

터널과 지하공간, 한국암반역학회

Vol. 1, 1991, pp. 241~249

高温岩體의 에너지 開發을 위한 세계 技術動向

姜大雨¹⁾

1. 序 論

1969년에는 아폴로 宇宙船이 달 表面에 着陸을 성공한 이래 美國과 蘇聯은 물론 日本, 中國 등에서도 宇宙開發을 위한 막대한 예산을 投入시켜 왔다. 최근에는 宇宙停車場을 이용하기 위하여 무중력하의 宇宙空間을 만들어 각종 實驗을 하는 등 새로운 分野의 研究開發도 이루어지고 있다. 이에 반하여 우리가 살고 있는 地球의 문제는 Plate Tectonic, 지진 혹은 海溝 嶺 Boring 등 理學的 이야기는 많으나 지금까지 이들에 대한 工學的 이야기는 많지 않았다. 특히 石油 혹은 鑛物資源의 大部分을 海外에 의존해온 우리나라에서는 1950년부터 1960년 대말까지 검은 Diamond라 불리우던 石炭採取의 全盛時代가 오늘날에는 내리막길을 걷고 있다고 말할 수 있다. 그러나 여기서 지하를 적극적으로 이용하는 방법에 대해서 工學的인 측면에서 다시 생각해보자.

수 10km까지의 地殼은 견고한 岩體로 구성되어 있고 그 내부에 半熔融狀態 Mantle(1,000°C 이상)이 존재한다. 이들에 대한 지하자원 이용은 岩體中에 관입하여 있는 熔融 Magma 등의 에너지를 工學的으로 이용하도록 하는 것

이 人類의 꿈이다. 우리들이 살고 있는 地表는 深度가 약 100m마다 평균 3°C 정도의 溫度가 상승한다. 이것은 地溫句配라 불리어진다. 지하 10km까지의 이 地溫句配는 세계 각국이 동일하지 않고 나라에 따라 차이가 있다. 일반적으로 가장 地溫句配가 급한 지역을 地熱開發의 適地라고 생각하고 있으며 韓國의 南部地域도 세계의 平均보다는 높은 地帶가 存在하고 있다. 심지어 200~400°C의 高温岩體(Hot Dry Rock)에 저장되어 있는 熱에너지는 막대하고, 만일 이것을 한 번이 4.5km 埋방체만하더라도 溫度差 100°C 정도의 熱에너지를 전부 地表까지 추출할 수 있다면 현재 우리나라가 4年間에 消費하고 있는 에너지의 總量(전기, 석유 등의 熱에너지로 換算한 값)과 같은 量에 해당한다. 따라서 地下高温岩體의 熱利用技術의 研究개발은 이 地熱에너지 開發의 꿈을 실현시키기 위한 工學的 重要과제이다. 구체적으로 단기간에 실현 가능한 에너지교환기술로서는 地下高温岩體를 熱源으로서 熱水 혹은 熱蒸氣를 추출하는 것이다.

岩石破壞力學의 學問體系는 아직 未知의 分野도 많고 그 應用범위도 넓다. 지금까지 工學

*1991年 12月 接受

1) 正會員, 東亞大學校 工科大學 資源工學科 教授

의 상호 연관되는分野로 Fig. 1처럼 생각되어지고 있다. 결국, 岩石을 破壞시키는 研究學問은 地下貯藏 設備뿐만아니라 安全性 評價와 熟

에너지 抽出을 위한 尖端技術 分野의 역할도 할 수 있다는 것이다.

