모형실험을 통한 공동규모와 절리 방향성에 따른 공동배면의 응력전이 특성에 대한 연구

A Study on the Characteristics of Stress Transfer around Cavern due to Cavern size and Rock Joint Orientation by Laboratory Model Test

김상환[1], Sang-Hwan Kim, 신범석[2], Beom-Seok Shin

[1] 호서대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hoseo University
[2] 호서대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hoseo University

SYNOPSIS : This paper presents the characteristics of stress transfer around carven due to cavern size and rock joint properties by laboratory model test. In order to perform this study, eight different scaled model tests were carried out according to excavation stage. The limited numerical analysis were also performed to verify the model test results.

The amount of stress transfer around the cavern is increased and then decreased by longitudinal arching effect according to tunnel excavation. It is founded that the stress developed around the cavern during excavation is increased when the cavern size and joint orientation are increased. It is also investigated that shear behaviour (such as stress, deformation) developed around cavern is considerably depended on the characteristic of fill material, dip and direction of joints. It is suggested that the behaviour will be verified throughout the 3D numerical prediction.

Keywords : Anisotropy Rock, Cavern, Joint Orientation, Stress Transfer, Laboratory Model Test

1. 서 론

우리나라는 국토의 70%가 산지인 국가 특성상 한정된 공간에서 폭발적인 인구의 증가는 지상 공간의 포화를 불러왔으며 제약된 공간에 대한 공간적 문제로 사회기반시설의 급속한 확충은 불가능한 상황이다. 따라서 지하공간건설에 대한 관심이 집중되고 있는 실정이며 시공간적 문제점을 해결하기 위해 지하 공간에 대한 특성을 파악하는 것이 시급하다할 수 있다. 이러한 추세를 반영하듯 지하 공간의 활용이 증대되고 있으며, 이에 따른 지하구조물의 설계 및 안정에 관한 연구가 진행 중이다. 그간에 사회간접시설인 도로, 철도, 전력, 통신시설 등 소단면 터널건설에 급속한 발전으로 양과 규모면에서 국제적 상위위치에 있으나 지하 공간 건설이 대형・대단면화 되어감에 따라 이를 뒷받침할 획기적 연구나 시공실적이 국외에 비하여 상당히 미비한 상태이다. 이러한 지하 대공간 건설의 대상이 되는 암반은 단층이나 절리, 층리, 균열과 같은 다양한 불연속면을 포함하고 있으며 이들 불연속면의 기하학적 형태와 역학적 특성은 지하구조물의 안정성에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 불연속면의 특성을 효과적으로 해석에 반영할 수 있는 해석기법의 확립이 필수적이며 이에 대한 연구와 시공은 단시간 내에 이룰 수 없는 작업이므로 이에 대한 많은 연구개발이 필요한 실정이다.

지하 공간에 대한 연구는 국내의 경우 이방성 암반내 공동 굴착 과정에서의 주위 암반 거동에 관한 축척모형실험 및 수치해석을 실시한 연구(이희근 외 1, 1990)가 있었으며 터널 굴착에서 불연속면에 의한 공동주변 암반블록의 안정성 해석 연구(송재준 외 1, 1996)도 있었다. 또한 지하공동의 형상과 규모가 공동안정성에 미치는 영향에 관한 연구(박상찬 외 1, 1998) 등과 같이 축소모형실험 및 수치해석, 안정성 해석과 같은 많은 연구가 있었다.

이러한 연구들은 대부분 공동에 작용하는 변위에 초점을 맞춘 연구들로 공동 자체의 안정성을 높이는데 적용할 수는 있으나 공동 굴착시 불확실한 굴착면의 안정성에 적용하기에는 미흡한 점이 있다.

본 연구에서는 공동 굴착시 공동 규모와 절리 방향성에 따라 굴착배면에 전달되는 배면응력의 양상을 파악하고자 실험을 실시하였으며 수치해석을 통하여 검증하였다.

2. 이론적 배경

2.1 암반의 불연속면에 의한 이방성

암반은 불연속면을 포함하는 연속체 또는 불연속체로서 이방성을 갖는다. 이러한 이방성은 층리, 균열, 편리 등의 암석 고유의 이방성에 의한 것과 암체 형성 후에 응력을 비등방으로 받았거나 절리, 파쇄, 단층 등으로 인하여 발생된 이방성으로 크게 나눌 수 있다. 실제로 암반은 단단한 암석과 상대적으로 변형성이 큰 층리, 절리, 습곡 등의 불연속면으로 구성되어 있으며, 암반의 거동은 암층의 생성원인, 절리상태, 풍화정도, 지하수, 초기응력 상태 등에 영향을 받는다. 암반내 구조물 주변의 응력-변형 거동에 큰 영향을 미치는 불연속면은 전체적으로 암반의 강도를 감소시켜 지하구조물의 불안정성을 초래할 수 있다. 이렇듯 암반의 이방성은 암반내에 지하공간, 암반사면, 암반상의 기초 등과 같은 구조물 설치시 연속체로서 거동하지 않고, 암반내의 불연속면에 의하여 거동하게 된다. 실제적으로 암반내 불연속면에 의하여 거동하게 된다. 실제적으로 암반내 구조물의 파괴는 대부분의 경우 불연속면을 따라 발생하므로, 암반내 불연속면은 지하구조물의 설계 및 안정성 해석시 매우 중요한 요소이다(이승호, 1997).

그림 1에서 보듯이 암반은 규모가 커질수록 해석 대상 영역에 포함되는 절리의 수는 점점 많아진다. 이에 따라 해석 대상 암반의 규모도 함께 커져 암반을 무결암으로부터 몇 개의 절리를 포함하는 불연속암반 그리고 무수히 많은 절리를 포함하는 절리성 연속체 암반 등으로 생각할 수 있음을 보여주고 있다.

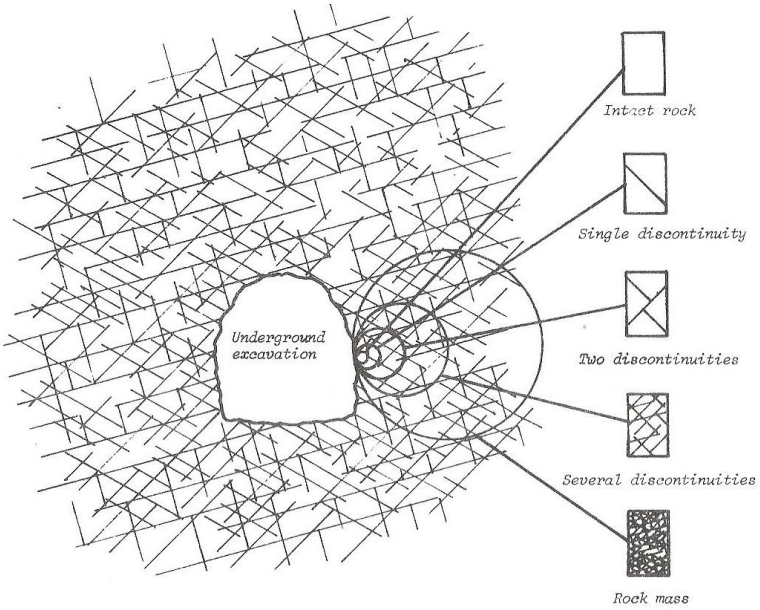


그림 1. Idealised diagram showing the transition from intact rock to a heavily jointed rock mass with increasing sample size(E. Hoek & Brown, 1980)

