

국내 원유 비축 지하공동의 조사 및 설계 사례

김치환¹⁾, 이석천¹⁾

Investigation and Design of Underground Cavern for Oil Storage in Korea

Chee Whan Kim, Seok Chun Lee

ABSTRACT

This study is to summarize the contents for the investigation and design of the construction for oil storage. Since underground caverns are large scale, in their construction one should consider the mechanical stability of caverns and the economic view of construction. On the basis of them, cavern's section and layout were determined and water curtains were designed to maintain hydraulic equilibrium so that gases were sealed tightly.

Also the supporting criteria for rock bolt and stotcrete were determined by means of the classification of rock masses and the results of finite element method. The criteria of grouting reinforcement were presented according to the results of injection test in the pilot holes of working face.

1. 서 론

원유비축용 공동의 건설은 여러분야가 복합되는 대규모 공사이므로 조사와 설계에 있어 여러 요소를 고려해야 한다. 특히 대단면 공동의 설계에는 공동의 구조적인 안정성을 보장해

야 할 뿐만 아니라 수리지질적 특성에 부합해야 한다.

따라서 대상 지역의 암석의 종류와 암반공학 적 특성 및 수리지질적 특성을 정밀한 지질 조

*1992년 12월 접수

1) 삼림건설터트 기술개발본부

사를 통해 파악했고 이를 토대로 지하공동의 배열과 지하공동의 단면형상을 중심으로 보강 기준 및 수봉시설을 설계하였다. 이들 설계에 있어 공동의 역학적, 수리적 안정성을 평가하기 위해 유한요소법을 이용하여 수치 해석을 행하였고 이들 자료를 설계에 반영하였다.

2. 지질조사

지하 원유 저장 시설의 경제성, 안정성, 시공성을 충족시키기 위한 지질 공학적인 고려가 동굴 설계시 매우 중요하며, 이에 대한 기본 설계 자료를 제공하기 위한 지질조사가 수행되었다. 즉 지하공동의 방향 결정, 배치, 가용면적 파악을 위해 지형 및 수계 분포, 지질 경계, 암종 및 분포, 단층, 파쇄대, 절리군 등의 구조대의 분포, 방향, 크기, 상태 등을 파악하기 위한 지형 및 항공 사진 관독, 지표지질 조사, 지구물리 탐사, 시추조사 등을 수행하였으며 수봉시설의 설치 및 지하 공동내의 해수, 지하수의 유입을 방지하기 위해 수문조사 및 수압시험, 양수시험, 지하수 유동조사, 지하수위 측정 등 수리지질 조사를 시추 조사와 병행하여 실시하였다. 또한 지하동굴의 형태와 규모에 따른 보강방법의 종류와 형태 등 역학적 안정성을 검토하기 위해 모암의 강도, 절리의 방향, 크기, 상태, 충전물 등 절리의 특성을 이용한 암반의 분류 및 암석의 물리적 특성을 파악하기 위한 실험실 암석 시험 등을 수행하였다. 이와 같은 제반 지질조사 결과는 다음과 같다.

2.1 지 질

본 조사지역의 지질은 중생대 백악기 불국사층에 속하는 화산암류와 이를 관입한 화강암류로 구성되어 있다. 화산암류는 응결응회암, 괴상의 유리질 안산암, 반상안산암 등이 분포하며 화강암류는 각섬석 결정이 특징적인 각섬석

화강암과 우백질의 미문상 화강암이 분포한다.

특히 미문상 화강암 분포 지역에서는 절리내 팽창성 광물이 협재되어 있다. 또한 본 지역에서는 암맥의 관입현상이 거의 발견되지 않는다.

