

# 금속 연료봉의 과도 상태 용융 현상을 고려한 피복관 응력 해석

2016.05.13.

KNS2016 spring

고려대학교 신뢰성평가연구실

김운재

정현우, 오영련

[kimy0308@korea.ac.kr](mailto:kimy0308@korea.ac.kr)

02) 3290 - 3372

# 연구 배경

[1] R. G. Pahl et al. "Proceedings of the 1990 International Fast Reactor Safety Meeting" 1990

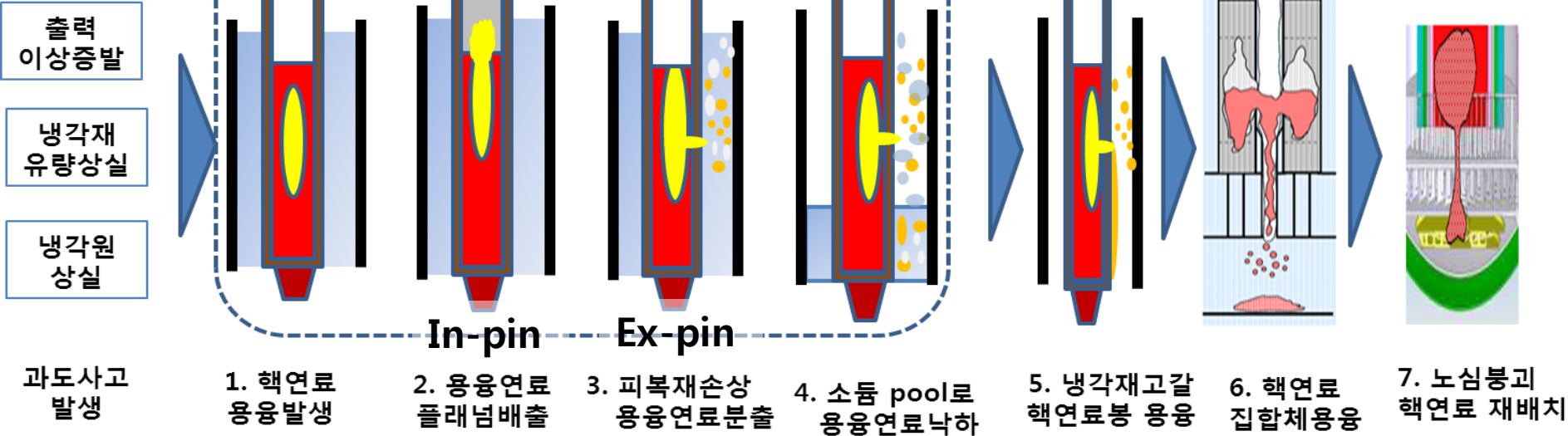
[2] Korea atomic energy research institute.

"Review of phenomenological models for the initial phase HCDA analysis in a metal-fueled sodium-cooled fast reactor" 2009

[3] A. Karahan. "Modeling of thermo-mechanical and irradiational behavior of metallic and oxide fuels for sodium fast reactors."

Thesis for the degree of Ph.D in nuclear science and engineering at the Massachusetts institute of technology 2009

## SFR 중대사고 진행과정

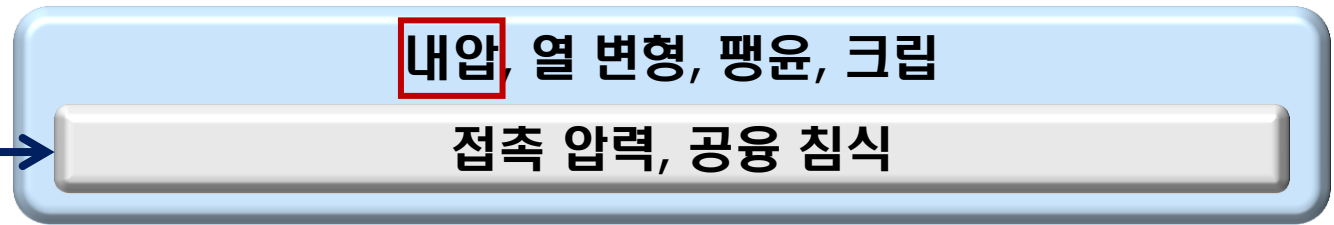


✓ In-Pin 발생 시 연료 반응도 감소로 인해 사고 조기 종료 가능성 높음

✓ Ex-Pin 발생 시 중대 사고 진행 가능성 높음

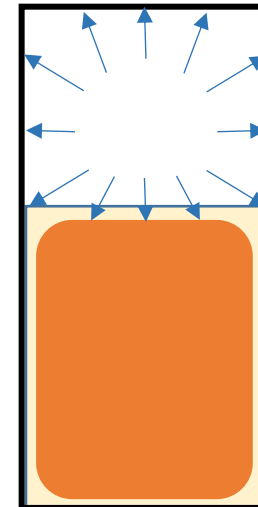
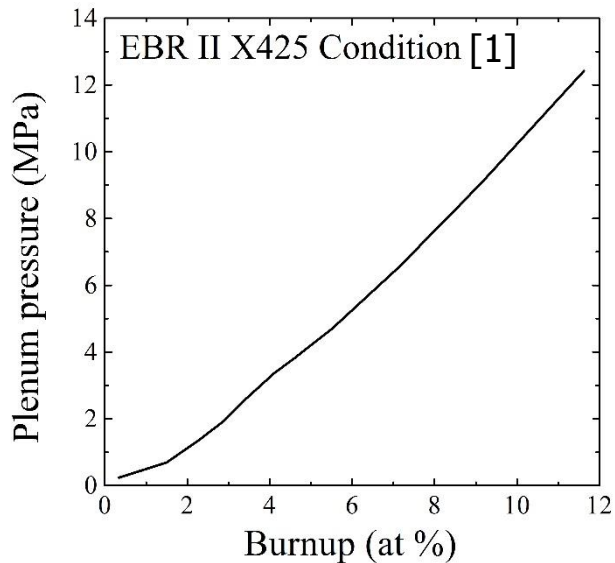
→ 피복관 파손에 대한 구조적 평가 필요

