

단계별 굴착에 따른 지하 대공동의 응력분포 및 변형거동

Stress Distribution and Deformation Behavior of a Underground Cavern according to Excavation Steps

김대영¹⁾, Dae-Young Kim, 서영호²⁾, Young-Ho Suh, 주광수³⁾, Kwang-Sue Jue, 이영남⁴⁾, Young-Nam Lee

¹⁾ 현대건설 기술연구소 대리, Research Engineer, Hyundai Institute of Construction Technology

²⁾ 현대건설 기술연구소 과장, Senior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology

³⁾ 현대건설 기술연구소 대리, Research Engineer, Hyundai Institute of Construction Technology

⁴⁾ 현대건설 기술연구소 이사, Director, Hyundai Institute of Construction Technology

개요(SYNOPSIS) : This paper presents the results of field instrumentation, laboratory tests, dilatometer tests, plate loading test, in-situ stress measurements, and two and three-dimensional numerical analysis of the oil storage caverns which are under construction in Yeochun, Korea. Changes in rock stress and displacements during excavation were monitored using vibrating wire stressmeters and multi-point borehole extensometers which had been installed before excavation. Laboratory tests were carried out to figure out physical and mechanical properties. Dilatometer tests and plate loading test were performed to determine the deformation modulus of metamorphosed andesitic tuff at the site of underground oil storage facility. In-situ stress measurements were executed at the depth of the caverns using the USBM type borehole deformation gage. Using the results of laboratory and field tests, two and three-dimensional numerical analysis were carried out and compared with the results of instrumentation. It seems that the amount of supports can be reduced and the behavior of cavern due to excavation can be predicted by numerical analysis using field input data.

Key words : dilatometer, plate loading test, in-situ stress, extensometer, deformation modulus

1. 서론

최근 간척사업 및 지하공간 건설로 새로운 공간을 확장하려는 대규모 건설이 점차 증가되고있는 추세이다. 이 중 대규모 지하공간의 건설은 1, 2차 석유파동 이후 정부의 석유비축 계획에 따라 지하비축기지의 건설로부터 시작되었으며 현재에도 건설 중에 있거나 계획중에 있다. 지하비축기지 건설에 있어 중요한 기술적 요소로 공동의 구조적 안정성을 확보하고 유류의 기밀성을 확보하는 기술이다. 구조적 안정성 확보 측면에서 보면, 암반의 등급에 따라 공동의 규모 및 보강패턴이 경험적으로 결정되어 있으며, 현장 기술자의 판단에 따라 약간의 증감이 이루어지고는 있으나 암 등급에 따른 보강 작업의 적정 여부가 확실하게 규명된 바 없다.

본 연구에서는 U-1-2 현장을 대상으로 공동의 단계별 굴착에 따른 응력변화 및 변위를 계측과 현장 암반 물성을 이용한 수치해석을 통하여 공동의 굴착 거동 규명 및 경험적으로 시공하는 보강작업의 적정성을 파악하고자 하였다. 계측으로는 진동현 응력계(Vibrating wire stressmeter)를 이용한 응력변화 측정과 다점식 지중변위계(MPBX)를 이용한 변위측정을 실시 하였으며, 특히 막장의 전방에서 미리

계측기를 설치 측정함으로써 단계별 굴착시 막장 진행에 따른 전체적인 암반의 거동을 파악하였다. 수치해석에 중요한 영향을 미치는 암반 응력조건 및 역학적 성질을 파악하기 위해 실내시험 및 현장에서의 초기응력측정시험, 공내재하시험, 평판재하시험을 실시하여 현지 암반의 조건을 수치해석에 사용하였다. 수치해석으로는 FLAC과 FLAC^{3D}를 사용하여 현장의 시공조건을 반영한 2차원과 3차원 해석을 수행하고 이 결과들을 계측치와 비교, 분석하였다.

2. 비축기지 제원 및 현장 지질

비축기지는 그림 1에 나타낸 바와 같이 6개의 저유 공동과 2개의 공사용 터널, 2개의 샤프트, 그리고 수벽터널로 구성되어 있다. 6개의 저유공동은 심도 EL.(-)30~EL.(-)60m 에 위치하며 N80° W 를 향해 각각 평행하게 놓여있고, 폭은 18m, 높이는 30m 이며 길이는 400~600m 인 마제형상의 공동이다. 공사용터널은 폭 8m, 높이 7.5m 이며, 심도는 입구에서 EL.(+)10m , 끝에서 공동의 바닥과 같은 EL.(-)60m이다. 두 지점간의 경사는 12% 이다.

