

지하 대공동의 3차원 굴착거동에 관한 연구

이영남¹⁾ · 서영호¹⁾ · 주광수¹⁾

Three Dimensional Behaviour of the Rock Mass around a Large Rock Cavern during Excavation

Young-Nam Lee, Young-Ho Suh and Kwang-Sue Jue

ABSTRACT This paper presents the results of deformation measurement and numerical analysis carried out to study the behaviour of the rock mass around large underground oil storage caverns. Displacements during excavation have been monitored using borehole extensometers which had been installed before the excavation of caverns proceeded. Numerical analysis has been carried out to examine the three-dimensional behaviour of rock and the face advance effect. The input parameters for this analysis were determined from the results of laboratory and field tests. The deformation modulus of the rock mass was determined from plate loading test at the site and in-situ stresses were measured from the overcoring method with USBM deformation gauge. The results from this study gave a clear picture for three-dimensional behaviour of the rock mass, hence would be used for the optimum design.

1. 서 론

터널 또는 에너지 지하비축시설, 식품 지하저장시설 등과 같은 대규모 지하공간 건설시 굴착에 의한 암반의 거동특성 규명은 시공의 안전성과 경제성을 높이는데 있어서 중요한 요소라고 할 수 있다. 이러한 암반의 거동은 대상지역의 지질조건, 암반역학적 특성, 초기응력 조건 등에 영향을 받으며 따라서 굴착에 따른 지하 공동의 복잡한 거동을 평가하기 위해서는 지반조사, 역학적 특성시험, 해석 및 계측 등을 포함한 일련의 체계적이고 종합적인 작업이 필요하다. 본 연구에서는 전남 OO 원유지하비축기지의 건설과정에서 비축기지의 거동규명을 통한 적정 지보패턴을 결정하기 위하여 종합적인 계획하에 현장시험, 수치해석, 변위 및 응력 계측 등을 수행하였다. 먼저 실내시험과 초기응력 측정시험, 평판재하시험 등의 현장시험을 실시하여 대상 암반의 역학적 특성을 파악하였으며 이 결과를 이용한 수치해석을 실시하였다. 해석은 2차원 및 3차원 유한차분 프로그램을 사용하였으며 굴착에 의한 공동 천정부 및 측벽부의 변위와 응력변화를 계산하고 각각의 결과를 상호 비교, 검토하였다. 끝으로 해석결과를 계측결과와 비교함으로써 단계별 굴착 및 굴착진행에 따른 암반의

거동 양상을 분석하였다.

2. 대상 지역

Fig. 1은 본 연구의 대상 지역인 전남의 OO 원유비축 기지를 보여 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 본 비축기지는 6개의 원유 저장용 공동과 2개의 수직갱, 수벽 터널 등으로 이루어져 있다. 6개의 공동은 폭이 18 m, 높이가 30 m, 길이가 400~600 m인 마제형 공동으로서 수벽터널 하부의 EL.(-) 30 m ~ (-) 60 m 심도에 서로 평행하게 배열되어 있다. 공사용 터널은 폭 8 m, 높이 7.5 m의 마제형이며, 터널의 위치는 EL.(+) 10 m의 입구부에서 EL.(-) 60.0 m의 공동 바닥부에 이르기까지 약 12%의 경사를 이루고 있다. 수벽터널은 EL.(-) 1.0 m에 위치하고 있으며 폭이 4.5 m, 높이가 5 m인 마제형 터널이다.

