2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고온 불연속 구조물의 크립피로 시험평가

On the creep-fatigue structural test of a high temperature discontinuous structure

김종범, 이형연, 박창규, 전계포, 이재한
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

액체금속로 고온구조물에서는 500°C 이상의 운전환경으로 인해 크립피로 손상이 발생할 가능성이 높아 고온구조설계코드에서도 이에 대한 평가절차가 보수적으로 제시되고 있다. 본 연구에서는 고온구조 크립피로 비탄성해석을 위한 NONSTA-VP 코드를 개발한 바 있는데 이를 검증하고 또한 크립피로 손상 현상과 결함에서의 균열발생 및 성장을 분석하기 위해 고온 불연속 Y-구조모델의 크립피로시험을 100 사이클의 하중에 대해 수행하였다. 구조시험에서 수집한 온도분포 데이터를 입력자료로 사용하여 ABASQUS를 사용한 탄성응력해석과 NONSTA-VP코드를 사용한 비탄성응력해석을 수행하여 구조시험 결과의 변형률과 비교한 결과 상당히 잘 일치하여 개발한 코드를 일부 검증할 수 있었고, 탄성해석 및 비탄성해석 결과를 ASME-NH에서 제시한 절차에 적용한 크립피로 손상평가를 수행하였는데 크립피로손상의 정도가 작게 나타나서 시험결과와 부합한 결과를 얻었다. 향후 추가 하중 사이클을 적용한 크립피로시험을 수행하여 크립피로 구조시험 기술을 정립하고 해석에 의한 평가결과와 비교분석하여 개발한 코드의 검증 작업을 계속할 예정이다.

Abstract

The objective of this study is to perform creep-fatigue test of Y-shape cylindrical model to validate the NONSTA-VP code that is developed for the detailed inelastic structural analysis and to characterize the creep-fatigue damage development of 316SS structure. In the test model, penetrated defects and surface defects were prepared investigate the damage development ahead of defects. In the fiscal year of 2003, 100 cycles of creep-fatigue loading were applied and the corresponding creep-fatigue damage was rarely observed. Both elastic analysis and inelastic analysis using NONSTA-VP code were performed with collected temperature profile from test and the strain results of analyses agree well with those from the test. The creep-fatigue damage was assessed per ASME-NH utilizing analysis results and the very small amount of damage was obtained of which result coincides with test result. Further cycles of creep-fatigue test is planned to investigate the evolution of creep-fatigue damage and to validate inelastic structural analysis code.

1. 서론

액체금속로 KALIMER[1]의 고온 구조물들은 운전상태에 따라 복잡한 하중이력을 경험하게 되며 고온 구조물에 사용되는 대부분의 금속 재료들은 고온 환경 하에서 확산(Diffusion), 전위활주(Dislocation Glide) 등과 같은 온도 의존성 크립 변형 기구가 작동되면서 복잡한 변형 양상을 보인다. 또한 입계 강도의 변화, 변형시효 및 석출물 등으로 인하여 금속학적으로 불안정해질 뿐만 아니라, 재료 내부에 발생된 캐비티(Cavity)가 반복 하중에 의한 피로 균열과 결합하면서 수명이 급격히 감소하게 된다[2]. 따라서 크립피로 손상 평가는 고온 구조물의 건전성 확보를 위해 고려해야 하는 여러 항목 중에 중요한 역할을 하고 있고 일본의 BDS/DDS[3], 프랑스의 RCC-MR[4], 미국의 ASME-NH[5]와 같은 고온구조 설계코드들에서도 중요하게 다루어지고 있다. 하지만 이들 코드에서는 주로 탄성해석방법에 기초한 보수적인 평가방법들을 제시하고 있어서 시간에 의존하지 않는 소성변형과 시간 의존적인 크립거동을 모사할 수 있는 비탄성해석을 이용한 신뢰성 있는 구조 해석기술의 확립이 요구된다.

고온에서의 재료 거동을 예측하기 위한 구성방정식 모델은 분리형 점소성모델(Separate Viscoplasticity Model)과 통합 점소성 모델(Unified Viscoplasticity Model)로 구분된다. 분리형 모델은 소성변형과 크립 변형을 분리해서 취급할 수 있다는 고전적인 가정에 바탕을 두고, 소성변형과 크립 변형에 대해서 각각의 구성방정식을 별도로 적용하는 모델로, 304 스테인레스강과 316 스테인레스강에 대한 ORNL(Oak Ridge National Laboratory) 모델[6]이 여기에 해당된다. 이와는 달리 통합 점소성 모델은 소성변형과 크립변형을 물리적으로 동일한 발생기구에 의해서 생겨나는 비탄성 변형으로 가정하고 하중상태와 상태변수(Internal State Variable)들의 동적 특성 및 내부이력에 의한 변화를 시간 적분법에 의하여 계산하는 모델이다. 이러한 통합 점소성 모델은 최근까지도 많은 연구자들에 의하여 개발되고 있는데, 현재까지 개발된 모델들은 대개 항복조건의 유무에 의하여 크게 두가지로 분류될 수 있다.

