

## L·R·C '86 Finland 에 다녀와서

徐 晶 圭\*

먼저 인사부터 드려야 되겠습니다. 저는 본래 본 학회의 회원이 아니므로 기고할 자격이 없는 지라 처음에는 망설였으나 여러 회원님들의 명단을 살펴 보니 많은 분들이 저와 함께 일한 일이 있으며 여러모로 저를 도와 주시던 분들이라 옛 친구를 대하는 것 같은 생각이 들었고 또한 이 심포지움에 다녀와서 그곳에서 보고 듣고 또 생각했던 것들을 국내의 여러분들과 나눌 수 있는 기회가 없을까? 하고 찾고 있던 중이라 귀 학회에서 할애해 주신 지면을 고맙게 생각하면서 이 글을 씁니다.

여러분들도 이미 알고계시는 바와 같이 현재 지하라는 개념은 그저 지하자원의 개발이나 도로터널의 대상, 혹은 지상구조물의 기초라는 범주에서 벗어나 인간이 앞으로 개발해야 할 무한한 공간이라는 개념으로 변천하였고 이 지하공간(Subsurface)의 개발과 이용에 대하여 전 세계는 경쟁적으로 심혈을 기울이고 있으며, 특히 북구의 제국들이 이 분야에서는 단연 앞서 가고 있는 것이 주지의 사실입니다.

그리고 이 노력의 일환으로 1977년과 1980년에 Sweden의 Stockholm에서 Rockstore 77 및 80이 개최된 바 있으며, 이년의 L.R.C.'86 Finland도 이 노력의 계속으로 추진된 것도 다 알고 있는 사실입니다.

이번의 심포지움도 I.T.A와 I.S.R.M의 후원

으로 Helsinki의 University of Technology에서 개최되었는데 소련과 동구권을 포함하여 52개국에서 약 450명이 참가하였고 35개국에서 154편의 논문이 제출되어 이 중에서 약 1/3이 직접 발표 토의되었습니다.

한국에서는 이정인 교수와 김치환(삼림엔지니어링 서울대 박사과정)씨가 The effect of pillar wiath on Stress distribution around Underground Caverns in Viscoelastic rock을, 정형식 교수가 Model Study On Watertightness around Underground Oil Storage Cavern. 이회근 교수와 일본 山口大의 Mizuta, Y.씨가 Analysis of rock behaviours for safe excavation of Mine Pillars 그리고 본인과 정형식 교수 및 김치환씨가 The Study on the Condition of Gas leakage from the Unlined rock caverns 등 4편의 논문이 제출되어 논문집에 수록되었고 김치환씨와 제가 직접 발표와 토의에 참가하였습니다.

그런데 위의 4편의 논문 중에서 3편이 본인이 근무하는 한국석유개발공사에서 시행한 사업을 대상으로 연구된 것이라는 것과, 이 연구를 하는데 있어서 삼림엔지니어링의 선용사장의 도움이 컸다는 것, 그리고 이러한 상호협조가 실질적인 산학협동의 모범적인 예로 특기할 만한 일들이라고 생각합니다.

그리고 한국에서는 정형식 교수, 김치환씨와

\* 한국석유개발공사, 기술역.

본인 그리고 동력자원연구소의 최순학 박사, 김윤기 박사가 참가하였습니다.

심포지움의 주제는 다음과 같았으며, 어느것 하나 중요하지 않은 것이 없어 모두 듣고 싶었으나 그럴수가 없는 것이 안타까웠습니다.

- Case histories
- Economy use and operation of large rock caverns.
- Engineering geology.
- Risks and risk sharing.
- Design of large rock caverns.
- Legal and environmental aspects.
- Excavation and mining methods

등이었으며 이 외에 ITA 회장 등 초청연사의 강연이 있었습니다.