대상지역의 지질은 중생대 백악기 불국사통에 속하는 화산암류와 이를 관입한 화강암으로 구성되어 있다. 본 비축기지를 구성하는 기반암은 열변성작용을 받은 안산암질 응회암으로 암회색을 띠며 매우 치밀하며, 서로 잘

1) 현대건설(주) 기술연구소

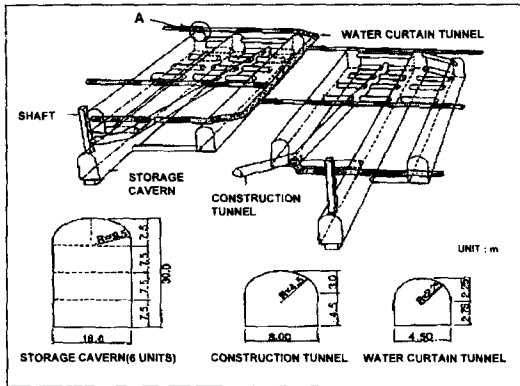


Fig. 1. Schematic view of the underground oil storage facility.

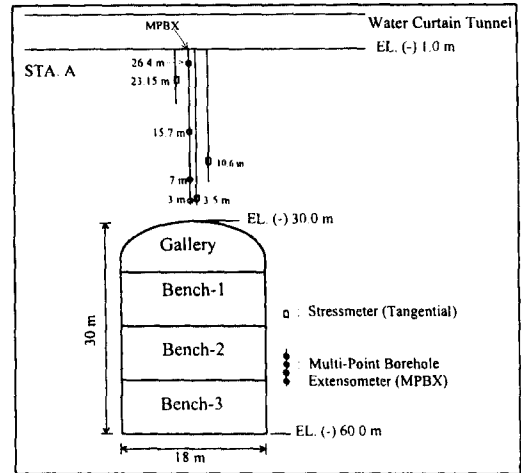


Fig. 2. Layout section showing instrumentation details.

밀착되어 있는 3개의 절리군(N70~80°E/70~80°NW, N 10°E/70~80°SE, N45°W/20°SW)과 그 밖의 불규칙한 다수의 절리가 분포하고 있다. Table 1은 열변성 응회암 암석 시편에 대한 역학적특성 시험결과를 정리한 것이다. 평균 일축압축강도는 약 2,500 kg/cm², 평균탄성계수는 8.3×10⁵ kg/cm²이며, 이는 조직이 치밀하고 아주 견고한 암반임을 알 수 있다.

공동 굴착은 발파공법에 의하여 각각의 높이가 7.5 m인 gallery, bench-1, bench-2, bench-3 의 4단계로 굴착이 진행되었다. 보강은 막장 검측 결과에 따라 두께 30~150 mm의 슛크리트와 길이 3~7 m의 록 볼트를 이용하여 수행되었다.

3. 계 측

막장이 계측 지점에 도달하기 이전에 다점식 지중변위계(MPBX)와 진동현 지중응력계(vibrating wire type stressmeter)를 설치하여 단계별 굴착 전체 과정에서 발생하는 공동 천정부의 변위량과 접선응력(tangential stress) 변화를 측정하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이,

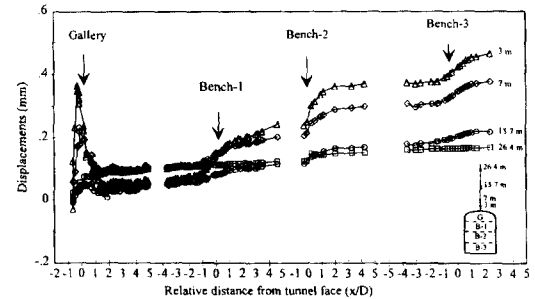


Fig. 3. Measured vertical displacements above the crown during excavation.

계측기는 공동의 상부에 위치하고 있는 수벽터널로부터 수직 천공된 시추공내에 설치되었으며, 변위 계측지점의 위치는 공동 천정부로부터 3 m, 7 m, 15.7 m, 26.4 m 떨어진 지점이고 접선응력 측정지점은 공동 천정부로부터 3.5 m, 10.6 m, 23.15 m 떨어진 지점이다.

계측 지점의 단계 굴착에 따른 막장 진행별 변위양상은 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 여기서 D는 공동의 폭, x는 계측단면과 막장과의 거리를 나타낸다. 이 그림으

Table 1. Mechanical properties of intact rock.

