

FRANC3D에 의한 균열진전해석 (Crack Propagation Analysis by the FRANC3D)

김 종 수*

Kim, Jong-Soo

장 희 석*

Jang, Heui-Suk

ABSTRACT

To trace crack propagation process in cracked structure is very important thing in view of maintenance and repair of the structure. But it is a little troublesome work due to the continuous remesh work, because a new crack tip is formed in each propagation step. It is more difficult if it should be studied in the three dimensional region. By the way, lately the CFG(Cornell Fracture Group) makes the crack propagation analysis in three dimensional problems possible by developing a new code for them. The use of the code will be expected to spread widely. So a brief introduction of the contents of the code via the theorems used and numerical examples is the purpose of this paper.

1. 서론

균열이 생겨있는 구조물에서 균열의 전파과정을 추적조사하는 것은 구조물의 유지보수 및 관리차원에서 중요한 의미를 갖고 있다. 그러나 균열이 진전할 때마다 새로운 균열선단이 형성됨에 따른 연속적인 새로운 모델링 작업은 균열의 전파과정 추적을 대단히 까다롭게 하고 있다.

Cornell대학의 CFG(Cornell Fracture Group)에서 개발된 FRANC(FRacture ANalysis Code)2D는 이러한 연속적인 모델링 과정을 자동적으로 처리하게 해주는 기능을 갖는 프로그램으로서 균열전파과정을 추적하는 데에 크게 기여하고 있다. 그러나 이 프로그램은 2차원의 범위 내에서 행해지는 것이므로, 균열이 생겨있는 구조물의 균열진전의 실제 거동을 정확히 나타내는 데에는 다소 부족함이 있었다.

현재 CFG에서 연구가 진행 중에 있는 FRANC3D는 이러한 2차원의 범위를 벗어나 3차원적으로 균열진전과정을 추적하는 것이 가능하게 하도록 하고 있어서 앞으로 그 활용도가 클 것으로 예상되고 있다.

따라서 본 연구는 FRANC3D에서 사용하는 이론 및 이를 이용한 구조물의 해석예를 통하여 FRANC3D를 개략적으로 소개하는 데에 그 목적을 두고 있다.

*부경대학교 토목공학과 교수

2.본론

2.1 FRANC3D의 개요

FRANC3D는 전처리(Pre-Processing)프로그램으로서 기하학적인 면을 주로 다루는 OSM과 재료특성치, 경계조건, 균열면의 정의 및 진전 등을 취급하는 FRANC3D가 있다. 주어진 조건에 따른 구조물의 해석은 BES에서 행해지는데 수치해법으로서 경계요소법을 채택하고 있다. OSM과 FRANC3D를 거쳐서 BES에서 계산이 행해지면 다시 FRANC3D를 불러서 균열선단에서의 응력확대계수(SIF)값들을 계산하고 또한 채택된 균열진전이론에 따라 균열의 전파각도 및 균열진전량을 계산하여 균열을 일정량만큼 진전시킨다. 이 이후 다시 BES를 사용하여 균열이 임의 길이만큼 진전되어 있는 구조물의 해석을 행하고, FRANC3D를 부르는 과정을 반복하여 균열의 전파과정을 추적한다[1,2] (그림1 참조).

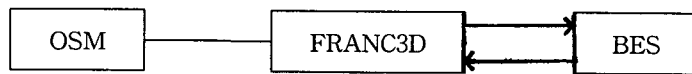


그림1. FRANC3D의 구성

구조물을 모델링하는 과정에서 OSM이나 FRANC3D가 갖는 독특한 기능중의 하나는 Front cutting 혹은 Back cutting을 행하는 것이다. 이러한 기능은 물체내부에 있는 균열면을 요소분할할 때 유용하게 쓰여질 수 있다. 즉 그림2와 같이 실린더 내부에 Penny-type의 균열이 있는 경우를 모델링할 때 균열부분만 남기고 나머지 부분은 모두 제거하므로써 균열부분을 쉽사리 요소분할할 수 있는 것이다. 그림3은 Front cutting 및 Back cutting을 행하여 실린더 중앙에 위치한 균열부분만 나타낸 것이고 그림4는 이 부분의 요소분할된 모습을 나타낸다.

