

## 고온 열하중을 받는 구조시편 용접부에서의 크립-피로 균열개시 현상에 관한 연구

A study on creep-fatigue's crack initiaion for a structural specimen on high temperature loads.

정창호\*, 이진우\*, 이형연\*\*, 이재한\*\*, 이영호\*\*\*

\* 충남대학교 기계공학과

\*\* 한국원자력연구원

\*\*\* 충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단

### 1. 서 론

원자력 발전소와 화력 발전소의 설비 및 플랜트 설비 등 고온 및 고압에서 사용되는 구조물들은 용접 열영향부에서 급격한 온도 변화에 기인한 열응력에 의하여 균열의 생성 및 성장이 발생하여 파괴로 이르게 된다. 이러한 균열 성장에 의한 파괴는 특히 용접으로 제작되어 있는 요소들에서 빈번히 발생되며 용접 요소의 균열은 열영향부를 따라서 발생 및 성장하는 경향이 있다. 따라서, 용접 열영향부 균열에 대한 균열 성장수명 평가는 실제 고온 구조물의 수명 진단에 매우 중요하다.<sup>1,2)</sup>

본 논문에서는 Mod.9Cr-1Mo강과 STS 316L 강을 구조 재료로 하여 이종 및 동종 용접 후 시편에 관통 균열시켜 각 부분에서 발생하는 균열 현상을 이해하고 유한요소해석 모델링 평가를 통하여 균열현상을 예측하는데 있다.

### 2. 사용 재료 및 시험 방법

#### 2.1 사용 재료

실험에 사용된 주 재질은 Mod.9Cr-1Mo강으로 열팽창계수와 열전도도가 낮고, 기계적 강도도 비교적 우수하며, 조사팽윤이 적고, 경제성이 우수하나, 용접 및 제작성이 비교적 떨어지고 용접부에서 Type IV(cracking)이 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>3)</sup>

주요 재질의 화학 성분은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of materials(wt%)

Elements	Mod.9Cr1Mo	STS 316L	Alloy 800ht
C	0.116	0.064	0.025
Mn	0.35	0.97	1.07
P	0.01		0.03
S	0.001	0.004	0.004
Si	0.224	0.48	0.57
Cu	0.11	0.06	0.29
Ni	0.15	31.35	10.45
Cr	8.87	20.56	2.05
Mo	0.92		
Al	0.21	0.52	
Fe		39.5	
V	0.18		
N	0.05		0.35

#### 2.2 시편 형상 및 시험 방법

Fig.1에 크립-피로 손상시험을 위한 액체 금속로의 동축배관 구조물의 형상을 재현하기 위한 구조 시험편을 나타내었다.

구조시험편은 실제 열 하중과 기계적 하중이 가해지는 시험부에서 재질별 용접 효과를 고려하기 위하여 Mod.9Cr-1Mo 강과 STS 316L을 접합하였다. 구조 시험편의 직경은 500mm, 전체 높이는 550mm 로 설계 하였다. 작용하중으로서는 30ton이 인장하중과 열하중을 90℃에서 620℃로 가열한 후, 620℃에서 2시간의 유지시간을 갖고 인장 하중을 제거한 후 90℃까지 냉각시키는 것을 한 사이클로 하며 총 200사이클을 실시하였다. 시편의 외부에 일정 간격으로 K 타입 열전대를 부착하여 온도변화를 모니터하고 그에 따라 온도를 제어하였다. 시험편 가열 방법으로 시편 주위에 히팅 코일을 감아 고주파 유도하

열기로 가열하였다. 그러나 온도 데이터 수집결과 1번 열영향부에서는 525℃에서 유지시간을 가졌으며, 2번 열영향부에서는 545℃의 유지시간을 가졌으며, 3번 열영향부에서는 610℃의 유지시간을 가졌다.

기계적 하중은 30t의 하중을 시편의 축 방향으로 하여 시편에 29.9MPa의 공칭응력을 발생시켰다.

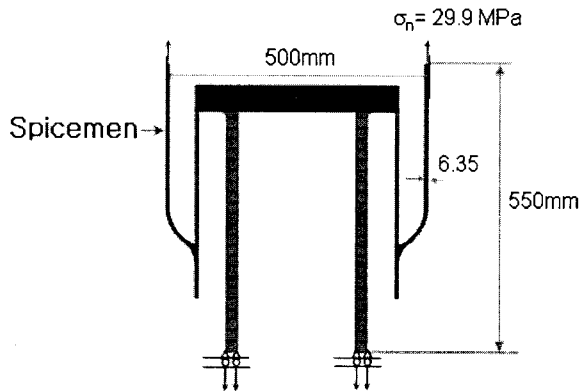


Fig.1 Schematics of structural test specimen

### 2.3 용접부 설계

Fig.2에 이중 및 동중 용접부에 대한 재료의 구성, 용접방법과 열처리를 나타내었다. 각 용접부의 번호에 관통균열을 생성한 부위이다.

