

## 시공중 터널 슛크리트 라이닝 작용응력 측정기법 개발을 위한 수치해석적 연구 Numerical Study for Tunnel Shotcrete Lining Operated Stress Measurement Techique Development During a Construction

신휴성<sup>1)</sup>, Hyu-Seong Shin, 김동규<sup>2)</sup>, Dong-Gyou Kim, 정용수<sup>3)</sup>, Yong-Su Jung,  
황재홍<sup>4)</sup>, Jae-Hong Hwang, 배규진<sup>5)</sup>, Gyu-Jin Bae

- 1) 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 선임연구원, Senior Researcher, Underground Structure Research Div. KICT
- 2) 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 선임연구원, Senior Researcher, Underground Structure Research Div. KICT
- 3) 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 학생연구원, Research Student, Underground Structure Research Div. KICT
- 4) 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 연구원, Researcher, Underground Structure Research Div. KICT
- 5) 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 연구위원, Senior Researcher Fellow, Underground Structure Research Div. KICT

**SYNOPSIS** : In general, stress measurement of existent shotcrete lining be used by pressure cells. but, measuring instrument is lost by high pressure at shotcrete lining construction and pressure cell's measurement value have to low believability by natural conditions like curing temperature. In this study, proposed techniques to measure without utilizing sensitive stress sensor in natural condition at point that want stress of shotcrete lining after shotcrete lining construction. Executed numerical analysis to forecast stress level that interact in tunnel shotcrete lining, measured strain of hole by load action through hole in shotcrete lining. 3D FEM(finite element method) is enforced through various parameters curing time of shotcrete lining, thickness, load condition. Different model cases applied by parametic study. As analysis result, it could grasp development possibility of method that propose this time because it could examine corelation with strain by near hole of shotcrete lining and stress about load condition.

**Key Word** : Stress measurement of shotcrete lining, 3D FEM, Numerical study, corelation of stress and strain

### 1. 서 론

도로 밀집량이 높은 우리나라에서 터널의 중요성 및 사용성이 높아져 많은 터널들이 공용중이거나 시공중에 있다. 그러나 많은 수요와 더불어 터널 붕괴 및 붕락 등 각종 사고가 끊이지 않고 있는 것 또한 사실이다. 특히, 터널건설 중 터널 막장 및 후방부 붕괴/붕락은 매년 약 20개소 이상 발생하고 있으며 한 개소당 복구비는 평균 50억원 정도이므로, 연간 총 1000억원 이상의 터널 붕괴/붕락에 따른 공사 손실액이 발생하고 있다. 이와 더불어 낙반이나 막장 붕괴에 의한 막장 인부들의 인명피해 위험이 크게 증가하고 있으며, 터널 토피고 함몰에 의한 지상 교통체계가 전면 마비되거나 인접구조물들의 파손 및 손상위험이 가중되고 있다(한국건설기술연구원, 2007). 이러한 터널 붕괴사고를 사전에 예측할 수 있다면 많은 경제적, 인적 손실을 줄일 수 있을 것이다.

붕괴를 미리 예방하기 위하여 터널 1차 지보재로 사용하고 있는 슛크리트에 작용하는 응력을 추정함으로써 터널의 붕괴 징후를 파악할 수 있다. 터널 라이닝 응력 측정은 필요시 유지관리계획의 일부로서

대표단면에 대하여 반경과 접선방향으로 숏크리트 라이닝의 응력측정을 수행하는 경우도 있다(Hook, E ; Brown, E.T. 1997). 그러나 이 경우 이미 콘크리트 타설시 설치한 계측기기를 사용하는 것이 일반적이다. 또한 국내·외적으로 기존에 이미 건설된 터널 라이닝의 안정성 평가는 주로 숏크리트 라이닝의 균열 조사나 내공변위를 측정하여 수행되고 있다. 계측기가 기존 라이닝에 설치되지 않은 이미 공용중인 터널의 라이닝응력 측정 사례는 문헌조사나 국내외의 터널 전문가들과의 토론 결과 사례를 발견하기 어려웠다. 일부 국내외의 터널에서 암반의 초기응력 측정법인 플랫폼, 응력해방법, 천공 후 천공홀 주위의 변위 측정 등에 의한 라이닝응력 측정 시도가 있었으나 그 결과는 만족스럽지 못했다(한국시설안전기술공단, 2003). 표1은 기존 터널에 작용하는 현장응력 측정법의 장·단점 및 특징을 보여주고 있다.