먼저 Perzyna[7], Phillips와 Wu[8], Robinson[9], Chaboche[10~12] 등에 의해서 개발된 모델들은 항복조건을 갖는 통합 점소성 모델로서 일정한 응력상태 하에서만 비탄성 변형이 생겨나는 것으로 가정한 모델이다. 반면에, Bodner와 Partom[13], Miller[14], Stouffer와 Bodner[15] 등에 의해서 개발된 모델들은 항복조건을 갖지 않는 모델로서 낮은 응력상태 하에서도 비탄성 변형을 가질 수 있게 구성되어져 있다. 또한 이러한 모델 이외에도 다른 형태의 모델들이 많은 연구자들에 의하여 제안된 바 있으며, 기존의 모델을 부분적으로 수정 보완한 모델들도 발표되었다[16~17]. 이러한 통합 점소성 모델의 경우에는 하중이력에 따른 상태변수들의 동적 특성 및 내부이력을 계산해야 하므로 분리형 모델에 비하여 계산량이 많아 비효율적이며, 또한 유한요소해석에 적용하기에 어려움이 있지만, 재료의 실제 거동을 정확하게 모사할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 Chaboche 통합점소성 구성식을 ABAQUS의 부프로그램으로 장착하여 NONSTA-VP를 개발하여 검증노력을 기울인 바 있는데[18], 그 일환으로 그림 1에 보인 액체금속로 KALIMER-600[19]의 주요 원자로 구조물에서 대표적인 고온 불연속로써 Y-구조 시편을 만들어 크립피로 손상시험을 수행하고 시험결과를 해석결과와 비교분석하였다. 시험 모델에서 우선적인 관심사는 기하학적 불연속부에서 크립피로 손상의 발생과 발전이지만 관통결함과 표면결함을 가공하여 결함의 선단에서 손상의 발생도 분석하였다. 크립피로 하중은 현재까지 100회 적용하였고 추가적인 하중 사이클에 대한 시험은 수행중에 있다.

2. 불연속 구조물의 크립피로시험

2.1 크립피로시험 장치 구축 및 준비

크립피로 구조시험장치는 그림 2에 보인 것과 같이 구성되어 있는데 IST 사의 100톤 로드셀과 액츄에이터를 국내에서 제작한 정반 및 로드 프레임에 장착하였다. 액츄에이터의 용량은 최대 ±1MN이고 램의 스트로우크는 ±125mm이다. 크립피로 구조시험을 위한 가열장치로는 국내에서 제작한 50KHz, 50KW 용량의 고주파유도가열기를 사용하고 그림 2에서 보인 것과 같이 원통구조물의 가열을 위해 원통구조물을 감는 형태의 동관을 6바퀴 회전시킨 형태의 가열코일을 제작하여 사용하였다. 가열코일에 고주파로 전류를 흘리면 유도코일에 인접한 구조모델 부위에서는 유도전류의 발생으로 저항발열이 급속하게 나타내서 고온으로 가열되며 온도조절을 위해 피드백 방식의 제어계통을 구성하였다.

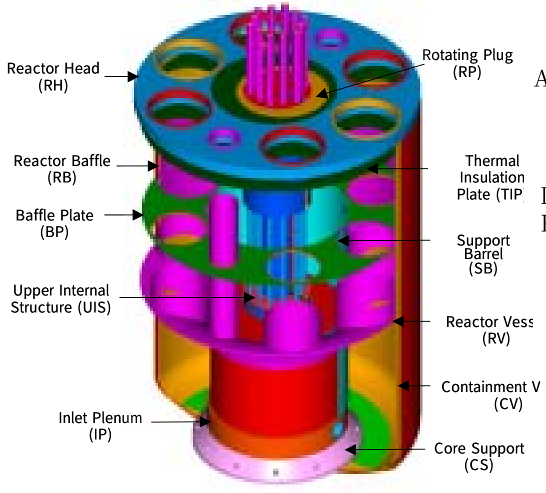

그림 1 KALIMER-600 원자로 개략도

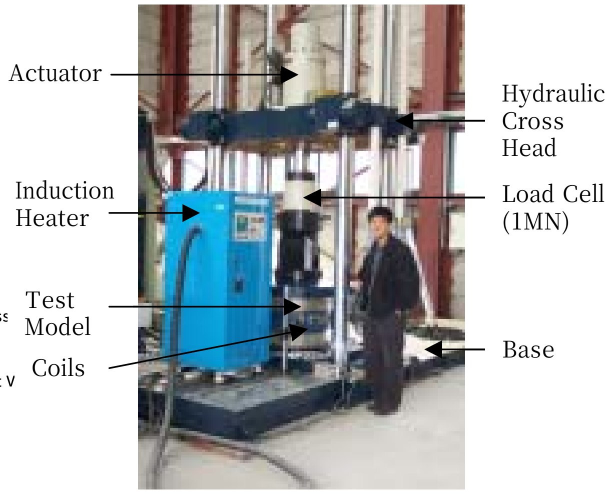

그림 2 크립피로 구조시험장치

고온구조물의 크립피로 시험을 수행하기 위해서는 액츄에이터를 사용하여 구조시험체에 힘하중 또는 변위제어하중을 가하고 고주파유도가열기를 사용하여 온도하중을 가해야 하는데 이를 위해서는 신뢰성 있는 계측 및 제어장치의 사용이 요구된다.

