# 地下油類備蓄空洞의 水密性에 관한 硏究

Water Tightness around Under-ground Oil Storage Cavern

鄭 亨 植*
Chung, Hyung Sik
宣 勇**
Sun, Yong
金 雲 永***
Kim, Oon Young

**Abstract**

A successful operation of underground oil storage cavern depends on water-tightness around cavern by groundwater. If water-tightness is not secured, gas bubbles would leak out and oil would migrate to an adjacent empty cavern.

In this research an electrical analogy method was employed to study the influence of shape of cavern on gas leakage and the required natural groundwater level, relative oil level in two neighboring caverns and cavern spacing to prevent oil migration.

The results show that gas leakage is prevented from a cavern with a ceiling of large curvature. The required values of factors to curtail the migration of oil are given on a graph.

**要 旨**

지하류비축동굴의 성패는 지하수에 의하여 空洞 주위에 유지되는 水密性에 있다. 水密性이 보장되면 동굴에 저장된 유류의 gas가 유출되지 않으며 인접空洞이 비어 있을 시 이곳으로 이동하지 않는다. 본 연구에서는 電氣相似模型實驗을 통하여 동굴형태가 gas누출에 미치는 영향과 여러 가지 형태에서 유류이동을 방지하는 지하수위, 동굴내의 유류수준, 동굴간격 등이 검토되었다. 연구결과 동굴의 천정이 큰 곡율을 갖고 있으면 gas누출이 방지될 수 있음이 입증되었고 유류이동을 방지하는데 필요한 자연지하수위, 공동내의 유류수준 및 공동간격이 도표로 주어졌다.

## 1. 序 論

오늘날 世界各國에서는 2次에 걸친 오일쇼크로 인하여 油類備蓄을 서두르고 있으며 그 方法으로서 地上에 탱크를 建造하여 貯藏하거나 地下에 空洞을 掘鑿하여 貯藏하고 있다. 두 方法

* 正會員·陸軍士官學校 土木工學敎授
** 正會員·正友엔지니어링(株) 副社長
*** 陸軍士官學校 土木工學專任講師

中 過去에는 前者의 方法을 많이 使用하여 왔으나 建設費 및 維持費가 너무 많이 所要될 뿐만 아니라 保安上에도 脆弱點이 많아 近年에 와서는 점차 地下에 備蓄하는 後者의 方法이 各國에서 採擇되고 있다. 이 方法의 長點은 地下에 空洞을 掘鑿하되 unline 狀態로 油類를 貯藏하므로 建設費가 低廉하고 維持費가 적으며 保安上의 問題도 훨씬 적어진다. 그러나 空洞內壁을 覆工하지 않기 때문에 發生되는 問題가 많으며 이 方法의 成功與否는 여하히 空洞 周圍에 水密性을 保障하여 油類損失 및 가스의 漏出을 防止하느냐에 있다고 보아도 過言이 아니다. 가스의 漏出을 防止하기 위해서는 空洞 上部에 內部의 가스壓보다 큰 充分한 水頭는 물론 가스氣泡가 上昇하지 않도록 動水勾配를 維持시켜야 한다. 油類의 損失은 地下水位를 높게 하여 水頭가 內壓보다 크게 하면 外部로 流失되지는 않으나 부근에 비어 있는 空洞이 있을 시는 이 곳으로 流失되면서 中間의 岩盤을 汚染시킨다.

이러한 것들은 空洞 上部의 地下水位, 水頭를 維持하기 위한 水平 및 垂直 water curtain 有無, 空洞의 形狀, 間隔 等과 密接한 關係를 이루고 있으며 복잡한 境界條件(boundary condition)으로 인하여 解析的 解法이 곤란하고 近似解法이나 實驗的인 硏究結果에 의존하여 實際設計에 適用하고 있다. 그러므로 자연히 아직 모든 條件을 만족시키는 公式이나 方法이 發表되지 않았으며 대개의 경우 각 경우마다 實際의 狀態를 單純化한 모델로 만들어 解決하고 있다.

