

암반내 축열시스템의 열-수리-역학적 상호작용에 대한 수치해석적 연구

이희석¹⁾ · 김명환²⁾ · 이희근³⁾

Numerical Studies on Thermo-Hydro-Mechanical Couplings for Underground Heat Storage.

Hee-Suk Lee, Myoung-Hwan Kim and Hi-Keun Lee

ABSTRACT This paper investigates coupled thermal, mechanical and hydraulic phenomena in deep rock mass especially for underground heat storage system. Firstly, concepts of underground heat storage were presented and coupling phenomena in this area were illustrated. In order to understand the basic mechanism of thermal, hydraulic and deformation behavior in rock cavern disturbed by thermal gradient about 100°C, various numerical experiments were conducted using several codes. The study involves the behavior of fractured rock mass including rock joint. In spite of the limitation of codes modelling fully coupled effects, these codes could be applied in analysis of underground heat storage. The heat loss in rock mass, which is a major factor in heat storage, is insignificant in all results.

1. 서 론

한정된 에너지 환경 속에서, 여러가지 방법으로 생성된 에너지를 낭비없이 소비, 관리하는 것은 21세기를 앞둔 현재 인류의 관심사 중의 하나이다. 에너지 저장 문제는 이러한 에너지의 경제적 사용 측면에 있어 매우 중요하며, 그 방법과 기술에 대하여 여러가지 연구들이 진행되어 왔다. 이중 지하 암반내 에너지 저장 문제는 장기간에 걸친 저장에 비해 매우 적은 건설비용이 든다는 측면에서 주목되어 왔다. 대규모인 경우, 암반 공동과 지반 내에서의 열수 저장은 중요한 해결책이 될 수 있다.

일반적으로 축열시스템에서는 100°C나 이보다 낮은 온도의 열이 지하암반 내에 저장되므로, 급작스런 온도 변화에 따른 암반내 공동의 역학적, 수리적, 열적인 거동은 상호 결합되어 매우 복잡한 양상을 띠게 된다. 즉 지하 암반은 초기에 역학적, 수리적, 열적으로 평형상태를 이루고 있다. 여기에 인위적인 변화가 가해지면 이러한 평형상태는 깨어지고 또한 각각의 영역은 독립적으로 변화하는 것이 아니라 상호작용을 주고 받으며 새로운 평형상태를 이룬다. 이러한 특성들은 다양한 형태의 실험실 시험과 현장 시험, 그리고 수치 모의 실험

을 통해 평가, 예측될 수 있다. 하지만 현장 시험의 경우, 실제 공사가 진행되기 전까지는 비용의 측면에서 수행되기가 어렵고, 실험실 시험은 복잡한 조건을 모사하는데 한계가 있기 때문에, 열-수리-역학적인 상호작용이 일어나는 이러한 시스템의 평가는 수치 모의실험에 의존하게 된다. 이러한 상호작용(coupling) 연구는 외국에서 주로 방사성 폐기물 처분과 관련해서 많은 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 DECOVALEX 국제 협력 프로젝트에 의해(Jing, Stephansson 등, 1995) 이들 상호작용의 연구를 통해 복잡한 상태에서의 암반 거동의 보다 나은 이해를 제공하는 새로운 방법들과 결과들이 개발되었다. 한편, 국내에서는 안형준(1997)의 논문이 발표되었지만, 아직까지 이 분야에 대하여, 본격적인 연구가 활성화되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 축열시스템에 대한 기본적인 과정에 대하여 고찰하고 열-수리-역학적 상호작용을 예상되는 다양한 조건과 모델에 대한 수치적인 실험을 통해 상호작용의 메커니즘과 암반에 미치는 영향을 분석하였다. 해

1) 정회원, 서울대학교 자원공학과 박사수료
2) 정회원, SK건설 주식회사
3) 정회원, 서울대학교 자원공학과 교수

석에 사용된 프로그램은 FLAC, PLASCON과 Geocrack 이다.

2. 축열시스템의 개요

축열(TES, thermal energy storage)은 방전·충전 하는 동안 저장과정(저장용기, 축적기)에서 일어나는 물리적, 화학적인 과정을 말하는 것으로서, 축열시스템은 예비전력을 이용하여 에너지를 전기가 아닌 다른 형태로 저장시켜서, 필요시에 공급할 수 있는 시스템을 말한다. 에너지 공급과 수요 사이의 시간과 공간 사이의 간격 차를 극복하는 것이 에너지 저장(축열)의 기본적인 필요성이다. 수요의 변화에 의한 에너지 수요와 공급에 차이가 발생한다면 축열시스템에 의해 해결해야 하고, 적어도 경감시켜야 할 것은 최대부하이다. 축열시스템은 다른 최대부하 전력보다 낮은 비투자비를 가진다. 반면에 약간의 에너지 손실에도 불구하고 낮은 연료비를 가진다. 그 이유는 낮은 연료비용을 가진 최저부하플랜트에서 초과된 에너지를 저장할 수 있기 때문이다. 여기서, 저장(Store)은 저장용기(일반적으로 열적으로 단열됨), 저장매체(storage medium), 방전·충전 고안장치와 보조기관으로 구성되어 있다.