2.2 굴착에 따른 공동에서의 아칭현상

지하구조물의 시공은 기존의 자연에 존재하는 평형을 깨뜨려 새로운 평형상태에 이르게 하는 과정으로 공동을 굴착하면 지반의 초기응력에 의해서 굴착 결계부를 따라 변형이 발생하게 된다. 공동 굴착시

터널 막장면의 종방향(Longitudinal Direction) 및 횡방향(Transverse Direction)으로 지반 초기응력의 일부가 전이되게 된다. 이로 인해 굴착의 상당량을 지지하게 되어 막장면에는 변형이 발생하더라도 주변 지반은 변형이 발생하지 않는다. 이러한 응력의 재분배 현상을 아칭효과(Arching Effect)라 하며 (Terzaghi, 1943) 지반 내에 파쇄대가 존재할 경우 이러한 아칭효과에 영향을 더해주게 된다.

아칭효과는 종방향 및 횡방향으로 하중이 전이되어 무지보 터널 막장이 일정시간동안 자립할 수 있게 한다. 이러한 종방향 및 횡방향 아칭은 굴착시 형성되지만 막장면 후방으로 멀어질수록 종방향 아칭은 사라지며 횡방향 아칭만이 남게 된다. 따라서 막장면 주변 종방향 아칭은 막장면 안정성에 밀접한 관계가 있다. 그림 2는 터널의 3차원 아칭작용에 대하여 보여주며 그림 3은 터널 주변지반의 응력전이를 보여준다.

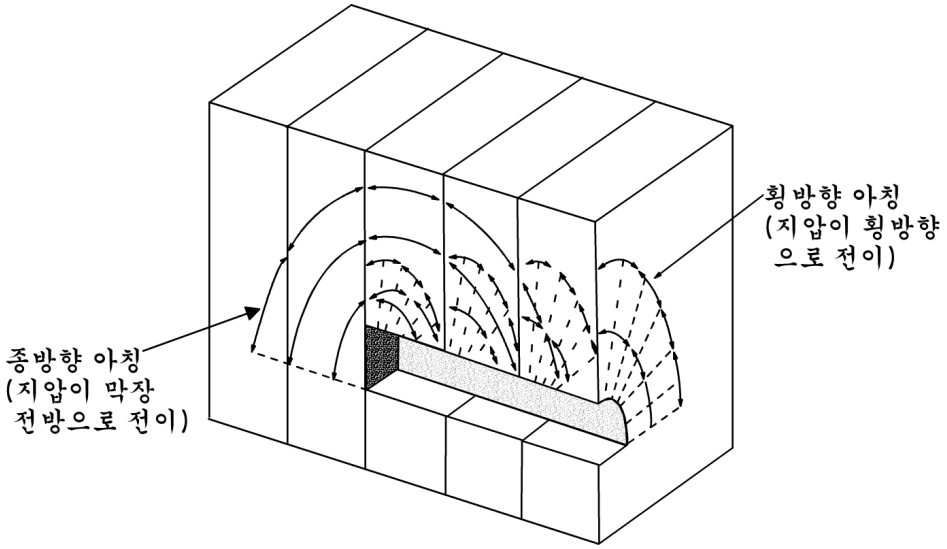


그림 2. Arching Effects at the Tunnel Face(Gnilsen, 1989)

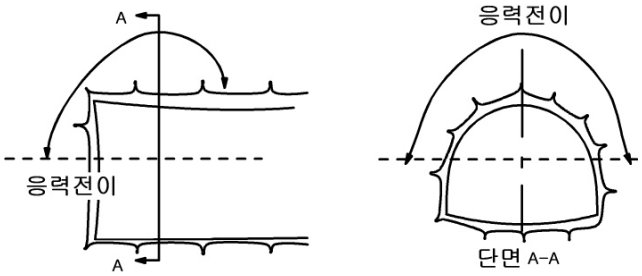


그림 3. 터널 주변지반의 응력전이

3. 축소모형실험

3.1 실험 개요

축소모형실험은 실제 현장의 모든 조건들을 차원해석에 의하여 축소율로 환산한다. 환산된 축소율을 통해 현장 상태를 그대로 재현한 물리적인 실험으로 여러 가지 터널을 비롯한 지하공동의 변형거동 및 지반의 안정성 검토 등에 효과적으로 널리 활용되고 있다.

본 연구는 지하구조물이 대형화됨에 따라 시공 위험도도 증가되는 시점에서 지반 굴착에 따른 위험도 인자인 공동 규모와 절리 방향성에 따른 공동 배면의 응력양상을 파악하여 상관관계를 파악하는데 목적이 있다. 축소모형실험에서는 절리 방향을 모사하기 위해 거푸집을 제작하였다. 이 거푸집을 이용하여 축소 모형을 제작하였으며 응력양상을 파악하기 위해 그림 4와 같이 굴착면의 후면에 천장부와 좌·우측부에 각각 센서를 설치하여 응력을 측정하였다. 굴착은 막장 전방에서 응력 영향이 작은 상하 2분할 굴착을 하였으며 3단계로

굴착을 실시하였다. 실험에 사용된 지반은 실제 지반과 흡사한 지반을 모사하기 위해 여러 가지 실내 물성실험을 통해 실제 암반 강도와 흡사하도록 제작하였다. 또한 실험에 적용하는 기본적인 제반 조건도 모래, 석고, 물 3가지의 혼합물로 구성해 실제 지형과 흡사하게 조성하여 이에 따른 결과의 신뢰도를 높였다.