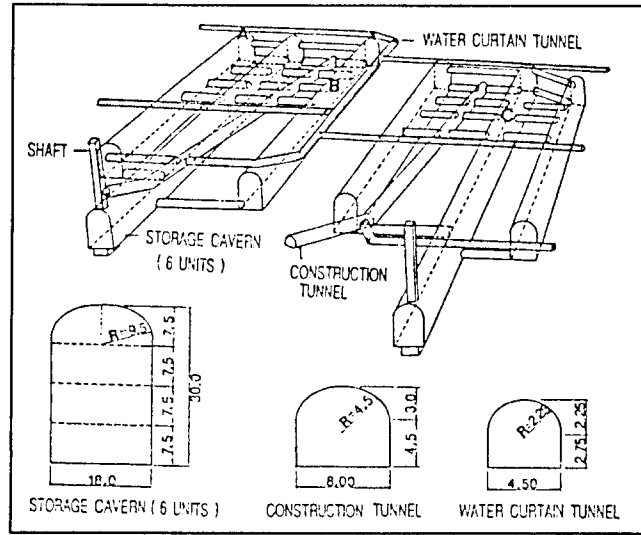


그림 1 U-1-2 비축기지 입체도

대상지역의 지질은 중생대

백악기 불국사통에 속하는 화산암류와 이를 관입한 화강암으로 구성되어 있다. 본 기지의 터널 심도에 해당하는 암질은 열변성작용을 받은 안산암질 응회암으로, 암회색을 띠며 치밀하다. 지표에서 관찰된 주요 지질구조로는 N10E~N10W와 N80E~EW의 두 절리군이 우세하며, N50E와 N50W가 부분적이면서 규칙적으로 존재한다. NS, EW는 전단절리이며, N50E, N50W는 인장절리로 나타났다. 코아 시료 조사 결과, R.M.R Rate는 평균 74의 2등급(Good rock)이고 Q-System에 의한 분류에서는 82% 이상이 Q 값 40 이상인 1등급(Very Good)의 매우 양호한 암반으로 분류되었다. 그러나 시공시 막장 검측 결과로는 Q 값은 2~10 으로 판명되었다.

예비조사 결과를 종합분석한 결과, 가장 유리한 공동의 축방향은 N80W로 결정되었고 공동 상부에 함수절리의 방향과 동일한 N80W의 방향으로 Water Curtain 설치 결정되었다.

3. 계 측

설계에는 A, B 계측이 명시되어 이를 수행하였으나, 공사용 터널 굴착시에 계측한 내공변위와 천단침하 결과 아무런 변위가 나타나지 않았다. 이는 계측이 막장으로부터 상당히 후방에서 이루어짐으로 인한 결과이다. 따라서 기존의 계측과는 다른 막장 전방에서 계측이 이루어 지도록 새로운 계측계획을 수립하였다. 계측은 그림 1 에서 Station A, Station B, Station C의 세 지점으로 구분하였으며, 계측 사항은 표 1.과 같다.

Station A의 계측기 설치 상세는 그림 2에 나타내었다. 계측기는 Gallery 막장의 10m 전방에 설치하여 Bench-3 굴착이 완료될 때까지 측정하였다. 이중 천단부에서의 위치별 지중변위 계측결과는 그림 3에 도시하였다. Gallery 막장 접근시의 상향 변위는 발파의 영향인 듯 하며, 각 단계별 굴착시 마다 상향의 변위를 나타내었으며, 천단부에서 가까울수록 변위량은 크게 측정되었다.

표 1. 계측 사항

위치 항목	Station A	Station B	Station C
계측 목적	공동 상부와 측벽부의 굴착거동 파악	공동 측벽부의 굴착 거동 파악	공동 측벽, 연약대의 변위 거동 파악
계측 항목	지중변위, 지중응력	지중변위, 지중응력	지중변위 계측
계측기 수	MPBX(4points): 1, Stressmeter: 10 EA	MPBX(5points): 1, Stressmeter: 10 EA	MPBX(5points) : 1
계측기 종류	Vibrating wire type, Geokon(USA)	Vibrating wire type, Geokon(USA)	Vibrating wire type, Geokon(USA)
설치 상세	공사용터널에서 공동을 향하여 수직하향	수벽터널에서 공동을 향하여 수평으로	공사용터널에서 공동을 향하여 수평으로

