

한국원자력학회

KOREAN NUCLEAR SOCIETY
2023 Spring Conference

Simulation of Bending Behavior of High Burnup Spent Fuel Rod Considering Breakage of Interfacial Bonding

2023-05-19

Jiyeong Park, Bongjun Kim, Sanghoon Lee*

*shlee1222@kmu.ac.kr



1. 연구배경

2. 연구목적

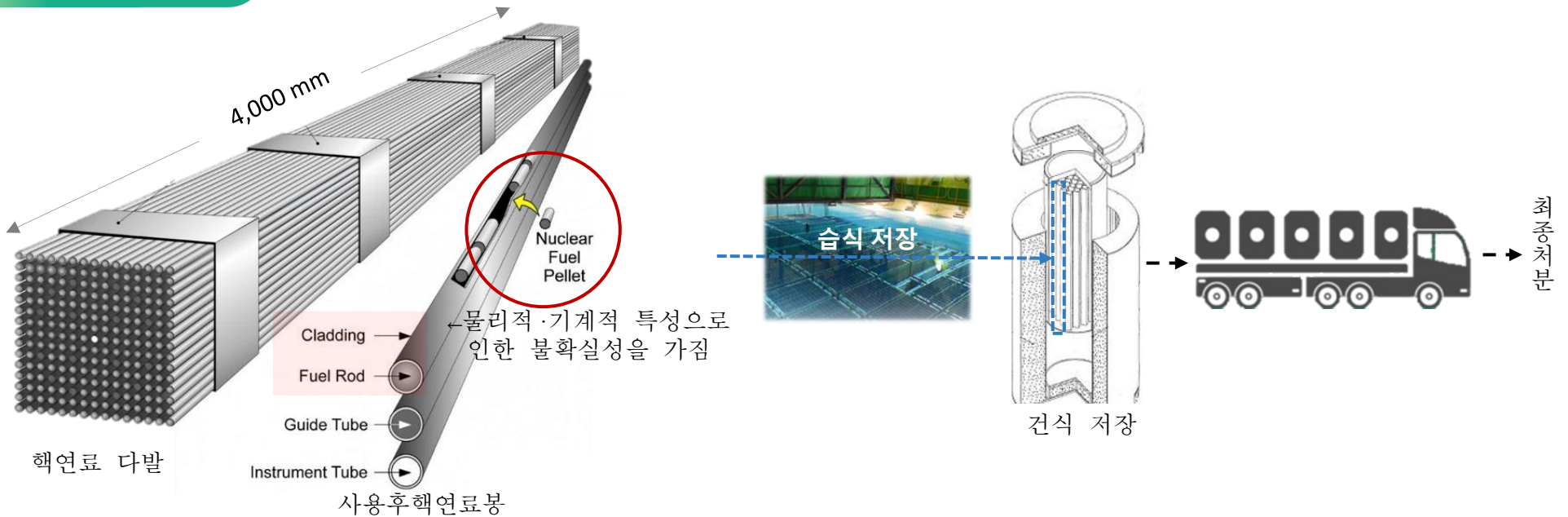
3. 방법론

4. 결과

5. 결론



연구배경

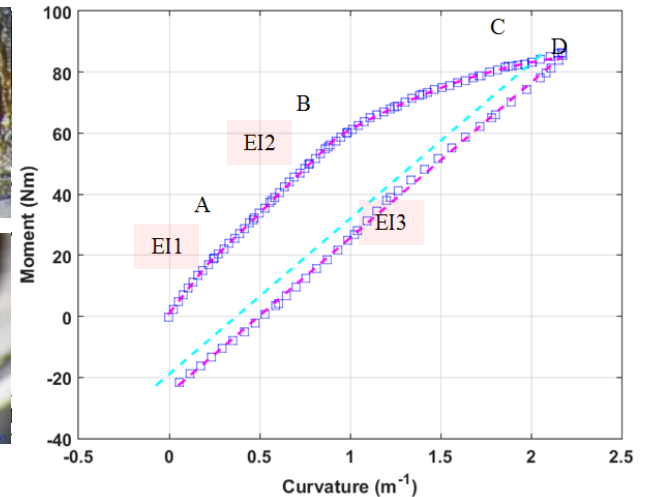
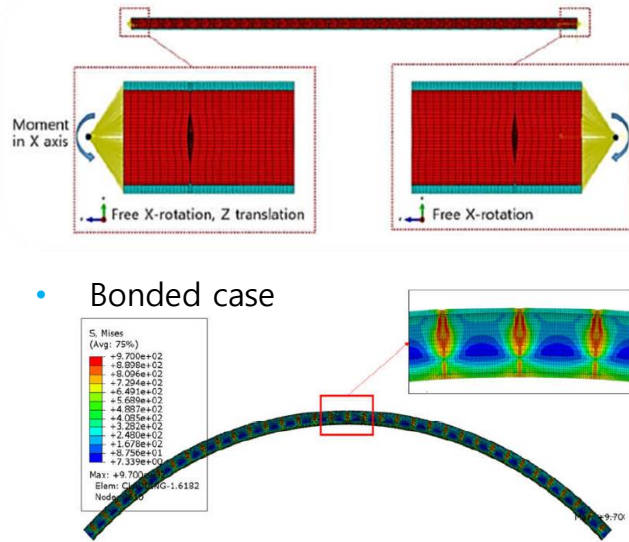


- ▶ 관리 과정에서 핵연료를 취급 가능한 상태로 유지하는 것은 중요하며, 사용후핵연료의 구조적 안전성은 필수
- ▶ 운반 및 저장과 같은 사용후핵연료 관리에서 핵연료의 건전성을 유지하는 것은 안전과 경제성을 위한 필수요건
- ▶ 수천개의 사용후핵연료봉이 포함된 용기는 운반 중 위험성이 발생 → 구조적 건전성 평가는 필수적
- ▶ 복잡한 형상과 물성으로 구성된 핵연료 집합체를 상세히 모델링하여 해석하는 것은 **비효율적**

단일 사용후핵연료봉 모델에 대한 단순화 모델 개발 필요



연구 필요성



<Moment - Curvature curve from NUREG-7198 static CIRFT test>

기울기가 꺾이는 특성 및 비선형 거동을 보임.

