하였으나, 점착파괴는 항상 타 파괴유형과 동반되어 나타나며, 별도의 파괴유형으로 분류하는 것은 부적절하다고 판단되었다. 또한 기존 관련 연구에서는 터널공학의 주요개념인 아칭효과에 대해 고려치 않고 단순보 개념하에서 라이닝의 파괴특성을 고찰하였으며, 굴착에 의해 추가되는 라이닝의 초기 축력을 고려치 않고 있다. 이에 대해 터널특성에 부합된 경계조건들을 고려하여 신규 라이닝 파괴모드를 재 고찰하였으며, 곡률이 있는 터널 라이닝조건에서는 크게 두 가지 파괴유형으로 분류할 수 있는 것으로 파악되었다.

**주요어** : 파괴 모드, 터널 슛크리트 라이닝, 아칭 효과, 유한요소해석, 인터페이스, 부착력

### 1. 서 론

스�크리트 라이닝의 파괴와 관련해서 Barrett과 McCreath (1995)는 블록낙하실험을 통하여 괴상 암반(blocky rock mass)의 경우 점착파괴, 직접전단파괴, 휨인장파괴 및 휨전단파괴의 4가지 유형이 가장 빈번한 파괴모드라고 보고한 바 있으며(그림 1 참조), 이에 대한 결정론적 접근방법(deterministic approach)을 제시하였다. 또한, 슛크리트의 파괴는 암반에 대한 부착성의 손실과 휨파괴에 의해 일반적으로 이루어지며, 특히 슛크리트의 지보능력을 극대화하기 위하여 부착성이 매우 중요하다고 언급하였다. 부착성이 손실된 후에는 휨강도와 휨인성이 최대강도 이후의 영역에서 매우 중요한 역할을 한다고 지적하였다. 상기한 4가지 파괴 모드 중 점

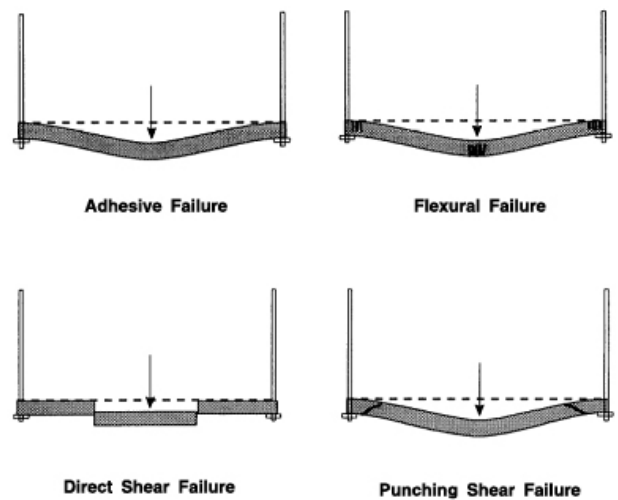


그림 1. 슛크리트 라이닝의 파괴모드(Barrett과 McCreath, 1995)

† 비회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원(E-mail : hyushin@kict.re.kr)

1) 비회원, 단우기술단 지반공학부 대리

2) 비회원, 한국건설기술연구원 선임연구부장

3) 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원

착파괴는 암반으로부터 슛크리트의 부착력이 약할 때 하중을 이기지 못하고 일어난다. 직접전단파괴는 부착력보다 슛크리트에 작용하는 응력이 직접전단강도를 초과할 때 일어난다. 이러한 파괴는 분리된 암반의 표면에 따라 생성될 것이며, 슛크리트의 두께, 암반체의 규모에 따라 파괴 가능성의 유무가 결정된다. 휨인장파괴는 암괴하중에 대해 슛크리트가 휘면서 라이닝의 터널 내측부에 발생하는 과다 인장응력에 의해 발생하고, 슛크리트의 굴곡량은 슛크리트의 물성치에 따라 달라질 것이다. 휨전단파괴는 부착력이 약한 슛크리트의 또 다른 파괴 유형이다. 본 파괴유형은 전단력이 최대인 곳이 지붕을 하면서 락볼트 같은 고정된 곳 가까이에서 연직면이 아닌 약 45도 경사를 가지고 인장파괴면을 따라 유발된다.

앞서 언급했던 블록낙하실험은 Fernandez-Delgado 등(1975)과 Holmgren(1975; 1987)에 의해 실시되었다. 사용된 실험모델은 3.7×1.2m 크기의 암반블록을 3개의 덩어리로 나눈 뒤 양쪽 두 개의 암반블록을 암반과 분리시키지 않고 록볼트에 의해 고정되어 있는 것처럼 고정시킨다. 다음, 그림 2와 같이 암반블록을 눕힌 뒤에 슛크리트를 타설하고 양생한 후, 하중을 가하기 위해 수직방향으로 세우고, 암괴하중을 모사하기 위해 아래에 위치해 있는 유압잭을 이용하여 상향으로 힘을 가해 슛크리트와 암반과의 부착성과 슛크리트의 파괴를 관찰하였다. 관찰 결과 앞서 언급했던 슛크리트의 다양한 파괴모드를 관찰할 수 있었다.

이러한 다양한 실험적 연구를 통해 관찰된 파괴유형들에 대해 역학적 개념을 기반으로 전문가의 분석을 통해 총 6개의 파괴모드를 제시하고 각각의 파괴모드에 대한 이론해를 유도하여 파괴개념의 지보재 안전율을 산출할 수 있는 기반을 마련하였다(Little, 1985; Barrett과 McCreath, 1995; 한국건설기술연구원, 2006). 하지만 터널공학의 기반이 되는 주요 개념인 아칭효과에 대해서는 고려되지 않아 단순보 개념 하에서 이론해가 유도 되었으며, 굴착에 의해 추가되는 라이닝의 초기 축력을 고려치 않았다. 이러한 기존 연구에서 고려치 못한 곡률을 갖는 라이닝의 특성은 라이닝 파괴의 직접적인 원인이 되는 배면 국부하중(암괴하중 등)에 대한 라이닝의

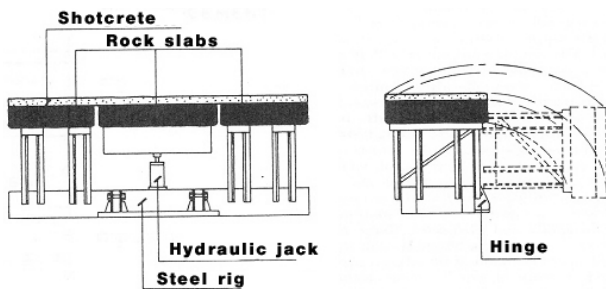


그림 2. 블록낙하실험(Falling block test) 개념도(Holmgren, 1987)

파괴모드에 크게 영향을 미칠 것으로 판단되며, 특히 파괴개시 시점 및 규모에도 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한 라이닝 파괴전 굴착에 의해 추가되는 라이닝의 축력은 라이닝 배면 국부하중에 대한 라이닝 축방향 구속압으로 작용하여, 라이닝의 파괴조건에 크게 영향을 미칠 것으로 판단된다.

이러한 배경에서, 본 연구에서는 슛크리트와 암반간 접촉력과 아칭형 라이닝의 기하학적 특성을 모두 고려했을 경우의 슛크리트 라이닝 파괴 유형을 상세히 파악코자 하였다. 이를 위하여 기존 블록낙하실험에 대한 수치모델과 곡률과 초기축력을 가한 모델을 각각 설정하여 유한요소 해석을 수행하였다. 이때, 암반과 슛크리트의 강성비의 차와 부착면의 접착강도를 매개변수로 하여, 이에 대한 파괴유형의 추이변화를 파악하였다.

## 2. 기존 파괴이론의 수치해석적 재검토

기존 연구를 통해 제시된 터널 라이닝 파괴유형을 수치해석적으로 재검토하고, 각 파괴 유형을 유발할 수 있는 파괴유발 가능조건들을 파악하기 위한 연구를 시도하였다. 따라서 기존 블록낙하실험의 수치해석에 필요한 모델을 설정하고, 각 층의 매질 물성을 달리 하여 총 9개의 Case를 만들어 슛크리트의 파괴 양상을 고찰하였으며, 기존의 이론적 파괴 메커니즘과 비교/평가하였다.

