

Type 304 및 316LN 스테인리스강 구조물의 크립-피로 하중에 따른 손상평가

Damage evaluation of Type 304 and 316LN stainless steel structure under creep-fatigue loading

이 형 연, 김 중 범, 유 봉

한국원자력연구소

요 약

본 연구에서는 소듐(sodium) 냉각재 환경에서 크립-피로 하중이 작용하는 고온 구조시험을 수행하고 이에 따른 손상을 평가하기 위하여 미세조직 관찰과 재료강도시험을 수행하였다. 250°C~600°C의 온도범위에서 한 주기가 3시간인 크립-피로 하중을 1055회 가한 구조시험을 수행하고 구조시험의 두께방향으로 미세조직의 사진을 분석한 결과 구조물의 내부에서는 손상이 거의 발생하지 않았으며 316LN이 304 스테인리스강에 비하여 손상이 적게 발생하여 고온강도가 더 우수한 것으로 나타났다. 재료강도시험의 결과 구조물 내부의 304 및 316LN 스테인리스강의 피로강도는 각각 선손상을 받지 않은 동일 재료의 평균 피로강도와 거의 동일하게 나타났다. 이는 구조시험 중에 내부에서는 손상이 거의 일어나지 않은 것을 의미하는 것이며 구조시험에 대한 관찰결과와도 일치하였다.

Abstract

In this study high temperature structural test was carried out in sodium coolant environments and microstructural observation as well as material strength tests were performed to evaluate the damage under structural test. The creep-fatigue load with one period of 3 hours was applied 1055 times over the temperature range of 250°C to 600°C for the structural test. An investigation of the damage distribution by microscopic images showed that the 316LN specimen was less damaged than the 304SS during the structural test. The results of material strength test with material specimens sampled along the thickness direction in structural model showed that the fatigue strength of 304 and 316LN stainless steels were almost the same with those of the mean fatigue strength curve for the undamaged materials. This means that the structural test model was nearly undamaged during the structural test, and the results are in agreement with those of microscopic observations.

1. 서 론

천이 열 하중을 받는 고온 구조물의 운전에서 크립-피로 손상의 방지가 가장 중요한 문제 중의 하나이다. 특히 500°C 이상에서 운전되는 액체금속로(Liquid Metal Fast Breeder Reactor)의 설계 및 해석에서 크립-피로의 평가는 매우 중요하고도 어려운 분야로서 관련기술의 개발을 위하여 시험 및 해석을 통한 많은 연구가 현재 수행 중에 있으며 특히 크립 영역에서 반복 열 하중에 따른 고온구조물 거동에 대한 평가기술을 개발하기 위해서는 구조 및 재료시험을 병행한 연구가 요구된다.

고온 크립 영역에서 운전되는 액체금속로의 설계 및 해석기술 개발을 위하여 프랑스⁽¹⁾, 일본⁽²⁾, 독일⁽³⁾, 영국⁽⁴⁾, 미국⁽⁵⁾, 인도⁽⁶⁾ 등에서는 크립-피로 관련 구조시험을 수행한 바 있으며, 이 국가들 중에도 특히 프랑스, 일본, 인도는 지금도 소듐을 냉각재로 하는 고온 소듐 구조시험 시설을 이용하여 시험적 연구를 활발하게 진행하고 있다. 국내에서는 스테인리스강 재료의 고온구조물 시험과 관련하여 일부 해석에 관한 연구는 수행되었지만⁽⁷⁻⁹⁾, 아직 구조시험은 수행된 바 없는 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 소듐환경에서 크립-피로 하중이 작용할 때 구조시편의 파손형태를 파악하기 위하여 미시적 관점에서 발생한 석출물의 종류 및 형태와 결합에 대하여 관찰하였다. 여기서는 304 및 316LN 스테인리스강 재료의 용접부로부터 충분히 떨어진 모재 부분에 대해서만 손상평가를 수행하였다. 크립-피로 손상을 받은 두 재료의 두께방향 강도 비교 및 구조시험에 따른 손상을 평가하기 위하여 재료 강도시험을 수행하였고, 반복 열 하중을 받은 고온 구조시험모델에서 두 사용재료에 대하여 고온특성을 비교 분석하였다. 304 및 316LN 스테인리스강은 고온강도가 탄소강에 비하여 우수하기 때문에 액체금속로 주요 기기 및 배관에 사용되는 대표적인 재료들이다.