2.2 구조지질

본 조사지역에서의 지표지질조사, 지구 물리 탐사, 시추조사 결과 지질 구조는 남측 지역에서는 주 구조대의 방향은 NS와 EW계 방향성이 우세하고 북측 지역에서는 $N25^{\circ}-35^{\circ}W$, $N50^{\circ}E$ 방향의 구조대가 주로 우세하게 발달 분포한다. 전체적으로 보아 본 구역에서는 NS, EW계가 전단절리로 $N50^{\circ}E$, $N50^{\circ}W$ 계가 인장절리로 판단된다. 주 응력 분포는 남측 지역은 NS를 중심으로 $N30^{\circ}W-N45^{\circ}E$ 분포를 보이며 북측 지역에서는 전 방향으로 분포하는 특이한 양상을 띤다. 이는 공내 수압 시험 결과와 비슷한 양상을 띄는데 지형적인 영향 및 다양한 구조적인 힘에 의한 영향으로 판단된다. 물리 탐사중 굴절법 탄성과 탐사결과 단층파쇄대 및 구성암석의 변화에 의한 변위대를 나타내는 $N35^{\circ}-45^{\circ}W$, $N40^{\circ}-50^{\circ}E$ 방향의 탄성과 속도 이상대가 분포하며, 전기 비저항 탐사 분석 결과 암맥의 관입 및 고밀도 암질의 분포를 나타내는 $N30^{\circ}-40^{\circ}W$ 방향의 고비저항 이상대와 NS,EW계 방향의 지질구조대의 분포를 나타내는 저비저항 이상대가 분포한다. 이는 지표지질 조사결과와 일치하며 이상대의 경사 방향은 $70^{\circ}-80^{\circ}E$ 가 우세하게 나타난다.

2.3 수리지질

본 조사 지역에서의 지하수위 분포는 약 10개월간 연속 측정된 결과 지형적인 영향으로 최저 +10ML이상에 위치하고 있으며, 수압시험 결과 투수계수 대표값은 양수시험 및 R.Q.

D.와의 상호관계에 따라 보정한 결과 남측 지역에서는 $3.0 \times 10^{-8} \text{m/sec}$, 북측 지역에서는 $1.5 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ 로 나타난다. 수리시험 및 수리간섭시험 결과 투수량계수(T)는 $1.67 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ 범위에 속하며 대수성이 양호한 방향성은 대체로 N35° W, NS 및 N50° E이나 지형적인 영향을 고려할 때 NS 방향으로 판단된다.

2.4 암반특성 및 기타

암질 및 구조대의 발달상태를 조사할 목적으로 실시한 시추조사 결과 채취된 암심에 대하여 암석분포, 풍화도, 색, 절리, 단층대의 발달상태, 절리내 충전물, 절리간격, R.Q.D., 회수율 및 지하수위 등을 관찰, 공별 시추 주상도를 작성한 뒤 암질을 R.Q.D., R.M.R., Q-system 등의 3개 측면에서 분류한 결과 지하 심부에서의 암질은 매우 양호한 것으로 판정되었으며 ±0 m M.S.L.하부에서 남측 지역에서는 평균 R.Q.D. 90%, R.M.R. Rate 75, Q-system Rate에서 60%이상의 양호한 암반에 해당되며 북측 지

역에서는 평균 R.Q.D. 96%, R.M.R. Rate 78, Q-system Rate 82%이상의 매우 양호한 암반에 해당된다. 암반 응력 시험 결과 본 지역의 응력은 수직응력보다 수평응력이 약간 높으며 최대 수평응력 또한 방향성은 낮은편이다.

3. 동굴설계

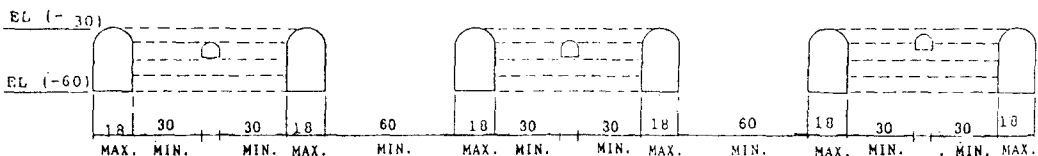
지하 공동을 기능별로 볼 때 저장 공동(Storage Cavern), 수봉시설(Water Curtain), 입출하 수직갱(Vertical Shaft) 및 상기 공동을 굴착하기 위한 진입터널(Access Tunnel)로 구분된다.

