

## 인공균열 주위의 변형과 터널 슛크리트 라이닝 응력간의 상관관계에 대한 수치해석적 검토

### Numerical approach on relationship between deformation of artificial crack and stress acting on tunnel shotcrete lining

신휴성<sup>1)</sup>, Hyu-Soung Shin, 권영철<sup>2)</sup>, Young-Cheul Kwon, 배규진<sup>3)</sup>, Gyu-Jin Bae, 김경신<sup>4)</sup>, Kyung-Shin Kim, 김홍택<sup>5)</sup>, Hong-Taek Kim

- 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 연구위원, Senior Researcher Fellow, Underground Structure Research Div. KICT
- 4) 홍익대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hongik University
- 5) 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hongik University

**SYNOPSIS** : The stresses acting on shotcrete lining of tunnel have been measured virtually by monitoring instruments installed during construction. However, the malfunction of instrument and the lack of consistency of signal have always been controversial, but re-installation of instrument after construction of tunnel lining is practically impossible. Therefore, authors have carried out the study to develop a new technique for estimating the stress acting on shotcrete lining during and after construction. In the technique, stresses of shotcrete lining can be estimate by the measurement of deformation of free face. Therefore, the relationships between the stresses of shotcrete lining and deformation of free surface are indispensable factor. In this paper, the parametric study using 2D FEM analysis was carried out to estimate the relationships between the stress level acting on the tunnel shotcrete lining and the deformation near the free face (e.g. artificial crack in this study). The distribution of stresses of shotcrete lining is also investigated in this study as the preliminary investigation for the large-scale tunnel lining test and detailed 3D FEM analysis.

**Keywords** : Stress of shotcrete lining, artificial crack, 2D FEM analysis

## 1. 서론

터널 라이닝응력 측정은 필요시 유지관리계획의 일부로서 대표단면에 대하여 반경과 접선방향으로 슛크리트 라이닝의 응력측정을 수행하고 있다. 이 경우에도 이미 슛크리트 타설시 설치한 계측기기를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 이러한 슛크리트에 매입하는 계측기기의 사용은 시그널의 일관성 및 신뢰성에 있어 문제점이 지적되고 있으며, 슛크리트 타설시 타설압에 의한 응력계의 손실이 우려된다. 또한 일단 슛크리트가 타설된 이후에는 재매설이 불가능해 공용 중의 터널에서는 적용이 제한적이라는 단점이 지적되고 있다.

현재 일상계측관리는 천단침하를 계측하는 변위 관리가 주를 이루며 변위 관리 기준치를 이용하여

위험 수준을 평가하고 있으나 터널의 변위는 안전도와는 직접인 관계를 갖고 있지는 못하다. 따라서 한국건설기술연구원에서는 슛크리트 타설 후 관심구간에 자유면을 형성하고 굴진에 따른 변형을 측정하며 이를 이용하여 슛크리트에 작용하는 응력을 추정하는 기법을 개발하고자 하는 연구를 수행하고 있다. 최종적으로는 파괴와 직접적으로 결부할 수 있는 슛크리트의 강도를 관리 기준치로 활용하며 동시에 정량적인 파괴 안전을 개념을 이용하여 시공 관리가 가능하도록 하는 방법을 개발하는 것을 본 연구의 목적으로 하고 있다. 이전의 연구에서 자유면 형성에는 시추공을 이용하는 방법(한국건설기술연구원, 2007, 신휴성 등 2008a)을 사용하였으나, 현재는 변형의 방향성을 단순화 시킬 수 있으며 응력 재하에 의한 변형의 민감도를 향상시킬 수 있는 인공균열 방법을 적용하여 새로운 검토를 실시하고 있다.