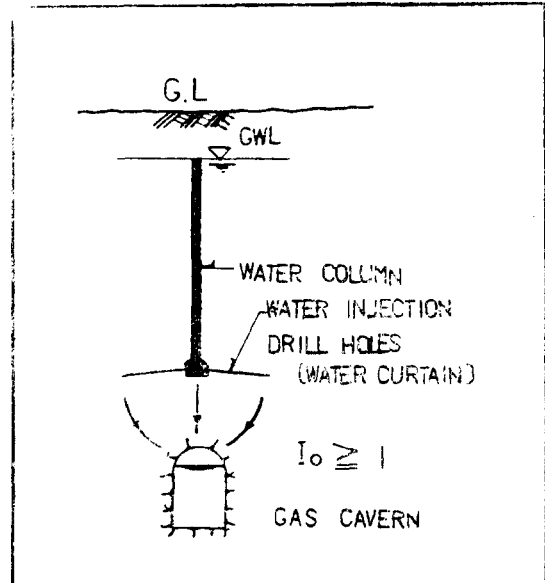
그러면 여기서 본인이 발표한 논문의 내용을 간략하게 요약 소개하고자 합니다.

우리나라는 1978년 석유저장지하비축시설을 착수한 이래 현재까지 원유 및 LPG 지하저장시설을 건설하여 왔고 현재도 2개소의 LPG 기지가 건설중에 있는 데도 어이된 일인지 아직까지 외국의 기술에 의존하고 있는 실정일 뿐만 아니라 관련업체에 의한 기술개발 의지가 부족한것 같아 늘 불만을 갖고 있던중 때마침 본인에게 여가가 생겨 이 분야에 대한 연구를 착수하게 되었고 정형식 교수의 적극적인 지도와 김치환씨의 헌신적인 노력과 Computer 처리로 본 연구를 마무리 지을 수 있었습니다.

유류(액체)의 지하저장 원리에 대하여는 여러분들도 대략적으로 알고 계시는 바와 같이 공동 주변의 지하수압이 공동의 내압 보다 크기만 하면 된다는 것이나, 이 저장물이 Gas인 경우에도 이 원리가 그대로 적용되는 것인지는 검토해 볼 필요가 있습니다.

이에 대하여 지금까지 연구 발표된 이론을 검토해 보면, 우선 Sweden의 Åberg 씨의 이론(1977)은 공동 천정의 균열의 입구가 절대수평이고 절대 평활하지 않으면(not absolutely horizontal and not absolutely smooth) 균열 내의 수압이 Gas 압 보다 높더라도 Gas는 누출될 수 있다고 가정하고 이를 방지하기 위하여는 공동 주변의 균열에 강력한 지하수류(strong flow of ground

water)가 있어야 하고 이때 이 지하수류의 강도는 적어도 연직동수구배(vertical hydraulic gradient)가 1 이상( $I_0 \geq 1$ ) 되어야 하며 이렇게 유지하려면 공동상부에 Watercurtain 설비를 반드시 해야 된다는 것입니다(그림-1).



이 이론은 지금까지 대체적으로 인정되어 왔으며 설계기준으로 채택되어 우리나라의 시설로 이 이론에 의하여 건설되어 왔습니다.

그런데 불란서의 Geostock 사는 Hele-saw 모델을 이용하여 일련의 실험을 한 결과 공동상부에 공동내압보다 일정량이 높은 수압을 가하면 Gas는 water curtain 없이도 누출되지 않는다



최순학 박사, Puddeck 교수, 필자, Gunnarstorp 박사(의장), Babendererde 박사(의장), Secretariat (정형식 박사 촬영).

— 논문 발표를 마치고 기념 촬영 —

는 것과 이 일정량의 추가 수압은 공동의 모양에 따라 상이하다는 것을 발견하고 이를 모양계수(shape factor)라 명명한 후 이 관계식에 대한 특허를 신청 획득(한국특허 출원공고 제 713 호 1984)하였습니다.