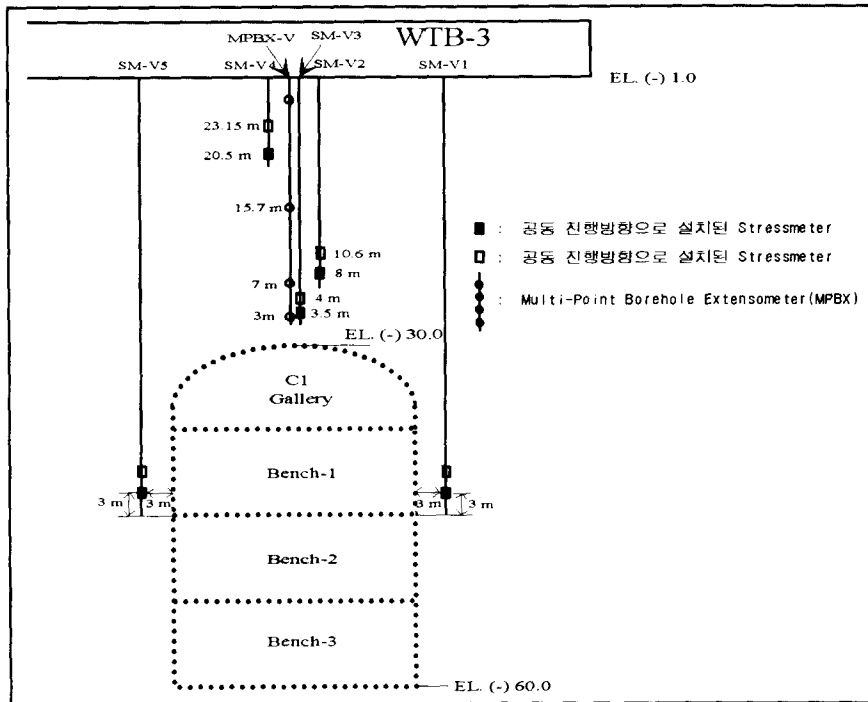


그림 2 Station A 계측기 설치도

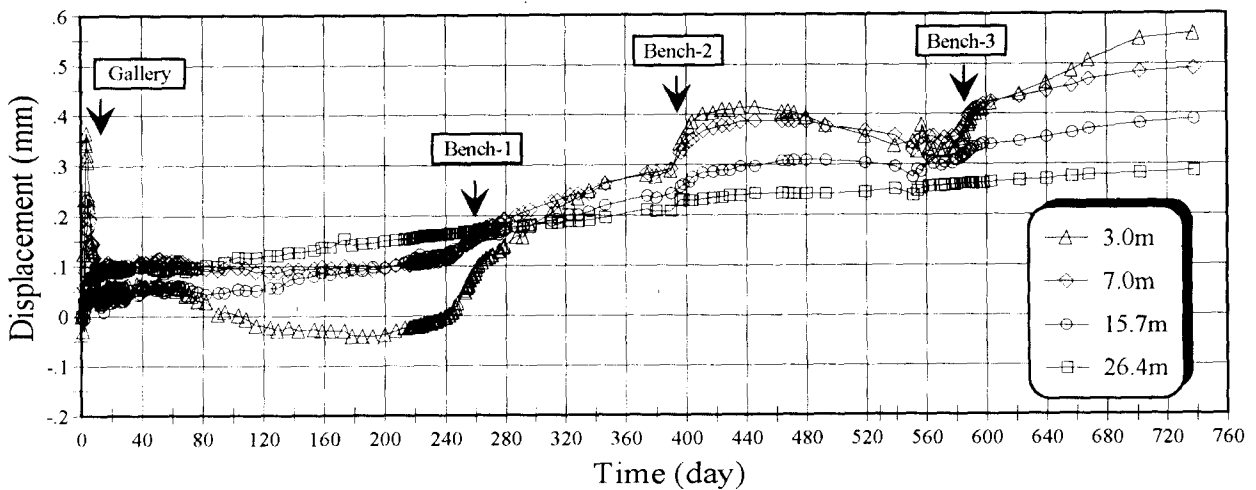


그림 3 Station A, 천단부의 지중변위

4. 암반의 역학적 특성

4.1 실내시험

실내시험으로는 계측 Station 과 평판재하시험 위치에서 천공하여 회수한 코아에 대한 물리적, 역학적 시험 결과들의 평균값을 표 2.에 정리하였다.

표 2. 실내시험 결과 평균값

암 종	비중	일축압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 ($\times 10^4$ MPa)	포아손 비	내부마찰각 ($^\circ$)	점착강도 (MPa)
응회암	2.70	250	220	8.3	0.23	51.5	530

4.2 공내재하시험

재하면적과 절리 포함수에 따른 암반의 변형계수 E_{mass} 를 결정하기 위해 평판재하시험의 계측기를 설치한 공에서 OYO 사의 Elastmeter2 를 사용하여 공내재하시험을 4, 8, 12MPa 의 3 Cycle 로 실시한 결과는 표 3.에 나타내었다.

표 3. 공내재하시험 결과

심도(m)	변형계수(MPa)	절리 상태 (그림 5 참조)
0.3	3.16×10^4	절리 2개 포함, 강하게 밀착, 신선
0.7	4.36×10^4	절리 3개 포함, 강하게 밀착, 신선
2.4	1.6×10^4	Calcite Seam 포함, 파쇄대
5.3	5.6×10^4	Intact

4.3 평판재하시험

절리를 포함한 암반의 변형계수를 구하기 위하여 콘그리트 블록과 12개의 Dywidag bar를 반력 시

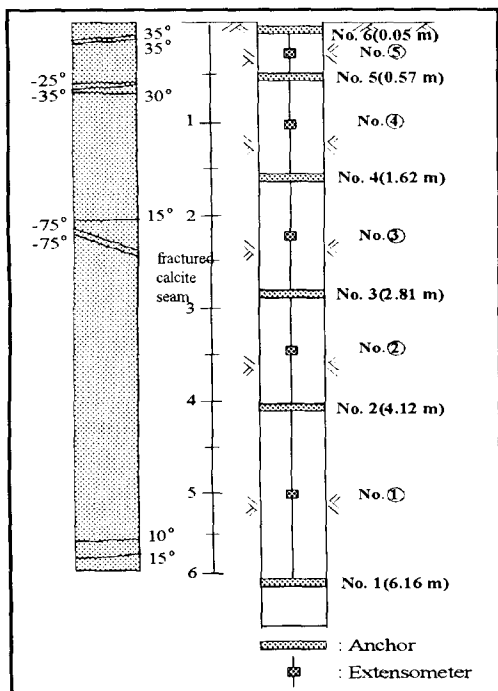


그림 4 평판재하시험 구성도

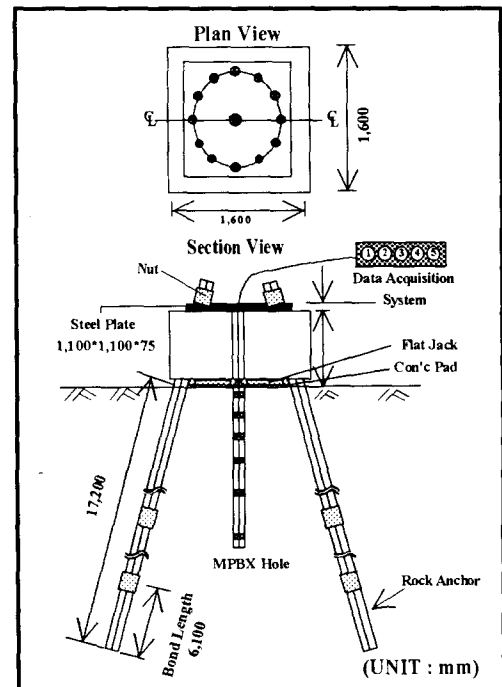


그림 5 시험 위치의 절리 및 MPBX 배치도

스텝으로 하여 공사용 터널 CT202 Gallery Secondary 의 터널 바닥면에 직경 1m의 Flat jack 으로 등분포 하중을 가하는 평판재하시험을 실시하였다. 시험위치는 토피가 약 250m 이며, 암반은 Q = 6.28인 3등급의 보통암으로 분류되었으며, RQD는 100% 였다. 평판재하시험은 그림 4와 같이 구성하였으며, 변위측정을 위한 MPBX 설치공의 절리 조건 및 Anchor 와 Extensometer의 배치는 그림 5에 나타내었다.

