

두께 5mm를 갖는 고온 Y-구조물의 크리피로 손상시험 연구

김종범, 이형연, 박창규, 전계포, 이재한

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150, jbkim@kaeri.re.kr

1. 서론

액체금속로 KALIMER[1]의 고온 구조물들은 운전상태에 따라 복잡한 하중이력을 경험하게 되며 온도 및 시간 의존성 크리피 변형 기구가 작동되면서 복잡한 변형 양상을 보인다. 또한 입계 강도의 변화, 변형시효 및 석출물 등과 재료 내부에 크리피로 인해 발생된 캐비티(cavity)가 반복 하중에 의한 피로 균열과 결합하면서 수명이 급격히 감소하게 된다[2]. 따라서 크리피로 손상 평가는 고온 구조물의 건전성 확보를 위해 고려해야 하는 여러 항목 중에 중요한 역할을 하고 있고 시간에 의존하지 않는 소성변형과 시간 의존적인 크리피거동을 동시에 모사할 수 있는 비탄성 해석을 이용한 신뢰성 있는 구조 해석기술의 확립이 요구된다.

소성과 크리피를 동시에 모사하기 위한 비탄성 해석 방법은 여러가지가 제시되고 있지만 한국원자력 연구소에서는 Chaboche의 통합점소성 구성식을 ABAQUS의 부프로그램으로 장착한 NONSTA-VP코드를 개발하여 검증노력을 기울였고 이의 일환으로 직경 600mm, 두께 7mm의 원통구조물에 대한 구조시험을 수행한 바 있다[3]. 본 연구에서는 직경 600mm, 두께 5mm의 원통 불연속구조물을 316L 스테인레스강으로 제작하여 크리피로 하중을 가하여 손상을 평가하였다.

2. 크리피로시험 준비 및 절차

크리피로 구조시험장치는 IST사의 100톤 로드셀과 액추에이터를 국내에서 제작한 정반 및 로드 프레임으로 구성되었고 크리피를 유발할 수 있는 온도하중을 가하기 위해 50kHz, 50kW 용량의 고주파유도가열기를 사용하였다[3].

액추에이터의 제어는 IST사의 Labtronic 8800 제어장치를 사용하였고 Instron사의 Model 2632인 고온용 Extensometer를 원통구조시편의 하단에서 205mm인 외면에서 축방향으로 설치하여 변형을 측정하였다. 반경 방향의 변위는 Schaevitz사의 LVDT(모델명 GCA-121-200)를 설치하여 측정하였고 MP2000 Reader를 RS232 통신을 이용하여 데이터 수집을 하였다. Measurement Group의 모델명 C-020708-D인 고온용 스트레인 게이지를 원주방향과 축방향으로 점용접 설치하여 변형률을 측정하였다.

시험모델의 온도분포를 수집하고 또한 온도제어를 하기 위하여 K-type 열전대 44 채널을 Y-구

조시편의 내면, 외면에 점용접하여 설치하였고 온도수집을 위해 IOTECH사의 Daqbook216 Data Acquisition Board와 DBK19 Thermocouple Signal Conditioning Card 및 Agilent Tech사의 모델 34970 Data Acquisition system을 사용하였다.

시험에 사용한 Y-구조물은 그림 1에 보인 것과 같이 5mm 두께의 실린더 안쪽 중앙에 5mm 두께의 스킨형태의 원추판을 TIG 용접한 불연속구조모델이다. 재질은 316L 스테인레스강이고 직경은 60cm, 높이는 50cm이다. 크리피로 손상을 가속하기 위하여 원주방향으로 90도 간격으로 4개의 결함을 방전 가공하였는데 2개는 길이 2cm, 폭 0.35mm의 관통 결함으로써 각각 축방향과 원주방향으로 배치하였고 나머지 2개는 길이 2cm의 표면 결함으로써 각각 축방향과 원주방향으로 배치하였다.

구조하중은 50톤의 인장하중을 가하였고 온도하중은 상온에서 550°로 가열하는데 약 270초 소요되고 1시간동안 고온상태를 유지한 뒤 다시 상온으로 냉각시켰는데 총 90분 정도 소요되었고 이것이 1사이클 하중이다.