3.1 저장공동

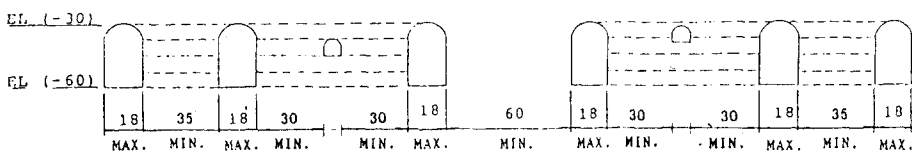
저장공동의 배치는 Fig.1과 같이 Unit-1지역과 Unit-2지역으로 구분하며 각각 화강암 지역과 화산암 지역에 장축 방향을 N80° W으로 배치한다. 그리고 안정적인 지하수압이 작용될 수 있도록 최대 운전 압력과 안전율을 감안해

단면 배치 계획도

단위 : m



UNIT-1



UNIT-2

Fig.1 단면 배치 계획도.

서 공동 천단고를 EL-30m M.S.L 하단부를 EL-60m M.S.L에 위치시켰다. 공동의 단면은 역학적 안정성과 굴착장비의 제원을 감안하여 높이 30m, 폭 18m로 설정하였고 굴착 방법은 7.5m씩 4회에 나누어서 수평방향으로 굴착토록 하였다.

인접한 공동에 서로 다른 유종을 저장할 경우에는 역학적 안정성과 함께 원유가 유출되어 혼합되지 않게끔 지하공동의 간격을 유지해야 한다. 현장의 암반내 초기응력상태 측정결과 평균적으로 $K=1.5$ 로 평가되었고 이를 토대로 유한 요소법에 의한 이완 영역의 계산 결과 공동사이의 암주폭을 35m로 결정하였다.

3.2 수봉시설(Water Curtain)

지하공동의 원유로부터 증발된 휘발성 기체의 유출을 막기위해 지하공동 주위의 압력을 지하공동 내의 압력보다 높게 유지해야 한다. 이를 위해 수봉시설이 설치되어야 하며 이는 수평과 수직 수봉시설로 구분된다.

3.2.1 수평 수봉시설

수평 수봉시설에 의한 지하 공동의 밀봉성은 지하 공동과 수평 수봉시설과의 거리, 수봉시설에서의 주입공 간격, 주입공의 방향, 주입공의 직경과 길이, 지하 공동 측벽에서 가장 바깥쪽의 주입공과의 거리, 암반의 투수계수에 따라 변하게 된다. 지하공동과 수봉시설 터널 굴착시 이완이 예상되는 절리 길이 약 20m와 최소 안전거리로 판단되는 약 10m를 고려하여 수봉시설 위치를 지하 공동으로부터 30m 상부로 결정하였다. 주입공 간격은 Unit-1에서 15m, Unit-2에서 10m로 결정하였고, 굴착시 발생하는 이완영역과 절리의 발달방향을 고려하여 지하공동 측벽에서 수평거리가 가장 멀리 떨어진 주입공까지의 거리를 23m로 결정하였다.

3.2.2 수직 수봉시설

수직 수봉시설은 저장 공동이 해안에 근접해 있을 경우 해수의 유입을 막기 위해 설치된다. 주입공의 깊이는 +25m M.S.L의 도로변에서 지하공동의 하반깊이 -60m M.S.L까지로 수직거리 85m가 된다. 주입공의 간격은 약 20m로 하고 현지 암반의 절리각도 70-80°를 고려할 때 약간 경사지게 설치하는 것이 바람직하다.