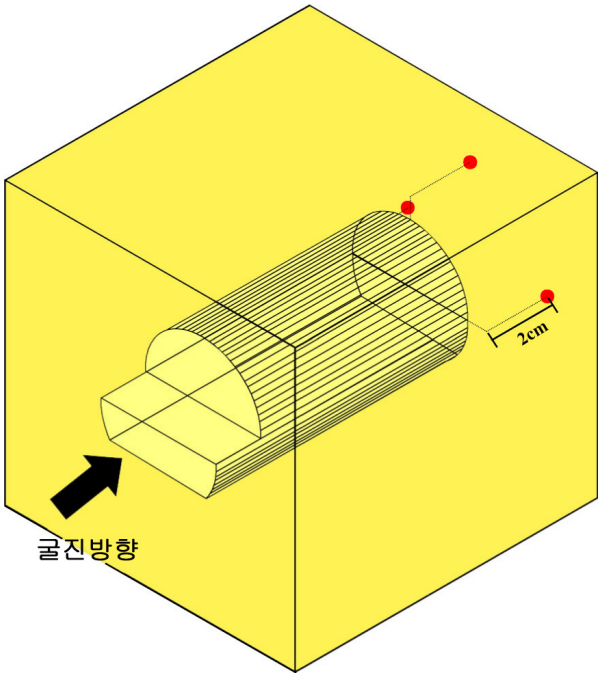


그림 4. 센서 측정 위치

3.2 모형재료

본 실험에서 사용되는 재료는 모래, 석고, 물로 모형지반 조성은 3가지 재료의 혼합물을 이용하여 구성하였다. 하지만 이는 중량 배합비에 따라 강도 및 변형계수가 달라지므로 특정한 일축압축강도를 갖는 혼합물을 제작하기 위하여 실내 물성실험을 실시하였다. 시험결과 본 실험에 부합하는 모형재료의 배합비로 모래, 석고, 물의 중량비가 3:1:2로 결정하였다. 모형 지반의 물성치는 표 2와 같이 요약 정리하였으며 혼합물은 강재 거푸집에 주입하고 두께 3.6cm인 모형 시험체를 여러 개 제작 및 결합하여 지반을 구성하였다.

또한, 현지암반의 변형거동을 조사·연구하기 위하여 축소모형실험을 실시할 때 현장성을 충분히 발휘할 수 있도록 하기 위해서는 현장의 경우에 대한 차원해석을 실시하고 이에 근거하여 적절한 축소율을 결정하는 것이 중요하다. 실험 모형의 축소율을 표 1과 같이 정리하였다.

표 1. 축소모형의 축소율

물리적 성질	차 원	축소율	물리적 성질	차 원	축소율
길 이	[L]	1/100, 1/75	밀 도	$[ML^{-3}]$	1/1.55
시 간	[T]	1/10	질 량	[M]	1/1,550,000
가속도	$[LT^{-2}]$	1	강 도	$[ML^{-1}T^{-2}]$	1/155

표 2. 모형지반의 물성치

배합비(모래 : 석고 : 물)	석고/물 비율(P/W)	압축강도(kgf/㎠)
3 : 1 : 2	0.50	2.05

3.3 실험 Case

본 연구에서는 지하 공동의 건설시 공동 규모와 절리 방향성에 따라 공동의 굴착 배면에 전달되는 응력양상을 파악하기 위한 Case로 설정하였다. 실험 Case는 그림 5와 같이 굴착방향과 수평이 되는 면을 기준으로 0°(수평), 30°(완경사), 60°(급경사), 90°(수직)의 절리지반에 굴착 공동의 크기를 달리한 총 8 Case로 실험을 실시하였다.

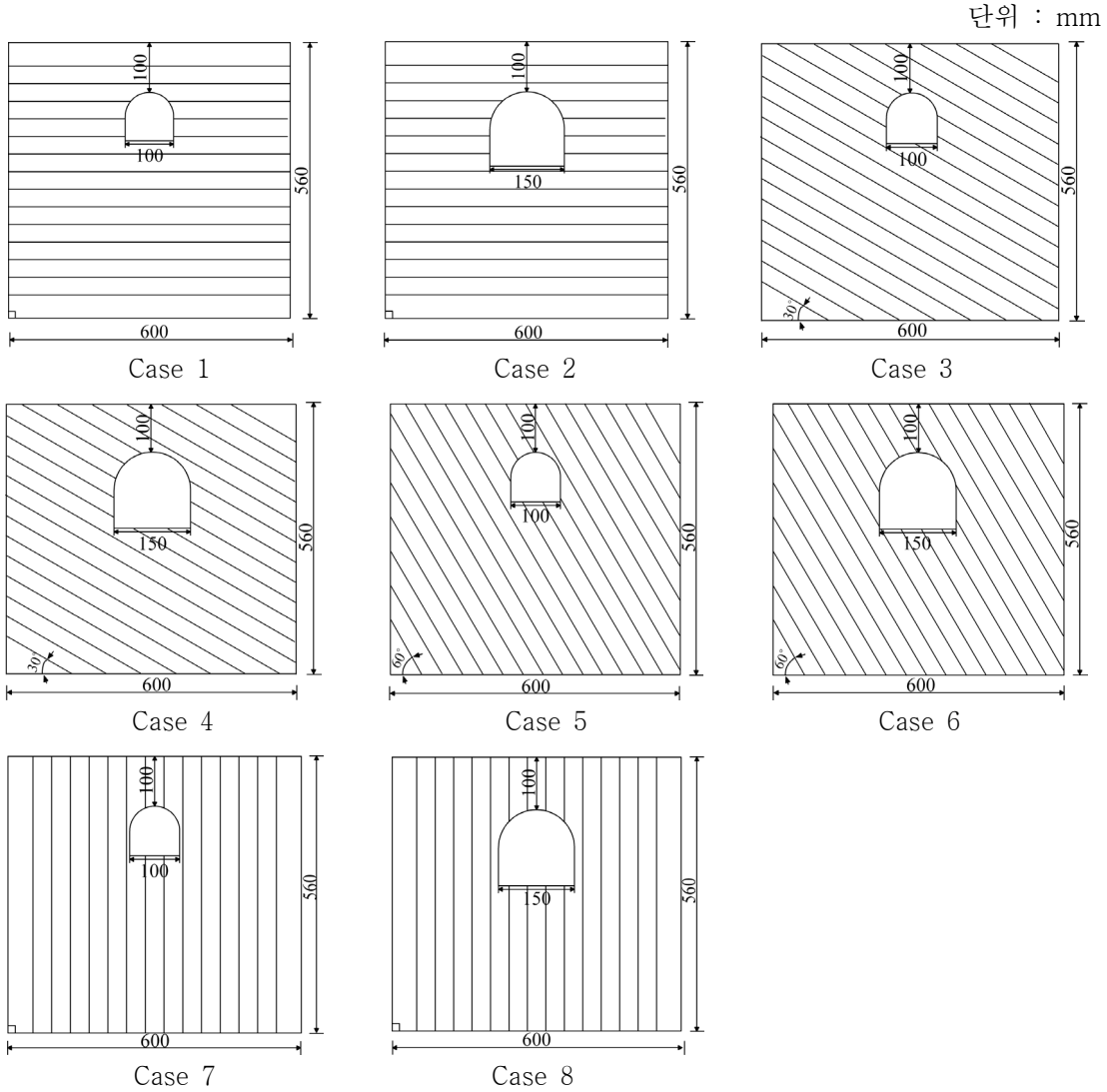


그림 5. 8가지 축소모형실험 Case

4. 실험장비 및 실험방법

4.1 실험장비

본 실험에 사용된 실험장비는 유압 및 공압식 2축 압축 가압 시스템으로 설계되었으며 상부하중 재하는 유압식 잭을 사용함으로서 실험 진행 중 원하는 만큼의 하중재하가 이루어지도록 하였다. 이때 하중재하는 1개의 유압식 잭이 중앙을 가압하였으며 하중은 토조의 상판을 가압함으로서 토조 전체에 압력이 가해질 수 있도록 하고 양측면에는 공기 튜브식 가압형태이며 압력의 조절은 컨트롤 박스를 사용하

였다. 축소모형실험을 진행하기 위한 토조 및 가압시스템의 전체 전경은 그림 6과 같다.