인공균열 방식의 적용성과 인공 균열 인근의 변형과 응력의 관계를 정량적으로 규정하기 위하여 먼저 실제 슛크리트 타설면에 형성된 인공 균열 인근의 변형 측정이 가능한지를 검토하는 현장 적합성 연구(신휴성 등, 2008)를 수행하였다. 이 결과를 바탕으로 현장 적합성을 확인한 이후 사전검토 성격인 2차원 유한요소해석, 실험대형 실험 및 3차원 상세해석을 계획하였다. 본 논문에서는 슛크리트 라이닝을 탄성체로 가정한 2차원 유한요소해석(MIDAS GTS)을 이용한 검토와 고찰을 기술하며, 인공 균열을 이용한 응력 추정기법이 현실적으로 타당한지 여부와 자유면의 변형과 슛크리트 라이닝 응력 관계에 대한 분석 결과에 대해 기술하고자 한다.

## 2. 슛크리트 라이닝 응력추정을 위한 2차원 유한요소 해석

### 2.1 수치해석 개요

2차원 수치해석은 실험대형 실험의 사전평가 연구로 실시하였다. 본 해석에서는 슛크리트 라이닝의 파괴거동이 아닌 인공균열의 변형에 따른 슛크리트 라이닝의 응력 추정을 위해 라이닝을 탄성체로 가정한 탄성해석을 실시하였으며, 해석에 사용된 슛크리트 라이닝 모델은 실험대형 실험 모형과 1:1 비율로 동일하게 구성하였으며, 결과적으로 하중증가에 따른 인공균열의 변형과 응력의 상관관계를 나타낸다.

### 2.2 수치해석 모델링

그림 1에서는 모델링의 개념도 및 하중조건을 나타낸다. 슛크리트 라이닝의 모델링에서는 변형률이 일정한 삼각형 요소를 이용하였고, 라이닝 치수는 폭 2m, 각도 60°, 두께 25cm, 20cm, 15cm로 모델링 하였다. 인공균열의 치수는 실험대형 실험에 적용한 인공균열 치수와 같으며, 깊이 5cm, 폭 5mm의 같은 치수로 모사하여 하중재하 후의 변형을 확인하였다.

수치해석의 모델은 2가지 종류로 인공균열의 변형을 통한 라이닝의 응력상태를 파악하기 위하여 인공균열이 없는 경우(그림1(a))와 인공균열이 있는 경우(그림1(b))를 모델링 하였다. 3차원 해석 시에는 한번의 모델링으로 인공균열의 변형과 라이닝의 응력상태를 동시에 파악 할 수 있지만, 2차원의 경우는 인공균열을 모델링하면 응력상태가 변화하여 실제 현장조건과 부합하지 않는다. 본 연구에서는 인공균열이 영향을 미치지 않을 정도로 충분히 거리가 있는 지점의 응력 추정을 상정하고 있으므로 2차원해석에서는 이를 동시에 고려하기 어렵다. 따라서 인공균열이 있는 경우에는 자유면 인근의 변형을, 인공균열이 없는 경우에는 주어진 하중에 대해 인공균열과 충분히 거리를 둔 지점의 응력을 측정하는 경우로 두 가지 모델을 결정하였다.

해석에 적용된 하중은 자중과 작용하중을 재하 했으며, 작용하중은 케이스에 따라서 등분포하중과 집중하중으로 나뉘게 되며, 라이닝 상부 중심 절점에 하중을 재하한 집중하중(그림 1에서①), 라이닝 상부 전체에 하중을 가한 등분포하중(그림 1에서②)을 나타냈다. 최종 하중 값으로 10tonf를 슛크리트 라이닝에 1tonf씩 10단계로 재하 하여 하중 증가에 따른 인공균열의 변형과 라이닝의 응력상태를 해석 하였으

며, 경계조건으로는 슛크리트 라이닝 시편의 좌·우 양단을 수평, 수직 변위를 구속하고 회전을 허용하도록 하였다.

