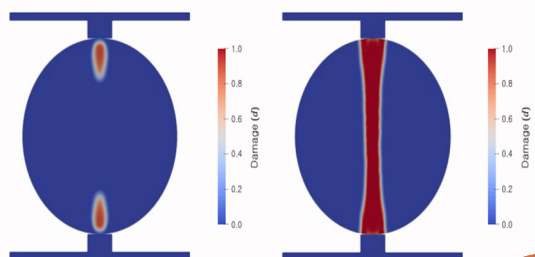


## 접촉과 균열을 한꺼번에 푸는 통합 전산구조해석 — 위상장 파괴역학(Phase-Field)와 제3매질 접촉역학(Third-Medium)의 만남

A Unified Numerical Framework Coupling Phase-Field Fracture and Third-Medium Contact in Finite Deformation



### 1. 들어가며: 누르면 깨진다

연필심을 종이에 꼭 누르면 부러지고, 망치로 돌을 내리치면 갈라진다. 무언가가 맞닿아 힘이 전해지는 ‘접촉(contact)’과 재료가 견디다 못해 갈라지는 ‘파괴(fracture)’는 사실 늘 한 몸처럼 함께 일어난다. 압입 시험으로 박막의 강도를 재거나, 충격을 받은 복합재가 층층이 떨어지거나, 배터리 전극이 충·방전 과정에서 갈라지는 현상까지 — 우리가 다루는 수많은 공학 문제의 본질은 ‘누르니까 깨진다’는 한 문장으로 요약된다. 특히 원자력 발전소처럼 안전이 무엇보다 중요한 첨단 구조물에서는 이 ‘접촉과 균열’을 정확히 예측하는 일이 곧 안전성 평가와 직결된다.

그런데 막상 이 두 현상을 컴퓨터로 함께 풀려고 하면 이야기가 달라진다. 접촉은 접촉대로 파괴는 파괴대로 각각 까다로운 수치해석 문제인데, 둘이 동시에 진행되면 난이도가 급절로 뛰기 때문이다. 이 글에서는 필자의 연구팀이 한국 원자력연구원(KAERI)과의 공동연구를 통해 제안한 접촉과 균열을 ‘하나의 에너지 식’으로 묶어 한꺼번에 푸는 방법을 가능한 쉽게 소개하려 한다.

### 2. 왜 어려울까: 컴퓨터가 싫어하는 두 가지

유한요소해석에서 접촉을 다루는 전통적인 방법은 의외로 손이 많이 간다. 매 순간 ‘어느 면과 어느 면이 닿았는지’를 찾아내고(접촉 탐색), 두 물체가 서로 파고들지 못하도록 조건을 강제로 걸어 줘야 한다. 큰 변형이 일어나 표면 모양이 시시각각 바뀌면, 이 탐색을 매 단계 다시 해야 해서 계산이 번거롭고 불안정해진다.

파괴는 또 다른 골칫거리다. 균열은 본질적으로 재료가 ‘뚝’ 끊긴 불연속면인데, 요소망으로 쪼개 푸는 유한요소법은 이런 날카로운 불연속을 본래 싫어한다. 균열이 자라는 길을 따라 그물망을 계속 다시 그리거나, 특수한 보강 함수를 끼워 넣는 등 추가 장치가 필요하다.

문제는 돌을 합쳤을 때다. 균열이 자라면 그 자리에 새로운 표면이 생기고, 이 새 표면이 다시 서로 맞닿아 접촉이 된다(예: 압축을 받아 균열면이 도로 닫히는 경우). 즉, ‘어디가 닿을지 미리 알 수 없는 시시각각 변하는 표면’을 다뤄야 한다. 기존 방식으로는 이 상황을 감당하기가 매우 어렵다.



김재민

국립창원대학교 기계공학대학 기계공학부 조교수

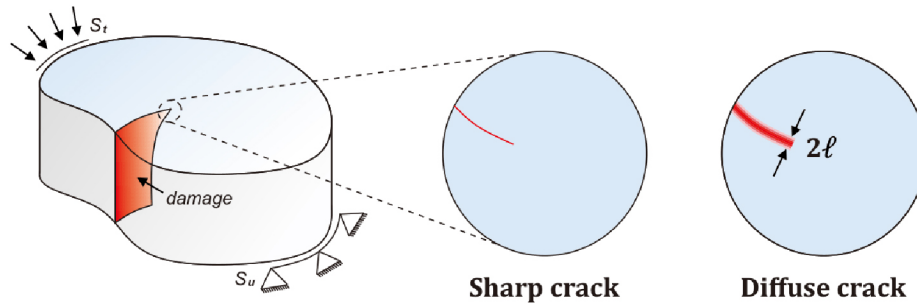


그림 1 날카로운 균열(왼쪽)을 폭이 있는 ‘변진 손상 영역’(오른쪽)으로 바꾸는 위상장 파괴의 핵심 아이디어. 손상 변수  $d$ 가 0(덜정함)에서 1(완전 파손)로 부드럽게 변한다