따라서, 저장시스템(Storage system)은 저장에 방전을 위한 에너지를 에너지원으로부터 빼내거나 에너지가 저장에서 충전되거나 혹은 많은 경우에 있어서 필요한 에너지형태로 변환되는 방법이다. 수압저장시스템과 유사하게 구분되는 유동저장시스템(flow storage system)과 펌핑저장시스템(pumped storage system)으로 나눌 수 있다. 지하저장용기는 지상저장용기와 비교해서 실제적으로 기술적인, 경제적인 크기 제한이 없으며, 비용이 지상용기보다 적게 들고 크기가 증가할수록 비용에 상당한 감소가 있으며 안전면에서 우수하고, 저장용기 윗부분을 플랜트 목적으로 이용할 수 있다는 이점이 있다. 그러나, 지하저장용기는 특별한 지질학적 조건이 낮은 비용의 지하저장용기에 부합되어야 하고, 조사가 보다 더 복잡하며, 고열지하저장용기와 과다운도를 가지는 용기는 아직까지 건설된 적이 없다는 단점을 가지고 있다. 암반공학에서는 주로 열수 치환 저장, 열수 변압 저장 등의 암반 공동내 저장이 고려된다. Fig. 1은 캐나다에서 연구되었던 열수 치환 저장용 공동의 대표적인 구조를 보여주고 있다. 방사성 폐기물 처분과 같은 대표적인 상호작용 문제와 달리, 축열시스

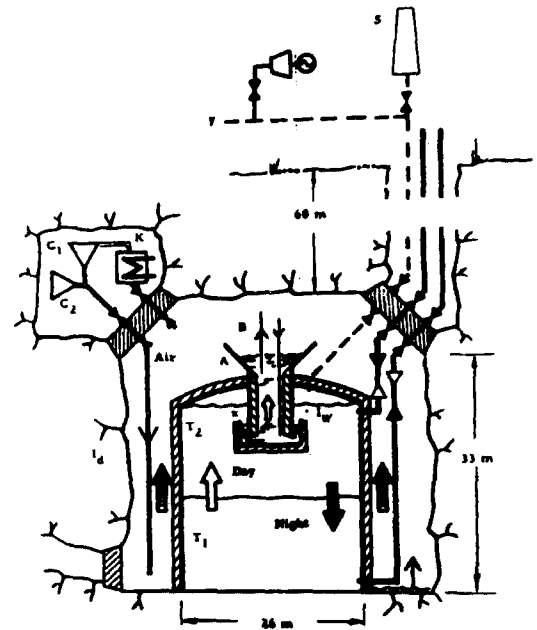


Fig. 1. Hot water displacement accumulator in rock caverns(by Margen).

A: narrow sealing passage, B: pressure balance tank, C₁: air circulator, C₂: air compressor, I_d: dry insulation, I_w: wet insulation, K: air cooler, S: stack, x: sealing flow to prevent intrusion of gas, y: steam pressurizing supply

템에서는 열손실 문제가 이러한 상호작용 해석의 핵심적인 사항이다.

3. 열-수리-역학적 상호작용

앞에서 언급했듯이 지하 심부의 암반은 초기에 역학적, 수리적, 열적으로 평형상태를 이루고 있다. 여기에 암반 굴착과 더불어, 열수저장 또는 가압 등의 인위적인 변화가 가해지면 이러한 평형상태가 파괴된다. 열-수리-역학적 거동은 각각의 영역이 독립적으로 변화하는 것이 아니라 복잡한 상호작용을 주고받으며, 새로운 평형상태를 이룬다. 축열시스템에서 100°C 내외의 열수가 지하 암반내에 저장될 경우, 열수에 의한 영향으로 처분 공동의 온도가 상승하게 되며, 이는 역학적 특성 변화와 열팽창의 효과를 가져온다. 또한 수리적으로 물의 점성도를 낮추고 유동 경로인 공극이나 균열의 변화를 가져와 수리 유동에 영향을 미친다. 처분 공동의 온도가 상승하게 되며, 이는 역학적 특성 변화와 열팽

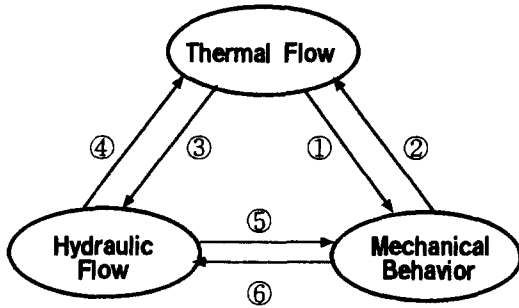


Fig. 2. Thermo-Hydro-Mechanical couplings diagram. ①-a variations of solid properties with temperature, ①-b induced thermal stress, ②-a variation of thermal properties with mechanical deformation, ②-b heat produced by mechanical dissipation (can be ignored) ③ variations of fluid properties with temperature, ④ heat convection by the fluid, ⑤ mechanical effect of fluid pressure variation (includes effective stress law), ⑥ variations of porosity and permeability

창의 효과를 가져온다. 또한 수리적으로 물의 점성도를 낮추고 유동 경로인 공극이나 균열의 변화를 가져와 수리 유동에 영향을 미치며, 이러한 수리유동의 변화는 또다시, 역학적 변형에 상호작용을 일으킨다.

각 계의 상호작용의 내용을 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 평형조건을 이루고 있는 상태에서 만약 어떤 시스템에 변화가 발생하면 그 변화는 아래 그림과 같이 상호작용을 주고받으면서 동시에 변화하게 된다. 그림에서 보듯이, 열에 의한 역학적 거동의 변화는 온도에 따른 암석 물성의 변화와 열에 의해 야기된 열응력으로 나뉜다. 역학적 거동 변화에 따른 열유동의 변화는 암석의 변형에 따른 열특성의 변이와 역학적 소산에 의한 열의 생성을 들 수 있는데, 일반적으로 두 항 모두 다른 상호작용에 비해 매우 미미하므로, 해석에서 무시될 수 있다. 수리유동과 열유동의 상호작용은 온도 변화에 따른 수리 특성의 변이와 유체에 의한 열대류로서 상호작용을 주고 받는다. 수리유동에 따른 역학적 변형의 영향은 식(1)과 같이 일반적으로 다공질 매체 및 암반에 적용되는 유효응력 법칙을 따르는 것으로 간주된다.

$$\sigma_{ij}^i = \sigma_{ij}^e - \alpha p \delta_{ij} \quad (1)$$

여기서, e_{ij}^i 는 물로 포화된 매질의 총응력, e_{ij}^e 는 고체입자에 작용하는 유효응력이며, p 는 유체압력, α 는 Biot이 제안한 물리상수이다.

