

심부지열개발을 위한 단층대에서의 열-수리적 거동 모델링

*김 종찬¹⁾, **이 영민²⁾, 구 민호³⁾, 김 영석⁴⁾

Thermo-hydraulic modeling in fault zones for deep geothermal development

*Jongchan Kim, **Youngmin Lee, Min-Ho Koo, Youngseuk Keehm

Abstract : 지층 내에 발달한 고투수성 단층은 유체, 에너지, 그리고 용질이 이동하는데 있어서 중요한 역할을 하는 지질구조이다. 따라서 고투수성 단층 주변부에서는 온천, 지열 이상대, 그리고 금속 광상 등이 형성될 가능성이 크다. 이 연구에서는 열-수리적 거동 모델링을 통하여 단층에 의한 온천 또는 지열 이상대의 형성 원인을 확인하였다. 단층의 구조에 따른 지하수 유동과 이에 따른 지층 내 열적 상태를 확인하기 위해서 단층 구조가 다른 3가지의 경우에 대해서 2차원 열-수리적 거동 정류 모델링을 수행하였다. 모델링 결과 단층 구조가 다른 3가지의 모든 경우에서 단층의 투수율이 커지면 단층대에서의 용출 온도가 초기 온도 보다 높아지는 경향을 확인 할 수 있고, 경우에 따라서 모암의 투수율 역시 용출온도에 영향을 미치는 것을 확인 하였다. 따라서 심부지열 개발을 위한 연구지역에 대해 보다 정확한 예측 모델링을 수행하기 위해서는 단층의 구조, 단층과 모암의 투수율, 그리고 수리지질학적 정보 등이 매우 중요하다고 할 수 있다.

Key words : 단층, 투수율, 열-수리적 거동 모델링, 심부지열

1. 서론

지층 내 발달한 고투수성 단층은 유체, 에너지, 그리고 용질 등이 이동하는데 있어서 중요한 역할을 하는 지질구조이다. 따라서 고투수성 단층 주변부에서는 온천, 지열 이상대, 그리고 금속 광상 등이 형성될 가능성이 매우 높다. 따라서 이러한 단층과 파쇄대의 영향에 의한 지층 내 열-수리적 거동 모델링은 상업적으로 중요한 금속광상과^{1,2)} 온천의 형성과정^{3,4)} 등을 규명하는 연구 분야에서 많이 수행되어왔다. 최근의 열-수리적 거동 모델링 연구는 환경과 관련되어 수행되는 추세로써 주로 방사능 폐기물 처리장 인근 지층의 온도분포⁵⁾, 천부지열에너지 이용에 따른 지층 내 온도분포 예측^{6,7,8)}, 그리고 심부지열을 이용한 지열 발전 부지 선정과 관련된 지열 저류층 평가연구^{9,10)} 등에 이용 되고 있다.

이 연구에서는 최근에 신재생에너지원으로 각광받고 있는 지열에너지 분야 중 심부지열개발에 초점을 맞추어 단층의 구조, 그리고 단층과 모암의 투수율이 단층 주변부의 열적 상태에 미치는 영향을 열-수리적 거동 정류 모델링을 통하여 확인하였다.

2. 열-수리적 거동 모델링

열-수리적 거동 모델링은 상용 프로그램인

Consol Multiphysics 를 이용하였다.

열-수리적 거동 모델링을 위한 지배 방정식은 다음과 같이 Darcy 법칙과 열전도-대류 방정식으로 표현할 수 있다(식(1), (2)).

$$S \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot [-K_h \nabla h] = Q_f \quad (1)$$

여기서 S 는 비저유계수, h 는 수두, t 는 시간, K_h 는 수리전도도, Q_f 는 유체의 소스 이다.

$$C_s \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot [-k_s \nabla T + C_f u T] = Q_h \quad (2)$$

-
- 1) 한국지질자원연구원 국토지질연구본부, 공주대학교 지질학과
E-mail : geotherm01@gmail.com
Tel : (042)868-3069 Fax : (042)868-3358
 - 2) 한국지질자원연구원 국토지질연구본부
E-mail : ymlee@kigam.re.kr
Tel : (042)868-3069 Fax : (042)868-3358
 - 3) 공주대학교 지질학과
E-mail : koo@gongju.ac.kr
Tel : (041)850-8515 Fax : (041)850-8953
 - 4) 공주대학교 지질학과
E-mail : keehm@gongju.ac.kr
Tel : (041)850-8517 Fax : (041)850-8953

여기서 C_s 는 매질의 체적 열용량, T 는 온도, t 는 시간, k_s 는 매질의 열전도도, C_f 는 유체의 체적 열용량, u 는 유체의 속도(Darcy velocity), Q_b 는 열원 이다.