우선 액츄에이터의 제어를 위해서 그림 3에 보인 것과 같이IST사의 Labtronic 8800 제어장치를 사용하였고 Instron사의 Model 2632인 고온용 Extensometer를 원통구조시편의 상단에서 20cm인 외면에서 축방향으로 설치하여 변형을 측정하였다. 반경 방향의 변위는 Schaevitz사의 LVDT(모델명GCA-121-200)를 설치하여 측정하였고 MP2000 Reader를 RS232 통신을 이용하여 데이터 수집을 하였다. 본 실험에 많은 노력을 기울인 측정기술은 고온 스트레인 게이지를 활용한 변형률 관찰 분야인데 이는 아직까지도 국내에서 활용기술이 정착되지 않은 실정이다. Measurement Group의 모델명 C-020708-D인 고온용 스트레인 게이지를 원주방향과 축방향으로 점용접 설치하였다.

크립피로시험 중에 Y-구조 시편의 온도분포를 수집하고 또한 온도제어를 하기 위하여 설치하는 열전대는 고온불연속 Y-구조시편의 내면 축방향으로 24채널, 외면 축방향으로 10채널, 스커트 부위의 윗면에 4채널, 아랫면에 2채널, 그리고 시편의 원주방향으로 3채널을 설치하였다. 온도

데이터 수집은 IOTECH사의 Daqbook216 Data Acquisition Board와 DBK19 Thermocouple Signal Conditioning Card를 사용하여 별도의 PC 시스템에 연결하여 수행하였고 온도의 수집과 더불어 실험 중에 일정 온도를 유지하기 위해서 Labview 를 이용한 제어프로그램을 작성하여 온도를 PID 방식으로 제어하였다. DBK19를 이용한 온도 데이터 수집을 위해 Fluent사의 Thermocouple Calibrator를 사용하여 보정하였고 또한Agilent Tech사의 모델 34970 Data Acqusition system을 사용하여 기존 장치와 온도수집데이터를 비교 검증하였다.

액체금속로 고온불연속 크립피로 시험에 사용한 구조물은 그림 3에 보인 것과 같이 7mm 두께의 실린더 안쪽 중앙에 7mm 두께의 스커트형태의 원추판을 TIG 용접한 불연속구조모델이다. 액체금속로 불연속 구조물 중에 대표적인 것으로써 316 스테인레스 강으로 만들고 외경은 60cm, 높이는 50cm이다. 원주방향으로 90도 간격으로 4개의 결함을 방전 가공하였는데 2개는 폭 1cm의 관통 결함으로써 각각 축방향과 원주방향으로 배치하였고 나머지 2개는 폭 2cm의 표면 결함으로써 각각 축방향과 원주방향으로 배치하였다. 구조모델의 장착 순서는 우선 구조시험 모델의 내외면에 축방향으로 K-type 열전대를 점용접하여 부착한다. 고온 Extensometer를 설치할 위치에 고강도강으로 만든 90도 각도의 펀치봉을 이용하여 가볍게 펀치를 내어둔다. 그리고 고온용 스트레인 게이지 2개를 각각 원주방향과 축방향으로 점용접하여 부착한다. 준비된 구조시험 모델을 그림 2에 보인 것과 같이 크립피로 구조시험 장치에 설치하는데 특별히 제작한 지그를 이용하여 구조시험 모델의 상하단에 준비한 각 31개의 스터드볼트로 체결한다. 이 때 지그에는 구조시험모델 내부의 공기가 순환할 수 있도록 공기구멍을 미리 만들어 두었다. 열전대와 스트레인게이지 연결선들을 계측장치와 연결하고 LVDT와 고온 Extensometer를 측정 위치에 설치하면 크립피로 시험을 위한 준비 작업은 완료가 된다.

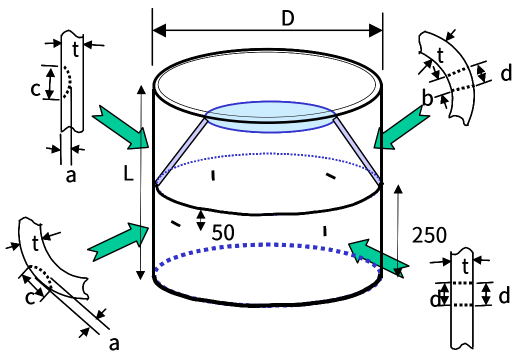

그림 3 Y-구조 시험모델

2.2 크립피로 구조시험 절차 및 손상 검사

크립피로 시험을 수행하기 위해서는 힘 하중 제어와 열하중 제어를 수행해야 한다. 우선 Labtronic 8800 장비를 사용해서 크립피로 시험장치를 제어하는데 구조시험모델의 축방향으로 50톤의 인장하중을 10초 동안 도달하도록 한 다음에 1시간 동안 유지하고난 뒤 다시 하중을 제거하도록 몇 단계의 하중 스텝을 설정한다. 그리고 로드 센서, 포지션 센서, 및 Extensometer 측정값을 실시간으로 저장하도록 설정한다. 이와 동시에 고주파 유도가열기 제어를 처음에는 최대출력으로 시편을 가열하고 목표 온도인 550°C에 도달하면 PID 제어로써 1시간 동안