2. 고온 구조시험

고온 소듐 냉각재의 열전이 상태에 따라 크립-피로 하중을 받는 액체금속로 주요 기기의 구조건전성 평가법 개발을 위하여 본 연구에서는 Fig. 1 과 같은 구조시험 모델을 소듐 시험 루프의 시험장치(test section) 내에 고정시킨다. 구조시험 모델의 제원은 원통용기의 외경이 50.6cm, 높이가 130cm 이고 벽두께는 2cm 이다.

구조시험모델의 내부에는 상·하부 양단의 중앙에 위치한 작은 구멍으로 소듐 냉각재가 채워지며 내부의 유동은 거의 없다. 반면 구조모델의 외부표면에는 고온의 소듐이 유동하며, Fig. 2 와 같은 크립-피로 하중을 3 시간 주기로 반복적으로 작용시킨다. 구조시험모델의 외부 표면에서는 600℃의 고온 유지시간 동안에 크립이 발생하고, 또한 온도차가 350℃인 천이 열하중에 의한 손상이 발생한다. 이와 같은 열 하중을 총 132 일 동안 1055 회에 걸쳐 반복적으로 가한 다음 구조 시험모델을 꺼내어 표면의 소듐을 제거한 다음 손상평가를 위한 시편을 채취하여 가공한다. 구조시험 과정에서 구조시험모델에는 매 주기마다 2 시간씩 총 2110 시간의 크립 하중이 작용하였다.

시편의 종류와 관련하여 구조시험이 끝난 후 재료의 조직관찰 및 강도시험을 위하여 구조모델 플랜지의 하부 15cm 위치에서 원주방향으로 구조재료를 잘라냈다. Fig. 3 은 잘라낸 구조재료를 원주방향으로 펼친 것이다. 이 구조시험 모델은 Fig. 3 에서와 같이 원주방향으로 304 및 316LN 스테인리스강 재료를 용기의 축방향으로 반씩 사용한 것이다. 구조재료시편은 조직관찰을 통하여 두께방향의 손상분포를 분석하기 위한 것으로 Fig. 3 의 A,B 위치에서와 같이 용기모델의 내·외면을 포함하도록 시편을 채취하였다. 이와 같은 구조재료시편을 편의상 ‘구조시편’이라 부르기로 한다.

재료시편은 구조시험을 겪은 후 선손상을 받은 304 및 316LN 스테인리스강에 대하여 고온 재료특성의 비교 및 두께방향 강도평가를 위한 것으로 여기서는 ‘재료시편’이라고 부르기로 한다. 재료시편은 Fig. 3 에서와 같이 구조물의 5 군데에서 시편을 채취하였으며, Fig. 3 에서 시편들의 두께방향 위치는 두께가 t 일 때 316F6 시편만 바깥면으로부터 $3t/4$ 인 곳에 위치하고, 나머지 4 개의 시편은 바깥면 부근에 위치한다. 또한 5 개 재료시편의 시험 조건은 Fig. 4 에 나타나 있는 바와 같이 반복 변형률 하중을 가하는데 316F6, 316F10, 304F10 시편에 대해서는 전체 변형률 범위를 $\Delta\epsilon_t = 0.6\%$ 로 하고, 316F11 시편에 대해서는 $\Delta\epsilon_t = 1.0\%$ 로 하며, 크립-피로에 관한 316CF12 시편에 대해서

는 600°C의 고온환경에서 6분의 유지시간을 주고 전체 변형률 범위는 $\Delta\epsilon_t = 1.0\%$ 로 하여 각각 재료 강도시험을 수행하였다.