### 2.1 해석모델 설정

상기에서 언급된 블록낙하실험의 수치해석을 위해 수치모델의 전체 길이를 약 2m로 설정했으며, 이는 터널 라이닝에 록볼트의 간격과 동일하게 설정한 것이다. 슛크리트층은 6cm의 두께로 설정하였고, 모델 중앙에 위치한 낙반블록(falling block)격인 암반블록의 가로 길이는 85cm로 설정하였다. 그리고 암반블록과 슛크리트 사이의 인터페이스 요소를 적용하기 위해 두 층 사이에 인터페이스 요소를 삽입시키고 그림 3과 같은 2차원 평면변형을 조건에서의 블록낙하실험의 대칭 수치모델을 설정하였다. 사용된 구조해석 프로그램은 MIDAS/GTS이며, 암반블록과 슛크리트층은 삼각형 6절점요소로 모사하였다. 총 절점수는 1533개이며, 2699개의 요소로 이루어진 요소망을 사용하였다. 암반블록은 탄성모델을 적용하고 슛크리트 라이닝과 인터페이스 영역은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하여 탄소성 비선형 해석을 수행하였다.

설정된 경계 조건은 그림 3과 같이 암반블록의 양끝을 고정단으로 설정하고, 상단부는 힌지로 하중방향으로만 고정하였으며, 하중 조건은 터널 라이닝 천단부에 국부 암괴하

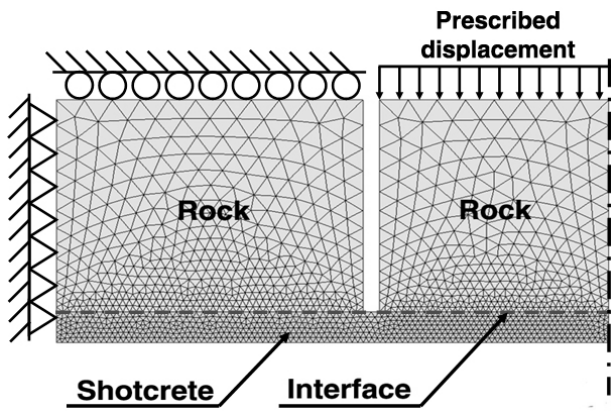


그림 3. 수치해석 모델 모식도

중이 작용하는 상황을 모사하기 위하여 중앙 암반블록에 수직하향 방향으로 최종 3mm의 강제변위를 가하여, 슛크리트 파괴를 강제로 유발시켰다.

## 2.2 붕괴모드 파악을 위한 해석조건 설정

수치해석에 적용된 암반블록 및 인터페이스, 슛크리트의 물성은 표 1과 같다. 슛크리트의 탄성계수는 15GPa로 고정된 후, 암반블록과 슛크리트의 강성비를 10:1, 0.1:1, 1:1인 3개의 Case로 구성하였다. 슛크리트의 물성은 변화가 없지만, 암반블록은 앞서 구성된 각 Case별로 슛크리트와 인터페이스간 부착력을 달리하여 또 다른 3개의 Case로 나누었다. 슛크리트의 강도정수는 직접인장강도 2MPa와 일축압축강도 20MPa인 경우 Mohr circle을 이용해 환산된 값인 점착력( $c$ )=4.69MPa, 내부마찰각( $\phi$ )=60°인 경우를 기준으로 설정하였다. 인터페이스 영역에는 그보다 작은 점착력인  $c$ =1.87MPa(인터페이스 인장강도 1MPa 경우 마찰각 60°를 고정하고 Mohr circle을 이용해  $c$ 값 환산)을 대입하는 것을 첫 번째 Case, 그보다 큰 점착력인  $c$ =9.33MPa (인터페이스

인장강도 5MPa인 경우 마찰각 60°를 고정하고 Mohr circle을 이용해  $c$ 값 환산)을 대입하는 것을 두 번째 Case, 슛크리트와 인터페이스의 부착력이 같다고 보는 것이 세 번째 Case로 해서 암반블록과 슛크리트의 강성비 3개의 Case에 각각 추가하여 총 9개의 Case를 해석모델로 설정하였다(표 1 참조)(Brady와 Brown, 1993). 각 Case별 인터페이스의 탄성계수는 그 Case의 암반블록과 슛크리트의 탄성계수 값의 평균값으로 설정하였고, 마찰각은 최대입력 가능각인 60로 고정시켰다. 슛크리트의 물성은 고정하고 다른 매질의 물성을 변화시켜 각 Case를 설정한 이유는 슛크리트의 물성은 예측 가능하지만, 암반의 물성은 현장조건에 따라 변화무쌍하며 굴착면의 습기 등 현장 및 시공조건에 따라 부착강도의 성능이 다를 수 있기 때문이다.

## 2.3 결과분석

각 Case별로 파괴된 시점에서의 해석모델의 변형 특성과 주응력 분포를 그림 4에 나타내었다. 해석 모델이 좌우대칭이므로 좌측면만의 결과만 도시하였다.

해석결과를 통하여 그림 1에서 언급된 부착파괴는 모든 경우에서 관찰되며, 독립된 파괴유형으로 분류하기 어려운 것으로 판단되었다. 해석결과로부터 파괴유형을 분류하기 위하여, 변형된 슛크리트 곡률이 비교적 완만하여 전단응력의 집중현상이 상대적으로 적으며 슛크리트 중앙부 하단과 좌측 경계에 가깝게 큰 인장응력이 발생한 파괴의 경우는 그림 1의 휨인장파괴 유형으로 판단하였으며, 암반 블록 경계면에서 부착 파괴가 상대적으로 적어 매우 큰 응력집중이 발생한 경우를 직접전단파괴 유형으로 분류하였다. 또한, 상대적으로 파괴 슛크리트의 곡률이 완만하지만, 슛크리트 중앙부 하단에 인장응력이 발생하지 않는 경우는 그림 1의 휨전단파괴 유형으로 분류하였다.

표 1. 수치해석을 위한 9개 Case의 물성치

	암반블록				스�크리트				인터페이스			
	탄성계수 (GPa)	포아송비	점착력 (MPa)	마찰각 (°)	탄성계수 (GPa)	포아송비	점착력 (MPa)	마찰각 (°)	탄성계수 (GPa)	포아송비	점착력 (MPa)	마찰각 (°)
Case1	150	0.25	1.32	38.3	15	0.17	4.69	60	82.5	0.25	1.87	60
Case2	150								82.5		9.33	
Case3	150								82.5		4.69	
Case4	1.5								8.25		1.87	
Case5	1.5								8.25		9.33	
Case6	1.5								8.25		4.69	
Case7	15								15		1.87	
Case8	15								15		9.33	
Case9	15								15		4.69	

Case1에 대한 해석결과에서 인터페이스와 슛크리트 부분이 파괴된 것을 볼 수 있는데, 이는 암반블록보다 슛크리트의 탄성계수가 높고, 슛크리트의 점착력보다 인터페이스의 점착력이 낮기 때문에 이런 결과를 얻은 것이다. 이 Case에서는 인터페이스가 먼저 파괴된 뒤 휨전단파괴 양상을 보였다. Case2의 강성비는 Case1과 동일하고 점착력이 인터페이스가 더 높기 때문에 슛크리트만 파괴되었으며, 직접전단파괴 양상을 보였다. Case3의 강성비는 암반블록이 높고, 슛크리트와 인터페이스 영역의 점착력을 같게 했을 때는 슛크리트와 인터페이스 영역이 함께 파괴되었으며, 역시 마찬가지로 직접전단파괴 양상을 보였다. Case4는 슛크리트의 탄성계수를 암반블록보다 크게 설정하고 점착력은 Case1과 동일하게 설정하였다. 그 결과, 중앙 암반블록이 늘어나면서, 상대적으로 강성이 큰 슛크리트에 휨이 발생하고, 슛크리트의 점착력이 크기 때문에 인터페이스 영역에서 먼저 파괴가 발생하였다. 여기서는 휨인장파괴와 휨전단파괴가 복합된 파

