

'97 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

## 노심용융사고시 원자로 압력용기 하반부 거동연구(II)

임동철, 정광진, 황일순

서울대학교

서울시 관악구 신림동 산56-1

### 요 약

Sandia National Laboratories(SNL)에서 수행된 원자로 용기의 고온, 고압 크리프 파괴 실험의 하나인 Lower Head Failure-1(LHF-1)에 대한 코드 해석을 수행하였다. 해석 코드는 범용 유한요소 구조해석 코드인 ABAQUS를 사용하였고, Idaho National Engineering Laboratory(INEL)의 크리프 데이터를 이용하였다. 크리프 해석에는 strain hardening 식을 적용하였고, 크리프 데이터를 적용하기 위해서 user subroutine을 개발하였다. 민감도 분석의 일환으로 내부 압력을 1.2배로 증가시킨 경우에 대해 수행한 해석 결과가 실험 결과와 유사하였다. 해석 결과를 분석하여 현 크리프 데이터의 절대적 부족을 확인하였고, 크리프 데이터 생산을 위한 크리프 시험을 계획하였다.

### 1. 서론

고온 상태의 노심이 용융 후 압력용기 하반부에 재배치될 때, 내부의 고압상태로 인해 압력용기가 크리프변형을 할 수 있고 이로 인해 용기강의 천공을 유발할 수 있다. 이러한 변

형거동의 예측에는 유한요소법 등에 의한 전산해석이 주로 이용되어 왔으며, SNL에서는 원자로 압력용기 1/5 규모의 고온, 고압 크리프 파괴 실험(LHF)을 수행한 바가 있다[1]. 고온, 고압시에 변형이나 파괴의 주된 요인은 크리프이다. 크리프 거동을 전산모형화하는 데는 기억 효과(memory effect)는 차치하더라도 각 온도에서 일정 하중 또는 일정 응력하의 크리프 시험을 통해 얻어진 데이터를 온도와 응력이 계속 변화하는 상태에 어떤 방식으로 적용하는가 하는 어려움이 있다(strain hardening, time hardening, life fraction 등). 이번 해석에서는 실험 결과와 더 잘 일치한다고 알려진[2] strain hardening 식을 이용하였다.

## 2. 모형 설명

### 2.1. 유한요소 모형

LHF-1 압력용기에 대한 변형거동을 구조해석 코드인 ABAQUS, Version 5.5-1을 이용하여 유한요소 모형을 가지고 해석하였다[3]. 이 모형은 2차원 축대칭-고체-4 노드-요소로 구성되어 있고, 대칭축으로부터 45.5 cm 거리의 구형 꺾질 모양을 하고 있다. 이 모형의 두께는 약 3 cm인데 용기 제조상의 문제로 인해 3 mm 정도의 편차가 있어, 위도별로 경도 방향에 대한 최소값을 택해 모형에 적용하였다. 이는 가장 얇은 부분이 변형에 가장 취약하다는 가정에 근거한 것이다. 이 모형은 두께 방향으로 10개의 요소를, 원주 방향으로 90개의 요소를 가지고 있어 총 1001개의 노드와 900개의 요소를 가진다.

### 2.2. 재료의 물성치

LHF-1 실험재료인 SA533B1 탄소강에 대한 열팽창 계수, 탄성 계수, 항복점, 응력-변형도 곡선 등 구조해석에 필요한 대부분의 물성치는 기본적으로 TMI-VIP 데이터[4]를 사용하였다. 크리프 데이터는 INEL 데이터[5]를 사용하였는데 그 이유는 시간에 대해 모든 실험 데이터가 fitting된 형태이고 상관계수  $R^2$ 가 모두 0.995 이상으로 우수하기 때문이다. 표 1의 특정 온도와 응력에 대한 데이터를 연속적으로 변하는 온도와 응력 상태에 적용할 수 있도록, 내삽 또는 외삽한 후 strain hardening 식을 적용하는 creep subroutine을 개발하였다.

내삽 또는 외삽 방법으로는 응력에 대해서는 Bailey-Norton 식의  $\sigma^n$  형태를 이용하여, 지수 n을 결정하였고, 온도에 대해서는  $\exp(-1/T)$  형태를 이용하였다.