그림 6에는 시험 Cycle 별 시간 : 5개 Extensometer에서의 측정변위를 나타내었다. 각 Extensometer의 변위는 인접한 두 Anchor 사이의 변위를 나타내고 있으며, 암반 표면에 근접한 Extensometer는 깊은 곳의 Extensometer에 비해 큰 변위를 나타내고 있다. 이것은 응력이 상부에 집중되고, 기반암의 표면 근처에 절리들이 존재하기 때문이다. No.3 Extensometer는 낮은 압력에서 Dilatancy 거동이 나타나는데 이것은 2.3m 심도에 있는 Calcite Seam과 파쇄된 부분(풍화되지 않음)이 존재하여 나타난 현상으로 판단된다.

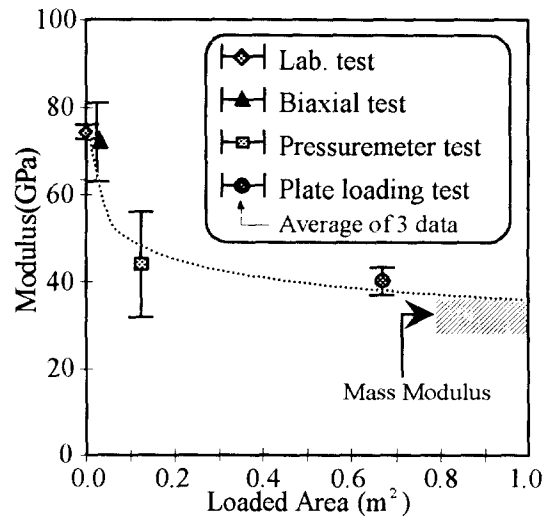
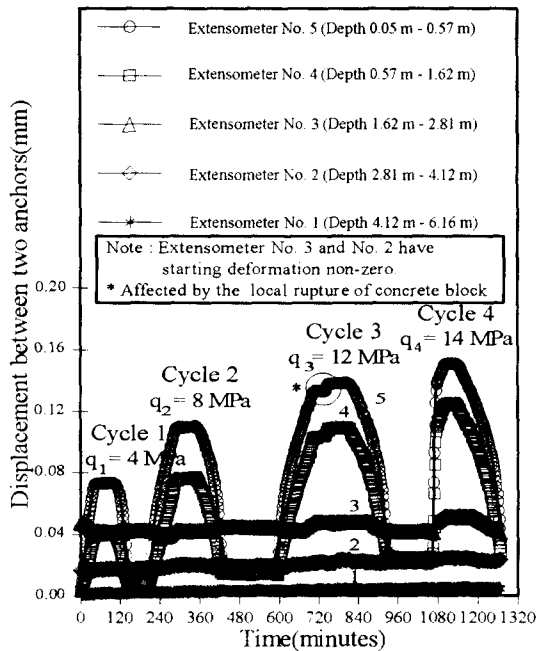


그림 7 재하면적 대 변형계수

그림 6 각 Cycle 에서의 상대변위, 시간, 작용응력과의 관계

그림 7 에는 절리가 변형계수에 미치는 영향을 알아보기 위해 각 시험 결과에서 얻은 값을 재하면적 대 변형계수의 관계로 도시하였다. 이 결과중 이축압축시험 결과는 초기응력 측정시험에서 회수한 Overcore의 탄성계수이다. 이 그림으로부터 변형계수는 재하면적에 따라 감소되며, 절리를 포함하는 기반암의 변형계수는 30~40 GPa 에 접근한다고 판단된다.

4.4 초기응력측정시험

초기응력은 예비조사시에 U-1 지역에 대하여 몇 개의 시추공에서 수압파쇄법을 적용하여 측정하였으나 공동이 위치하는 심도에서는 이루어지지 않았다. 공동이 위치한 심도에서의 초기응력을 측정하기 위하여 응력해방법(Overcoring Method)을 적용하여 CT201 ST2-G, ST3-G에서 표면으로부터 15m 깊이 이하에서 약 3m 깊이로 각각 4회, 5회 시험하였다(그림 8). 사용 장비는 USBM Type Borehole Deformation Gage(BDG) 를 사용하였으며, 외경 122.6mm, 내경 85mm 의 비트로 천공하여 회수한 Overcore 는 외경 85mm, 내경 38mm 였다.

Overcoring 시에 응력해방에 의한 Ex 공의 변화는 그림 9에 나타내었다. 그림에서 U₁, U₂, U₃ 는 BDG 의 세 방향 Tip 을 나타내며, Overcoring Bit가 BDG의 Tip이 위치한 지점에 접근함에 따라 EX 공

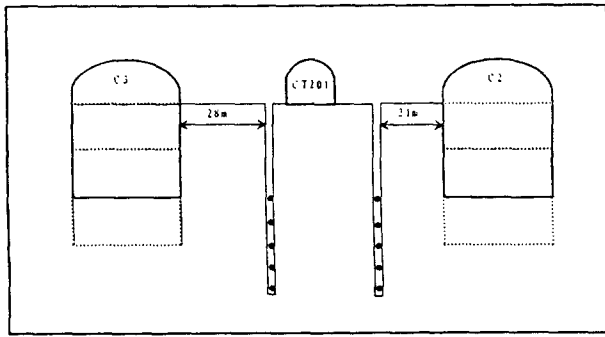


그림 8 초기응력 측정위치

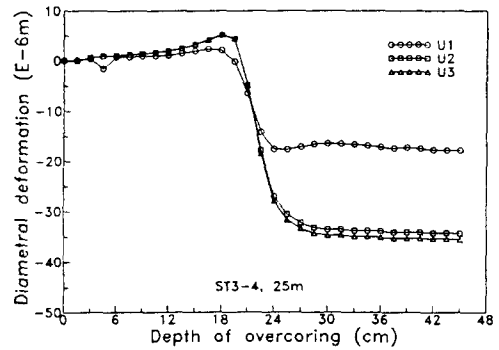


그림 9. 응력해방에 의한 Ex 공의 변화(STG3-4, 25m)

