2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중대사고시 원전 압력용기 재료에 대한 크리프 데이터베이스 평가

Evaluation of Creep Database for Nuclear Pressure Vessel Steel under Severe Accident Conditions

전현철, 오영진, 정광진, 황일순

서울대학교
서울시 관악구 신림동 산 56-1

요약

중대사고시 압력용기 하반부 크리프 변형 예측을 위해서는 압력용기 재료에 대한 정확한 크리프데이터를 확보함과 동시에 크리프데이터의 차이가 해석결과에 미치는 영향을 평가하는 것이 필요하다. 기존의 다섯 가지 SA533B1 크리프데이터를 사용하여 크리프 구성식을 구성하고 이를 바탕으로 압력용기 하반부의 변형을 해석하였다. TMI-2 사고당시의 압력이력을 적용한 결과, 크리프 구성식들의 큰 편차는 하반부 변형량의 차이로 나타났다. 이로 인해 중대사고시 크리프 변형이 압력용기 하반부 변형의 주된 인자이며, 적절한 크리프데이터의 선택이 중요함을 확인하였다. 압력을 2MPa로 감압하여 해석한 결과, 열팽창 기여분이 변형의 주된 인자였으며, 중대사고시 시기 적절한 감압으로 크리프 변형을 줄일 수 있음을 확인하였다.

Abstract

To properly predict the creep behavior and failure time of RPV lower head in case of severe accident, it is necessary that we should have accurate creep data set of RPV lower head material and evaluate the effect of difference in creep data sets on the RPV lower head analysis. Five available sets of creep database for SA533B1 low alloy steel have been critically evaluated and each sets of raw data and fitted data are examined by applying to RPV lower head analysis using finite element method. When a representative temperature and pressure history from Three Mile Island Vessel Investigation Project is applied with these databases, large discrepancy has been displayed on calculated lower head deformation and this discrepancy has been attributed to the difference in fitted data. It means that creep deformation is the major factor of RPV deformation and also that the adopting appropriate creep data set is very important. Analysis result shows that thermal expansion is more responsible for the deformation in case of 2 MPa scenario and it is concluded that depressurization would prevent RPV creep deformation in case of severe accident.

1. 서론

가압 경수로의 노심 용융 사고시, 원자로 압력용기 하반부는 재배치된 용융 노심과 내부 압력으로 인한 과도한 열적, 기계적 하중에 의해 크리프 파손을 일으킬 수 있다. 노심 용융 사고시 압력용기의 크리프 파손확률, 파손시간, 파손 유형 그리고 파손부위의 크기 등에 대한 정확한 예측은 전체 사고 진행에 대한 평가와 사고 완화 대책 수립에 있어 필수적이다.

TMI-2 사고 이후 압력용기 하반부 크리프 변형 예측모형의 개발을 위한 여러 연구를 통하여 크리프데이터의 중요성이 부각되었고, 압력용기 재료에 대한 정확한 크리프데이터를 확보함과 동시에 크리프데이터의 차이가 해석결과에 미치는 영향을 평가하는 것이 필요하다는 것을 알게 되었다.

2. 연구배경

중대사고 대책 수립 노력의 일환으로써, 미국의 Sandia National Lab.에서는 1988년부터 1993년까지 수행된 TMI-2 Vessel Investigation Project(VIP)의 크리프 예측모형의 개선을 위해 원전 압력용기 하반부를 1/5로 축소한 압력용기 파괴 시험(Lower Head Failure)을 실시하였다[1]. 압력용기는 SA533B1 저합금강으로 제작되었다. 이 실험결과를 바탕으로 하여, 개발된 크리프 모형에 대한 검증이 몇몇 연구자에 의해 수행된 바, 연구 결과 기존의 SA533B1 물성데이터의 불완전성이 지적되었다[2].