Table 1 장래의 地下이용을 하기위한 研究課題

| | 技術開發課題 | 岩體의 溫度 | 目 標 | 지하균열의 역할 |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------------|---------------------|
| 에너지 資源 抽出 | 마그마로부터의 에너지 자원 추출 | ~1,000°C | 광물자원추출 및 열 에너지 추출 | 反應容器 |
| | 고온안체에 의한 연료 Gas의 제조 | 600°C~800°C | 수소, 일산화탄소의 地下直接製造 | 反應容器 |
| | 열수, 열증기추출을 위 한 지하보일러 Gas | 100°C~450°C | 發電用 200°C이상, 工業 用100~200°C, 給湯用 | 지하보일러 熱交換面, 流體通路 |
| 에너지 資源 地下 備蓄및 保管 | 石油 天然가스 地下備 蓄 | 0°C~50°C | 地下탱크대신 이용 | 空洞調節균열 破壞의 起點이 됨 |
| | 高 Level 방사성 廢棄 物 地下管理 | 50°C~250°C | 50~100년 保管監視 | 상동 |
| | 電力비축용 大型超電 導 magnet 地下設備 | Magnet 내부와 영하 269°C | 야간잉여 電力의 직 접 備蓄 | 상동 |

2. 地下開發과 岩石破壞力學

機械工學의 分野에서 發展해 온 金屬材料의 破壞力學은 주로 우주 Rocket, 航空機의 機械 構造物 脆性破壞事故를 미연에 방지하기 위한 基本概念으로서 널리 이용되고 있다. 오늘날 파괴역학은 地下岩體에 있는 鑛物資源과 熱에너지를 지상까지 효율적으로 開發하는 문제로 대단히 중요하다. 이 새로운 형태의 地下資源을 開發하기위한 방법의 하나로 地下의 特定場所에 存在하는 資源은 다이나마이트나 水壓을 利用해서 파괴하고 물 등을 注入해서 Slurry狀의 流體로서 地表까지 운송하자는 研究도 提案되고 있다. 이것이 實現되어지면 人間이 직접 地下에 들어가서 資源을 採掘하지 않고 地上에서의 採取가 可能하게 될 것이다. 이렇게 하기 위해서는 目的하고자 하는 位置의 岩盤을 적극

적으로 파괴시키는 기술이 필요하게 되고 또 그때 破碎의 規模, 方向 등도 과약하지 않으면 안된다. 그래서 地下岩體의 파괴거동을 解析하기 위한 새로운 학문분야가 중요하게 된다. 岩石의 경우 金屬과는 破壞의 性質이 크게 달라 金屬破壞力學을 그대로 適用할 수가 없다. Fig. 1은 岩石破壞力學의 여러가지의 공학적 利用分野를 나타낸 것이다.

3. 高溫岩體 熱抽出 研究開發 現況

3-1 外國에서의 最近 動向

1) 美國의 熱抽出 實驗

Fig. 2는 처음에 생각한 熱抽出 Project의 概念을 나타내는 모형도이다. 그러나 실제에는 Fig. 2처럼 균열을 만드는 것은 대단히 어려운 과제이다. 지금까지의 연구개발 現況에 대해서