반면에, 역학적 변형에 의한 수리유동의 영향은 공극

률과 투수율의 관계로 인한 유동 조건의 변화를 대표적으로 들 수 있다. 이러한 영향을 수식화하려는 다양한 시도가 있었으며, 일반적으로 다공질 매체에서의 투수율과 공극률 사이에는 다음 관계가 성립한다.

$$k \propto k_0 \left(\frac{n}{n_0} \right)^3 \quad (2)$$

위식에서, k_0 는 초기의 투수계수를 타나내며, n_0 는 초기 공극률을 의미한다. 암석의 경우 투수율의 변화는 공극률의 변화로 표현하기 보다는 변형률과의 관계를 경험식으로 나타낸다(Wei, 1992).

$$k = k_0 \exp(\beta \times \epsilon) \quad (3)$$

여기서, β 는 실험상수이다.

이외에도, 암석의 화학적 반응의 영향 등의 상호작용이 고려될 수 있지만, 단순화를 위해 보통 해석에서 제외된다. 이러한 상호작용의 각 지배방정식은 일반적인 탄성이론과 연속방정식, Darcy 법칙, 열팽창 이론 그리고 열유동 방정식 등을 결합하여 구성될 수 있다.

4. 상호작용 해석을 위한 프로그램 조정

FLAC은 미국 ITASCA에서 개발한 연속체 유한차분 프로그램으로서, 열-수리-역학적 모델의 지배방정식이 완전히 결합되어 동일 시간단계에 계산되는 것이 아니라, 각각의 지배방정식이 따로 구성되고, 그 시간단계가 각각의 모델에 대해 따로 정의되므로, 상호작용 해석을 위해서는 몇가지 고려 사항이 존재한다.

또한 FLAC의 역학적 모델은 다른 모델과 동시에 계산이 되지만, 열모델과 수리모델의 계산이 동시 시간단계에서 진행될 수 없고, 한 계산이 수행될 때 다른 모델은 잠시 계산을 중지해야 하는 단점이 있다. 따라서 엄밀한 의미에서 완전 상호작용 구현이라고 보기 어렵다.

따라서 본 해석에서는 역학적 단계는 수리, 열 모델이 계산되는 과정 중에 동시에 100 단계씩 동시에 진행하도록 입력하였으며, 수리, 열 모델의 경우 변수의 단위를 초 단위로하여 한 시간단계를 3600초(1시간)의 물리적 시간으로 지정하였다. 즉 해석 결과에서 1 Step은 1시간의 결과 수리적 실제 시간을 의미한다. 그리고 열 모델과 수리 모델의 계산을 FISH 함수를 이용하여 1단계씩 번갈아 가면서 진행시키도록 입력하였다. 이러한 방식으로 근사적인 열-수리-역학적 상호작용을 모델링

하였다.

PLASCON은 영국 Wales 대학의 Lewis 교수가 개발한 2차원 연속체 유한요소 비등온 압밀 모델 프로그램이다. 본 해석에서는 위 PLASCON을 이용하여 온도변화에 따른 물성변화와 다양한 옵션을 추가한 형태로 프로그램을 변형하였다.

Geocrack은 원래 미국 Kansas 대학에서 개발한 HDR 지열에너지 개발용 시뮬레이션 모델로서, 본 해석에서는 Win95 용으로 Complie된 version을 사용하였다. 절리 암반에서의 이산유체유동 모델의 도구로 유한요소법을 사용하였다. 유한요소모델은 연속체 요소(T6, 암반을 나타내는), 접촉면(interface) 요소(비선형 절리 강성을 나타내는), 유체요소로 구성된다. 절리 개구 법칙을 표현하는데에는 Gangi(1978) 모델이 사용되었다. 이 모델에서는, 절리 개구와 절리 응력 사이의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$a = a_0 \left[1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^m \right] \quad (4)$$

여기서, a는 절리 개구이고, a_0 는 초기 절리 개구 응력, σ 는 절리 응력, σ_c 는 절리가 닫혀져 있다고 가정되었을 때의 응력이며, m은 상수이다. 이 모델에서는 절리가 닫힘에 따라, 이들은 보다 강성이 커지게 되고, 열림에 따라 좀더 연성을 띠게 된다.

5. 수치해석 결과 및 검토

5.1 실린더형 열원이 있는 무한매체의 압밀

일정한 방출열 q (W/m^3)을 내는 체적열원 V 가 있는 무한하고 균질한 포화 다공질매체에서의 압밀에 대한 이론해가 Booker와 Savvidou에 의해 제시되었다. 이 문제는 연속체 지반에서 원통형의 열원이 있는 경우 이론해를 통해 그 경향을 예측할 수 있다는 측면에서, 축열시스템이나 방사성 폐기물 처분장에서와 같은 해석에 잘 적용할 수 있는 모델이다. 또한 이 모델은 Lewis (1988), Nguyen(1995)에 의해 비슷한 조건에서 검증된 바 있다.