선행 연구에서는 계면이 완전히 접합되거나 완전 비접합된 두 가지 극단적인 계면 접합조건을 가정하여 고연소 사용후핵연료봉의 단순화 모델 구축 방법 제안

- 실제 고연소도 사용후핵연료봉은 노심의 고온 고압 환경 하에 펠릿-펠릿, 펠릿-피복관 사이의 계면이
- 하중물리화학적 계면 접합이 점진적으로 파손 및 분리되는 현상 발생
- 연료봉 계면의 접합이 순차적으로 파손되면서 발생하는 것으로 의심됨.

➢ 계면 결합에 대한 파손을 현실적으로 모사하기 위해서 이를 고려한 전산 모델 개발



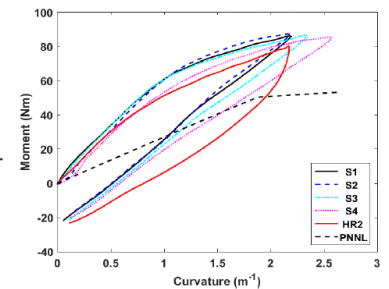
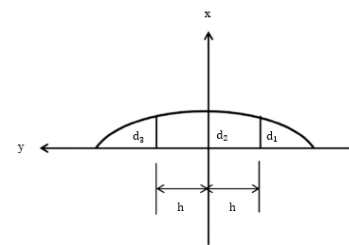
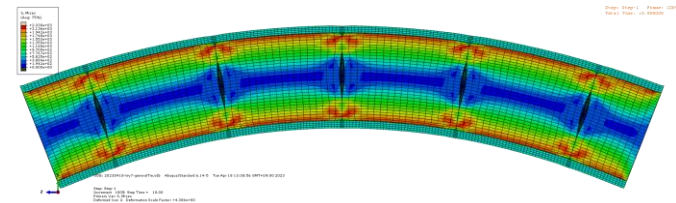
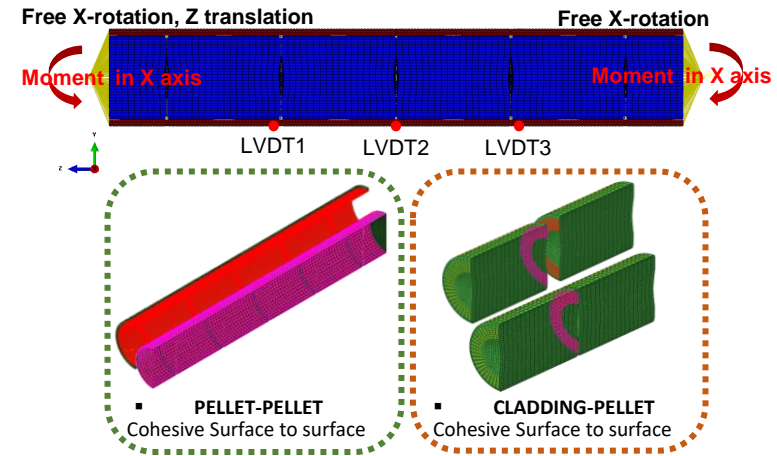
연구 목표

정적 굽힘 시험에 따른 펠릿과 펠릿, 피복관과 펠릿 사이의 계면 접착 거동을 고려한 **사용후핵연료봉 전산**

연구 내용

1. 대상 사용후핵연료봉 선정
 - 사용후핵연료봉 재료 특성
2. CIRFT 시험방법에 따른 연료봉 유한요소모델 개발
 - CIRFT 시험 방법
 - 사용후핵연료봉 유한요소모델 개발
3. Cohesive modeling 기법 활용
 - Cohesive modeling 기법
 - 계면결합조건 사용후핵연료 전산 모델
4. 연료봉 모델 검증
 - 계면 결합 파손을 고려한 전산 모델 및 기존 데이터와의 비교

❖ CIRFT (Cyclic Integrated Reversible-Bending Fatigue Tester)



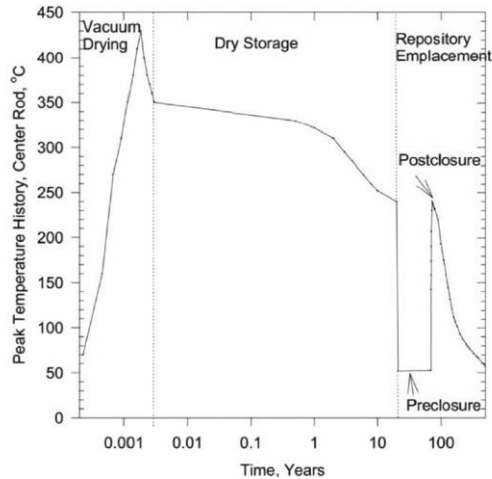
1. 대상 사용후핵연료봉 선정



사용후핵연료봉 재료 특성

❖ PNNL(Pacific Northwest National Laboratory)

- 건식저장에서 약 5년 동안 저장된 300 °C의 연소도 60 GWd/MTU인 고연소도연료봉 고려
→ PNNL-17700에서 개발한 연료봉 피복관 물성을 계산 할 수 있는 기계적 재료 모델
- ▶ Zircaloy-4 피복관 물성모델은 피복관의 파손을 제시하고 있지 않아, 과열되거나 찢어지는 파괴 변위에는 적용 불가하며 원주방향 수소화물이 포함된 피복관에 대해서만 적용 가능