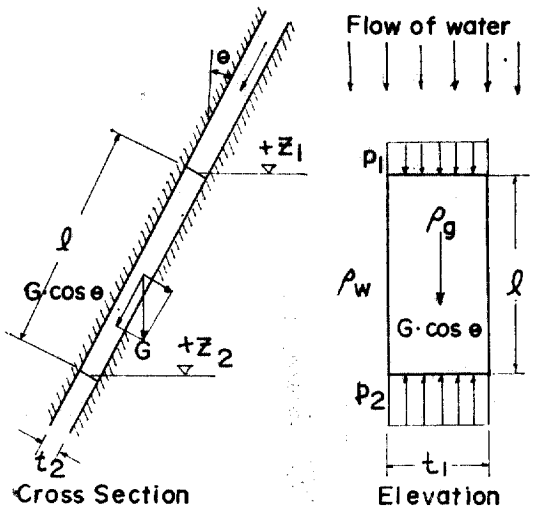


그림 1. 암석내 균열을 통한 gas 누출

本硏究에서는 空洞의 形狀이 가스漏出에 미치는 영향과 油類流失이 空洞의 形狀, 間隔 및 地下水位에 의하여 어떻게 달라지는가를 糾明하려 하였다. 實驗은 電氣相似法을 使用하였으며 水平 및 垂直 water curtain과 空洞 부근에 존재하는 破碎帶에 의한 영향에 대한 것과 模型實驗에 의한 硏究는 次後課題로 하려 한다.

本 硏究의 結果로 地下 油類備蓄用 空洞을 設計할 때 形狀과 間隔, 그리고 地下水面으로부터의 깊이, water curtain의 必要性 여부를 決定하는데 適用할 수 있을 것이다.

## 2. 水密性

### 2.1 Gas의 漏出

地下에 貯藏된 油類에는 揮發性 物質이 포함되어 있으므로 空洞內에는 gas로 인한 壓力이 發生되며 그 크기는 貯藏油類의 種類, 貯藏方法에 따라 差異가 있게 된다. 고로 unline 空洞에서는 gas가 岩石內의 龜裂 사이로 漏出되는 것을 防止하기 위하여 gas 壓보다 큰 水頭를 空洞 上部에 維持하여 주는 외에도 gas의 氣泡가 龜裂을 따라 地表面으로 上昇하여 漏出되지 않도록 하여야 한다. 氣泡가 上昇하지 않으려면 空洞으로 流入되는 地下水의 動水勾配가 충분히 커야 한다. 만일 그림 1과 같이 傾斜 $\theta$를 가진 間隔 $t_2$의 龜裂이 있고 이 사이에 길이 $l$인 氣泡가 있을 경우를 생각하여 보면 이 氣泡가 上昇되지 않기 위하여 氣泡 上端에 작용하는 水壓과 氣泡의 무게가 氣泡 下端에 작용하는 水壓보다 커야 한다.

$$\text{즉, } p_1 t_1 t_2 + \rho_g g t_1 t_2 l \cos\theta > p_2 t_1 t_2$$

$$\text{또는 } p_1 - p_2 + \rho_g g l \cos\theta > 0 \qquad (1)$$

여기서 $p_1$ : 氣泡 上端에 작용하는 水壓

$p_2$ : 氣泡 下端에 작용하는 水壓

$\rho_g$ : Gas의 密度

$g$ : 重力加速度

$t_1$ : 氣泡의 폭

그런데 龜裂內에서의 流速은 매우 적으므로 베르누이式으로부터

$$z_1+\frac{p_1}{\rho_w g}=z_2+\frac{p_2}{\rho_w g}+h_f \qquad (2)$$

이다. 여기서

$z_1$ : 氣泡 上端의 높이

$z_2$ : 氣泡 下端의 높이

$\rho_w$ : 물의 密度

$h_f$ : 氣泡 上下端의 水頭差

$z_1-z_2=l\cos\theta$ 이므로 (2)식으로부터

$$p_1-p_2=\rho_w g(h_f-l\cos\theta) \qquad (3)$$

(1)식과 (3)식을 정리하면

$$\frac{h_f}{l}>\left(1-\frac{\rho_g}{\rho_w}\right)\cos\theta \qquad (4)$$

$h_f/l$ 은 動水勾配 $I$ 이고 $\rho_g \ll \rho_w$ 이므로

$$I>\cos\theta \qquad (5)$$

식(5)는 氣泡가 傾斜 $\theta$ 를 가진 龜裂을 따라 上昇하지 않는 기준이 되는데 實際問題에서는 透水方向이 一定하지 않아 判別하기 어렵기 때문에 垂直方向에 따른 水頭의 降下로부터 動水勾配 $I_0$ 를 구하여 利用하는 것이 便利하다. 그러면

$$I_0=I/\cos\theta$$

$$I_0>1 \qquad (6)$$

이 기준은 매우 간편하고 기억하기 쉽다.