이처럼 중대사고시 압력용기 하반부 크리프 파손 예측에 있어서 물성데이터는 중요한 영향을 미치며, 어떠한 물성데이터를 선택하느냐에 따라서 그 결과가 상당히 달라질 것으로 생각된다. 본 연구에서는 기존의 SA533B1 크리프 물성데이터(TMI-2 Vessel Investigation Project, Idaho National Engineering Lab., Sandia National Lab., Seoul National University-일정하중조건(CL)+일정응력조건(CS))를 Bailey-Norton 식에 fitting함으로써 이러한 다섯 가지 크리프데이터를 비교하고, 중대사고시 압력용기 하반부의 변형해석을 통하여 크리프데이터의 차이가 변형량에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

3. 크리프데이터

먼저, TMI-2 데이터는 TMI-2 VIP에서 실험한 결과이며, <표 1>에서 각각의 실험온도, 응력, minimum creep rate를 보이고 있다[3]. 한편, INEL 데이터는 Idaho National Engineering Lab.에서 실험한 결과이며, 역시 각각의 실험온도와 응력, minimum creep rate가 <표 2>에 나타나 있다[4]. 다음으로, 이들 두 가지 데이터를 통합한 데이터로써 Sandia National Lab.의 SNL 데이터가 있으며, 이는 <표 3>에 나타내었다. 마지막으로, SNU 데이터는 Seoul National University에서 실험한 결과로써 일정하중조건(CL)과 일정응력조건(CS)에 대해 수행되었으며, 각각 <표 4>와 <표 5>에 나타내었다[5].

4. 해석방법

범용 유한요소해석코드인 ABAQUS를 사용하여 원전 압력용기 하반부를 2차원 축대칭 모형으로 모델링하였다. 모형의 크기는 TMI-2 압력용기 하반부의 크기와 같으며, 원주방향으로 90개의 요소와 두께방향으로 5개의 요소로 구성되었다. 크리프 구성식으로는 위의 다섯 가지 데이터베이스에 대하여 서로 다른 조건의 minimum creep rate를 하나의 식으로 fitting한 Bailey-Norton식을 사용하였다(eq. 1)

$$\dot{e} = A s^{m} \exp(-B/T) \qquad \text{(eq. 1)}$$

먼저, TMI-2 VIP에서의 압력용기 하반부 관찰결과를 바탕으로 온도이력에 대한 해석이 수행되었으며, 이 결과가 다섯 가지의 크리프 해석에 공통적으로 적용되었다. 압력이력으로는 TMI-2 VIP에서의 TMI-2사고 당시의 압력이력과, 2MPa, 0MPa를 각각 적용하였는데, 이는 각각 실제 중대사고 상황을 모사하고, 중대사고시의 감압을 고려하며, 압력용기 하반부의 주된 변형 인자는 크리프 변형과 열팽창이므로 압력의 영향을 배제하여 단순히 열팽창으로 인한 변형만을 봄으로써 순수한 크리프 변형만의 크기를 알기 위해서이다.

5. 결과

eq.1에서 결정된 다섯 가지의 Bailey-Norton 상수는 <표 6>과 같으며, <그림 1>에서 이들 다섯 가지의 Bailey-Norton 식을 100MPa의 압력용기 하반부 membrane stress에 대하여 비교하였다. 이는 TMI-2 사고당시의 내부압력에 의한 membrane stress가 대략 100Mpa이기 때문이다. x축에 온도를, y축에 minimum creep rate를 표시한 결과, 1000k에 가까운 고온 영역을 제외하고는 같은 온도에 대하여 INEL 데이터의 경우가 가장 큰 minimum creep rate를 나타내며, 가장 작은 경우와 비교하였을 때 그 차이가 크다는 것을 알 수 있다. <그림 2>는 TMI-2 사고 당시의 압력이력을 나타낸다. 사고 발생 후 약 2시간 후까지는 10MPa 정도를 유지하다가 그 후에는 15MPa정도까지 압력이 증가하고 있다.

이러한 TMI-2사고당시의 압력이력을 적용하였을 때의 결과를 <그림 3>에 나타내었다. 시간에 대하여 압력용기 중앙에서의 수직 변형량을 나타내었는데, minimum creep rate가 가장 큰 INEL의 경우가 가장 큰 변형량을 나타내었으며, 이는 세 시간 후에 아래 방향으로 0.09m정도였다. SNL과 TMI-2 VIP의 경우가 0.04m정도로 가장 작은 변형량을 나타내었는데, 이는 minimum creep rate가 가장 작았던 사실과 일치한다. <그림 4>는 TMI-2사고당시의 압력이력을 적용하고, 열팽창 기여분을 제외하였을 때의 결과이다. 전체적인 경향에는 별다른 차이가 없었으며, 다섯 가지 경우 모두 0.02m정도 변형량이 적은 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 전체적인 변형량보다는 많이 작으므로, 중대사고시 크리프 변형이 주된 변형 인자임을 확인하였다.