연료 - 피복관  
접촉 시 상호작용

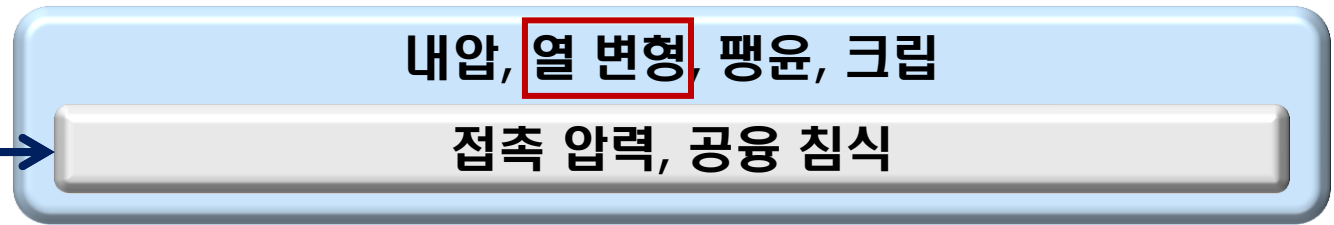


## ❖ 피복관 내압

- ✓ 운전 시 금속 연료의 핵 분열 기체 발생으로 인해서 플레넘 압력 상승
- ✓ 피복관 응력 평가의 중요 인자

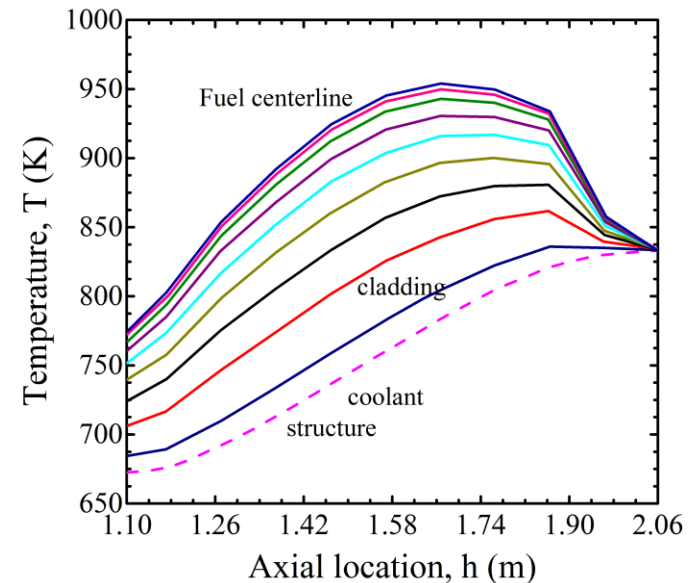


연료 - 피복관  
접촉 시 상호작용

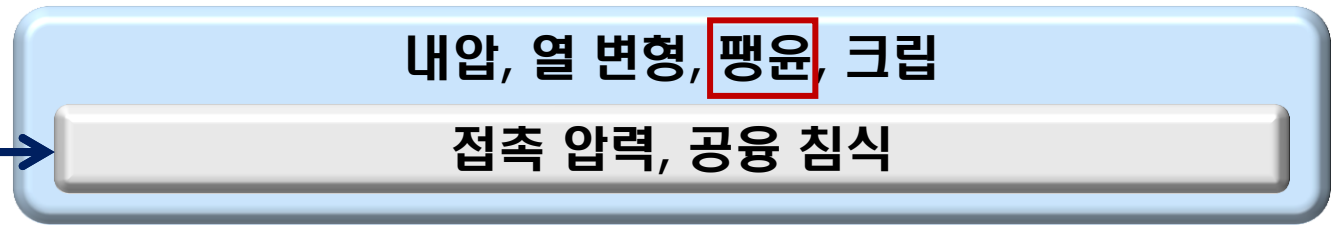


## ❖ 피복관 열 변형

- ✓ 연료봉 내부의 온도 구배 존재
- ✓ 정상 상태 운전 시 피복관 온도 680 ~ 840 K
- ✓ 과도 상태 진입 시 연료봉 온도 급격히 상승  
→ 피복관의 높은 열 변형 및 열 응력 초래
- ✓ 피복관 응력 평가의 중요 인자



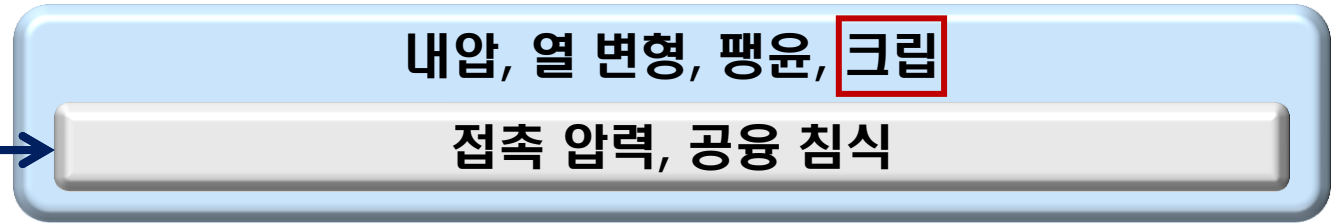
연료 - 피복관  
접촉 시 상호작용



## ❖ 팽윤 (Swelling)

- ✓ 운전 시 연료의 핵 분열로 인하여 중성자 방출
- ✓ 중성자 조사로 인한 피복관의 팽창 현상 발생
- ✓ HT9 소재의 중성자 조사로 인한 팽윤 현상은 적음