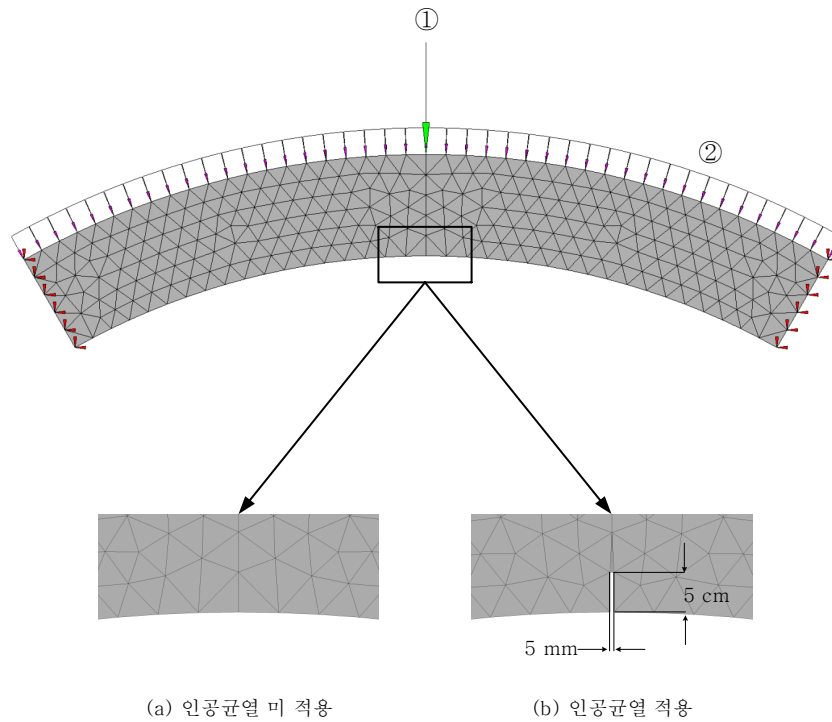


그림 1. 2차원 수치해석의 모델링 개념도 (하중재하 및 경계조건 포함)

### 2.3 해석 파라미터의 결정

2차원 수치해석 파라미터는 슛크리트 라이닝의 역학거동에 크게 영향을 미치는 강도, 두께 및 하중재하로 구분하여 수치해석을 실시하였고, 슛크리트 라이닝의 강도는 저장도(21MPa), 중강도(28MPa), 고강도(35MPa)를 갖는 경우를 상정하였다. 강도조건에 따른 탄성계수와 포아송비, 단위중량은 표 1과 같다.

표 1. 2차원 수치해석 입력 물성치

	스�크리트 (저강도)	스�크리트 (중강도)	스�크리트 (고강도)
$E$ (MPa)	4,154	4,395	4,621
$\nu$	0.3	0.3	0.3
$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	24.5	24.5	24.5

하중재하방식은 전술한바와 같이 등분포하중과 집중하중으로 구분하였고, 라이닝 두께는 15, 20, 25cm의 경우를, 인공균열의 변형과 라이닝의 응력측정을 위해 균열의 유무로 나누어 수치해석을 실시하였다. 하중, 강도, 라이닝 두께별로 최대 인장응력과 최대 압축응력의 분포와 인공균열의 변형 및 라이닝의 응력상태를 고찰하였다. 해석 Case는 표2에서 정리한 바와 같이 총 36개로 나누어 해석을 실시하였다.

표 2. 2차원 수치해석 Case

등분포(D)			집중하중(P)		
강도	두께	균열의 유무	강도	두께	균열의 유무
35MPa	25cm	35MPa-D25-NC	35MPa	25cm	35MPa-P25-NC
		35MPa-D25-YC			35MPa-P25-YC
	20cm	35MPa-D20-NC		20cm	35MPa-P20-NC
		35MPa-D20-YC			35MPa-P20-YC
	15cm	35MPa-D15-NC		15cm	35MPa-P15-NC
		35MPa-D15-YC			35MPa-P15-YC
28MPa	25cm	28MPa-D25-NC	28MPa	25cm	28MPa-P25-NC
		28MPa-D25-YC			28MPa-P25-YC
	20cm	28MPa-D20-NC		20cm	28MPa-P20-NC
		28MPa-D20-YC			28MPa-P20-YC
	15cm	28MPa-D15-NC		15cm	28MPa-P15-NC
		28MPa-D15-YC			28MPa-P15-YC
21MPa	25cm	21MPa-D25-NC	21MPa	25cm	21MPa-P25-NC
		21MPa-D25-YC			21MPa-P25-YC
	20cm	21MPa-D20-NC		20cm	21MPa-P20-NC
		21MPa-D20-YC			21MPa-P20-YC
	15cm	21MPa-D15-NC		15cm	21MPa-P15-NC
		21MPa-D15-YC			21MPa-P15-YC