3.3 공사용 진입터널

공사용 진입터널은 입구, 주진입터널, 분기터널로 구분되며 입구의 기준면고는 Unit-1이 EL+25m M.S.L., Unit-2가 EL+10m M.S.L.로 계획하였으며, 주진입터널과 분기터널은 단위 동굴내의 암주에 배치하고 수밀성을 최대한 유지하기 위해서 저장공동과 교차하지 않도록 한다. 공사용 장비중 차량 폭과 높이가 최대인 로더와 가장 빈번하게 출입하는 덤프트럭 20Ton의 교행 공간과 환기용 관 및 기전 설비의 공간을 확보하기 위해 단면의 폭을 7.0-8.5m, 높이를 7.5-8.5m로 계획하였다.

4. 굴착 및 보강

4.1 굴 착

굴착 방법은 작업 진행중에 현장에서 판단되는 암질별로 보유 장비에 가장 적합한 발파방법을 발파시험에 의해 결정하는 것이 바람직하다. 일반적으로 발파효율은 암질, 화약류의 종류, 천공패턴 및 작업원의 숙련도에 의해 좌우되며 이러한 요소를 고려하여 각 단면별로 가장 적합한 천공과 장약패턴을 추천하였다(Fig. 2, Table 1).

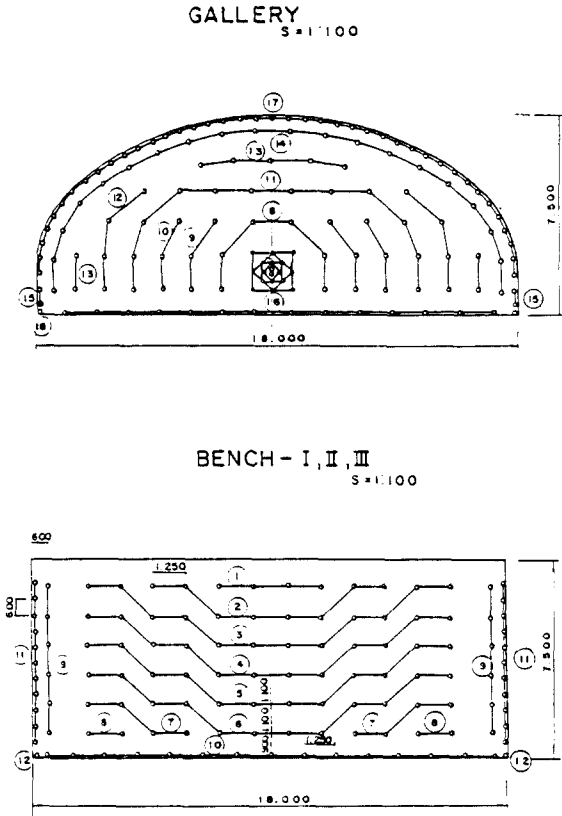


Fig.2 저장공동의 천공 패턴.

Table 1. 1회 발파당 천공 및 장약 패턴.

| 구 분 | 단면적 (m^2) | 천공수 (공) | 장약량 (kg) | 굴진장 (m) | 비장약 (kg/m^3) |
|--------|------------------|------------|-------------|------------|---------------------|
| 저장공동 | | | | | |
| 갤러리 | 111.4 | 146 | 441 | 3.4 | 1.163 |
| 벤치 I | 135.0 | 123 | 470 | 3.4 | 1.033 |
| 벤치 II | 135.0 | 123 | 470 | 3.4 | 1.033 |
| 벤치 III | 135.0 | 123 | 470 | 3.4 | 1.033 |
| 진입터널 | | | | | |
| 주진입터널 | 56.8 | 92 | 250 | 3.4 | 1.292 |
| 분기터널 | 47.4 | 85 | 221 | 3.4 | 1.371 |
| 수봉터널 | 18.1 | 53 | 127 | 3.4 | 2.061 |

저장 공동 갤러리의 아치부는 굴착 후 최대한 원형을 유지하여 응력집중 현상을 줄이고 낙석의 방지를 위하여 슛크리트는 최소 50mm 이상 시공한다. 저장공동을 제외한 각 터널의 보강은 저장공동과 같이 적용 실시하며 록볼트의 길이는 최대 3.0m를 사용한다.