연료 - 피복관  
접촉 시 상호작용



## ❖ 크립 (Creep)

- ✓ 고온 피복관의 경우 시간 의존적인 변형으로 인한 응력 완화 현상 및 손상 발생
- ✓ 손상 모델 - 피복관 수명 예측 모델

→ Cumulative damage fraction model, Constrained diffusional cavity growth model

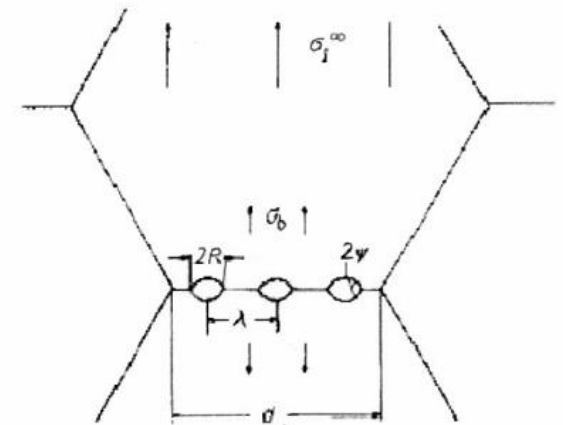
$$CDF(t_n) = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t}{t_r(\sigma_i, T_i)}$$

$CDF(t_n)$ : Cumulative damage fraction at time,  $t_n$

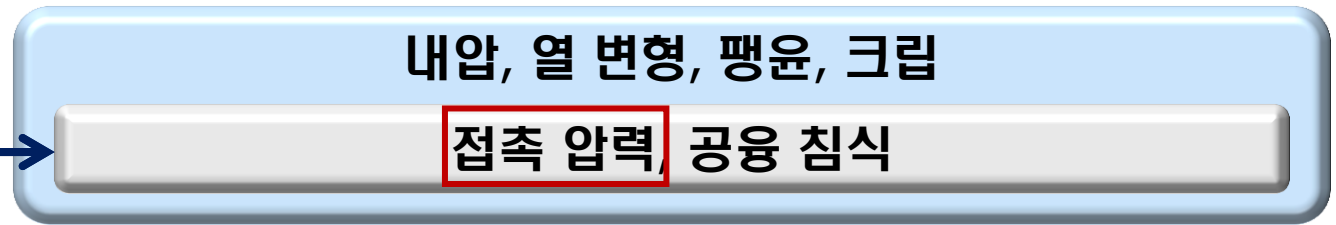
$\Delta t$ : Magnitude of a time step [s]

$t_r(\sigma_i, T_i)$ : Failure time calculated with the stress and temperature at time step (i) [s]

n: Number of time steps

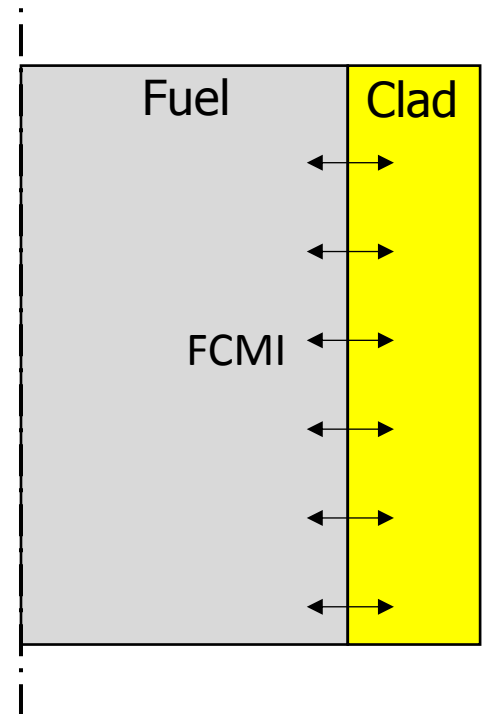


연료 - 피복관  
접촉 시 상호작용



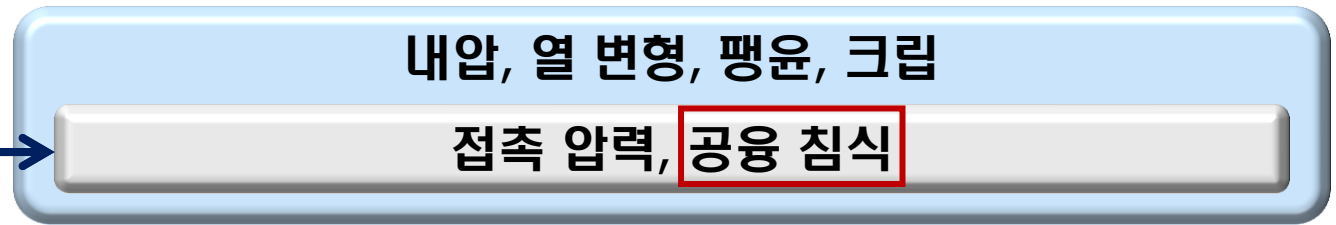
## ❖ 연료 - 피복관 기계적 상호 작용 (FCMI)

- ✓ 연료의 변형 이력이 모두 고려되어야 함  
탄성 변형, 소성 변형, 열 변형, 크립 변형, 팽윤  
이방성 변형, 연료 기공 영향, .....
- ✓ 과도 상태 진입 시 연료 공동 형성 접촉 압력에 영향
- ✓ 운전 이력을 반영
- ✓ 피복관 응력 평가의 중요 인자