Property	No. of samples tested	Average value	Range
Uniaxial compressive strength(kg/cm ²)	12	2,500	2,150~3,310
Tensile strength(kg/cm ²)	12	220	160~310
Elastic modulus(×10 ⁵ kg/cm ²)	12	8.3	7.0~9.7
Poisson's ratio	12	0.23	0.21~0.25
Internal friction angle(°)	4	51.5	49~54
Cohesion(kg/cm ²)	4	530	480~590

로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

1) 굴착 단계별로 1 mm 이내의 상향 또는 하향 변위가 계속되어 전체적으로 공동 천정부의 3 m 이상의 지점에서는 변위가 거의 발생하지 않았다.

2) 단계별 굴착에 따른 변위 발생 경향을 살펴 보면, gallery 굴착시 막장이 계속지점에 접근함에 따라 발파에 의한 영향으로 공동 천정부로부터 상향변위가 발생하였다. 막장이 계속지점을 통과하면서부터는 발파의 영향은 없어지면서 굴착 영향에 의한 하향변위가 발생하였으며 이는 막장이 계속지점으로부터 공동폭의 2배 정도 지나면서 수렴되는 경향을 나타내었다.

3) bench-1, bench-2, bench-3 굴착이 진행됨에 따라 천정부의 변위양상은 연속적으로 상향으로 발생함을 알 수 있었다.

4) 공동 천정부의 주변 암반은 탄성거동 양상을 보이면서 전체적인 안정성을 확보하고 있는 것으로 보이며 따라서 천정부의 보강량을 상당히 줄일 수 있다고 판단된다.

굴착 단계별 천정부 접선응력변화 계속결과는 Fig. 4와

같으며, 이 그림으로부터 다음의 결과를 얻을 수 있다.

1) 갤러리 굴착시 접선응력은 Fig. 4(a)와 같이 막장이 계속단면에 접근함에 따라 감소하는 경향을 보이며 계속지점 통과후 증가하는 경향을 보인다. 이러한 감소 경향은 발파 진동에 의한 초기치 변화에 기인한 것으로 보이며, 막장이 계속단면을 지나면서부터는 변위 계속결과와 마찬가지로 발파의 영향이 사라지면서 접선응력은 증가하는 경향을 보이고 있다.

2) bench 굴착이 진행됨에 따라 상대적으로 큰 축압과 공동형상 변화의 영향으로 천정부의 접선응력은 계속적으로 증가하는 경향을 보이며(Fig. 4(b),(c),(d)), 이러한 접선응력의 증가가 Fig. 3의 상향 변위 발생에 영향을 미친 것으로 판단된다.