이 수평방향으로 압축을 받아 횡방향의 응력이 일시적으로 증가함을 볼 수 있다. 이것은 Overcoring 할 때의 압력에 의해 횡방향의 응력이 증가하기 때문이다. BDG의 Tip이 위치한 지점을 Bit가 지나게되면 응력이 해방되어 EX Hole이 팽창한다. 이 때 측정한 변위 U_1 , U_2 , U_3 와 Overcore를 회수하여 Biaxial Chamber에서 구한 변형계수로 최대주응력과 최소주응력, 최대주응력 작용방향을 구하여 도시하면 그림 10 과 같다.

이 결과 수평면에서의 최대 주응력은 16.2~28.3MPa 로 측정되었고, 최소주응력은 1.3~18.5MPa 로 측정되었다. 최소주응력이 작게 측정된 것은 양측의 공동이 Bench-2 가 굴착되고 있었던 것 때문으로 판단된다. 따라서 초기응력의 범위로는, 수직응력 $S_v=7\sim7.4$ MPa (암반 단위중량과 피복층 두께에 비례), 수평최대주응력 $P'=16.2\sim28.3$ MPa(100° 방향, 공동 축방향과 일치), 수평최소주응력 $Q'=9.4\sim18.5$ MPa(190° 방향) 으로 결정하였으며, 각 방향의 응력비는 $P'/Q'=1.5$, $P'/S_v=3.0$, $Q'/S_v=2.0$ 으로 결정하였다.

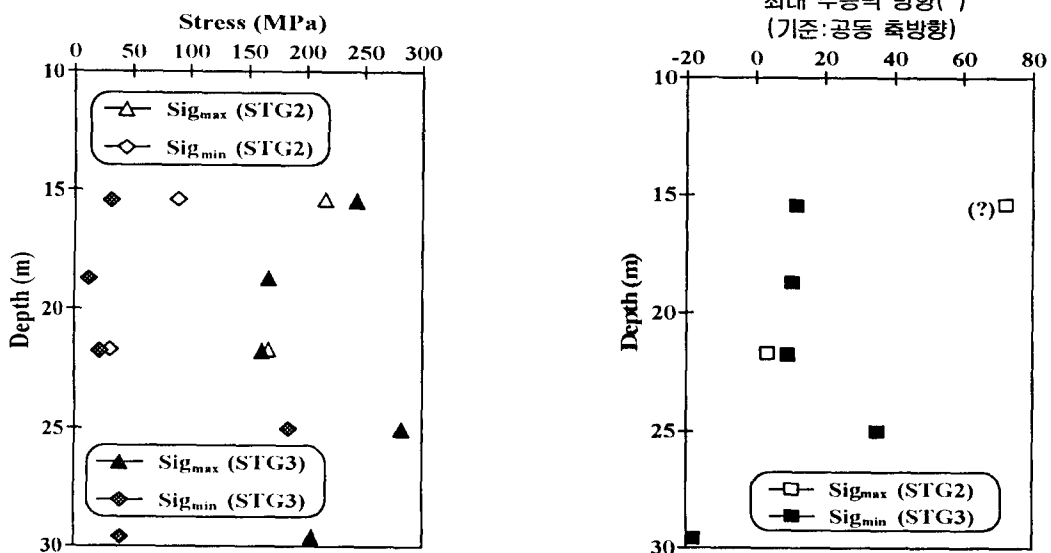


그림 10 깊이에 따른 수평면상의 주응력과 주응력 방향

5. 수치해석

공동의 거동을 분석하고 계측결과와 비교하여 보강의 적정성 판정을 하기위해 유한차분 해석 프로그램인 FLAC과 FLAC^{3D} 를 사용하여 해석을 수행하였다. 초기응력 조건, 변형계수는 현장시험에서 구한 값을 사용하였으며, 점착력은 실내시험 결과(53MPa)의 19%인 10MPa 를 적용하였다. 대상지역의 암반은 열변성 응회암이며 실험결과 세립질의 등방성 극경암 이었으므로 현지암반의 인장강도는 Hoek & Brown의 강도 추정법에 의하여 식 (1)에 $m=8.5$, $s=0.1$ 을 대입하여 결정하였다.

$$\sigma_t = \frac{1}{2} \sigma_c (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (1)$$

표 6.에는 해석에 사용한 물성을 나타내었다.

표 6. 해석에 사용한 물성

Density(t/m ³)	E(MPa)	ν	C(MPa)	ψ	Tensile Strength (MPa)
2.7	4 x 10 ⁴	0.23	5, 10	45°	3

2차원 해석에는 가로 150 m, 세로 150 m 의 모델을 설정하였다(그림 11). 평면 변형을 조건에 Mohr-Coulomb 파괴조건을 사용하였다. 해석순서는 Gallery, Bench-1, Bench-2, Bench-3의 총 4단계로 하여 단계별굴착에 의한 해석을 수행하였으며, 무지보인 경우와 시공조건과 같이 록볼트로 보강한 경우에 대하여 비교하였다. 두 해석 결과는 변위와 주응력 분포는 거의 근사한 결과가 나타났다. 이는 록볼트에 의한 지보효과가 거의 없다는 것을 의미한다. 터널 측벽부의 경우 최종 굴착 후 측벽부에서 약 5 m 이내에서 응력이완현상이 발생하였고 이러한 결과는 록볼트의 길이(4 m)를 감안할 때 록볼트에 의한 지보 효과가 감소되는 요인으로 작용하고 있다.