<그림 5>는 내부압력을 2MPa로 일정하게 유지하였을 때의 결과이다. 2MPa의 압력에서는 시간에 따른 변형량이 모든 경우에서 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 내부압력을 2MPa로 유지하면서 열팽창 기여분을 제외시킨 결과는 <그림 6>에 나타내었다. 2Mpa의 압력만 작용하는 상태에서는 변형량은 매우 작으며, <그림 5>에서의 변형은 대부분 열팽창에 의한 것으로 생각된다. 이는 <그림 7>의 내부압력을 0MPa로 했을 때의 결과와 <그림 5>의 결과가 시간에 따른 변형량이 거의 일치한다는 사실로도 뒷받침된다. 이는 중대사고시 내부압력을 2MPa로 감압하였을 때, 열팽창 기여분이 압력용기 하반부 변형의 대부분을 차지한다는 사실을 보여준다.

6. 결론

중대사고시 압력용기 하반부 크리프 변형해석에 대한 크리프데이터의 영향을 파악하기 위하여 기존의 다섯 가지 크리프데이터를 사용하여 각각의 Bailey-Norton식을 구성하고 이를 비교하였으며, 이들 다섯 가지 크리프 구성식을 이용하여 압력용기 하반부 크리프 변형해석을 여러 압력 조건에서 수행하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. Minimum creep rate는 크리프데이터에 따라서 큰 차이를 나타내었으며, 이는 변형량의 차이로 나타났다.
2. Minimum creep rate가 큰 경우가 변형량도 큰 경향을 보였으며, 이는 TMI-2사고당시 압력에서는 크리프데이터의 차이가 해석결과의 차이의 주요 원인이라는 것을 보여준다.
3. TMI-2사고당시 내부압력에서는 크리프 변형이 주된 변형 인자임을 확인하였다.
4. 2MPa 내부압력에서는 열팽창 기여분이 주된 변형 인자임을 확인하였다.
5. 중대사고시 크리프 변형으로 인한 압력용기의 실패를 막기 위해서는 시기 적절한 감압이 중요함을 확인하였다.

<표 1> TMI-2 VIP **크리프데이터**

Temperature[K]	Stress[MPa]	mcr[%/h]
873	114	0,175
	115	0,382
	115	0,0799
	155	0,506
	157	0,873
973	34,5	0,128
	40	0,402
	41,6	0,241
	52,1	0,453
	55	1,07
	60	1,24
	80	3,68
	95,1	8,73
1273	11,5	2,15
1473	3,4	0,612
	4	0,788
	6	4,99

<표 2> INEL **크리프데이터**

Temperature[K]	Stress[MPa]	Rupture time[h]	mcr[%/h]	Elongation[%]
900	69,7	190,1	0,03075	22,4
	140,1	11,3	0,3518	24,3
1000	39,0	8,9	1,5746	72,9
	55,6	4,6	2,13639	37,4
1050	13,9	264,4	0,08717	47,7
	26,3	18,9	1,39688	83,0
1150	12,5	54,7	0,29683	27,9
	26,5	4,1	4,55465	26,4
1250	8,0	61,2	0,36418	73,3
	12,6	2,2	9,41059	43,4
	26,5	0,045	377,674	54,8
1373	3,5	46,9	0,39021	50,4
	7,0	0,65	24,368	78,7