따라서, 본 연구에서는 숏크리트 내에 직접 매설하여 계측하는 방식이 아닌 숏크리트 타설 후 임의 구간에 천공을 실시하고 천공의 외곽부 주변 변위를 복수의 설정된 방향으로 측정하고, 역해석을 이용해 숏크리트 응력을 산출해낼 수 있는 새로운 간편 현장측정기법 개발이 목표이며, 본 논문에서는 수치해석적 사전검토 결과에 대해 논한다.

표 1. 기존 터널에 작용하는 현장응력 측정법(한국시설안전기술공단, 2007)

방법	장 점	단 점	비 고
응력 해방법	서로 다른 방향의 3개의 시추공을 이용하여 완전한 응력텐서를 구할 수 있음	암반의 탄성정수가 필요하며 시추의 정확도가 요구됨, 비교적 얇은 심도에서만 시행되므로 시험을 위한 별도의 굴착이 필요함	탄선 병렬 터널의 피난 연락 갭 등에서 시행가능
플랫폼	터널 라이닝 등의 응력측정에 유리함	비교란 상태의 응력 측정에는 부적절함	공용중인 터널지반에서의 측정은 매우 곤란함
수압 파쇄법	적용심도의 제한이 없음, 암반 탄성정수가 필요 없음	주응력 중의 하나가 시추공과 평행한 것으로 가정	높은 수압을 사용하므로 공용중인 터널부근에서 적용이 다소 위험
AE법	가장 간단히 측정할 수 있음	시료의 방향성을 확인해야하며 시험오차가 클 수 있음	오차가 크다

## 2. 3차원 유한요소 해석을 이용한 매개변수 연구

### 2.1 해석모델 설정 및 해석방법

해석 모델의 제원은 실대형 실험에 사용된 라이닝 시편과 동일하게 모델링하였다. 해석 CASE는 표2와 같이 라이닝 시편의 두께별, 재령별, 재하하중으로 나누어 동일한 하중 작용 시 숏크리트 라이닝의 거동양상의 차이와 천공주변 응력과 공경변화의 상관관계를 확인하기 위하여 실시하였다.

표 2. 수치해석 CASE 분류 (총 24개 CASE)

등분포 하중			집중 하중		
콘크리트 재령	모델두께	모델명	콘크리트 재령	모델두께	모델명
1주 재령	25 cm	1W-W25-1	1주 재령	25 cm	1W-P25-1
	25 cm	1W-W25-2		25 cm	1W-P25-2
	15 cm	1W-W15-1		15 cm	1W-P15-1
	15 cm	1W-W15-2		15 cm	1W-P15-2
4주 재령	25 cm	4W-W25-1	4주 재령	25 cm	4W-P25-1
	25 cm	4W-W25-2		25 cm	4W-P25-2
	15 cm	4W-W15-1		15 cm	4W-P15-1
	15 cm	4W-W15-2		15 cm	4W-P15-2
8주 재령	25 cm	8W-W25-1	8주 재령	25 cm	8W-P25-1
	25 cm	8W-W25-2		25 cm	8W-P25-2
	15 cm	8W-W15-1		15 cm	8W-P15-1
	15 cm	8W-W15-2		15 cm	8W-P15-2

숏크리트 라이닝내 응력과 공경변화의 상관관계를 도출하기 위한 본 해석의 목적과 효율적인 해석을 위하여 3차원 유한요소법(MIDAS GTS)을 이용하였다. 숏크리트 라이닝과 라이닝 구속체는 탄성체로 가정하여 탄성해석을 실시하였다. 3차원해석의 모델링 상세도는 그림1과 같다. 또한 해석에서 사용된 숏크리트 라이닝 모델은 실험에서 사용된 모형을 1:1 비율로 동일하게 모사하였다. 천공 주변의 응력집중을 고려하고 다양한 변위값을 얻기 위하여 천공 주변의 메쉬를 조밀하게 설정하였으며, 해석시간 및 효율성을 고려하여 천공부에서 멀어 질수록 점진적으로 메쉬 사이즈를 크게 하는 등 요소밀도를 조정하였다.

