

L.P.G 등 高壓 가스地下貯藏技術의  
發達過程과 研究課題

徐 晶 圭  
韓國石油開發公社技術役

鄭 亨 植  
漢陽大學校教授

## 1. 머릿말

우리나라는 1978년 불란서의 Geostock 사로부터 기술을 도입 석유류의 지하저장시설 건설에 착수한 이래, 현재 세계 최대의 원유저장동굴과 세계 제 2의 LPG 저장동굴을 보유하게 되었다.

그러나 이러한 시설들은 모두가 막대한 외화를 사용하여 외국의 기술을 도입·건설하였고 아직도 핵심기술을 이들에 의존하고 있는 것은 괘목할 발전을 계속하고 있는 타분야에 비하여 유감스러운 일이라 아니할 수 없다.

이 분야의 핵심이론은 Aberg (1977)에 의하여 제안된 후 Komada (1980, 1985), Noe (1980), Bawden (1980), Suh (1986) 등에 의하여 이의가 제기되었는가 하면 Goodall (1986)에 의하여 지지논문이 발표되는등 아직도 확립된 이론이 없는 것으로 보임으로, 이를 소개하여 많은 분들이 이의 연구에 참여하시도록 권하는 의미에서 이 분야의 핵심이론을 발달과정순으로 소개 한후 앞으로 연구해야 할 과제를 제시해 보고저 한다.

## 2. 기본이론의 발달과정

### 2-1 유류의 지하저장원리

유류는 물보다 가볍고 물과 혼합되지 않는다는 특성을 이용, 지하수면 하의 암반에 공동을 굴착하고 이 공동내에 유류를 저장하는 기법이다. 이를 좀더 자세히 설명하면 그림 - 1 과 같이 공동을 굴착하면 공동주변 암반의 균열내에 들어 있는 지하수는 공동내로 유입되며 이때의 유입량은 Muskat 의 식으로 알려진 다음 식으로 표시된다.

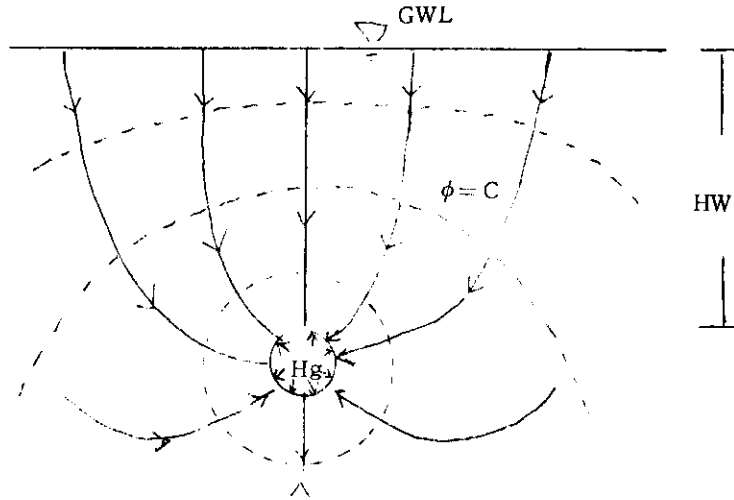


그림 1 유류의 지하공동저장원리

$$Q \ell = 2\pi K (H_w - H_g) / \ell n (2H_w + r_o) / r_o \quad (1)$$

$Q \ell$  : 유입량 ( $m^3 / hr$ )

$K$  : 암반의 투수계수

$H_w$  : 공동상부의 지하수의 수심 ( $m$ )

$H_g$  : 공동내압의 수두 ( $m$ )

$r_o$  : 공동의 반경

이 식은 공동이 원형이고 만수되어 있으며, 공동주변의 암반이 균질이고 등방성이라고 가정하여 유도된 식이다.

이 식으로부터  $H_w > H_g$ 이면  $Q \ell > 0$ 이 되어 공동주변의 지하수가 공동내부로 유입되나  $H_w < H_g$ 이면 반대로 공동내에 만수된 물이 공동외부로 유출됨을 알 수 있다.

이러한 관계로부터 일반적으로 “공동주변의 지하수압이 공동내의 유체압보다 크면 유체는 공동외부로 누출되지 않는다.”라고 알려져 있다.

그러나 위의 식(1)이 공동이 만수되어 있고, 원형이며 균질 등방성이라는 가정하에 유도된 것인데 반하여 실제로 이러한 가정이 성립될 수 없기 때문에 이 이론에 대해서는 상당한 수정이 가해져야 한다.

실제로 60년대에 Sweden과 France 등에서는 이 원리를 이용 액체유류의 지하저장 실용화에 성공하였으며, LPG 등 고압기체연료의 지하저장을 시도해 보았다.

그러나 고압 Gas의 경우는 다량의 Gas가 누출되어 실패하게 되었고, 이 실패의 원인으로서는 공사중 공동주변의 암반이 탈수된 것으로 지적되었으며, 이에대한 대책으로서 Sweden의 Royal Institute of Technology (RIT)의 Janelid는 공동주변에 다수의 주수공을 굴착하여 탈수된 암반을 충수하는 공법을 개발, 미국과 Sweden에서 특허를 획득하였다. 이것이 아마도 Water curtain의 시초가 아닌가 생각한다.

그후 해저에 공동을 굴착하고 압축공기를 주입하여 실험한 결과도 역시 공기가 누출되는 것이 확인되어 Aberg는 이 공기의 누출원인을 공동천형의 요철이라고 판단하고 그의 유명한 Watercurtain이론을 발표했다.(Rockstare 77).

그의 이론은 이 분야의 가장 중요한 이론으로서 현재 전세계적으로 이미 건설되었거나, 현재 건설중에 있는 모든 시설이 실질적으로 이 이론에 의하여 설계된 것임을 감안할 때 이 이론은 자세히 검토할 필요가 있다.

## 2-2 Aberg의 이론

공동을 횡단하는 한 균열의 천정부위를 그림과 같이 가정하고 그 대칭부의 일부균열을 ABCD라 하면 이 균열입구 AB에서 Gas가 균열내로 침투하기 위해서는 입구의 수압은 물론 균열입구에 형성되는 수막(MENISCUS)을 극복해야 함으로 다음 조건을 만족시켜야 한다.