심빼기 방법은 점보드릴을 사용하여 대구경 번커트로 $\phi 102mm$ 의 무장약공 2공을 중심으로

Table 2. 저장공동의 보강기준.

| 암질 등급 | | I | II | III | IV | V | 비고 | |
|-------------|------------|------------|-------------------|-------------------|---|---|---|-----|
| Q 값 | | 40 이상 | 40-10 | 10-4 | 4-0.4 | 0.4 이하 | | |
| 록 볼 트 | 간격 | G | Spot Bolt 3-7m | $2.0 \times 2.0m$ | $2.0 \times 2.0m \sim$ $1.5 \times 1.5m$ | $1.5 \times 1.5m \sim$ $1.2 \times 1.2m$ | $1.2 \times 1.2m \sim$ $1.0 \times 1.0m$ | |
| | | B | 상 동 | 상 동 | 상 동 | 상 동 | 상 동 | |
| | 길이 | G | $l = 4.0m$ | $l = 4.0m$ | $l = 4.0m$ | $l = 4.0m$ | $l = 4.0m$ | 90% |
| | | | $l = 7.0m$ | $l = 7.0m$ | $l = 7.0m$ | $l = 7.0m$ | $l = 7.0m$ | 10% |
| | | B I | $l = 4.0m$ | $l = 4.0m$ | $l = 4.0m$ | $l = 4.0m$ | $l = 4.0m$ | 50% |
| | | B II | $l = 5.0m$ | $l = 5.0m$ | $l = 5.0m$ | $l = 5.0m$ | $l = 5.0m$ | 50% |
| B III | $l = 4.0m$ | $l = 4.0m$ | $l = 4.0m$ | $l = 4.0m$ | $l = 4.0m$ | 100% | | |
| 스 크 리 트 | | Random | $t = 30mm$ | $t = 50mm$ | $t = 100mm$ | $t = 150mm$ | | |

G: 갤러리, B: 벤치, B I: 벤치 I, B II: 벤치 II, B III: 벤치 III

φ45mm의 공을 14공 배치한다. 장약방법으로 일 반공에서는 제라틴 다이너마이트 φ32mm를 장 약하고, 주변공에서는 조절발파법을 적용하여 정밀 폭약인 Finex 1호를 사용한다.

4.2 암반보강

현재 지하공동 건설에서 명확한 보강기준이 없는 상태이므로 암반분류법을 기초로 하는 경 험적인 방법, 터널의 크기에 의한 방법 및 FEM해석에 의한 방법을 종합하여 본 현장여 건에 맞는 적정 보강기준을 선정하였다(Table 2).

5. 그라우팅

지질 조사 결과 대수층이나 파쇄대에 이를 것으로 예상되면 정확한 대수층의 위치와 투수 성을 파악하여 굴착막장에서 진행방향에 대하 여 주수시험을 시행 할 Pilot공을 천공한다. 하 나의 굴착막장에 대하여 길이 20m, φ64mm공 1 공을 천공하여 주수시험을 시행한 후 주입된 물의 손실률(Q)에 따라 그라우팅 시행여부가 결정된다. Q가 0.05 l/min.kg/cm².m 미만일 때 Grouting은 불필요하고 Q가 0.05~0.5일때는