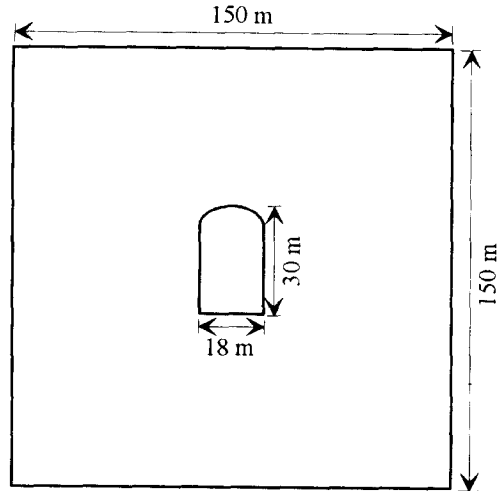


그림 11 2차원 해석 모델

3차원 해석에는 폭 100 m, 길이 150 m, 높이 250 m의 1/2 대칭형 모델을 사용하였다(그림 12). 파괴기준은 2차원 해석과 같은 조건을 사용하였다. 해석순서는 2차원 해석 단계와 마찬가지로 Gallery, Bench-1, Bench-2, Bench-3의 총 4단계로 각 굴착에 따른 해석을 수행하였다. 또한 공동 굴착 진행방향의 굴착단계는 현장의 변위, 응력 계측지점 결과 비교를 위해 응력-변위 계측지점을 길이방향의 중앙인 75m에 두고 시공과정과 같이 굴착하는 것으로 하여 계측단면에 30m에 근접하는 곳까지는 한 번에 굴착하고, 그 이후는 6m씩 굴착하다가 계측단면에 가까워지면 3m씩 굴착하여 계측단면을 통과하고 나머지 75m 구간은 이 순서의 역순으로 하였다.

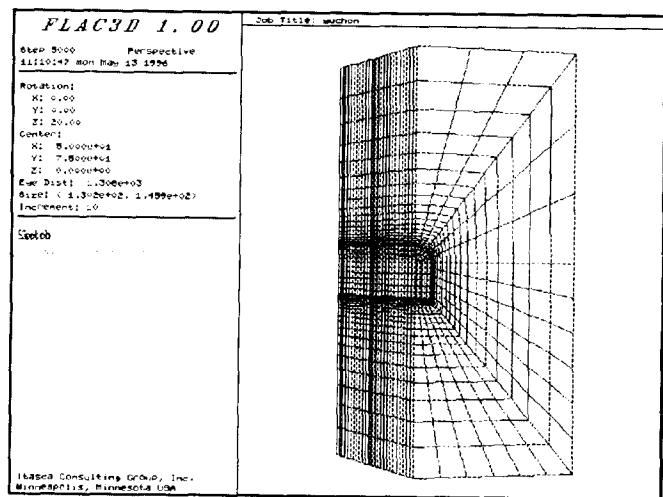


그림 12 3차원 해석 모델

사용한 물성은 2차원 해석의 경우와 동일한 물성을 사용하였으며 2차원 해석결과 무지보 굴착인 경우에도 해석결과에 큰 차이가 없었으므로 무지보로 하였다. 해석 결과 Bench-3 굴착 후에 공동 천단부에서 최대 0.3 mm, 측벽부에서 최대 9.3 mm의 변위가 발생하였다. 전체적으로 천단부의 변위는 높은 축압으로 인해 각 단계 굴착이 진행됨에 따라 감소 하는 경향을 보이며, 측벽의 경우 증가하는 경향을 보인다. 주응력 분포의 경우 측벽 바닥 모서리 부분에서 응력집중이 발생하였으며 측벽부 약 5 m 내에서 응력이완 현상이 발생하였다. 소성대는 발생하지 않았으나 측벽부의 응력이완 현상때문에 보강이 필요하다고 판단된다. 특히 록볼트를 사용할 경우 응력이완 현상을 막기 위해 5 m 이상의 록볼트를 사

용해야 할 것으로 판단된다.

6. 계측 및 수치해석 결과의 비교분석

6.1 계측결과의 발파영향 보정

계측결과와 수치해석결과와의 비교를 위해서는 먼저 발파영향에 대한 보정이 필요하다. 그림 13은 Gallery 상부 3m 지점의 계측 변위와 해석변위를 막장의 진행에 따라 도시한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 계측치의 경우, 막장이 계측단면으로 다가오면서 발파진동의 전파방향(상향)으로의 변위가 발생하며, 막장이 계측지점을 지날 시점부터는 발파의 영향이 제거되면서 굴착에 의한 하향변위가 발생함을 알 수 있다. 따라서 막장이 계측단면에 도달할 때까지 발생한 굴착 변위는 제대로 측정되지 않았기 때문에 해석치와의 비교를 위해서는 이에 대한 보정이 필요하다.