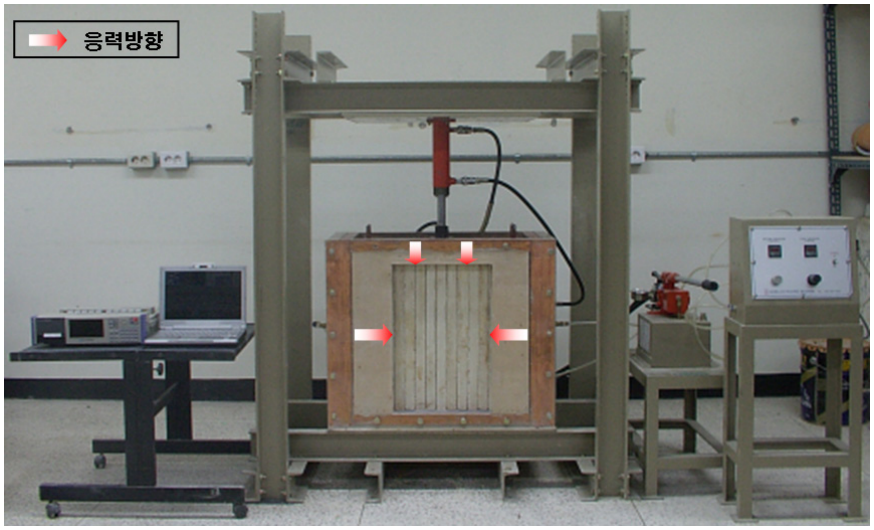


그림 6. 축소모형실험의 전경

4.2 실험방법

불연속면의 존재로 인하여 공동의 응력은 수직축에 대해 비대칭성을 나타내므로 지반 배면에 공동의 해당하는 측정 부분을 정하여 천단부 및 좌・우측벽부에 센서를 설치하고 응력변화를 측정하였으며 본 연구에서 실시한 실험방법 및 순서는 다음과 같다.

① 모형 시험체는 Case별 크기에 맞게 제단하여 지반을 조성한다.
② 지반 배면에 측점까지 조성된 지반의 후면을 굴착 후 센서를 삽입하고 데이터 로거에 연결한다.
③ 지반 상부에 가압판과 Load Cell을 설치하고, 상부와 측벽부에 정해진 압력을 일정하게 가한다.
④ 굴착장비를 이용하여 정해진 굴진장에 의해 3단계로 상・하 2분할 굴착하여 총 6 Step에 걸쳐 굴착을 실시한다.
⑤ 각 Step별 굴착 후 수렴값을 측정하고 정리한다.

5. 실험결과 분석

실험결과는 공동 규모와 절리 방향성이 다른 8 Case에서 공동 배면에서의 천단부 및 측벽부 응력양상을 측정하였으며 이에 따른 실험결과를 비교・분석하였다.

5.1 공동 규모 변화의 영향

공동 규모에 따른 공동 배면에서의 응력변화 양상을 알아보기 위해 공동 크기 2가지(10cm, 15cm)를 설정하여 축소모형실험을 실시하였다. 공동 굴착시 배면의 응력상태를 확인하기 위해 공동의 천단부 및 좌・우측벽부에 해당하는 부분을 정하여 센서를 설치하였으며 굴착단계에 따른 공동 배면에서의 응력을 측정하였다. 결과는 천단・좌측・우측벽부 3부분으로 나누어 공동 규모에 따라 비교・분석하였다.

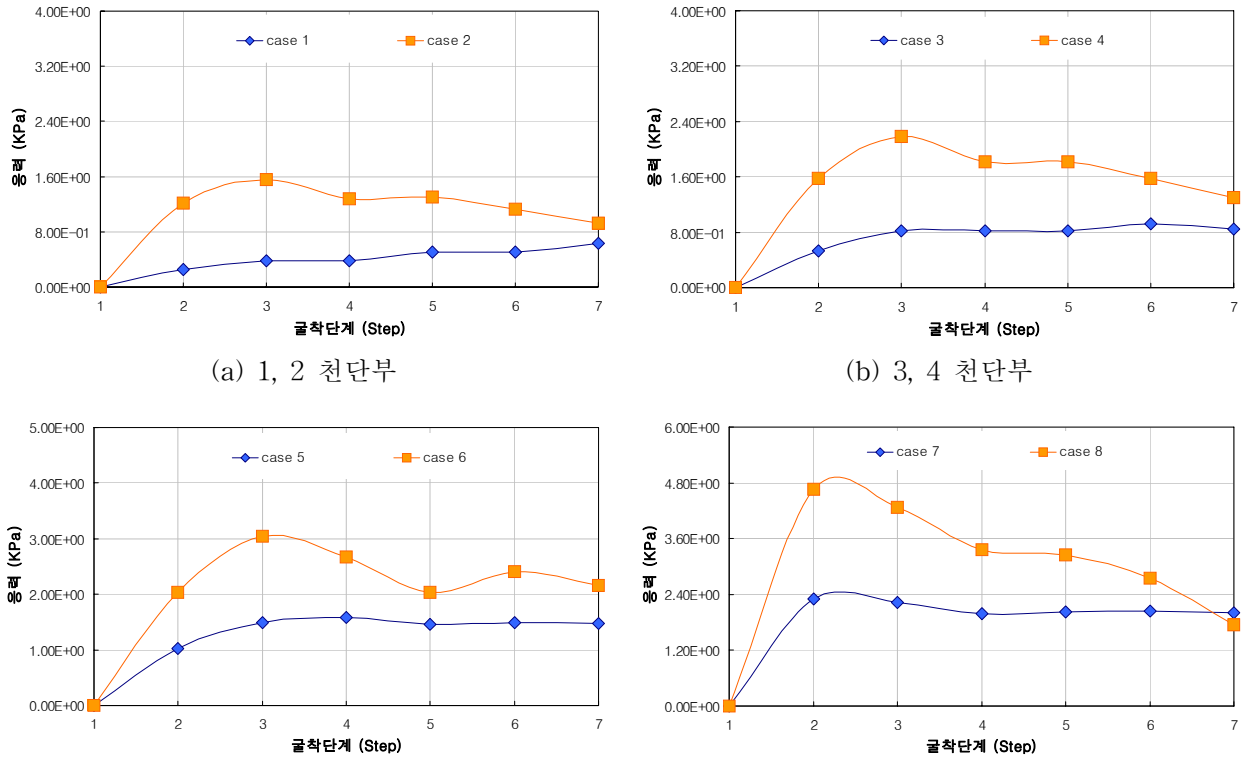
공동 굴착시 응력양상은 대체적으로 천단부의 경우 굴착이 시작됨과 함께 증가하여 굴착단계 2 Step에서 응력이 최고점에 도달한 후 점차 감소하는 경향을 보인다. 좌측벽부와 우측벽부의 경우도 2 Step까지 증가 추세를 보이나 이후에는 응력이 증가하거나 감소하면서 천단부와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