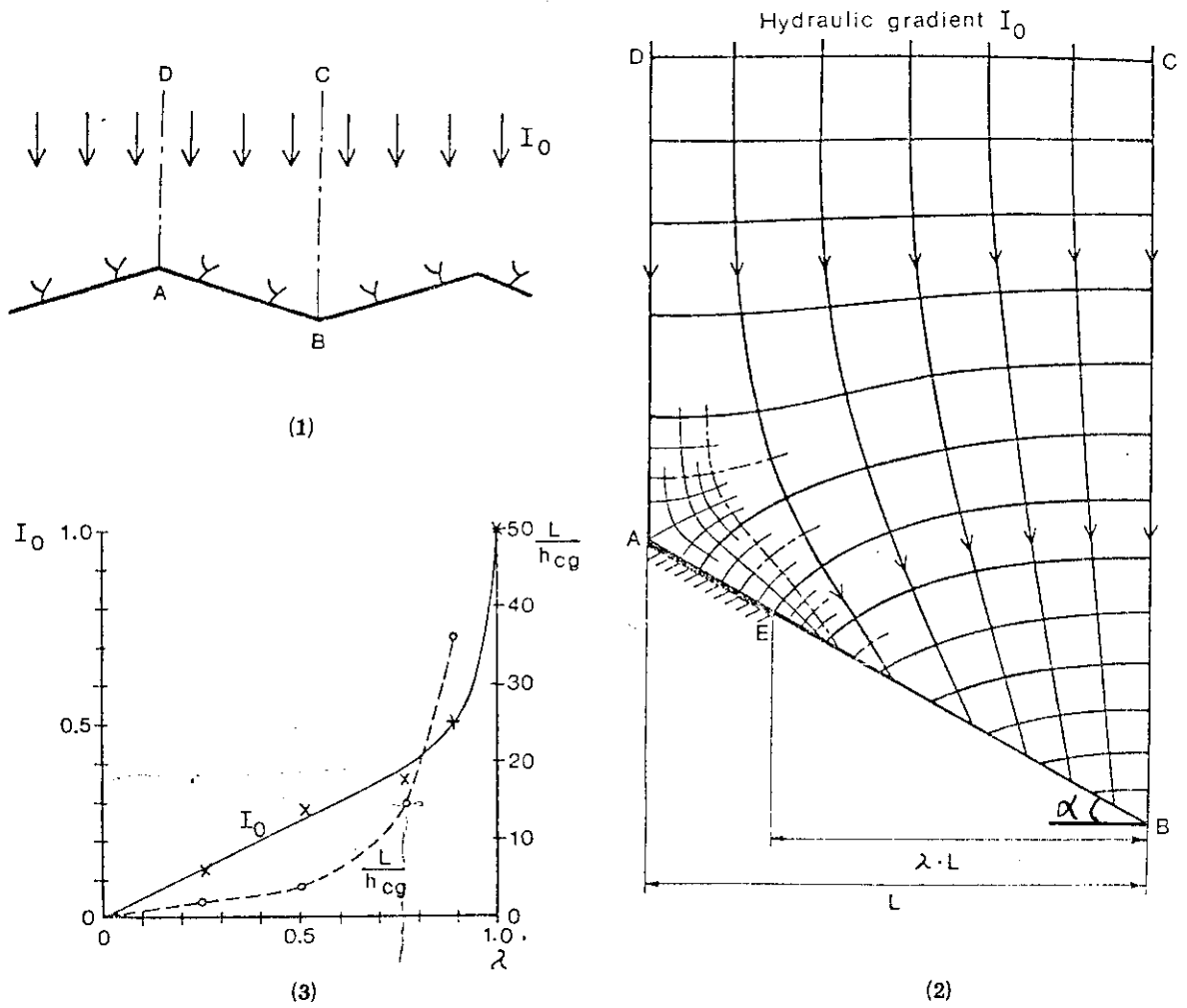


그림 - 2 Aberg의 Flow-net

$$P_g > P_{wa} + P_{ca}, \text{ 혹은 } P_g - P_{wa} > P_{ca} \quad (2)$$

$P_g$  : 균열입구의 Gas 압

$P_{wa}$  : 균열내 A점의 수압

$P_{ca}$  : A점의 수막이 작용하는 힘을 압력으로 표시한 것.

모세관압 ( Capillasy Pressure )

여기서 모세관압은 Laplace formular for Cupillary Pressure 로 알려진 다음식으로 정의한다.

$$P_c = P_w - P_g = \frac{1}{T} \left( \frac{1}{r'} + \frac{1}{r''} \right) \quad (3)$$

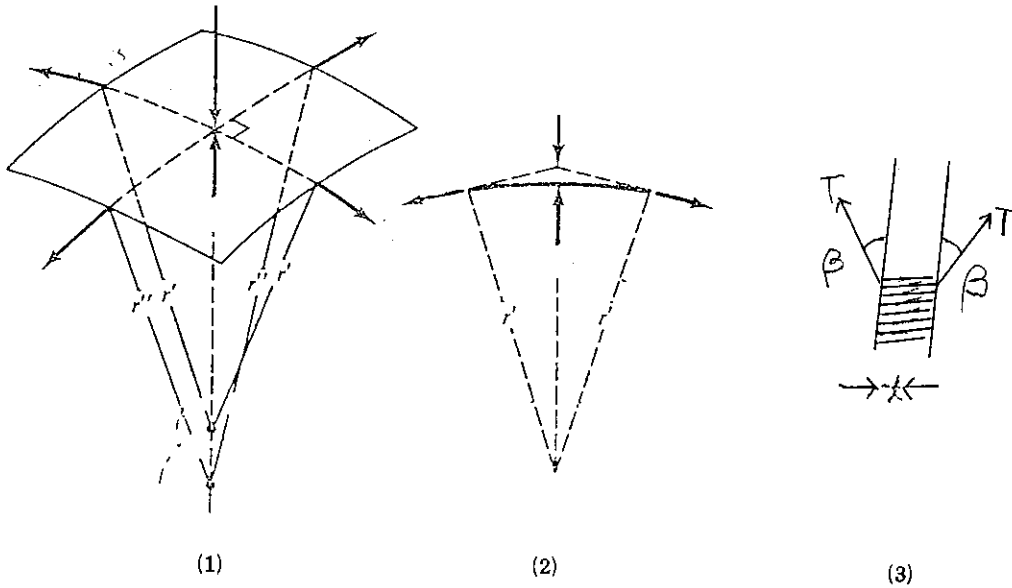


그림 - 3 Capillary Pressure

$T$  : 물의 표면장력

$r', r''$  : 수막면상에서 서로 직각되는 곡률반경 (그림 - 3 참조)

그리고, 평행극판내에서의 모세관압은

$$P_c = \frac{2T}{t} \cos \beta \quad (4)$$

$t$  : 극판간의 간격

$\beta$  : 수막과 극판간의 접촉각.

Aberg 는 균열입구 AB 의 상단에 수막 AE 가 형성된다고 가정하고, 균열입구에서 원거리에 있는 CD 부근의 수직동수구배 ( Vertical Hydrnlic Gradient )  $I_0$  를 계산하기 위하여 Flow-net 를 작도하였다.

그림 2. (2) 는  $\alpha = 30^\circ$ ,  $EB / AB = 0.75$  를 가정하고 작도된 것이다.

여기서 유의할 점은 AE 구간에서는 수막이 있음으로 (2)식이 성립되나, EB 간에서는 간극수가 흘러나오고 있음으로 그 경계면에서는 항상  $P_w = P_g$  가 된다는 사실이다.

EB 구간의 Potential 분포는

$$\phi_{wEB} = Z_{EB} \frac{P_g}{\gamma_w} = Z_{EB} + \frac{P_w}{\gamma_w} \quad (5)$$

$Z_{EB}$  : EB 구간의 위치수두

$w$  : 물의 단위 중량

EB 구간의 수직동수구배는

$$I_o = \frac{d\phi_w}{dZ} = \frac{d}{dZ} \left( Z + \frac{P_g}{\gamma_w} \right) = 1, \quad (* \quad P_g = \text{Const}) \quad (6)$$

이 된다.

따라서, EB 구간에서 등 Potential 선간의 Potential drop은  $EB (Z_E - Z_B) / MEB = \lambda L \tan \alpha / MEB$  가 되고 AB간의 등 Potential 선 간격수를 MAB라 하면 AB점의 Potential 차  $\Delta \phi_w$

$$\Delta \phi_w = MAB \cdot \lambda L \tan \alpha / MEB \quad (7)$$

가 되며,  $\phi_{gA} = Z_A + P_g / \gamma_w$ ,  $\phi_{wA} = \phi_{EB} + \Delta \phi_w$  가 되고  $Z_B$  를 기준 ( $Z_B = 0$ ) 으로 할 때  $Z_A = L \tan \alpha$  가 되므로 (2)식은

$$\left( 1 - \lambda \frac{MAB}{MEB} \right) \cdot L \tan \alpha > hc \quad (8)$$

$$hc = P_c / \gamma_w$$

로 전환된다.

같은 방법으로 CD와 CD바로 밑의 등 Potential 선 간의  $I_o$ 는 이 2 선간의 Potential 차를 실거리로 나눈값이며 실거리는  $CD / n = L / n$  임으로

$$I_0 = \frac{n}{MEB} \tan \alpha \quad (9)$$

$n$  : CD구간의 유선간격수 (유관수)

로 표시하고 (9)식으로부터 Gas의 침투조건은

$$L/hc > \frac{1}{\left(1 - \lambda \frac{MAB}{MAB}\right) \tan \alpha} \quad (10)$$

이며, 이때에 균열입구에서 원거리지점의  $I_0$ 는 (9)식이 라고 제안하고  $\alpha = 30^\circ$ ,  $L/hc = 0.25, 0.50, 0.85$  일 때의  $I_0$ 의 값을 계산하여 그림 2. (3)을 제시하고  $hc$ 의 값은 암반의 균열이 3mm만 되여도 3cm 밖에 않되므로 이를 무시하면  $I_0 \geq 1$ 이 Gas가 균열내로 침투하지 못하는 안전조건 이므로 그림 4. (1)과 같이 공동주변에 철저히 Grouting을 하든가 그림 4. (2)와 같이 공동상부에 다량의 주수공을 굴착하고 수압을 가하여 공동주변에서  $I_0 \geq 1$ 이 유지되도록 하여야 한다는 설계개념을 제안하였다.

