

Implementation of Larson-Miller Creep Model to CINEMA code for Simulation of Steam Generator Tube Rupture Accident in APR1400

2020. 12. 17

Hyoung Tae Kim * and Kwang Soon Ha

Accident Monitoring and Mitigation Research Team, KAERI, Daeduk-daero 989-111, Daejeon, Korea

**Corresponding author: kht@kaeri.re.kr*

사고감시대처연구실
디지털가상원전기술개발부



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

목차

1. MELCOR 코드의 Larson-Miller 크립 모델
2. CINEMA 코드 적용에 대한 검증
3. C-SGTR 적용 예비해석
4. 요약 및 결론

1. MELCOR 코드의 Larson-Miller 크립 모델 (1/3)

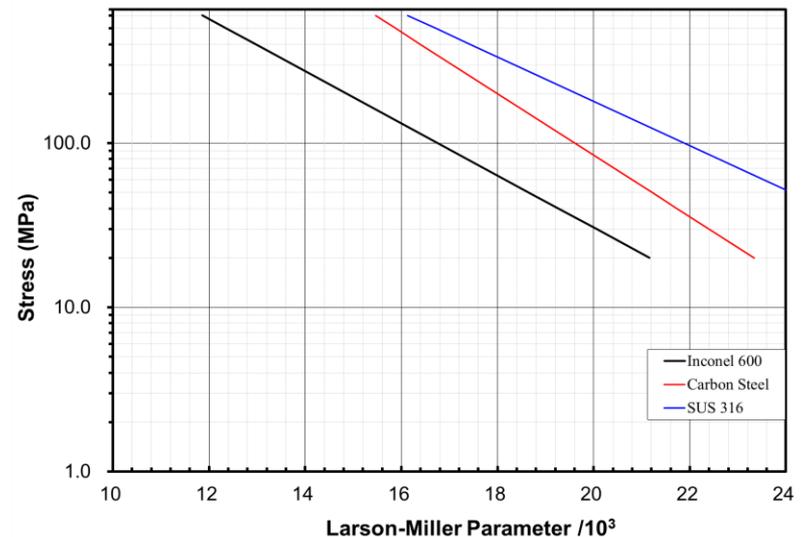
□ Larson-Miller 파라미터

- 구조물에 가해지는 온도 및 stress에 의해 creep이 진행되며, 이로 인한 파손 조건은 구성 물질의 고유 특성인 P_{LM} (Larson-Miller 파라미터)를 계산함으로써 예측할 수 있음

$$\blacktriangleright P_{LM} = C_1 \log(\sigma_{eff}) + C_2$$

<표1> 물질 특성에 따른 P_{LM} 의 계수값

Material	C_1	C_2
Carbon steel	-5335.0	62291.3
SUS 316	-7400.0	81088.4
Inconel 600	-6296.1	67130.0

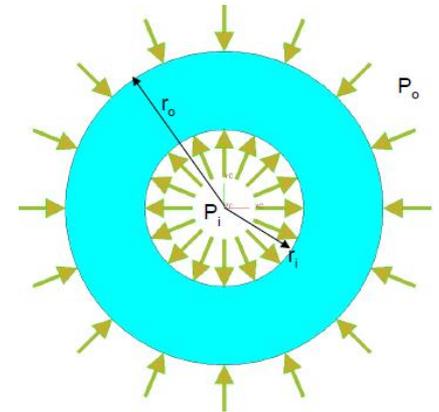


<그림 1> 물질 특성에 따른 P_{LM}

1. MELCOR 코드의 Larson-Miller 크립 모델 (2/3)

○ 원기둥 구조물에서 원주방향의 stress (hoop stress), [Pa]

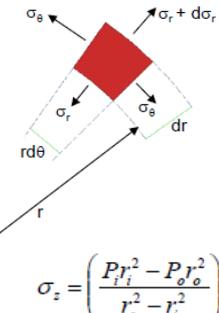
$$\blacktriangleright \sigma_{\theta} = \frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{(P_i - P_o) r_i^2 r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2) r^2}$$



○ P_{LM} 계산에서 사용되는 인자인 σ_{eff}

$\blacktriangleright r = r_i$ 일 때 최대 값을 갖는 σ_{θ} 사용

$$\blacktriangleright \therefore \sigma_{eff} = \frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o + (P_i - P_o) r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2)} = \frac{(r_o^2 + r_i^2) P_i - 2r_o^2 P_o}{(r_o^2 - r_i^2)}$$



$$\sigma_r = \frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{(r_o^2 - r_i^2)} - \frac{(P_i - P_o) r_i^2 r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2) r^2} \quad \sigma_{\theta} = \frac{r_i^2 P_i - r_o^2 P_o}{(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{(P_i - P_o) r_i^2 r_o^2}{(r_o^2 - r_i^2) r^2}$$

$$\sigma_z = \left(\frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \right)$$