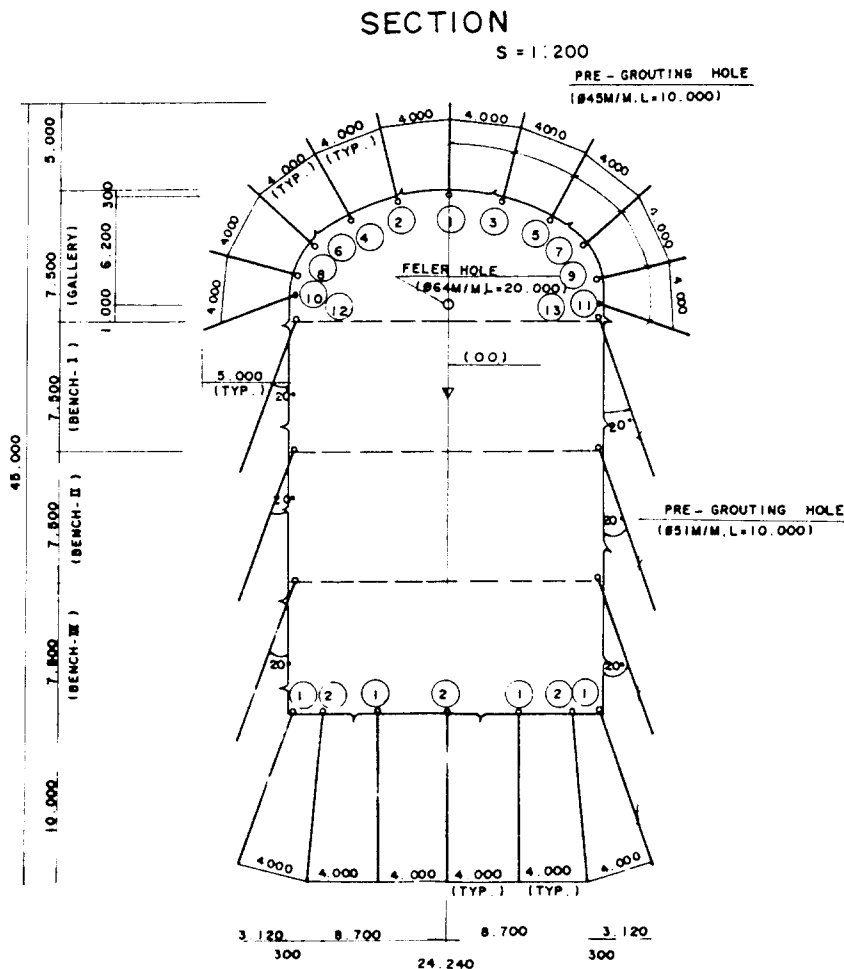


Fig.3 저장공동의 프리 그라우팅 계획.

Pilot공에서만 그라우팅이 시행되며 굴착 후 발견되는 누수는 애프터 그라우팅으로 처리한다. 그라우팅은 시공 시기에 따라 프리 그라우팅과 애프터 그라우팅으로 구분된다.

5.1 프리 그라우팅

암반 분류 결과 불량하다고 평가되는 갠러리 구간에서 매 2라운드 발파마다 수평으로 그라우팅을 실시하고 벤치-I 과 벤치-II 측벽부에서는 하향으로 시행하되 매우 불량한 암반에서는 2m간격으로, 불량한 암반에서는 4m간격으로 시행한다. 벤치-III 바닥에서는 측벽부의 하향 프리 그라우팅을 포함하여 한 열당 7공의 바닥 그라우팅을 시행하되 열간격을 하향 프리 그라우팅에서와 마찬가지로 매우 불량한 암반에서는 2m간격으로, 불량한 암반에서는 4m간격으로 시행한다(Fig. 3).

5.2 애프터 그라우팅

프리그라우팅과는 달리 애프터그라우팅은 적절한 기준을 설정하기 곤란하므로 저장공동 허용 누수량을 근거로 과다 출수 개소 및 바닥에 대한 지수 작업을 시행한다.

6. 유한요소 해석

6.1 동굴 안정성 해석

터널의 설계 및 시공을 합리적으로 수행하기 위해서는 터널의 역학적 안정성을 평가하여야 한다. 이를 위해서는 터널주위 암반에 대한 응력해석을 통한 응력분포 및 이완영역의 발달범위 등을 결정하여야 하며, 록볼트와 슛크리트 등 지보공의 보강 효과에 대하여도 평가되어야 하므로 록볼트 및 슛크리트 지보와 암반의 시간 의존성을 고려한 응력해석이 요구된다.