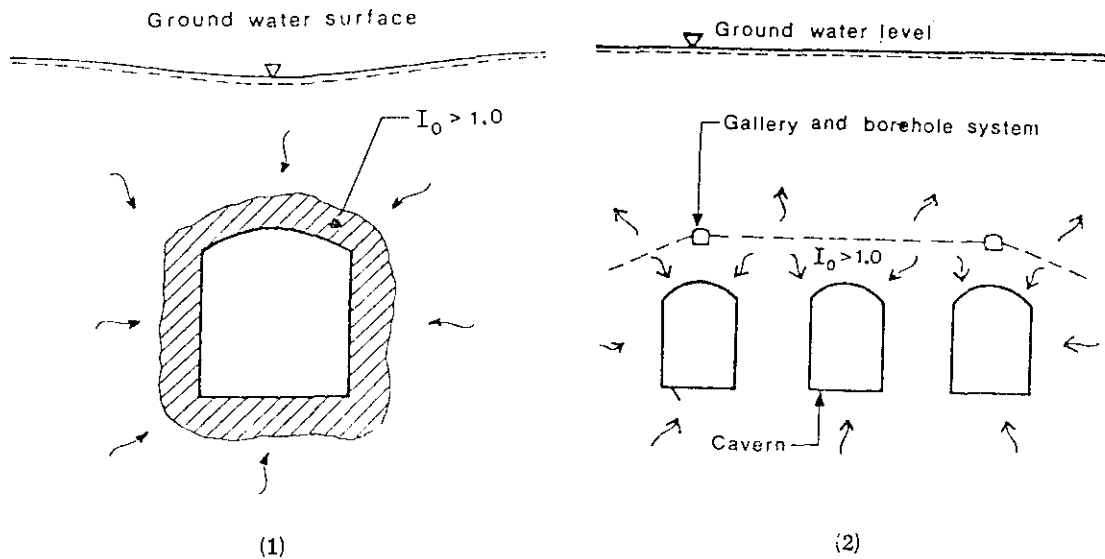


그림 - 4 Aberg의 설계개념  
-121-



표 1. LPG 공동 제원

구 분	여 수	L - 1	을 산	Monstat	Neste
압 력 ( kg / cm <sup>2</sup> )	7.5	7.5	7.5	3.99	11.0
온 도 ( °C )	15	15	15	2	30
공 동 깊 이 ( m )	- 115	- 115	- 119	- 72	- 143
W.C 과 공동간의 거리(m)	30	30	24	15	?
I <sub>o</sub>	1,306	1,306	1,833	2.0	?

그런데 이 경우에는 flow-net 가 크게 바뀌지는데 Aberg 자신의 실험에서도 이를 규명하지 못하였기 때문에 Komada 를 위시하여 많은 사람들이 이의를 제기하고 있다.

### 2-3 Komada 의 실험

Komada 는 그의 첫번째 실험 (1980) 에서 그림 5 와 같은 실험장치를 제작하여 균열 ( slit ) 의 입구각 (  $\theta$  ) 과 I<sub>o</sub> 와의 관계를 조사한 결과 표 2 와 같았다.

표 2. 균열의 입구각과 I<sub>o</sub> 와의 관계

$\theta$	30	60	90	120	150	180
I <sub>o</sub>	0.30	0.21	0.21	0.02	0.02	0.00

이 표를 검토해 보면 균열의 입구가 수평 (  $\theta = 180^\circ$  ) 이면 I<sub>o</sub> = 0 이나  $\theta$  가 감소하여 예각이 될수록 증가한다는 것과 그래도 1 보다는 훨씬 적은 것임으로 Gas 가 누출되지 않는 조건은,

$$I_o = 1 - a \quad (11)$$

라고 주장했다.

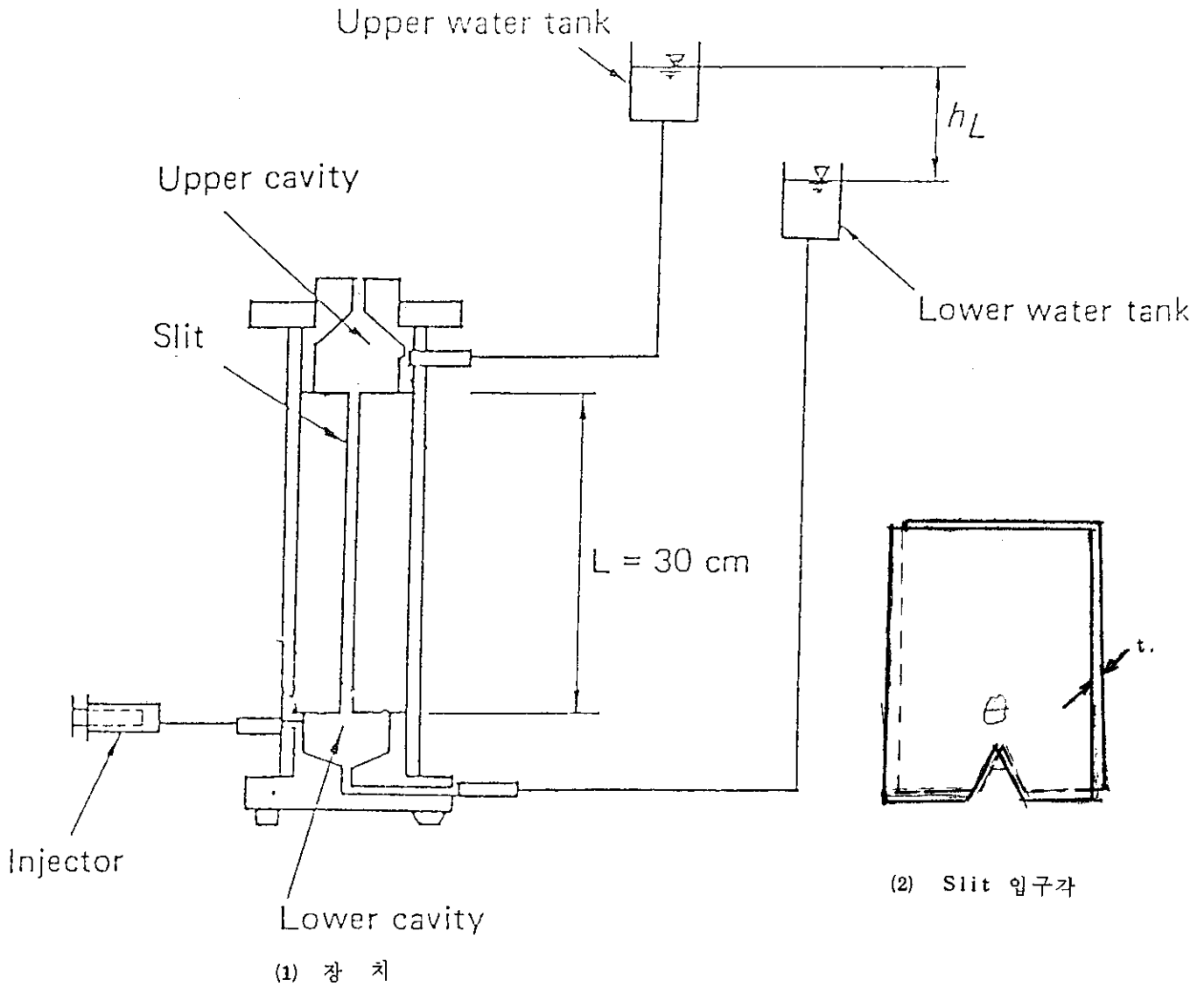


그림 - 5 Komada 의 실험 (1)

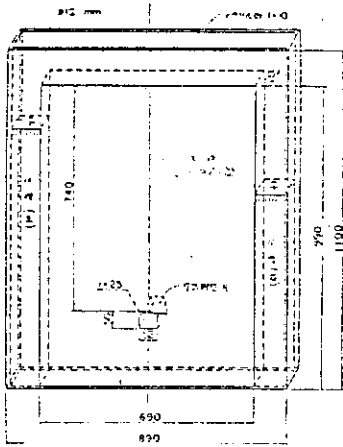
그후 (1985) 그는 CAES (Compressed air Energy storage) 연구에서 균일한 간극 대신에 다공질 (Porous material) 재료를 사용 그림 6. (1)과 같은 모형을 제작실험을 하여 그림 6. (2)와 같은 결과를 얻었습니다.