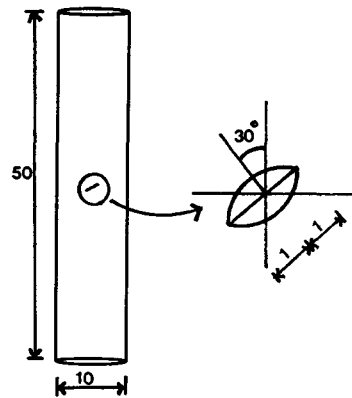


그림2. 내부에 Penny-type의 균열을 가진 실린더

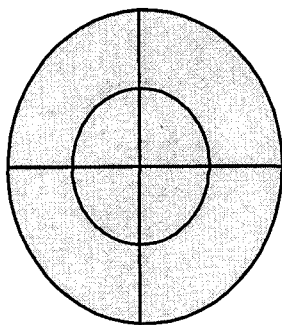


그림3. Front cutting 및 Back cutting에 의하여 얻어진 균열부위

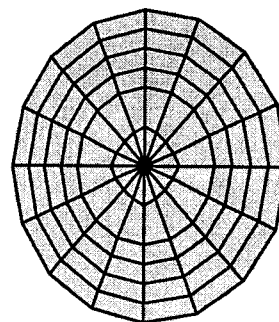


그림4. 균열부위의 모델링

FRANC3D는 현재까지 아직 완성된 단계는 아니며 계속 이론적인 면에서 수정을 추가하고 있는 상태에 있다.

2.2 FRANC3D에서 균열의 진전

FRANC3D에서 사용되는 균열의 전파이론은 일반적으로 잘 알려진 원주방향 최대응력이론($\sigma_{\theta \max}$ theory), 최대에너지 해방률이론($G_{\theta \max}$ theory) 및 최소변형률 에너지이론($S_{\theta \max}$ theory)이 있다.

FRANC3D에서 구조물내의 균열의 진전은 균열선단의 각각의 점에서 얻어진 균열의 전파방향 및 균열진전량의 중첩으로서 이루어진다. 균열선단의 각점에서 균열전파의 방향은 다음 그림5와 같이 균열선단의 각 점의 국부좌표계인 X_1 , X_2 축으로 이루어지는 2차원 면내에서 θ 의 각도를 이루며 전파된다. 여기서 X_1 축은 X_2 및 X_3 축으로 이루어진 면에 대하여 수직인 축이다. X_2 축은 균열선단에서 上下방향으로 수직인 축이며 X_3 축은 균열선단에 대하여 접선방향의 축이다 [3]. 그러나 구조물내에서 균열선단의 각점에서의 균열전파방향은 X_1 , X_2 축으로 이루어진 면만이 아닌 다른 임의의 방향으로도 진전될 수 있다는 사실을 고려한다면 이 부분은 앞으로 보완되어야 할 내용중의 하나라고 판단된다.

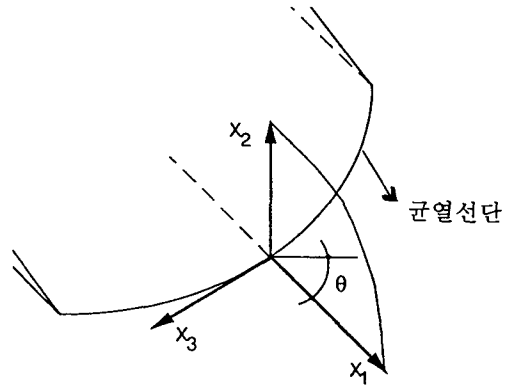


그림5. 균열선단의 국부좌표계

균열선단에서 균열의 진전량은 균열선단에서의 응력확대계수 값에 따라 정해진다. 즉 균열선단 각점에서 계산된 응력확대계수 값들 중에서 최대값이 생긴 위치에 대하여 사용자가 임의로 준 미소량만큼의 균열을 진전시키며, 나머지 점들에 있어서는 이들 점에서의 응력확대계수 값과 응력확대계수 최대값의 비율에 따라 균열진전량이 결정된다. 이 과정 역시 하나의 제안에 지나지 않으므로 추후 실험이나 다른 방법들을 통하여 더욱 재고가 되어야 하는 부분이라고 생각된다.