본 지하 저장동굴은 대규모 단면이 요구되는 시설이므로 단면 형태 및 크기를 결정하기 위

해서는 구조적인 안정성과 함께 시공성과 경제성을 고려한 이상적인 단면형상과 규모 및 동굴간격 등이 검토되어야 한다.

상기 사항에 의거 1차적을 검토된 동굴 단면에 대하여 유한요소법을 통한 단계별 안정성 해석을 시행함으로써 동굴 주변의 응력분포, 이완영역의 발달범위 및 인접공동과의 영향검토, 동굴주변의 범위, 록볼트 및 슛크리트의 지보공 효과 등을 검토하였다. 그리고 다음과 같은 결론을 통해 동굴의 안정성 여부를 평가하였다.

가. 지하공동을 굴착하였을 때 지하공동 주위 암반에 분포하는 응력은 아치부에서 고른 분포를 보였으나 측벽과 암주에서는 부분적으로 단축압축에 가까운 응력상태가 나타나고 있다.

나. 지하공동을 굴착하였을 때 아치부에서의 연직변위보다는 측벽에서의 수평변위가 더 크게 발생하였다(Fig.4).

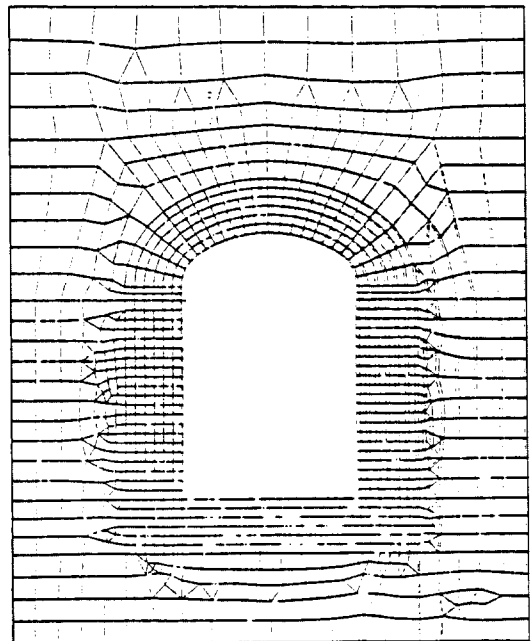


Fig.4 최종 변위도.

다. 록볼트 길이를 약 4m로 입력하고 계산한 록볼트 축력은 약 1.45~6.75t의 분포를 보였다. 록볼트의 길이는 아치부에서는 양호하나 측벽부에서는 록볼트 길이가 짧을 것으로 판단된다.

라. 숏크리트 응력분포는 아치부에서는 고르게 나타났으나 측벽부에서는 인장력이 발생하고 있다. 따라서 부분적으로 숏크리트의 두께를 늘일 필요가 있을 것으로 판단되나 시공시 계측을 통하여 안정성을 확인한 후 결정하는 것이 합리적이다.

6.2 수리해석

지질 조사에 의하여 측정된 암반의 투수계수와 지하수위, 수리 경계 조건 및 저유공동의 단면 형상 및 배열을 고려하여 저유공동 굴착시 변하는 지하수의 거동을 유한요소법에 의하여 해석하였다. 지표로부터 자연 보충수만을 고려하여 저유공동 굴착시 발생하는 지하수위 하강선을 먼저 검토하였고 다음 수봉시설을 고려하여 지하수 연직 동수구배를 구하였으며 연직 동수구배를 기준으로 주입공의 간격을 결정하는 한편 지하공동 내로의 누수량 및 주입공에서 물의 주입량도 계산하였다.

1) 지표로부터 자연 보충수만을 고려할 때 저유 공동 굴착시 발생하는 지하수의 하강선은 저유공동의 바닥까지 도달하여 저유공동 내에 압력이 작용하는 경우 지하수에 의하여 그 압력을 유지할 수 없는 것으로 판단되었다. 따라서 저유공동 내에 압력을 유지하기 위하여 수봉시설이 필요하다.