그러나 이 관계식은 정성적일뿐 정량적으로 계산하는 방법이 제시되지 못하였으므로 실제 설계에는 적용할 수 없을뿐만 아니라 GK사 자체도 이 식을 이용하여 설계한 사실이 없으므로 불완전하다는 것도 확인되었습니다.

일본의 중앙전력연구소의 Komada 박사 팀은 Rockstore 80에, Gas 누출방지에 필요한  $I_0$ 는 1보다 적어도 된다는 논문을 발표한바 있고 최근(1985)에는 아예  $I_0 \geq 0$ 이면 됨으로 Åberg 씨가 주장하는 Watercurtain은 필요가 없으며, 공동의 상부에 유지하여야 할 지하수위는 공동내의 Gas 압수두 이상이면 된다고 발표하였습니다.

이상의 서로 상이한 이론들을 면밀히 검토한 결과 Åberg 씨의 이론은 그 가정이나 관계식의 유도 과정이 전적으로 잘못되었을 뿐만 아니라 더욱 놀라운 것은 자기 자신의 실험에서도 이를 입증하지 못하였다고 실토하고 있는 것이었습니다.

문제는 공동천정의 불규칙성이 기포발생에 어떻게 영향을 주는 것일까 하는 것이었습니다. 이 문제는 Laplace formular for Capillary pressure (Bear, 1979)를 적용하여 수학적으로 유도해 본 결과 천정의 불규칙성에 관계 없이 Gas 누출방지 조건은  $P_w \geq P_G$  ( $P_w$ : 지하수압,  $P_G$ =Gas 압) 즉,  $I_0 \geq 0$ 이라는 것이 증명되었고 이는 Komada의 실험과도 일치하는 것이었습니다.

그런데 또 하나의 문제는 공동의 경계면 특히 공동의 천정에서  $P_w \geq P_G$ 의 조건을 만족시키기 위하여 공동상부에 유지하여야 할 지하수의 수심은 얼마인가 하는 것이었습니다. 여기서 일반적으로 생각되는 것은  $P_w = H_w \times \gamma_w$  ( $H_w$ : 지하수 수심,  $\gamma_w$ : 지하수의 단위중량)이지만 이것은 지하수가 정지하고 있을 때의 지하수압 임으로 지하수가 유동중일 때는 이와는 달라짐으로 이때의 지하수압을 구하는 방정식을 찾아내야 하는 것이었습니다.

결국 이 방정식은 역시 지하수의 연속방정식

표 1. 공동의 모양과 최대 Gas 압과의 관계

Shape							
Size	D=10M	D=20	10×20	10×20	10×20	20×10	20×10
$H_w$	90.0	80.0	87.0	88.0	88.2	91.8	91.5
$\Delta H$	10	20	13	12	11.8	8.2	8.5

Hw=100M

Cavern Characteristic Factor C.C.F  
: Where the gas leak begins

(Continuity equation of groundwater)라는 것을 알게 되었고, 이 방정식에 경계조건으로서 공동내의 Potential을 변경시키면서 공동경계면의  $I_0$ 가 0이 되는 값을 찾은 결과 공동상부에 유지하여야 할 수심의 깊이가 구해졌습니다(표-1).

이 표를 분석해 보면 공동상부에 유지해야 할 지하수 수심은 공동내압의 15~20%를 증가시키면 된다는 것을 알 수 있습니다. 이는 물론 이 표에 예시된 모양에 대한 것임으로 실제 공동을 설계시는 그 설계에 대하여 따로 계산되어야 함은 당연한 것입니다.

그런데 공동내압과 지하수의 수심과의 차이는 공동의 형태에 따라 다를뿐만 아니라 연속방정식의 제계수 즉, 투수계수의 분포와 서로 상이한 경계조건에 의하여 정하여지기 때문에 서로 상이한 값을 갖게 됨으로 이 값을 단순히 모양계수(Safe factor)라 부르는 것보다는 공동의 특성계수(Cavern Characteristic Factor C.C.F)라 부르는 것이 타당하다고 생각됨으로 이렇게 부를 것을 제안했습니다.