3. 시험결과

3.1 조직관찰

본 연구에서는 손상을 관찰하기 위해 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 구조시편의 내·외부 표면과 두께방향의 조직을 관찰하였다. Fig. 5a의 SEM 사진에서 보는 바와 같이 316LN의 외부 표면에서는 주로 입계를 따라 약 30 μm 까지 크립-피로 손상이 일어났지만 동일 시편의 내부에서는 Fig. 5b에서와 같이 손상이 발생하지 않았다. 다만 내부표면 부근에서만 두께 2 μm 정도의 소듐 영향영역(sodium affected zone)이 관찰되었는데 이는 소듐 냉각재에 의하여 스테인리스강의 니켈성분이 빠져 나가고 탄소성분이 들어오기 때문이며 이와 같은 원소의 이동은 크롬 탄화물(Cr-carbide) 또는 σ -상(σ -phase)의 석출물의 발생을 야기한다. 크롬 탄화물은 구조물의 크립강도를 떨어뜨리는 원인이 된다. Fig. 5a의 결합 부분에 대하여 에너지 분산 X선 분석기(EDX)를 이용하여 분석한 결과 A, B점의 결합은 각각 σ -상과 크롬 탄화물인 것으로 나타났다. 또한 316LN 재료의 두께방향 손상을 관찰한 결과 외부 표면으로부터 1/4, 1/2 및 3/4인 내부 위치에서의 재료손상은 일어나지 않은 것으로 관찰되었다.

반면 304 스테인리스강 재료 부위에서의 크립-피로 손상은 외부 표면에서는 Fig. 6a에서와 같이 150 μm 이상의 입계손상이 일어났다. Fig. 6a의 결합부위를 분석한 결과 d1은 주괴(ingot) 제작시 형성된 개재물(inclusion)이고, d2는 입계를 따른 미소 균열이며, d3는 σ -상인 것으로 나타났다. 304 스테인리스강 재료에 대해서도 용기의 외부 표면으로부터 1/4, 1/2 및 3/4의 위치에서는 재료손상이 발생하지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 5 및 6의 관찰 결과로부터 고온 크립-피로 하중조건에서 316LN 및 304 스테인리스강의 미소 균열길이를 비교한 결과 316LN의 경우가 304의 경우보다 5배 정도 작게 나타나 304에 비하여 316LN 스테인리스강의 고온강도가 더욱 우수하다는 것을 알 수 있다. 또한 크립 강도에 대하여 금속학적으로 분석해보면 316LN이 304에 비하여 탄소의 함량을 0.05 wt%에서 0.01 wt%로 낮추었고 니켈과 질소의 함량을 증가시켰으며 새롭게 몰리브덴 원소를 첨가함으로써 고온강도를 개선시켰기 때문에 316LN의 고온거동이 더 우수한 것으로 분석된다.

한편 6분의 유지시간이 주어진 316CF12 크립-피로 시편의 균열면 SEM 사진은 Fig. 7a와 같이 초기 균열 생성점이 A 부위라는 것을 보여주고 있다. Fig. 7b는 Fig. 7a의 확대사진으로서 D 부위를 포함하여 전체적으로 분포하는 줄무늬 상은 피로파손 입내균열의 형태를 보여주고 있지만 위치 F에서와 같이 부분적으로 균열 파단면의 입자 크기가 316LN의 입자 크기인 50 μm 와 거의 같게 나타나 크립-피로 하중에 의한 입계균열의 양상이 혼합하여 나타나고 있는 것을 보여주고 있다. 따라서 비교적 유지시간이 짧은 크립-피로 시험의 SEM 사진은 입계 및 입내 손상이 혼합하여 나타나고 있음을 보여주고 있다.