여기서 表面張力으로 인한 毛細管水의 영향은 고려되지 않았는데 Komada[1] 등의 實驗에 의하면 龜裂間隔이 2 mm 以下인 때는 $I_0<1$ 인 때에도 毛細管現象의 영향으로 氣泡가 上昇하지 않았다. 그러나 實際의 岩石內의 龜裂은 그 모양이 不規則하여 이를 고려하는 것이 無意味할 것이다. Aberg[2]는 龜裂 사이에서 氣泡의 上昇을 관찰하기 위하여 2개의 플라스틱판을 좁은 간격으로 설치하고(Hele-Shaw 모델) 그 사이에 물을 流通시켜 보았더니 $I_0<1$ 인 때에는 판 하단에서 氣泡가 發生하여 上昇하고 $I_0>1$ 인 때에는 氣泡가 發生하지 않음을 發見하여 식(6)의 妥當性을 主張하였다. 만일 空洞의 天頂이 水平面이고 gas 壓力>0 일 때에는 自然的인 地下水位에 의하여 空洞으로 流入되는 動水勾配 $I_0$ 가 1보다 적어지는 점을 들어 그는 gas 氣泡의 發生과 上昇을 防止하려면 반드시 water curtain을 설치하여야 한다고 結論짓고 있으나 거의 모든 경우에 空洞天頂은 arch 形을 이루고 있으며 이 부분으로 流入되는 물은 動水勾配 $I_0$ 가 평균값보다 커지게 되므로 water curtain이 없이도 경우에 따라서는 $I_0>1$ 일 수도 있다. 따라서 $I_0$ 는 空洞의 形狀에도 관계가 되므로 이에 대한 硏究를 할 必要가 있다. Aberg[2] 나 Komada[1] 등은 空洞의 形狀을 圓으로 假定하고서 이때 流入되는 流量을 計算하고서 이로부터 空洞周圍의 平均 를 계산하여 實際 設計에 適用하였다. 그러나 空洞으로 流入되는 流線은 水平以下의 方向에서도 들어 오지만 氣泡는 下降하지 않으므로 流線이 空洞의 壁面에서 水平 以上이 되는 部分만을 고려하여야 하며 이는 空洞形狀과도 密接한 關係가 있다. 고로 平均 $I$는 實際로 無意味하다.

### 2.2 隣接 空洞으로의 移動

油類備蓄用 地下空洞을 單一로 建設하는 경우도 있겠으나 대부분 한 지역에 몇 개의 平行한 空洞을 建設한다. 이들 平行한 空洞에 同時에 같은 種類의 油類가 비슷한 水準으로 貯藏되면 은 앞에서 언급한 gas의 氣泡를 防止하는 조치로서 주변 岩石으로 油類가 流失되지 않으나 주변 하나의 空洞은 차 있고 隣接한 空洞이 비어 있을 때는 비어 있는 空洞으로 油類가 移動될 수 있고 이때 두 개의 空洞 사이의 岩石은 油類로 汚染된다. 이러한 可能性 여부는 地下水 位置, water curtain 有無, 空洞의 形狀, 間隔 등에 의하여 영향을 받는데 Aberg는 그의 Hele-Shaw 모델실험으로 檢討한 후 이러한 流失을 防止하려면 空洞 사이에 water curtain이 있어야 한다고 結論지었다. 그러나 地下水位가 높을 경우 隣接空洞內의 相對的인 油類水準의 差異가 적을 경우에는 구태여 water curtain이 없이도 油類의 損失이 發生되지 않는다. 따라서 이들 要因들이 미치는 영향을 硏究한다면 實際問題 解決에 많은 도움이 될 것이다.

## 3. 電氣相似模型

地層內에서의 地下水 透水를 解析하는 데는 解析的 解法과 近似解法이 있는 바 境界條件이 不規則한 경우에는 解析的 解法이 어려우므로 통상 近似解法으로 問題를 分析하고 있다. 近似解法에는 有限要素法, 電氣相似模型法 等을 利用하여 流線網圖를 作成하든가 模型을 製作하여

그림 2. 電氣 相似模型 실험장치(사진)

實驗함으로서 要求된 資料를 얻을 수 있다. 만일 透水의 媒體가 均質하고 等方性이며 固定境界條件에서 steady-state 狀態의 透水가 이루어진다면 이들 近似解法中에 電氣相似模型法이 가장 間便하며 비교적 정확한 結果를 얻을 수 있다. 이는 有孔性 媒體에서의 透水와 導電性 媒體에서의 電流通過는 그 樣相이 같기 때문이다.