여기에 실린더형 열원이 있다고 가정하자. 이 때 실린더 열원의 반지름은 0.3 m, 실린더열원의 높이는 2 m, $q=1000$ (W/m^3) $E=6000$ MPa, $\nu=0.4$, 투수계수 $K=0.4 \times 10^{-5}$ m/sec, 암석의 열용량 $\rho C=40$ $J/m^3/^{\circ}C$, $n=$

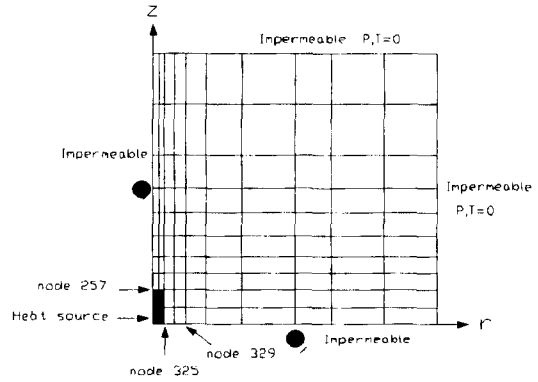
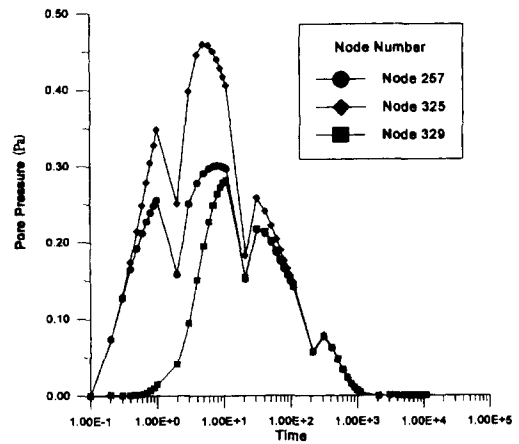
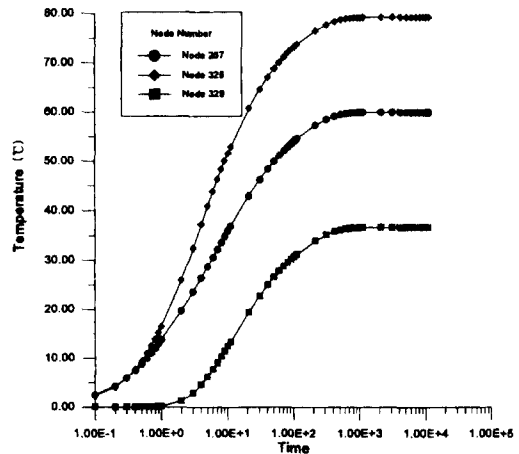


Fig. 3. Finite Element Mesh for 2D Thermo-consolidation model



(a) Time versus pore pressure



(b) Temperature of several nodes with time

Fig. 4. Representative results of consolidation model with heat source.

0.5, 고체 입자의 열팽창 계수 $\beta = \beta_s = 0.9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 물의 열팽창 계수 $\beta_r = 0.63 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 이다.

이 문제에 대해 경계조건을 준 유한요소망이 Fig. 3에 나와 있다. 초기의 응력은 모두 0이라고 가정하자. 그리고 축대칭조건으로 해석한 결과 Fig. 3에 나타낸 세 절점에서의 간극수압과 온도는 Fig. 4에서 보는 바와 같다. 먼저 시간에 따른 간극수압곡선을 살펴보자. 3개의 점에서 갑자기 값이 떨어지는 것을 제외하고는 일정한 경향을 보이고 있다. 대체적으로 시간에 따라 공극유체의 열팽창에 기인하여 간극수압이 증가하다가 서서히 매체에 압밀현상이 일어나면서 점차적으로 감소함에 따라 일정한 값에 수렴함을 볼 수 있다.

온도곡선을 보면 열이 전도되어 각 절점에서 온도가 서서히 증가하다가 거의 같은 시간에 제각기 일정한 값에 수렴하고 있다. 절점 325에서는 약 78°C에, 절점 257에서는 60°C, 절점 329에서는 35°C에서 수렴하고 있다. 두 곡선에서 공통적으로 실린더 벽면인 절점 325에서 가장 높은 간극수압과 온도를 보여 주고 있다.

이러한 경향은 기본적으로 Booker와 Savvidou의 이론해와 일치하고 있다. 이는 결국 무한 매체에서 일정한 크기의 열원이 실린더 형으로 존재하는 경우 온도 값은 어느 정도에서 수렴하며, 이에 따른 간극수압이 증가하다가 압밀이 진행되면서 다시 0으로 감소하는 현상을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 FLAC의 결과에서도 확인할 수 있었다. Fig. 5는 FLAC에 의한 같은 모델의 해석 결과를 보여주고 있다. 여기서 좌표 (2,1), (4,1), (1,4)는 각각 Fig. 3의 절점 325, 329, 257에 해당한다. 경향은 동일하지만, 무차원화 시키지 않아서 그림의 형태는 약간 다르게 보인다.

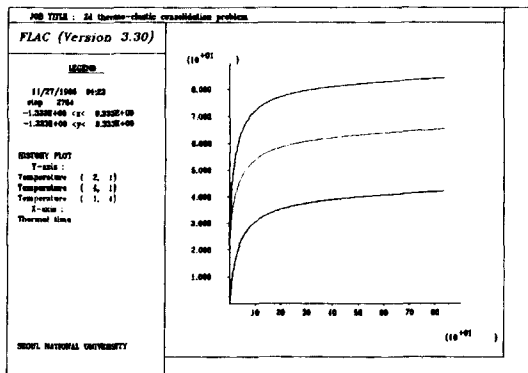


Fig. 5. Temperature change for the same model by FLAC.

5.2 암반 공동 모델

해석에 사용된 물성은 방사성 폐기물 지하처분과 관련된 국제협력 Decovalex Project에서 공통으로 사용되었던 암반과 수리, 열적 물성을 이용하여 해석하였다. 이에 대한 값들을 정리하여 Table 1에 나타내었다.