3.2 재료강도시험

크립-피로 하중을 받는 구조시험에서 선손상을 받은 5개의 재료시편을 이용하여 강도시험을 수행한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 전체 변형률 범위가 0.6%인 두 개의 316LN 재료시편과 하나

의 304 재료시편의 피로 시험결과는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 데이터 피로수명이 평균수명과 거의 비슷하게 나타났고, 전체 변형률 범위가 1.0%이고 외부표면 부근에서 채취된 316LN 재료시편의 피로강도도 Fig. 8에서 보는 바와 같이 구조시험 중의 선손상에도 불구하고 피로 강도가 거의 그대로 유지되고 있는 것으로 나타났다. 또한 구조시험모델의 동일한 위치에서 채취한 304 및 316LN 재료의 시험결과 두 재료의 피로강도는 거의 비슷하게 나타났다. 이는 구조시험 전에 두 재료가 동일한 피로강도를 보인 결과와 그 경향이 일치하는 것이다.

한편 크립-피로에 관한 재료시험 결과는 고온에서 변형률 유지시간이 가해짐에 따라 Alumina 및 크롬산화물 등의 석출물과 부균열이 많이 발생하여 Fig. 8에서와 같이 피로 평균곡선으로부터 강도가 24% 감소된 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 304 및 316LN 스테인리스강으로 구성된 고온 구조물에 대하여 고온 소듐 시험 루프에서 구조 시험을 수행하고, 구조 시험모델의 손상을 평가하기 위하여 미세조직 관찰 및 재료 강도시험을 수행하였다. 구조 시험은 350℃의 온도차를 급격하게 가하고 600℃의 고온을 2 시간 동안 유지하는 크립-피로 하중을 1055 회에 걸쳐 작용시켰다.

미세조직 관찰을 위하여 304 및 316LN 스테인리스강으로 용접된 각 재료의 모재 부분에서 용기의 벽두께 방향으로 내부 및 외부표면을 포함하는 구조시편을 채취하고 SEM 을 이용하여 조직 관찰을 수행한 결과 두 재료는 크립-피로 하중을 직접 받은 외부표면 부근에서만 크립-피로 손상이 나타난 것으로 관찰되었다. 구조 시험에 따른 크립-피로 손상은 316LN 의 외부표면에서는 입계를 따른 미소균열이 약 30 μm 로 비교적 작았지만 304 재료에서는 약 150 μm 깊이까지 전파된 것으로 나타나 316LN 이 고온 크립-피로 영역에서 304 스테인리스강에 비하여 고온강도가 우수한 것으로 나타났다.

재료강도 시험을 위하여 재료시편을 이용한 구조시험 모델의 두께방향으로 내부의 피로강도를 시험한 결과 304 및 316LN 의 피로강도는 거의 동일하게 나타났으며, 각 재료시편의 피로수명은 선손상이 가해지지 않은 동일 재료의 평균 피로곡선과 거의 비슷하게 나타났다. 이는 구조시험 중에 내부에는 손상이 거의 일어나지 않은 것을 의미하는 것으로 구조시편에 대한 미세조직 관찰결과와도 일치하는 것이다. 또한 600℃의 고온환경에서 6분의 변형률 유지시간을 가한 크립-피로 시험 결과, 균열의 진전양상은 많은 부균열 및 석출물을 동반하는 입내 및 입계균열이 혼합된 형태로 나타났고, 강도는 크립 하중이 가해지지 않은 평균 피로곡선으로부터 약 24%가 감소된 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구의 구조시험은 일본 동력로핵연료개발사업단의 고온 소듐 시험시설에서 수행된 것으로서 도움을 준 동력로핵연료개발사업단에 감사의 뜻을 전한다. 또한 본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. P. Kaszynski, E.Ghorbel, D. Marquis, "An Experimental Study of Ratchetting During Indentification of 316L Stainless Steel," *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, Vol. 120,