<표 3> SNL 크리프데이터

Reference	Test Group	T [K]	stress[MPa]	mcr [%/h]
NUREG/CR-5642 b17a	INEL	1373	3.5	0.416
NUREG/CR-5642 b16b	INEL	1250	12.6	12.0
NUREG/CR-5642 b16a	INEL	1250	8	0.406
NUREG/CR-5642 b15a	INEL	1150	12.5	0.347
NUREG/CR-5642 b14b	INEL	1050	26.3	1.63
NUREG/CR-5642 b14a	INEL	1050	13.9	0.113
NUREG/CR-5642 b13a	INEL	1000	39	2.26
NUREG/CR-5642 b12a	INEL	900	69.7	0.0402
NUREG/CR-6187 p125	TMI-2 VIP	1473	3.4	0.612
NUREG/CR-6187 p124	TMI-2 VIP	1473	4	0.788
NUREG/CR-6187 p123	TMI-2 VIP	1473	6	4.99
NUREG/CR-6187 p118	TMI-2 VIP	1273	11.5	2.15
NUREG/CR-6187 p106	TMI-2 VIP	973	34.5	0.128
NUREG/CR-6187 p105	TMI-2 VIP	973	41.6	0.241
NUREG/CR-6187 p104	TMI-2 VIP	973	52.1	0.453
NUREG/CR-6187 p103	TMI-2 VIP	973	80	3.68
NUREG/CR-6187 p102	TMI-2 VIP	973	95.1	8.73
NUREG/CR-6187 p101	TMI-2 VIP	973	40	0.402
NUREG/CR-6187 p100	TMI-2 VIP	973	55	1.07
NUREG/CR-6187 p99	TMI-2 VIP	973	60	1.24
NUREG/CR-6187 p98	TMI-2 VIP	873	114	0.175
NUREG/CR-6187 p97	TMI-2 VIP	873	157	0.873
NUREG/CR-6187 p93	TMI-2 VIP	873	115	0.0799
NUREG/CR-6187 p92	TMI-2 VIP	873	115	0.382
NUREG/CR-6187 p91	TMI-2 VIP	873	155	0.506

<표 4> SNU-CL **크리프데이터**

T [K]	Stress[MPa]	Rupture time[h]	mcr[%/h]	Elongation [%]
873	150	8,433333	1,5732	38,9
	170	3,051667	3,816	35,5
933	80	7,373611	2,5164	70
	100	2,561667	6,984	58
	130	0,567778	24,012	47,6
973	50	8,585834	3,636	110
	60	4,374166	6,336	104
	80	1,071667	21,816	80,2

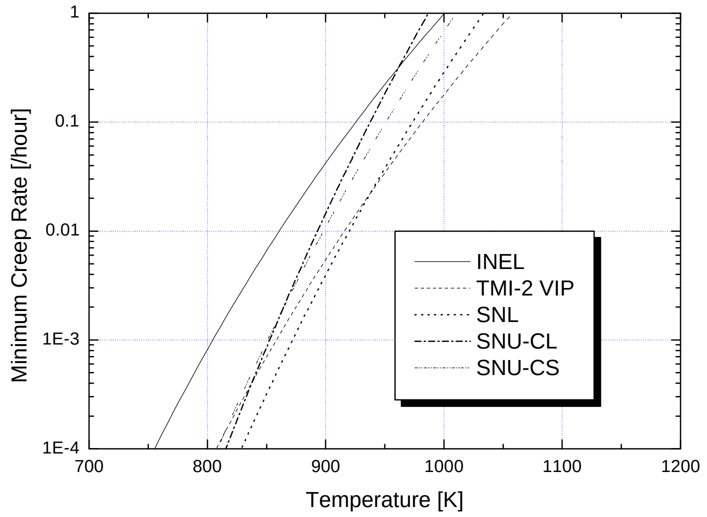
<표 5> SNU-CS **크리프데이터**

T [K]	Stress[MPa]	Rupture time[h]	mcr[%/h]	Elongation [%]
873	150	16,15278	1,1952	29,9
	170	6,035833	2,8296	27,5
933	90	11,65611	2,5776	46,3
	97	8,995	3,636	47,4
	130	2,316111	13,14	45,2
973	50	24,20194	2,0772	60,9
	70	6,791945	6,948	61
	80	4,207222	10,26	54,5

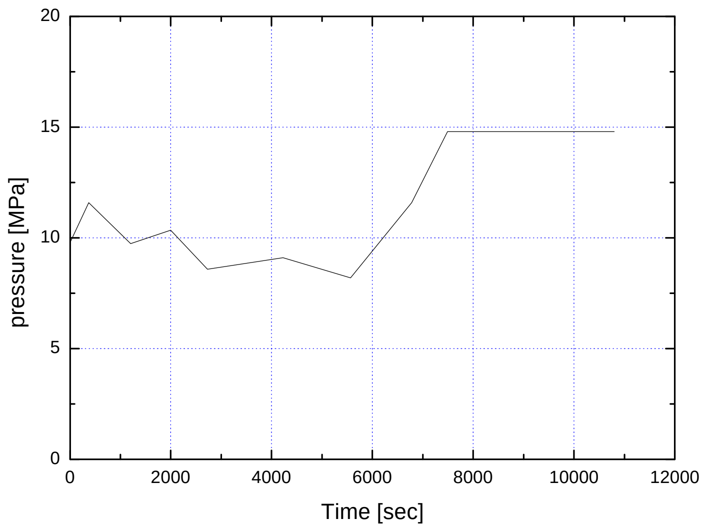
<표 6> **다섯 가지 데이터베이스의** Bailey-Norton **상수**