### 2.3. 열적, 기계적 부하

LHF-1 시험시 측정된 압력용기의 온도 분포는 그림 2와 같다. 위도 6°, 30°, 90° (90° : 하향 반구 최하단 지점)에서 주어진 값을 모든 위도에 대해 선형 내삽하여 사용하였으며, 바깥벽의 단열면이 완벽하게 열을 차단한다는 가정하에 두께 방향으로 균일한 온도를 적용하였다. 시험시 측정된 압력 이력은 그림 3에 나타나 있다. 민감도 분석의 일환으로 실제 압력, 실제 압력의 1.1배, 그리고 실제 압력의 1.2배 경우에 대하여 각각 해석을 수행하였다.

### 2.4. 해석 절차

ABAQUS의 구조해석 선택사항 중 열적, 탄·소성, 그리고 크리프 거동의 해석이 가능한 VISCO를 이용하여 해석하였다. 10000초에 대한 해석을 수행하였는데 실험에서 크리프 파괴가 일어난 8700초 이후에는 기록된 데이터가 없기 때문에 8700초 이후로는 8700초의 데이터를 연장하여 사용하였다.

## 3. 결과

실제 압력, 실제 압력의 1.1배, 그리고 실제 압력의 1.2배 경우에 대한 해석 결과가 그림 4, 그림 5, 그림 6에 나타나 있다. 위도 30°, 60°, 90° 에서 수직 방향의 변형을 나타낸 것인데, 점으로 표시된 것이 실험 결과이고 선으로 표시된 것이 해석 결과이다. 실제 압력 1.2배 경우에 실험 결과와 비슷한 기울기를 가지며 변형이 진전되어감이 보인다.

## 4. 결론

INEL 크리프 데이터는 각 온도에서 두 응력상태에 대해 전개된 형태이고 이러한 온도범위

또한 고온으로 갈수록 부족하다고 할 수 있다. 특히 1000 K 부근에서 상변화를 수반하므로 물성의 급격한 변화를 보인다(그림 1). 따라서 현재의 데이터로 예측하는 모형의 한계를 생각하지 않을 수 없게 된다. 그림 4, 그림 5, 그림 6에서 마지막에 다시 기울기가 감소되는 점이 크리프 데이터가 바뀌는 지점인데 이는 1000 K 부근의 크리프 데이터가 부족한데서 오는 fitting 상의 오류라 할 수 있다. 결론적으로 내부 압력을 1.2배 하였을 때 실제 실험 결과와 유사한 결과를 얻었는데 이는 크리프 데이터가 한 온도에 대하여 두 가지 응력 상태에 대하여 주어져 응력에 대한 fitting이 불충분하다고 볼 수 있다. 압력용기 하반부의 거동을 정확하게 예측하기 위해서는 풍부한 크리프 데이터의 확보가 필수적이라는 판단하에 차세대원전 압력용기 재료로 사용될 SA508-Class 3에 대한 인장 및 크리프 특성 측정실험이 계획되었다.

## 참고 문헌

- [1] T.Y. Chu et al., A Preliminary Assessment of the Effects of Heat Flux Distribution and Penetration on the Creep Rupture of a Reactor Vessel Lower Head, Sandia National Laboratories, 1996
- [2] H. Kraus, Creep Analysis, New York: John Wiley and Sons, 1980
- [3] Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., ABAQUS User's Manual, Version 5.5-1, Providence, Rhode Island, 1995
- [4] L. A. Stickler et al., Calculations to Estimate the Margin to Failure in the TMI-2 Vessel, TMI V(93)EG01, OECD-NEA-TMI-2 Vessel Investigation Project, September, 1993
- [5] J. L. Rempe et al., Light Water Reactor Lower Head Failure Analysis, NUREG/CR-5642, EGG-2618, October 1993

Temp(K)	Stress(Mpa)	A	B	C	D	R <sup>2</sup>
900	140.1	5.11E-04	3.55E-03	-4.41E-0	2.11E-05	0.9998
900	69.7	1.35E-03	4.41E-04	-6.63E-0	1.00E-07	0.9998
1000	55.6	2.91E-03	6.35E-02	-1.94E-0	3.00E-03	0.9980
1000	39	5.49E-03	1.84E-02	-6.24E-0	3.64E-04	0.9997
1050	26.4	7.24E-04	1.58E-02	-9.07E-0	8.37E-05	0.9980
1050	13.9	8.84E-03	1.46E-03	-7.28E-0	2.51E-08	0.9994
1150	26.5	9.33E-03	5.75E-02	-1.00E-0	2.04E-03	0.9998
1150	12.5	9.77E-04	4.38E-03	-8.78E-0	1.56E-06	0.9991
1250	12.6	-5.17E-0	1.47E-01	-7.33E-0	3.35E-02	0.9957
1250	8	3.06E-03	4.09E-03	-3.38E-0	9.77E-07	0.9995
1373	7	9.47E-03	4.44E-01	-9.22E-0	1.71E+00	0.9993
1373	3.5	-6.99E-0	7.30E-03	-2.60E-0	5.30E-06	0.9970

$$\epsilon_{cr} = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$$

여기서,  $\epsilon_{cr}$  = creep strain

t = time(h)

A, B, C, D = constants

표 1. INEL의 SA533B1 크리프 데이터에 대한 3차 fitting.