이 연구에서는 구조가 다른 세 가지 단층에 대해서 2차원 열-수리적 거동 정류 모델링을 수행하였다. 단층의 구조와 모델링을 위한 격자는 Fig. 1에 도시하였다. 첫 번째 모델 영역은 10 km×5 km 이며, 중심 부분의 고도는 4.7 km로 설정하여, 좌우 대칭으로 최대 300 m의 고도차가 나도록하였다. 또한, 단층은 모델 영역 중심에 폭 20 m의 수직 방향으로 설정하였다. 두 번째 모델은 단층이 두 개인 경우로 모델영역은 첫 번째 모델과 같으며, 첫 번째 모델의 단층에 약 60°의 경사 방향을 갖는 단층이 연결된 형태로 두 개의 단층을 설정하였다. 마지막으로 세 번째 모델은 단층이 역시 두 개인 경우로 모델영역은 역시 첫 번째 모델과 같으며, 첫 번째 모델의 단층으로부터 우측으로 4 km 떨어진 지점에 평행한 수직 단층을 설정하였다. 이 연구에서는 모델 영역 내에서의 지하수 유동은 지형에 따른 고도차에 의한 흐름 즉, 수두 차에 의해서만 일어나도록 경계조건을 설정하였다. Table 1은 모델링에 사용된 유체와 매질의 물성과 열물성을 보여준다. 단층과 모암에서의 투수율은 Table 2와 같은 범위를 설정하여 모델링을 수행하였다. 열-수리적 모델링을 수행하기 위해서는 열과 수리영역에 대해서 경계조건을 각각 설정을 해야 한다. 이 연구에서의 열에 대한 경계조건은 모델영역 하부와 상부의 온도를 각각 150°C 와 15°C로 설정하였고, 측면에서는 열의 흐름이 없다고 가정 하였다. 단층의 상부에 대해서는 convective flux boundary 로 설정하였다. 수리영역에 대해서는 측면과 하부에서는 지하수 유동이 없다고 가정하였으며, 상부는 고도와 같은 수위로 조건을 설정하였다. 단층 모델링을 단순화하기 위해서 아래와 같은 세 가지 가정을 하였다. 첫 번째, 모델영역은 등방성의 균질한 암체이다. 두 번째, 지하수와 암석의 온도는 항상 평형한 상태를 유지한다. 세 번째, 온도 변화에 따른 유체의 밀도와 점도의 변화는 없다.

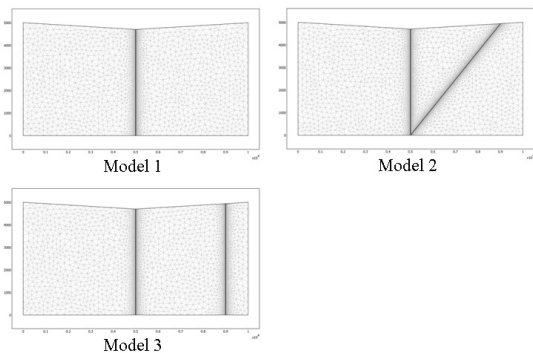


Fig. 1 Fault geometry and mesh in model domains

Table 1 Physical and thermal properties of fluid and solid in country rock and fault zone

Property	Country rock	Fault zone
Porosity	0.02	0.3
Density of Fluid (kg/m ³)	1000	1000
Density of Solid (kg/m ³)	2650	2350
Specific heat of Fluid (J/kgK)	4200	4200
Specific heat of Solid (J/kgK)	800	800
Thermal conductivity of Fluid (W/mK)	0.6	0.6
Thermal conductivity of Solid (W/mK)	3.0	2.5
Compressibility of Fluid (Pa ⁻¹)	4.4e-10	4.4e-10
Compressibility of Solid (Pa ⁻¹)	1e-8	1e-8
Viscosity of Fluid (Pa s)	5.4e-4	5.4e-4

