

TOUGH2-MP/FLAC3D 연동 해석을 위한 시스템 구축

이재원*, 이창수, 김건영, 김경수

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

*jwl@kaeri.re.kr

1. 서론

고준위 방사성폐기물 처분장에서 공학적 방벽은 방사성폐기물을 물리적으로 보호하고 방사성폐기물에서 발생하는 열을 주변 암반에 잘 전달하며 암반 내부의 지하수가 방사성폐기물에 최대한 늦게 접촉하도록 지연시키는 역할을 담당한다. 따라서 처분 안전성에 대한 신뢰도를 확보하기 위해서는 공학적 방벽의 열-수리-역학적인 상호작용을 고려한 성능 평가가 필수적이다[1].

열-수리-역학적 상호작용을 고려한 수치해석을 수행하기 위해 전 세계적으로 다양한 코드들이 개발되고 이용되고 있는데, 특히 TOUGH-FLAC [2]의 경우 열-수리 상호작용 뿐만 아니라 역학적인 거동을 가장 잘 모사할 수 있는 코드 중 하나로 평가 받고 있다. 하지만 TOUGH-FLAC은 모델의 메시가 매우 큰 경우 해석시간이 오래 걸린다는 단점이 있기 때문에, 오랜 기간 동안의 공학적 방벽 성능을 평가하기에 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 열-수리-역학적인 상호작용을 고려한 수치해석을 위해 TOUGH2-MP [3]와 FLAC3D [4]를 반복적으로 해석하는 연동 해석 모듈을 개발하였으며, 이를 위해 리눅스 클러스터와 윈도우 시스템을 갖춘 통합 해석 시스템을 구축하였다.

2. 본론

2.1 코드 연동 해석의 장점

두 개의 기존 코드를 반복적으로 해석하는 연동 해석의 가장 큰 장점은 각각 코드가 모듈화가 되어 있어 지배방정식의 큰 수정 없이 해석을 수행할 수 있다는 점이다. 더욱이 단일 코드의 개발에 비해 연동 해석 모듈만 개발하면 되기 때문에 개발 기간이 짧고 추후 수정이 용이하다. 마지막으로 코드 개발 후 검증을 위해서는 오랜 기간이 걸리기 마련인데, 연동 해석 시스템의 경우 각각의 코드가 많은 기존 사용자들에 의해 이미 검증이 완료되었기 때문에 연동 모듈의 검증만 수행하면 된다는 장점이 있다.

2.2 TOUGH2-MP/FLAC3D 연동 해석 모듈

열-수리-역학적인 상호작용을 고려한 해석을 수행하기 위해 LBNL에서 개발된 TOUGH2-MP와 ITASCA™에서 개발된 FLAC3D를 이용하였다. TOUGH2-MP는 TOUGH2 Massively Parallel의 약자이며, TOUGH2의 병렬 해석용 버전 소프트웨어이다. TOUGH2는 다상·다중 유체 유동 해석 및 열 전달 해석에 강점이 있는데, TOUGH2-MP의 경우 병렬 해석을 가능하게 해 해석속도를 비약적으로 향상시켰다. FLAC3D는 토질이나 암반의 역학적 해석에 강점이 있는 코드이다.

TOUGH2-MP/FLAC3D 연동 해석 모듈의 알고리즘은 Fig. 1에 나타나 있다.

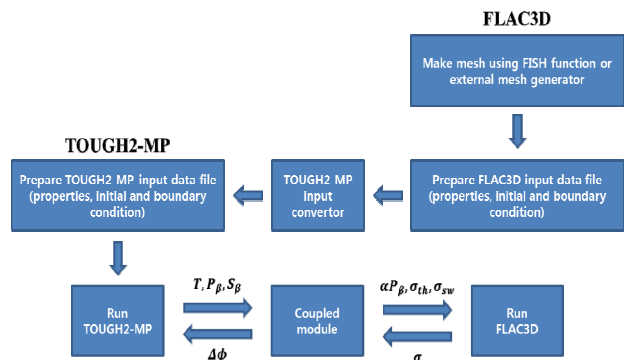


Fig. 1. TOUGH2-MP/FLAC3D coupling module algorithm.