이 실험결과에 의하면  $H_g / H_w \approx 1$  이므로 Gas 가 누출되지 않는 조건은  $I_o \geq 1$  이 아니라,  $I_o \geq 0$  이며 약간의 안전률을 고려하면 된다고 받

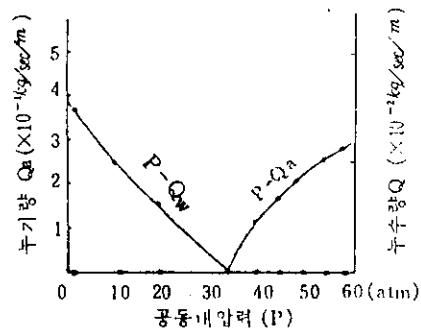
표했습니다.

$$I_0 \geq 0$$

(12)



(1)



(2)

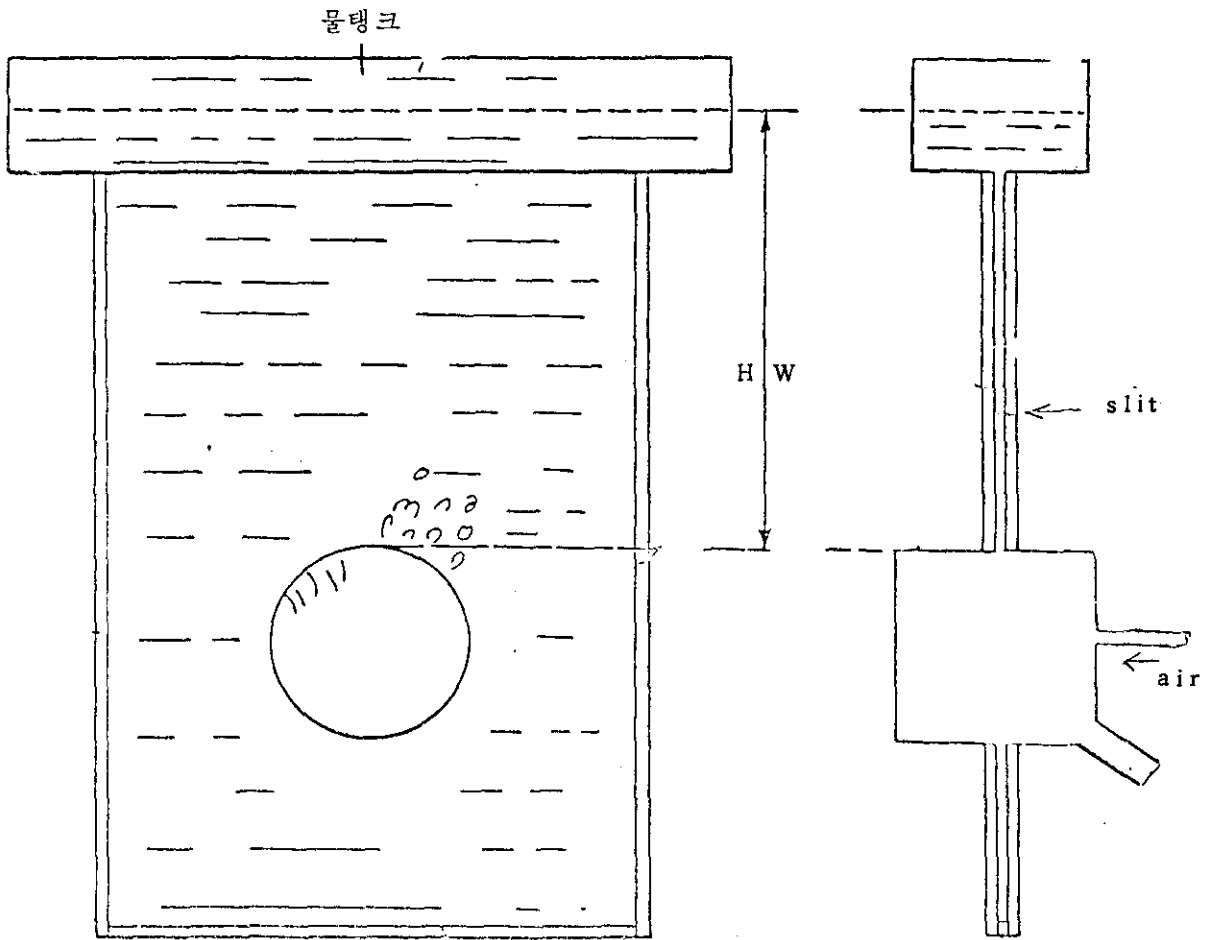
그림 - 6 KOMADA 의 실험(2)

#### 2-4 Noe 의 실험

그림 7. (1)과 같은 실험장치를 제작하여 공동상부의 수심 (Hw) 과 공동 내부의 Gas 의 누출개시압 (Hg) 과의 관계를 실험한 결과 그림 7. (2)와 같은 관계가 있음을 발견하고 이를 (13)식으로 표시하였다

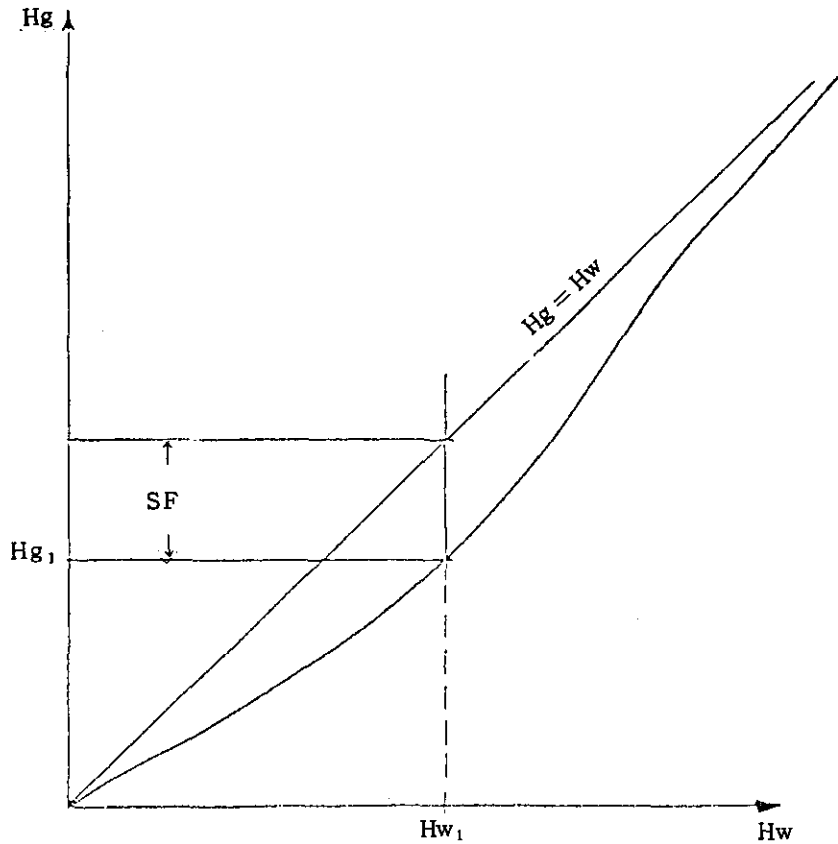
$$Hw = Hg + SF \quad (13)$$

여기서 SF = Shape Factor



(1) 실험장치

그림 - 7 NOe 의 실험과 Shape factor



(2) 실험결과

그림 - 7 NOe의 실험과 Shapp factor

그리고 그는  $Hw - Hg = SF$  즉, 공동내부에 저장할 수 있는 Gas의 최대압과 공동상부의 지하수 수심과의 차이는 공동의 모양에 따라 변동되므로 이 차이를 Shape factor라 명명하고 우리나라에도 특허를 신청(1980. 12) 획득하였다.

그런데 이 원리로 설계되었다는 국내의 LPG저장시설은 그림 - 4와 같은 Aberg의 이론으로는 설명되나 (13)식으로는 설명되지 않을 뿐 아니라 France의 Lavera에 건설한 대규모( $303 \times 10^3 m^3$ )의 LPG저장공동도 이와 유사하므로 결국 (13)식은 NOe의 소속회사인 Geostock사가 이식을 해석적으로 유도하였으나 Know-How로서 공표하지 않았다고 주장하지만

필자의 견해로는 어딘가 미진한 점이 있어 실용화하지 못한 것으로 추측된다.

그러나 (13)식은 Aberg가 Gas의 누출방지조건을 공동주변의  $I_0$ 로서 정의한데 반하여 공동내에 저장할 수 있는 최대 Gas압과 공동상부의 수심압으로 정의한 것이므로 Aberg의 이론과 쌍벽을 이루는 중요한 이론으로서 주목할 필요가 있다.

## 2-5 Bawden의 실험

Komada (1980)가 천정의 요철이  $I_0$ 에 미치는 영향을 조사하기 위하여 균열의 입구각(그림 5. (2)의  $\theta$ )을 변동시키면서 실험한 것과 유사한 실험을 하였으나, 그는 공동의 모양이 최대 Gas압에 미치는 영향을 관찰할 의도로 균열의 입구를 원형, 수평타원형, 4각형등으로 변동시키면서 Gas의 누출개시압(최대저장가능압)과 공동상부의 수심압과의 비( $P_g / P_w$ : dimensionless Pressure)와 균열의 폭(thickness)과의 관계를 조사한 결과는 그림 8과 같다.

이 그림에서 알 수 있는 것은 균열간극의 폭( $t$ )이  $0.4 \text{ mm}$ 이상이면  $P_g / P_w$ 가  $t$ 보다는 모양에 더 영향을 받으며 수평타원형의 값이 가장 크고, 어느 경우에도 거의 1에 가깝다는 것이다.