NC : 인공균열 미적용 숏크리트 라이닝

YC : 인공균열 적용 숏크리트 라이닝

### 3. 2차원 수치해석 결과

2차원 수치해석 결과는 수평방향(x방향) 응력, 인공균열의 수평방향 변형으로 정리하였다. 응력 측정 지점은 그림 2와 같으며, 숏크리트 라이닝의 중심축에서 상부면과 하부면에서 최대응력 값을 취득하고 변형측정지점은 인공균열이 있는 숏크리트 라이닝의 하부면에서 상재하중에 따른 균열폭의 변화를 취득하였다.

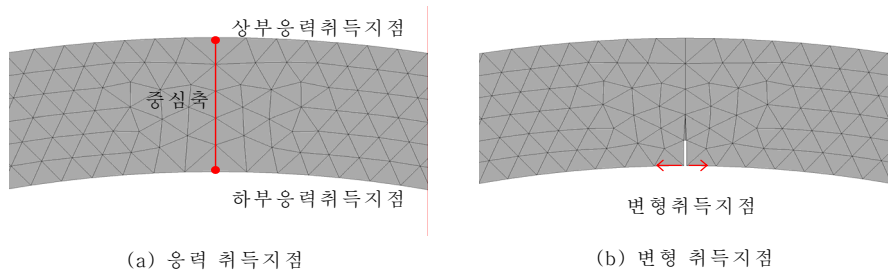


그림 2. 응력 측정지점

숏크리트 라이닝에 하중 재하시 라이닝의 최대 응력값을 측정 하기위해 응력은 최대, 최소 주응력을 측정해야한다. 하지만 실 대형 실험에서 스트레인 게이지는 한 방향의 변형을 값을 취하므로 동일한 조건에서 검토하기 위해, 수평방향의 응력으로 결과를 정리하였다. 숏크리트 라이닝의 응력을 측정한 두 지점 즉, 중심축의 상, 하부 절점은 하중재하 방향과 일치하므로 전단력이 발생하지 않는다. 따라서 수평방향(x축) 응력이 주응력 값과 같은 값을 나타내므로 수평방향의 응력이 주응력을 대신 할 수 있다. 인공균열의 변형은 균열폭을 측정해야 하므로 수평방향 값으로 취득하였다. 수치해석 결과 수평방향 응

력은 최대주응력 값, 압축응력은 최소주응력과 비교해 일치한 응력값을 나타내었다.