300 °C 고연소도핵연료봉의 매개변수

| Parameter | Value |
|--|-------------------------------------|
| Temperature (T) | 300 °C |
| Neutron fluence (ϕ) | $11.4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ |
| Brun-up (Bu) | 60 GWd/MTU |
| Total hydrogen concentration (H_{tot}) | 352 ppm |

300 °C 고연소도핵연료봉의 재료특성

| Parameter | Value | |
|---------------------------------|--|---------|
| Zircaloy cladding (SRA Zry-4) | Mass density (ρ_c) | 6590 |
| | Modulus of elasticity (E_c) | 75.22 |
| | Strength coefficient (K) | 1.443 |
| | Strain hardening exponent (n) | 0.159 |
| | Strain rate exponent (m) | 0.015 |
| | Shear modulus (G) | 28.28 |
| | Poisson's ratio (ν_c) | 0.33 |
| | Uniform plastic elongation (UE) | 0.022 |
| | Yield strength (σ_y) | 644.798 |
| | Ultimate tensile strength (σ_{e+p}) | 788.68 |
| Fuel (Uranium dioxide, UO_2) | Mass density (ρ_p) | 10440 |
| | Modulus of elasticity (E_p) | 168.3 |
| | Poisson's ratio (ν_p) | 0.32 |
| | Yield strength (σ_y) | 2146 |

2. CIRFT 시험방법에 따른 연료봉 유한요소모델 개발



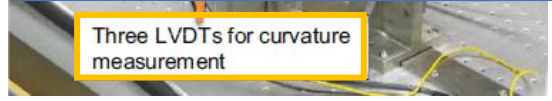
CIRFT 시험 방법

❖ NUREG-7198_Mechanical Fatigue Testing of High-Burnup Fuel

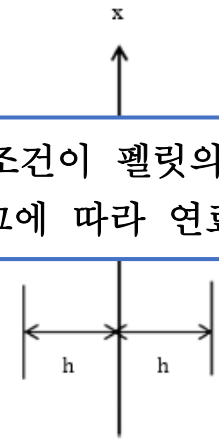
- ▶ NUREG-7198에 제시된 CIRFT 시험 데이터 핵연료봉의 유한 요소 모델을 이용하여 시험 시뮬레이션
 - ▶ CIRFT 시험기에는 변위를 측정하기 위해 3개의 선형 가변 차동 변압기 (LVDT)가 존재하며 이를 사용하여 연료봉의 실시간 곡률 측정
 - ▶ 적용된 변위는 시편에 85 Nm의 순수한 굽힘을 생성하기 위해 0.1 mm/s의 속도로 12.0 mm까지 적용
- 실제 CIRFT 시험 방법
 - Curvature 계산식
 - Curvature-moment curve



- 펠릿-펠릿, 펠릿-피복관 사이의 계면 접합 조건이 펠릿의 하중 저항에 큰 영향을 미치는 것이 확인됨.
 - 하중을 받는 동안 계면이 끊어지고 그에 따라 연료봉의 강성이 달라지는 것이 확인됨.



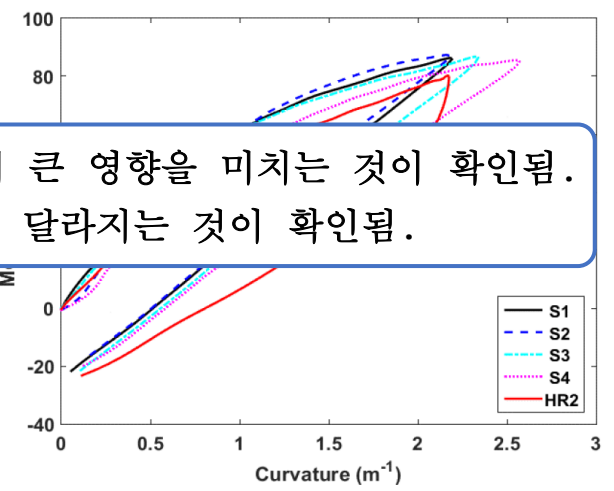
<rod specimen and three LVDTs for curvature measurement in NUREG-7198>



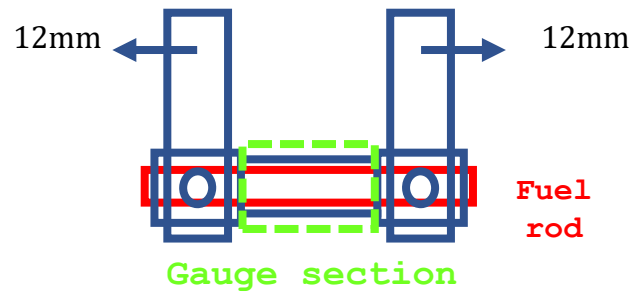
$$d_1 = \text{LVDT1}$$

$$d_2 = \text{LVDT2}$$

$$d_3 = \text{LVDT3}$$



<Moment - Curvature curve from NUREG-7198 static CIRFT test>



2. CIRFT 시험방법에 따른 연료봉 유한요소모델 개발

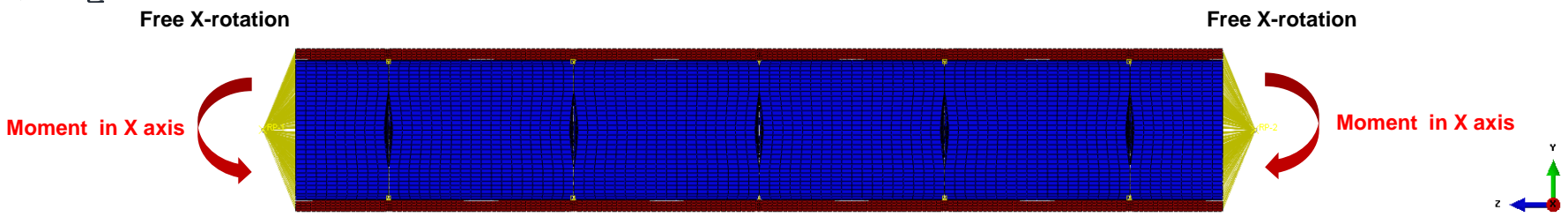


사용후핵연료봉 유한 요소 모델

❖ PNNL (Pacific Northwest National Laboratory)