괴유형을 보였다. Case5는 강성비를 Case4와 동일하게 하고 인터페이스에 큰 점착력을 준 경우로 휨인장파괴 양상을 보였다. Case6은 강성비를 Case4와 동일하게 하고 슛크리트의 점착력을 인터페이스와 동일하게 했을 경우인데, 이 Case에서도 휨인장파괴는 일어나고 압괴의 하중이 증가함에 따라 휨전단파괴 양상도 함께 관찰되었다. 다음 Case7에서는 암반블록과 슛크리트의 탄성계수를 동일하게 설정하고, 슛크리트의 점착력을 크게 설정했으며, 결과적으로 휨전단파괴 유형을 보였다. Case8에서는 Case7과 마찬가지로 암반블록과 슛크리트의 탄성계수를 동일하게 설정하고, 점착력을 인터페이스를 높게 설정했으며, 이 결과 직접전단파괴 유형만 관찰되었다. 마지막 Case9에서는 강성비와 점착력을 동일하게 설정했으며, 이 결과도 Case7과 같이 압괴의 하중에 따라 휨전단파괴와 직접전단파괴가 복합된 파괴유형을 보였다. 본 수치해석적 고찰을 통해 기존의 문헌에서 언급된 것과는 달리, 각 Case별로 한 가지의 파괴 모드만을 보이지

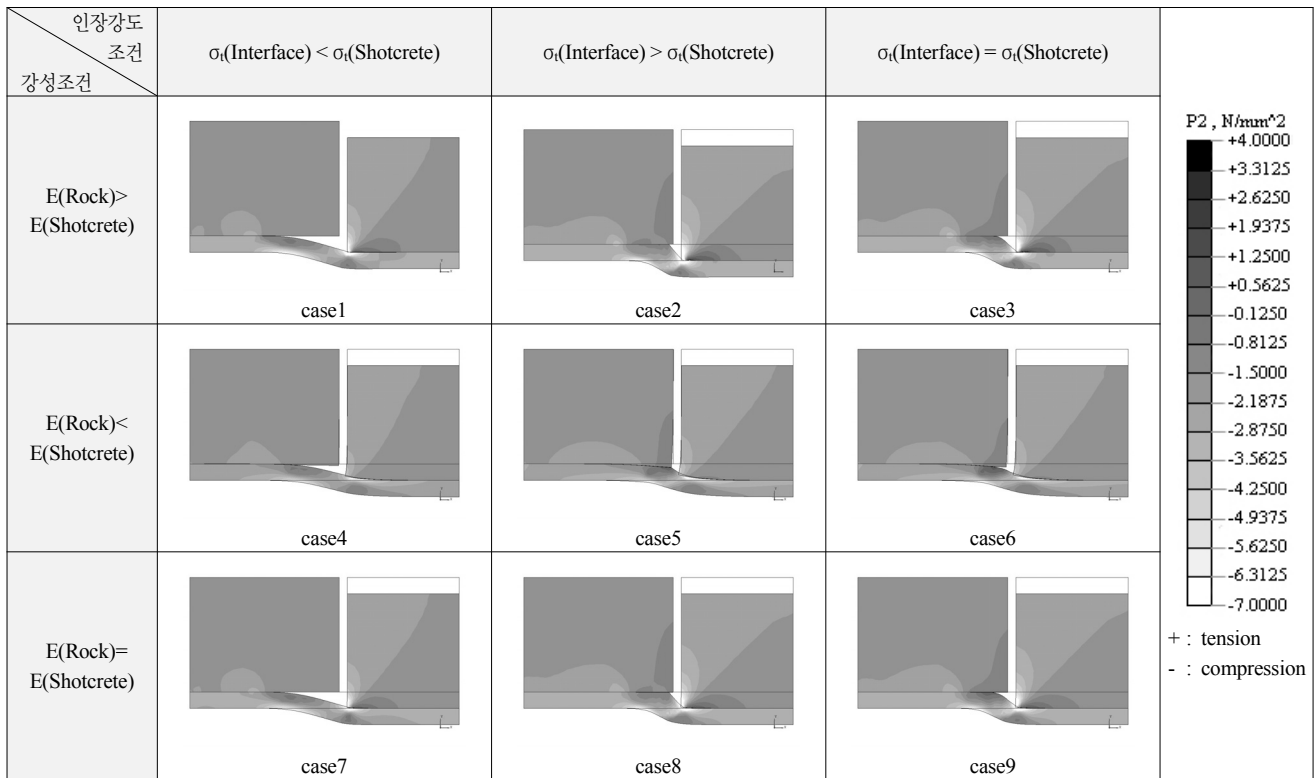


그림 4. 해석결과(최종변형 및 주응력분포)

표 2. 강성비, 점착력별 파괴모드 분류

탄성계수 \ 인장강도 조건	$\sigma_i(\text{Interface}) < \sigma_i(\text{Shotcrete})$	$\sigma_i(\text{Interface}) > \sigma_i(\text{Shotcrete})$	$\sigma_i(\text{Interface}) = \sigma_i(\text{Shotcrete})$
$E(\text{Rock}) > E(\text{Shotcrete})$	Punching shear	Direct shear	Direct shear
$E(\text{Rock}) < E(\text{Shotcrete})$	Punching shear + Flexural	Flexural	Direct shear + Flexural
$E(\text{Rock}) = E(\text{Shotcrete})$	Punching shear	Direct shear	Direct shear

않음을 알 수 있었다. 또한 앞서 언급되었듯이, 그림 1의 점착파괴는 모든 파괴유형에서 관찰할 수 있었다. 각 Case별 파괴모드는 표 2와 같이 정리하였다. 반대로 정리된 표 2는 각 파괴모드별 파괴 유발가능조건들을 이해하고 예측하는데 활용될 수 있을 것이다.

### 3. 아치형 슛크리트 라이닝 조건에 대한 수치 해석적 검토

#### 3.1 해석모델 설정

본 연구에서는 보다 현실적인 터널조건들을 고려한 신규 라이닝 경계조건을 설정하고, 기타 해석조건은 기존 블록나실험에 대한 수치해석 조건과 동일하게 설정하였다. 신규 해석모델은 기존 연구에서 고려하지 않은 아칭효과를 모사하여 라이닝에 곡률을 부여하고 붕괴전 굴착하중에 의해 발생하는 초기 축력을 고려하기 위해 두 단계로 나누어서 해석을 실시하였다.

첫 단계는 축력을 유발시키기 위해 슛크리트 배면에 굴착하중인 등분포하중을 가하고, 두 번째 단계에서 터널 라이닝 천단부에 국부 압괴하중을 추가로 가하였다. 두 번째 단계에서 가한 압괴하중은 중앙 암반블록 배면에서 수직하향 방향으로 가하였으며, 총 재하하중량은 각 Case별 최대

지하하중 범위인 0.5MPa(Case1~Case3), 10MPa(Case4~Case6), 2MPa(Case7~Case9)의 분포하중으로 재하 하였다. 그림 5는 신규 해석모델을 도식화한 것이고, 그림 6은 슛크리트에 굴착하중이 가해졌을 때의 응력분포를 나타낸 것이다. 슛크리트 상에 균질한 응력분포가 발생되어야 하나, 왼쪽 끝의 응력집중 현상은 sliding을 허용키 위해 투입된 슛크리트 끝단의 인터페이스 요소에서 유발된 미미한 수치오류로 그 영향은 무시할 수 있는 것으로 가정하였다. 이 모델 역시 MIDAS/GTS 프로그램을 사용하였으며, 암반블록과 슛크리트층은 사각형 8절점요소로 모사하였고, 절점수는 1575개이며, 1386개의 요소로 이루어진 요소망을 사용하였다. 암반과 슛크리트 경계면에 인터페이스 요소를 투입하여 부착력을 모사하였다. 암반 블록은 탄성모델, 슛크리트 라이닝은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하여 탄소성 해석을 수행하였다. 그리고 해석 조건인 각 층별 물성치 및 각 Case조건은 표 1과 같이 2장의 해석모델과 동일하게 설정하였다.