유지되도록 한다. 목표온도의 도달 여부는 고온 가열부에 설치한 열전대 3 쌍의 평균온도로써 판단하도록 프로그래밍 하였고 현재 사용한 구조시험모델이 목표온도에 도달하는 데에는 약 7분이 소요된다. 그리고 난 다음에 가열기 출력을 제거하여 구조시험모델이 냉각되도록 하는데 시편의 온도가 다시 상온으로 떨어지기까지는 약 1시간이 소요된다. 이렇게 총 2시간 남짓의 크립피로 시험 시간 동안 44채널의 온도 데이터는 실시간으로 수집한다. 고주파 유도가열기의 사용으로 인해 발생한 잡음은 Low Pass Filter를 사용하여 제거한다.

크립피로 손상시험에서 구조시험모델에 손상이 발생한 것을 관찰하는 방법은 여러가지가 있다. 본 험에서는 500배 배율의 이동식 광학현미경과 5000배 배율의 전자현미경(SEM)을 사용한 표면 관찰을 수행하였는데 이를 위해서는 시험모델 표면 처리가 요구된다. 우선 구조표면에서 손상을 관찰하기 위한 표면 처리 절차는 Grinding과 Polishing, 및 Etching의 3단계로 수행하며 본 실험에서는 HNO_3 8%, HCl 54%, H_2O 38%로 조성된 부식액을 사용하여 입계에서의 탄화물 석출이나 공동(cavity)의 생성을 관찰할 수 있도록 하였다. 그림 4는 100사이클의 크립피로시험을 수행한 후 수직결함 선단 부근을 125배로 관찰한 것이고 그림 5는 500배로 확대한 것인데 입계에서의 손상이 거의 발생하지 않았다. 그림 6은 구조모델의 모재를 650°C로 100시간 열처리를 한 후 전자현미경(SEM)으로 5000배 확대한 입계를 보여주고 있는데 입계에 탄화물의 석출이 뚜렷한 것을 볼 수 있다. 본 시험에서 구비한 장비로는 구조모델의 관찰부위를 현장에서 1000배 이상의 배율로 관찰할 수 없고 또한 구조물의 불연속부는 이동식 광학현미경으로 관찰이 어렵기 때문에 구조모델 표면을 복제(Replica)하여 전자현미경으로 관찰할 필요성이 있다. 앞에서 설명한 것과 같이 3단계로 표면처리를 한 다음에 다음과 같은 절차로 표면복제를 수행하였다[20]. 그림 7은 100사이클 크립피로시험을 수행한 불연속구조모델의 내부 불연속부를 표면복제한 후 전자현미경으로 2000배 확대한 모습을 보여주는데 표면복제 기술의 어려움 때문에 관찰이 용이하지는 않지만 크립피로손상은 보이지 않고 있다.

그림 4 수직관통 결함선단 (x125)

그림 5 수직관통 결함선단 (x500)

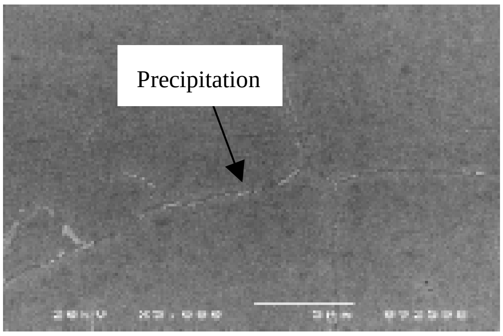

그림 6 650°C 100시간 열처리후 SEM관찰

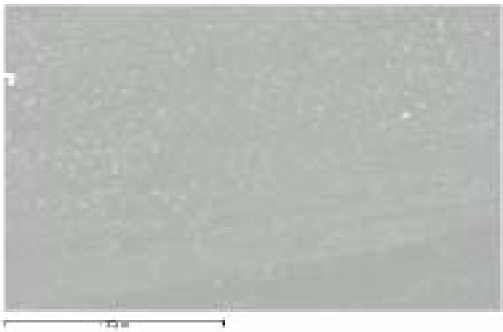

그림 7 표면복제후 SEM 관찰 (x2000)

3. 크립피로 손상 평가

크립피로 시험은 특성상 보통 수백 사이클의 하중시험을 수행하게 되는데 시험 도중 검사주기를 설정하여 구조시편을 해체한 후 표면에서의 손상 검사를 수행한 후 다시 장착해야 하는 어려움이 있다. 본 연구에서는 30사이클 수행후 첫 번째 검사를 수행하였고 100사이클 수행후 두 번째 검사를 수행하였는데 검사 과정과 결과에 대해서는 앞절에서 설명하였다. 구조시험에서 수집한 구조물 표면의 온도 데이터를 탄성 및 비탄성 유한요소해석에 입력자료로 활용하여 해석을 수행하였다. 시험에서 측정된 변위와 변형률을 해석결과와 비교하였고 본 절에서는 해석에 의한 손상 평가 수행 방법 및 결과를 설명하였다.