Test Group	A	m	B
INEL	2.438E5	3.467	2.839E4
TMI-2 VIP	8.603E4	3.981	3.142E4
SNL	1.391E8	4.021	3.852E4
SNU-CL	5.421E10	4.159	4.329E4
SNU-CS	3.471E8	3.740	3.727E4

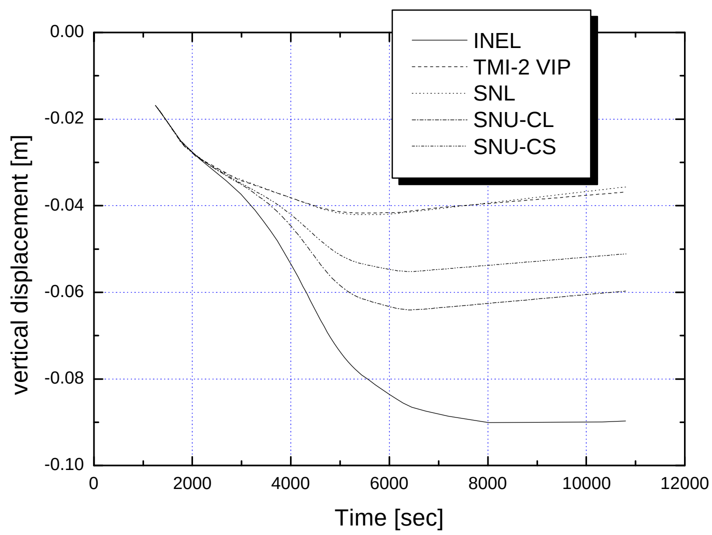
<그림 1> 100MPa에서의 다섯 가지 Bailey-Norton equation 비교



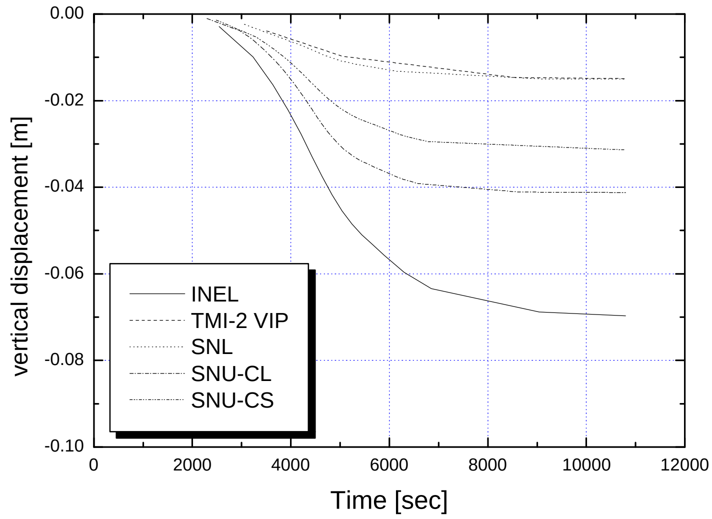
<그림 2> TMI-2 사고에서의 시간에 따른 압력이력



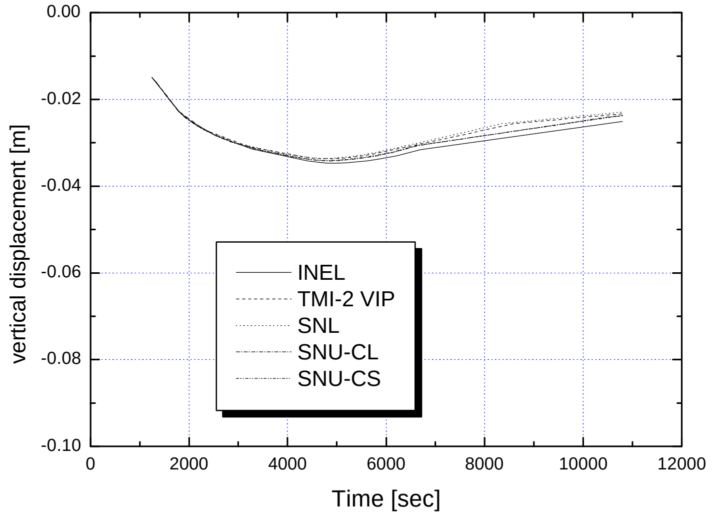
<그림 3> TMI-2사고 압력이력을 적용했을 때 시간에 따른 하반부 중앙의 수직 변형량