그림 7(a)은 절리 방향성이 0°인 경우로 천단부의 응력양상으로 공동 규모가 큰 Case 2가 Case 1보다

응력이 크게 측정되었으며 그림 7(b)은 절리 방향성이 30°인 경우로 천단부의 응력양상은 Case 4의 경우가 Case 3 보다 크게 측정되었다. 그림 7(c)은 절리 방향성이 60°인 경우로 Case 5와 Case 6은 천단부에서 유사한 응력양상을 나타냈지만 미세하게 Case 6이 크게 측정되었고 그림 7(d)은 절리 방향성이 90°인 경우로 천단부의 응력양상은 모두 Case 8이 Case 7보다 응력이 크게 측정되나 마지막 6 Step부터 Case 8은 감소하는 경향을 보이나 Case 7은 4 Step이후 비슷한 응력상태를 유지한다.

그림 8(a)은 절리 방향성이 0°인 경우 좌측벽부의 응력양상으로 천단부와 같이 Case 1이 Case 2보다 크게 측정되었으며 그림 8(b)과 같이 절리 방향성이 30°인 경우의 좌측벽부의 응력양상은 Case 4의 경우가 Case 3 보다 크게 측정되었다. 그림 8(c)은 절리 방향성이 60°인 경우로 Case 5와 Case 6은 천단・좌・우측벽부 모두 유사한 응력양상을 나타냈지만 미세하게 Case 6이 크게 측정되었다. 그림 8(d)은 절리 방향성이 90°인 경우로 천단・좌・우측벽부의 응력양상은 모두 Case 8이 Case 7보다 응력이 크게 측정되었다. 또한, 그림 8과 9의 그래프에서 보는 것과 같이 우측벽부 응력 양상 또한 좌측벽부와 유사한 양상을 보였다.

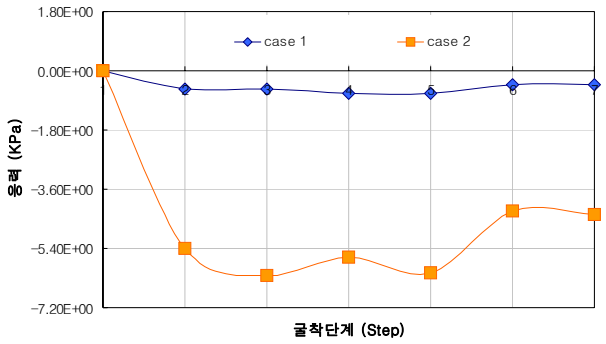
이와 같이 모든 Case에서 보듯이 공동 규모가 증가함에 따라 응력 양상은 전체적으로 증가하는 경향을 보인다. 천단부의 경우는 Case 2, 4, 6, 8이 Case 1, 3, 5, 7 보다 응력이 크게 측정되었으며 그중 Case 8의 응력이 가장 크게 측정되었다. 좌・우측벽부 또한 Case 2를 제외한 4, 6, 8의 경우 응력이 크게 나타났으며 좌측벽부가 우측벽부 보다 응력이 크게 나타났다. 이것으로 공동 규모가 큰 경우 응력도 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.