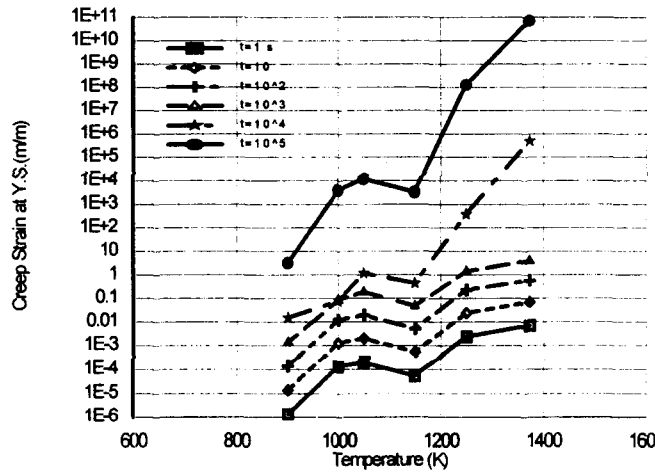


그림 1. INEL 크리프 데이터  
(항복 강도에서 시간에 따른 변형도)

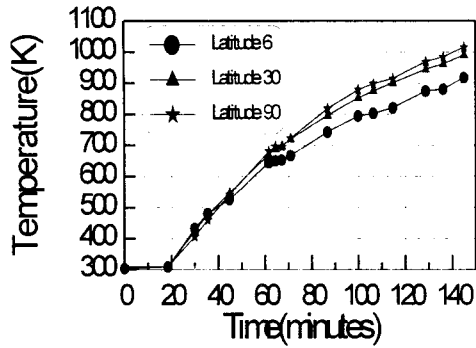


그림 2. LHF-1의 온도 분포와 이력

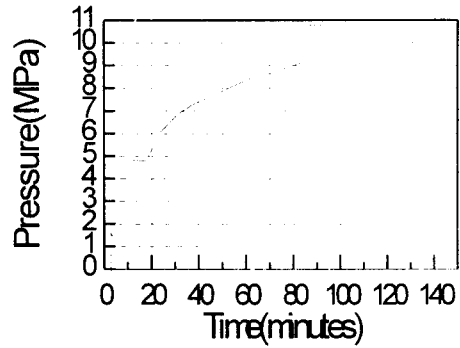


그림 3. LHF-1의 압력 이력

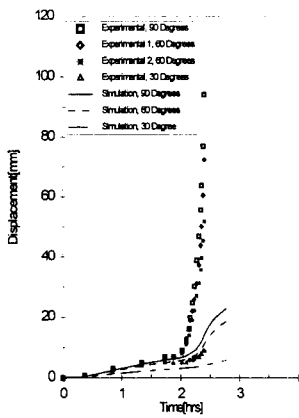


그림 4. 수직 변형  
(실제 압력)

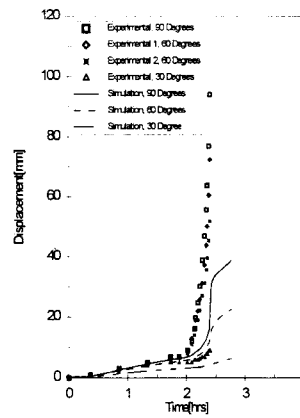


그림 5. 수직 변형  
(실제 압력 × 1.1)

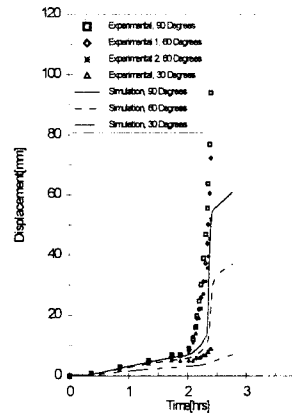


그림 6. 수직 변형  
(실제 압력 × 1.2)