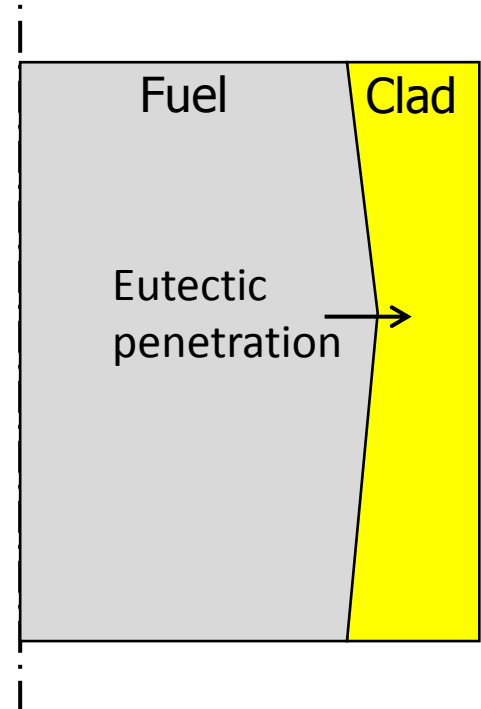


연료 - 피복관  
접촉 시 상호작용



## ❖ 연료 - 피복관 화학적 상호 작용 (FCCI)

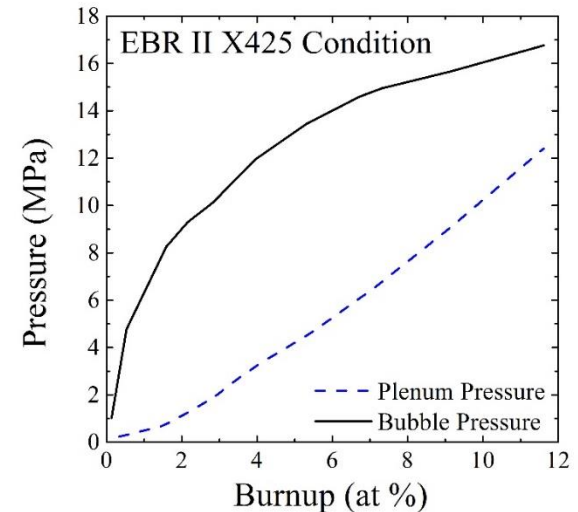
- ✓ 연료 - 피복관 접촉 시 확산 현상으로 인하여 녹는점 감소
- ✓ 고온 연료봉 공용 현상으로 인하여 피복관 감육 발생
- ✓ 과도 상태 진입 시 온도 상승으로 인한 피복관 감육 가속화
- ✓ 피복관 응력 평가의 중요 인자



내압, 열 변형, 팽윤, 크립

접촉 압력, 공동 침식

- ✓ 수 초 ~ 수 분의 짧은 시간 동안 고온 및 고압에 따른 변형
  - ✓ 정상상태의 운전 이력 하중 및 변형 이력 존재
  - ✓ 고온 환경에 따른 공동 현상 가속화
  - ✓ 고온 환경에 따른 금속 연료 용융 발생 → 공동 형성
  - ✓ 공동 내압으로 인한 응력 상태 변화
- 공동 내압 : 플레넘 압력, 버블 압력



# 과도 상태 피복관 응력 평가

## ❖ 과도 상태 금속 연료 평가 코드

- ✓ LIFE-METAL[ANL], FEAST-METAL[MIT]

**➔ 상용 프로그램을 이용한 피복관의 응력 평가 필요**

**내압, 열 변형, 팽윤, 크립**

**접촉 압력, 공용 침식**

## ➤ 정상상태 & 과도상태 연료봉 변형 기구 복잡

→ 이력을 모두 고려한 응력 해석 진행이 어려움



- 문제의 단순화를 통하여 피복관의 응력 상태 평가
- 공동 형성, 소성 거동, 열 변형에 의한 영향 평가

# 과도 상태 용융 현상을 고려한 피복관 응력 해석

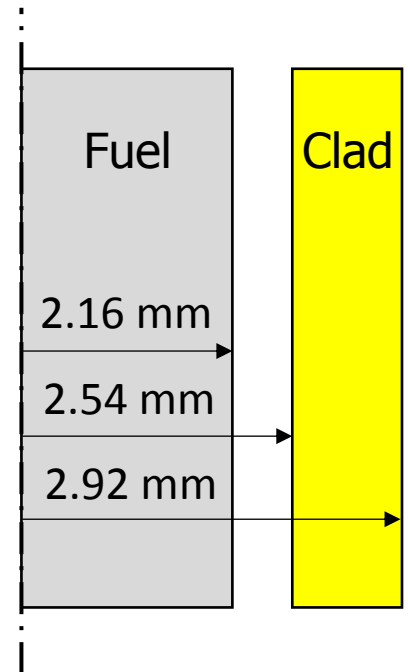
[1] Horger O.J. and Nelson C.W. "Design of press-and shrink-fitted assemblies" Journal of Applied Mechanics 1937

[2] Argonnes national laboratory. "The SAS4A/SASSYS-1 Safety Analysys Code System"

[3] A. Karahan. "Modeling of thermo-mechanical and irradiational behavior of metallic and oxide fuels for sodium fast reactors."

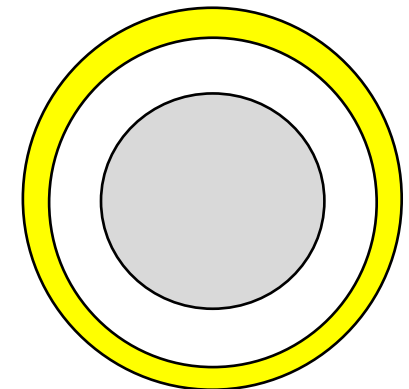
Thesis for the degree of Ph.D in nuclear science and engineering at the Massachusetts institute of technology 2009

	Fuel	Clad
<b>Material</b>	U-19Pu-10Zr	HT9
<b>Ref. Temperature (K)</b>	900	800
<b>Elastic modulus (GPa)</b>	15	159.6
<b>Poisson's ratio</b>	0.349	0.301
<b>Yield stress (MPa)</b>	11.8	250
<b>Expansion coeff.</b>	$\alpha^{\text{Fuel}}(T)$	$\alpha^{\text{Clad}}(T)$