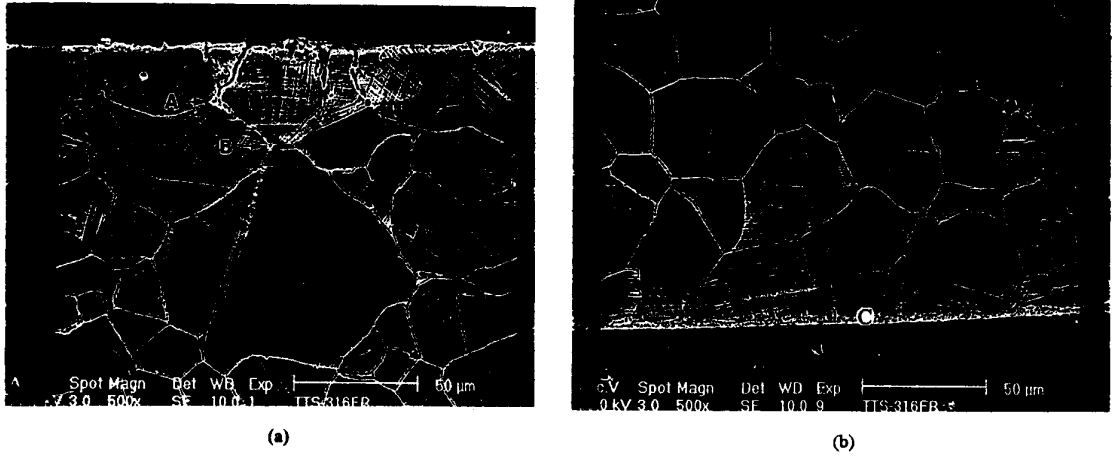


Fig. 5 SEM images near (a) outer surface. (b) inner surface for 316LN

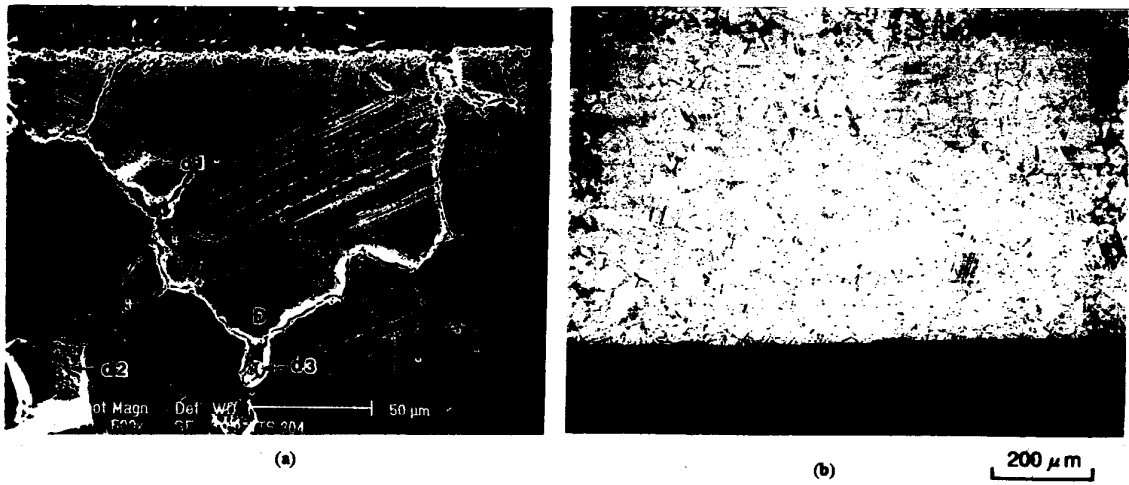


Fig. 6 SEM images near (a) outer surface
Optical microscope images near (b) inner surface for 304SS