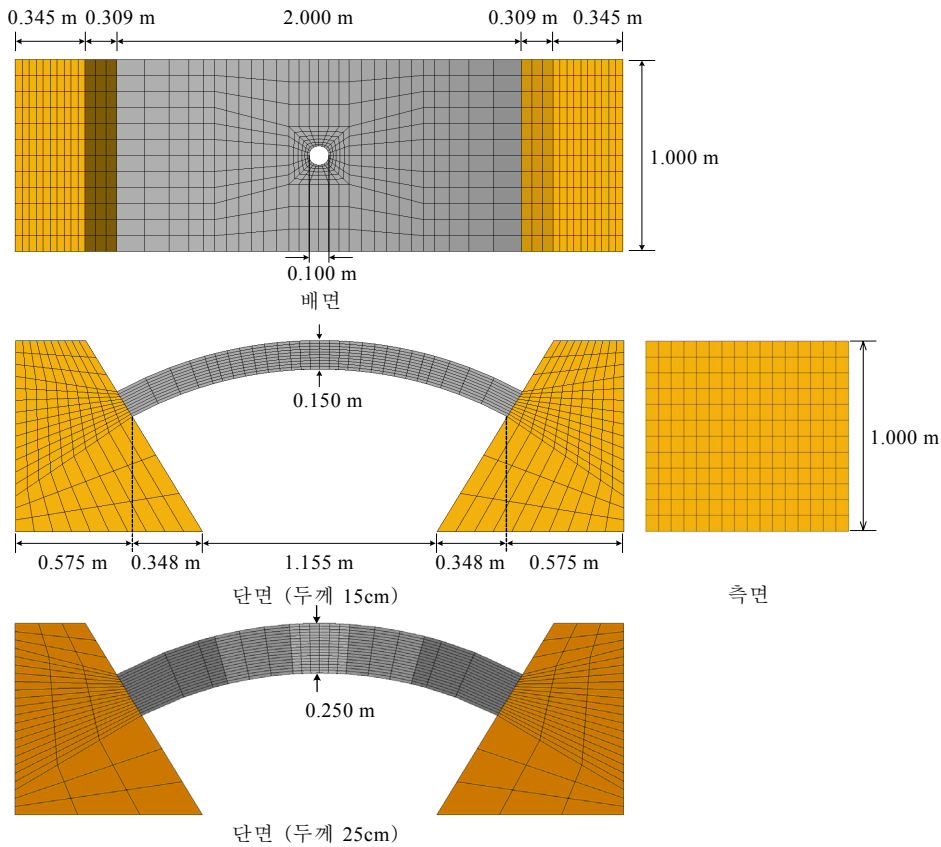


그림1. 모델링 제원

## 2.2 모델링 및 매개변수 설정

### 2.2.1 하중조건

해석에서 적용된 하중은 자중과 작용하중으로 나눌 수 있다. 자중은 연직방향(z방향)으로 재료의 단위중량에 부피가 곱해져서 요소의 각 절점에 절점하중으로 적용된다. 한편 작용하중은 해석 Case에 따라서 집중하중과 등분포 하중으로 구분된다. 실험에 적용되었던 최종 하중 값인 3ton을 슛크리트 라이닝에 재하 하였다. 집중하중 재하시 하중재하 위치는 실험의 재하위치와 동일하며, 천공중심을 기준으로 좌·우 15cm씩 이격시켜 재하하였다. 또한 등분포 하중 재하시 집중하중 재하와 마찬가지로 천공중심을 기준으로 좌·우 15cm씩 이격한 거리에 재하하고 천공중심으로부터 각각 좌·우측 구속체까지의 중앙에 위치하는 지점에 하중을 재하 하여 등분포 하중 모사를 구현하였다. 하중재하 개념도는 아래 그림2 와 같다.