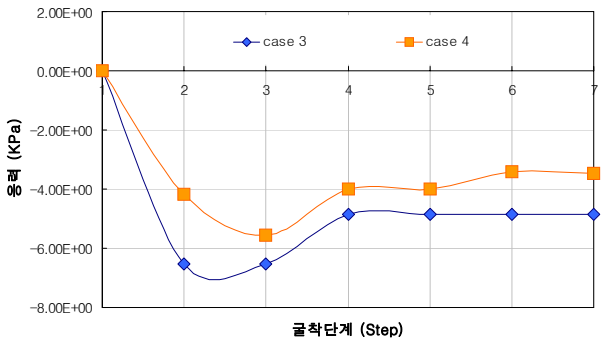
(a) 1, 2 천단부 (b) 3, 4 천단부

(c) 5, 6 천단부 (d) 7, 8 천단부

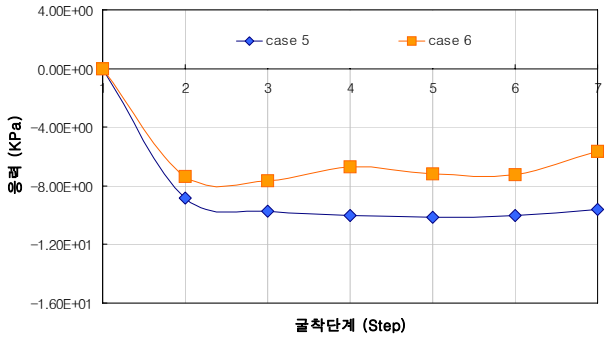
그림 7. 공동규모에 의한 천단부 응력양상



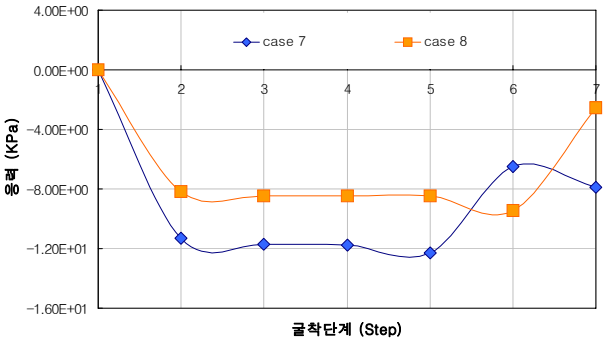
(a) 1, 2 좌측부



(b) 3, 4 좌측부

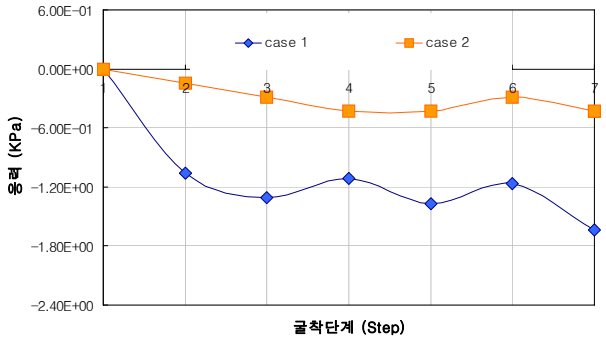


(c) 5, 6 좌측부

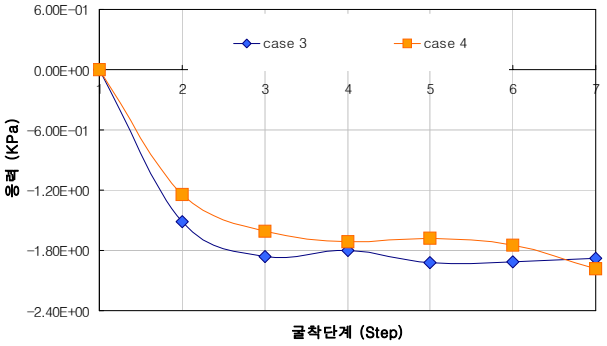


(d) 7, 8 좌측부

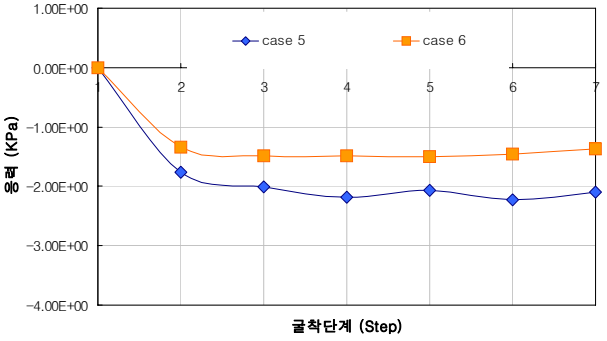
그림 8. 공동규모에 의한 좌측부 응력양상



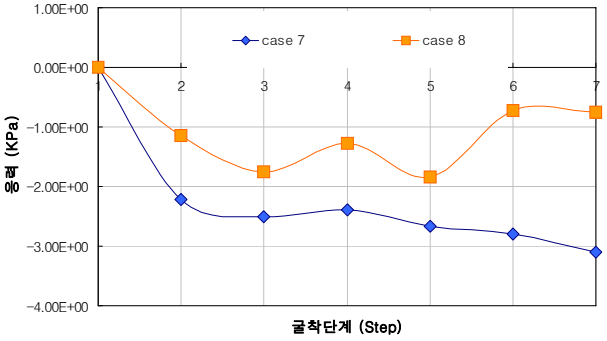
(a) 1, 2 우측부



(b) 3, 4 우측부



(c) 5, 6 우측부



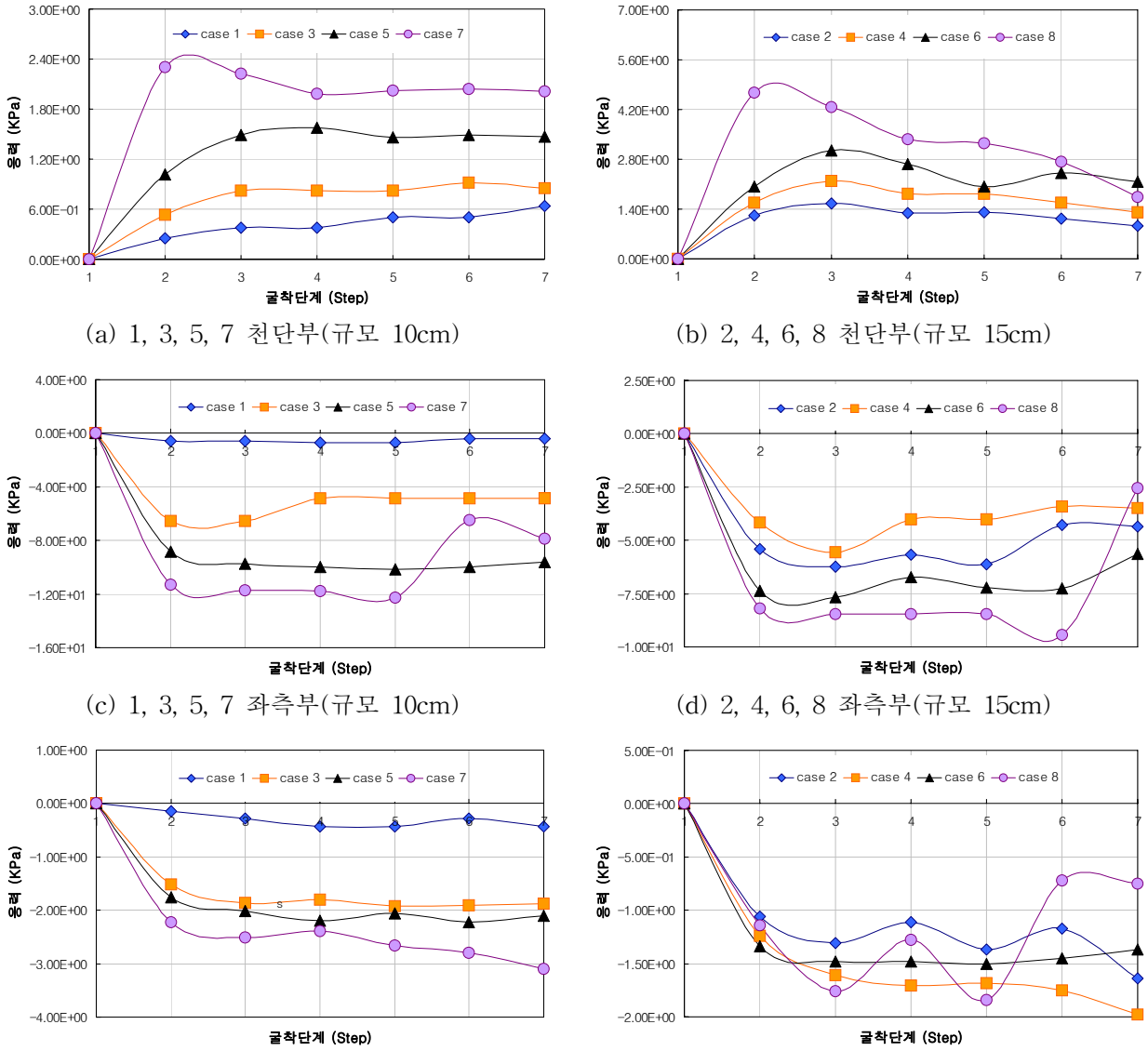
(d) 7, 8 우측부

그림 9. 공동규모에 의한 우측부 응력양상

5.2 절리 방향성 변화의 영향

절리 방향성에 따른 공동 배면의 응력변화 양상을 파악하기 위해서 4가지 절리 방향성(0°, 30°, 60°, 90°)을 실험에 적용하였다. 그림 10은 실험에 대한 결과를 절리 방향성에 따라 나타낸 그래프로 Case 1, 3, 5, 7은 공동 크기가 10cm일 때 절리 방향성에 대한 그래프이며 Case 2, 4, 6, 8은 공동 크기가 15cm일 때 절리 방향성에 대한 그래프를 나타낸 것이다.