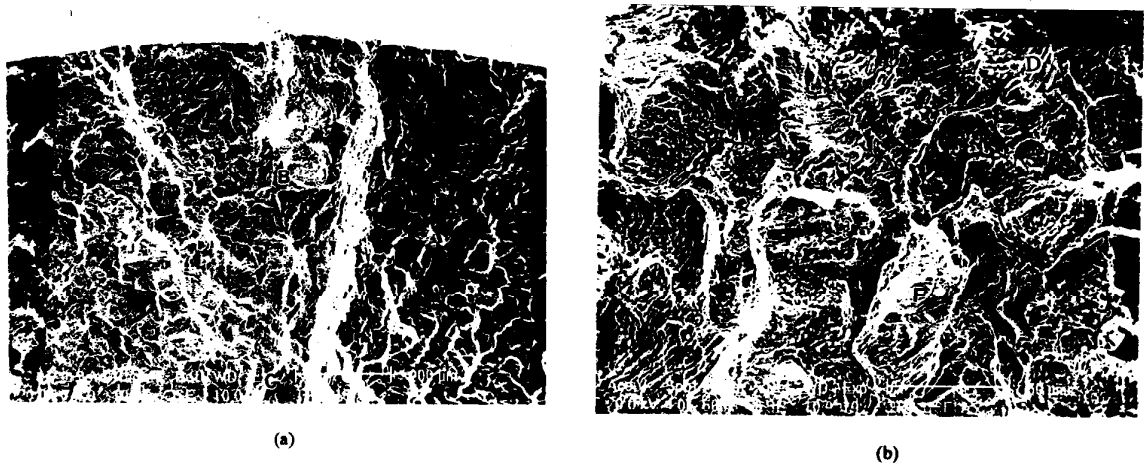


Fig. 7 SEM images for 316CF12 (a) crack initiation point
 (b) mixed mode of transgranular and intergranular cracking feature