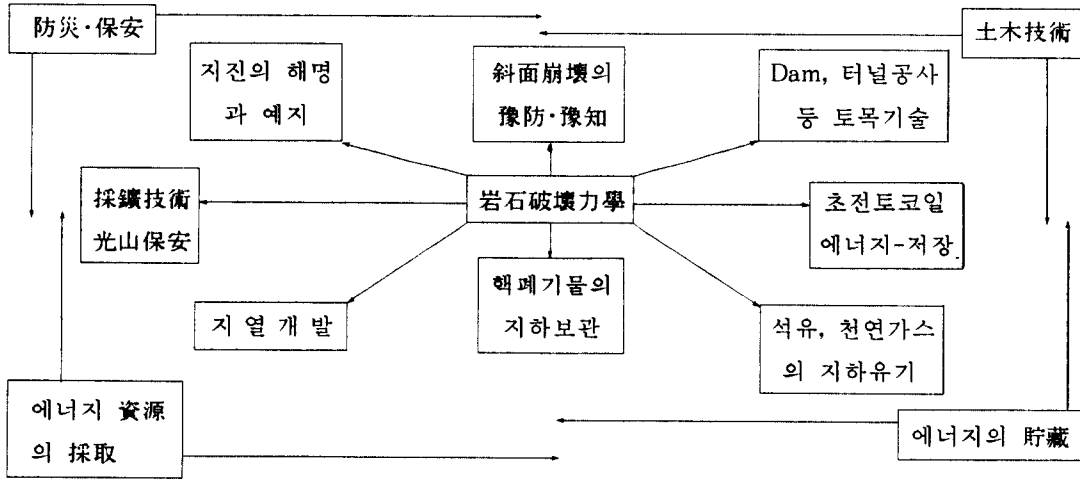


Fig. 1 岩石破壞力學의 應用分野

는 他 文獻⁽³⁾⁽⁴⁾를 參考하면 알 수 있고, 최근 美國의 LANL(Losangels National Laboratories)의 第Ⅱ期 計劃에는 1986년 5월에 大規模 水壓 破碎實驗을 실시한 結果를 Table 2에 나타

내었고 이 Table에서 地下 약 3,500m 깊이의 약 100m 떨어진 2공의 井層의 연결에 최종적으로 성공하였다.⁽⁵⁾

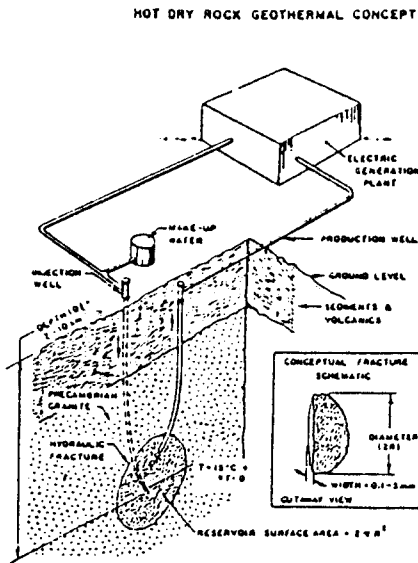


Table 2 LANL研究所 注水試驗結果(Losangels National Laboratories) 1986년 5월 27 일

| 日數 | 注水條件 | 生産條件 | Impedance | 熱出力 |
|----|-----------------------------------|-------------------------|---------------|---------------------|
| 8 | 流量 19 l/s 壓力 32 MPa 溫度 15°C | 10 l/s 2MPa 162°C | | |
| 9 | | 18 30 15 | 8 2 168 | |
| 11 | | 12 26 15 | 8 2 169 | 2.7MPa/l/s 5.1MW |

Fig. 2 高溫岩體 地熱開發의 概念圖

여기에서 약 1.5Kw의 熱出力을 확보할 수 있었다. 또 1988년에서 1989년까지 약 1년간 連續熱抽出 實驗까지도 행하였다. 이는 장기간 熱抽出과 더불어 HDR저류층의 수명 評價등 장래의 공학적 설계를 위한 가장 중요한 연구 결과를 얻었다. 1989년부터 현재까지 SNL(Sandia National Laboratories)에서는 지하 6000m에서 약 3,000°C의 熱抽出을 위

한 굴착작업과 시험을 하고 있는 실정이다. 한편 1991년 9월부터는 New Mexico洲의 HDR 實驗現場에서 Gas Separator에 의한 長期 循環試驗이 實施되고 있고 第 2의 地熱開發候補地로서는 California洲의 Clear Lake 地域에 대한 지질조사가 진행되고 있다. Table 3은 지금까지 高溫岩體 研究開發 計劃의 各國의 現況과 特徵을 나타내고 있다.