<그림 2> 원기둥 구조물에서의 stress 계산

1. MELCOR 코드의 Larson-Miller 크립 모델 (3/3)

□ Creep 파단 시점, t_R 의 계산

○ P_{LM} , 온도 (T), 추가 계수 (C_3) 값을 이용하여

$$\blacktriangleright t_R = 10^{\left(\frac{P_{LM}}{T} - C_3\right)}$$

<표2> 물질 특성에 따른 t_R 의 계수값

Material	C_3
Carbon steel	16.44
SUS 316	16.44
Inconel 600	11.44

□ Creep 도달 까지의 진행율, ε_{new} (life time progress)

○ $\varepsilon_{new} = \varepsilon_{old} + \frac{\Delta t}{t_R}$

○ Fractional life time: $\int \frac{dt}{t_R(t)} \approx \sum \frac{\Delta t_i}{t_R(t_i)}$ (=1.0, Creep 파단 판정)

2. CINEMA 코드 적용에 대한 검증 (1/4)

□ LM 크립 모델 벤치마킹 문제 정의

○ 구조물 내외 압력, 온도

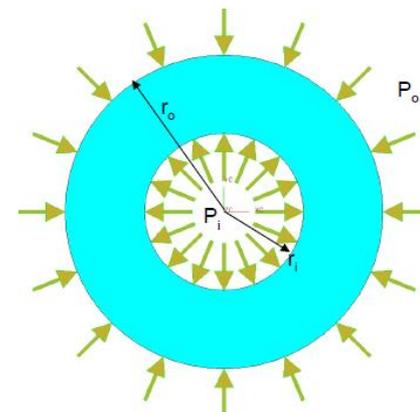
- ▶ APR1400 일차 및 이차계통 운전 압력 조건
- ▶ SG 전열관 용융점 이하 고온점

○ 구조물 형상

- ▶ SG 전열관 내외부 반경

○ 2가지의 크립 물성치 (MELCOR 코드 사용 값)

- ▶ SUS 316
- ▶ INCONEL 600



<표3> LM 크립 계산을 위한 경계 조건들

P_i	P_o	T	r_i	r_o
$1.5 \times 10^7 (Pa)$	$7.0 \times 10^6 (Pa)$	1300.0 (K)	$8.4582 \times 10^{-3} (m)$	$9.525 \times 10^{-3} (m)$

2. CINEMA 코드 적용에 대한 검증 (2/4)

□ LM 크립 모델 벤치마킹 계산

○ 교차 검증을 위한 계산 Case

① Analytical solution

- $t_R = 10^{\left(\frac{P_{LM}}{T} - C_3\right)}$, $\int \frac{dt}{t_R(t)} \approx \sum \frac{\Delta t_i}{t_R(t_i)}$
- $\Delta t_i = 0.1 \text{ sec}$ 로 고정하여 비교 계산 (해석해 및 코드 계산 모두)

② MELCOR 코드 입력 모델

- 자체 내장 패키지 (control function) 에 의한 $\sum \frac{\Delta t_i}{t_R(t_i)}$ 계산

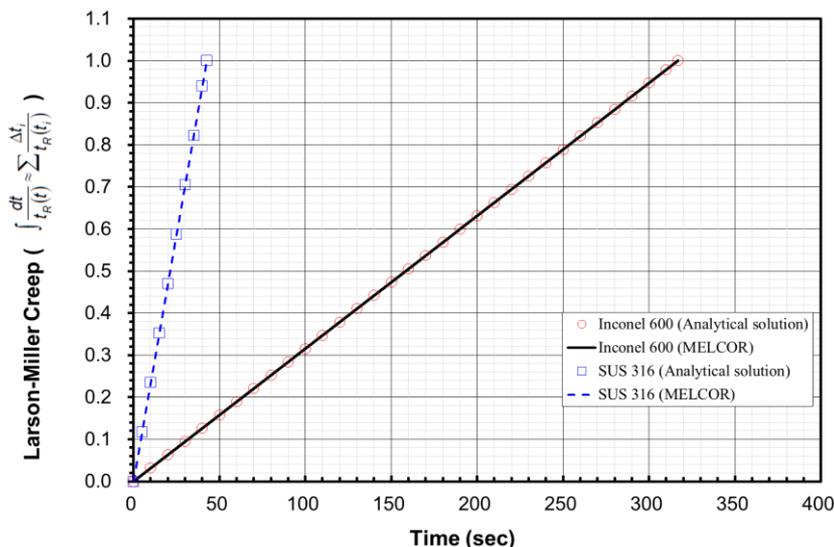
③ CINEMA 코드 입력 모델

- 자체 내장 Control variable 함수들을 활용하여 $\sum \frac{\Delta t_i}{t_R(t_i)}$ 값을 구현하여, 각 time step 별로 explicit 하게 계산