그리고 그는 이 실험에서 균열의 입구가 사각형일 경우는 기포가 양쪽 모서리에서 발생하는 것을 관찰은 하였으나, 그 원인은 판명하지 못했다고 한다.

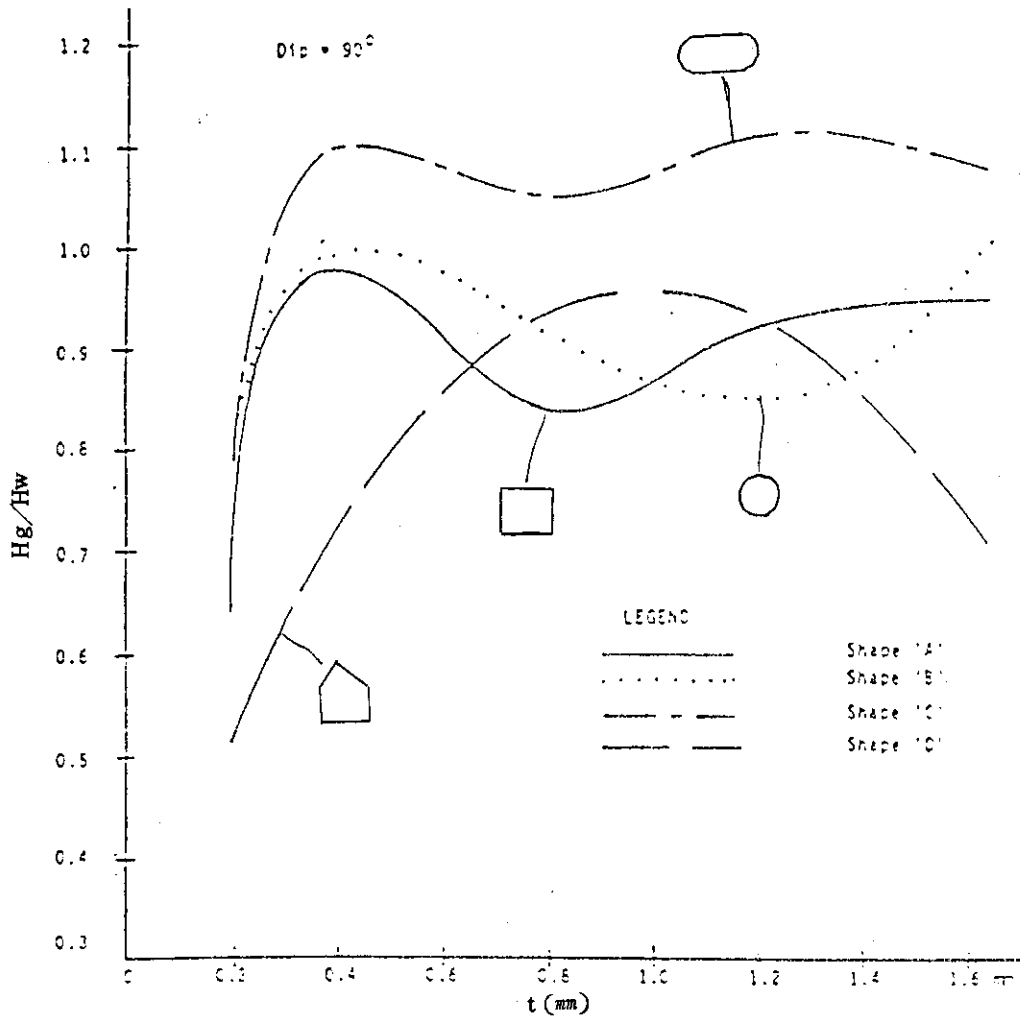


그림 - 8 Banden 의 실험결과

2-6 필자들의 연구 (1986)

필자들은 이상에서 검토한 바와 같이 여러 사람들의 연구결과가 서로 상이하고 또 우리나라에서도 원유와 LPG 등의 저장공동을 건설해야 되기 때문에 이에 대한 연구의 필요성을 느껴 이를 검토하기 시작했다.

그런데 이상에서 검토한 이론을 종합해 보면 공동내에 저장할 수 있는 Gas 의 최대압은 (13)식으로 표시될 수 있으며, Aberg 의 이론은 어딘

가 불확실하므로 (18)식을 해석적으로 규명해야 된다고 생각하고 우선 Aberg의 균열입구의 Gas의 압(Hg)을 변동시키면서 flow-net를 작도해 본 결과는 그림 9과 같다.

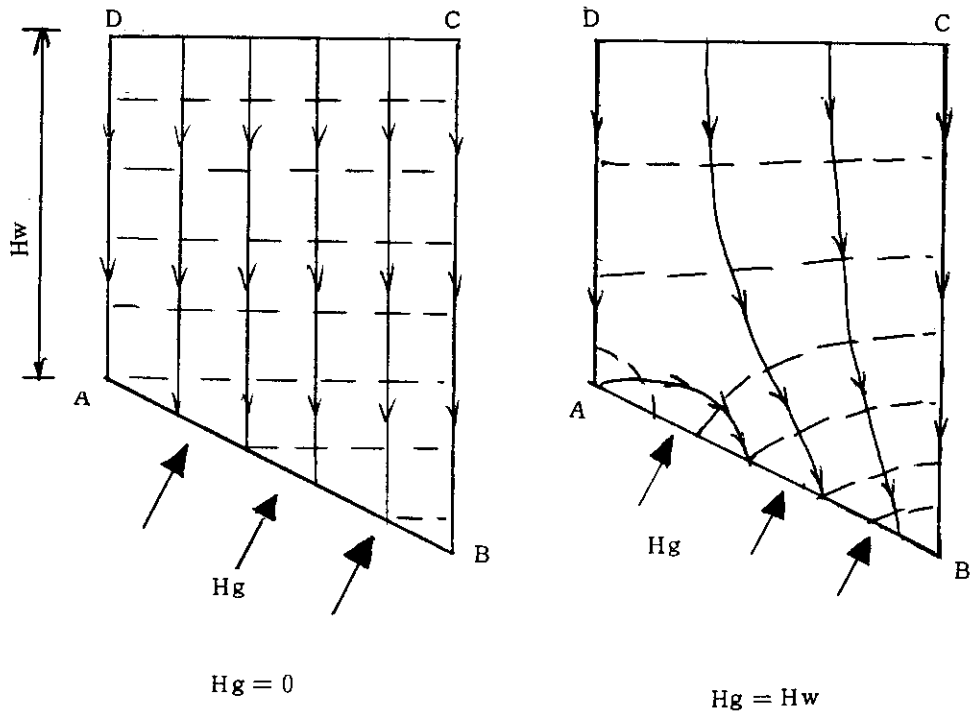


그림 - 9 Hg의 변동과 flow-net와의 관계

그림 9. (1)은 균열입구 AB에 작용하는 Gas 압과 CD에 작용하는 압력과 같은 경우로서  $I_0 = (Z_D - Z_A) / H_w = 1$ 이 되어 균열내부의 모든 점에서  $I_0 = 1$ 이 되며, 그림 9. (2)의 경우는  $H_g / H_w = 1$ , 즉 균열입구의 Gas 압이 균열상부의 수심압(Hw)과 같은 경우로서 AE구간에서 유선이 균열내로 들어감으로 공동내의 Gas가 균열내로 침투하는 것을 의미한다.



그런데 Hg를 점차 감소시키면 그림 9 (2)의 X점이 A점에 접근하고 이때의 flow-net는 그림 2. (2)와 유사하게 되리라고 예상되고, 그러면 공동점으로부터 유선이 들어가지 않으므로 Gas 누출이 없게 된다.

이때의 Hg를 구하면 그것이 최대 Gas압이 된다.

그런데 모든 Potential Flow는 LAPLACE 방정식 (14)으로 정의되며, 물의 흐름도 Potential Flow임으로 이 방정식을 도입하여 해석해 보았다.