本 硏究에서 使用된 模型實驗裝置는 그림 2와 같다. 導電性 媒體로서는 carbon paper 를 사용하였으며 境界條件에 符合하는 電壓을 附加할 수 있도록 導電페인트로 境界를 表示하였다. 附加된 電壓은 실험기간중 일정한 값을 유지하여야 하기 때문에 정밀한 整流器와 蓄電池를 사용하였으며 電壓의 測定은 digital multimeter 를 사용하여 0.01V 正確度로 測定하였다.

## 4. 實驗方法

油類備蓄用 地下空洞의 形態로는 일반적으로 馬蹄形이 많이 사용되고 있다. 이 형태는 空洞의 天頂 部分의 安定에 매우 효과적일 뿐만 아니라 재래식 방법으로 掘鑿時 作業이 便利한 長點이 있다. 馬蹄形의 높이와 폭의 比는 地殼의 構造的 應力에 따라 다르나 2:1 내지 3:1을 많이 사용하고 있으며 만일 空洞이 2개 이상 있을 시는 주변에서의 發生應力이 過大하여지지 않기 위하여 그 間隔을 空洞의 幅 以上으로 하는 것이 보통이다.

本 硏究에서 馬蹄形 空洞의 높이와 폭의 比를 가능한 한 다양하게 하여 1:1 부터 3:1 까지의 형태로 하고 間隔은 높이의 1~4 배의 模型을 만들어 實驗하므로서 어떠한 地下水 높이와 隣接한 空洞內의 油類水準 差異에서 油類移動이 防止되는가를 調査하였다. 또한 空洞으로 流入되는 地下水의 動水勾配는 空洞 天頂部分의 形態에도 關係가 되므로 이를 관찰하기 위하여 극단적인 예로 天頂이 水平面인 正四角形의 경우와 半楕圓形(長軸/短軸=2)의 경우에 대하여 模形實驗을 實施하여 自然水位時 流入動水勾配가 空洞形態에 따라 어떻게 달라지는가를 관찰하였다.

## 5. 實驗結果 및 分析

### 5.1 Gas의 漏出

空洞內의 gas의 漏出은 地下水의 垂直方向에 대한 流入動水勾配가 1 보다 크면 發生하지 않는다. 따라서 水平面의 空洞天頂을 가진 正四角形인 空洞의 경우 自然的인 地下水 水頭下에서 空洞으로 流入되는 現象의 流線網圖를 그리고 垂直方向의 流入動水勾配가 1 보다 큰 부분을 표시하면 그림 3과 같은데 여기서 보면 天頂 中央部에는 그 값이 1 보다 크지 않아 이곳으로 流出될 수 있다. 같은 條件下에서 地下水 流入의 流線網圖를 半楕圓形인 空洞의 경우에 대해 그려보면 그림 4와 같은데 여기서는 1 보다 큰 값의 動水勾配를 갖는 부분이 空洞 全體를 둘러싸고 있어 water curtain 없이도 gas 漏出은 없게

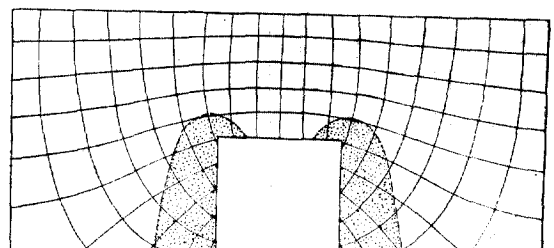

그림 3. 정4각형 공동주변의 유선망 및 $I_0>I$ 되는 영역

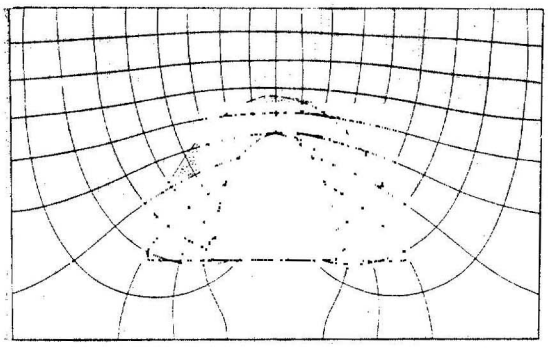

**그림 4.** 반타원형 공동주변의 유선망 및 $I_0>I$ 되는 지역

된다.