Table 3 各國의 高溫岩體地熱開發 Project의 對比

| 大規模 水壓·破碎와 HDR 推熱 實驗 | | | | | 小規模 水壓·破碎 및 注水 實驗 | | | | | | |
|----------------------|--------|-------|-------|------|-------------------|-------------------|---------|-------|---------|-------|-----------------|
| 연구기관(國) | LANL | | UKCSM | | 佛 | | 西獨 | | 日本 | | 佛·獨共同 Soutlz |
| | (I) | (II) | (I) | (II) | (I) | (II) | NBERG | 東北大 | NEDO | (87?) | |
| 年次 | 72-82 | 79- | 77-90 | 中止 | 78-81 | 84-87 | 78-83 | 83-88 | 80-83 | | |
| 온도(°C)(岩體) | 185 | 250 | 80 | 200 | 30 | 20 | 20 | 80 | - | 140 | |
| 균열작성深度(km) | 2.6 | 3.6 | 2.8 | ~6.0 | 0.2 | 0.8 | 0.25 | 0.4 | 0.2 | 2.0 | |
| 균열의 深度 | ~8,000 | 800 | 200 | | ~6,000 | 2×10 ⁵ | 150×150 | 50×50 | 80× | | |
| | m | ×800 | ×70 | | m | m | m | m | 200m | | |
| | (직경 | ×150 | ×70m | - | | | | (예정) | | | |
| 균열의 形態 | 複合 | 複合 | 複合 | | 不明 | - | 單一 | | 單一 | | |
| 坑井間距離 (연속되어진 場合) | - | 100m | 100m | | - | 100m | - | 40m | 200~250 | | |
| | | | | | | | | | m | | |
| 地壓計測 | - | - | ○ | | - | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| MA/AE | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | |
| 코어採取·調査 | - | - | △ | | △ | ○ | ○ | ○ | - | | |
| 地質學的考察 | - | - | △ | | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | | |
| 破壞力學的 採用 | - | - | - | | - | - | - | ○ | - | | |
| 熱抽出·注水試驗 (試驗年次) | 77-80 | 86-87 | 86-87 | | 80-81 | 86-87 | 83 | 86 | - | | |
| 熱出力(MW) | 3~3.3 | 5.1 | | | | | | | | | |
| 調査井本數 (計測井도포함) | - | - | - | 3 | 5 | 7 | 5 | 5 | - | | |
| 岩體 | G | G | G | G | G | G | G | 凝灰岩 | 沙岩등 | G | |

G : 花崗岩, ○ : 좋은 調査·研究, △ : 一部調査·研究.

2) 유럽 共同體에 있어서

HDR開發 Project⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾

英國 CSM(Camborne School of Mines)大學에서 水壓破碎作業을 실시한 후 坑井間에 양호한 통로가 형성되어 1986년에서 1987년까지 장기간 注水 循環 實驗을 행하였으나 커다란 성과 보고는 아직 없으며 1990년부터 실험이 중단되었다. 또 Table 3에 나타나 있는 것처럼 독일에 있어서 HDR計劃 기초연구로 여러가지 소규모 破碎實驗을 실시하여 각각 특징있는 성과를 얻고 있다. 특히 프랑스에서는 독자적인 研究計劃이 진행되고 있고 다음 단계로서 熱抽出 실험을 목표로 英國, 獨逸, 프랑스가 공동으로 研究計劃案이 1992년부터 시행될 것으로 알려져 있다.

3) SWEDEN에서의 研究

1989년에 심도 500m까지의 循環試驗(6週間)을 實施하였으며, 이후에 지금까지 수년간 예산이 없어 1991년 현재에는 Modeling(hydronechanical + AE)과 岩石 및 水의 反應관계에 대한 연구가 행해지고 있다.

4) 日本의 HDR 研究開發

石油危機以後 資源에너지廳 및 선샤인 계획 추진 본부가 중심이 되어 진행되어온 地熱開發計劃은 1980년 新에너지 종합개발기구(NEDO)가 설립되면서부터 추진체제는 더욱 강화되었다. 1984년에 이미 地熱 關聯 豫算이 172억엔(약 860억원)에 달했다. 이 예산은 주로 在來形(熱水形)에 대한 것도 있고 地熱貯留層의 평가와 열수이용개발 Plant등에 사용되어졌다. NEDO은 선샤인(Sun Shine) 계획의 일환으로 미국과 공동으로 1981년부터 1985년까지 5년간 HDR研究를 한바 있으며, 이 HDR계획에 약 30억원을 투자하였다. NEDO는 일본내에서도 HDR Project를 갖고 있으며 山形(야마가타)縣 지역에서 坑井深度 1800m와 坑低溫度

250°C에서 要素技術開發에 주안점을 두고 水壓破碎, 抽熱實驗을 각각 실시 계획하여 1984년에 예비실험을, 1985년에 환경영향 조사와 豫備注水實驗을 행하였고, 1986년에는 全 坑井에 加壓에 의한 水壓破碎 實驗을 하였다.