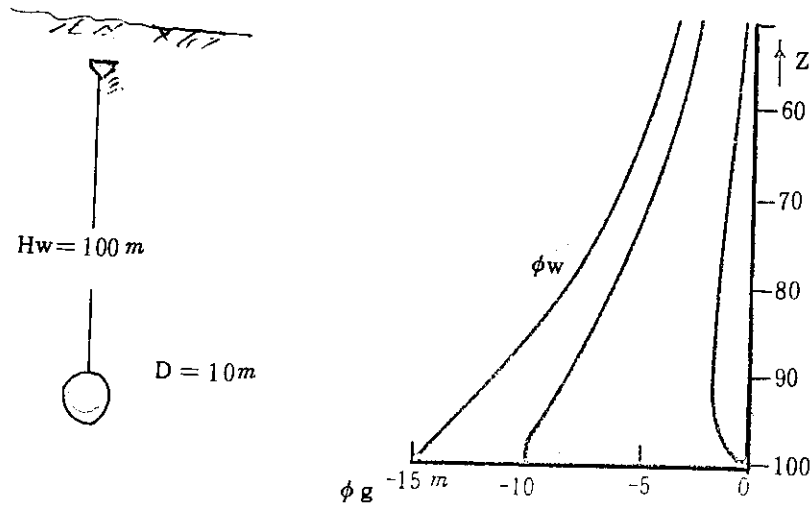
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( Kx \frac{\partial \phi_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( Ky \frac{\partial \phi_w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( Kz \frac{\partial \phi_w}{\partial z} \right) = 0 \quad (14)$$

이 방정식을 해석하기 위해서는 Model test, Electric Analogue 등이 있으나, 주지하는 바와 같이 FEM이 가장 용이하므로 가장 간단한 기하학적 도형인 원형에 대하여 해석한 결과는 다음과 같다.

경계조건으로는 공동에서 원거리에 있는 경계면 Potential을 기준 Potential인 지하수면과 같이  $\phi_w = 0$ 로 하고, 공동내부의 Potential은  $\phi_g = Z + Hg$ 로 하여 Hg를 변동시키면서 공동의 정점과 이 점에서 단위거리상부에 있는 Potential이 같게 될 때에 유선이 균열내로 들어가지 않으므로 이때의 Hg의 값을 구하면 Hg의 허용최대치가 된다.

그림 10. (2)에서  $\phi_g = 0$ , 즉  $Hg = Hw$ 일 때의 공동상부의 Potential 분포를 보면 공동상부 약 10 m (실제산치는 13 m)에서 최저 Potential 점이 형성되며, 이는 그림 9. (2)에서 예상한 것이 옳다는 것을 확인해 준다.

그리고 이때에는 공동의 정점에서  $I_o < 0$ 이 되어 Gas가 누출되며,  $\phi_g = -15 m$ 로 하면  $I_o > 0$ 이 되어 Gas는 누출되지 않고  $I_o = 0$ 일 때  $\phi_g = -10 m$ 가 됨으로  $Hg = \phi_g - Z = -10 - (-100) = 90$ 이 되어, 공동상부의 지하수 수심의 90%에 상당하는 Gas압을 지장할 수 있다는 계산이다.










(1) 공동의 개요

그림 - 10 공동의 내압과 공동상부의 Potential 분포

같은 방법으로 여러 형태의 공동에 대한 최대 Gas 압 (Hg) 은 표 3 와 같다.

표 3 공동의 형태와 최대 Gas 압 (수두)

SHAPE							
DIMENSION	D = 10 m	D = 20 m	10 × 20	10 × 20	10 × 20	20 × 10	20 × 10
SIZE	78 m	314	200	189	178	178	200
Zc	100	100	100	100	100	100	100
φgc	-10.0	-20.0	-13.0	-12.0	-11.8	-8.2	-8.5
Hg*	90.0	80.0	87.0	88.0	88.2	91.8	91.5

Hg\* : I<sub>0,c</sub> = 0 일 때의 Hg

표 3 으로부터 공동내에 저장할 수 있는 최대 Gas 압과 공동상부의 지하수의 수심과의 관계는 NOe 의 (13) 과 같다는 것을 알 수 있다.

그리고 NOe의 Shape factor는 같은 도형일지라도 공동의 높이가 높을수록 커진다는 것을 알 수 있다.

이 Shape factor는 결국 (4)식으로부터 계산된 것이므로 이 계산에 적용된 경계조건과 공동의 형태뿐만 아니라 공동주변암반의 투투계수, 균열조직, 지하수면의 상태등에 의하여 정해짐으로 매공동마다 고유의 값을 갖게 됨으로 필자는 이를 공동특성계수라 CCF (Cawern Charactereshc Factor) 부를 것을 제안했다.

이 연구결과를 요약하면 “어떤 공동에 고압 Gas를 저장할 경우 공동상부에 필요한 지하수 수심은 공동내의 Gas 압 수두에 CCF에 해당하는 수두를 가산한 값과 같으며 이때 공동의 경계면 (Periphery)에서는  $I_0 \geq 0$ 이 된다.”는 것이다.

그리고 공동상부의 지하수면은 강우량의 변동이나, 불규칙한 균열조직 및 공사중 탈수로 인하여 변동되어 일정하게 유지할 수 없으므로 공동건설의 최적입지조건은 해저나 호수밑등이라고 할 수 있다.

그러나 이러한 입지조건을 구할 수 없을 경우는 지하수면을 일정하게 유지하는 인공호, 급수로 및 다량의 주수공동을 설치, 급수하면 되리라고 사료된다.

이 공법은 Aberg의 water curtain 공법에 비하여 공사비가 저렴할 뿐 아니라, 공동내 유입수량이 감소하여 운영비가 절감되며 water curtain은 아무리 깨끗이 정수한 물을 주수하여도 유동방향이 일정하기 때문에 주수공의 균열이 불순물로 폐색되어 주수량이 감소될 우려가 있으나 이 공법은 주수공을 청소할 수 있어 이러한 우려가 없다는 장점도 있다고 생각한다.

## 2-7 Goodall의 연구

Goodall은 필자들과 같은 시기(1986. 8.25 및 9.15)에 같은 과제를 연구하여 서로 다른 이론을 발표하므로써 앞으로 이 두이론을 통합 새로운 이론을 정립해야 한다는 과제를 제기하였다.

즉, 필자들은 공동의 모양과 이 공동에 저장 가능한 최대 Gas압과의 관계규명에 초점을 맞추어 Shape factor 혹은 CCF의 이론을 전개하면서 Aberg이론의 부당성을 지적한 반면에 Goodall은 Sweden의 세계적 권위인 Lindholm교수의 지원을 받아 Aberg의 이론을 입증하기 위하여 노력하였고 또 입증하였다고 주장하기 때문이다.

그는 광범위한 관련분야의 자료를 검토하였고 균열내 기포의 운동에 관한 "Drag Coefficient"의 개념과 같은 그의 새로운 이론의 정립은 높이 평가될 수 있다.

그러나 그의 연구의 핵심은 역시 Aberg의 이론을 입증하기 위한 실험과 FEM분석인데 필자의 견해로는 만족할 만한 결과를 얻지 못한것이 아닌지 의심치 않을 수 없다.

그는 두께 25 mm 사방 448 mm의 유리판 2매로 극판간격 0.05 - 0.2 mm의 모형을 제작하여 균열입구에 기포가 침투하는 현상을 관찰하고 그림 11과 같은 결과를 얻었다.

그림 11 (1)은 균열입구의 공기압이 687 mm H<sub>2</sub>O일 때 간극 각부의 유선과 FEM으로 계산된 등 Potential선을 나타내고 있으며, 그림 11 (2)는 공기압이 712 mm H<sub>2</sub>O일 때 균열입구의 상단에서 기포가 침투할 때의 유선을 나타내고 있다.

이 실험을 통하여 Goodall은 Aberg의 flow-net는 확인하였으나 기포발생시의 I<sub>0</sub>는 계산이 곤란하다고 하였다. 따라서 Aberg가 정의한 CD구간에서의 I<sub>0</sub>는 구할 수 없었으며, 단지 DA 및 CB구간의 I<sub>0</sub>를 구하여 추정할 수 밖에 없었다.