### 3. 발상의 전환: 경계를 흐릿하게, 문제를 매끄럽게

이 난관을 푸는 열쇠는 의외로 단순한 공통점에 있다. 두 현상 모두 ‘날카로운 경계’가 말썽이라면, 그 경계를 부드럽게 번지게 만들어 버리면 어떨까? 최근 각광받는 두 방법이 바로 이 ‘정규화(regularization)’라는 같은 철학을 공유한다.

#### 3.1 위상장 파괴역학: 균열을 ‘번지는 띠’로

위상장 파괴(Phase-Field Fracture)는 날카로운 균열선을 0에서 1 사이를 오가는 손상 변수  $d$ 로 표현한다.  $d = 0$ 이면 멀쩡한 재료,  $d = 1$ 이면 완전히 깨진 재료이고, 그 사이는 손상이 번져 가는 ‘회색지대’다(그림 1). 균열을 폭이 있는 띠처럼 부드럽게 그려 주면, 그물망을 다시 그릴 필요없는 균열이 스스로 생기고, 자라고, 갈라지고, 합쳐지는 과정을 자연스럽게 따라갈 수 있다.

#### 3.2 제3매질 접촉 역학: 빈틈을 ‘말랑한 쿠션’으로 채우기

제3매질 접촉(Third-Medium Contact)은 더 기발하다. 맞닿을 두 물체 사이의 빈 공간을 아주 말랑말랑한 가상의 쿠션(제3의 매질)으로 미리 채워 둔다. 두 물체가 가까워지면 이 쿠션이 눌리면서 자연스럽게 밀어내는 힘을 만들어 낸다. 덕분에 ‘어디가 닿았는지’를 일일이 찾을 필요가 없다 — 닿으면 그 사이의 쿠션이 알아서 눌릴 뿐이다. 놀랍게도 이렇게 얻은 접촉 압력이 고전적인 헤르츠(Hertz) 접촉 이론과도 잘 들어맞는다.

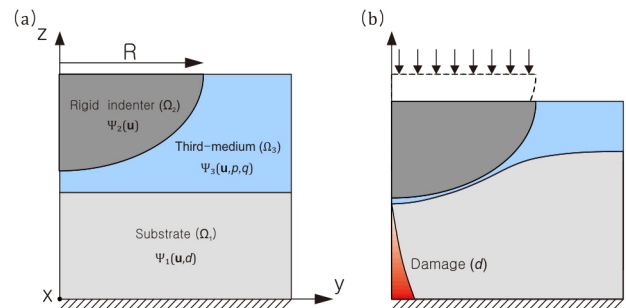


그림 2 통합 프레임워크 개념도. 기재( $\Omega_1$ ), 압자( $\Omega_2$ ), 그리고 둘 사이를 채우는 제3매질( $\Omega_3$ ). 하중이 가해지면 제3매질이 눌러 접촉력을 전달하고, 기재에서는 손상장  $d$ 가 자라 균열이 진전된다.

### 4. 두 방법을 ‘하나의 에너지’로 묶다

두 방법이 같은 철학을 공유한다는 점에 주목하면, 자연스러운 결론에 이른다 — 굳이 따로 풀 이유가 없다는 것이다. 균열도, 접촉도 결국 ‘에너지를 가장 적게 쓰는 상태’를 찾는 문제로 볼 수 있기 때문에 모든 요소를 하나의 전체 에너지 식에 담을 수 있다.

전체 에너지  $\Pi = (\text{기재의 탄성} \cdot \text{파괴 에너지}) + (\text{압자}) + (\text{제3매질}) - (\text{외부 일})$   
 이 하나의 식을 최소화하면, 변형 · 균열 · 접촉이 동시에 결정된다.