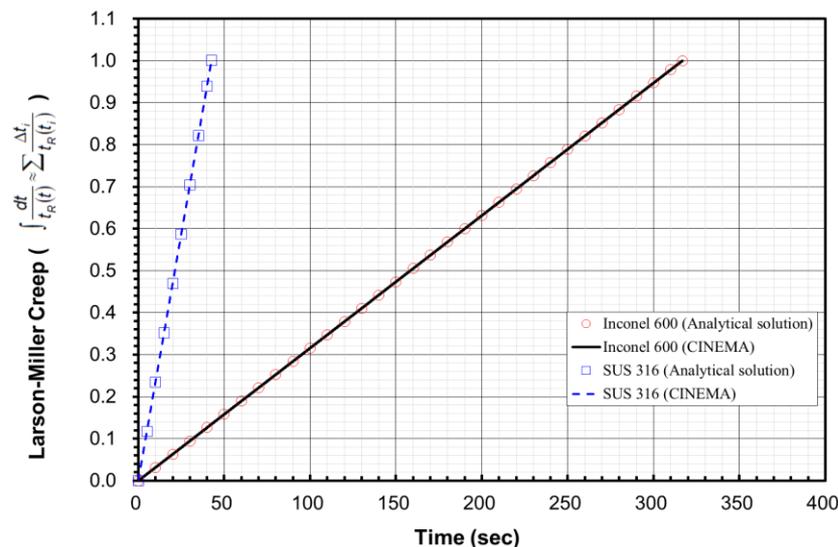
2. CINEMA 코드 적용에 대한 검증 (3/4)

□ LM 크립 모델 벤치마킹 결과

- Analytical solution이 MELCOR 크립 계산 모델을 잘 반영
- 확인된 Analytical solution과 CINEMA 적용 모델 결과 비교



(a) MELCOR vs. Analytical solution 비교



(b) CINEMA vs. Analytical solution 비교

<그림 3> LM 크립 모델 벤치마킹 검증 결과

2. CINEMA 코드 적용에 대한 검증 (4/4)

□ CINEMA 코드의 LM 크립 모델 반영 평가 결과

- 벤치마킹을 위한 크립 조건에 대하여 2가지 구조물성치에 적용한 결과, 크립 파손 예측이 analytical solution과 잘 일치함

<표4> LM 크립 벤치마킹 문제에서의 크립 파손 시점 예측 결과

물성 조건	MELCOR	CINEMA	Analytical solution
SUS 316	42.7 sec	42.6 sec	42.57 sec
INCONEL 600	316.9 sec	316.8 sec	316.72 sec

3. C-SGTR 적용 예비해석 (1/3)



□ 기존의 LM 크립 비적용 모델과 적용 모델간의 비교 계산

○ 비적용 모델 (기존)

- ▶ 고온 전열관 온도가 Inconel 690의 용융점(1,650K) 도달시 파손

○ LM 크립 적용 모델

- ▶ LM 크립 조건을 적용 (Inconel 600 기준)

□ 비교 계산의 목적

○ LM 크립 모델이 C-SGTR 해석에 잘 적용되는지 확인

- ▶ SGTR 시점 예측 시점에 대한 객관적인 계산 근거

○ 용융에 의한 파단시점 보다 더 이른 시점에 SGTR 발생 예상되므로 이후 중대사고 진행에 대한 비교 분석

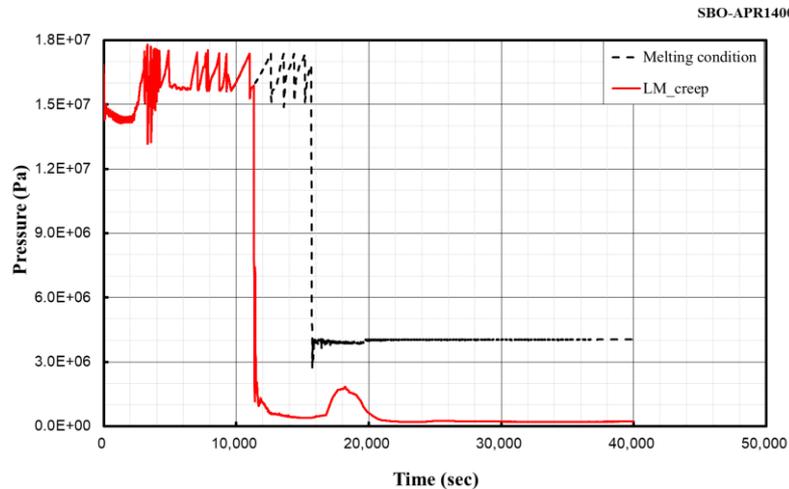
3. C-SGTR 적용 예비해석 (2/3)