정적 CIRFT 시험방법을 시뮬레이션 하기위해 Abaqus를 사용하여 동일한 조건의 사용후핵연료봉 유한요소모델 개발

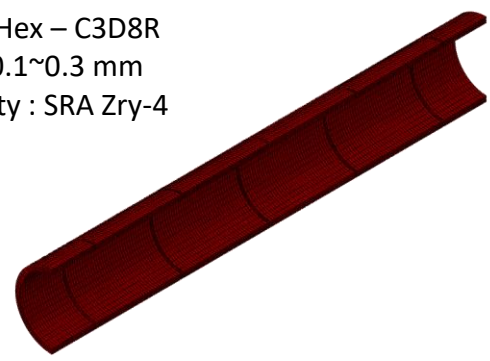
- CIRFT 시험방법에서의 Gauge section 유한요소모델



- ▶ 모델은 아래의 그림과 같이 핵연료 펠릿과 Zircaloy-4 피복관으로 구성되며 PNNL-17700 물성을 참고하여 적용
- ▶ 연료봉 모델의 양 끝에 최대 약 85 N·m의 굽힘 모멘트 적용

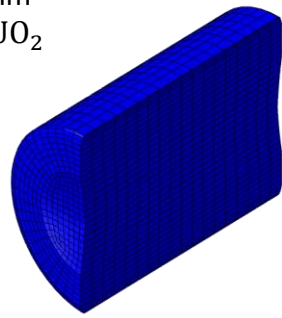
- Cladding (피복관)**

- Solid : Hex - C3D8R
- Size : 0.1~0.3 mm
- Property : SRA Zry-4



- Pellet (핵연료)**

- Solid : Hex - C3D8I
- Size : 0.6 mm
- Property : UO₂



- Cladding 및 Pellet 물성**

| | Parameter | Value |
|---|-----------------------|--------|
| Zircaloy Cladding (SRA Zry-4) | Mass density | 6.95 |
| | Modulus of elasticity | 75.22 |
| | Poisson's ratio | 0.3377 |
| Fuel (Uranium Dioxide UO ₂) | Mass density | 1.04 |
| | Modulus of elasticity | 168.3 |
| | Poisson's ratio | 0.32 |

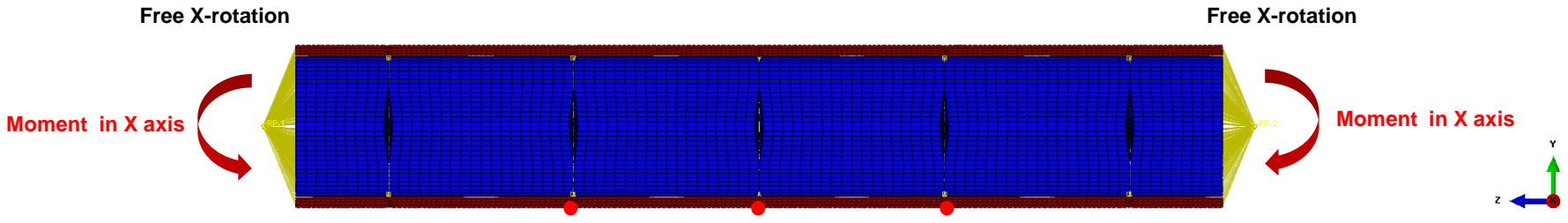
2. CIRFT 시험방법에 따른 연료봉 유한요소모델 개발



사용후핵연료봉 유한 요소 모델

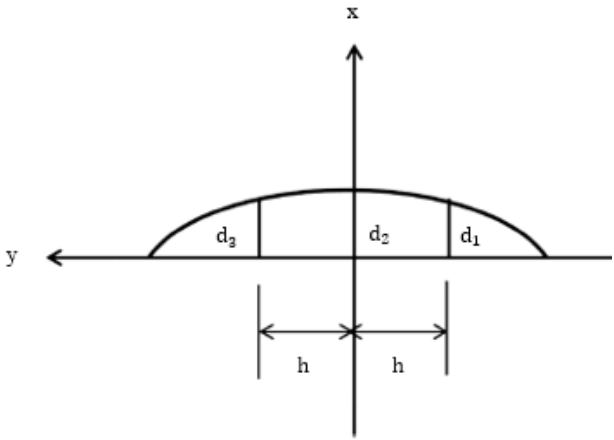
❖ CIRFT (Cyclic Integrated Reversible-Bending Fatigue Tester)