해석 암반의 위치는 지표로부터 100 m에 위치하며, 공동의 반경은 10 m로 대규모 공동이다. 매우 깊은 심도가 아니기 때문에 지열구배는 무시하였으며, 초기 온도를 15°C로 가정하였다. 초기 간극수압은 지표에서부터 포화되었다고 가정하고 정수압으로 입력하였다. 또한 초기응력 역시 K=1의 정수압 상태로 가정하였으며, 해석의 편의성을 위해 심도에 따라 입력하지 않고 해석 대상 심도인 100 m에서의 초기응력 값인 2.67 MPa로 입력하였다.

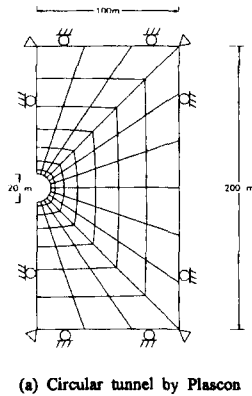
해석 대상의 공동은 원형공동, 수갱, 그리고 마제형 터널을 대상으로 하여 해석하였다. 이 중 마제형 터널 모델은 실제 축열시스템에서 가행될 수 있는 규모의 공동을 대상으로 한 열-수리-역학적 상호작용을 모델링하였다. 모델 대상은 캐나다에서 연구되었던 암반내 열수 전환저장 터널을 그 대상으로 하였다.

Fig. 6은 이 모델들 중 대표적인 원형공동 모델과 마제형 터널 모델에 대한 요소 격자망을 보여주고 있다. 각 모델에 따른 자세한 해석 결과는 보고서(이희근 외, 1996)를 참조하기 바란다.

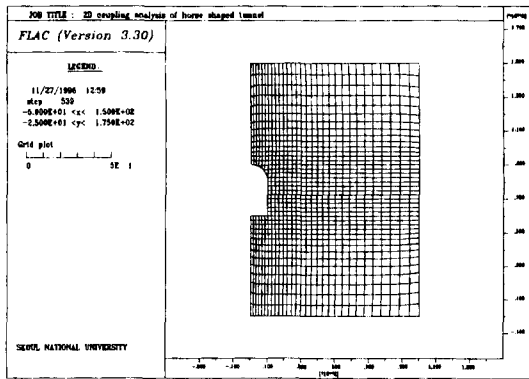
Fig. 7과 Fig. 8은 몇가지 모델에서의 공동벽면에 100°C의 구속온도를 가하였을때 시간이 지난 후의 온

Table 1. Representative properties of Coupling Analysis

Properties	Input
Rock matrix	
Elastic modulus (E)	60, 12 GPa
Poisson's ratio (ν)	0.23
Rock density (ρ_s)	2670 kg/m ³
Rock specific heat (C_p)	900 J/kg/K
Thermal conductivity (λ)	3 W/m/K
Linear thermal expansion coefficient (α_T)	$9 \times 10^{-6} / \text{K}$
Fluid	
Permeability (K)	10^{-10} m/sec
Porosity (ν)	0.02
Water density (ρ_w)	1000 kg/m ³
Water specific heat (C_w)	4200 J/kg/K
Water volumetric compressibility (K_w)	2×10^{-8}
Water expansion coefficient (β_w)	$6 \times 10^{-4} / \text{K}$



(a) Circular tunnel by Plascon



(b) Horse-shaped tunnel model by FLAC

Fig. 6. Representative grid of some coupling models

도분포를 나타내고 있다. 공동벽면에서 연속적으로 열 유동이 확산되고 있음을 알 수 있다. 그러나 암석의 열 용량이 크고 열전도도가 낮기 때문에 넓은 지역으로 열 유동이 확산되지 않고 있다. 또한 온도경사도 비교적 일정한 형태를 보이고 있다. 더욱 시간이 경과했을 때에도 두 배이상 열유동이 일어났지만, 아직까지 공동 주변 10 m 범위 이내로 한정되었다. 이러한 경향은 암반 공동내 축열시스템에서의 열손실이 매우 작음을 의미하는 것이다.

Fig. 9와 Fig. 10은 수갱 터널에 대해 100°C의 구속 온도를 가했을때 3225 시간이 지난 후의 간극수압 분포와 유동벡터를 각각 보여주고 있다.

특이한 점은 앞서 수갱모델에서와 같은 과잉간극수압에 의해 이상적으로 간극수압이 큰 지대가 존재한다는 것이다. 이러한 간극수압의 분포는 공동 내부와 외부로의 유동을 동시에 일으키는 형태를 띠게 된다. 앞서 살펴본 바와 같이, 이러한 과잉간극수압은 열팽창에

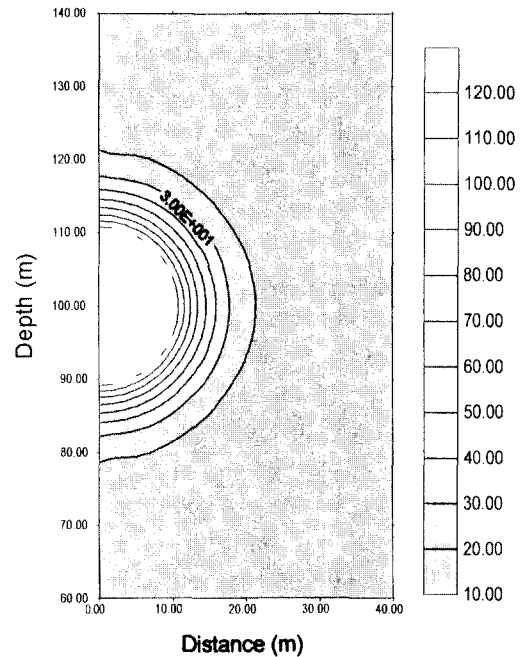


Fig. 7. Temperature distribution at circular opening 810 days after thermal source (by PLASCON).