## ❖ X425 Benchmark fuel pin data

✓ 열 팽창 계수는 온도에 따라 변화



## ❖ 목표

- ✓ 공동 크기와 정상 상태 이력에 따른 피복관 응력 계산

## ❖ 문제 가정

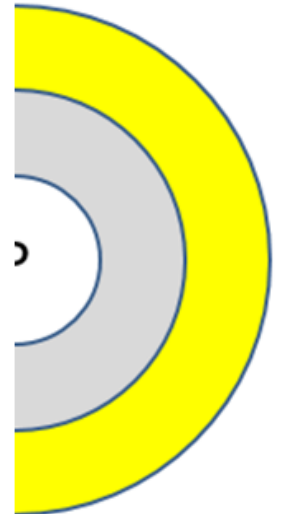
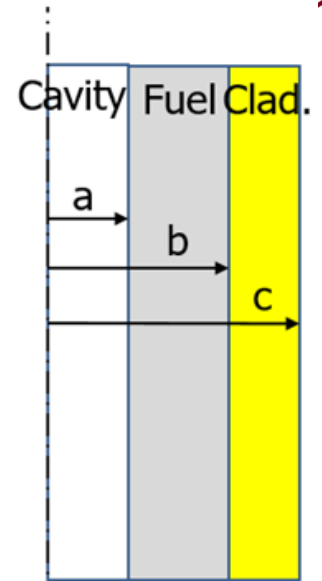
### 1. 정상 상태 이력 단순화

- ✓ 과도 상태 진입 시 접촉 압력, 플레넘 내압, 버블 내압

### 2. 재료의 탄성 거동만을 고려

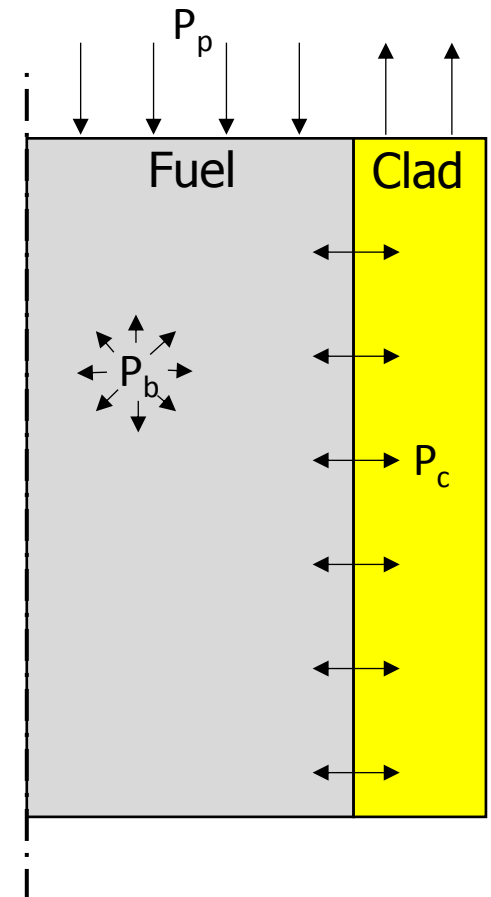
- ✓ 소성, 크립 변형, 열 변형 무시

→ 이론적 해와 유한요소 해석 결과를 비교하여 문제 검증



## ❖ 정상 상태 이력 - 과도 상태 진입 조건

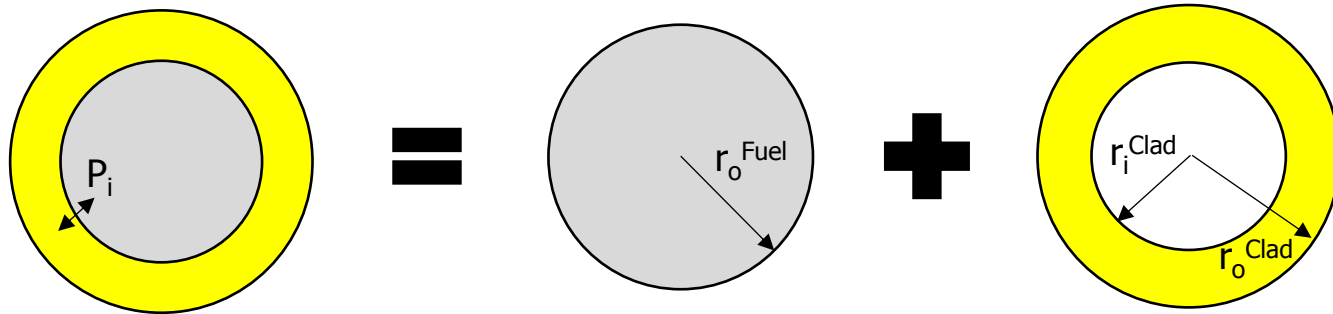
	Free-FCMI	Low burnup	High burnup
Burnup (at %)	-	5	12
Contact pressure $P_c$ (MPa)	0	12.5	46.3
Plenum pressure $P_p$ (MPa)	4.3	4.3	12.0
Bubble pressure $P_b$ (MPa)	13.9	13.9	16.7