#### 3.2 결과분석

##### 3.2.1 하중에 따른 변위 양상

각 Case별로 슛크리트의 변위양상 추이변화를 고찰하기 위하여 해석단계별로 수치해석모델의 오른쪽-아래 끝단 지점, 즉 터널 천단부 정중앙 하부지점의 변위를 취하였다. 총 9개 Case의 하중-변위 곡선을 종합하여 그림 7에 나타내었다. Case4, Case5, Case6의 곡선을 살펴보면 슛크리트의 파괴가 일어나지 않은 것을 알 수 있다. 또한 타 Case들에 재하한 하중의 10배를 가해도 파괴되지 않았다. 이는 암반블록의 탄성계수가 슛크리트의 탄성계수보다 작기 때문에 슛크리트가 쉽게 파괴되지 않고 암석블록의 변형만 유발된 것으로 설명된다. 그리고 Case2, Case8의 두 Case가 다른 Case들에 비해 유독 파괴하중이 큰 것으로 해석되었다. 본 Case

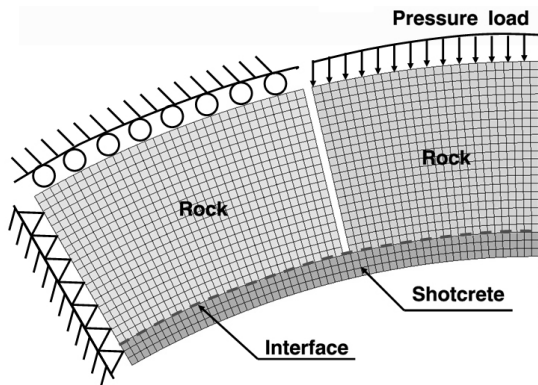


그림 5. 신규 해석모델 모식도

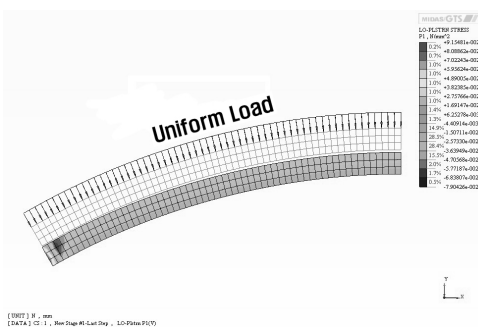


그림 6. 굴착하중 가압후 슛크리트 응력분포

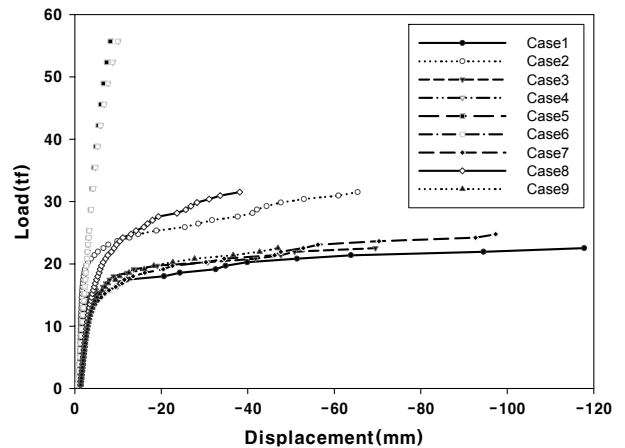


그림 7. 9개 Case의 변위-하중 곡선

들의 공통점은 인터페이스의 접착력이 슛크리트의 접착력보다 높은 경우이다. 인터페이스의 접착력이 크기 때문에 접착파괴가 일어나지 않고 타 Case들의 경우보다 더 큰 하중까지 버틸 수 있던 것으로 판단된다.

### 3.2.2 슛크리트 단면의 응력 변화 추이

스�크리트의 축응력 변화를 단계별로 비교해 보았다. 본 분석을 위해 축응력 값을 취한 지점은 좌표계에서 0°인 a-a',

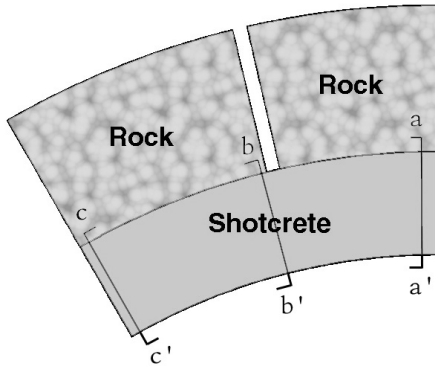


그림 8. 하중단계별 응력 변화추이 분석 지점

15°인 b-b', 30°인 c-c' 지점으로 그림 8에서와 같이 각 지점의 x축방향 응력을 취하여 분석하였다.

b-b' 지점과 c-c' 지점은 각각 15°, 30°씩 기울어진 것을 감안해 각 요소의 응력값을 아래 식에 대입하여 각 기울기에 해당하는 응력을 측정하였다.

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (1)$$

각 지점은 프로그램의 결과값에서 슛크리트 상단의 요소, 슛크리트 중앙의 요소, 슛크리트의 하단 요소 등 총 세 지점에서의 응력값 변화추이를 그림 9~그림 11에서 도시하였다. 총 가압량의 20%, 40%, 60%, 80%, 100%의 하중재하 단계로 구분하여, 각 하중단계마다 상단부, 중앙부, 하단부의 응력값을 이어서 도표에 표현하였다. 그림 상에서 수평축은 각 하중재하 단계마다 유발된 축방향 응력수준(axial stress intensity)을 의미하며 나타난 응력값 중 (+)값은 인장응, (-)값은 압축을 의미한다.

그림 9는 a-a' 지점의 축방향 응력분포를 나타낸 것이다. 슛크리트의 탄성계수보다 암반블록의 탄성계수가 더 큰 Case1~Case3은 상단부 부터 하단부까지 응력차이가 거의

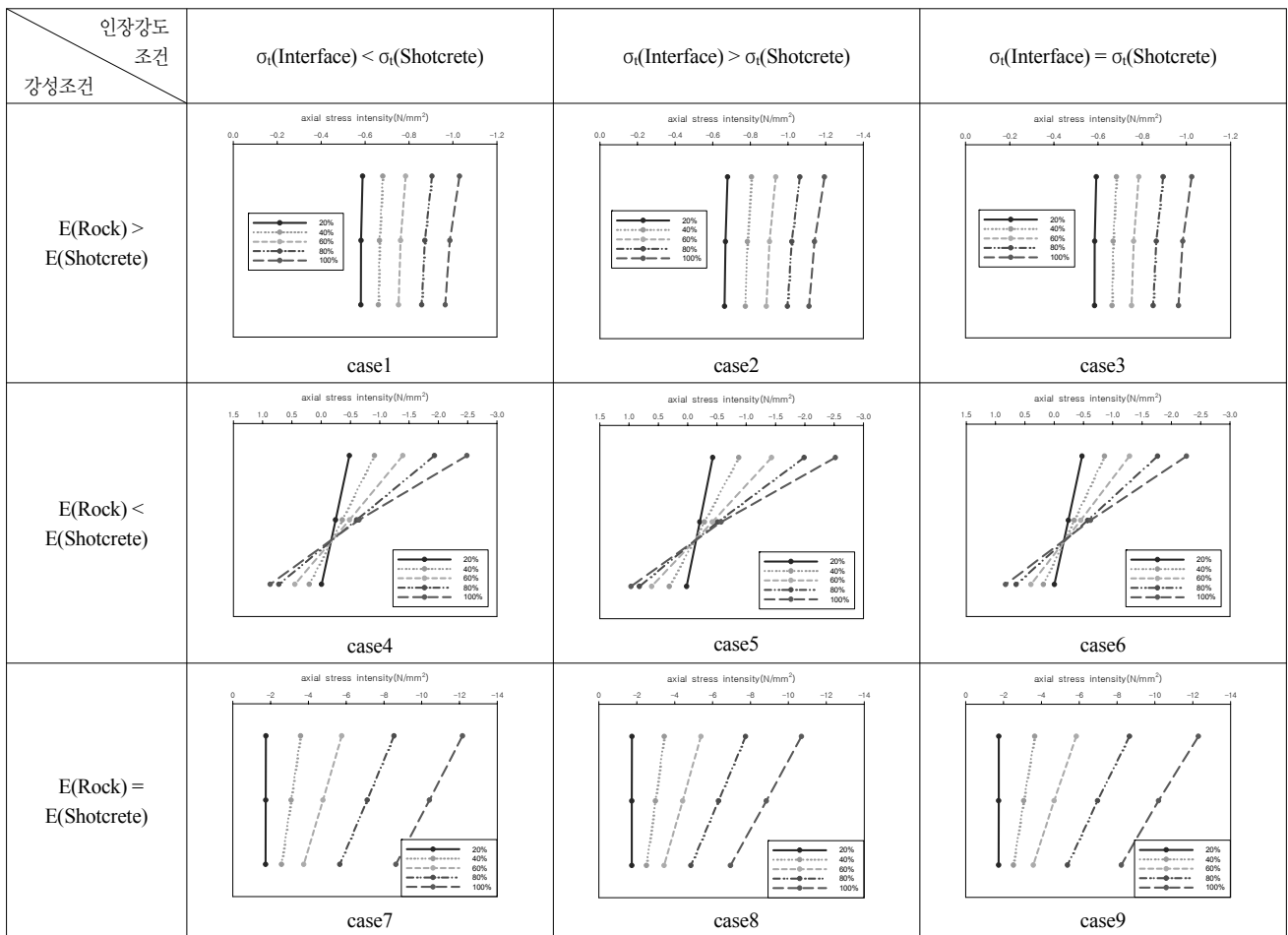


그림 9. a-a' 지점의 응력변화

없고, 일정하게 증가한 것을 볼 수 있다. 이 지점에서 전체적인 쏫크리트의 축응력은 일정했다.