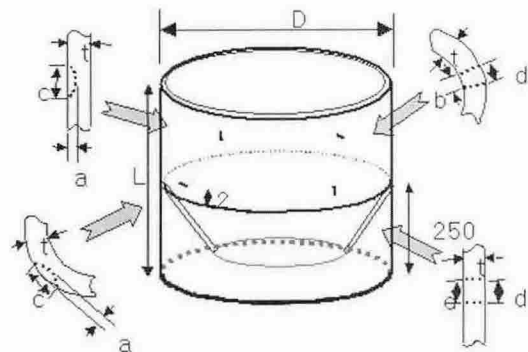


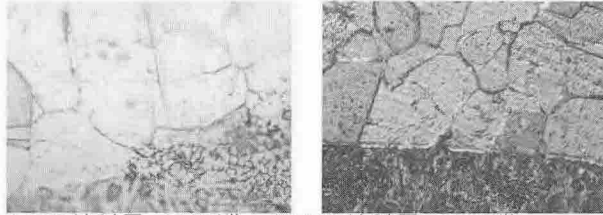
그림 1. Y-구조물의 형상 개략도

3. 손상검사

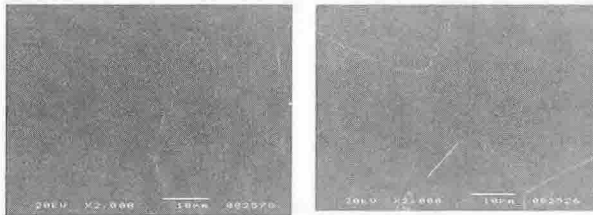
크리피로 손상은 3500배까지 표면을 관찰할 수 있는 중현미경과 그보다 높은 배율을 갖는 전자현미경(SEM)을 사용하였다. 관심부위의 표면을 관찰하기 위해서는 시험모델 표면 처리가 요구되는데 Grinding과 Polishing, 및 Etching의 3단계로 수행한 다음 입계에서의 탄화물 석출이나 공동(cavity)의 생성을 관찰하였다.

본 시험에서는 총 400사이클의 크리피로시험을 수행하였고 매 100사이클마다 구조시편을 해체한 후 표면에서의 손상 검사를 하였다. 그림 2에 보인 것과 같이 Y-구조물 내부에 스킨을 용접한

불연속부를 관찰한 결과 100사이클에서는 입계의 손상이 거의 관찰되지 않는데 400사이클 후에는 탄화물의 석출이 관찰되고 있다. 그림 3은 수평관통 결함에 인접한 곳을 표면복제하여 전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과인데 400사이클 후에는 입계의 탄화물 석출이 잘 관찰되고 있음을 알 수 있다. 하지만 이러한 손상이 미시균열로까지 발전하지는 않은 단계이고 균열로 발전하기까지 필요한 시험회수는 해석평가를 수행해야 추정할 수 있을 것이다.



(a) 100사이클 1000배 (b)400사이클 1000배
그림 2. 내부불연속부의 크리피손상비교



(a) 100사이클 2000배 (b)400사이클 2000배
그림 3. 수평관통결함인접부의 크리피손상비교

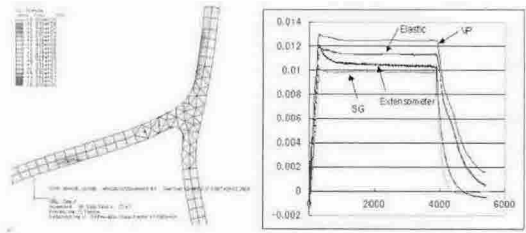
4. 구조해석 및 비교

수집한 구조물 표면의 온도 데이터를 탄성 및 비탄성 유한요소해석에 입력자료로 활용하여 구조해석을 수행하였다. 탄성해석은 ABAQUS[4] 코드를 사용하였고 비탄성해석은 NONSTA-VP 코드를 사용하였다.

6절점 축대칭 열전달 요소인 DCAX6요소를 열전달해석에 사용하였고, 구조요소인 CAX6요소를 응력해석에 사용하였으며 물성치는 온도의 함수로 입력하였는데 문헌[3]과 같은 데이터를 사용하였다.

해석결과 예상한 것과 같이 불연속부에서 응력 집중 효과가 나타났고 Y-구조물 하단에서 205mm 위치에 설치한 Extensometer와 Strain Gage의 측정값을 해석결과와 비교한 결과를 그림 4에 나타내었는데 10% 내외의 차이가 발생하였다. 해석결과

를 ASME-NH 설계코드[5]에 적용하여 크리피로 손상을 평가하여 시험결과 관찰된 손상과 비교하고 또한 미시균열 발생에 필요한 시험회수를 평가할 계획이다.



(a) 응력강도분포(270초) (b)수직변형을 비교
그림 4. Y-구조물 구조해석 결과 및 비교

5. 결론

본 연구에서는 고온 Y-구조물의 크리피로 시험을 400회 수행하여 크리피로 손상을 관찰하였고 탄성해석 및 NONSTA-VP를 활용한 구조해석을 수행한 결과와 비교분석하였다.

400회의 시험을 마친 뒤 크리피로 손상이 불연속부와 결함부에서 관찰되었다. 변형률과 같은 물리량을 비교하고 ASME-NH 코드를 따른 손상 평가를 수행하여 시험결과와 비교분석을 수행하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 지원을 받아 2004년도 원자력연구개발사업을 통해 수행되었음.

참고문헌

- [1] 이재한 외, 액체금속로 기계설계 기술개발, KAERI/TR-2704/2004, 한국원자력연구소, 2004.
- [2] A.K.Miller, Unified Constitutive Equations for Creep and Plasticity, Elsevier Applied Science, 1987.
- [3] 김중범 외, "고온불연속구조물의 크리피로 시험평가," 2004 춘계학술발표대회 논문집, 한국원자력학회, 2004.
- [4] ABAQUS Users manual, Version 6.4.1, H.K.S, USA, 2004.
- [5] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Div. 1, Subsection NH, Class 1 Components in Elevated Temperature Service, ASME, 2001.