- CIRFT 시험방법에 따른 유한요소모델 해석 진행 과정



세 위치에서의 변위 측정

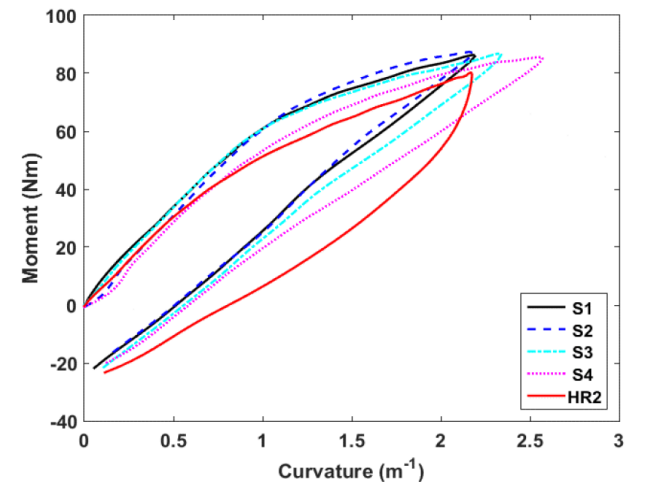
- Curvature 계산식



- Matlab 코딩을 통해 곡률 그래프 생성



- Moment-curvature curve



<Moment-Curvature curve NUREG-7198 static CIRFT test>

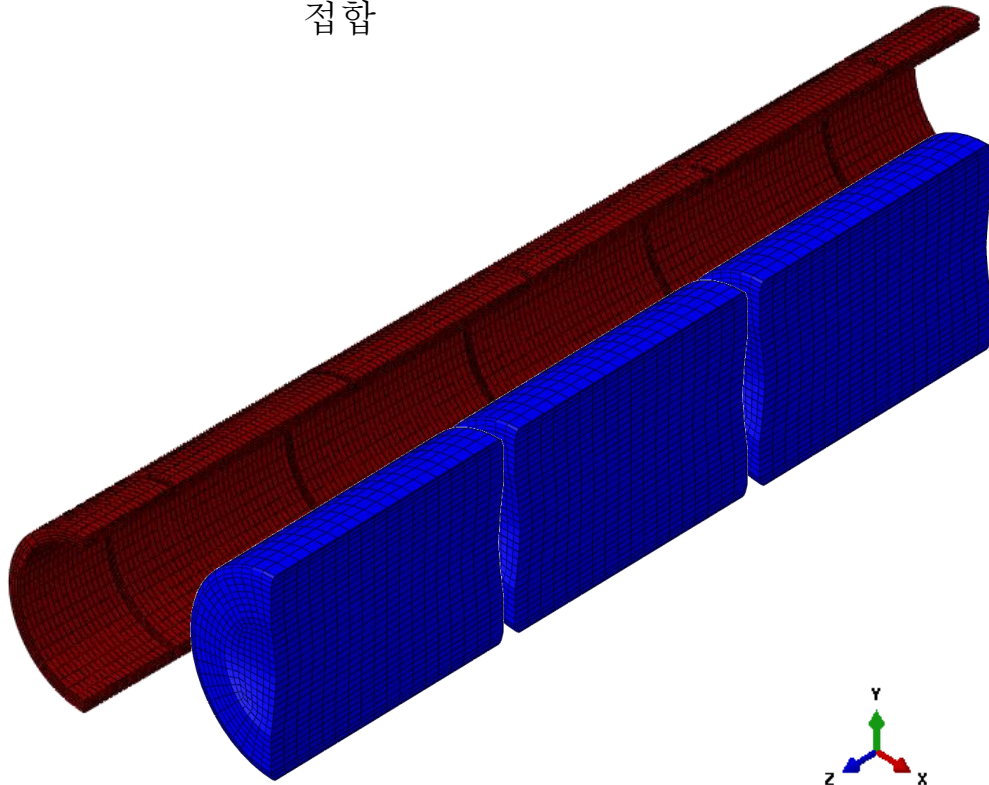
3. Cohesive modeling 기법 활용



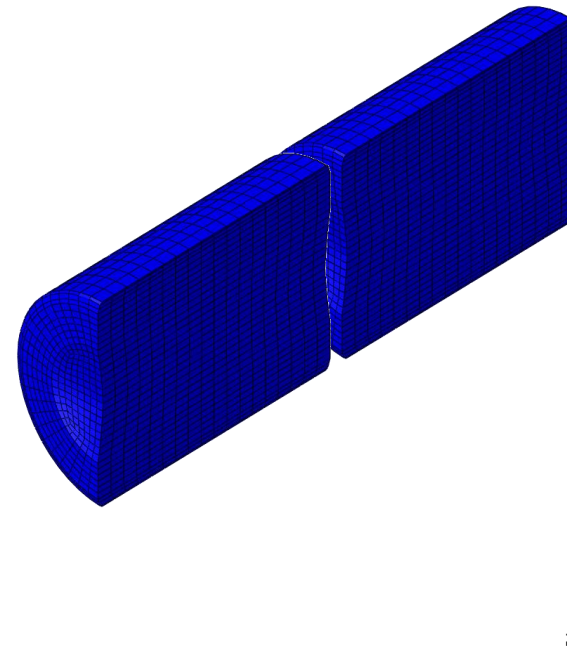
Cohesive modeling 기법

계면 간의 접합이 사실적으로 끊어지는 것을 모사하기 위해서 접촉되는 부분에 **cohesive**를 이용한 계면 접합 조건 부여

- ▶ 펠릿과 피복관 간의 계면 접합



- ▶ 펠릿과 펠릿 간의 계면 접합



3. Cohesive modeling 기법 활용



Cohesive modeling 기법

▶ Cohesive model

Traction-Separation Model에 근거하며 경계면의 무시할 정도로 작은 두께를 고려하여 Cohesive 거동을

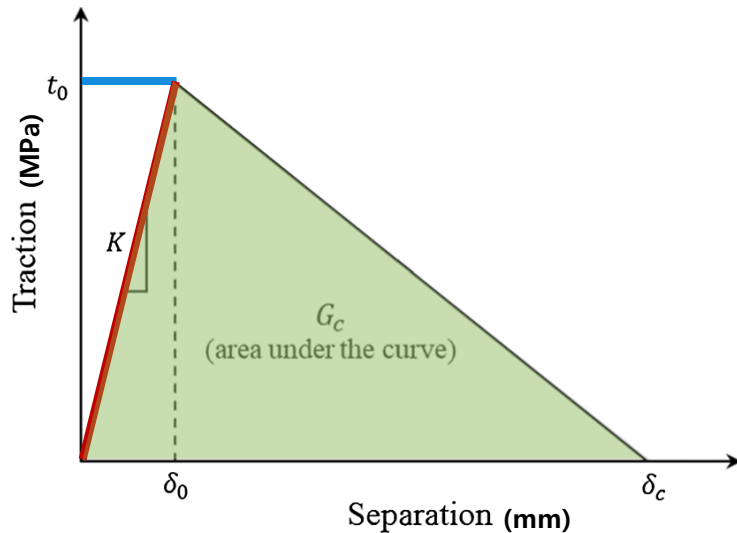
☞ 유사한 방법

☞ 유한요소모델의 접착이 되는 면에서 발생하는 균열 및 파손을 모델링하기 위해 정의

☞ 단순히 접착제가 아닌 계면 강성을 수치적으로 표현함으로써 다양한 균열 진전 조건을 예측하는 방법

Cohesive

element



▶ Required parameters

1. Slope
2. Maximum stress
3. Fracture energy

- Traction $t = \frac{P}{A}$, (Nominal Stress, MPa)