4. 수치 해석

4.1 해석방법 및 입력자료

저장 공동 굴착에 따른 공동 주위 암반의 거동 양상

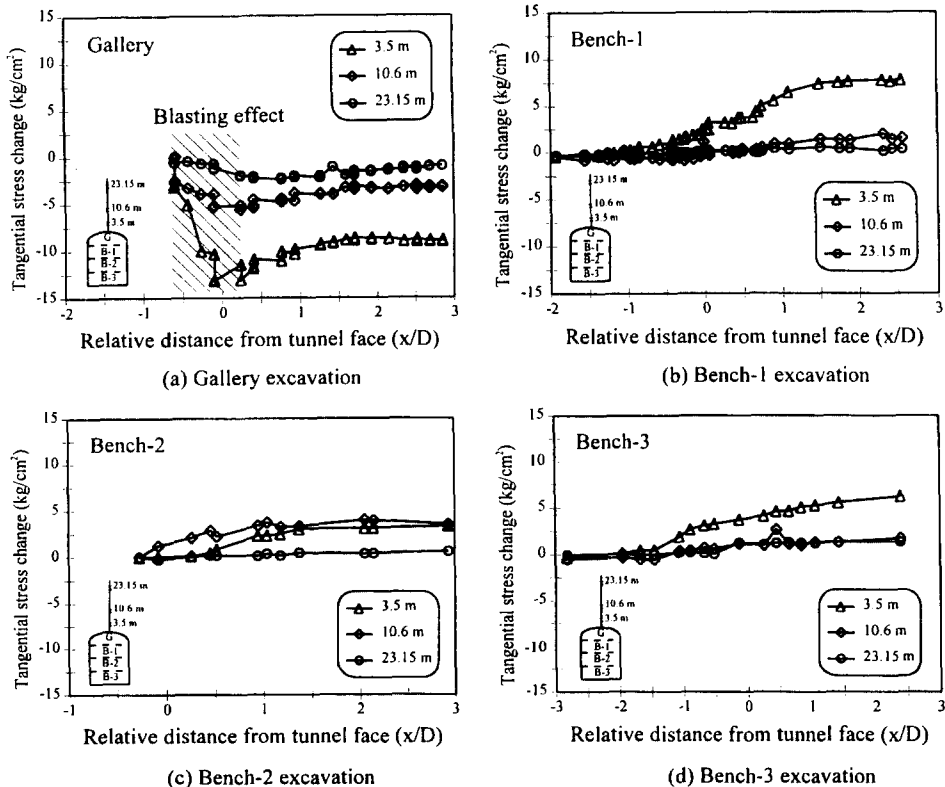
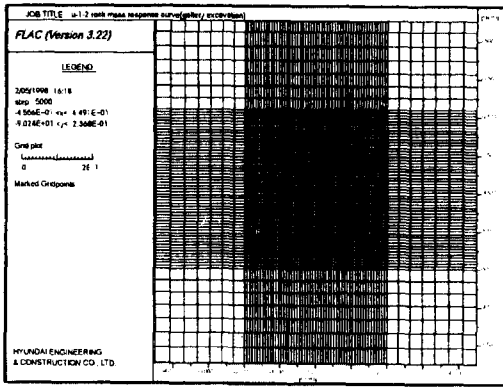
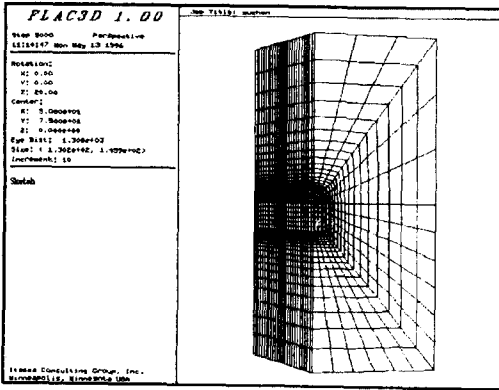


Fig. 4. Tangential stress changes above the crown during excavation.



(a) 2D model



(b) 3D model

Fig. 5. Numerical models.

을 파악하기 위해 2차원 및 3차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC과 FLAC3D를 이용한 안정성 해석을 수행하였다. 공동 천정부와 측벽부 벽면에서 거리에 따른 몇 개의 지점을 설정하여 2차원 및 3차원 해석으로부터 얻어진 변위 및 응력변화 결과를 상호 비교하였다.

Fig. 5는 해석에 사용된 2차원 및 3차원 모델을 나타낸다. 2차원 해석의 경우 평면변형을 조건에 의한 해석을 수행하였으며, 파괴조건은 Mohr-Coulomb 파괴조건식을 사용하였다. 해석에 사용한 모델의 크기는 가로 150 m, 세로 150 m이다. 3차원 해석모델의 경우 2차원 해석의 경우와 같은 파괴조건식을 사용하였으며 모델의 크기는 높이 250 m, 폭 100 m, 길이 150 m이다.