쏘크리트 탄성계수가 암반블록의 탄성계수보다 큰 Case4~Case5의 응력값 변화를 살펴보면, 상단부는 하중이 증가할수록 압축응력이 증가하는 반면에, 하단부는 하중이 증가할수록 인장응력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 중앙부는 응력의 변화가 거의 없는 것도 확인할 수 있다. 이는 암반블록의 탄성계수가 쏫크리트의 탄성계수 보다 작은 Case들이기 때문에 쏫크리트의 휨변형이 일어나면서 아래로 볼록한 형상으로 상단은 압축, 하단은 인장이 일어난 것으로 판단된다.

쏘크리트와 암반블록의 탄성계수가 동일한 Case7~Case9에서는 하중재하 초기에는 상단부와 하단부가 압축응력이 거의 비슷했지만, 하단부의 압축응력 증가폭이 상단부에 비해 작은 것을 관찰하였다. 이는 Case7~Case9의 탄성계수 조건이 암반블록과 쏫크리트의 탄성계수가 같기 때문에 앞의 두 조건의 중간 수준인 압축응력분포를 보인 것으로 판단된다. a-a' 지점은 암괴하중을 재하하는 중간지점이기 때문에 쏫크리트나 암반블록의 탄성계수에 따라 각 요소의 응력값이 달라졌을 뿐, 인터페이스의 인장강도에 따른 변화는 거의 없었다.

그림 10은 b-b' 지점의 축방향 응력분포를 나타낸 것이다.

b-b' 지점은 암반블록이 갈라지는 지점이어서 육안으로도 쏫크리트의 변형을 확인할 수 있는 지점이기 때문에 응력분포를 보면 가장 변동이 심한 지점이기도 하다. Case1을 보면 상단부에서는 하중초기때 인장이 조금씩 증가하다가 다시 줄어들면서 마지막엔 약간의 인장력이 발생했고, 중앙부에서는 압축력이 점점 증가하였다. 그리고 하단부에서는 압축력이 증가하다가 쏫크리트가 파괴될 때에는 오히려 압축력이 처음보다 감소하였다. Case2에서는 상단부의 응력이 처음엔 압축력이 약간 발생되다가 쏫크리트가 파괴될 때는 약간의 인장력이 발생되었고, 중앙부에서는 압축력이 발생되어 감소했다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 그리고 하단부에서는 하중이 40%일때 압축력이 급증하였다. Case3에서는 상단부에서 인장력이 발생하였는데, 증가와 감소를 반복하다가 최종적으로는 증가하였고, 중앙부에서는 압축력이 증가하였으며, 하단부에서는 압축력이 증가하다가 마지막에 다시 초기상태의 압축력을 유지하였다. Case4에서는 상단부에서는 압축력이 처음엔 감소하다가 마지막엔 증가하였고, 중앙부와 하단부는 꾸준히 증가하였다. Case5에서도 Case4와 마찬가지로 상단부에만 압축력이 감소하다가 마지막에는 증가하였고, 중앙부와 하단부에서는 하중이 증가함에 따

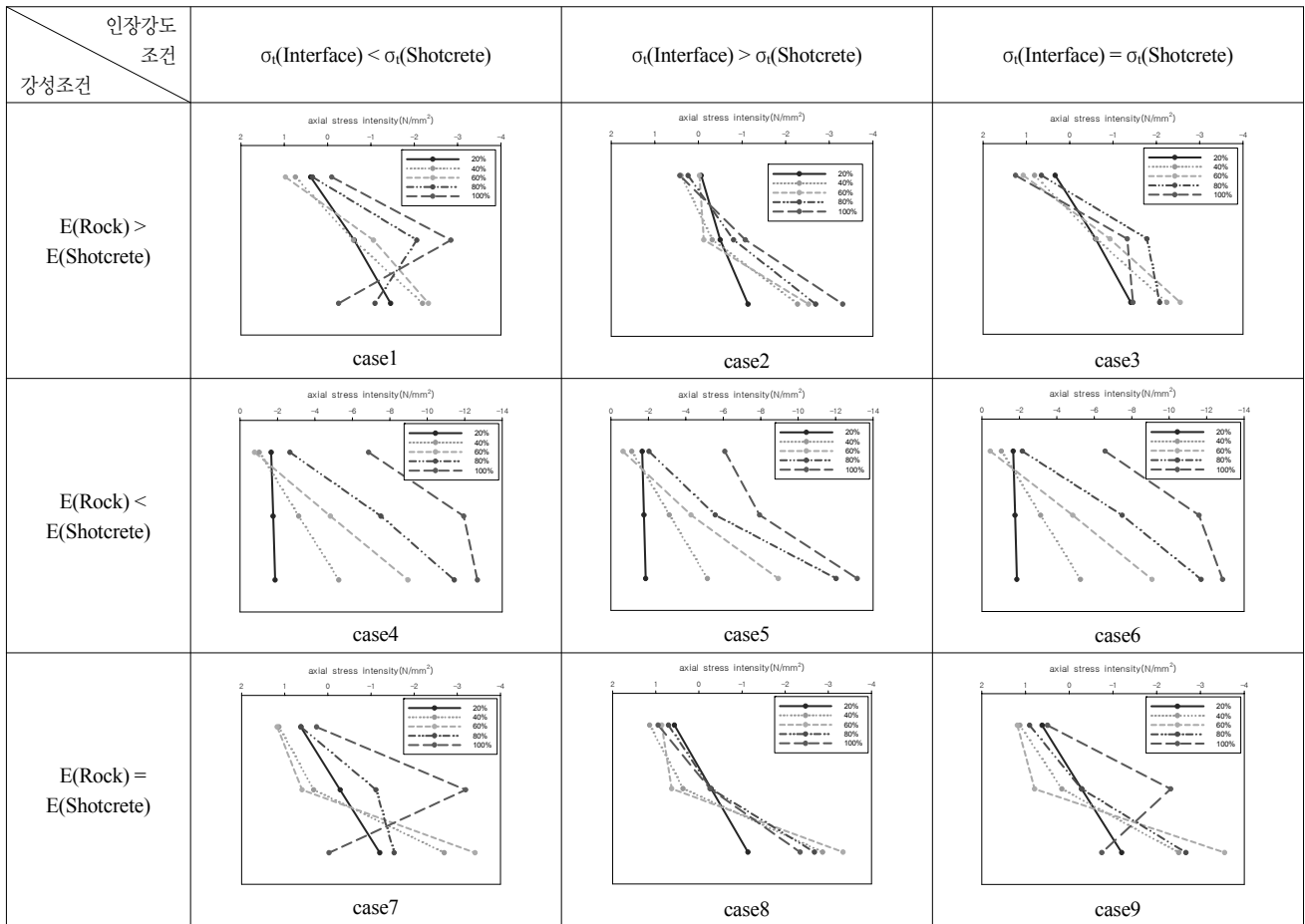


그림 10. b-b'지점의 응력변화

라 압축력도 증가하였다. Case6에서도 앞의 두 Case와 마찬가지로 상단부는 압축력이 감소하다가 증가하였고, 중앙부와 하단부는 압축력의 증가만 발생했다. 그러나 Case4~Case6의 상단부에서 하단부까지 연결한 선인 Case5는 Case4와 Case6가 ㄴ자를 그리는 것과 달리 ㄱ자 모양을 나타내었다. 이는 Case5의 압축력의 증가량의 폭이 비교적 작다는 것을 의미한다. Case7은 상단부에서는 인장력이 발생하지만, 증가하다가 마지막에는 처음보다 더 약한 인장력의 발생으로 파괴되고, 중앙부는 압축력이 발생하다가 인장력이 잠깐 발생하며 마지막에는 압축력이 크게 발생 되었다. Case8의상단부에서는 인장력이 발생하고, 중앙부에서는 초기에 압축력이, 중간에는 인장력이, 마지막에는 다시 압축력이 발생하였다. 하단부에서는 압축력이 크게 증가했다가 조금씩 줄어드는 경향을 볼 수 있다. Case9에서는 Case7과 마찬가지로 상단부에서는 인장력이 증가했다가 처음보다 줄어들고 중앙부에서는 처음에 압축하였다가 중간에 인장력이 발생되면서 큰 폭으로 압축력이 발생되었다. 하단부에서는 압축력이 증가하다가 마지막에 처음보다 작은 압축력이 발생하였다.

b-b' 부분은 슛크리트의 변형이 심하게 일어나는 지점이라 응력변화도 다양했다. 주목해야 할 부분은 Case2, Case5, Case8

이다. 이 세 Case는 다른 Case들과 달리 상단부 부터 하단부까지의 응력발생 수준을 선으로 이어놓은 그래프선이 대체로 ㄴ자 모양을 하고 있다는 것이다. 이 세 Case들의 공통점은 슛크리트의 점착력보다 인터페이스의 점착력이 크다는 것인데, 이러한 조건에서는 슛크리트와 암석블록이 쉽게 떨어지지 않으면서 하단부의 압축력이 증가한다는 것으로 파악된다.