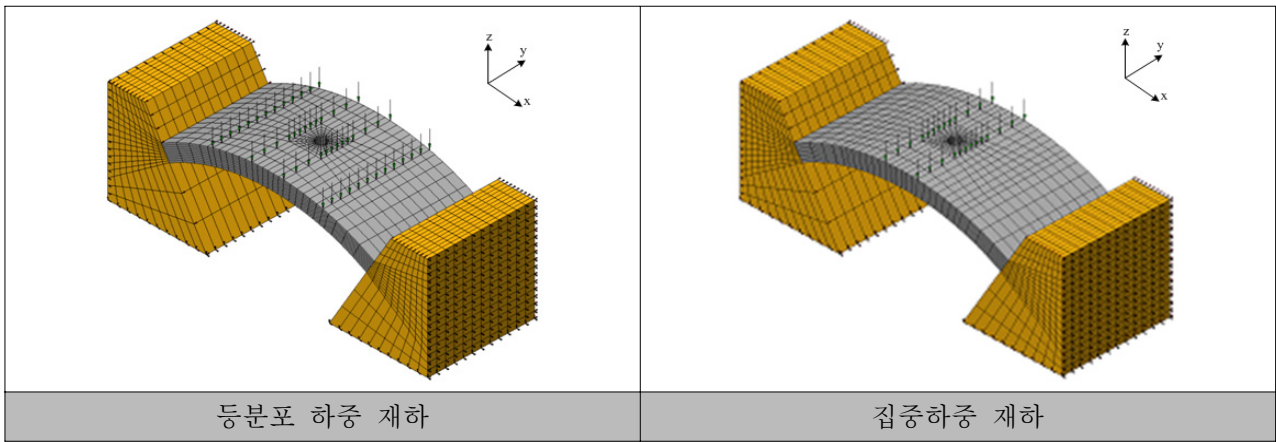


그림2. 하중재하 개념도

### 2.2.2 물성조건

해석에 사용된 물성은 표3과 같으며, 실험 시 슛크리트 라이닝 중앙부에서 천공에 의해 채취한 각 재령 및 두께에 따른 공시체를 이용한 일축압축 강도시험을 수행하여 산정하였다. 또한, 슛크리트 라이닝 시편 제작 시 성형한 공시체의 일축압축 강도시험을 실시하여 물성치 산정의 정확성을 높였다. 좌우 시편을 구속하는 강체는 경계조건 부여용이므로, 시료보다 매우 큰 탄성계수를 부여하여 강체거동을 하도록 의도하였다(표3).

표3. 수치해석 입력 물성

	스�크리트(1주)	스�크리트(4주)	스�크리트(8주)	좌우 시편 구속체
$E$ (MPa)	5550	6230	6830	$1 \times E9$
$\nu$	0.3	0.3	0.3	0.3
$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	24	24	24	68

수치해석 모델은 3차원 모델을 이용하였으며, 모델의 좌·우 및 하부경계를 고정시켜 실제 시공되는 터널의 경계조건을 모사하였다. 본 수치해석은 슛크리트 라이닝 시편의 파괴양상을 검토하기 위함인 작용하중의 증가에 따른 응력 및 공경변화간 상관관계를 검토하는 것이 목적이다. 따라서 선형

탄성해석 모델을 이용하여 수치해석을 수행하였다.