3.1 유한요소 모델링

316 스테인레스강으로 만든 불연속 Y-구조시편의 크립피로손상을 평가하기 위하여 시험에서 수집된 온도 데이터를 이용하여 탄성응력해석과 본 과제에서 개발한 NONSTA-VP 프로그램을 이용한 비탄성응력해석을 수행하였다. 해석에는 범용유한요소해석코드인 ABAQUS 코드[21]를 사용하였고 그림 8에 보인 것과 같이 6절점 축대칭 열전달 요소인 DCAX6요소를 열전달해석에 사용하였고, 구조요소인 CAX6요소를 열응력해석에 사용하였으며 요소수는 각각 599개, 절점의 개수는 1494개로 모델링 하였다. 316 스테인레스강의 물성치는 온도의 함수로 입력하였는데 열물성치를 표 1에 나타내었고 기계적물성치는 표 2에 나타내었다.

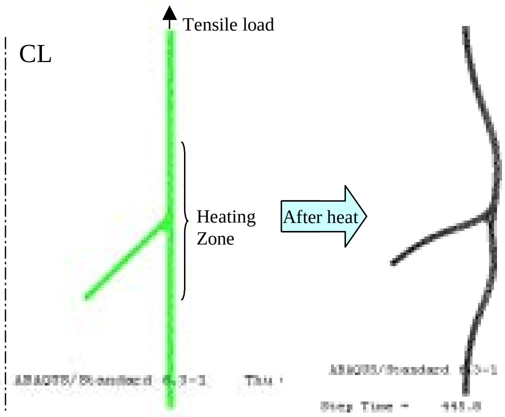

그림 8 유한요소해석 모델 및 변형도

표 1 Thermal Properties of 316SS

Temperature(°C)	Conductivity(J/s.m. °C)	Density(kg/m^3)	Specific Heat(J/kg. °C)
37.78	13.656	7962.0	472.33
93.33	14.596		492.50
148.9	15.520		509.70
204.4	16.427		524.31
260.0	17.319		536.68
315.6	18.193		547.18
371.1	19.051	7814.1	556.16
426.7	19.892		563.99
482.2	20.716		571.03
537.8	21.522	7739.33	577.64
593.3	22.311	7713.0	584.18

표 2 Mechanical Properties of 316SS

Temperature(°C)	Young's Modulus(GPa)	Poisson's Ratio	Thermal Expansion($x10^{-6}$)
37.78	192	0.3	15.9
100.0	186	0.3	16.4
200.0	178	0.3	17.0
300.0	170	0.3	17.5
350.0	166	0.3	17.7
400.0	161	0.3	17.9
500.0	153	0.3	18.3
600.0	145	0.3	18.7

본 연구에서는 시험결과와 비교분석하기 위하여 탄성해석과 상세비탄성해석을 모두 수행하였다. 탄성해석은 그 자체로서는 실제 고온구조물에서 나타나는 비탄성거동을 모사할 수 없지만 ASME-NH 의 절차에 탄성해석 결과를 적용하여 비탄성 거동과 이로 인한 손상을 평가할 수 있다. Y-구조 모델은 기계적하중과 열하중을 동시에 받아 시간에 의존하지 않는 소성변형을 하게 되고 또한 고온 유지시간 동안 시간에 의존하는 크립변형이 동시에 나타나게 된다. 본 연구에서 소성변형과 크립변형을 동시에 모사할 수 있도록 개발한 NONSTA-VP 프로그램에 적용한 통합 점소성 구성식은 다음과 같다.

응력과 변형률의 관계는 (1)식으로 나타난다.

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathrm{E}(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p) = \mathrm{E}\left\{\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \frac{3}{2}\left\langle\frac{J(\mathbf{s}-\boldsymbol{X})-(R+\kappa)}{K}\right\rangle^n \frac{\mathbf{s}-\boldsymbol{X}}{J(\mathbf{s}-\boldsymbol{X})}\right\} \tag{1}$$

점소성 변형률속도($\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p$)와 누적소성 변형률속도($\dot{p}$)는 (2)식과 같다.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p = \dot{p}\mathbf{n}, \quad \dot{p} = \left\langle\frac{J(\mathbf{s}-\boldsymbol{X})-(R+\kappa)}{K}\right\rangle^n \tag{2}$$

여기서 $\mathbf{n} = \frac{3}{2}\frac{\mathbf{s}-\boldsymbol{X}}{J(\mathbf{s}-\boldsymbol{X})}$ 이다.