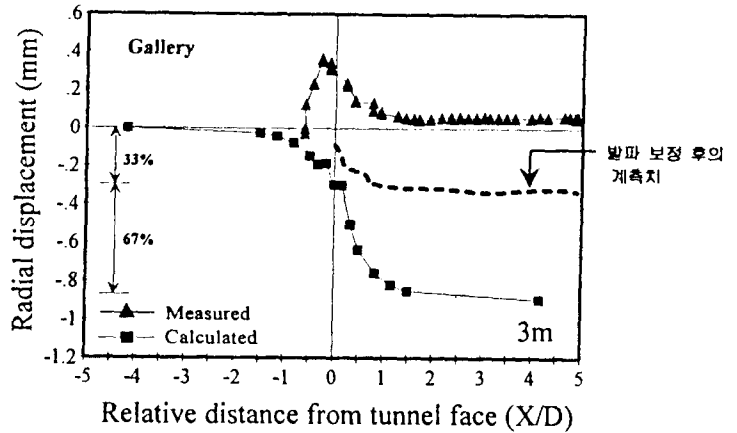


그림 13 발파효과 보정 방법

3차원 해석결과에 의하면, 막장이 계측단면으로부터 $-2 \sim -3D$ (D :공동의 폭)정도 도달했을 때부터 하향 변위가 발생하기 시작하여 막장이 계측단면을 지나 $2 \sim 3D$ 정도 지나면서 약 0.9mm의 최종 변위로 수렴함을 알 수 있다. 그리고 막장이 계측단면을 지날때까지 발생한 변위는 총 변위량의 약 33% 정도로 계산되었다. 이 결과를 이용함으로써 계측치에 대한 발파영향을 보정하였다(그림 13). 이 결과에 의하면 Gallery 굴착후 약 0.37mm의 계측변위가 하향으로 발생한 것으로 나타났다. 변위의 수렴시기는 해석결과에서의 수렴시기와 일치함을 알 수 있다.

6.2 비교 분석

그림 14는 각 굴착단계에 따른 Gallery 상부 3m 지점의 변위발생 양상을 도시한 것이다. 이 그림에서 측정치는 발파영향을 보정한 결과이며, 해석치는 3차원 해석결과이다. 전체적인 변위량에는 약간의 차이가 있으나 굴착에 따른 변위 발생경향은 계측치와 해석치가 일치함을 알 수 있다. 즉, Gallery 굴착 후 하향으로 변위가 발생하였으나 Bench 굴착이 진행됨에 따라 공동형상과 축압의 영향으로 인하여 상향변위가 발생함을 알 수 있다.

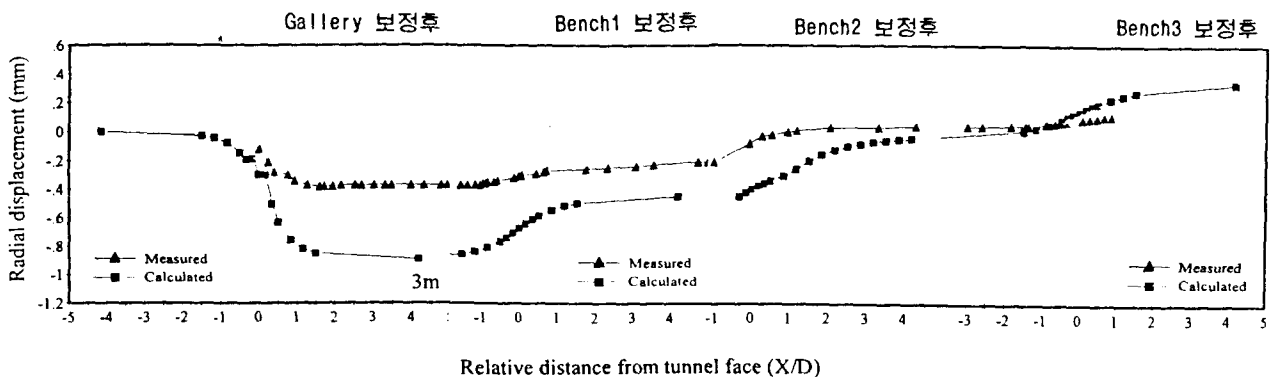


그림 14 굴착 단계별 변위 발생 경향 비교

그림 15 는 각 굴착 단계별로 Gallery 상부 계측지점들(3m, 7m, 15.7m, 26.4m)의 최종 변위발생량을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 공동에 인접한 지점일수록 굴착의 영향을 많이 받는 것으로 나타났으나, 전체적인 변위량은 1mm 내외로 미소하며, 변위발생양상은 계측결과와 해석결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