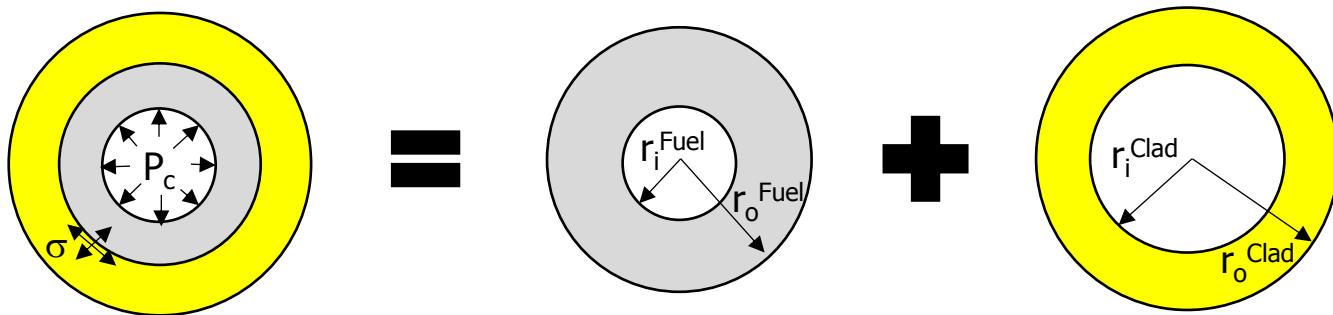
- ✓ Bubble pressure를 과도 상태 공동 내압으로 가정
- ✓ 피복관 상단에 플레넘 압력에 의한 End cap force 인가

✓ 적합 조건 : 연료 외경 = 피복재 내경

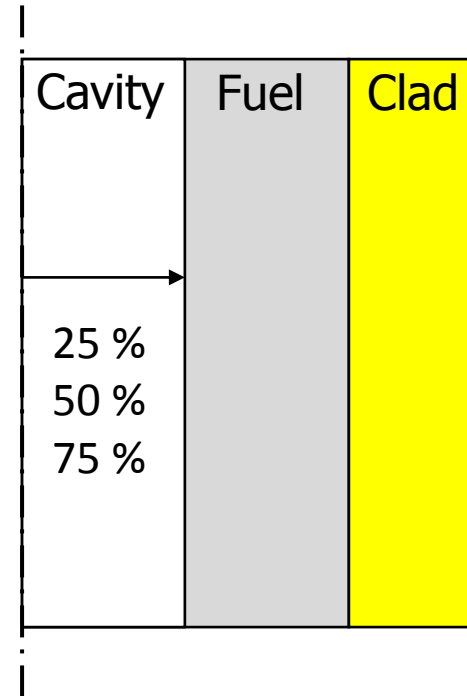
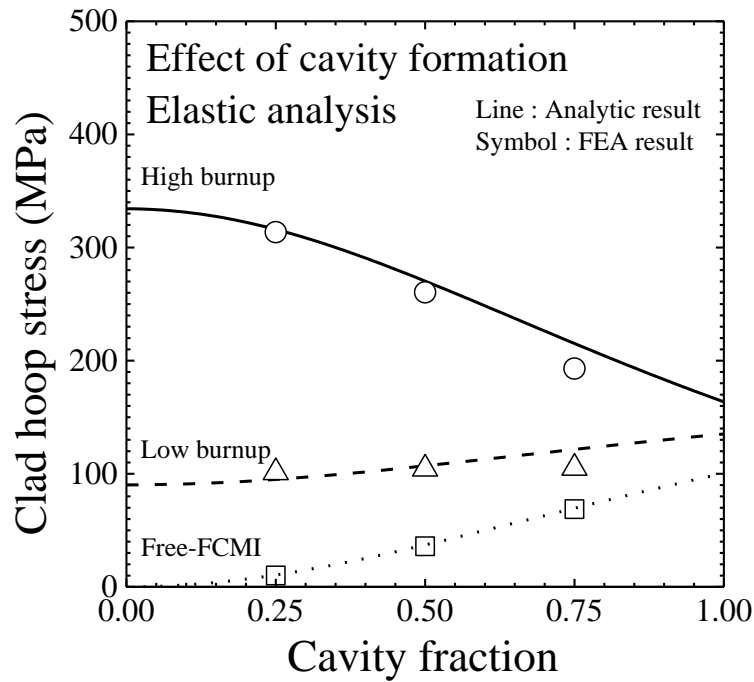
Step 1) 초기 접촉 압력이 주어졌을 때 팽창된 연료의 반경 도출



Step 2) 연료 용융이 발생, 공동 내압이 주어졌을 때 피복관 응력 도출

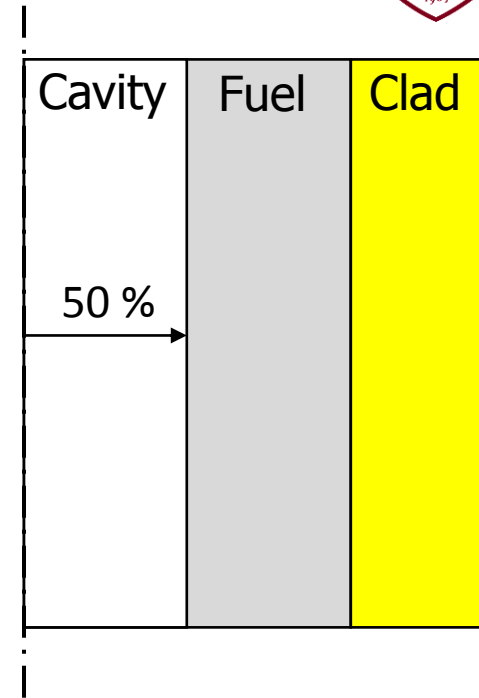
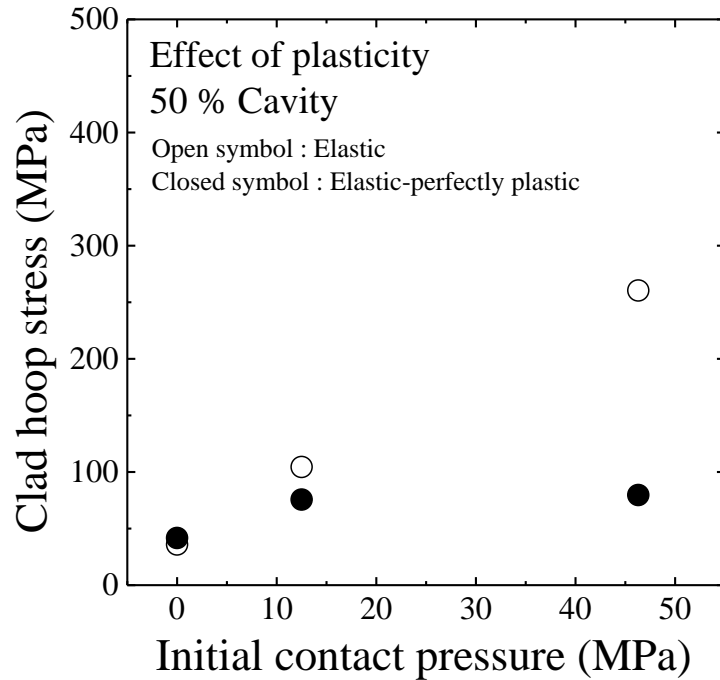