그림 11은 c-c' 지점의 축방향 응력분포를 나타낸 것이다. 이 지점은 각각의 값은 다르지만, 탄성계수의 변화에 따라 응력이 변화하고 점착력에는 별로 영향이 없는 것은 a-a' 지점의 경향과 유사하다. Case1~Case3을 보면 상단부의 응력이 초기에 비교적 큰 값으로 시작해서 일정하게 증가하였다. 중앙부를 보면 상단부 정도까지는 아니지만, 응력이 증가하였고, 하단부는 약간의 인장력이 발생하였고 하중이 증가되더라도 큰 변화가 없었다. Case4~Case6은 상단부, 중앙부, 하단부에서 응력이 거의 비슷했으며, 하중이 증가할수록 압축력도 증가하였다. Case4~Case6은 슛크리트의 탄성계수가 암반블록의 탄성계수보다 크기 때문에 상단부와 하단부의 응력차가 거의 없이 전체적인 압축력만 증가한 것으로 보인다. Case7~Case9의 상단부에서는 하중이 증가할수록 압축력이 증가하였고, 중앙부에서는 작은 크기지만 인장력

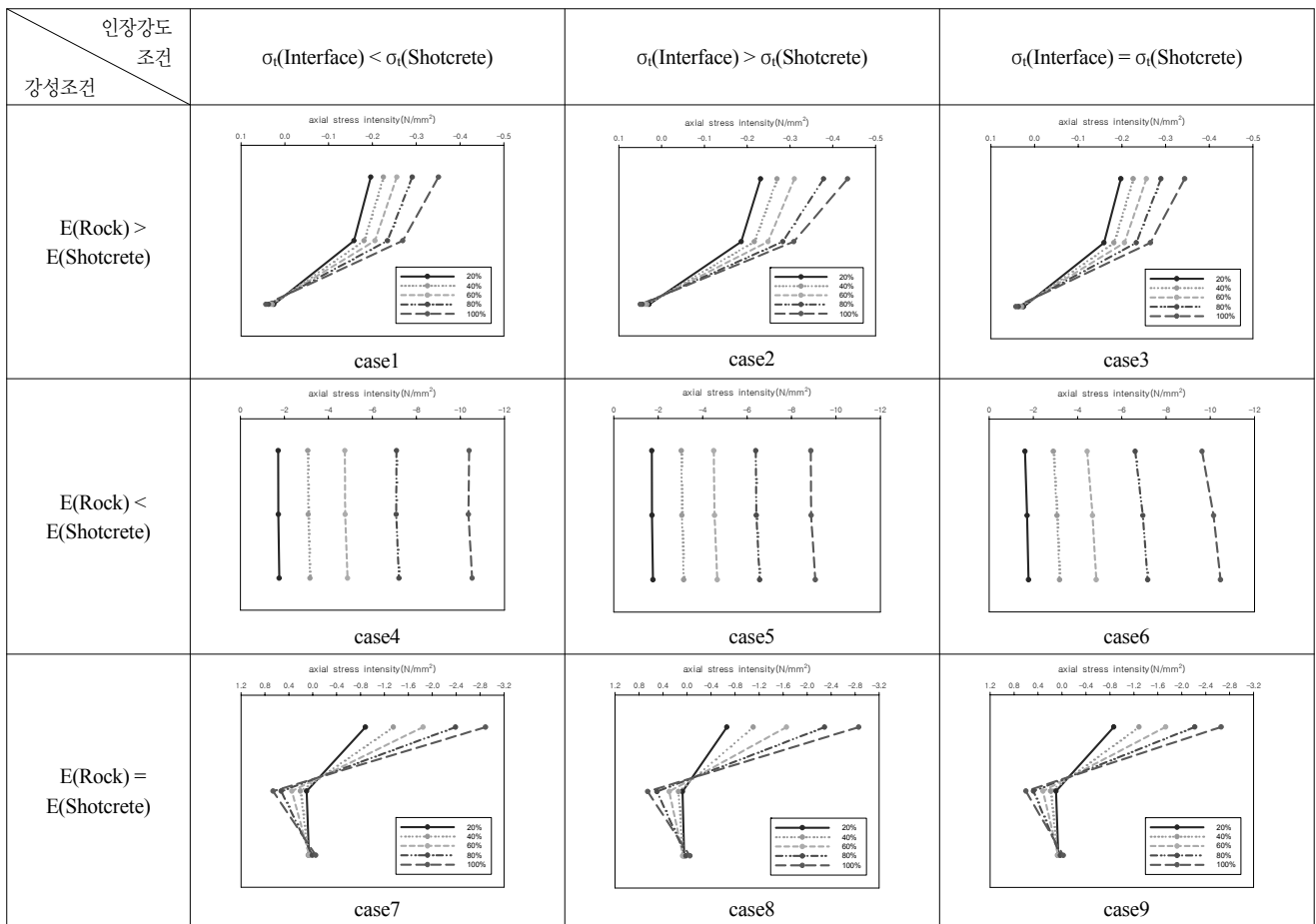


그림 11. c-c' 지점의 응력변화



이 발생하며 일정하게 증가하였다. 하단부에서는 응력이 거의 발생되지 않고 하중이 증가하더라도 거의 변화가 없었다.

c-c' 지점은 슛크리트의 가장자리이기 때문에 하중을 증가시켜도 갑작스런 변화없이 초기의 응력상태가 일정하게 증가하는 경향을 보였다. 슛크리트는 각 Case마다, 각도가 다른 각 지점마다, 그리고 슛크리트의 암석블록과의 떨어진 거리마다 응력분포의 다른 변화추이를 파악할 수 있었다. 그리고 15°의 각도에서는 슛크리트가 파괴되기 직전까지의 응력변화도 관찰할 수 있었다.

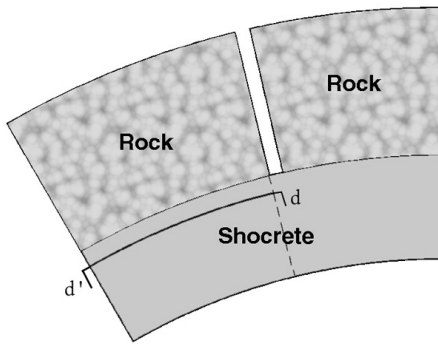


그림 12. 암반블록과 접한 슛크리트의 접촉부 응력 분석 지점

### 3.2.3 암석블록과 접한 슛크리트 지점의 응력변화 추이

암괴하중을 가운데 암반블록에 재하하게 되면 양 끝에 고정되어 있는 암반블록들의 슛크리트와 접한 면에는 응력이 발생한다. 조건에 따라서 부착력이 감소하여 암반블록과 슛크리트가 떨어질 수도 있을 것이고 슛크리트가 심한 변형을 일으키며 파괴가 일어날 수도 있을 것이다. 그림 12는 부착면 주변 슛크리트의 응력변화 추이 분석 지점을 나타낸다.

d-d' 지점은 총 32개의 요소로 메시가 짜여졌고, 각 요소들은 축과의 기울기가 모두 다르기 때문에 각각 요소의 응력을 아래 식에 대입하여 부착면에 수직(normal)한 방향 응력을 계산하였다.

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (2)$$

총 9개 Case의 응력값의 변화는 기울기가 15°인 중앙부분에서 기울기 30°인 지점까지의 응력변화를 측정하여 아래와 같이 그래프로 정리하였다. 그림 13에서 그래프들의 수평방향은 d-d' 축선상의 위치를 나타내며, 하중을 5단계로 나누어 20%, 40%, 60%, 80%, 100%의 각 응력분포를 도시하였고, (+)값은 인장을, (-)값은 압축을 나타낸다.