### 3. 결과 분석

#### 3.1 하중재하에 따른 천공 변형

수치해석결과로 하중재하에 따른 천공 변형 양상을 나타냈다. 천공 변형 양상을 보다 명확히 확인할 수 있게 실제 스케일의 100배로 확대하여 나타내었다. 전체적인 해석 CASE에서 하중재하에 의해 상부 배면부 천공의 변형이 하부 측면부 천공의 변형보다 크게 나타났다. Z방향으로 하중 재하 시 변형방향은 상부 배면 천공에서는 X축방향으로 수축하였고, 하부 측면 천공부에서는 Y축으로 팽창하는 경향을 나타내었다. 이는 슛크리트 라이닝 상부에 하중 재하시 천공부에 의한 자유면 형성으로 응력이 천공부 주변으로 집중되어 천공 상부에 수축이 발생한 것으로 판단된다. 반면 하부 천공부에서는 콘크리트 중립축 개념에 의하여 팽창이 발생하는 것으로 판단되었다. 그림3은 해석CASE 4W-W15의 하중재하에 따른 천공 변형양상이다.

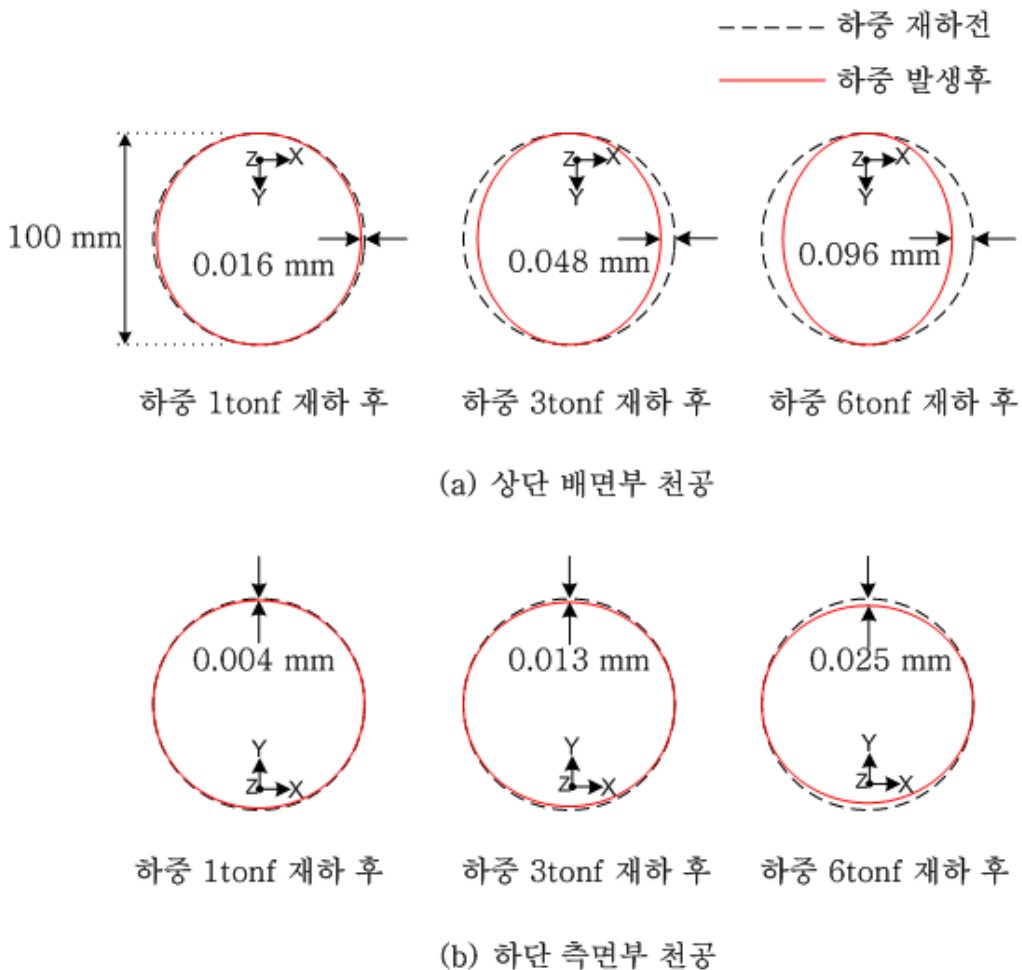


그림3. 하중재하에 따른 천공 변형

### 3.2 슛크리트 라이닝 내 응력-천공변형 관계

본 수치해석을 통해서 슛크리트 라이닝의 재령기간 및 단면두께에 따른 단면응력-상·하부 천공변형의 상관관계를 알 수 있었다. 분석방법으로는 천공의 변형 상태를 수축 및 팽창으로 나누어 검토하였다. 또한 모델이 좌우대칭조건이므로 좌측대각선 방향만을 검토하였다.