각각의 해석에 사용된 암반의 역학적 특성자료는 Table 1의 실내실험 결과와 현장시험 결과로부터 결정하였다. 암반의 탄성계수는 현장에서 수행한 평판재하시험으로부터 구하였다. 평판재하시험에 의해 결정된

현지 암반의 탄성계수는 $3.7\sim 4.3 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 의 분포 양상을 나타내었으며(Lee, Suh & Kim), 이 범위 중 평균치인 $4.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 를 본 해석에 적용하였다. 한편 USBM Deformation Gage를 이용한 overcoring 방법에 의하여 대상지역 암반의 초기응력을 측정하여 그 결과를 해석에 이용하였다. 수직응력은 공동의 심도에 따라 $50\sim 70 \text{ kg/cm}^2$ 의 값을 산정하였으며, 평균 축압계수는 공동 진행방향에 평행한 방향으로 3, 공동 진행방향에 수직인 방향으로 2 정도의 값으로 결정되었다(Lee, Suh, Kim & Nam).

4.2 해석 결과

4.2.1 변위

Fig. 6은 단계별 굴착에 따른 공동 천정부 및 측벽부 (bench-1 바닥으로부터 1 m 상부지점)의 최종변위 해석결과를 나타낸 것이며 이 그림으로부터 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

1) 천정부 변위의 경우, 2차원 해석 결과 gallery 굴착시 벽면에서 최대 1.7 mm의 변위가 발생하였으며 이후 bench 굴착이 진행됨에 따라 약간의 상향변위가 발생하여 bench-3 굴착후의 최종변위는 gallery 굴착시 보다도 오히려 적은 1.5 mm의 변위가 발생한 것으로 계산되었다. 3 m, 7 m 등 다른 지점에서도 벽면의 경우와 유사한 경향을 보였다. 3차원 해석의 경우에도 전체적인 경향은 2차원 해석과 유사하나 굴착이 진행됨에 따라 상향으로 발생하는 변위량이 더 크게 나타났다. 이는 3차원 해석에서는 2차원 해석시 고려할 수 없었던 공동 축방향으로 작용하는 지중응력의 영향이 포함되었기 때문이다.

2) 측벽부 변위의 경우, 굴착이 진행됨에 따라 변위가

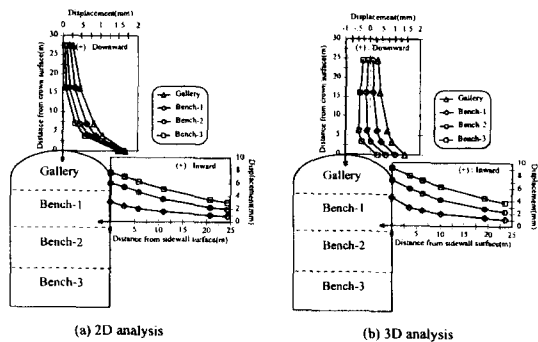


Fig. 6. Displacements at the crown and the sidewall.

증가하는 경향을 보이며 최종 굴착 후의 변위는 2차원 해석의 경우 7.6 mm, 3차원 해석의 경우 9.2 mm의 변위가 발생하는 것으로 나타났다. 측벽부의 변위가 천단부의 변위보다 더 크게 발생한 이유는 단계별 굴착진행에 따른 공동형상의 변화와 초기응력 조건에 따른 응력 재분포에 의한 영향인 것으로 판단된다.

4.2.2 응력변화

Fig. 7은 단계별 굴착시 천정부 및 측벽부의 벽면으로부터의 거리에 따라 발생하는 반경방향응력(radial stress)의 변화양상을 보여 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 3 m 이상의 지점에서 굴착이 진행됨에 따라 응력이 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 2차원 해석결과에 의하면 천정부의 응력은 단계별 굴착이 진행됨에 따라 증가하는 경향을 보이며, 최종 굴착후 공동 벽면을 제외한 지점에서 초기의 응력상태(공동 천정부 : 약 67.5 kg/cm²)로 회복되는 경향을 보였다. 3차원 해석결과도 2차원 해석결과와 유사한 경향을 보이거나 최종 굴착후의 응력상태는 초기응력 상태보다 큰 응력

상태(최대 77 kg/cm²)를 보이는 것으로 나타났다. 측벽부 반경응력은 굴착이 진행되면서 공동의 형상 변화에 따라 감소하는 경향을 보였다.