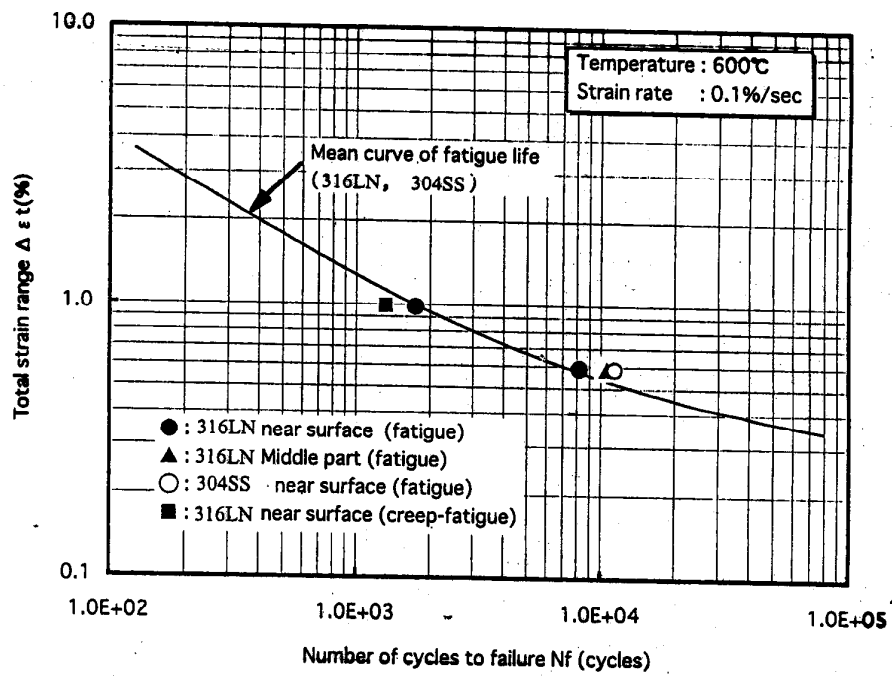


Fig. 8 Material strength test results for fatigue and creep-fatigue test

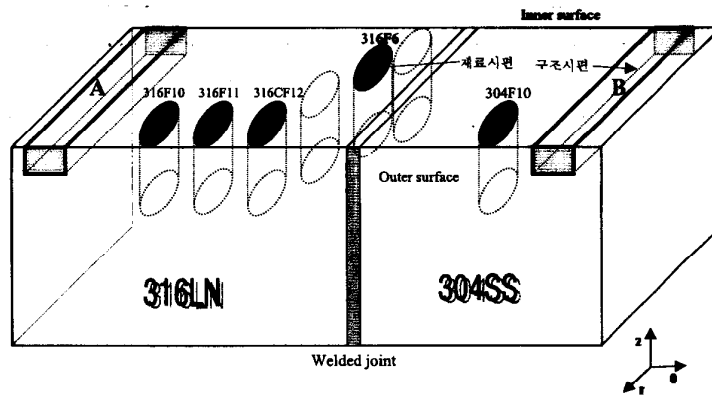


Fig. 3 Sampling locations for 316LN and 304SS specimens

	Specimen No.	$\Delta\epsilon_r$ (%)	Loading Patterns
Fatigue	316F10	0.6	
	316F6		
	304F10		
Creep-Fatigue	316F11	1.0	
	316CF12	1.0	
Temperature : 600 °C, Strain rate : 0.1 %/sec.			

Fig. 4 Test conditions for material specimens

pp.218-223, 1998.

2. N. Tanaka, *et. al* "Failure Test and Analysis of a Vessel Type Structure Subjected to Cyclic Thermal Transients," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 140, pp.349~372,1993.
3. G. Breitbach, K. Schmidt-Plutka, F. Achubert, H. Nickel, "Investigation of Creep Ratcheting on Thick Walled Tubes," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 151, pp.337~345,1994.
4. C. Picker, "Experience of Cracking in Austenetic Steels Components of the UK Prototype Fast Reactor," *International Journal of Pressure Vessel & Piping*, Vol.65,pp.283-293, 1996.
5. K. Thomas, "Creep-Ratcheting Tests and Aanalysis of a Pressurized Elbow at 593°C Subjected to Cyclic Bending," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 116, pp.199~213, 1989.
6. P. Chellepandi, G. Thomas, S.C.Chtal,, S.B.Bhoje, "Experimental Simulation of Creep-Fatigue Damage in the PFBR Control Plug Mock-up," *Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technolgy*, Vol. 3, Div.F, pp.81~190, 1997.
7. H.Y.Lee, J.B.Kim, J.H.Lee, B. Yoo, "Prediction of Ratcheting Behavior of 304SS Cylindrical Shell using Chaboche Model," *IAEA-TECDOC-993 on Creep-Fatigue Damage Rules for Advanced Fast Reactor Design*, pp.243~252, 1996.
8. 광대영, 임용택, 김종범, 이형연, 유봉, "액체금속로 Y-구조물의 비탄성 열응력 해석 및 손상평가에 관한 해석," *대한기계학회논문집*, 제 21 권, 제 7 호, pp.1042~1049, 1997.
9. H.Y.Lee, J.B.Kim, B.Yoo, "Thermomechanical and Fracture Mechanics Assessment on a Tee Junction of LMFR Secondary Circuit Involving Thermal Striping Phenomena," *3rd RCM on Harmonization on and Validation of Fast*, Lyon, 20-24, April, IAEA Coordinated Research Program, 1998.

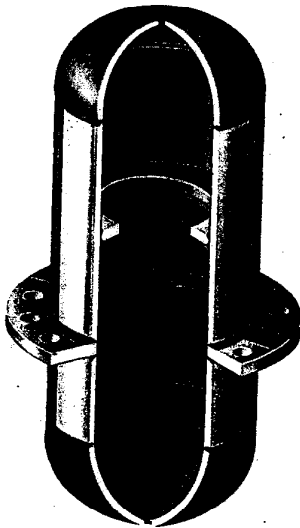


Fig. 1 Structural test model

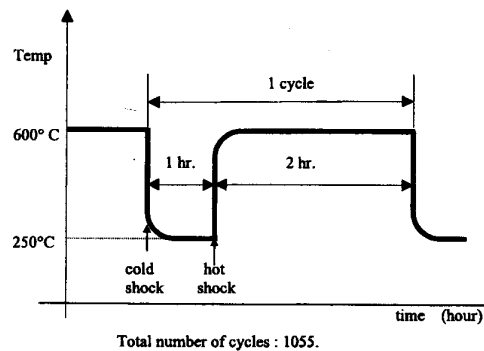


Fig. 2 Thermal transient condition for structural test