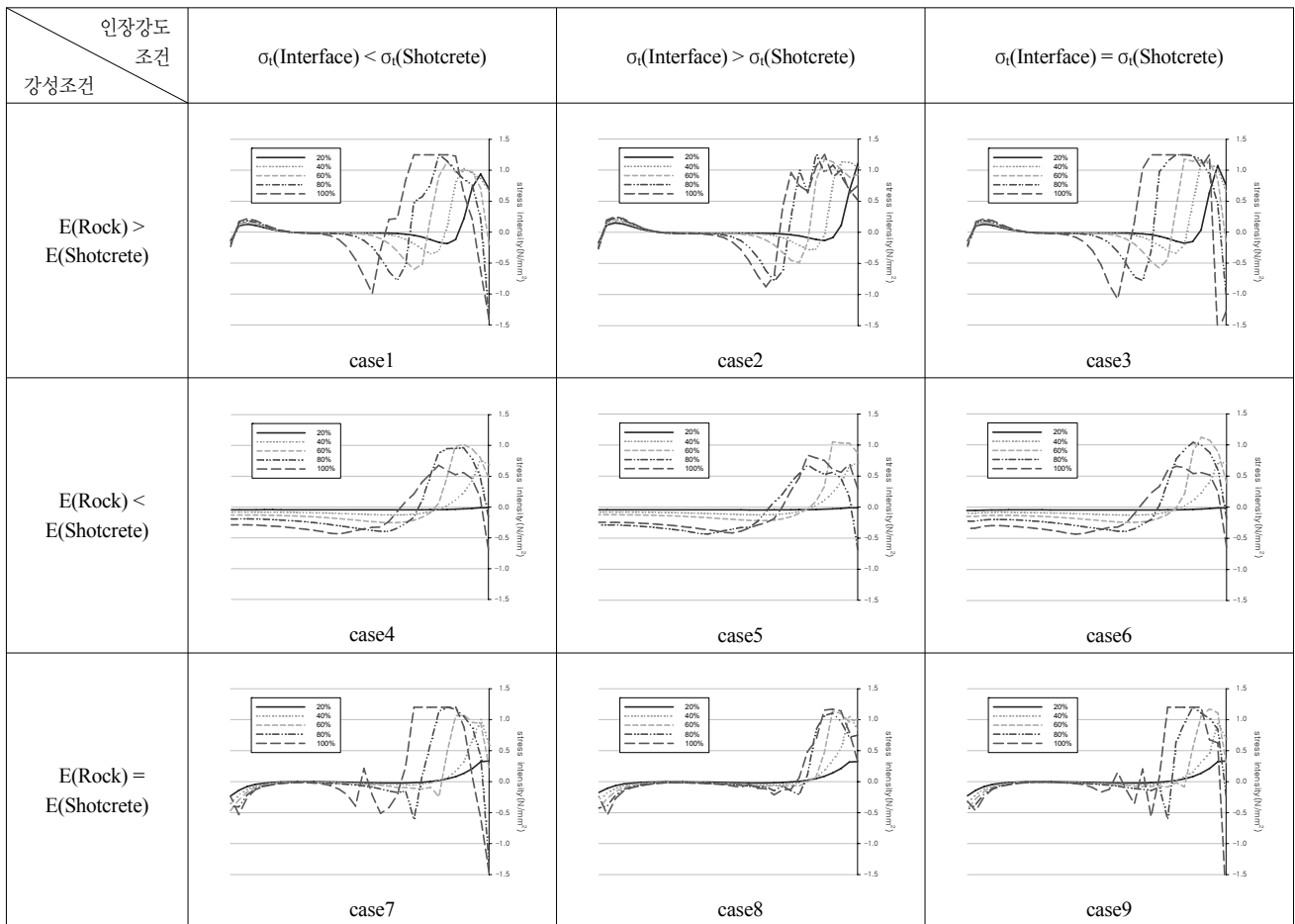


그림 13. d-d' 지점의 응력분포

그림 13에서 볼 수 있듯이 9가지 Case의 조건이 모두 다른 만큼 d-d' 지점의 응력변화도 다양하게 나타난 것을 관찰할 수 있었으며, 탄성계수의 조건과 점착력의 조건이 각각 같은 Case에서는 공통점을 보였다. 즉, 암반블록의 탄성계수가 슛크리트의 탄성계수보다 큰 Case1~Case3에서는 인장범위가 끝나는 지점 근처의 압축력이 하중의 증가에 따라 증가하였고, d' 지점 가까이에서 약간의 인장이 발생한 점도 동일하였다. 그리고 슛크리트의 탄성계수가 암반블록의 탄성계수보다 큰 Case4~Case6에서는 인장범위가 끝나는 지점부터 d' 지점까지 압축력이 일정하게 발생하며 하중이 증가함에 따라 압축력도 증가하였다. 슛크리트와 암반블록의 탄성계수가 동일한 Case 7~Case9에서는 인장범위가 끝나는 지점에서부터 d' 방향으로 압축력이 거의 발생하지 않았고, d' 지점 가까이에서는 압축력만이 하중증가에 따라 증가하였다. 또한, 슛크리트의 점착력보다 인터페이스의 점착력이 더 큰 Case2, Case5, Case8에서는 하중재하가 증가하여도 압축력이 발생하지 않아, 슛크리트와 암반블록의 탈락이 발생하지 않음을 알 수 있다.

### 3.2.4 최대주응력 분포 및 파괴모드 분류

기존 해석모델과 마찬가지로 총 9개의 Case에 대한 수치 해석을 실행한 후, 각 Case별로 파괴 당시 모델변형과 최대 주응력 분포를 그림 14에 나타내었다.

Case1은 슛크리트와 암반 사이의 인터페이스가 파괴되며 중앙암과 슛크리트 하단부에서 큰 인장응력 집중현상을 보였으며 휨전단파괴 양상으로 분류할 수 있다. Case2에서는 인터페이스의 점착력이 더 큰 경우로서 인터페이스부는 파괴가 발생하지 않고 슛크리트에 응력이 응집되는 직접전단파괴 양상을 보였다. Case3에서는 슛크리트와 인터페이스 영역의 점착력을 같게 했을 때 동시에 파괴된 걸 볼 수 있다. 여기서 가압초기에는 어느 정도 부차파괴 양상만을 보이며, 최종 파괴는 직접전단파괴 양상을 보였다. Case4, Case5, Case6은 모두 암반블록의 탄성계수가 슛크리트의 탄성계수가 작은 경우인데, 그림 14에서와 같이 인터페이스의 파괴는 전혀 일어나지 않았으며, 하중이 가해지면서 슛크리트의 축력만 증가했을 뿐, 다른 Case의 파괴하중 10배 정도의 하중에서도 슛크리트의 파괴는 발생되지 않았다. 이는 기존 해석모델에 대한 해석결과에서와 같이 암반자체에 변형이 집중되고 슛크리트에 가해지는 하중은 대부분 축력으로 작용하여 상대적으로 매우 큰 압축강도에 대한 파괴유형으로 전환되어 파괴가 유발되지 않은 것으로 판단된다. Case6에서는 인터페이스의 점착력이 슛크리트 영역보다 작아서 인터페이스 영역의 파괴를 발견할 수 있고 휨전단파괴 양상을 보였다. Case8에서는 인터페이스의 파괴가 약간 발생했으나, 하중이 증가함에 따라 인터페이스 파괴보다는 슛크리트의 파괴경향이 더욱 뚜렷히