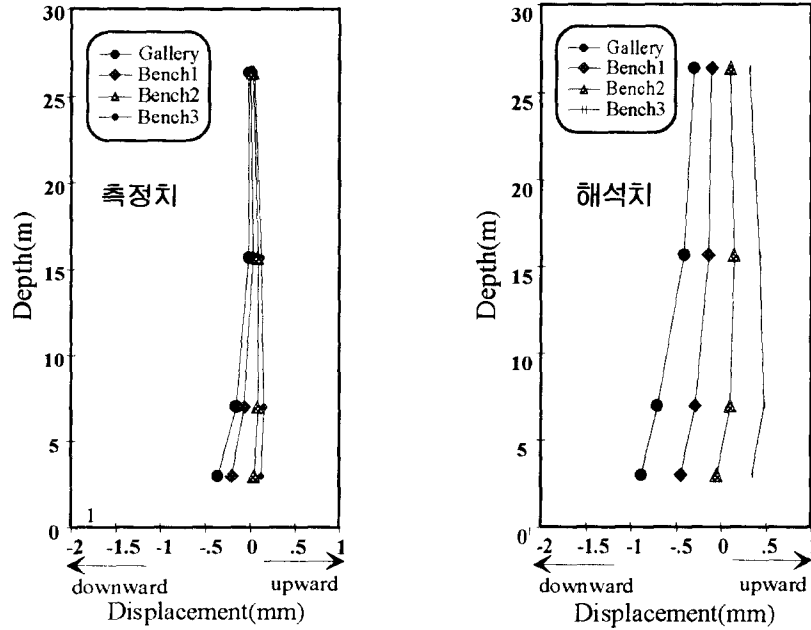


그림 15 굴착 단계별, 심도별 천단부 최종 변위 비교

그림 16 은 각 굴착단계에 따른 Gallery 상부 3m 지점의 변위에 대한 계측치와 2차원, 3차원 해석치를 함께 도시한 것이다. x 축의 굴착 높이는 단계별 굴착에 따른 공동의 높이를 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이 전체적인 변위발생경향은 일치함을 알 수 있으며, 2차원 해석에 의한 하향 변위량이 3차원 해석에 의한 하향 변위량보다 크며 반대로 상향변위량은 2차원 해석치가 가장 작음을 알 수 있다. 이는 2차원 해석의 경우 수평 측압에 의한 영향을 제대로 고려하지 못하기 때문이며 따라서 2차원 해석으로 공동을 설계하거나 안정성을 평가하면 안전율은 높아지고 안정성은 감소하는 결과를 가져올 수 있다.

응력변화에 대한 계측의 경우, 공동 인접지점에서는 초기의 발파충격으로 인하여 응력 변화량의 절대치는 제대로 측정되지 못하였으나 그 증감 경향은 수치해석 결과와 일치하였다.

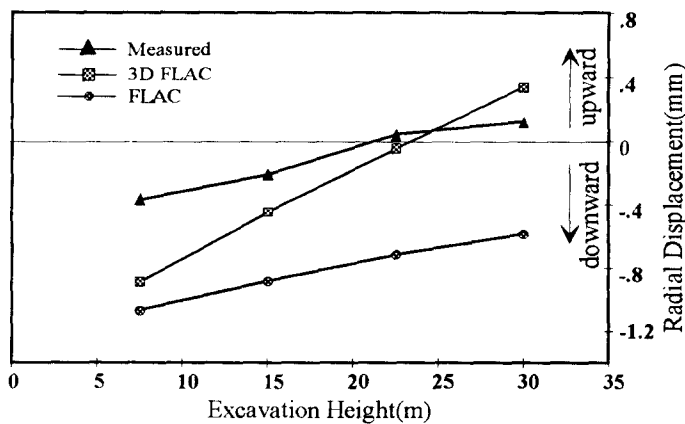


그림 16 굴착 단계별 천단부 최종 변위 비교 (3m 지점의 계측치/FLAC/FLAC^{3D})

7. 결 론

본 연구는 전남 여천 지역에 시공 중인 원유비축기지를 대상으로 계측, 현장시험, 수치해석 등을 통하여 지하공동의 역학적 거동을 규명하고 지보량의 적정성을 검토함으로써 경제적이고 안전한 지하비축기지 건설을 도모하고자 수행되었다. 본 연구에서 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 초기응력 측정결과, 수평압이 수직압에 비하여 2-3 배 정도 큰 것으로 나타났으며, 공동의 진행방향이 최대주응력 방향과 대체로 일치하여 공동은 역학적 안정성에 유리한 방향으로 배치된 것으로 판단되었다. 이 결과는 수치해석의 중요한 입력자료로 활용되었다.

(2) 암석실내시험과 평판재하시험, 공내재하시험 등의 현장시험을 통하여 현지 암반 변형계수의 합리적인 결정이 가능하였으며 본 대상지역의 경우 현장 암반의 변형계수는 암석 코아 탄성계수의 약 50% 정도로 나타났다. 이 결과도 수치해석의 중요한 입력자료로 활용되었다.

(3) 수정계측 결과, 공동 주변의 암반은 굴착이 진행됨에 따라 발생하는 변위 및 응력변화로 인한 복잡한 거동 양상을 보였으나 전체적으로 현 저유동굴은 역학적인 안정성을 확보하고 있는 것으로 판단되었으며, 발파영향을 보정한 계측결과는 수치해석결과와 비슷한 경향을 보였다.

(4) 현장시험결과를 중요 입력자료로 한 2차원 및 3차원 수치해석 결과, 계측결과와 마찬가지로 공동의 안정성을 확인할 수 있었으며, 특히 3차원 해석을 통하여 굴착진행에 따른 주변 암반의 전체적인 거동양상 파악이 가능하였다. 현장시험을 통하여 정확한 입력자료를 얻을 경우, 수치해석은 암반의 거동을 정확하게 예측하는 데 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

(5) 계측결과와 해석결과를 종합할 때 전체적으로 보강량을 상당부분 줄일 수 있었던 것으로 판단되었다. 설계 단계에서 보강량에 대한 정확한 산정에는 어느 정도 한계가 있으나 사전 지질조사, 현장시험, 수치해석등을 체계적으로 수행하면 보강량에 대한 좀 더 합리적인 결정이 가능할 것으로 생각된다.

8. 참고문헌

1. 이영남, 서영호, 김대영, 주광수(1996), "여천 비축기지 계측 및 굴착거동(최종보고서)", 현대건설(주) 기술연구소
2. Hoek, E. and Brown, E. T. (1980), "Underground Excavations in Rock", The Institution of Mining and Metallurgy.
3. Lee, Y. N., Yun, S. P. and Kim, D. Y. (1996), "Design and construction aspects of unlined oil storage caverns in rock", *Jour. of Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 11, No. 1, PP. 33-37.
4. Lee, Y. N., Suh, Y. H. and Kim, D. Y. (1996), "Deformability of metamorphosed andesitic tuff from plate loading test", *Proc. of the 2nd North American Rock Mechanics*, Vol. 2, pp. 1573-1580, Montreal, Canada
5. Lee, Y. N., Suh, Y. H., Kim, D. Y. & H. K. Nam (1995), "Three-dimensional behavior of large rock caverns", *8th International Congress on Rock Mechanics*, International Society of Rock Mechanics, pp.505-508, Tokyo, Japan