以上 두 가지 극단적인 경우를 살펴 본 바와 같이 gas 漏出 여부가 空洞形狀에 의하여 영향을 받으며 water curtain이 없는 경우라도 空洞形狀에 따라 gas 漏出 危險性이 없을 수 있는 것이 確實하다.

### 5.2 隣接空洞으로의 移動

馬蹄形 空洞의 높이($h$)와 폭($b$)의 比가 1 : 1 내지 1 : 3이고 높이와 간격($d$)의 比가 1 : 1 내지 1 : 4인 각각의 경우에, 우선 한편에는 滿水位로 차 있고 다른 空洞에는 완전히 비어 있는 條件에 대하여 실험하였다. 空洞 天頂으로부터의 지하수 높이($\alpha h$)를 변화시키면서 油類의 移動을 沮止하는 높이($\alpha h$)를 찾았다. $h/b=1$인 경우는 간격이 $d/h=1$일 때 $\alpha \fallingdotseq 10$으로부터 간격이 넓어질수록 감소하여 $d/h \fallingdotseq 3.4$이면 $\alpha=1$에서도 油類移動이 발생하지 않는다. 그림 5에서 보면 $h/b$가 클수록, 즉 空洞幅이 좁을수록 같은 간격에서 所要 $\alpha$가 적어지며 $\alpha=1$에서 油類移動이 발생하지 않는 간격도 좁아진다. 즉 $h/b=2$일 때 $d/h \fallingdotseq 2.8$, $h/b=3$일 때 $d/h \fallingdotseq 2.4$이다.

油類移動을 沮止하는 地下水 位置는 空洞의 形狀과 間隔에 의하여 좌우되나 間隔에 더욱 直接的인 영향을 받는 것을 알 수 있다.

다음에는 앞에서와 같은 경우에서 條件을 달리 하였다. 즉 한편 空洞에는 油類가 滿水位로 차 있더라도 다른 空洞에 適正線으로 油類가 維持되어 있으면 油類의 移動이 발생하지 않기 때문에, 각 경우에서 地下水位를 $\alpha=1$로 固定하고서 所要油類높이 $\Delta h$를 구하였다. 즉 $h/b=1$인 경우 $d/h=1$일 때 $\Delta h=0.9h$이던 것이 $d/h \fallingdotseq 3.4$이면 $\Delta h=0$이라도 油類移動이 없다. 그러나 $d/h=1$인 경우 $h/b=1$에서 $h/b=2$와 $h/b=3$으

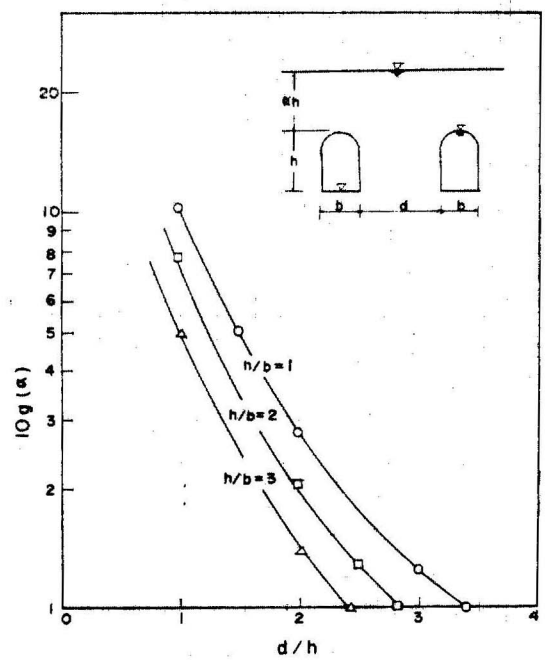


**그림 5.** 최악의 조건하에서 유류이동을 저지하는 자연지하 수위

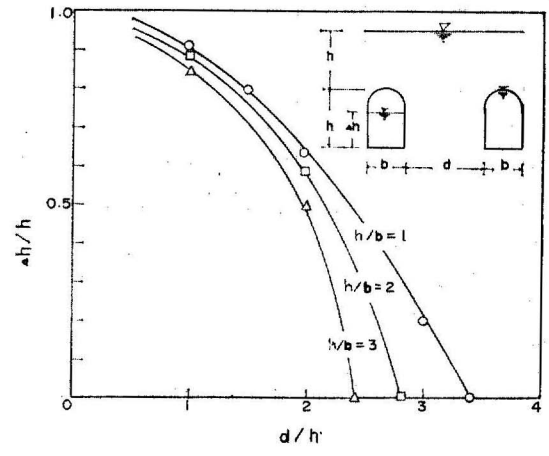


**그림 6.** 유류이동을 저지하는 인접공동의 유류수준

로 변하면 $\Delta h=0.9h$에서 각각 $\Delta h=0.88h$와 $\Delta h=0.85h$로 적어지지만 큰 차이는 없다.