굴착에 따른 접선응력의 변화는 Fig. 8에 나타난 바와 같다. 천정부의 경우 굴착이 진행됨에 따라 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 2차원 해석의 경우 gallery 굴착시 초기응력(공동 천정부 : 135 kg/cm²)의 약 1.6배의 접선응력이 발생하였으며 최종 굴착후 초기응력의 약 2.4배에 달하는 응력증가현상이 나타났다. 3차원 해석의 경우 gallery 굴착시 초기응력의 약 1.9배, 최종 굴착후 약 2.8배의 응력증가가 발생하였다. bench-1 바닥으로부터 1 m 상부의 측벽부 지점의 경우 gallery 또는 bench-1 굴착시 응력집중에 의한 접선응력 증가 양상을 보이다가 bench-2와 bench-3가 굴착되면서 공동 형상 변화와 초기응력조건에 의하여 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다.

Fig. 9는 3차원 해석을 통하여 구한 단계별 굴착에 따른 공동 축방향응력의 변화양상을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 축방향응력은 접선응력의 변화와 유사한 양상을 보이면서 변화한다. 천정부의 경우 굴착에 따라 계속적으로 증가하여 최종 굴착후에는 초기응력의 1.2배에 달하는 응력증가가 발생하였다. 측벽부는 gallery 굴착후 약간 증가하다가 bench 굴착이 진행되면서 계속적으로 감소함을 알 수 있다. 따라서 지하공동의 정확한 거동 분석을 위해서는 축방향응력도 고려되어야 함을 알 수 있다.

4.2.3 비교 고찰

Fig. 10은 굴착 단계별 그리고 막장 진행에 따른 천

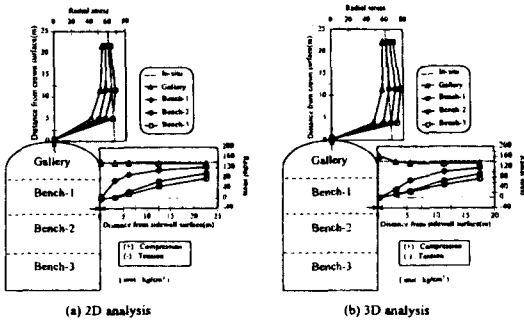


Fig. 7. Radial stress changes at the crown and the sidewall.

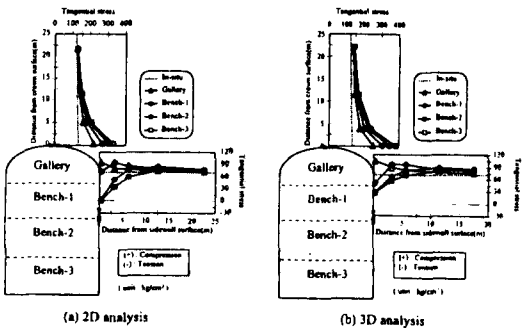


Fig. 8. Tangential stress changes at the crown and the sidewall.

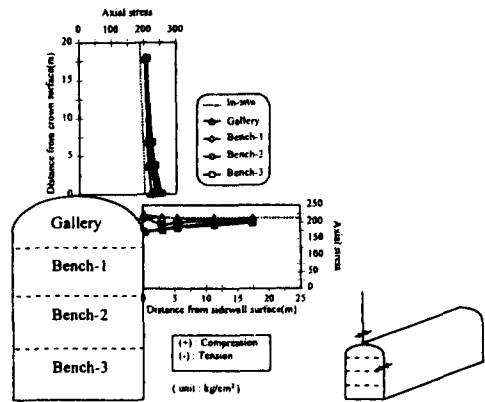


Fig. 9. Axial stress changes at the crown and the sidewall.

