'96추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

노심용융사고시 원자로 압력용기 하반부 거동연구

정광진 · 임동철 · 황일순
서울대학교
서울시 관악구 신림동 산56-1

요약

OECD-NEA 주관으로 수행된 TMI-2의 압력용기 변형연구의 결과, 하반부의 creep해석에 많은 문제점이 제기되어 있다. 본 논문은 TMI-2 노심용융 사고에 대한 기존 구조해석에서 creep 상관식의 형태, 적용방법및 FEM 해석절차상의 상이점을 밝혀내고 이에 따라 압력용기 하반부의 파손확률이 크게 다르게 결정됨을 보였다. 기존의 TMI-2 구조해석에서 주 오차의 요인으로서 시간의 변화에 따른 국부열점 및 이를 포함한 재배치된 용융노심의 열경계조건의 불확실도와 압력용기강의 creep strain을 시간 및 온도에 대하여 불충분하게 묘사한 점을 밝혔다. 또한 creep-rupture 예측에 사용된 Larson-Miller Parameter도 해석을 지나치게 보수적인 결과로 유도하였다. 중대사고시 압력용기 하반부 천공방어를 위한 방안인 용기하부 외벽 냉각방식을 적용하였을 때 TMI-2 사고를 재해석한 결과, 압력용기의 건전성이 충분한 보수성을 가지고 유지됨을 보였다.

1. 서론

TMI-2 사고와 같이 고온상태의 노심이 용융후 압력용기 하부에 재배치 될 때 경우에 따라 내부의 고압상태(약 15MPa)로 인해 압력용기가 creep 변형을 하게된다. TMI-2 용융사

고에 대한 기존의 연구중 독일과 일본에서 수행한 유한요소법에 의한 creep rupture 모형을 비교 분석하고 각각에 대하여 주요 변수를 바꿔가며 재해석을 수행한 결과, 용기의 변형 및 파손 예측이 서로 일치하지 않는다는 결론을 내렸다. 뿐만 아니라, 실제 TMI-2 용기 하반부의 creep 변형은 무시될 정도였다. 두 모형은 매우 큰 변형을 예측하였다. 이러한 오차의 원인을 분석하기 위하여 본 연구에서는 동일한 TMI-2 경우에 대하여 독립적 검증 계산을 수행하였다. 구조해석을 수행하기 위하여 상용 유한요소 코드인 ABAQUS 5.5를 이용하였다.

2. 원자로 압력용기 하반부 구조해석 수행결과

2.1 Creep 해석 입력조건

SA533 Class B로 제작된 TMI-2 용기하반부를 2차원 축대칭 모형화하고 온도변화에 따른 열적·기계적 물성데이터로 U.S. N.R.C 기준치를 사용하였다. 열전달 경계조건과 creep strain을 일본 Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) 와 독일 Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit (GRS)에서 수행한 입력자료[1]를 입수하여 각각에 대하여 계산을 수행하였다. 단일축 인장실험에서의 creep strain은 주어진 응력(σ)과 온도(T)상태에서 다음과 같은 식①로 표현된다.

$$\varepsilon_{creep} = A + Bt - Ct^2 + Dt^3$$

여기서, ... ①

ε_{creep} = *creep strain*
t = 시간
A, B, C 와 D = 상수

위의 식은 primary, secondary 및 tertiary creep이 모두 고려 되었으며 주어진 응력(σ)과 온도(T)에서 A, B, C, D의 계수가 각각 결정된다. 일반적인 전산해석에서는 파손 단계에서 중요한 tertiary creep은 제외하고 있다. 따라서 creep strain은 시간(t)과 응력(σ), 그리고 온

도(T)의 함수이다. 이러한 parameter들로 표현되는 creep을 해석하기 위해 JAERI 에서는 시간에 대하여 식 ②와 같이 선형적으로 creep strain이 변한다고 가정하여 secondary creep 만을 고려한 계산을 수행하였고, GRS에서는 식 ③과 같이 온도에 대하여 지수함수로 creep strain이 변한다고 가정하였으나 응력 및 온도에 따른 변동을 충분히 반영하지 않았다. 이와 같은 제한은 각 FEM 모형의 입력한계에 기인하며, 상기 두 경우의 creep strain에 대한 입력자료를 비교하면 그림 1과 같이 많은 차이를 나타낸다.