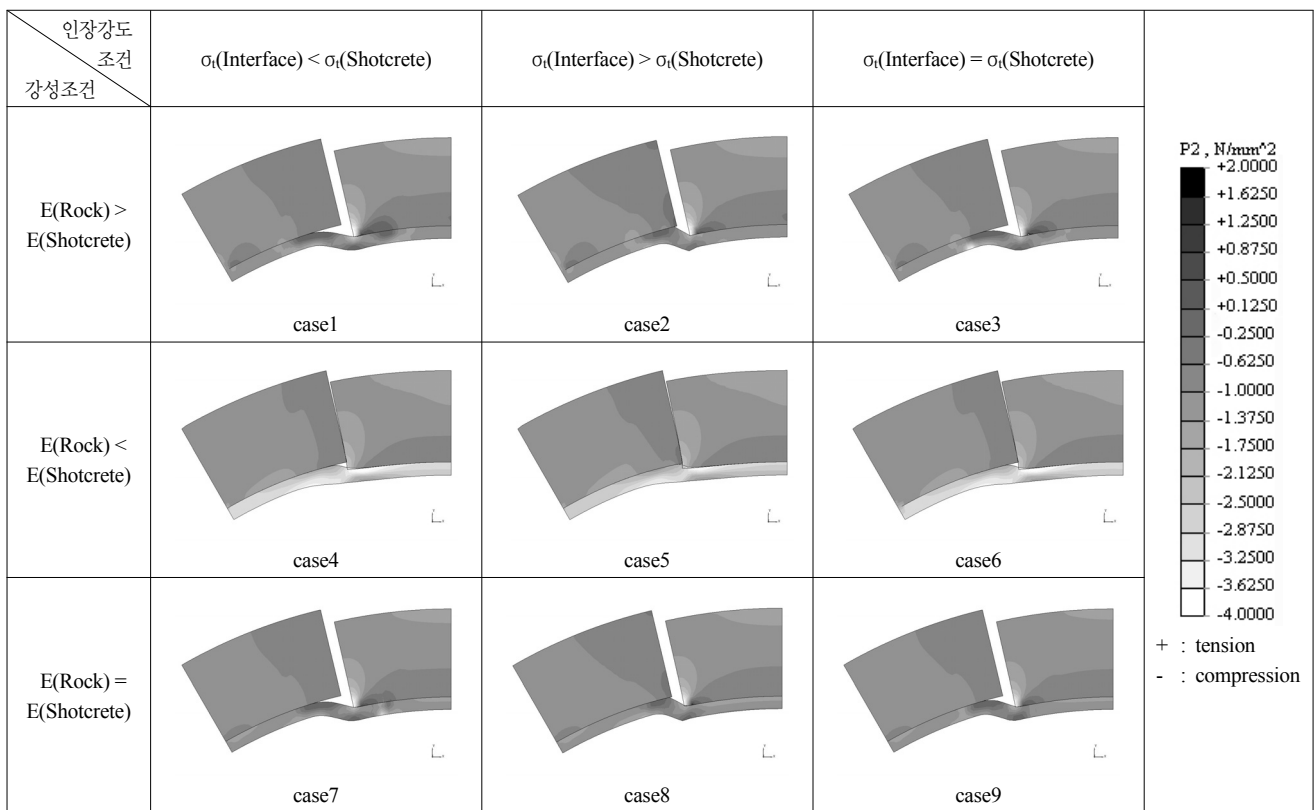


그림 14. 해석결과(최종 변위 및 주응력 분포)

표 3. 신규모델 강성비, 점착력별 파괴모드 분류

인장강도 탄성계수	$\sigma_i(\text{Interface}) < \sigma_i(\text{Shotcrete})$	$\sigma_i(\text{Interface}) > \sigma_i(\text{Shotcrete})$	$\sigma_i(\text{Interface}) = \sigma_i(\text{Shotcrete})$
$E(\text{Rock}) > E(\text{Shotcrete})$	Punching shear	Direct shear	Direct shear
$E(\text{Rock}) < E(\text{Shotcrete})$	Flexural deformation but no failure	Flexural deformation but no failure	Flexural deformation but no failure
$E(\text{Rock}) = E(\text{Shotcrete})$	Punching shear	Direct shear	Direct shear

나타나며 직접전단파괴 양상을 보였다. Case9에서는 암반블록과 슛크리트의 탄성계수가 같고 슛크리트와 인터페이스의 점착력도 같은 Case인데, Case7보다는 작지만 인터페이스의 파괴현상이 뚜렷하였다. 여기서 하중이 증가함에 따라 직접전단파괴 양상을 보였다. 신규 모델 역시 부착파괴 양상은 모든 Case에서 발견되어 따로 언급하진 않았다. 신규 모델의 각 Case별 파괴모드는 표 3과 같이 3개의 모드로 정리할 수 있으나, 사실상 휨인장파괴 양상은 발생하지 않아 아칭현상의 라이닝 조건에서는 크게 2개의 파괴유형을 보이는 것으로 해석결과를 정리할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 선행 연구에서 수행한 곡률없이 수평한 기존 파괴 모델과 라이닝 곡률을 고려한 개선된 모델에 대한 수치해석적 고찰을 통해 파괴 모드를 고찰하였다. 기존 모델은 중앙 암반블록에 강제변위를 주었고, 신규 모델에는 각 Case별 최대지지하중 범위 내의 하중을 준 점이 다르긴 하지만, 두 모델 중앙블록의 압괴하중을 표현한 것이기에 두 모델을 비교하는 데는 크게 무리가 없다. 이러한 고찰을 통해 얻어진 파괴양상 고찰상에서의 결론은 다음과 같다.

두 모델에 대해 수치해석적 검토를 수행한 결과 가장 뚜렷한 차이가 있는 Case는 슛크리트의 탄성계수가 암반의 탄성계수보다 큰 Case4~Case6에서 관찰 할 수 있었다. 본 3개의 Case에 대해서는 기존 모델 해석상에서 휨인장파괴 양상 외에 휨전단파괴나 직접전단파괴와 같은 양상으로 파괴되는 것으로 해석된 반면, 신규 모델에 대해서는 슛크리트와 인터페이스간 점착력의 차이와 상관없이 다른 Case들 파괴하중의 10배 수준에서도 파괴가 발생되지 않으며, 곡률이 완만한 휨변형만을 보였다. 여기서 암반하중에 대해 큰 암반변형이 유발되었지만 슛크리트 상에서는 대부분 축력으로 작용되었던 것으로 파악되었다. 이는 기존의 모델에서 존재하지 않았던 터널 굴착에 의해 부가되는 라이닝의 초기 축력과 라이닝 곡률을 고려한 것에 기인하다는 것으로 판단된다. 또한 Case9의 파괴유형이 기존 모델에서는 직접전단 파괴 유형에서 휨전단파괴 양상으로 바뀌었다.

기존 연구에서는 터널 슛크리트 라이닝의 괴상 암반에 의한 파괴 모드를 연구하면서 터널공학의 주요 개념인 아칭효과를 고려하지 않았다. 본 연구를 통해 연구에서 도출된 결과를 재검토하여 기 제시된 파괴유형과 각 파괴유발 가능조건들을 새롭게 정리하였다. 또한 기존 연구에 비해 보다 현실적이고 기존연구에는 고려되지 않은 아칭효과를 모사하여 라이닝에 곡률을 부여하고 붕괴 전 굴착하중에 의해 발생하는 초기 축압 조건하에 발생 가능한 파괴모드를 재 고찰 할 수 있었다. 이를 통해, 곡률이 있고 초기 축력이 가압되어 있는 실제 터널 라이닝 경계조건에서는 슛크리트와 암반의 강성비의 차와 슛크리트 부착조건에 따라 크게 두 가지 파괴(직접전단파괴 및 휨전단파괴) 유형으로 단순화해 분류할 수 있으며 각 파괴유발 가능조건도 경계조건에 따라 달라질 수 있음을 보였다.

#### 참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원 (2006), *터널공사 재해 최소화 및 예방기술 개발(III)*, 전기연 기관고유사업 연차 보고서, 전기연 2006-077, p. 223.
2. Barrett, S. V. L. and McCreath, D. R. (1995), Shotcrete Support Design in Blocky Ground : Towards a Deterministic Approach, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 10, No. 1, pp. 79~89.
3. Brady, B. H. G. and Brown, E. T. (1993), *Rock Mechanics for Underground Mining (2nd Edition)*, Chapman and Hall, p. 571.
4. Fernandez-Delgado, G., Mahar J., Cording, E. (1975), *Shotcrete : Structural Testing of Thin Liners*. Federal Railroad Administration Department of Transportation Final Report, p. 243.
5. Holmgren, J. (1975), *Plane Shotcrete Layers Subjected to Punch Loads*, Royal Swedish Fortifications Administration Research Dept. Report 121.4.
6. Holmgren, J. (1987), Bolt-anchored Steel Reinforced Shotcrete Linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 2, pp. 319~333.
7. Little, T. E. (1985), An Evaluation of Steel Fibre-reinforced Shotcrete for Underground Support. *Canadian Geo-technical Journal*, Vol. 22, pp. 501~507.

(접수일 2009. 10. 19 심사일 2009. 10. 28 심사완료일 2009. 11. 16)