수치해석결과에 따르면, 상부천공부에서는 수평(X방향)으로 수축이 크게 발생하고, 종단(Y방향) 및 대각선(XY방향)으로는 팽창이 발생하였다. 반면 하부천공부에서는 전체적으로 팽창이 발생하였는데, 등분포하중 재하시에 X방향 및 Y방향의 변형량이 반대로 되어 하부천공변형이 균등히 분배되는 것으로 나타났다. 그러나 집중하중 재하시에는 하부 천공부의 변형이 Y방향으로 탁월하게 나타났으며, 단면두께가 작을수록 또는 재령기간이 짧을수록 큰 변형이 발생하였다. 또한 하중조건에 관계없이 모든 CASE에서 동일하게 슛크리트 라이닝 좌측 하단부에서 최대 인장 응력이 발생함을 알 수 있었다. 그림4, 그림5에서 최대 인장 응력 발생 지점의 응력과 천공주변 변형량의 상관관계를 살펴보면, 재령이 길수록 동일한 변형량에서 발생하는 최대 인장 응력값은 높았으며, 슛크리트 라이닝의 두께가 두꺼울수록 동일 변형량에서 발생하는 최대 인장 응력값은 높게 나타났다. 그러나 하부천공의 X방향 변형량은 두께가 얇을수록 최대 인장응력은 높은 것으로 나타났다.