- ❖ 공동의 내압이 초기 접촉 압력보다 낮을 경우 (High burnup)
  - ✓ 공동 성장함에 따라서 피복관 응력 감소
- ❖ 공동의 내압이 초기 접촉 압력보다 높을 경우 (Low burnup, Free-FCMI)
  - ✓ 공동 성장함에 따라서 피복관 응력 증가

	Yield stress
Fuel	11.8 Mpa
Clad	250 MPa



## ❖ 탄성 - 완전 소성 물성 사용

## ❖ 소성 거동으로 인하여 피복재 응력 감소 (Low burnup, High burnup)

- ✓ 전체 연료의 소성 유동으로 인한 변형 저항성(강성) 감소가 원인
- ✓ 전체 연료의 소성 발생 시 피복관 응력 포화

## ❖ 연료 일부 소성 발생 시 응력 재분배 현상으로 인한 피복재 응력 증가

# 문제 정의 - 탄소성 + 열 변형 해석

## ❖ 목표

✓ 열 변형에 의한 피복관 응력 상태 변화 해석

## ❖ 문제 가정

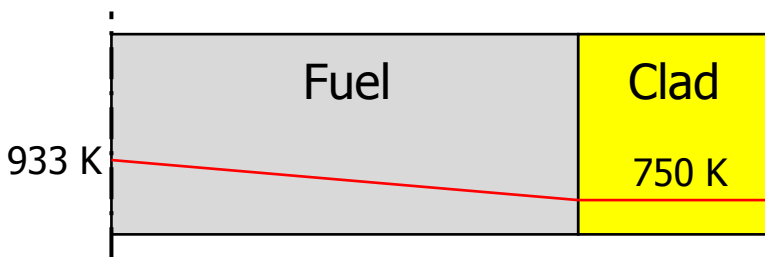
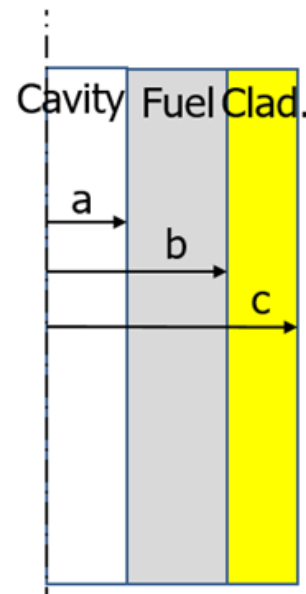
1. 정상 상태 이력 단순화