이 통합이 단순히 기존 재료들을 한데 모은 것에 그치지 않는다는 점이 핵심이다. 압축을 받을 때 균열면이 서로 파고드는 비물리적 현상을 막기 위해 변형 에너지를 인장 · 압축 성분으로 분리하고, 제3매질이 극단적으로 눌러 부피

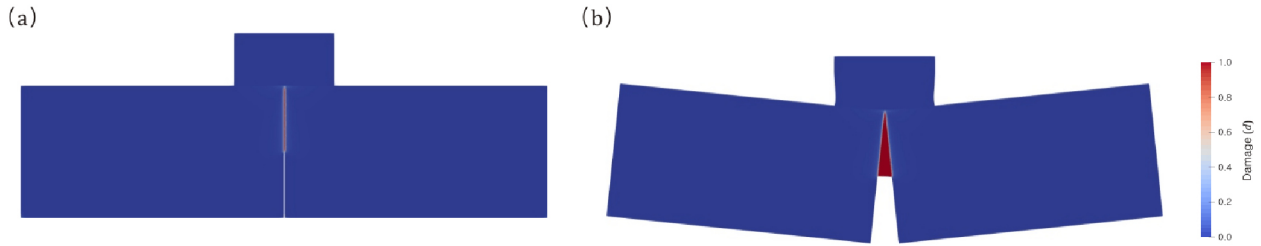


그림 3 3점 굽힘 시험의 손상장 진전. (a) 기준 형상에서의 수직 균열 진전, (b) 변형된 형상에서 접촉으로 유발된 굽힘에 의해 보가 갈라지는 모습

가 0에 가까워질 때도 계산이 터지지 않도록 안전장치를 두는 등, 여러 까다로운 문제를 함께 해결해야 비로소 하나의 식으로 안정적으로 풀린다.

## 5. 유한요소법(FEM)으로 구현하기

제안한 프레임워크는 유한요소법(FEM)으로 구현했다. 변위 · 손상 · 보조장이 서로 다른 영역에 정의되는 다중 물리 문제이므로 영역별로 변수 공간을 따로 두어 조립할 수 있도록 구성했다.

풀이는 엇갈림(staggered) 방식을 따른다. 한 번은 손상  $d$ 를 고정한 채 변위 · 접촉을 풀고, 다음에는 변위를 고정하고 손상을 푸는 식으로 번갈아 반복한다. 이렇게 나눠 풀면 각 부분 문제가 다루기 쉬운 형태가 되어 수렴이 안정적이다. 또한 ‘한 번 깨진 곳은 다시 붙지 않는다’는 비가역 조건을 손상값의 하한을 점점 끌어올리는 방식으로 자연스럽게 강제한다.

## 6. 수치예제

먼저 접촉과 파괴 각각을 따로 검증한 뒤(자기접촉 C-box, 단일 노치 시편), 두 현상이 얹히는 결합 문제 두 가지에 적용했다.

**3점 굽힘 시험.** 원형 압자가 미세 균열이 있는 보를 눌러 내리는 문제다. 처음에는 한 점에서만 닿던 접촉이 압자가 파고들면서 점점 면 접촉으로 넓어진다. 제3매질이 이 변해 가는 접촉을 알아서 처리하며 힘을 분산해 전달하고, 그 결과 균열이 압자 바로 아래에서 위로 자라 올라간다(그림 3).

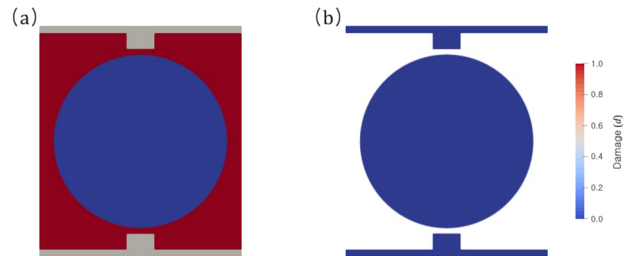


그림 4 브라질리언 디스크 시험의 영역 구성.  
(a) 변형 전 형상 — 시편 원판(파랑), 가압판(회색), 제3매질(빨강).  
(b) 초기 손상장  $d$  (제3매질은 보이지 않게 처리)

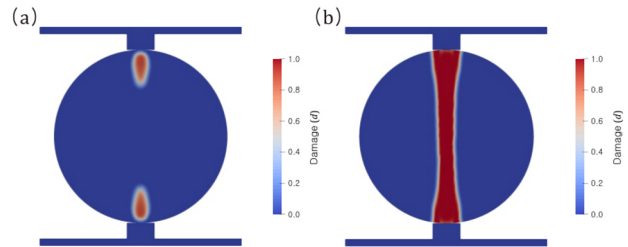


그림 5 브라질리언 디스크 시험의 손상장 진전. (a) 주 균열에 앞서 가압판 근처에서 접촉으로 유발된 2차 균열이 먼저 나타나고, (b) 이후 수직 지름을 따라 인장 균열이 진전된다.