한편 文部省에서는 1980년부터 地熱開發의 工學的 研究를 위한 과학 연구비중에 에너지 특별 연구비가 조성되어 각 대학에서 대형의 예산에 의한 연구가 활발히 진행되고 있다. 지하 심부 抽熱工學의 최종 목표는 지상 및 지하 熱交換系를 설계하고 그것을 필요로하는 기간까지 열을 보유하여 維持시키는 것이다. 이를 위한 기초연구로서 에너지 특별연구비 일부의 지원으로 1983년부터 深部地殼에너지 개발을 위한 人工균열면 설계에 관한 연구(일명 Γ (Gamna)計劃)이 특별히 추진 연구되고 있다. 그 구체적인 내용에 있어서는 3-2.에서 서술한다.

3-2. 日本의 Γ 計劃의 概要⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

深部 熱에너지를 採取하기 위해서는 地下에 熱交換面에 있는 均열面을 設計하고 이것을 維持시키는 技術을 確立해야만 한다. Γ 計劃은 岩體의 破壞工學을 중심으로하여 地下 均열면의 設計法에 對한 確立을 目標로 한 工學分野의 기초연구를 말한다. Fig. 3은 Γ 計劃에 있어서 地下均열의 構成, 制御에 관한 基本的인 생각을 나타낸 것으로 各種 實驗 및 數値 Simulation 解析을 기본으로 해서 地下 均열 작성 단계에서 그치지 않고 熱抽出때의 均열 制御技術 System의 基本을 完成하는 것을 目的으로 하고 있다. Γ 計劃은 세가지 實驗計劃을 만들어 Phase I에서 III까지 시행하였다.

Phase I은 實驗室 規模의 岩石試驗片(一邊 0.5m에서 1m의 立方體) 및 10m 規模의 巨大 岩試驗片(野外에서 實驗)을 利用해서 水壓으로 試片을 破碎시켜 人工均열이 어떻게 이루어지

능가를 알아보는 실험을 했다.

1984년 福島縣의 野外實驗에서 花崗岩 약 851m³의 試片에 1-2m 規模의 균열을 7개 만들었으며, 이 試驗片을 통과하는 면의 平面을 切斷하고 균열 形狀과 균열 進展拳動을 檢討하

였다. 또 균열 진전과 더불어 彈性波 放出 特性을 檢討하였다. 그 결과 岩石破壞力學 分野에서 지금까지 해결하지 못했던 균열의 크기를 규명하였고 地下에 균열을 만들고 計測하기 위한 基礎 Data를 얻었다.