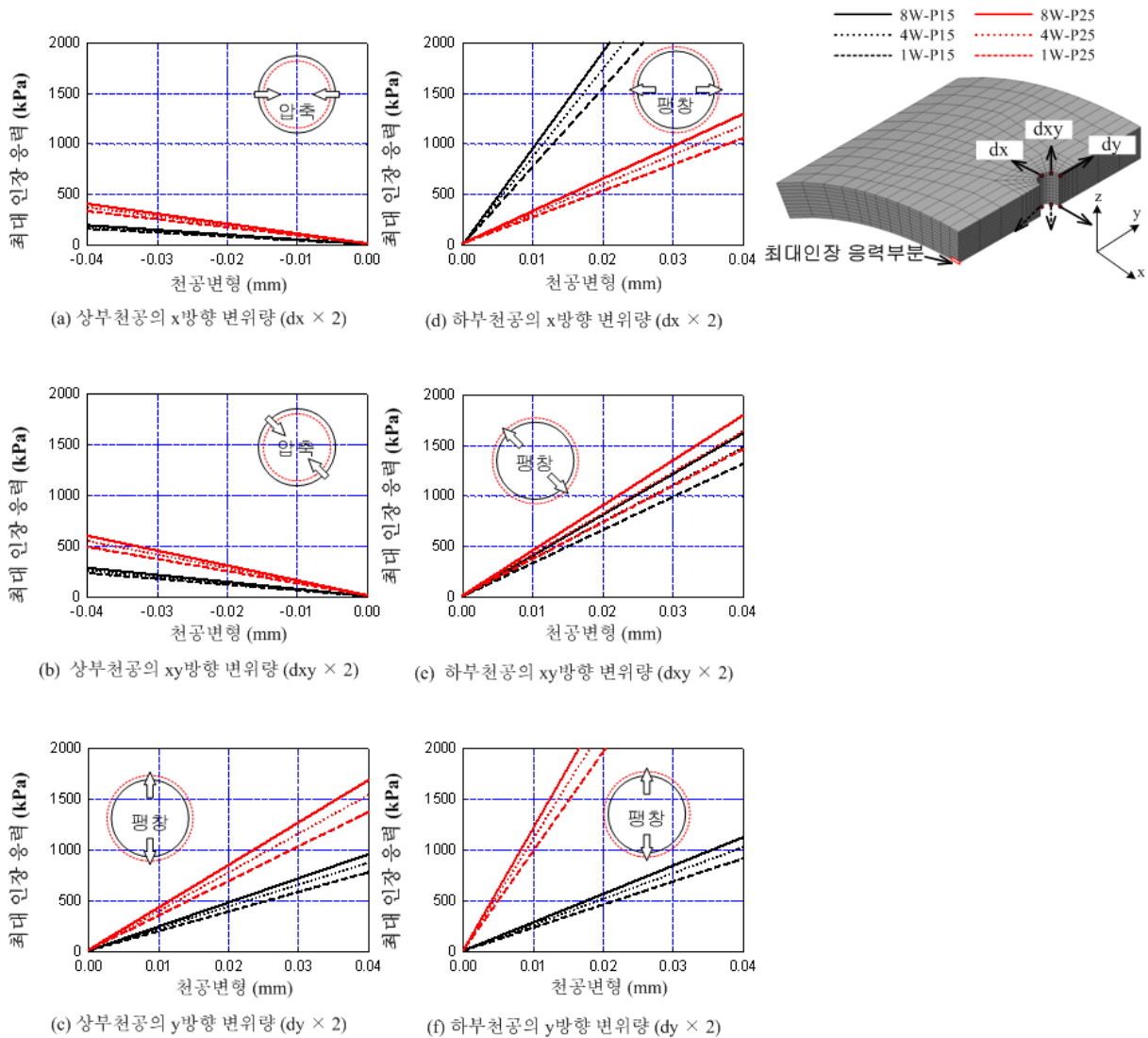


그림4. 슛크리트 라이닝 내 최대인장응력-상·하부천공변형 관계 (등분포하중)