JAERI에서는 다음의 상관식을 온도의 함수로 사용했다.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A\sigma^n$$

여기서,

ε = *von Mises creep strain* ..... ②

σ = *von Mises stress*

t = 시간

A, n = 상수

GRS는 대표적 온도 및 응력범위에서 아래와 같은 단순 상관식을 사용했다.

$$\varepsilon = A_1\sigma^{A_2}(t^{A_3} + A_4 t^{A_5})e^{\frac{-A_6}{T}}$$

여기서,

ε = *von Mises creep strain* ..... ③

σ = *von Mises stress*

t = 시간

$A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ = 상수

2.2 계산결과

가. JAERI의 TMI-2 해석 검증모형

직경 약 1 m의 국부열점의 열경계 조건으로 두께방향으로 온도분포를 시간에 대하여 그림 2와 같이 사용했다. 2차원 축대칭 모형이므로 국부열점 영역은 대칭축으로부터 반경 0.5 m

이내이고 대칭축이 국부열점 영역의 중심이 되는 곳이다. 용기 내부의 압력조건으로는 11.6 MPa을 일정하게 유지하고 있다. 이 때 노심이 재배치된지 약 3,000초 후의 구조해석 결과는 국부열점에서 용기의 안쪽표면으로 부터 두께 방향으로 최대 Mises creep strain이 약 50%에 이르는 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 입력자료로 쓰인 creep strain이 그림 1과 같이 크고 열경계조건으로 쓰인 온도도 높기 때문이다. 이처럼 사고 해석의 creep이 과대 예측되자 Rempe등은 corium debris의 균열을 통한 냉각 가능성을 제시한 바 있다[2, 3].

나. GRS의 TMI-2 해석 검증모형

GRS는 국부열점 영역의 열경계 조건을 그림 3과 같이 시간의 변화에 대하여 선형보간을 하였기 때문에 JAERI의 경우에 비하여 상대적으로 완화된 온도분포를 갖고 있다. 2차원 축대칭 모형을 갖고 있으며 그 대칭축에 국부열점 영역의 중심이 있고 대칭축에서 부터 반경 0.5 m까지의 국부열점 영역의 말단까지 열경계조건을 역시 선형보간하여 주었으므로 국부열점 영역이 최고온도에 머물러 있는 시간과 최고온도 분포 영역이 JAERI의 경우에 비하여 협소하게 된다. 용기내부의 압력조건으로는 그림 4과 같이 시간에 따라 변하는 TMI-2 금속조직 검사를 이용한 실측 데이터를 쓰고 있다. Creep strain 입력자료는 그림 1에서 보듯이 JAERI 경우에 비하여 상대적으로 작은 값을 나타내는데 이는 실험데이터중 일부 온도 영역의 creep strain값을 보간하였기에 온도의 변화에 따라 creep 실험 데이터와 맞지 않는다. 해석결과는 JAERI의 결과와는 대조적으로 10,800초가 지나도 최대 creep strain이 약 6%에 지나지 않는다는 결과를 나타냈다.

다. GRS의 열경계조건에 JAERI의 creep을 어울린 해석

JAERI의 결과가 creep strain을 지나치게 크게 예측하고 GRS의 creep strain은 일부 온도에서만 맞으므로 TMI-2 사고시와 가장 유사한 조건을 모사하기 위해 JAERI의 creep

strain 데이터에 GRS의 열경계조건과 내부 압력조건을 주었다. 그 해석 결과가 그림 5에 나타나 있다. 노심이 재배치된후 10,800초 후의 변형된 모습을 1:1의 비율로 나타내고 있으며, 이때의 국부열점의 중심에서의 creep strain과 plastic strain을 압력용기 안쪽 표면에서부터 두께 방향의 바깥쪽 표면까지 도시한 결과가 그림 7에 나타나 있다. 최대 creep strain이 약 50%에 도달하였으며 이는 실제 TMI-2 에서 최종 변형보다 매우 크므로 지나친 보수성을 내포하고 있음을 알 수 있다.