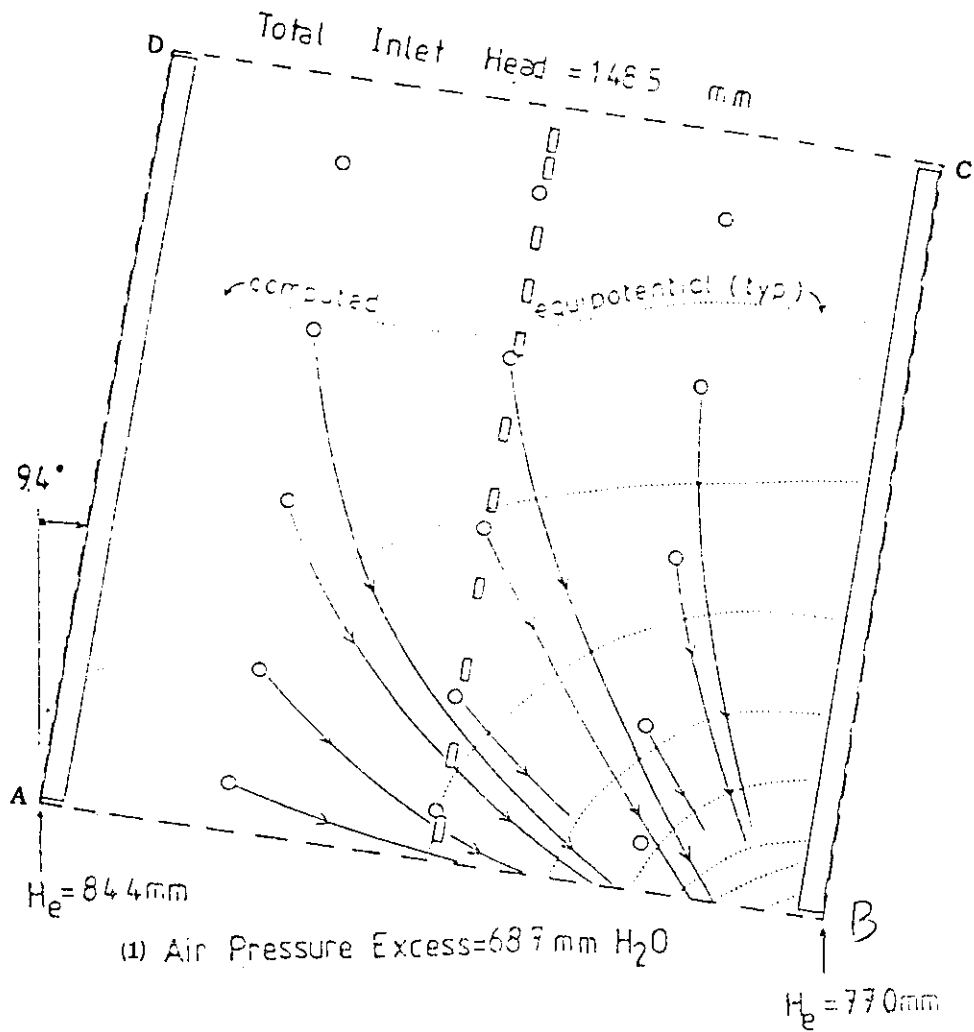


그림 - 11 Goodall 의 실험

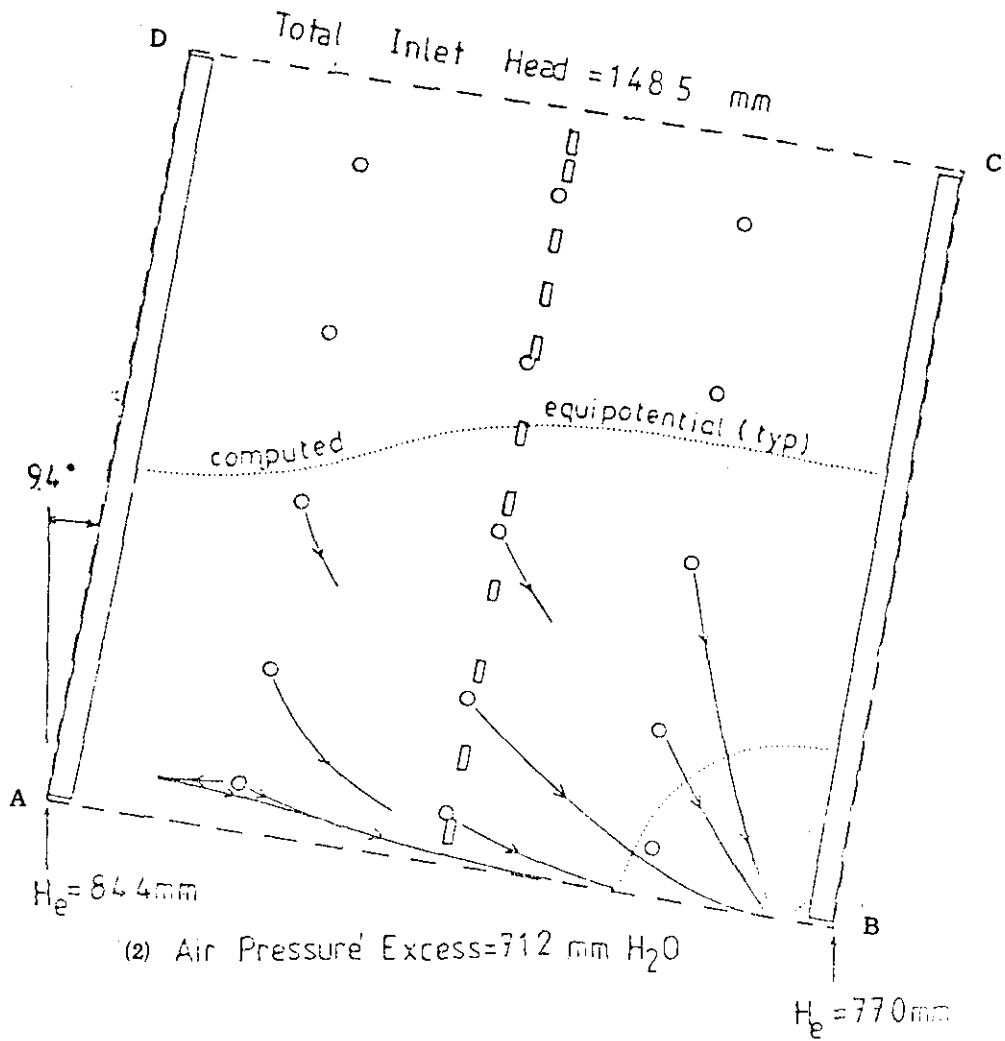


그림 - 11 Goodall의 실험

즉, 그림 11에서 좌측 DA선에 따른  $I_0 = (\phi_D - \phi_A) / \Delta Z = (1485 - 1531) / 448$ .  $\cos 9.4^\circ = -1.104$ , 같은 방법으로 CB구간에서는  $I_0 = 0.063$ 이 되며, 좌측에서는 유선이 상향이고 우측에서는 하향이 되어 Aberg가 예상한 CD구간에서의 균일한  $I_0$ 의 값을 구할 수도 없고 존재하지도 않는 것 같다.

그러나 그림에서 보는 바와 같이 모든 유선이 우하향으로 경사진 것은 Aberg가 주장한 대로 수막(Meniscus)이 형성되었기 때문이며 Goodall 자신이 지적한대로 만약에 극판의 간격(slit)을 좀더 증가시켜 수막의 효과를 감소시켰더라면 좌측에서의 유선은 상향이 되고 기포는 균열내로 침투하였을 것이다.

그러나 그렇게 하였어도  $I_0 < 1$ 이 되어 Aberg이론을 입증하지는 못했을 것이며, 더우기 그가 계산하였다는 등 Potential의 실제 계산치가 제시되지 않았을 뿐 아니라, AB구간에서 B측에 가까운, 수막이 없는 부분에서의 등Potential선의 간격이 균일치 않은 것( $I_0 \neq 1$ )은, 이 실험의 결과해석이 어딘가 미진하다고 생각할 수 밖에 없다.

그가 이 Model 실험에 대하여 Bercley대학 Nicholas Star 교수가 고안한 Program SATCON을 이용하여 균열입구의 수막의 높이(hreg)와 균열입구의 수직고(hmax)의 비 및 Gas의 침투를 방지하는데 필요한  $I_0$ 의 값을 계산한 결과는 그림 12와 같다.

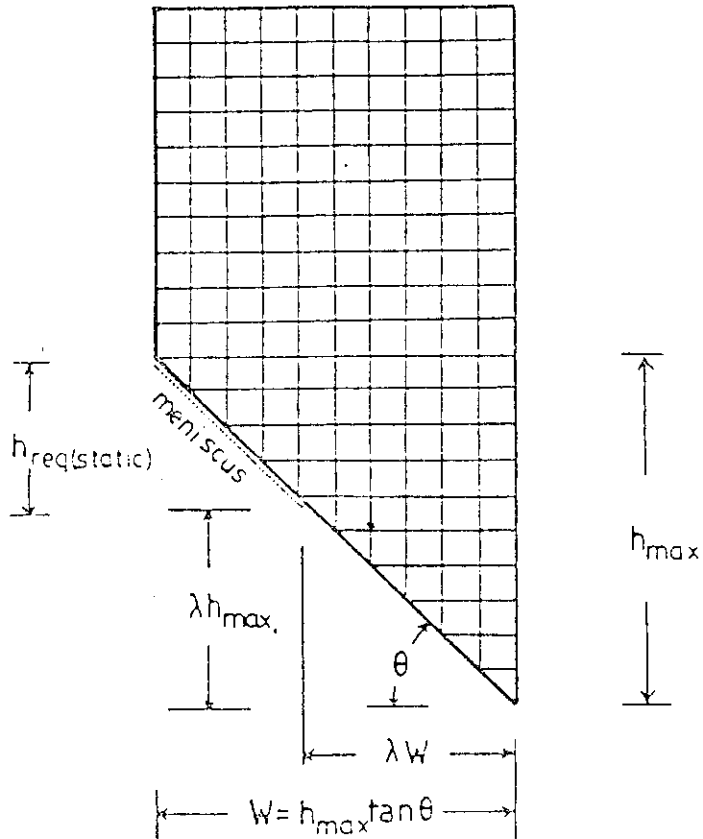
이 계산에 있어서 어떤 경계조건을 사용했는지는 모르겠으나, 수막의 길이가 0일 때 즉, 균열의 간격이 비교적 클때  $I_0$  값은 Aberg가 예상한 1도 아니며, 그의 실험치인  $I_0 \neq 0$ 도 아니라는 사실이다.