- Separation $\delta = \frac{t}{K}$, (Displacement, mm)
- Stiffness $k = \frac{t}{\delta}$, (분리 강성, MN/mm)
- Traction peak $t_0 = \frac{P_0}{A}$, (Nominal Stress,

| | 분리강성(K) | 최대 분리 응력 (t) | 손상 진화 에너지 (G) |
|-----|----------|--------------|---------------|
| C-P | 1.00E+09 | 1.00E+09 | 5.00E-01 |
| P-P | 1.00E+10 | 1.00E+10 | 6E+19 |

Stiffness

- 분리 강성, 탄성 거동을 결정하는 중요한

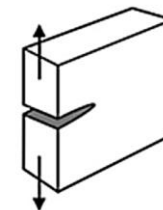
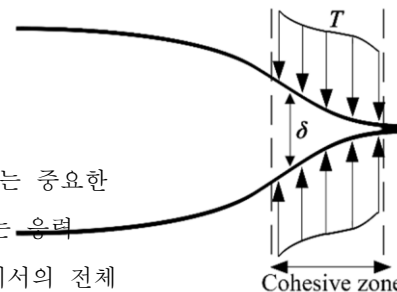
Maximum stress

- Cohesive model이 최대 받을 수 있는 응력

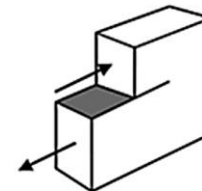
Fracture energy

- Traction-Separation relation에서의 전체

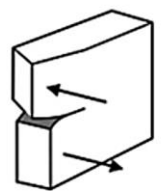
면적



Opening (Mode I)



In-Plane Shear (Mode II)

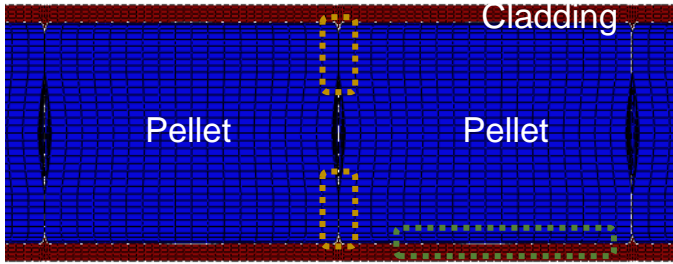


Out-of-Plane Shear (Mode III)

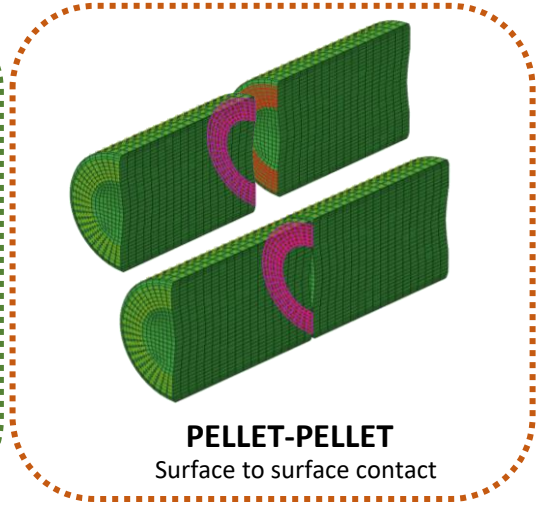
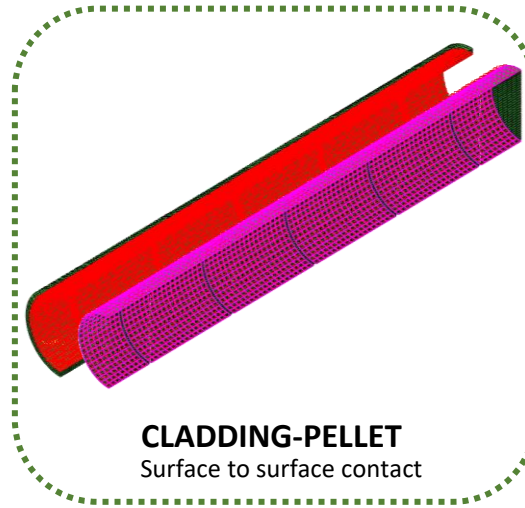
3. Cohesive modeling 기법 활용