먼저 FLAC3D 혹은 외부 메시 생성기를 이용해 해석 모델의 메시를 생성하고, 역학적 해석을 위한 물성 및 초기조건과 경계조건을 설정한다. 이후 MATLAB 코드로 짜여진 TOUGH2-MP input convertor를 이용해 TOUGH2-MP 해석을 위한 입력 파일을 생성한다. 실제 해석 수행 시에는 TOUGH2-MP를 이용해 열-수리 해석을 먼저 수행한 후 압력, 온도, 포화도 정보를 Coupled module을 통해 FLAC3D에 전달하고 이를 이용하여 유효응력, 열응력, 팽창압 등으로 변환하여 역학적 해석을 수행한다. FLAC3D는 이러한 입력값들을 이용해 역학적 해석을 수행한 후 다시 Coupled module을 통해 응력값을 TOUGH2-MP 입력값인 공극률, 투수율, 삼투압으로 변환시켜 TOUGH2-MP 해석을 수행한다. 위의 과정을 반복적으로 수행함

으로써, 열-수리-역학적인 상호작용을 고려한 수치 해석을 수행한다.

2.3 TOUGH2-MP/FLAC3D 시스템 구축

TOUGH2-MP의 경우 리눅스 기반의 클러스터 시스템이 필요하며, FLAC3D의 경우 윈도우 기반의 노드가 필요하기 때문에 이를 종합적으로 고려한 시스템을 구축하였다 (Fig. 2와 Fig. 3).



Fig. 2. TOUGH2-MP/FLAC3D System.



Fig. 3. TOUGH2-MP/FLAC3D System (In detail).

시스템의 구성 요소는 TOUGH2-MP를 위한 리눅스 기반의 노드 3개와 FLAC3D를 위한 윈도우 기반 노드 1개 및 두 시스템을 연결하기 위한 인터넷 허브 1개, 시스템 제어를 위한 모니터, 키보드, 마우스 1셋으로 이루어져 있다. TOUGH2-MP의 노드는 각각 20개의 cpu로 이루어져 있으며, FLAC3D의 노드는 8개의 cpu로 구성되어 있다.

TOUGH2-MP/FLAC3D 해석 수행 시 TOUGH2-MP 코드가 마스터 역할을 수행해, 타임 스텝별로

윈도우 시스템의 FLAC3D를 호출한다. 이때, 연동 해석을 위한 정보들은 인터넷 허브를 통해 리눅스와 윈도우 시스템 간 전달이 이루어진다.

3. 결론

본 연구에서는 열-수리-역학적인 상호작용을 고려한 수치해석을 위해 TOUGH2-MP/FLAC3D 연동 해석 모듈을 개발하였으며, 이를 위해 리눅스 클러스터와 윈도우 시스템을 갖춘 통합 해석 시스템을 구축하였다. 현재 시스템 및 코드 검증을 실시하고 있으며, 추후 장기간 및 대규모 메쉬를 갖는 모델 해석이 가능하게끔 리눅스 클러스터의 cpu 개수를 증가시켜 나갈 계획이다.

4. 참고문헌

- [1] K.B. Min, J. Rutqvist, C.F. Tsang, L. Jing, "Thermally-induced mechanical and permeability changes around a nuclear waste repository - a far-field study based on equivalent properties determined by a discrete approach", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(5-6), 765-80 (2005).
- [2] J. Rutqvist, Y.S. Wu, C.F. Tsang, G. Bodvarsson, "A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, 429-442 (2002).
- [3] K. Zhang, Y.S. Wu, K. Pruess, "User's Guide for TOUGH2-MP - A Massively Parallel Version of the TOUGH2 Code", Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-315E (2008).
- [4] Itasca Consulting Group Inc., "FLAC-3D Manual: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions version 5.0.", (2012).