以上에서 살펴본 바로는 隣接空洞으로 油類가 移動하지 않게 하는 데는 地下水 位置와 인접한 空洞內의 油類의 相對的 位置로 調節할 수 있는데 그 量은 空洞의 間隔에 直接的으로 그리고 空洞의 幅에는 다소 영향을 받는다. 空洞의 間隔은 클수록, 그리고 空洞의 幅은 좁을수록 有利함을 알 수 있다. 그림 5와 그림6에 있는 圖表는 實際設計에도 適用할 수 있을 것이다.

### 5.3 實際例에의 適用

現在 ○○地域에 建設中인 地下原油備蓄施設에 本硏究 結果를 適用하여 보는 것도 意味있는 것 같다.

本 施設의 規模는 保安上 밝힐 수 없으나 空洞의 크기는 높이 30 m, 폭 18 m이며 平行한 隣接空洞의 간격은 63 m였다. 따라서 $h/b\fallingdotseq1.7$, $d/h=2.1$이다. 그림 5에 의하면 $\alpha\fallingdotseq2$이므로 인접한 空洞內의 油類水準이 最惡의 條件일 때 즉 한편에는 滿水位이고 다른 편에는 완전히 비어 있을 때는 地下水位를 空洞 上部로 60 m는 維持하면 油類의 移動이 發生하지 않는다. 또한 그림 6에 의하면 이 경우 $\Delta h\fallingdotseq0.55h\fallingdotseq16$ m이므로 地下水位가 空洞上部 30 m($\alpha=1$)에 있더라도 다른 편 空洞이 비어 있지 않고 油類水準을 약 16 m로 維持하면 油類移動이 없다.

물론 이러한 施設의 細部設計에서는 空洞內의 gas 壓, water bed의 水準, 정확한 形狀 등을 그대로 반영한 모델實驗을 행하여야 하나 豫備設計段階에서는 위의 圖表를 使用할 수 있을 것이다. 참고로 本施設에서 2 kg/cm² ABS의 gas 壓과 2 m의 water bed를 고려한 所要油類水準은 약 18 m여서 誤差는 약 10 % 정도였다.

## 6. 結　論

以上에서 硏究分析한 結果를 다음과 같이 要約할 수 있다.

(가) 電氣相似模型은 매우 便利한 模型實驗方法이며 더 깊은 硏究에 훌륭히 適用될 수 있다.

(나) 地下油類備蓄空洞으로부터의 gas 漏出은 空洞天頂部의 形狀에 따라서 water curtain 없이도 防止될 수 있다.

(다) 隣接空洞으로의 油類移動의 防止는 地下水位의 位置와 空洞內의 相對的인 油類水準으로 좌우된다.

(라) 油類移動防止에 必要한 地下水位와 空洞內 油類의 相對的 水準은 空洞間隔이 클수록 減少하고 空洞의 幅이 적어져도 다소 減少된다.

(마) 硏究結果로 얻어진 圖表는 實際의 設計에 適用될 수 있을 것이다.

本 硏究는 water curtain이 없는 경우에 局限하였는바 앞으로 이를 포함한 硏究를 계속할 것이다. 끝으로 本 硏究가 可能하도록 支援하여 준 正友엔지니어링(株) 李曙鍾 社長께 感謝한다.

## 參 考 文 獻

1. Komada, H. et al. "Study on Seepage Flow Through Rock Mass Surrounding Caverns for Petroleum Storage" *Proc., Rock Store 80,* Sweden, 1980
2. Aberg, B. "Prevention of Gas Leakage from Unlined Reservoirs in Rock" *Proc., Rock Store 77,* Sweden, 1977
3. Aberg, B. "Model Tests on Storage in Unlined Rock Caverns" *Proc., Rock Store 77,* Sweden, 1977
4. Shimada, J. et al. "Role of Groundwater in the Bedrock for Underground Oil Storage" *Proc., Rock Store 80,* Sweden, 1980
5. Harr, M.E. "*Groundwater and Seepage*" McGraw Hill, 1962

(接受 : 1982. 11. 11)