공동 규모가 10cm일 때 천단부의 응력은 절리 방향성이 90°인 Case 8일 때 가장 크게 측정되었으며 절리 방향성이 0°에서 가장 작게 측정되었다. 좌・우측벽부의 응력은 절리 방향성이 0°인 Case 1일 때 가장 크게 측정되었으며 절리 방향성이 90°에서 가장 작게 측정되었다. 좌측벽부와 우측벽부의 응력은 유사한 경향을 보이지만 좌측벽부의 응력은 우측벽부의 응력보다 약 2배가량 크게 측정되었으며 공동 규모가 15cm일 때도 유사한 결과를 나타났다. 이러한 실험결과는 절리면을 따라 미끄러짐이 발생하여 절리면의 경사 방향이 공동 응력변화에 큰 영향을 미치며 수평 절리를 갖는 암반 내에 굴착된 공동은 상대적으로 천단부에서 받는 응력보다 측벽부에서 받는 응력이 더 크게 나타났다. 수직 절리를 갖는 암반 내에 굴착된 공동은 상대적으로 측벽부에서 받는 응력보다 천단부에서 받는 응력이 더 크게 나타났다.



(a) 1, 3, 5, 7 천단부(규모 10cm)

(b) 2, 4, 6, 8 천단부(규모 15cm)

(c) 1, 3, 5, 7 좌측부(규모 10cm)

(d) 2, 4, 6, 8 좌측부(규모 15cm)

(e) 1, 3, 5, 7 우측부(규모 10cm)

(f) 2, 4, 6, 8 우측부(규모 15cm)

그림 10. 공동 규모에 따른 Case별 응력양상

6. 수치해석

불연속 암반에 공동이 굴착시 공동주위는 이차적 응력 재분배로 인한 응력집중과 불연속면 및 암반자체의 항복으로 인한 소성영역이 발생하게 되는 이와 같은 거동을 묘사하기 위해 개별요소법인 수치해석 프로그램 3DEC을 이용하여 검증하였다.

해석영역은 저심도에 위치한 공동의 석회암 지반을 모델링하였으며, 절리암반 터널의 해석으로 지반 및 절리의 물성을 이용하여 절리 모델 해석을 실시하였다. 해석단면은 상·하반단면 2분할 굴착으로 시공단계에 따라 6단계로 해석하였으며, 측압계수는 K_0=1로 설정하여 해석을 수행하였다. 해석지반의 물성치는 표 3과 같으며 수치해석 모델링은 축소모형실험과 같다.

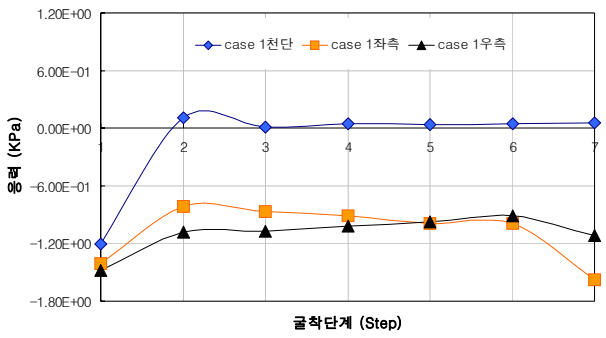
표 3. 수치해석의 지반 물성치

Rock Type	bulk (gf/cm^3)	density (gf/cm^3)	shear (kgf/cm^2)	tension (kgf/cm^2)	cohesion (kgf/cm^2)	friction (°)
Soft Rock	1.6	2.0	700	0.62	0.71	28

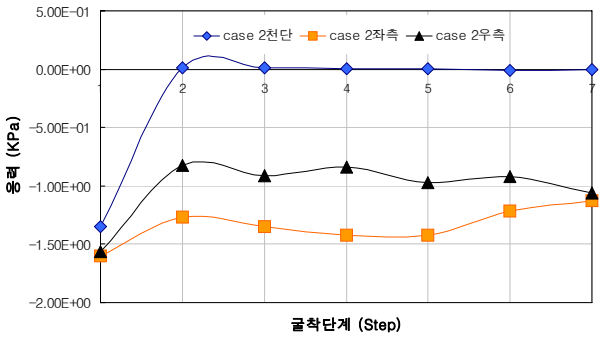
7. 수치해석 결과 분석

공동이 굴진되면서 공동의 횡방향은 물론, 축방향으로 하중전이효과가 발생하며 이러한 축방향의 하중전이효과를 3차원으로 해석하기 위해 수치해석 프로그램인 3DEC을 이용하여 탄소성 해석을 실시하였다. 수치해석 Case는 축소모형실험과 동일한 Case를 해석 모델로 구성하였으며 실험의 물성과 경계조건 등 모든 사항은 실험과 동일하게 적용하였다. 수치해석한 결과는 세부적으로 천단·좌측·우측벽부의 양상을 그림 11과 같이 Case별로 정리하여 비교·분석하였다.

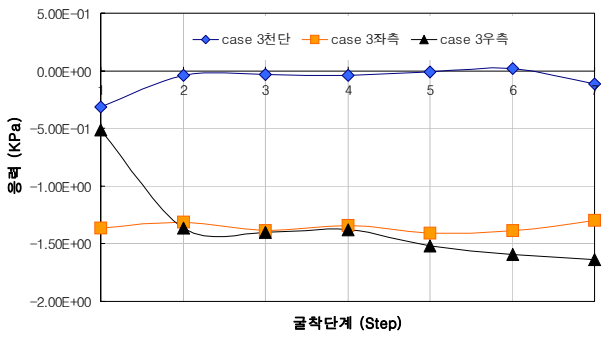
수치해석을 분석한 결과로 천단부는 Case 8인 경우 즉, 공동 규모가 크고 절리 방향성이 90°일 때의 응력이 가장 크게 나타났으며 좌·우측벽부는 Case 1인 경우 즉, 공동 규모가 작고 절리 방향성이 0°일 때의 응력이 가장 크게 나타났다. 이는 실험결과에 부합하는 것으로서 공동크기가 클수록 응력은 크게 나타났으며 또한 절리 방향성은 천단부의 경우 절리 방향성이 90°일 때, 좌·우측벽부의 경우 절리 방향성이 0°일 때 응력이 크게 나타났다.