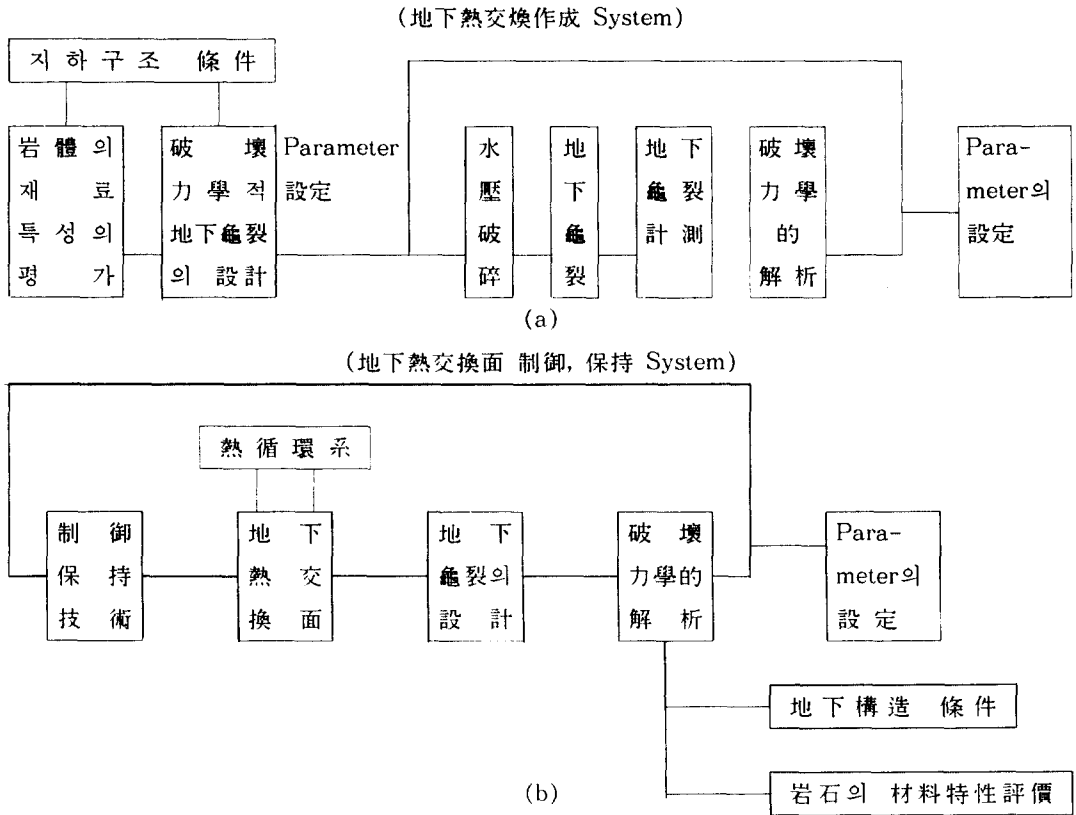


Fig. 3. 새로운 地下深部 熱抽出 System

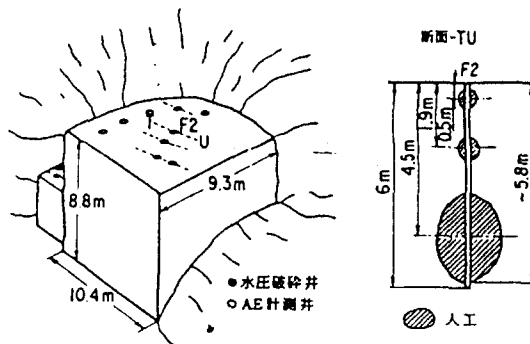


Fig. 4. 거대한 試驗片의 龜裂 모양

巨大 試驗片 및 균열 形成 狀況을 Fig. 4에 나타내었다. Phase II는 溫度가 100°C 미만 深度 400-500m까지를 中心으로 人工 均열을 만들어 이를 유지시키기 위한 技術을 파악할 목적으로 하고 있다. Phase II의 淺部岩體實驗은 野外 岩手縣 松尾村에서 實施되었다. 이 곳의 人工 均열 對象 岩體는 凝灰岩이다. 1984년에 E-1-3 공 AE-1를 實驗을 위한 硯공을 했다. 全 坑井의 全 深度의 Core를 採取하여 Core의 地質學的 狀態를 관찰하여 實驗前의 地層의 天然 均열의 조사와 Core의 破壞特性을 실시하였다. 또 各 坑井에 있어서 電氣, 溫度 및 音波 등의 檢層도 하였다. 이들 資料는 水壓破碎를 하기 위한 加壓 장소의 선정에 使用된다.

地殼은 一般적으로 3軸壓縮應力下에 있다. 人工均열의 進行方向은 本質적으로 最小 壓縮應力(主應力)에 수직이다. 따라서 地殼應力の 正確한 把握은 人工 均열설계의 基本課題이다. 從來의 地殼應力 測定法은 Fig. 5(a)에 나타낸 것처럼 應力의 主軸이 鉛直軸에 一致하는 경우이다. 그러나 특히 地熱地帶는 熱應力이 크므로 主軸方向이 완전히 명확하지 않는 경우 (Fig. 5(b))의 測定方法이 開發되어져야 한다.