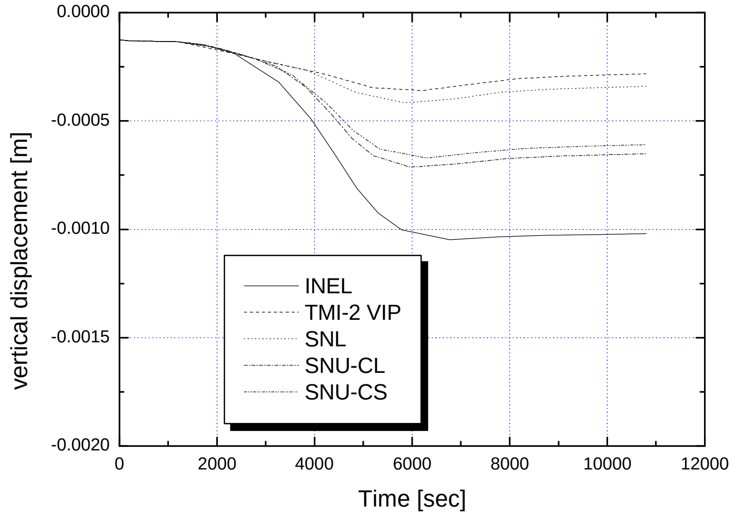
<그림 4> TMI-2사고 압력이력을 적용하고 열팽창 기여분을 제외했을 때 시간에 따른 하반부 중앙의 수직변형량



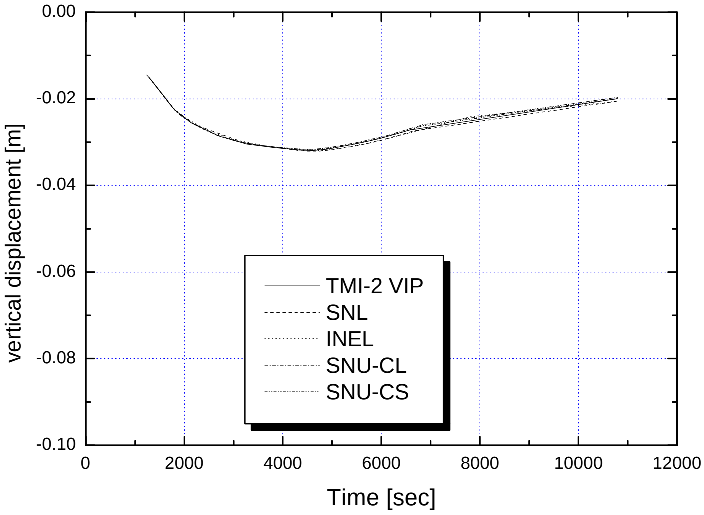
<그림 5> 2MPa 내부압력을 적용했을 때 시간에 따른 하반부 중앙의 수직변형량



<그림 6> 2MPa 내부압력을 적용하고 열팽창 기여분을 제외했을 때 하반부 중앙의 수직변형량



<그림 7> 0MPa 내부압력을 적용했을 때 시간에 따른 하반부 중앙의 수직변형량



참고문헌

[1] T. Y. Chu et al., Lower Head Failure Experiments and Analyses, NUREG/CR-5582, Sandia National Laboratories, 1999

[2] K. J. Jeong, D. C. Lim and I. S. Hwang, Creep rupture behavior of a PWR lower head in a core-melt accident, Transaction of ANS, Vol. 77, pp. 273-274, 1997

[3] L. A. Stickler et al., Calculations to Estimate the Margin to Failure in the TMI-2 Vessel, NUREG/CR-6196, 1994

[4] J. L. Rempe et al., Light Water Reactor Lower Head Failure Analysis, NUREG/CR-5642, 1993

[5] **임준**, **원자로 중대사고시 압력용기 하반부의 고온 크리프 파손 예측 모형에 관한 연구**, **공학석사학위논문**, **서울대학교**, 1999