Table 2 Ranges of permeability of country rock and fault zone

Property	Range
Permeability of country rock (m ²)	1e-20~1e-15
Permeability of fault (m ²)	1e-15~1e-12

3. 모델링 결과 및 토의

이 연구에서는 구조가 다른 세 가지의 단층대에서의 용출 온도를 2차원 열-수리적 거동 정류 모델링으로부터 확인 하였다. 첫 번째 구조, 즉 단층이 하나인 경우에 대한 단층과 모암의 투수율 차에 따른 지층 내 온도분포, 수두, 그리고 유체의 속도는 Fig.2 에서 볼 수 있다. Fig.2 에서 보듯이 단층의 투수율이 클수록 용출 온도 역시 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있으며, 단층의 투수율이 10⁻¹⁴ m² 인 경우에 용출온도는 약 18°C 이고, 10⁻¹² m² 인 경우에 용출온도는 약 40°C 로 약 두 배 이상의 온도 차이를 보인다. 수두 차 역시 모암과 단층의 투수율에 영향을 받는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 3 은 단층과 모암의 투수율에 따른 단층대에서의 용출온도 변화를 정량적으로 보여주는 그래프이다. 단층의 투수율이 10⁻¹⁴ m² 보다 작은 경우에는 용출온도에

변화가 크지 않지만, 단층의 투수율이 10^{-14} m^2 이상이 되면 용출 온도가 급격히 상승하는 현상을 볼 수 있다. 단, 모암의 투수율이 10^{-16} m^2 보다 작은 경우에는 단층의 투수율에 따른 용출 온도의 변화는 거의 없는 것을 알 수 있다. 따라서 첫 번째 구조에서 단층대에서의 용출 온도는 모암과 단층의 투수율에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

두 번째 구조, 즉 두 개의 단층이 연결되어 있는 경우에 대한 모암과 단층의 투수율에 따른 지층 내 온도분포, 수두, 그리고 유체 속도는 Fig. 4 와 같다. 이 구조에서도 역시 단층의 투수율이 클수록 용출 온도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 단층의 투수율이 10^{-13} m^2 일 때 용출온도는 약 18°C 이고, 단층의 투수율이 10^{-12} m^2 일 때 용출온도는 약 65°C 정도로 나타났다. 두 번째 단층 구조는 단층이 심부에서 연결되어 있는 경우이기 때문에 모암의 투수율이 용출온도에 미치는 영향은 미미한 것을 Fig. 5로부터 확인 할 수 있다. 또한 이러한 단층 구조가 존재하는 경우 용출 온도가 높게 나타나는 지역의 인근 지역에서 지온구배가 현저히 낮은 현상이 나타날 수도 있음을 보여준다(Fig. 4).

마지막으로 세 번째 단층구조에서의 온도분포, 수두, 그리고 유체속도는 Fig. 6과 같다. 용출온도는 모암과 단층의 투수율이 모두 관련이 있는 것을 확인 할 수 있으며, Fig. 7을 보면 이러한 현상을 명확하게 확인 할 수 있다. 모암의 투수율이 10^{-16} m^2 일 때 까지는 단층의 투수율에 상관없이 용출온도가 일정하지만, 모암의 투수율이 10^{-15} m^2 이고, 단층의 투수율이 10^{-14} m^2 이상이 되면 용출온도가 급격히 상승하는 현상을 볼 수 있다. 따라서 세 번째 단층 구조 역시 첫 번째 구조와 마찬가지로 단층대에서의 용출온도는 모암과 단층의 투수율이 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

위의 총 세 가지의 단층 구조가 다른 모델링 결과로부터 단층대에서의 용출온도는 단층의 구조와 모암과 단층의 투수율에 의해 영향을 받는 것을 확인 할 수 있다.