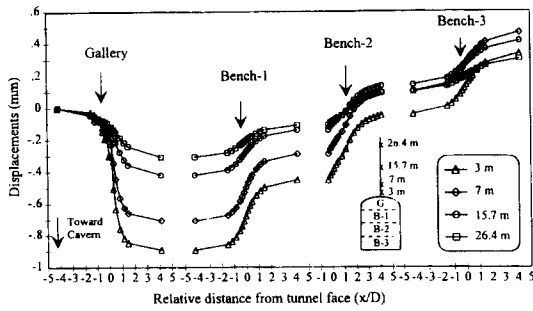


Fig. 10. Calculated displacements above the crown during excavation(3D analysis).

정부의 변위 양상에 대한 3차원 해석결과를 계측 지점 별로 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 최종 굴착후 1 mm 이내의 상향변위가 발생하였으며 계측지점 통과후 변위는 막장이 공동 쪽의 약 2~3배 지점에 도달했을 때 수렴되는 경향을 보였다. 전체적인 변위 양상은 gallery 굴착시 발파에 의한 영향을 제외하고는 Fig. 3의 계측결과와 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 즉, 계측치 및 해석치 모두 gallery 굴착시 하향변위가 발생하였고 이후 굴착단계에서 굴착으로 인한 응력 재분포와 공동형상의 변화로 상향변위가 발생하였다. 계측 결과에는 공동 굴착의 영향과 발파의 영향이 복합적으로 반영되었기 때문에 계측결과와 해석결과와의 비교를 위해서는 계측 결과에 미친 발파 영향을 보정할 필요가 있다. 즉, 3차원 해석 결과에서 총 변위량에 대한 발파 영향을 보정하였다. 3차원 해석의 결과에 의하면 막장이 계측단면 전방으로 공동 쪽의 약 3배 지점에 있을 때부터 하향변위가 발생하기 시작하여 막장이 계측단면을 지나 공동 쪽의 약 2~3배 지점에 도달하였을 때 변위가 수렴되는 경향을 보였다. 막장이 계측단

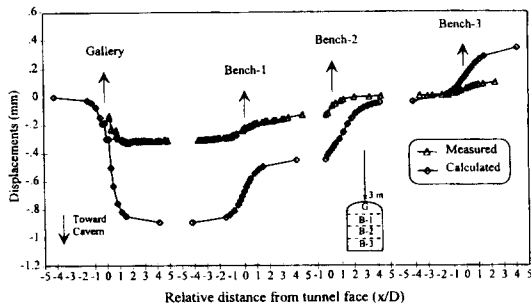


Fig. 11. Comparison of displacements at 3 m above the crown.

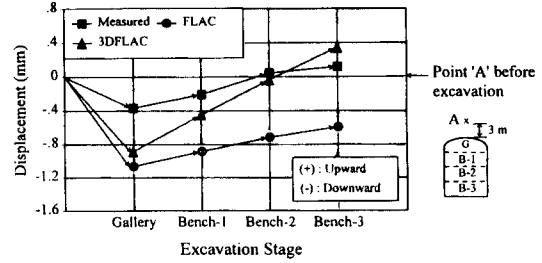


Fig. 12. Comparison of displacements for each excavation stage at 3 m above the crown.

면 통과전 발생한 변위량은 총 변위의 약 33% 정도로 계산되었다.

Fig. 11은 천정부 상부 3 m 지점에서 발파 영향이 보정된 변위 계측치와 3차원 해석에 의한 결과치를 막장의 진행에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 굴착 단계별로 1 mm 이내의 미소한 변위가 발생하였고, 굴착에 따른 변위발생 경향은 서로 일치함을 알 수 있다. gallery 굴착후에는 반경방향응력의 급격한 감소로 인하여 하향변위가 발생하여 계측치의 경우 약 0.4 mm, 해석치의 경우 약 0.9 mm의 하향변위가 발생하였으며, 수렴양상은 막장이 공동 쪽의 약 2배 지점에 도달하였을 때 수렴되는 경향을 보였다. 그러나 bench 굴착이 진행되면서 Fig. 7과 Fig. 8에서 보는 바와 같이 반경방향응력과 접선응력의 증가로 인한 상향변위가 발생하여 최종 굴착후에는 초기치보다 오히려 올라간 변위상태를 보임을 알 수 있다.