라. 최적 입력을 어울린 Ex-vessel 냉각효과 해석

GRS의 열경계조건에 JAERI의 creep strain 데이터를 어울린 해석에 ex-vessel 냉각이 TMI-2 원자로 외벽에 적용되었다고 가정하여 그 효과를 해석하였다. 그림 9는 5 mm의 간극을 가진 직경 약 30 cm의 하향 반구틈 사이에서 물의 열전달 실험을 수행한 결과 얻어진 열전달계수이다. 수직 상향을 0°로 잡고 120°, 150°, 165° 각각의 위치에서의 막비등 영역에서 부터 quenching[4, 5]한 결과이고 좌측의 데이터는 핵비등 영역에서의 정상상태에서의 데이터이다[6]. 보수적인 계산을 수행하기 위하여 이중 막비등영역에 있는 열전달계수중 가장 낮은 값을 원자로 외벽의 경계조건으로 대입하여 해석한 결과가 국부열점 중심에서 노심이 재배치 된지 10,800초가 지난 뒤 안쪽 표면에서부터 두께방향으로 바깥쪽 표면까지 도시된 결과가 그림 8에 나타나 있다. 34%의 creep strain을 보인 내벽에서는 약 5%의 creep strain을 보였고 약 50%의 creep strain을 보인 외벽에서는 creep에 의한 변형이 0% 였다. 따라서 ex-vessel 냉각은 압력용기 하반부의 건전성을 확보하는데 매우 효과적임을 알 수 있다.

3. 결론

기존 TMI-2 압력용기 하반부에 대한 구조해석을 검토한 결과 일본 JAERI와 독일 GRS의

creep 모형 열경계 조건이 크게 다른데서 결과의 불일치가 발생하였다는 결론을 내렸다. GRS의 경우에 JAERI의 creep strain입력조건을 주고 해석한 결과가 보여주듯이 creep 상관식의 차이가 전체 구조해석에 큰 변수로 작용함을 알 수 있다. 비록 심한 응력변형을 하게 되는 이러한 조건 하에서도 외벽의 열경계조건에 따라 용기의 건전성이 크게 좌우될 수 있음을 확인하였다. 예로서 TMI-2와 같은 노심 용융사고시 용기 외벽 냉각조건에서는 creep rupture가 일어나지 않을 것임을 보였다.

- 감사문

ABAQUS 입력자료를 주신 K. Hashimoto (JAERI)와 creep 자료를 주신 P. Gruner (GRS)에게 감사한 마음을 표합니다.

- 참고문헌

1. OECD, "Three Mile Island Reactor Pressure Vessel Investigation Project", Proc. of an open forum sponsored by the OECD NEA and the USNRC, 1994

2. J.L. Rempe et al., Light Water Reactor Lower Head Failure Analysis, NUREG/CR-5642, EGG-2618, October 1993.

3. 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 VIP, 1993

4. F.P. Incropera and D.P. DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 3rd ed, JOHN WILEY &SONS, Singapore, 1990

5. K. Nishikawa and Y. Fujita, "Nucleate Boiling Heat Transfer and Its Augmentation", Advances in Heat Transfer, Vol. 20, ACADEMIC PRESS, U.S.A., 1990

6. 정광진, "Saturated Boiling Heat Transfer of Water in Hemispherical Narrow Space to Analyze TMI-2 Hot Spot Survival Model", 서울대학교 공학석사학위논문, 1996

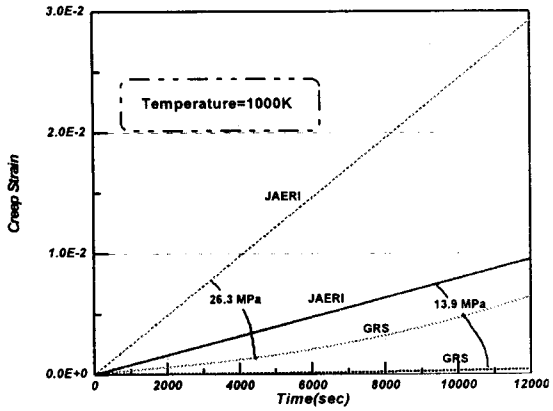

그림 1. JAERI와 GRS의 creep data 비교
(1000K, 13.9MPa 및 26.3MPa)