그러나 Watercurtain을 설치하지 아니하고 단지 C.C.F의 개념만으로 설계할 경우에는 공동 주변의 균열의 불규칙성으로 인하여 공동상부에 충분한 지하수가 공급되지 않는 한 국부적인 탈수현상이 발생할 수도 있으며, 년중 강우량의 변동은 지하수면의 변동을 수반하게 됨으로 필요한 수심을 유지하기 위하여는 안전율을 증가시켜야 하는데 이와 같은 현상을 방지하고 항상

일정한 지하수압을 유지하기 위하여는 공동을 해지나 호수 혹은 늪지하에 건설하는 것이 타당하며 이렇게 할 경우 토지 비용과 Watercurtain 비용이 감소되고 공동의 보강비가 일부 증가 할 것이 예견되며, 전체적으로 공사비의 약 10~15%가 절감될 것이라는 것이 본인 논문의 요지였습니다.

이 논문을 발표하자 GK사의 CRAPPE 씨는 GK사를 대표해서 질문한다고 전제하고 이 연구 결과는 이미 자사가 개발하여 특허권을 획득(대한민국 특허청 공고번호 84-713)한 바가 있음으로 새로운 것이 아니라고 말하고 그렇지만 수학적인 계산방법은 자사의 Know-how로 보유하기 위해서 어떠한 문헌에도 발표한 바가 없는 것도 사실이라고 말했습니다.

이에 대하여 본인은 바로 그 문제가 이 연구를 하게 된 동기라고 답하고 실용할 수 없는 공식은 무용한 것이 아니냐?고 반문했습니다.

토론이 끝난 후 Swiss의 Gysel 박사는 수학적 계산방법이 제시되지 않은 공식이 어떻게 특허를 받을 수 있느냐?고 반문하는 것이었습니다.

Sweden의 Blomquist 박사와 Ronge 박사는 해저 지질 조사가 곤란하다고 말하여 나는 대부분의 해저는 동굴공사가 가능할 뿐 아니라 선진보링(Advanced Boring)을 실시하면서 굴착과 보강을 하면 별 문제가 없을 것이고 지금 Norway의 Stüre 해저 터널공사가 성공적으로 진행되고 있지 않느냐?고 반문했더니 하기는 그렇다고 대답하는 것이었습니다.

귀국해서 논문집을 훑어 보다가 Sweden의 Lindlom 교수의 LNG 지하저장 공법에 관한 논문을 읽어 보니 그 개념은 대략 Gas 압이 6~7 MPa 이고 따라서 지하 600~700 m에 공동을 건설해야 되는데 Watercurtain을 설치할 경우 Bore hole의 수압이 높아 hydro-fracturing 현상이 발생되어 공동이 붕괴하거나 과도한 지하수가 유입되는 것 등을 해결해야 할 과제라는 것이었습니다. 나는 즉시 심포지움 사무처에 그가 믿고 있는  $I_0 \geq 1$ 의 이론은 잘못된 것이니 Watercurtain도 필요 없고 따라서 이상의 문제점도 발생하지 않을 것이라는 의견을 보내고 연말에 발간될 회의록에 수록하여 여러 사람들의 견

해를 들어보라고 제안했습니다. 아마 그의 연구에 나의 연구 결과가 상당히 도움이 될것이라고 나는 믿습니다. 그 외에도 GK나 Komada씨의 연구에도 도움이 되리라는 것도 의심하지 않습니다.

그러나 제가 바라는 것은 국내에 계시는 분들의 적극적인 참여로 제가 연구한 것에 대하여 비판해 주시고 모순점을 지적해 주셔서 더욱 보완 발전시켜 복구의 기술 수준을 따라 잡는 것입니다.

그리고 우리나라에서 앞으로 건설될 Gas 저장 공동에 저의 이론이 적용되는 것을 보고 싶은 것입니다.