이동경화 발전식과 등방경화 발전식은 각각 (3)식과 (4)식으로 표현된다.

$$\dot{X} = \frac{2}{3}C\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p - \gamma\dot{\boldsymbol{X}}\ \dot{p} = \left(\frac{2}{3}C\mathbf{n} - \gamma\dot{\boldsymbol{X}}\right)\dot{p} \tag{3}$$

$$\dot{R} = b(Q-R)\dot{p} \tag{4}$$

여기서 C와 γ 는 이동경화 크기를 나타내고 Q와 b는 주기경화를 모사하고, κ는 초기 항복의 크기를 나타내는 상수인데 점소성 이론에서는 원칙적으로 항복의 개념이 사용되지 않기 때문에 일반적인 항복응력과 다름에 주의해야 한다. X는 역응력을 나타내고 R은 드래그응력을 나타내며 p는 누적소성변형률을 나타내고 함수 <x>는 다음 식으로 표현된다.

$$\langle x\rangle = x \text{ if } x \geq o, \quad \langle x\rangle = 0 \text{ if } x < 0.$$

NONSTA-VP를 사용한 해석에 사용된 비탄성 재료 물성치들은 표3에 나타내었다[11].

표 3 Material constants for 316SS

E	149.6GPa	Young's modulus	κ	6MPa
ν	0.309	Poisson's ratio	C	24800MPa
α	$19.7x10^{-6}$	Thermal expansion	γ	300
K	150MPa		b	10
n	12		Q	80MPa

3.2 해석과 시험결과의 비교

탄성해석결과 구조시편의 가열부위가 550℃로 도달했을 때의 변형도를 그림 8에 나타내었고 그림 9는 불연속부에서의 응력강도분포를 보여주고 있다. 절점 119는 Extensometer, 스트레인게이지, LVDT로 변형을 측정했던 위치이고 절점 44-51 부위와 절점 257-106 부위가 응력집중 관심 부위이며 응력은 전형적인 굽힘응력 양상을 띠고 있음을 알 수 있다. 또한 S_x, S_{xy}는 미약하고 가열속도(1.2℃/s)에 비해 늦은 냉각속도(0.15℃/s)로 인해 열충격효과가 작게 발생하였다. 축방향 응력(S_y)의 특징은 막응력은 작지만 큰 굽힘응력이 발생하고 원주방향 응력(S_z)은 굽힘응력은 작지만 큰 막응력이 발생하는 특징이 있다.

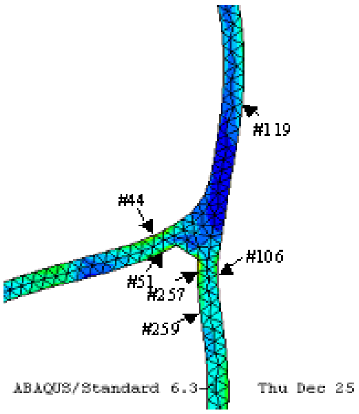

그림 9 가열후 응력강도분포

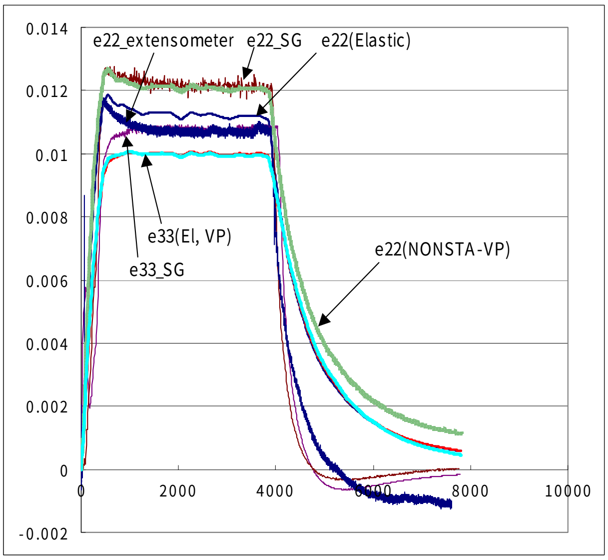

그림 10 해석과 시험결과 변형률 비교

그림 11은 절점119번 위치에서 측정한 축방향 변형률과 원주방향 변형률 및 반경방향 변위를 탄성해석결과와 NONSTA-VP를 활용한 비탄성해석 결과와 비교하였는데 4-10% 오차범위로 일치하고 있고 특히 NONSTA-VP를 사용한 비탄성 해석결과가 실험결과와 잘 일치하고 있어 비탄성해석코드의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 그리고 특기할 만한 점은 세계적으로 고온 스트레인게이지의 활용이 아직까지 일반화되지 않았는데 본 연구에서 Micro Measurement사의 고온 스트레인게이지 초기 모델을 사용하여 측정 기술을 확보한 것이다.