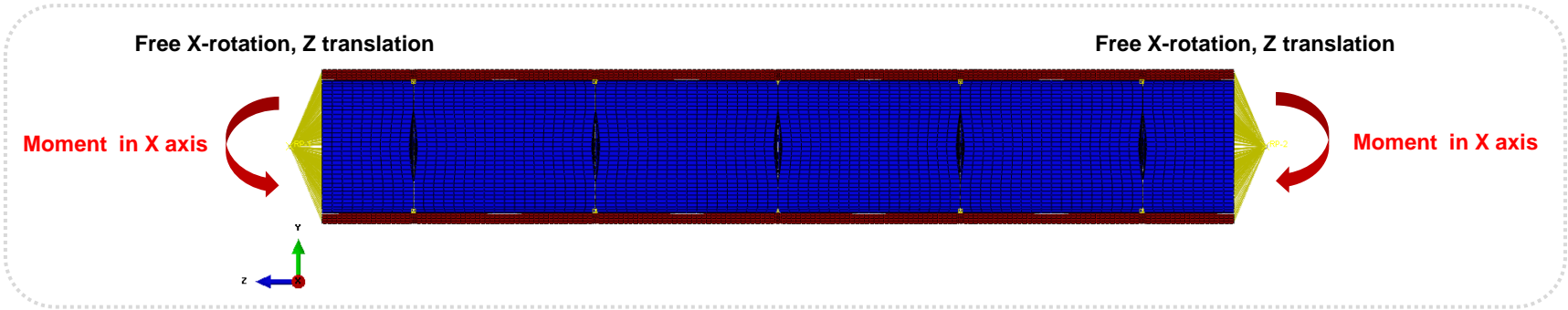
계면결합조건 사용후핵연료 전산 모델



| Contact | Interactions |
|-----------------|------------------|
| Pellet-Pellet | Cohesive surface |
| Pellet-Cladding | Cohesive surface |



- ▶ 펠릿-펠릿, 펠릿-피복관 사이의 조건은 수직 및 전단 응력으로 인한 점진적인 손상 축적을 시뮬레이션 할 수 있는 Cohesive modeling 기법 활용



- ▶ 하중 조건 - 사용후핵연료봉 시험편에 순수한 굽힘 하중을 가함.
- ▶ 경계 조건 - 양 끝 단의 Reference Point를 기준으로 x방향 회전 자유도 및 z방향 변위 자유도를 제외하고 모두 구속

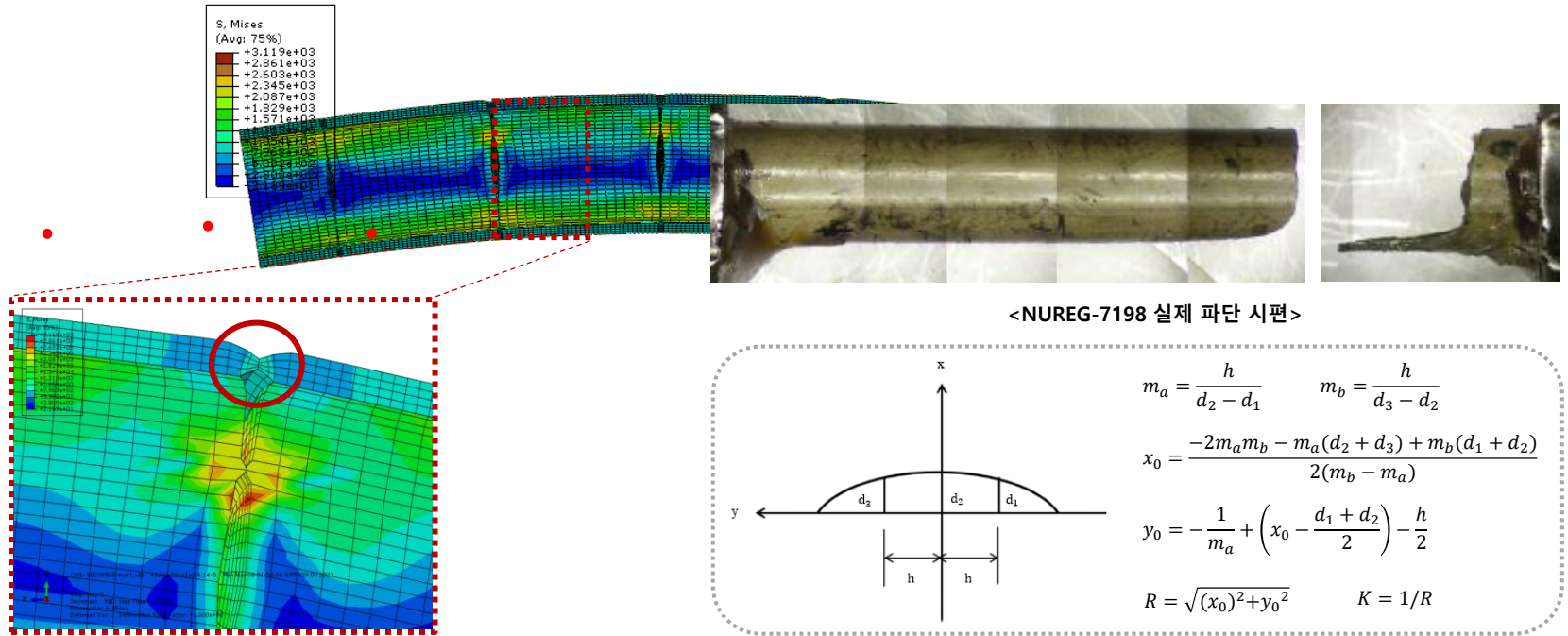
3. Cohesive modeling 기법 활용



계면결합조건 사용후핵연료 전산 모델

❖ NUREG-7198_Mechanical Fatigue Testing of High-Burnup Fuel

펠릿과 펠릿의 접촉면이 상대적으로 큰 응력을 받는 것을 확인하였으며,
펠릿과 펠릿 사이 표면의 가장자리에 큰 국부 응력이 발생하였음.