다음은 제가 Symposium과 tour 기간에 보고 듣고 생각한 것 몇가지를 적어볼까 합니다.

저는 우리 공사의 배려로 우리나라에서는 유일하게 Symposium 전후의 tour에 참가하는 영광을 갖었습니다. 이 tour는 Norway 서해안에 건설중인 송유관 부설용 해저터널 2.3 km와 원유 및 LPG 저장 공동 건설 현장 및 Oslo의 지하체육관 및 지하정수장(Water treatment plant) 그리고 Finland의 국영석유회사인 Neste-Oy 정유공장에 있는 2,900만 바렐의 지하유류 저장시설 Finland 북부의 Lapland 지역에 위치한 2개소의 지하수력발전소 등의 견학이었습니다.

이 tour는 전문가의 안내를 받으며 전문가들과 같이 하는 tour였음으로 비록 짧은 기간이었지만 많은 것을 체계적으로 보고 배울 수 있는 좋은 기회였으나 우리나라에서 저 혼자만이 참가하게 된 것이 몹시 안타깝게 생각되었습니다.

Norway 서해안의 해저터널은 해저 80 m에 피복고가 불과 15 m 밖에 얹히는 곳이 있었으나 누수량은 당초 6,000 l/min을 예상 했던데 비해 20~30분의 1인 200 l/min 밖에 얹였으며 수개소에 Weathered zone을 통과했으나 별 어려움이 없었다는 설명이었고 Steel-fiber-reinforced Shotcrete를 실용하고 있었으며 Jumbodril과 폭약장전의 효율성으로 Cycle타임을 최대한 줄이는 작업계획 등은 인상적이었습니다.

원유저장 공동의 규모는 19 m×33 m의 대형 단면으로서 우리 U-2의 18 m×30 m보다 컸으며 특히 굴착공법이 상부 Gallery와 Bench I은

horizontal drilling 하부 16.5 m 의 Bench II 는 Bench-cut 을 하고 있는 것을 보았으며 이것이 상당한 공사비를 절감하고 공사기간을 단축시킬 것이라는 것을 알았습니다.

그리고 또 한가지 특이한 것은 터널내에 공사용 조명이 거의 없다는 것입니다. 조명이란 단지 장비의 자체 조명과 인부들의 helmet 에 부착된 조명장치 뿐이었으며, 안전대책으로는 2주에 한번씩 Scaling 을 하는 것뿐이라는 것입니다.

Watercurtain 의 설계는 역시 그 원칙이 확립되지 못하여 2개소의 원유저장 공동이 서로 상이하였을 뿐 아니라 그에 대한 이론을 자신 있게 설명하는 사람도 없고 오히려 본인에게 묻고 있는 실정이었습니다.

LPG 의 저장공법은 아직까지 상온(15°C) 저장법만 알고 있었는데 이곳에서는(Monstat) 반냉각(+2°C) 저장공법(Semirefrigerated Storage Method)을 개발하여 시공중에 있다는 것도 특기할 만한 것이었습니다.

Bergen 횡단 고속도로의 건설은 TBM(Tunnel Boring Machine)으로 비 발파공법을 채택하여 기존 교통에 전혀 지장을 주지 않으면서 시공되고 있어 앞으로 우리 서울의 도로율을 증가시키는 수단은 또한 이것 밖에 없지 않을까도 생각해 보았습니다.

Helsinki 교외에 있는 Neste-Oy 의 지하유류 저장시설은 아마도 세계 최대 최고(最古)의 시설일 것이라고 생각되었으며 지금도 LPG 와 Light Condensate gas(천연 Gas 의 일종)의 저장 공동을 시공하고 있는데 역시 Watercurtain 시설은 계획은 되어 있으나 설치는 좀더 검토해보겠다고 하니 역시 그 원리가 명확히 확립되지 못했다는 것을 말해주고 있었습니다.