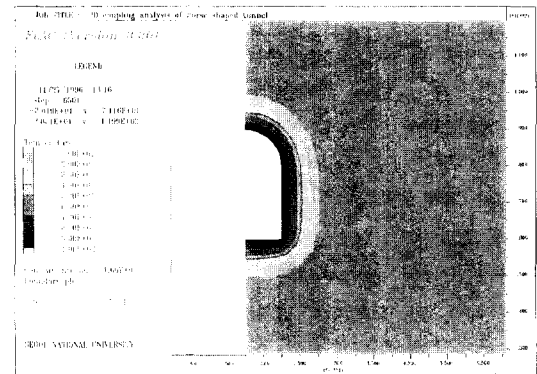


Fig. 8. Temperature distribution around the horse-shaped tunnel with thermal source.

의한 터널 벽면 주위의 인장-압축의 전이지대가 존재하면서, 공극이 과잉 압축되어 수압의 증가로 나타나고, 이러한 수압의 증가 때문에 이중적인 유동 구조가 생성된 것으로 파악할 수 있다. 또한 열유동과 수리유동의 방향이 반대인 영향도 무시할 수 없다. 어쨌든 열-수리-역학적 상호작용을 고려했을 때의 이러한 현상은 매우 흥미있는 것으로서, 앞으로 계속적인 연구가 필요하다.

Fig. 11은 이때의 변위벡터를 나타내고 있다. 유동구조와 마찬가지로 공동으로부터 수 m 부근에 인장대가

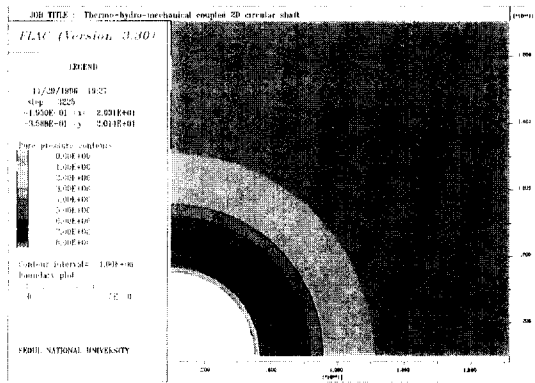


Fig. 9. Pore Pressure around the circular shaft with heat source.

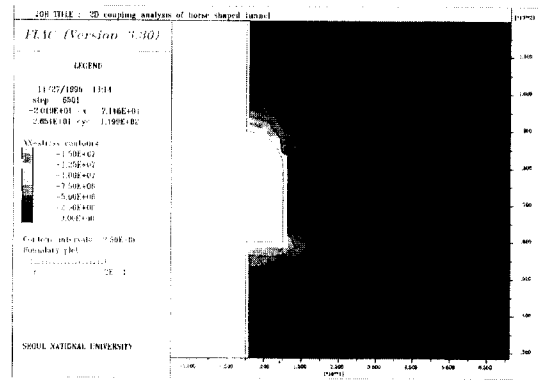


Fig. 10. Flow vector around the circular shaft with heat source.

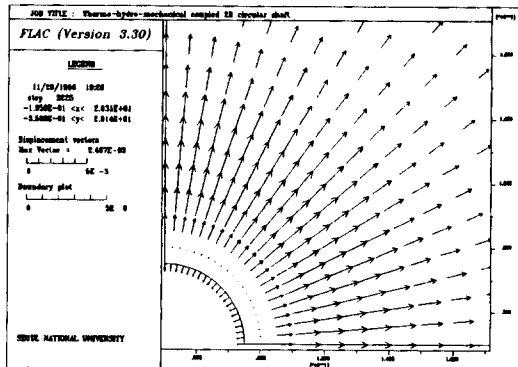
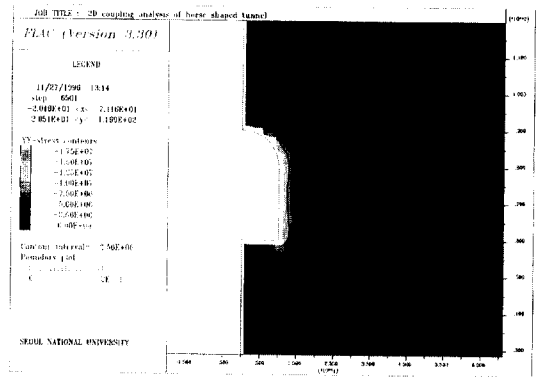


Fig. 11. Displacement vector around the circular shaft with heat source.

형성되었음을 볼 수 있다. 이러한 경향은 공동에서 암반 쪽으로 향하는 열팽창의 영향과 역학적 변형에 의한 공동 안쪽에서의 변위가 동시에 증첩된 결과이다. 변위 벡

(a) X-direction



(b) Y-direction

Fig. 12. Representative stress distribution of rock cavern with heat source.

터는 공동 벽면에서만 벽면쪽으로 향하여 압축력이 작용할 뿐, 전체적으로는 공동 바깥쪽으로 향하고 있다. 이러한 결과는 문헌구, 주광수(1991)의 연구결과와 일치한다. 전체적으로 열팽창의 영향이 공동 바깥쪽으로 진행되며, 공동벽면에서 공동 안쪽으로 진행되는 것은 수리경사의 영향과 더불어 역학적 변형이 증첩 때문에 일어나는 것으로 보인다. 이러한 압축-인장의 전이지역은 공동 벽면에 매우 근접하여 존재한다.