3. 수치예

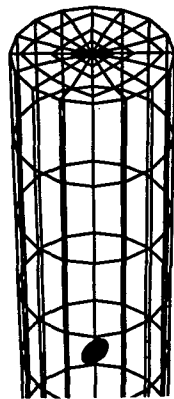


그림6. 내부에 Penny-type의 경사균열을 가진 실린더의 모델링

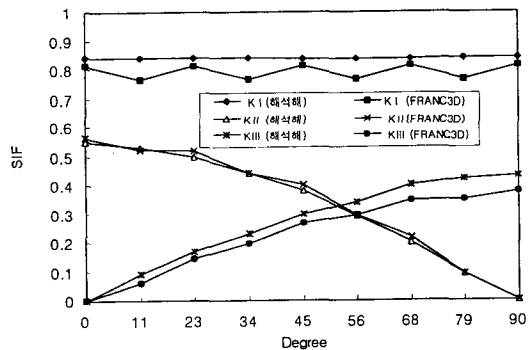


그림7. 응력확대계수의 계산결과

먼저 구조물의 양단에서 단위크기의 인장응력을 받고 내부에는 Penny type의 균열이 경사방향으로 생겨있는 실린더 구조물을 고려해본다(그림2, 그림6). 여기서 실린더의 반경은 5이고, 균열은 반경이 1로서 실린더의 중앙부에서 30° 기울어져 위치하고 있다. 계산 결과치가 대칭 혹은 역대칭으로 되는 점을 고려하여 균열선단의 1/4구간에 대하여 FRANC3D에 의하여 구해진 응력확대계수 값을 Feng[4], Kassir[5]가 구한 이론치와 비교하여 그림7에 함께 나타내었다. 그림8은 균열의 진전량을 0.3만큼 3번 주었을 때 균열의 전파 결과를 균열부위만 확대하여 나타낸 것이다. FRANC3D에서는 균열의 진전회수 및 진전량 등을 미리 지정해놓고 전파과정을 자동적으로 처리할 수도 있도록 하고 있다.