✓ 과도 상태 진입 시 접촉 압력, 플레넘 내압, 버블 내압

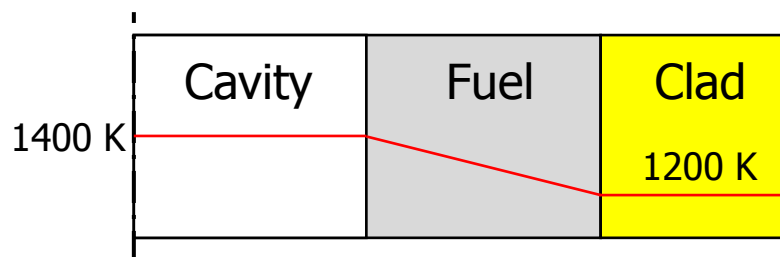
2. 재료의 탄소성 거동, 열 변형 고려

✓ 크립 변형 무시

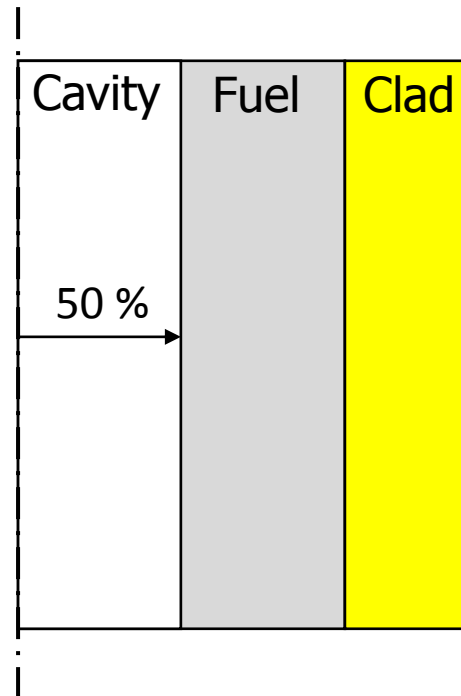
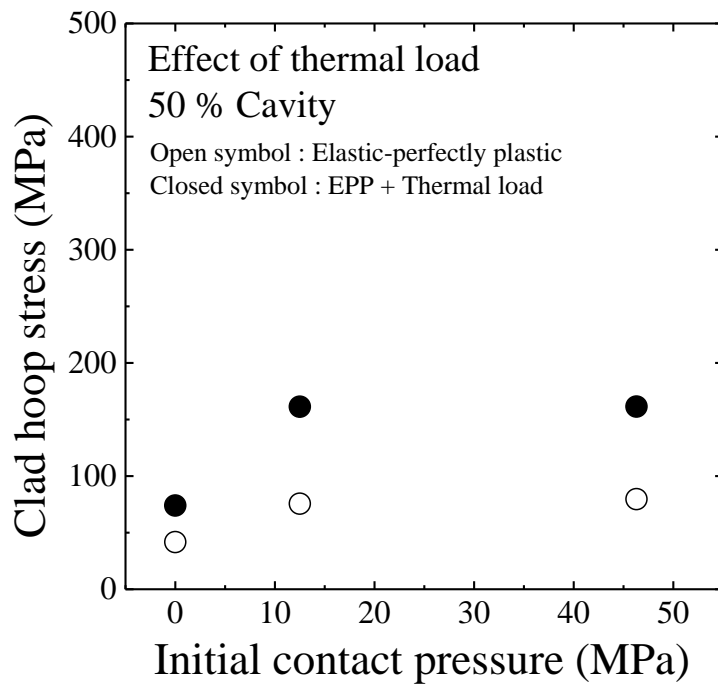
3. 선형 온도 구배 가정



초기 상태 - 정상 상태 운전 조건

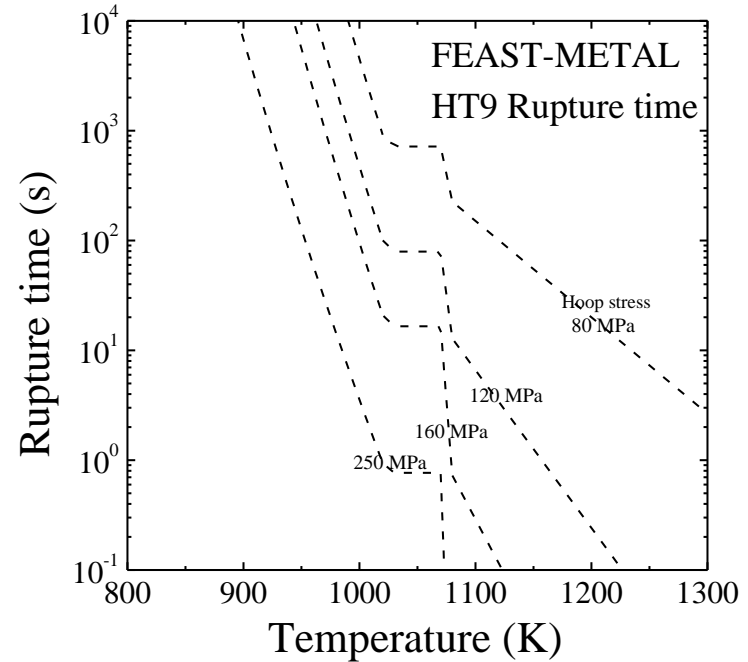
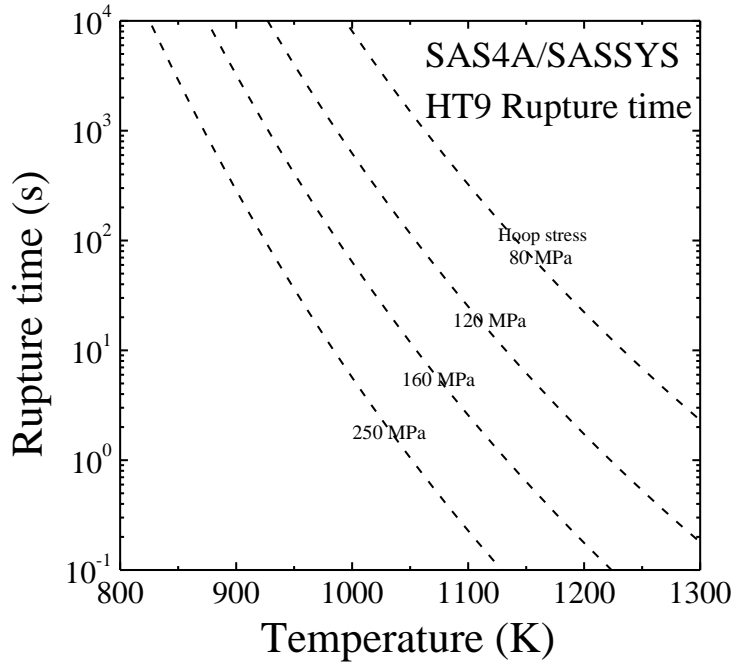


과도 상태



❖ 열 변형으로 인한 응력 상승 확인

# 피복관 크립 수명 예측



	Free-FCMI	Low burnup	High burnup
Temperature (K)	1200	1200	1200
Hoop stress (MPa)	74.0	161.3	161.4
Rupture time (s) SAS4A / FEAST-M	34.13 / 38.82	0.165 / 0.0025	0.164 / 0.0025

# 후속 연구

---

1. 다양한 형태의 공동 형상에 대한 해석 수행
  - ✓ 관통형 외에 구형, 환형 공동 등에 대한 해석 필요
2. 실제 온도 구배 반영
  - ✓ 온도 차이로 인한 열 응력 차이 고려
3. 과도 상태 이력 반영
  - ✓ 과도 상태 크립 및 소성 이력이 응력 상태 및 수명에 영향
4. 공용 현상 반영
  - ✓ 실제 과도 상태 시 공용 현상으로 인한 감육 발생
  - ✓ 감육 현상이 응력 상태에 큰 영향을 미칠 것이라 예상

감사합니다.



## ❖ CAX8 요소

✓ 축 대칭 2차 요소