**브라질리언 디스크 시험.** 원판을 위아래에서 눌러 간접 인장강도를 재는 표준 시험이다. 원판(기재), 가압판, 그리고 그 사이를 메우는 제3매질로 영역을 나누어 구성했다(그림 4). 이 예제에서 특히 흥미로운 결과가 나왔다. 접촉이 한 점에서 시작해 점차 넓어지기 때문에, 먼저 가압판 부근에서 2차 분쇄형 균열이 생기고, 이어서 원판 중앙을 따라 수직으로 갈라지는 주 균열이 발달한다(그림 5). 이런 가압점 근처의 부스러기듯 생기는 손상은 실제 실험에서 늘 관찰되지만, 접촉 면적을 고정해 단순화한 기존 해석으로는 재현할 수 없던 현상이다.

하중-변위 곡선 역시 최대 하중 이전 구간에서 참고 문헌의 실험 데이터와 합리적으로 일치했다(그림 6). 정리하면,

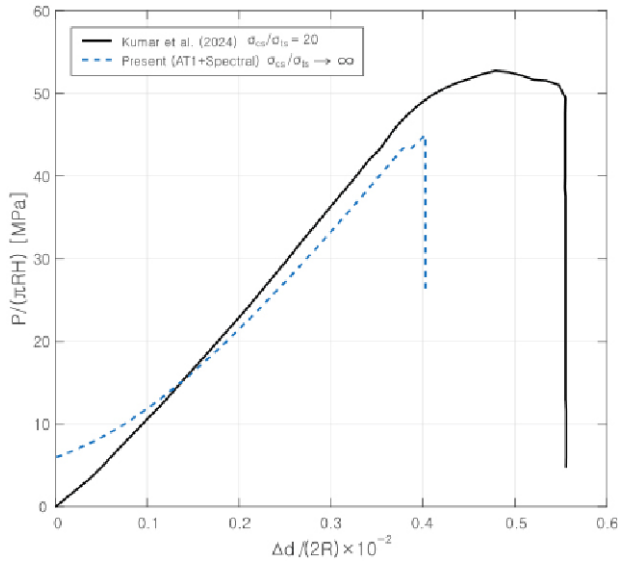


그림 6 정규화된 하중-변위 곡선. 접촉이 자리 잡기 전 제3매질이 전달하는 미세한 초기 힘을 제외하면, 변위가 커질수록 참조 실험 데이터에 수렴한다

제3매질이 변해 가는 접촉면을 스스로 풀어 주기 때문에 접촉 면적의 성장과 그에 따른 응력 재분배가 손상의 발생과 자동으로 맞물린다. 그 결과 별도의 알고리즘 수정 없이도 복잡한 파괴 메커니즘이 자연스럽게 드러난다.

## 7. 맺으며: 한계점과 향후 연구계획

물론 한계도 분명하다. 제3매질이 아무리 말랑해도 두께가 완전히 0이 될 수는 없어 미세한 잔류 간극이 남고, 추가된 자유도와 반복 계산 때문에 계산 비용이 크다. 또한 이번 연구는 고전적 위상장 모델을 사용해 복잡한 다축 응력 상태에서의 균열 발생 강도를 정밀하게 맞추는 데는 한계가 있다. 이는 명시적 강도면(strength surface) 모델을 결합하는 향후 과제로 남겨 두었다.

앞으로는 마찰/접착 접촉, 관성 효과(충격 파괴), 이방성 재료로의 확장을 계획하고 있다. 특히 필자의 연구팀은 한국원자력연구원과 함께 이 통합 프레임워크를 소형모듈원자로(SMR) 등 차세대 원전의 핵연료봉 구조 건전성 평가로 확장하려 한다. 연료 펠릿과 피복관의 기계적 상호작용(PCMI), 간극 변화, 펠릿 파편화를 하나의 틀 안에서 동시에 다룰 수 있을 것으로 기대한다. 접촉과 균열을 부드럽게 번지게 하여 하나로 묶는 이 단순한 발상이 그동안 따로 놀던 두 난제를 함께 푸는 실마리가 되기를 바란다.

## 참고문헌

1. Kim, J., Kim, G., Yoon, S., Lee, D.-H. (2026). A unified variational framework for phase-field fracture and third-medium contact in finite deformation hyperelasticity. *Finite Elements in Analysis and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2026.104590> (본 기사의 원 논문)
2. Francfort, G.A., Marigo, J.-J. (1998). Revisiting brittle fracture as an energy minimization problem. *J. Mech. Phys. Solids*, 46(8), 1319-1342.
3. Miehe, C., Welschinger, F., Hofacker, M. (2010). Thermodynamically consistent phase-field models of fracture. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 83, 1273-1311.
4. Wriggers, P., et al. (2025). Third-medium contact formulation. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*
5. Kumar, A., et al. (2024). A strength-surface phase-field model and the Brazilian disk test.
6. Alnaes, M.S., et al. (2015). The FEniCS Project Version 1.5. *Archive of Numerical Software*, 3(100). 