그러나 그는 결론부분에서의 여러모양의 균열입구에 대한 FEM분석결과 소요  $I_0$ 가 1보다는 적으나  $I_0 \geq 1$ 로 하는 것이 안전하며 이렇게 유지하기 위해서는 공동상부에 다수의 주수공을 설치, 높은 수압으로 주수할 수 밖에 없다고 하였다.

그런데 그는 그의 실험이나 FEM분석이 모두 1차원적(one dimensional)이고 공동의 모양에 대한 연구가 결여 되어, 이 분야의 연구가 더 필요하다고 하였다.

$Q =$  computed flow

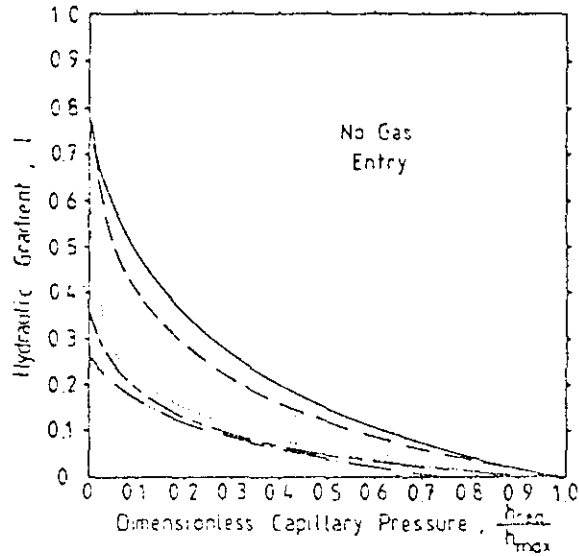
$I =$  hydraulic gradient  $= \frac{Q}{W}$



(1) FEM

그림 - 12 Goodall 의 계산





(2) 계산결과

그림 - 12 Goodall의 계산

### 3. 건설사례의 검토

현재 세계적으로 운영중에 있거나, 건설중에 있는 유류저장동굴에 대하여 살펴보기로 한다. 유류저장동굴에는 비교적 Gas 압이 낮은 원유저장동굴(약  $1 \text{ kg/cm}^3$ )과 Gas 압이 높은 LPG 저장동굴(약  $7 \text{ kg/cm}^3$ ) 및 LNG 저장동굴( $50 - 70 \text{ kg/cm}^3$ ) 등이 있다.

우선 LPG 저장동굴현황을 표 4에 수록하였다.

여기서 보면 60년대에 건설된 공동은 모두 Water curtain이 없는데 반하여 70년대 이후에는 France의 1개소와 Finland의 설치 미확정된 1개소를 제외하고는 Water curtain이 모두 설치되어 있는 것으로 보아 이론의 발달과정을 이해할 수 있으며, 현재도 Aberg의 이론이 널리 응용되고 있음을 알 수 있다.

표 - 4 LPG 공동현황

Country/Name	Operation Started	Rock Type	Size × 1000 m <sup>2</sup>	Water curtain Installed	Leakage Yes/No
USA Ravensworth	1965	Granite	60	No	
Sweden Goteborg	1968	Granitic	100	No	
Brofjorden	1974	Gneiss Granite	80	Yes	
OEF	1976	Granitic Gneiss	120	Yes	N
Norway Rafsnes	1977	Granite	100	Yes	N
France Lavera	1972	Limestone	423	Yes	
Petit cournne	1977		52	No	
Korea Yosu	1984	Gneiss	160	Yes	N
Ylsan	1988 (?)	Gneiss	160	Yes	
L - 1	1989 (?)	Metasand Stone	160	Yes	

그런데 비교적 공동내 Gas 압이 낮은 저장공동에는 water curtain이 설치되지 않은 경우가 간혹 있는데 이경우는 종종 Gas가 노출되어 문제를 야기하고 있다.

최근에 일본에서 건설에 한 착수한 원유공동에는 완벽한 watercurtain 설비가 설계되어 있으며, Norway에서 건설중인 2개소의 원유공동중 1개소에는 공사초기에 강력한 water curtain을 공사초기에 설치하였으나, 1개소에는 watercurtain 설비 없이 공동을 굴착하던중 급격한 지하수위의 강하를 발견하고 지상에서부터 주수공을 굴착하여 주수하고 있다.

그런데 국내에 건설된 Diesel 공동에는 water curtain 설비가 되어 있는데 이는 Diesel 증기의 분압이 원유에 비하여 무시할 정도이므로 이것이 오히려 이론상으로는 watercurtain이 불필요한 것이라고 생각된다.

위에서 검토한 바와 같이 비교적 고압인 LPG 공동의 경우는 watercurtain의 설치가 일반화 되었으나, 설치 안된 곳도 있으며 원유저장공동의 경우도 마찬가지로 Water curtain이 설치된 곳도 있고 안된 곳도 있다.

이는 결국 Water curtain 이론, 즉 Aberg 이론의 불확실성에 기인하는 것이라고 판단된다. 그리고 또 한가지 주목해야 할 사실은 이들 watercurtain이 단순히 지하수위를 유지하는 역할을 하는 것인지 아니면 Aberge의 이론대로  $I_0 \geq 1$ 의 조건을 만족시키는 것인지를 확인해야 되며 만약 전자의 역할만을 한다면 watercurtain을 공동의 직상부에 설치할 것이 아니라 지상에서부터 주수공을 설치하여 건설비와 운영경비를 절약할 수 있다는 것이다.

필자가 국내저유시설을 계획하고 건설하는 과정에서 취득한 경험중 중요한 것은 공동의 계획시 저유용량/총굴착량의 비율을 가능한한 크게해야 되며, 이렇게 하기 위해서는 모든 배관설비를 Tunnel 내가 아닌 지상에 설치해야 되며, 이렇게 하려면 공동은 산밑이 아닌 계곡밑에 건설해야 되고 이렇게 하면 지하수도 충분하다는 것과 입지 선정시에 고려할 사항은 암질보다도 기타 경제적 조건에 더욱 비중을 두어야 한다는 것이다.

#### 4. 앞으로의 연구과제

이상에서 검토한 바와 같이 고압 Gas의 지하저장시설은 점차 증가일로에 있으나 이에 관한 핵심이론은 아직도 정립되지 못한 것 같다.

현재까지 발표된 이론은 Aberg의 이론이 주류를 형성하고 있으나 NOe와 필자등이 또 다른 이론을 발표하고 있으므로 이들을 종합, 새로운 이론을 정립할 필요가 있고, 또 가능하다고 생각한다.

즉, Aberg는 공동천정의 요철에 주안점을 두어 연구하였고 NOe와 필자등은 공동의 전체적인 형태, 규모에 중점을 두어 연구한 결과이므로 앞으로는 이

를 종합하여 천정에 요철이 있는 전체적인 공동에 관하여 연구하여야 할 것으로 생각된다.

## 5. 맺는말

우리나라가 유류지하저장시설을 건설하기 시작한 이래 벌써 10년이 되어가고 있으며 우리도 모르는 사이에 세계최대의 원유저장공동 보유국이 되었고 앞으로 1, 2년내에 세계최대 LPG저장공동보유국도 될 것이다.

이 기간동안 대형공동의 건설기술은 획기적으로 개발되었고 많은 기술인력이 양성된 것은 누구도 부인할 수가 없으나, 유류지하저장기술의 핵심분야인 지하수 관련기술(이론)은 아직도 외국인에게 전적으로 의존하고 있는 실정임도 부인할 수 없는 현실이라 하겠다.

그런데 이 분야는 그렇게 난해한 것이 아니므로 관련전문인 들은 누구나 관심만 가지면 쉽게 성과를 기대할 수 있으리라고 보므로 많은 분들이 참여하실 것을 권하고 싶다.

그리고 이 분야의 기업을 경영하시는 분들에게는 국내기술인들을 활용하는 것은 초기에 비록 상당한 기간은 소요되겠으나 장기적으로는 기업에 상당한 이익이 될 것임은 타분야의 예를 보아도 틀림없는 일이므로 관심을 가져 줄 것을 부탁드립니다.