### 3.1 하중별 해석결과

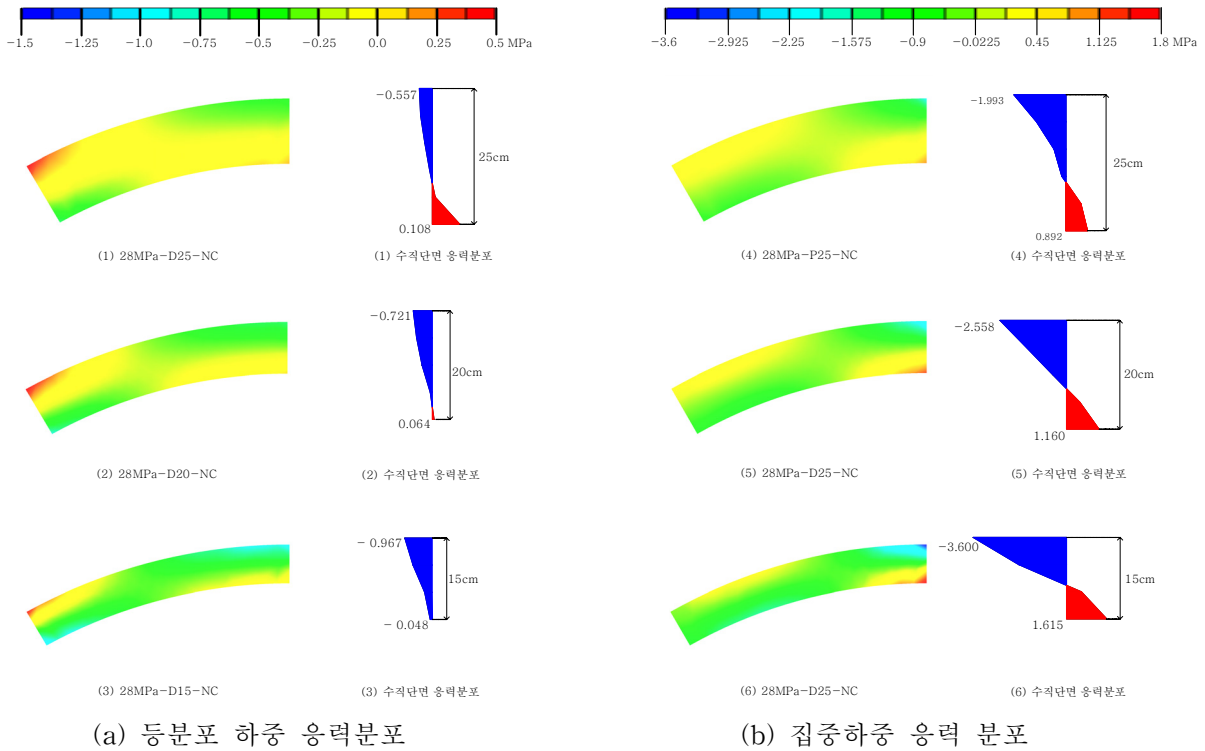


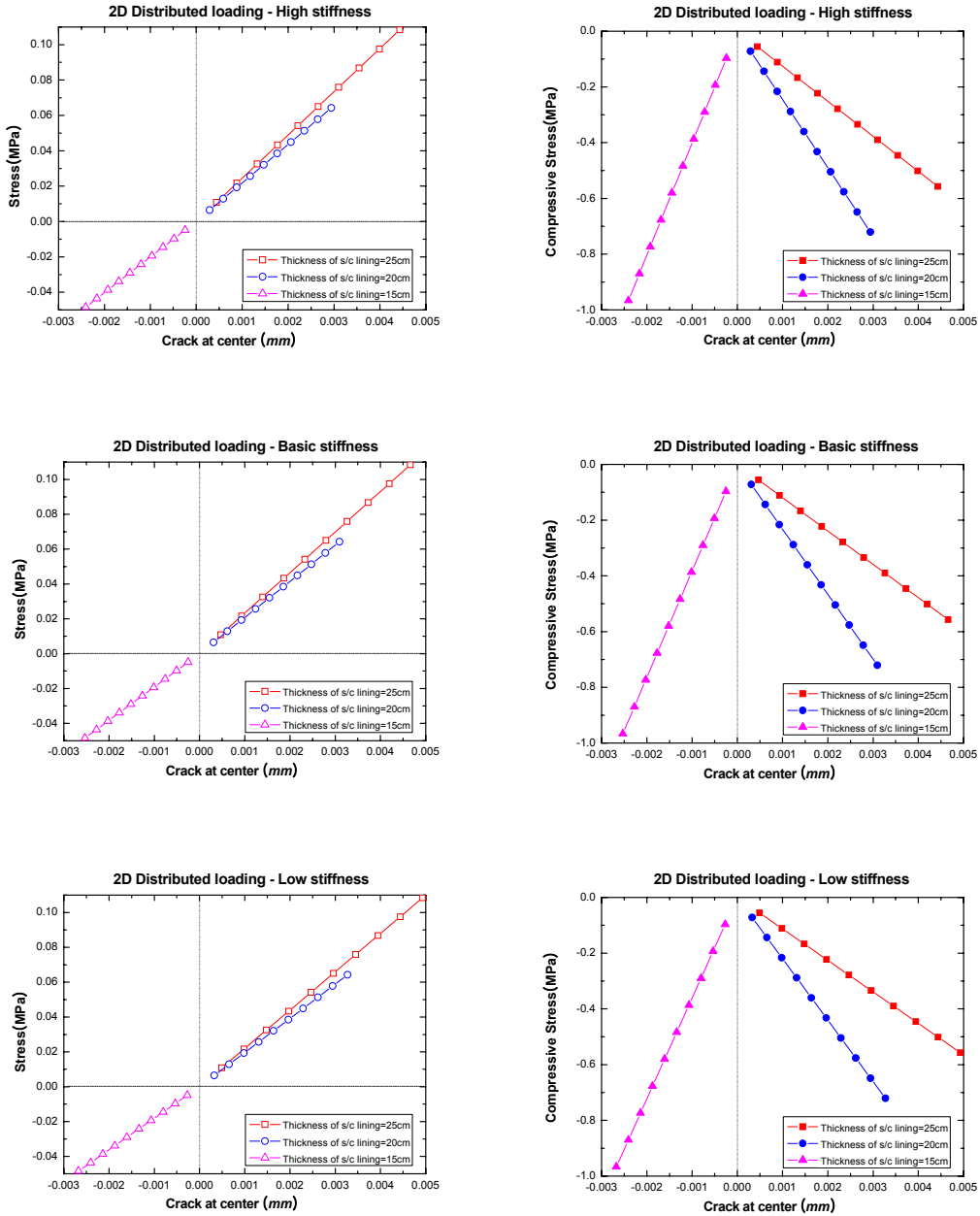
그림 3. 하중별 응력 분포도

그림 3에서는 최종 하중값 10tonf이 적용된 후 중강도 슛크리트 라이닝의 응력분포를 두께별로 나타내며, 좌우대칭을 이루고 있어 슛크리트 라이닝의 반단면만을 정리하였다. 응력분포는 인장응력값이 클수록 적색을 나타내며 압축응력값이 클수록 청색에 가까운 색으로 표현하였다. 고강도, 저강도의 경우에도 중강도 응력분포와 같은 응력분포를 나타낸다.

등분포하중의 경우 중심축 상부면은 압축응력이 발생하였고, 하부면은 상부면 압축응력의 5%정도의 인장응력값이 산출되었다. 두께 15cm에서는 인장응력이 아닌 압축응력이 0.04 MPa정도가 산출되었다. 수치해석을 실시하기 전에 하부면에서 인장응력이 발생하리라는 예상과는 달리 슛크리트 라이닝의 하부면의 응력분포가 중심부에서는 0에 가까운 값을 나타내었다. 곡률이 없는 단순보의 경우 등분포하중 case와 같은 조건으로 해석을 실시하면 라이닝 중심축 하부면에서는 인장 응력이 발생한다. 하지만 수치해석을 실시한 슛크리트 라이닝은 곡률을 포함한 아칭형의 구조물이므로 하중 재하시 아칭현상에 의해 중심축 하부면에서 응력분포가 집중되지 않았다.

집중하중의 경우 라이닝 두께가 감소할수록 라이닝 중심축의 응력값은 압축응력과 인장응력 모두 증가하는 경향을 보이고 있다 하중이 한 절점에서만 작용하여 등분포하중에 비해 응력분포가 넓게 퍼지지 않고 중심축에 집중적으로 이루는 것을 확인 할 수 있다. 중심축 하부면에서도 집중하중은 아칭효과의 영향을 받지 않아 두께가 증가할수록 인장응력값이 커지는 결과를 보였다. 최대 수평응력 값은 등분포하중에 비해 크게 발생하며 등분포하중의 응력에 상부면은 10배에 가까운 값, 하부면은 3배정도 크게 발생하였다.