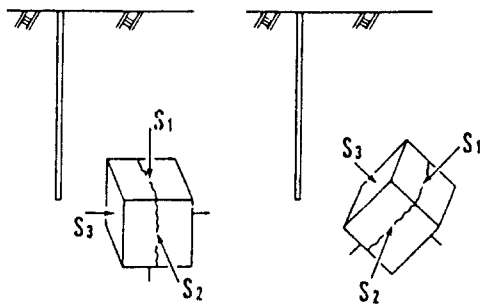


Fig. 5 地殼應力狀態(S₁, S₂, S₃)

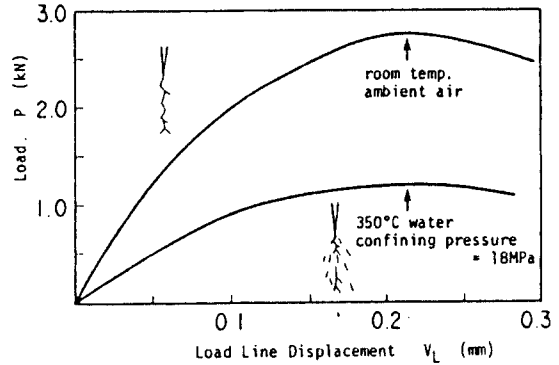


Fig. 6 花崗岩의 破壞인성시험 결과의 例 (室溫과 高溫高壓水中의 比較)

이에 E-3정에 이 測定하는 方法을 研究하기 위하여 약 13회에 걸쳐 小規模 水壓 破碎를 실시하여 290-400m 深度의 主應力 分布를 決定했다.

Phase III은 深部の 溫度, 壓力 및 물이 存在하는 곳에서의 均열進行 狀態를 파악하고 岩石의 物性を 規明하는 것이다. 여기서 高溫高壓下에서 破壞特性實驗, 물을 첨가한 環境下의 부식피로 및 應力腐蝕 龜裂전과 試驗 등에 있어서 DATA를 얻어 Fig. 6에 나타내었다. 이는 地下 環境下에서 破壞 저항만이 아니라 破壞 Mechanism도 다르다는 것이 判明되었으며 岩盤에 作用한 人工均열을 正確하게 측정하는 방법도 開發하였다. 計劃은 大規模의 地下深部 熱에너지 開發에 있어서 피할 수 없는 岩石의 物理的 性質에 대한 學術的 側面에 초점을 모으고 있다.

이상 3가지 研究를 바탕으로 1986년 日本 東北大學 地熱開發工學 研究 Group이 岩手縣 岩手縣 松尾村에서 地下 370m에서 人工井層을 굴착하여 均열층을 형성시켜 溫水를 回收하고 實驗에 成功하였다. 이를 實用化하기 위해 日本 후지다工業이 1988년부터 九州地域 두 곳에서 地熱探查를 실시하여 地下 3000m에서

時間當 25만Kw 전기를 생산할 수 있는 高温岩體를 발견하여 貯留層 存在로서의 본격적인 開發이 가능하게 되었다.

4. 高温岩體(HDR)貯留層의 壽命評價의 岩石의 熱水相互作用

4-1. Trasca試驗

美國 LANL 研究所 및 英國의 CSM大學의 HDR貯留層이 여러가지 어려움이 있었는데 이중 入水井과 生産井내의 Impedance의 저하로 注水循環實驗計劃이 난관에 봉착하여 HDR地熱開發의 새로운 局面을 맞이하게 되었다. 결국 注水와 熱抽出의 장시간 實驗 혹은 정기적인 Trasca試驗을 실시하는 것에 의해 地下 熱交換面(地下균열群)이 熱抽出과 더불어 어떠한 형태로 變化하는가를 조사하고 장래의 貯留層 壽命評價法을 확립하는 것이 HDR地熱開發에 있어서 중대한 課題이다. MA/AE法에서 확인된 地下균열群의 어느 分野까지 注水시킨 물이 순환해서 有效한 電熱面積을 어느 정도까지 확보되어지는가를 판단하는 것이 필요하다.