2) 지표로부터 자연 보충수만을 고려할 때 저유공동으로 유입되는 지하수의 누수량은 남쪽과 북쪽 저유공동에서 각각 약 462m³/day, 약 172m³/day로 예측되었다.

3) 수봉 시설 주입공의 위치는 ±0.m M.S.

L.로 하고 주입공의 수위를 +25m M.S.L.로 유지하는 남쪽 지역의 저유 공동에서 수봉 시설 터널의 주입공 간격이 약 15m일 때 저유 공동 주위에서 지하수 연직 동수구배 I₀를 검토한 결과 약 1.37-2.43의 범위로 저유공동으로부터 가스의 누출을 막기 위한 조건 I₀≥1.0을 만족할 수 있다. 따라서 남쪽 저유공동에서의 주입공 간격은 15m로 결정할 수 있다(Fig. 5).

4) 수봉 시설 주입공의 위치를 ±0.m M.S.L.로 하고 주입공의 수위를 +10m M.S.L.로 유지하는 북쪽 지역의 저유 공동에서 수봉 시설 터널의 주입공 간격이 약 10m일 때 지하수 연직 동수구배 I₀를 검토한 결과 약 1.0으로 저유 공동으로부터 가스의 누출을 막기 위한 조건 I₀≥1.0을 만족할 수 있었다. 따라서 북쪽 저유공동에서의 주입공 간격은 10m로 결정할 수 있다.

5) 수봉시설이 설치되는 경우 남쪽과 북쪽 저유공동으로 누수되는 지하수의 양은 각각 약 1,654m³/day-2,100m³/day, 약 391m³/day-538m³/day로 수봉시설이 없는 경우의 누수량 약 172m³/day-462m³/day보다 컸다. 또한 남

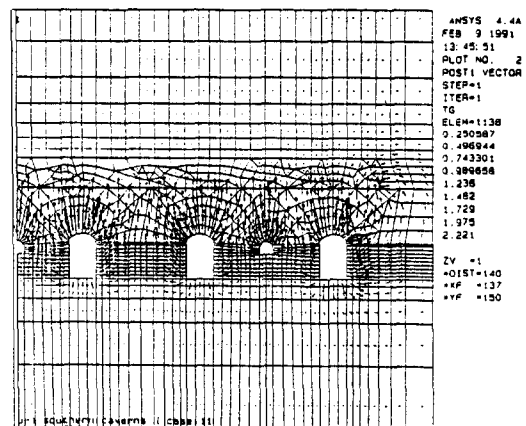


Fig.5 지하수의 연직 동수 구배.

쪽과 북쪽 지하 공동 수봉 시설에서의 주입량은 각각 약 $1.782\text{m}^3/\text{day}$ - $2.349\text{m}^3/\text{day}$ 및 약 $456\text{m}^3/\text{day}$ - $638\text{m}^3/\text{day}$ 로 나타났다. 따라서 적절한 그라우팅에 의하여 저유 공동 내부로 누수되는 지하수의 양을 조절하여야 할 것이다. Water Curtain터널에서의 주입공의 간격은 시공시 현장에서 주입공 상호간의 수리 간접 시험에 의하여 설계된 주입공 간격의 효율성을 확인하고 현장의 수리지질 특성에 적합하게 재조정할 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 연구는 현재 시공 초기 단계인 원유류 저

장시설에 대한 기본 조사와 설계에 대한 사례 소개이다. 저장공동은 지하심부에 굴착되므로 공동의 안정성과 함께 경제성과 시공성 등이 검토되어 여러가지 대안이 제시되었고 이들을 비교 평가하여 최종적인 안이 채택되었다.

본 저장공동에 대한 조사와 설계는 기존에 수행한 여러 지하시설물에 대한 조사, 설계, 감리의 경험을 토대로 시행하였고, 외국의 사례들과 신기술을 검토하여 적용하였다. 따라서 앞으로 계속될 석유류 비축용 지하공동 건설시, 보다 경제적이고 효율적인 기술을 채택할 수 있으리라 기대된다.