탄성 열응력해석 결과를 고온구조 설계지침인 ASME NH[5]의 절차에 적용하여 최대 변형률 범위를 구하면 절점 257 위치에서 0.0028%로 계산되었다. 최대 변형률 범위를 ASME-NH에서 제시된 설계피로곡선에 적용하면 허용사이클이 2000회가 되는데 100사이클의 하중에 대해서 피로손상은 (5)식과 같이 계산된다.

$$D_f = \sum_{j=1}^{P} \left(\frac{n}{N_d} \right)_j = \frac{100}{2000} = 0.05 \ \ (\#257) \tag{5}$$

그리고 $\frac{S_r}{K'} = \frac{146}{0.67} = 219$ (MPa) 로 평가되어 이를 크립파단곡선에 적용하면 허용시간이 18,000시간이 되는데 고온 유지시간 100시간에 대한 크립손상은 (6)식과 같이 계산된다.

$$D_c = \sum_{k=1}^{q} \left(\frac{\Delta t}{T_d} \right)_k = \frac{100}{18000} = 0.006 \quad (\#257) \tag{6}$$

위에서 구한 피로손상과 크립손상을 (7)식에 따라 이직선 크립피로 손상평가 선도에 적용하면 그림 11에 보인 것과 같이 무척 작은 값이고 앞 장에서 금속학적 표면 조직검사를 수행하여 크립피로 손상이 관찰되지 않은 것과 일치하는 결과임을 알 수 있다.

$$D_f + D_c = \sum_{j=1}^{P} \left(\frac{n}{N_d} \right)_j + \sum_{k=1}^{q} \left(\frac{\Delta t}{T_d} \right)_k \tag{7}$$

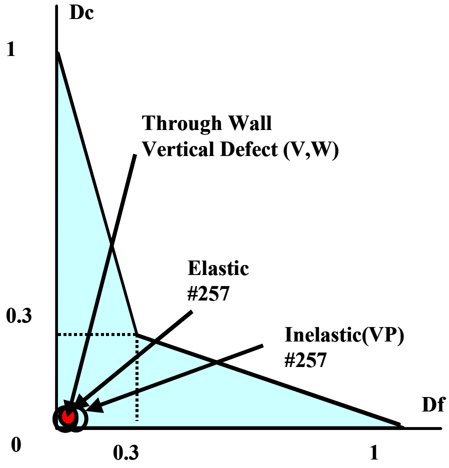

그림 11 크립피로 손상평가도

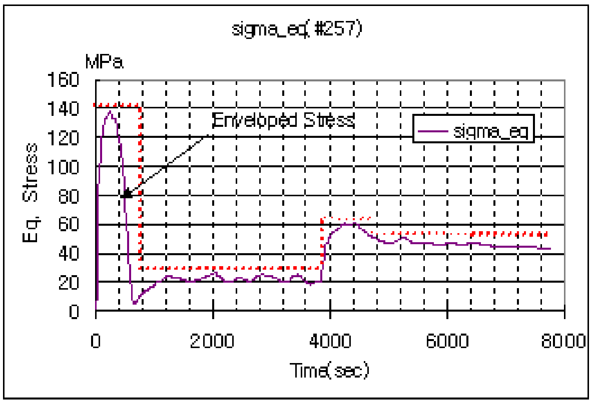

그림 12 비탄성 응력이력과 선형 분할

앞에서 탄성해석법에 기초한 크립피로손상을 평가하였는데 본 연구에서 개발한 고온구조 크립피로해석코드인 NONSTA-VP를 사용한 비탄성해석을 수행하여 크립피로손상을 평가해 보았다. 비탄성해석에 의한 크립피로손상평가의 장점은 탄성해석법을 ASME-NH에 적용할 때 발생하는 복잡한 과정을 따를 필요가 없이 바로 비탄성 변형률과 응력값이 결정되고 이를 손상평가에 적용할 수 있다는 점이다. 해석결과 최대 비탄성변형률 범위는 절점257에서 0.00454가 나왔는데 ASME-NH의 설계피로곡선에 적용하면 허용 사이클은 880회가 되어 피로손상은 0.114로 계산되었다. 크립손상을 구하기 위해 절점257에서의 응력값들을 이용하여 등가응력 이력을 구하면 그림 12와 같이 되는데 이를 몇구간의 평탄한 응력구간으로 나누고 각 구간에 해당하는 크립파단시간을 적용하면 크립손상은 0.0016으로 계산된다. 이를 그림 11에 표시하면 탄성해석법에 의한 결과와 마찬가지로 극히 작은 손상임을 알 수 있다. 두가지 해석결과를 이용하여 그림 10에서 손상이 발생하기까지의 수명을 평가하면 총 900사이클이 소요될 것으로 나타났는데 이는 Y-구조시편의 응력집중부에서의 결과이다. 본 시험에서는 Y-구조시편의 크립피로손상 발생을 위해 상당한 회수의 시험을 요할 것을 미리 예상하여 원주방향으로 4개의 결함을 방전가공으로 만들고 결함선단에서의 손상을 관찰하고 해석에 의한 평가를 수행하고 있다. 지금까지 100사이클에 대한 수직 관통 결함선단에서의 해석적인 손상평가를 RCC-MR A-16[4]의 절차에 따라 수행한 결과를 그림 11에 나타내었는데 (0.02, 0.0001)의 작은 값이어서 100 사이클의 하중으로는 거의 손상이 발생하지 않음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 고온 불연속 Y-구조모델의 크립피로시험을 수행하고 시험결과를 탄성해석결과 및 NONSTA-VP를 활용한 비탄성해석결과와 비교분석하였다. 100 사이클의 크립피로 하중에 대한 시험결과 공학적으로 감지할 만한 손상이 발생하지 않았고 방전 가공한 결함 선단에서도 손상의 발생은 나타나지 않았다. 크립피로 손상을 관찰하기 위해 표면복제 기술을 적용하였고 고온 스트레인 게이지 측정기술을 확보하여 적용하였다.