Fig. 12는 마제형 터널 모델에서, 100°C 온도를 구속한 후, 6500여 시간(270일) 후의 응력분포를 보여주고 있다. 공동 상부와 측벽 부근에 접선응력이 압축으로 상당한 응력 집중이 발생하고 있다. 하단부 모서리와 천단부 부분에서의 응력 집중은 상대적으로 더 낮은 값을 보였다. 열팽창에 의한 압축응력이 매우 크게 작용한 것으로 보이는데, 이러한 이유는 자유면 쪽의 x 변위가 구속된 것에 기인한 것으로 보인다. 열원을 가한 직후에는 열팽창에 의한 응력값이 미미하기 때문에 수

리-역학적인 해와 비슷한 경향을 보이겠지만, 시간이 지남에 따라 이러한 열팽창에 의한 응력이 커지게 된다. 또한 특이한 점은 이러한 응력집중대가 공동 상단과 측벽을 따라서 매우 작은 지대에서만 일어난다는 사실이다. 또한 반경방향의 응력은 열변형에 의한 현지 응력과 거의 같은 수준으로 되기 때문에 별 문제가 되지 않는다.

5.3 절리를 고려한 해석

불연속면이 존재할 경우, 열유동과 전체적인 상호작용을 검토하기 위해, 다양한 형태의 절리 모델을 구성하였다. Fig. 13은 해석에 사용된 절리 모델 중의 단일 불연속면을 포함한 원형공동을 나타낸다. 4분의 1 단면만을 대칭으로 구현하였으며, 모델의 크기는 60×60 m이며, 공동의 크기는 직경 5 m이다. 절리는 공동 벽 45°를 따라서 무한관과 연결되어 있다. 유체요소와 불연속 요소가 중첩되어 사용되었다. 연속체 요소의 물성은 앞에서와 동일하며, 암반의 초기응력은 해석의 편의를 위해 0으로 설정하였으며, 암반의 초기온도는 15°C로 일정하게 설정하였다. 절리의 강성은 암반의 탄성계수와 같은 방식으로 거동하도록 설정하였다. 유체의 점성도는 3×10^{-9} N-day/m²이고, 초기 절리개구너비는 0.0002 m이다. 절리 외부 경계에서의 압력은 1 MPa이고, 터널 벽면의 절리에는 0.1 MPa의 고정 수압을 설정하였다.

Fig. 14는 열원을 가한지 1000일 후(약 2.7년)의 온

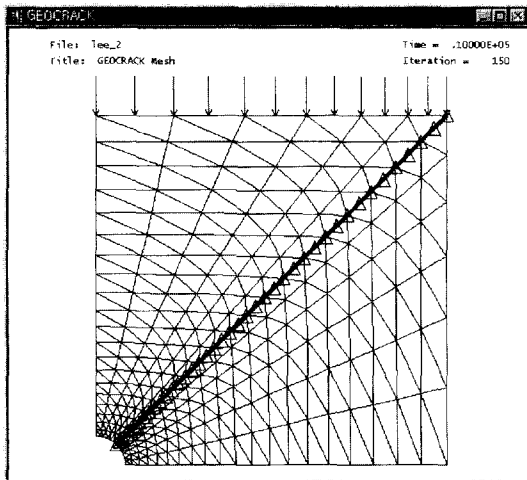


Fig. 13. Example models for discontinuous rock cavern.

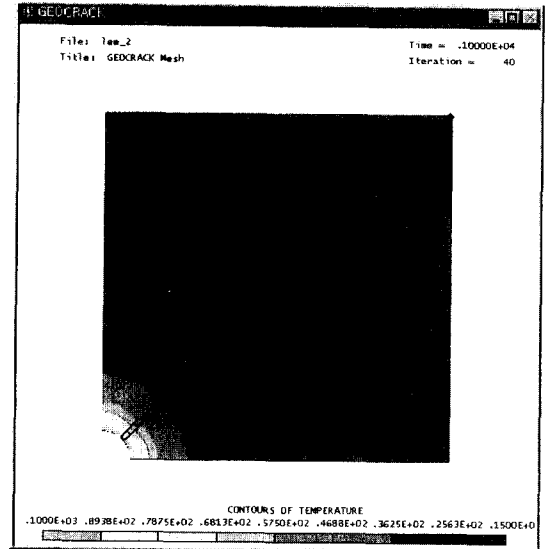


Fig. 14. Representative temperature distribution for jointed cavern.

도분포 양상을 보여주고 있다. 온도분포가 절리를 기준으로 대칭인 형태로 발달하고 있다. 이러한 모습은 절리내의 유동과 지하수의 낮은 열전도도와 높은 비열 때문에 절리를 따라서의 열전달이 더 느리게 일어나기 때문이다. 이러한 양상은 시간 진행에 따라 계속 동일한 방식으로 확대되었다. 낮은 유동을 때문에 수리 유동에

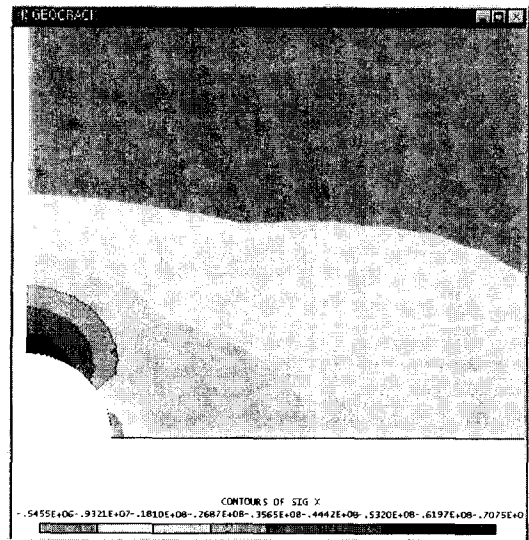


Fig. 15. A stress distribution of x-direction for jointed cavern.