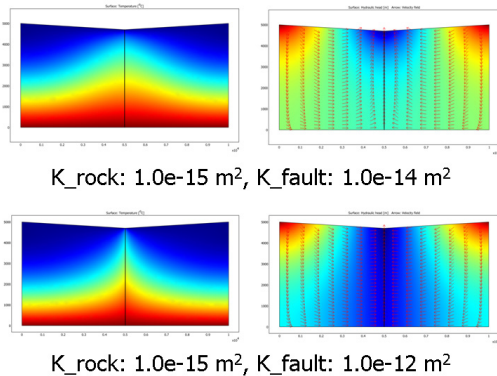


Fig. 2 Temperature distribution(left), hydraulic head and normalized velocity(right) in the case of Model 1

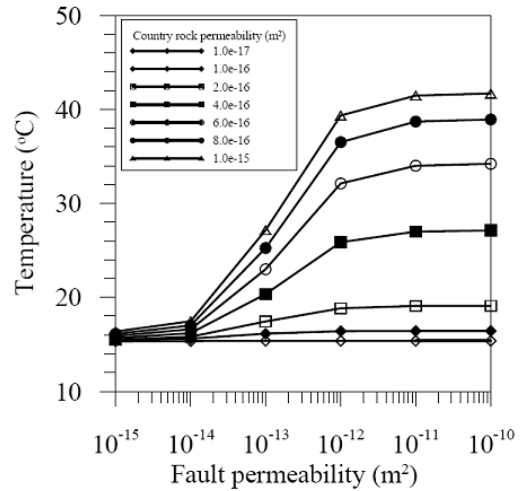


Fig. 3 Discharge Temperature in fault zone, and permeability of fault and country rock for in the case of Model 1

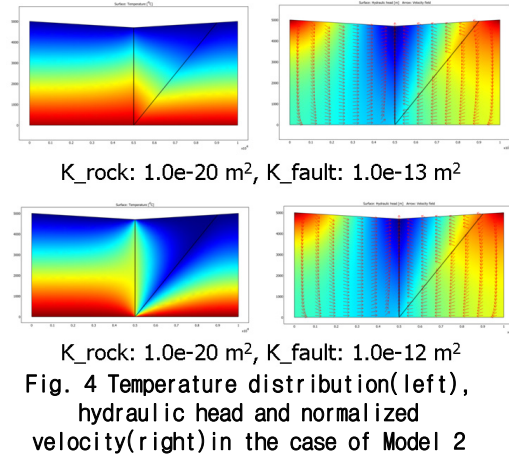


Fig. 4 Temperature distribution(left), hydraulic head and normalized velocity(right) in the case of Model 2

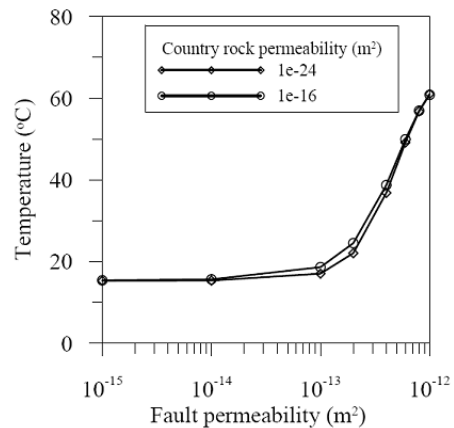


Fig. 5 Discharge Temperature in fault zone, and permeability of fault and country rock for in the case of Model 2

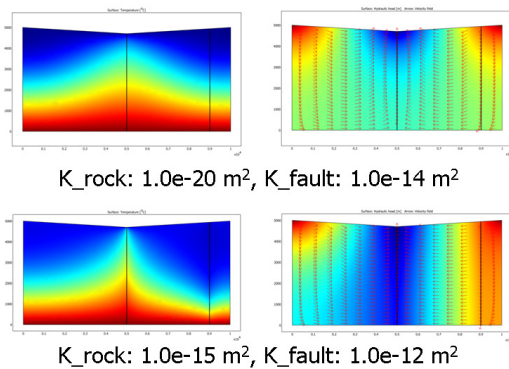


Fig. 6 Temperature distribution(left), hydraulic head and normalized velocity(right)in the case of Model 3