구조시험에서 수집한 온도분포 데이터를 입력자료로 사용하여 ABAQUS를 사용한 탄성응력해석과 NONSTA-VP코드를 사용한 비탄성응력해석을 수행하여 구조시험 결과의 변형률과 비교한 결과 상당히 잘 일치하여 개발한 코드를 일부 검증할 수 있었다. 탄성해석과 비탄성해석 결과를 ASME-NH의 절차에 적용하여 크립피로 손상평가를 수행한 결과 크립피로손상의 정도가 극히 작게 나타나서 시험결과와 부합하였지만 이는 향후 추가 시험을 수행한 후 비교평가를 수행하여야 최종 결론을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 추가 하중 사이클을 적용한 시험을 수행하여 크립피로 손상을 관찰함으로써 손상기구를 규명하여 크립피로 구조시험 기술을 정립하고 또한 해석에 의한 평가도 수행하여 개발한 코드를 검증할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

[1] KALIMER 예비 개념설계 보고서, KAERI/ TR-1636, KAERI., 2000.

[2] A.K.Miller, Unified Constitutive Equations for Creep and Plasticity, Elsevier Applied Science, 1987

[3] Structural Design Guide for Class 1 Components of Prototype Fast Breeder Reactor for Elevated Temperature Service, PNC, Japan (1984).

[4] Design and Construction Rules for Mechanical Components of FBR Nuclear Islands, RCC-MR, 2002 Edition, AFCEN (2002).

[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).

[6] Nuclear Standard NE F9-5T, “Guidelines and Procedures for Design of Class 1 Elevated Temperature Nuclear System Components,” USDOE TIC, Oak Ridge, Tenn., 1981

[7] P. Perzyna, "The Constitutive Equations for Rate Sensitive Plastic Materials," Quarterly Appl. Math., Vol. 20, p. 321, 1963

[8] A. Phillips and H. C. Wu, "A Theory of Viscoplasticity," Int. J. Solids and Struc., Vol. 9, p. 15, 1973.

[9] D. N. Robinson, "A Unified Creep-Plasticity Model for Structural Metals at High Tempertures," ORNL/TM

5969, 1978.

[10] J. L. Chaboche and G. Rousselier, "On the Plastic and Viscoplastic Constitutive Equations - Part 1 : Rules developed with internal variable concept," J. of Press. Vess. Tech., Vol. 15, p. 153, 1983.

[11] J. L. Chaboche, Mechanics of Solid Materials, Cambridge University Press, 1990.

[12] J. L. Chaboche, "Cyclic Viscoplastic Constitutive Equations, Part I : A Thermodynamically Consistent Formulation," J. Appl. Mech., Vol. 60, p. 813, 1993.

[13] S. R. Bodner and Y. Partom, "Constitutive Equations for Elasto-Viscoplastic Strain Hardening Materials." J. Appl. Mech., Vol. 42, p. 235, 1975.

[14] A. K. Miller, "An Inelastic Constitutive Model for Monotonic, Cyclic and Creep Deformation: Part 1, Equations, Developement and Analytical Procedures and Part 2, Application to type 304 stainless steel," J. Engng. Mat. and Tech., Vol. 98, p. 97, 1976.

[15] D. C. Stouffer and S. R. Bodner, "A Constitutive Model for the Deformation Induced Anisotropic Plastic Flow of Metals," Int. J. Engng. Sci., Vol. 17, p. 727, 1979.

[16] N. Ohno, "A Constitutive Model of Cyclic Plasticity with a Nonhardening Strain Region," J. Appl. Mech., Vol. 49, p. 721, 1982.

[17] J. D. Wang and N. Ohno, "Two Equivalent Forms of Nonlinear Kinematic Hardening : Application to Nonisothermal Plasticity," Int. J. of Plasticity, Vol. 7, p. 637, 1991.

[18] 김종범, 이형연, 이재한, “반복 크립하중을 받는 고온 구조물의 비탄성해석 비교분석,” 2002 춘계학술발표대회 논문집, 한국원자력학회, 2002

[19] 한도희 외, KALIMER 개념설계보고서, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2204/2002, 2002

[20] J.S. Park, “Standard Procedure of Replication for High Temperature Equipment Life Estimation,” Proc. of KSME, Vol. A, No.24, 9, pp.2381-2386 (2000).

[21] ABAQUS Users manual, Version 6.2, H.K.S, USA (2002).