의한 열유동의 증감 현상은 두드러지지 않았다. 유동률은 열원이 위치한 후에 급격하게 감소하고 있다. 이러한 현상은 열팽창에 따라 절리가 압착되기 때문이다. 따라서 절리가 압착되는 상태에서의 수리유동은 열유동에 별 영향을 미치지 않는다.

이후 공동 벽면에 열을 가한 후의 역학적 변형 양상을 해석하였다. Fig. 15는 이때의 응력분포를 나타낸다. 이 모델이 45° 방향의 단일 절리 모델이기 때문에 전체적인 응력분포는 열-역학적인 거동과 별 차이를 보이지 않았다. 이러한 양상은 다중 절리 모델일 경우에는 판이하게 나타날 것이다.

절리가 있는 위치를 따라서 약간의 응력 불연속 양상이 등고선에 나타나 있다. 하지만 본 해석에 사용한 절리가 탄성 모델이기 때문에 응력의 큰 차이는 보이지 않았다. 비선형 절리 모델을 사용할 경우, 이러한 변화 양상은 보다 두드러질 것이다. 응력 형태는 동일했지만 전체적으로 절리내 수리유동을 고려한 경우 응력 집중도가 약간 작아졌다. 즉 최대 접선응력이 91 MPa에서 85 MPa로 약 6 MPa 정도 작아졌는데, 이러한 영향은 절리 변형에 의한 것으로 생각된다.

6. 결 론

본 연구에서는 축열시스템에서 고려되는 다양한 모델에 대한 수치 실험을 통해 열-수리-역학적 상호작용에 대한 기본 개념을 고찰해 보았다.

열원에 의해 교란된 암반은 공동 벽면 부근에서는 공동 안쪽으로, 공동 내부로 들어갈수록 공동 바깥쪽으로 향하는 변위양상을 보였다. 이는 열팽창에 의한 영향이다. 축열시스템에서 결정적으로 중요한 열손실의 문제는 정성적인 면에서 볼때, 탄성 암반에서 큰 문제가 되지 않음을 알 수 있었다. 또한 사용한 코드의 한계와 탄성해석에 국한됨으로 인해, 완전한 상호작용을 구현하지 못했기 때문에, 열응력에 의한 응력집중이 과도하게 나타났다. 절리 암반에서의 열유동은 유체가 있는 절리 간극보다 암반 매질에서 보다 빠른 전도를 보였으며, 따라서 절리내 수리유동은 열손실에 큰 영향을 미치지 않는다. 하지만, 이러한 경향은 응력 조건에 많이 의존하게 된다. FLAC에 의한 해석 결과는 전체적으로 응력집중을 과도하게 평가하는 경향을 보였다.

실제로, 이 연구는 열-수리-역학적 상호작용 해석을

위한 아주 기초적인 연구일 뿐이며, 현재 불연속 암반에서의 열-수리-역학적 상호작용을 구현할 수 있는 코드를 제작하기 위해 연구가 진행중에 있다. 앞으로, 실제 암반 시스템의 보다 정교한 모델의 개발과, 실험을 통한 검증, 또한 축열시스템에서 중요한 암반내 열손실의 정량적인 평가를 위한 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

1. 문현구, 주광수, 1991, 등방 및 이방성 암반내 공동의 열역학적 거동에 관한 전산모델연구, 터널과 지하공간, Vol. 1, pp. 181-203.
2. 안형준, 1997, 암석의 온도의존성을 고려한 열-수리-역학적 상호작용의 수치해석적 연구, 터널과 지하공간 Vol. 7, pp. 13-19.
3. 이희근, 이희석 외, 1996, 암반내 축열시스템의 열-수리-역학적 상호작용에 대한 연구, 서울대학교 에너지자원 신기술연구소 위탁연구 보고서.
4. Biot, M. A., 1941, General theory of three dimensional consolidation, J. Appl. Phys. Vol. 12, pp. 155-165.
5. Gangi, A. F., 1978, Variation of Whole and Fractured Porous Rock Permeability with Confining Pressure, Int. J. Rock Mech. Min. Sch. & Geomech Abstr., Vol. 15, pp 249-257.
6. Gilli, P. V., Beckmann, G., 1984, Thermal Energy Storage, Springer-Verlag.
7. Itasca Consulting Group Inc., 1995, FLAC manual.
8. Jing, L., Tsang, C.f., Stephansson, O., 1995, DECOVALEX-An International Co-Operative Research Project on Mathematical Methods of Coupled THM Processes for Safety Analysis of Radioactive Waste Repositories, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 32, No. 5, pp. 389-398.
9. Lewis, R. W., Schrefler B. A., 1987, The Finite Element Method in the Deformation and Consolidation of Porous Media, John Wiley & Sons.
10. Nguyen, T. S. Selvadurai, A. P. S., 1995, Coupled Thermal-mechanical-hydrological Behavior of Sparsely Fractured Rock: Implications for Nuclear Fuel Waste Disposal, Int. J. Rock Mech. Min. Sch. & Geomech Abstr., Vol. 32, No. 5 pp. 465-479.
11. Swenson, D. V., DuTeau, R., and Sprecker, T., 1994, Modeling Flow in a Jointed Geothermal Reservoir, submitted to World Geothermal Conference 1995.
12. Swenson, D.V., 1996, User's Manual for GEO-CRACK.
13. Wei Lingli, 1992, Numerical Studies of the Hydro-Mechanical Behavior of Jointed Rocks, Ph.D. thesis, Imperial College U.K.