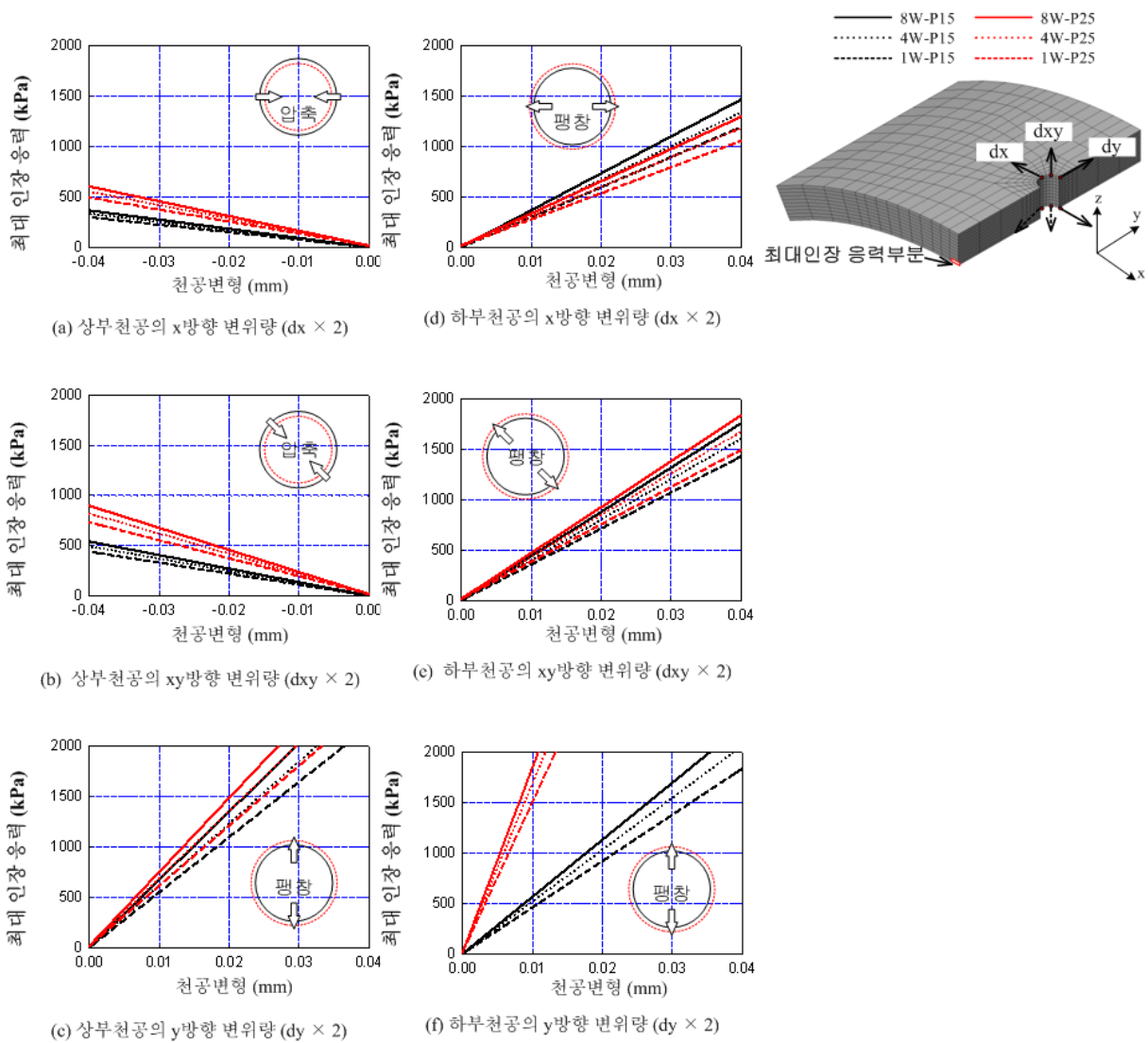


그림5. 숏크리트 라이닝 내 최대인장응력-상·하부천공변형 관계 (집중하중)

#### 4. 결론

본 논문에서는 시공 중 터널 숏크리트 라이닝에 미치는 응력상태를 파악하는 방법으로서 숏크리트 라이닝 임의의 부분에 천공 후 천공주변의 변형과 응력상태의 상관관계를 유한요소법을 이용한 매개변수 연구를 통해 파악하고자 하였다. 해석결과 최대 인장응력이 발생 시 상부천공부에서는 수평(X방향)으로 압축이 크게 발생하였고, 종단(Y방향) 및 대각선(XY방향)으로는 팽창이 발생함을 알 수 있었다. 하부천공부에서는 전체적으로 팽창이 발생하였는데, 등분포 하중 재하시에는 X방향 및 Y방향의 변형량이 반대로 되어 하부천공변형이 균등히 분배되는 것으로 나타났다. 또한, 단면두께가 얇을수록 또는 재령기간이 짧을수록 숏크리트 라이닝의 천공 주변에서는 동일한 천공 변형량에서 더욱 작은 인장응력이 발생하는 것으로 나타났다. 최종적으로 본 수치해석을 통해서 숏크리트 배면에 작용하는 응력수준과 천공부에서 발생하는 변형경향과 수준의 상관관계 특성을 파악할 수 있었다.

## 5. 참고문헌

1. (사) 한국터널공학회, 시설안전기술공단, “역해석을 이용한 터널주면 이완하중의 추정기법의 개발” 2006
2. 시설안전기술공단, “공용중인 터널(산악터널)에 작용하는 지반응력 측정에 관한 연구”, 2003
3. 이인모 “암반역학의 원리”, 2001
4. 한국건설기술연구원, “터널공사 재해 최소화 및 예방기술개발”, 2007
5. C. Liunggren, Yanting Chang, T. Janson, R. Christiansson, 2003.7. "An overview of rock stress measurement methods" Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.
6. Hoek.E, and Brown. E.T, 1997. "Practical Estimates of Rock Mass Strength"Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.