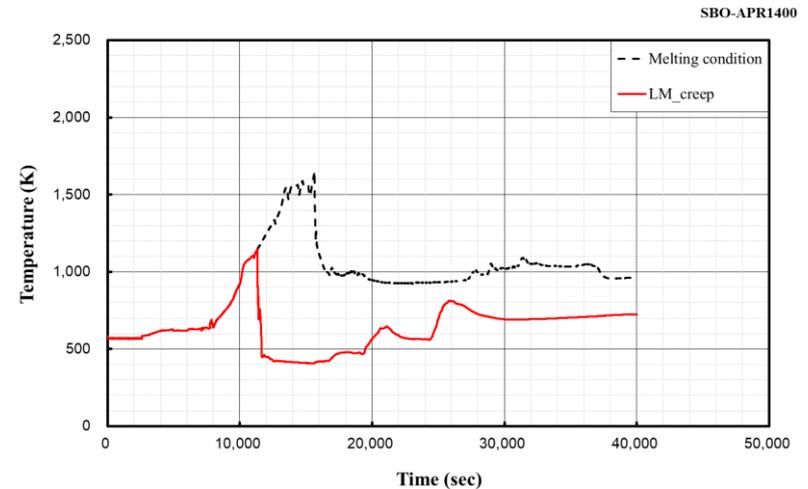
□ LM 크립 모델 적용에 따른 계산 결과의 차이

○ 크립 적용시 상대적으로 SGTR 시점이 앞 당겨짐을 확인

- ▶ 크립 비적용 (Melting 조건): 15,666 sec
- ▶ 크립 적용 (LM_creep): 11,319 sec



<그림 4> 일차 계통 압력 변화



<그림 5> SG 전열관 온도 변화

3. C-SGTR 적용 예비해석 (3/3)

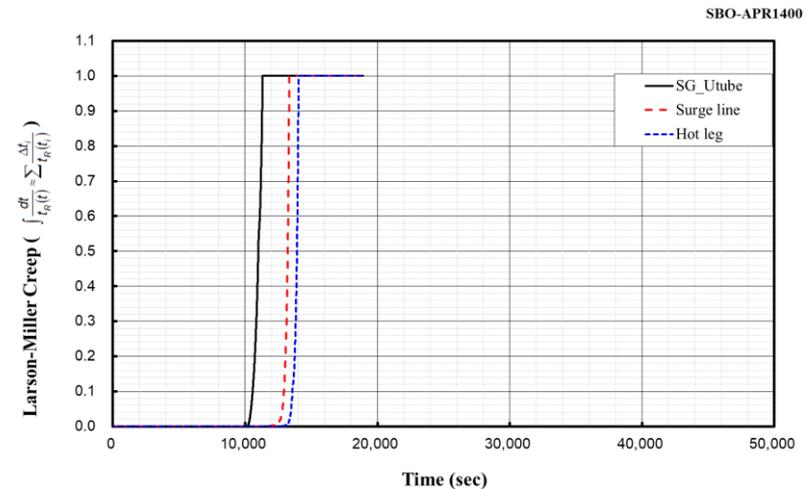


□ 크립 파단 예측 시점의 비교

○ SG 전열관, 가압기 밀림관, 고온관 순서로 예측됨

크립 적용 위치	적용된 물성	크립 파단 시점
SG 전열관	Inconel 600	11,319 sec
가압기 밀림관	SUS 316	13,333 sec
고온관	SUS 316	14,037 sec

▶ SG 전열관 크립은 10,000초 이후 급격히 진행됨



<그림 6> 크립 분율 변화에 따른 발생 시점의 비교

4. 요약 및 결론

□ MELCOR 코드의 LM 크립 모델을 CINEMA 코드에 채용

- MELCOR 코드에서 사용된 크립 모델에 대한 분석
 - ▶ 계산 상관식, 기본 입력 조건, CINEMA 코드 적용 방안
- CINEMA 코드 적용의 검증을 위한 벤치마킹 비교 계산 수행
 - ▶ CINEMA 코드 적용성 확인

□ C-SGTR 사고 예비 해석 적용 결과

- Larson-Miller 크립 모델을 고온의 전열관에 적용하여 C-SGTR 사고 해석을 수행한 결과, 기존의 용융에 의한 파단시점 보다 앞 당겨서 SGTR 사고를 모의할 수 있음을 확인

□ 앞으로의 과제

- C-SGTR 사고의 CINEMA 코드 계산 결과에 대한 신뢰성 제고 필요
 - ▶ 타당한 사고해석 결과의 분석
 - ▶ 중대사고 현상 진행 전반에 대한 코드 예측 능력 평가