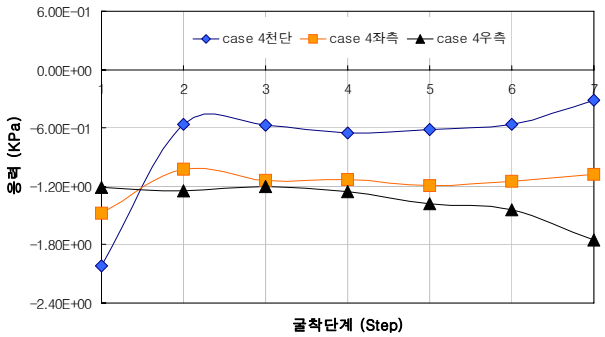
(a) Case 1



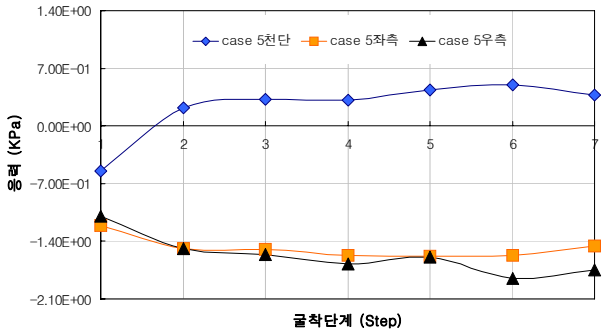
(b) Case 2



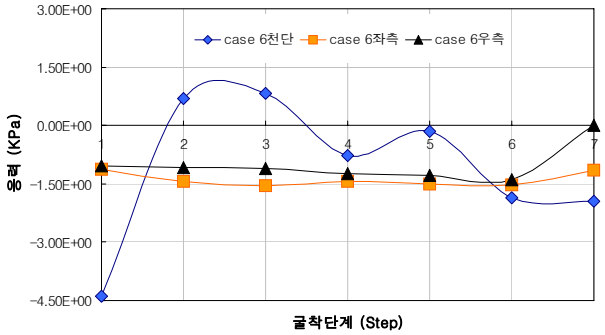
(c) Case 3



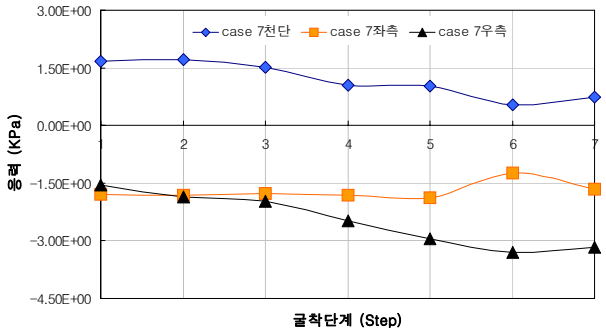
(d) Case 4



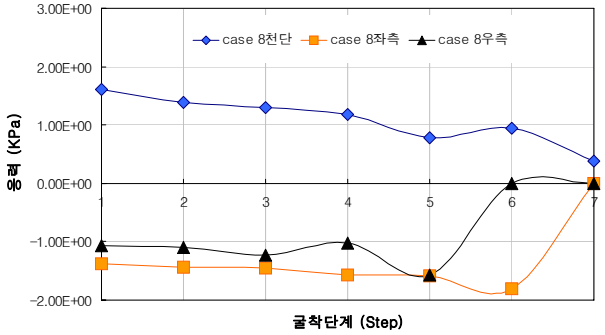
(e) Case 5



(f) Case 6



(g) Case 7



(h) Case 8

그림 11. Case별 수치해석결과 그래프

8. 결 론

본 연구에서는 지하구조물 건설시 이방성 암반에서 공동 굴착에 따라 위험도를 증가시킬 수 있는 인자인 공동 규모·절리 방향성에 대한 공동 배면에 전이되는 응력 양상을 영향을 파악하기 위해 축소모형실험을 실시하였으며 실험결과를 검증하기 위해 수치해석을 실시하였다. 이로부터 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

1) 공동 굴착시에 천단부 및 측벽부의 응력양상은 대체적으로 굴착 2 Step까지는 증가하였으나 이후 감소하는 경향을 보였다. 이는 아칭효과에 의한 응력 재분배현상의 결과로 판단된다.
2) 공동 규모가 큰 경우 굴착 배면에서 천단부이 응력은 더 크게 측정되었으며 좌·우측벽부의 응력 또한 공동 규모가 큰 경우 더 크게 측정되었다. 이는 저심도에 위치한 공동을 모사함으로 인해 상부하중

이 공동 규모가 커짐에 따라 굴착배면으로 전이되는 아칭효과가 증가되어 이러한 결과가 나온 것으로 판단된다.
3) 실험결과와 같이 절리면을 따라 미끄러짐이 발생하여 절리면의 경사 방향이 공동의 응력변화에 큰 영향을 미치며 절리 방향성이 90°일 때 천단부의 응력이 가장 크게 측정되었으며 절리 방향성이 0°일 때 좌・우측벽부의 응력이 가장 크게 측정되었다. 이는 불연속면의 역학적 특성 때문으로 판단된다.

본 연구는 축소모형실험과 수치해석을 통해 공동 굴착시 공동 규모와 절리 방향성에 의한 배면 응력의 양상을 확인하여 공동의 굴착면에 대한 안정성 향상에 이점으로 작용할 것으로 판단되나 한정된 절리방향과 공동크기에 국한된 연구이므로 향후 다양한 절리방향과 공동의 크기를 고려한 지속적인 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 “지하공간 규모에 따른 시공리스크 분석기법 개발”(과제번호 : 04핵심기술CO1) 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 이성민, 이윤규, 신성렬(1999), “암반의 진행성 파괴 기법을 이용한 터널거동 분석”, **한국암반공학회**, Vol. 9, pp. 288~295
2. 이승호(1997), “불연속면의 경사와 강성을 고려한 지하구조물 안정성에 관한 연구”, **한국암반공학회**, Vol 7, pp. 65~74
3. 정형래, 김종우(2006), “이방성 암반의 방향성과 측압조건을 고려한 터널 모형실험 연구”, **한국암반공학회지**, 제 16권, 제 4호, pp. 313~325
4. 한국지반공학회(1996), **터널**, 지반공학시리즈 7
5. Barton, N. And Choubey, V(1997), “The shear strength of rock joints in theory and practice”, *Rock Mechanics*, vol. 10, pp. 1~54
6. E. Hoek & E. T. Brown(1980), *Underground Excavation in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, pp. 87~328
7. Gnilsen, R(1989), "Underground Structures Design and Instrumentation", *Elsevier*, 59A, p. 84-128
8. Hudson JA(1991), “Atlas of rock engineering mechanisms underground excavations”, *Int J Roc Mech Min Sci Geomech*, vol.28, no. 6, pp. 523~6
9. Terzaghi, K(1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley&Sons, pp. 66~77