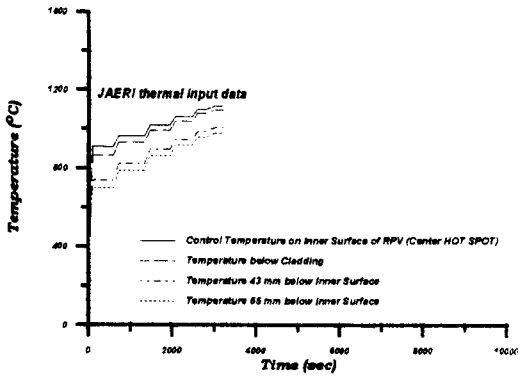

그림 2. JAERI의 TMI-2 사고
해석용 thermal input

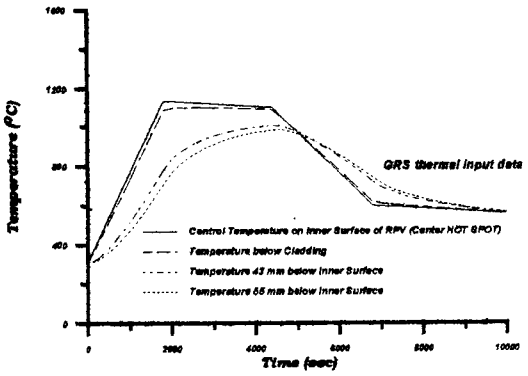

그림 3. GRS의 TMI-2 사고
해석용 thermal input

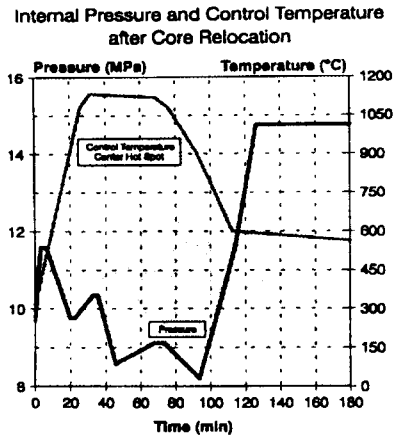

그림 4. GRS의 TMI-2 사고 해석용
온도와 압력 이력

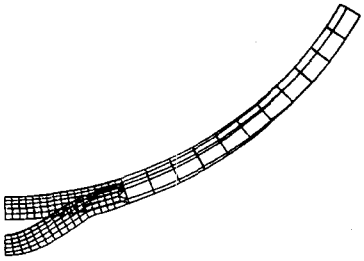

그림 5. GRS의 열경계조건에 JAERI의 creep을 어울린 최적조건해석, 노심 재배치후 3시간 경과후 변형된 모습

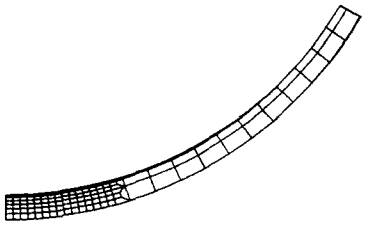

그림 6. 최적 입력에 ex-vessel 냉각효과를 어울린 해석, 노심 재배치후 3시간 경과후 변형된 모습

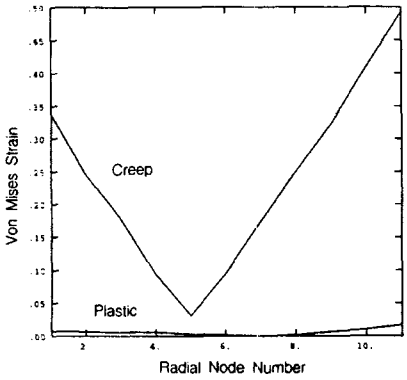

그림 7. GRS의 열경계조건에 JAERI의 creep을 어울린 최적조건해석, 노심 재배치후 3시간 경과후 strain의 분포

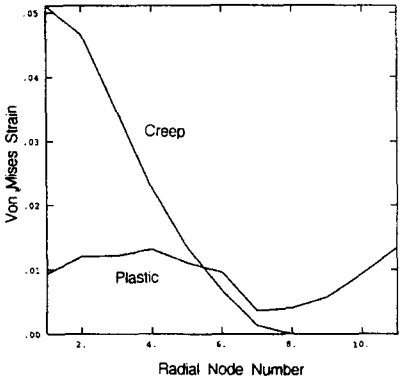

그림 8. 최적 입력에 ex-vessel 냉각효과를 어울린 해석, 노심 재배치후 3시간 경과후 strain의 분포

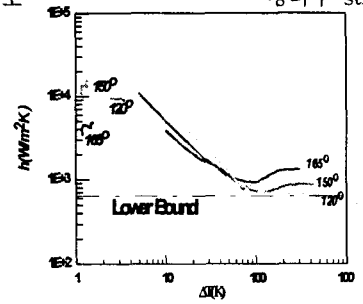

그림 9. Ex-vessel 간극 열전달 계수와 그 하한치