### 3.2 응력-변형과의 상관관계



(a) 하부면 응력-변형 그래프

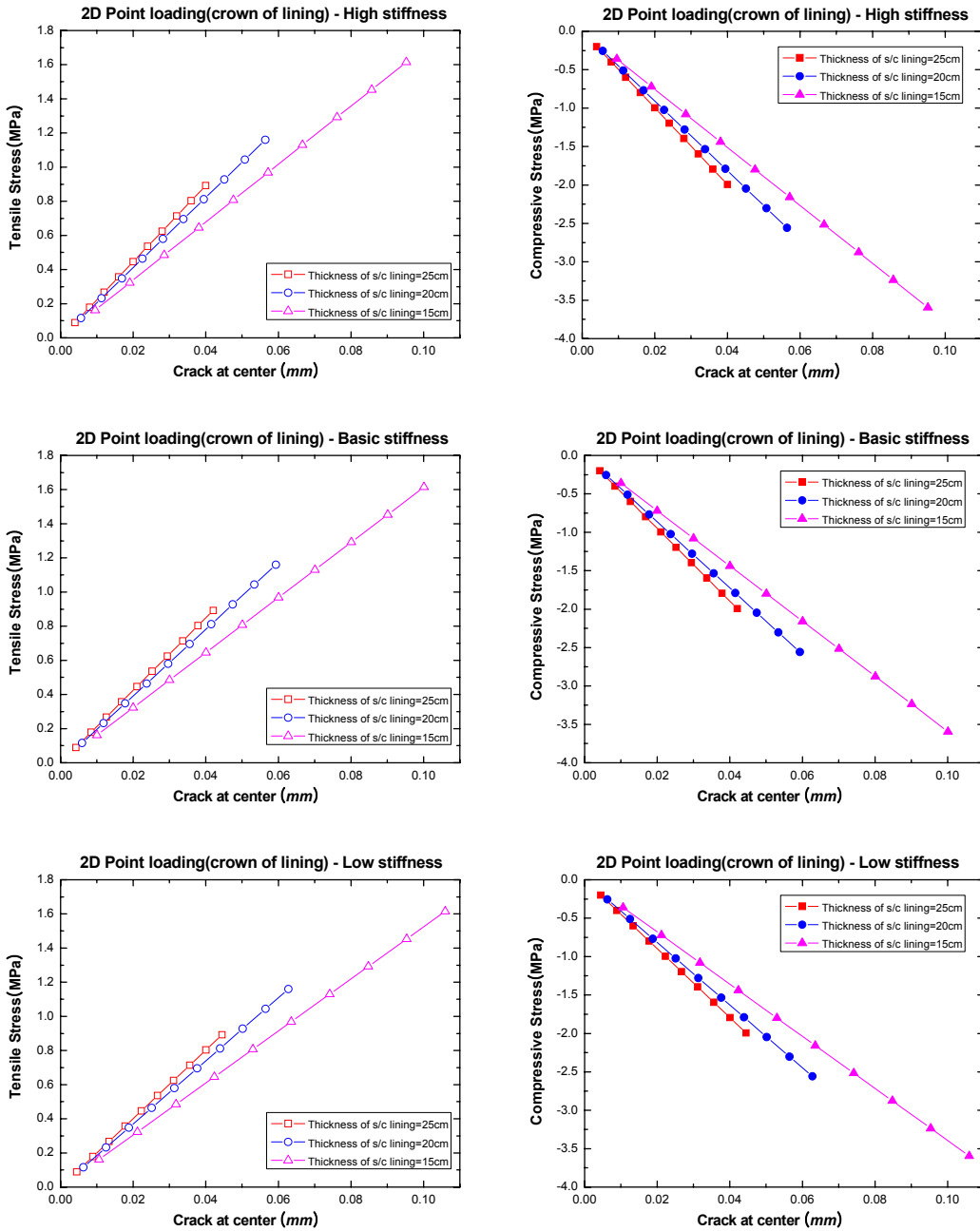
(b) 상부면 응력-변형 그래프

그림 4. 등분포하중의 응력-변형 그래프

그림 4에서는 등분포하중 조건에 따른 응력-변형 그래프를 인장응력은 정(+), 압축응력은 부(-)로 표기하여 나타내었다. 강도가 감소할수록 인공균열 폭은 증가하였고, 응력수치는 변화가 크게 나타나지 않았다. 상부응력취득지점(그림 4(b))에서 두께가 줄어들수록 압축응력값은 증가하고 균열의 변형은 감소하는 경향을 나타냈다. 상부응력취득지점(그림 4(b))에서의 두께 15cm 경우는 응력과 변형거동 모두 부(-)의 방향을 띄고 있다. 그림 3(a)에서 확인하였듯이 두께 15cm의 경우 아칭현상에 의해 인장응력이 아닌 압축응력이 발생하여, 인공균열 또한 압축응력에 의해 균열폭이 부(-)의 방향을 나타낸 것으로 판단된

다.

그림 5에서는 집중하중의 응력-변형 그래프를 나타내었다. 강도에 따른 변화로 강도가 감소할수록 인 공균열 폭이 증가하는 경향을 나타내며, 두께에 따른 변화는 상부응력취득지점(그림 5(a)), 하부응력측정 지점(그림 5(b)) 모두 두께가 감소할수록 응력과 균열폭이 증가하는 경향을 나타냈다.



(a) 하부면 응력-변형 그래프

(b) 상부면 응력-변형 그래프

그림 5. 집중하중의 응력-변형 그래프

## 4. 결론

2차원 수치해석을 통해 인공 균열을 이용한 슛크리트에 작용하는 응력 추정기법을 검토하였다. 인공균열(자유면)인근의 변형과 응력상태의 상관관계를 검토하기 위하여, 강도 및 두께, 하중재하를 해석 파라미터를 사용하여 라이닝의 역학거동을 파악하였다. 