- ▶ NUREG-7198_Mechanical Fatigue Testing of High-Burnup Fuel 보고서를 참조하였을 때, 실제 시험에서와 동일한 곳에서의 파단이 일어나는 것을 확인하였음.
- ▶ 결합이 파단되기 전에 펠릿-피복관의 계면에서 전단응력이 발생하고 변형이 진행됨에 따라 펠릿-펠릿
- ▶ 계면에서 순간 응력이 발생할 수 있으므로, 구현하기 위해 필요한 세 개의 위치에서의 변위를 측정하여 곡률 식에 대입

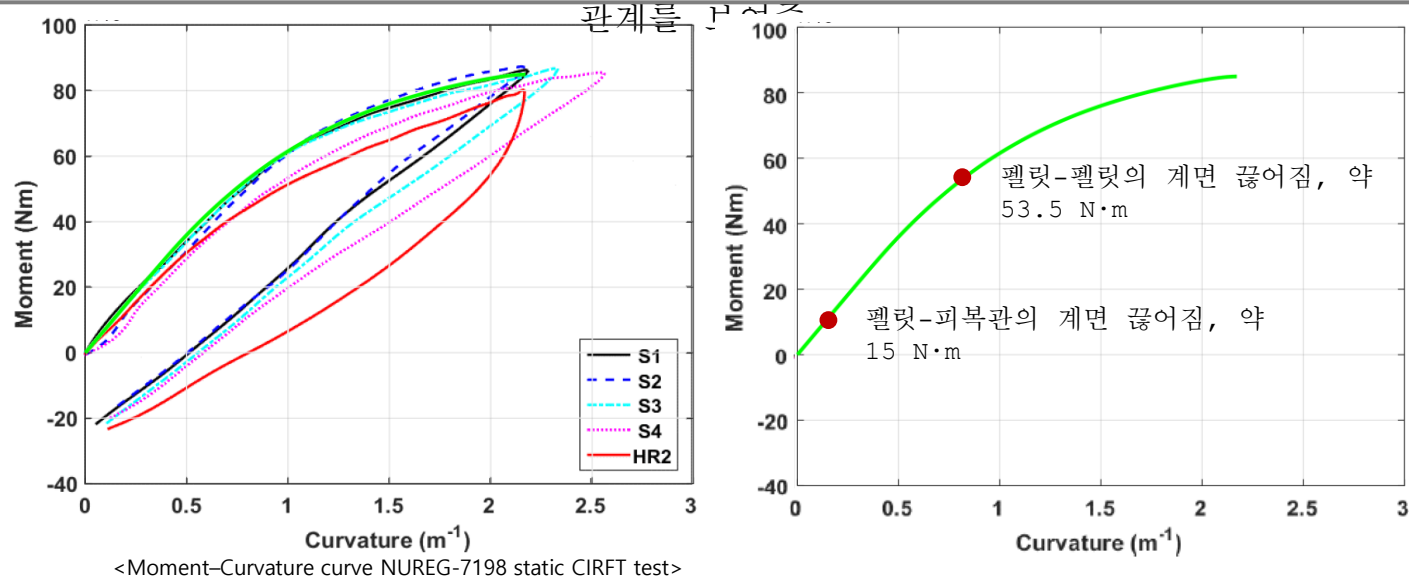
4. 전산 모델



계면 결합 파손을 고려한 전산 모델 및 기존 데이터와의 비교

❖ NUREG-7198_Mechanical Fatigue Testing of High-Burnup Fuel

계산된 곡률을 사용하여 Curvature-moment curve를 테스트 결과와 비교해보았을 때, 좋은 상관



- ▶ ORNL 고연소도 사용후핵연료봉에 대한 4개의 정적 테스트 결과 그래프와 비교해 보기 위함.
- ▶ ORNL CIRFT 시험 데이터를 참고한 모델을 생성함에 따라 거의 정확하게 일치하는 형상을 얻을 수 있었음.
- ▶ ORNL CIRFT 시험에서 계면 결합 파손이 발생하는 지점은 12 N·m와 59 N·m으로, 계면 결합 파손을 고려한 전산 모델의 결과와 거의 유사하다는 것을 증명하였음.
- ▶ 개발된 전산모델의 타당성과 정확성이 입증됨.



본 연구는 계면 결합 파손을 고려한 고연소도 사용후핵연료봉 전산 모델을 개발하여 굽힘 거동을 모사하였으며, 기존 ORNL 데이터와의 비교 분석

- ✓ 고연소도 사용후핵연료봉은 노심의 고온 고압환경 하에 계면이 물리화학적으로 접합되어 있으며, 이러한 것에 하중을 가하게 되면 계면이 점진적으로 파손, 분리되는 현상 발생
- ✓ 선행 연구에서는 계면이 완전히 결합되거나 완전히 결합이 해제된 상태로 가정하였으며, 이는 현실적이지 않으며 지나치게 보수적이거나 안전하지 않은 대책으로 이어질 가능성이 있음.
- ✓ 계면 결합 파손을 고려한 고연소도 사용후핵연료봉 전산 모델을 개발하였으며, 펠릿-펠릿, 펠릿-피복관 사이 각 계면에서의 끊어지는 현상을 현실적으로 모사하기 위해 Cohesive modeling 기법 활용
- ✓ 굽힘 하중 하에서 펠릿과 펠릿, 펠릿과 피복관 사이의 계면 결합이 순차적으로 파괴되는 것을 시뮬레이션 하였음.
- ✓ 기존 ORNL 데이터를 참고하여 해석 모델을 만들었을 때, 거의 정확하게 일치하는 형상을 얻을 수

향후 연구 목표

- 기존 연구 모델의 거동을 바탕으로 한 단순화 모델 개발 진행 예정
- 계면의 손상 거동 시뮬레이션에 필요한 파라미터는 정적 CIRFT 시험 데이터에 대해 최적화를 통해 향후 보정 수행 예정
- 다양한 하중 조건에서 사용후핵연료봉을 사실적으로 시뮬레이션 할 수 있으며, 연료 손상 비율 계산이 더 정확할 것으로 예상



END