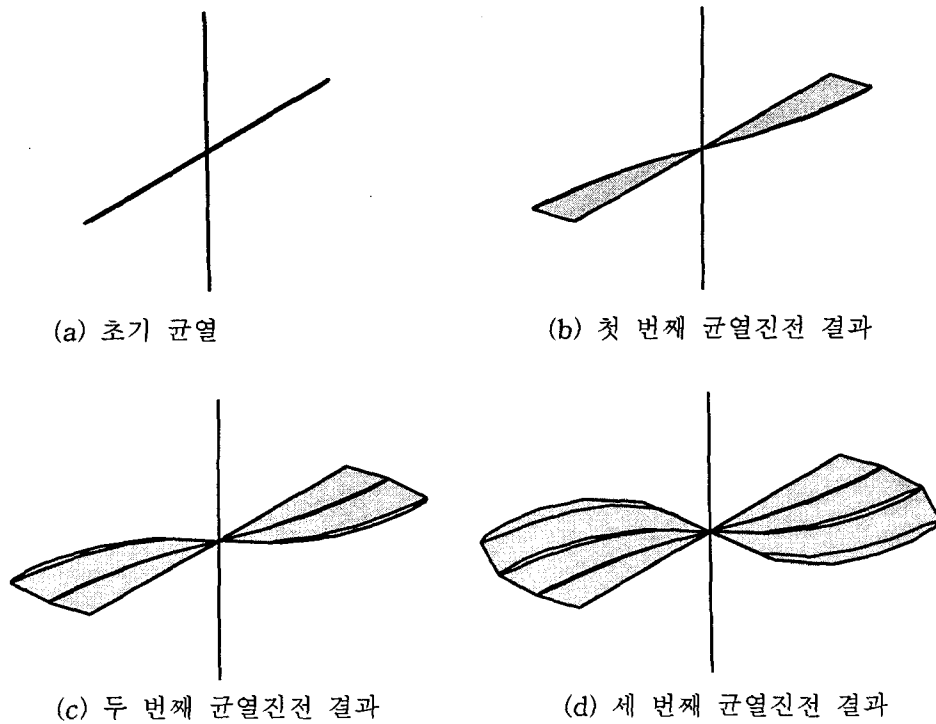


그림8. 균열의 전파 과정

균열이 생긴 콘크리트 중력댐에서 일반적으로 생각할 수 있는 기초적인 보강방법중의 한 가지는 균열을 그라우팅하는 것이다. 그러나 이 경우에 그라우팅 자체의 압력으로 인하여 균열이 추가로 발생되지 않도록 그라우팅재료의 점성, 주입율, 주입시간 그리고 주입점의 개수등을 고려하여 그라우팅압력을 조절하는 것이 절대적으로 필요하다. 즉 그라우팅 압력으로 인하여 발생하는 응력확대계수가 콘크리트댐의 파괴인성치를 초과하지 않도록 하여야 한다. 그림9는 댐상부에 균열이 생겨있는 중력식아치댐을 FRANC3D를 통하여 나타낸 것이고, 그림10은 이 균열부위에 그라우팅이 실시된 경우에 균열선단을 따라서 발생한 응력확대계수의 분포를 나타낸 그림이다[6]. 이 그림으로부터 응력확대계수의 최대값은 균열의 양 끝단에서 생긴다는 것을 알 수 있는데, 이러한 사실은 이 위치가 균열보수 시공시에 그라우팅 압력에 의하여 균열이 추가로 진행되는지의 여부를 직접 육안으로 확인해 볼 수 있는 좋은 위치가 됨을 알려준다.

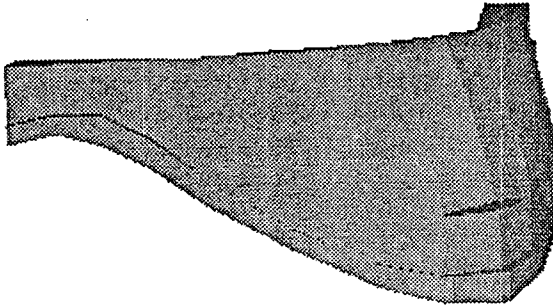


그림9. FRANC3D에 의한 아치댐의 3차원 모델링

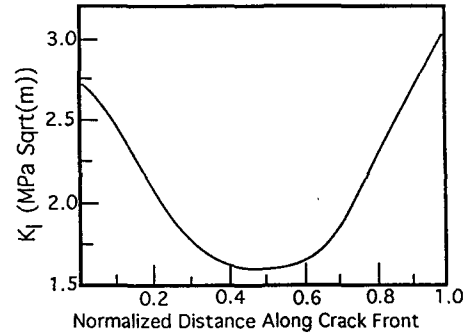


그림10. 균열선단에서의 응력확대계수

4. 결론

본 연구는 균열의 진전과정을 3차원적으로 추적할 수 있는 프로그램인 FRANC3D를 소개하여 앞으로 그 활용도를 높여 보려는 데 그 목적이 있다.

FRANC3D는 현재 전처리, 후처리과정에서는 사용자들이 균열진전과정을 효율적으로 추적할 수 있도록 해주고 있으나 균열의 진전을 지배하는 이론적인 면에서는 이론의 연구와 병행해서 계속 보완을 해나가고 있다.

FRANC3D의 이용은 구조물에서 균열 발생이 가능한 위치를 예측하고 또한 균열이 생긴 경우에 균열거동을 조사하며 또한 보수방법의 검토 등에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단한다.

참고문헌

1. Cornell Fracture Group, "OSM, A Simple Object Oriented Geometrical Modeler", 1995.
2. Cornell Fracture Group, "FRANC3D, A Three Dimensional Fracture Analysis Code", 1995.
3. L.F.Martha, J.Llorca, A.R.Ingraffea, M.Elice, "Numerical simulation of crack initiation and propagation in an arch dam", Dam Engineering, Vol.2, issue3, 1991 pp.193-213.
4. L.M.Feng, O.A.Pekau, C.H.Zhang, "Cracking Analysis of Arch Damc by 3D Boundary Element Method", Journal of Structural Engineering, Vol.122, No.6, 1996, pp.691-699.
5. M.K.Kassir, G.C.Sih, "Three-Dimensoinal Stress Distribution Around an Elliptical Crack Under Arbitrary Loadings", Journal of Applied Mechanics, Vol.33, No.3, pp.601-611, 1966.
6. A.Ingraffea, B.Carter, P.Wawrzynek, "Application of Computational Fracture Mechanics to Repair of Large Concrete Structures", Proceedings of FRAMCOS II, Vol.III, pp.1721-1734, 1996.