응력-변형의 상관관계를 파악한 결과, 강도 조건에 따른 변화는 강도가 감소할수록 인공균열 폭은 증가하였고, 응력수치의 변화가 크게 나타나지 않았다. 재하조건 및 두께에 따른 변화는 등분포하중 재하시 상부응력취득지점에서 압축응력을, 아칭현상에 의해 라이닝 응력분포가 하부응력측정지점에서 집중하중과는 다른 경향을 취득하였다. 25cm, 20cm의 경우 인장응력을 취득하였고, 증가된 균열폭을 취득하였으며, 15cm의 경우에는 압축응력이 취득되어 감소된 균열의 폭을 취득하였다. 하부면에서 응력-변형 거동은 두께 25cm의 경우 20cm에 비해 인장응력과 변형이 증가 하였으며, 상부면에서 응력-변형 거동은 두께 25cm의 경우 20cm에 비해 압축응력과 변형이 감소하였다. 15cm의 경우 하부면 압축응력으로 인한 균열 폭의 감소로 인한 다른 거동을 파악 하였다. 집중하중의 응력-변형 거동은 상부응력취득지점에서 압축응력을, 하부응력측정지점인장응력을 취득하였고, 두 지점 모두 두께가 감소할수록 응력과 균열 폭이 증가하는 경향을 나타냈다. 추후에 정량적인 상관관계를 도출하기 위해 실험과 3차원 수치해석이 이루어져야 할 것이며, 본 수치해석을 통해 인공균열(자유면)인근의 변형을 통한 응력추정의 가능성을 확인 할 수 있었다.

## 참고문헌

1. 한국건설기술연구원(2007), 터널공사 재해 최소화 및 예방기술 개발(IV), pp.121~198.
2. 신휴성 외4인(2008a), “시공중 터널 슛크리트 라이닝 작용응력 측정기법 개발을 위한 수치해석적 연구”, 한국지반공학회 2008 춘계 학술발표회 논문집, pp. 754~761.
3. 신휴성 외4인(2008b), “터널 시공 중 슛크리트 라이닝 작용응력 측정방안 제안 및 현장 적용성 검토”, 대한토목학회 정기 학술발표회, CD-rom.
4. MIDAS GTS(2007), Basic&Advanced Tutorials.