Fig. 12는 천정부 상부 3 m 지점의 변위 발생량에 대하여 각 굴착 단계별로 계측치와 2, 3차원 해석치를 상호 비교한 것이다. 변위 발생경향은 3가지 결과 모두 일치하여 gallery 굴착시에는 하향변위가, bench 굴착시에는 상향변위가 발생하였다. 즉 주어진 현장 조건하에서는 gallery 굴착시점이 bench 굴착시점보다 더 위험할 수 있음을 보여 주는 것으로서 이로부터 굴착 단계별 해석의 중요성을 알 수 있다. 또한 현장의 축방향 응력을 제대로 고려한 3차원 해석결과가 2차원 해석결과보다 계측결과와 더 근접함을 알 수 있다.

5. 결 론

원유 저장공동의 굴착에 따른 주변 암반의 거동 양상을 규명하기 위하여 계측 및 수치해석 (2차원 및 3차원)을 수행하고 결과를 서로 비교하였다. 그 결과를 요

약하면 다음과 같다.

1) 계측에 의한 공동 천정부 압반의 변형거동은 굴착에 따른 응력재분포와 발파에 의한 영향으로 굴착 단계별로 복잡한 양상을 보였다.

2) 천정부 변형거동을 보면, gallery 굴착시 막장이 계측지점에 접근함에 따라 발파의 영향으로 상향변위가 발생하였으나 계측지점의 지난 후로는 굴착 영향에 의한 하향변위가 발생하였다. 또 bench 굴착시에는 초기응력조건 및 공동의 형상변화에 따라 상향 변위가 발생하여 최종 굴착후에는 초기상태보다 오히려 올라간 변위상태를 보였다.

3) 수치해석 결과는 변위계측 결과와 유사한 경향을 보였는데, 특히 공동 주변의 응력조건을 제대로 고려한 3차원 해석결과가 계측치와 더 유사하게 나타났다.

4) 해석 결과에 의하면, 공동 천정부의 접선응력은 굴착 단계별로 계속 증가하여 굴착 완료후 초기응력의 2배 이상으로 증가하였으며, 측벽부의 접선응력은 단계별 굴착에 따라 감소하는 경향을 보였다.

5) 측방향응력은 접선응력의 변화와 유사한 양상을 보였다. 천정부의 경우에는 굴착에 따라 계속 증가하여

굴착 완료후 초기응력의 1.2배 정도로 증가하였으며, 측벽부에서는 단계별 굴착에 따라 계속적으로 감소하였다.

참 고 문 헌

1. Brown, E. T., 1981, Rock characterization testing and monitoring, Pergamon Press.
2. Goodman, R. E., 1975, Methods of geological engineering in discontinuous rocks, West Publishing Co.
3. Hoek, E. & Brown, E.T., 1980, Underground excavations in rock, Institution of mining and metallurgy.
4. Itasca Consulting Group, Inc., 1995, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Vol. I-III, Minneapolis.
5. Lee, Y. N., Y. H. Suh & D. Y. Kim, 1997, "Deformation behaviour of metamorphic tuff from plate loading test", J. of Korean Geotechnical Society, Vol. 13, No. 3, pp.87-100.
6. Lee, Y. N., Y. H. Suh, D. Y. Kim & H. K. Nam, 1995, "Three-dimensional behaviour of large rock caverns", Proc. of 8th Int. Congress on Rock Mechanics, Tokyo, Vol. 2, pp.505-508.