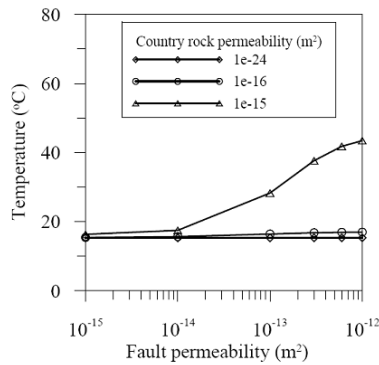


Fig. 7 Discharge Temperature in fault zone, and permeability of fault and country rock in the case of Model 3

4. 결론

심부지열개발을 위한 단층대에서의 열-수리적 거동 모델링으로부터 단층대에서 용출되는 용출 온도를 정량적으로 분석하였다. 연구에 사용된 단층대의 구조는 세 가지로 정의 하였다. 단층이 하나인 경우인 첫 번째 모델에 대한 모델링 결과는 모암과 단층의 투수율이 단층대에서의 용출온도에 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있으며, 단층이 두 개인 두 번째 모델의 모델링 결과에서는 단층이 연결되어 있는 구조이므로 모암의 투수율 보다는 단층의 투수율이 용출온도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 확인 되었다. 마지막으로 세 번째 모델의 모델링 결과는 첫 번째 모델링 결과와 마찬가지로 모암과 단층의 투수율이 용출온도에 중요한 영향을 미치는 것으로 확인 되었다. 두 번째 모델의 모델링 결과로부터는 용출온도가 높은 지역 인근 일지라도 지온구배가 현저히 낮은 현상이 나타날 수 있음을 확인 할 수 있다. 따라서 심부지열을 개발하기위한 연구 지역에 대해 보다 정확한 예측 모델링을 하기위해서는 단층의 구조, 단층과 모암의 투수율, 그리고 수리지질학적 정보 등이 매우 중요하다고 할 수 있겠다.

후 기

본 연구는 한국지질자원연구원 지열연구실 기본 과제 “저온 지열 열병합 발전에 활용 가능한 심부 지열수 자원 확보 기술 개발연구” 와 에너지 관리공단 과제 “대수층 축열 시스템 개발을 위한 수리지질/지열학적 조사연구” 의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Garven, G., Appold, M. S., Toptygina, V. I., and Hazlett, T.J., 1999, "Hydrogeologic modeling of the genesis of carbonate-hosted lead-zinc ores", *Hydrogeology Journal*, Vol. 7, pp. 108-126.
- [2] Garven, G., Bull, S. W., and Large, R. R., 2001, "Hydrothermal fluid flow models of stratiform ore genesis in the McArthur Basin, Northern Territory, Australia", *Geofluids*, Vol. 1, pp. 289-311.
- [3] Sorey, M. L., 1978, "Numerical modeling of liquid dominated geothermal systems", U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1044-D
- [4] Forster, C. and L. Smith, 1989, "The influence of groundwater flow on thermal regimes in mountainous terrain: A model study", *J. Geophys. Res.*, Vol 94, pp. 9439-9451, 1989.
- [5] Hudson, J. A., Stephansson, O., and Andersson, J., 2005, "Guidance on numerical modelling of thermo-hydro-mecanical coupled processes for performance assessment of radioactive waste repositories", *International Journal of Rock Mechanics & Sciences*, Vol. 42, pp. 850-870.
- [6] Lee, K. S., 2008, "Performance of open borehole thermal energy storage system under cyclic flow regime", *Geosciences Journal*, Vol. 12, No. 2, pp. 169-175.
- [7] 김종찬, 이영민, 윤운상, 구민호, 김영석, 2009, “대수층 축열 시스템의 열 간섭 모델링”, 한국신재생에너지학회 2009 춘계학술대회 초록집, pp. 101.
- [8] Kangas, M. T., and Lund, P. D., 1994, "Modeling and simulation of aquifer storage energy systems", *Solar Energy*, Vol. 53, No. 3, pp. 237-247.
- [9] O'Sullivan, M. J., Pruess, K., and Lippmann, M. J., 2001, "State of the art of geothermal reservoir simulation", *Geothermics*, Vol. 30, pp. 395-429.
- [10] Faust, C. R., and Mercer, J. W., 1979, "Geothermal reservoir simulation 2. Numerical solution techniques for Liquid and vapor dominated hydrothermal systems", *Water resources research*, Vol. 15, No. 1, pp.31-46.