나는 Symposium 이 끝난 후 Finland 북부인 Lapland 를 방문했으며 이곳에는 원래 원주민인 Lapp 족이 널리 흩어져 살고 있었으나 백인에게 쫓겨 북극지방 일부에 몰려 살게 되었고 그 인구도 극히 감소하여 그들을 만나보기가 어려울 지경이었으며 그들의 유물을 전시해 놓은 소위 open meuseum 은 우리의 조그만 민속촌 같은 인상을 주었으나 Lapp 족은 한명도 볼 수 없어

죽은 문명과 같이 서글프게 느껴졌습니다.

무엇보다도 이번 tour 기간에 나를 놀라게 한 것은 Norway 서해안의 Pilot-wave-Power plant 였습니다.

Norway 는 산유국일 뿐만 아니라 수많은 크고 작은 호수가 있어 소수력이 잘 발달되어 있는 관계로 에너지 문제는 없는 나라인데도 보잘 것 없는 wave-power 연구에 몰두하고 있다는 사실이었습니다.

내가 그들에게 이 연구의 목적을 물었더니 그들의 대답은 남태평양과 같은 wave-power 가 풍부한 지역의 Energy 문제를 해결하는 것이라고 대답했습니다.

내 생각에는 정말로 불요 불급한 분야인데도 막대한 연구비를 투자하여 연구한다는 것이 한편으로는 이해가 되지 않았고 또 한편으로는 부럽기만 했습니다.

그리고 그들은 항상 연구하고 또 연구를 지원하고 있기 때문에 오늘날의 서양문화가 있고 그리고 또 그들의 문화가 영속되는 것이 아닌가 생각해 보았습니다.

그들은 우리 보다 인구도 적고 대학의 수도 적었으며 연구소 엔지니어링회사 그리고 대학교 수도 우리보다 적는데 그들은 이 적은 자원을 서로 유기적으로 잘 통합해서 활용하는 것 같았습니다. 즉 그들의 대학교수들은 어떤 형태로든지 엔지니어링사와 연관을 맺고 있었으며 1인 2역 아니 1인 3역을 하고 있었습니다.

그런데 우리의 현실을 보면 그렇지가 못한 것 같아 이것이 그들과 다른 점이라고 생각되었습니다. 매년 우리나라가 시행하고 있는 Project 는 세계적으로도 방대한 것임이 틀림 없습니다. 그런데 이 Project 에 대해서 발표되는 연구논문이 얼마나 되는지 모르겠습니다. 확실한 것은 이번 Symposium 에 발표된 것을 보면 대략 알 만한 것 같습니다.

마지막으로 여러 회원님들에게 부탁드리고 싶은 것은 외국의 기술을 많은 돈을 들여 도입하면 빠른 시일내에 그것을 소화하여 내것으로 만들고 한단계 더 발전시켜야 하겠으며 이렇게 하기 위해서는 우리의 훌륭한 인적자원을 최대한 활용해야 된다는 것입니다.

제가 이번 Symposium 과 tour 에 참석하기 위해서 소요된 경비는 약 6.000 불이었는데 만약에 제가 보고 배우고 본것을 우리 project 에 적용할 수만 있다면 이것의 몇 10 배 이상 도움이 될 것이라는 것을 의심치 않으며, 이 정도의 자금을 지원할 수 있는 기업도 우리 나라에는 많이 있다고 생각되기 때문에 앞으로는 더 많은 사람들이 이러한 기회에 참석할 수 있도록 지원해 주실 것을 부탁드립니다.

이렇게 함으로서 우리 나라의 기술 수준을 세계에 알리고 세계의 발전하는 기술을 신속하게 도입하여 그들과의 격차를 줄여 나갈 수 있는 길이라고 생각되기에 이것을 권하고 싶습니다.

그리고 끝으로 제가 앞으로 현업에 참여하게 될 때는 반듯이 여러분들과 함께 여러분의 그 완숙한 지식을 활용하고 더욱 발전시켜 나가도록 서로 노력할 것을 약속 드리겠습니다. 도와 주십시오.