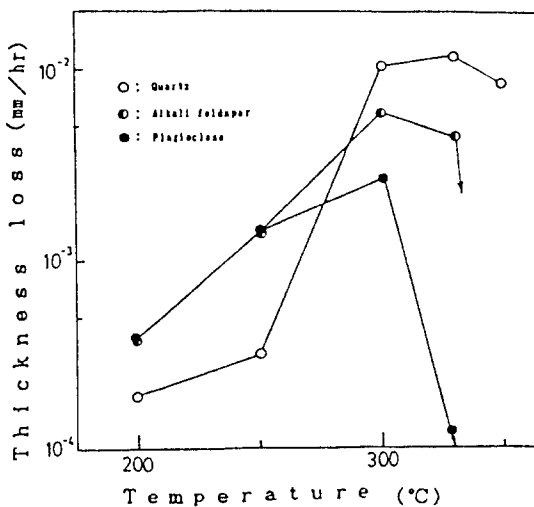


Fig. 7 花崗岩의 熱水로부터 溶解舉動

Trasca試驗에서 조사한 것을 PhaseⅢ의 大規模 熱抽出 實驗중에 실시하고 그 結果를 利用해서 地下균열群을 流體力學的으로 어떻게 Model化시키고 評價하는 것이 앞으로의 課題이다. 또 東北大學 I計劃에서 實施된 花崗岩의 高温高压水中에서 溶解舉動(Fig. 7)⁽¹¹⁾으로부터 볼 수 있는 것처럼 將來의 HDR貯留層 壽命評價에 있어서 對象岩體의 熱水の 相互作用을 알아 溶解와 沈積舉動을 미리 충분히 파악하여야 한다. 한편 均열支持材 혹은 충전材가 高温高压水中에 어느 程度 安定한가도 미리 조사할 필요가 있다.

4-2. 岩石과 熱水相互作用에 관한 研究開發

地下의 어떤 高温岩體를 대상으로 하던 HDR貯留層을 設計할 때 對象岩石과 高温高压과의 相互作用 問題, 즉 溶解와 沈積舉動은 HDR貯留層 設計를 위한 기초적 情報로서 重要할 뿐 아니라 從來型 地熱貯留層 壽命評價를 위해서도 필요하다.

5. 結 論

地下로부터 에너지資源 抽出을 위한 Project는 세계적으로 日本, 獨逸, 美國, 英國, 프랑스 및 스웨덴에서 연구가 지금 착수한 狀態로 금후 10-15년 長期的인 研究開發이 필요하다고 생각된다. 또한 新技術을 完成하기 위하여서는 많은 時間과 資金이 필요한 관계로 大學과 研究所 및 여러 專門分野에서 國際的인 技術協力和 共同研究가 가장 合理的이다.

國內에서도 岩石破壞分野의 많은 專門家가 있고 地質學的으로 地熱의 存在가 확인되고 있는 시점에서 次世代 무공해 에너지 開發을 위한 積極적인 參與가 要求된다.

參考文獻

- 1) T. M. Gerlach, Energy Resources of Pacific Region (Ed. M. T. Halbouty), AAPG Studies in Geology No. 12, AAPG(1981) p. 553.
- 2) J. L. Colp and H. M. Stoller, *ibid*, p. 541.
- 3) H. Murphy, Hydraulic Fracturing and Geothermal Energy (Ed. S. Nemat-Nasser et al.), Martinus Nijhoff Publishers (1983) p. 32.
- 4) 阿部博之, 日本機械學會誌, Vol189, No 807 (1986) p. 159.
- 5) J. Whetten et al., Preprints of EEC/US Workshop on HRD, Brussels (1986)
- 6) A.S.Batchelor, *ibid* (1986)
- 7) F. H. Cornet, *ibid* (1986)
- 8) O. Kappelmeyer and R. Jung, *ibid* (1986)
- 9) A. Gerard and O. Keppelmeyer, *ibid* (1986)
- 10) 高橋秀明·阿部博之, 地熱技術, Vol 10, No26 (1985) p. 8.
- 11) H. Takahashi et al., Preprints of EFC/US Workshop on HDR, Brussels (1986)