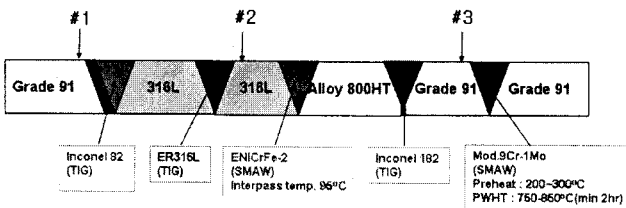


Fig.2 Details of materials, weldment's method and heat treatment

이중금속 용접부를 포함한 용접부의 설계는 인코넬 버터링(buttering)을 포함하여 총 6개의 용접부를 포함하고 있으며 이번 연구에서는 1번, 2번과 3번의 열영향부에 관통균열을 내어 균열 현상을 관찰하고, 3D 모델링 하여 유한 요소 해석을 수행 하였다.

1번 열영향부는 Mod.9Cr-1Mo 강과 STS-316L 강 사이를 Inconel 82 용접재를 사용하여 버터링 용접한 부위로 관찰부위는 Mod.9Cr-1Mo강의 열영향부이다.

2번 열영향부는 STS-316L 강을 동중 용접

접합하였으며 관찰부위는 열영향부이다

3번 열영향부는 Mod.9Cr-1Mo강을 동중 용접 접합하였으며 관찰부위는 열영향부이다

### 2.4 유한요소모델

본 연구에서 사용된 시험편 형상에 대하여 상용 프로그램인 ABAQUS 6.6을 사용하여 유한요소 해석을 수행하였으며 해석에 사용된 요소는 8-node shell 요소이다.

Fig.3은 3D모델링 하였으며 동축배관의 1/2을 형상화하여 유한 요소 모델을 만들었다.

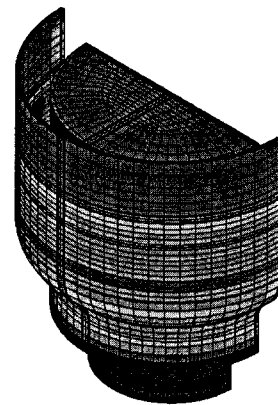


Fig.3 Specimen modeling on FEM

## 3. 크립-피로 균열 관찰 및 해석 결과

### 3.1 열영향부 균열현상 관찰 결과

Fig.4는 Mod.9Cr-1Mo강과 STS 316L강의 이중 용접부위의 Mod.9Cr-1Mo강 쪽 열영향부에 관통균열을 준 노치 부분을 나타내었다. Mod.9Cr-1Mo 강과 STS-316L 강의 이중용접부의 열영향부는 거의 손상이 발생되지 않았다. 이는 0사이클에서부터 200사이클 까지 열 피로 시험을 하였음에도 불구하고 균열의 발생이 관찰되지 않았으며, 이는 시편의 받는 열하중의 SN 커브 이하의 범위 내이기 때문이라고 사료된다.

Fig.5는 STS 316L강의 동중 용접부위의 열영향부에 관통균열을 준 노치 부분을 나타내었다. STS-316L 강과 STS-316L 강 사이의 동중 용접부의 열영향부는 상대적으로 진전을 나타내었다. 이는 열하중과 반복하중으로 인한 크립-피로 현상이 관찰 되었다.

Fig.6는 Mod.9Cr-1Mo강의 동중 용접부위의 열영향부에 관통균열을 준 노치 부분을 나타내었다. Mod.9Cr-1Mo 강과 STS-316L 강 사이의 동중용접부의 열영향부에서는 손상이 발생하였으나, 크립-피로현상이

아닌 열하중과 용접부의 결함으로 인한 넥킹 (Necking) 현상으로 사료되어진다.

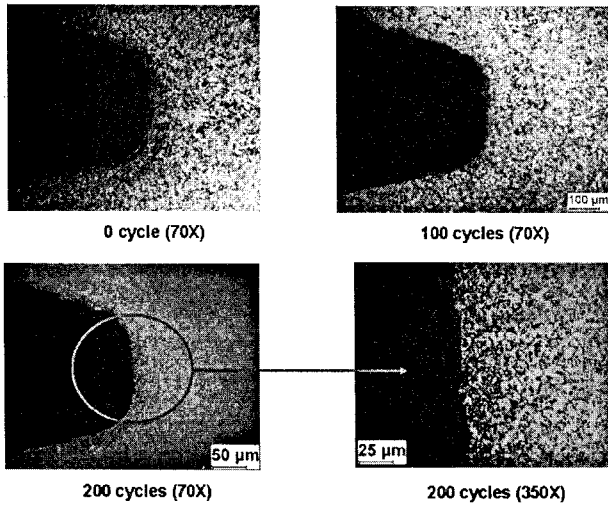


Fig.4 Observed image of the defects #1

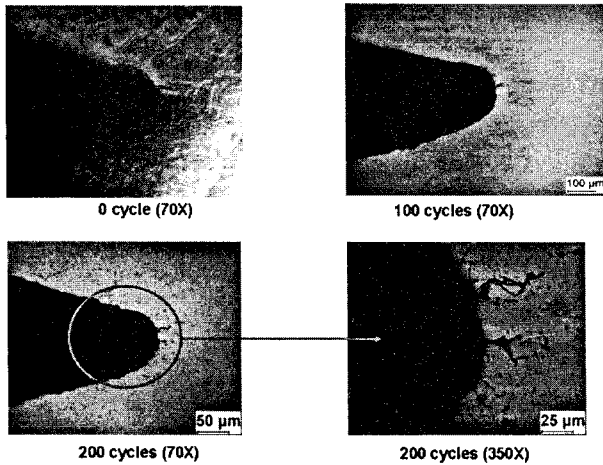


Fig.5 Observed image of the defects #2

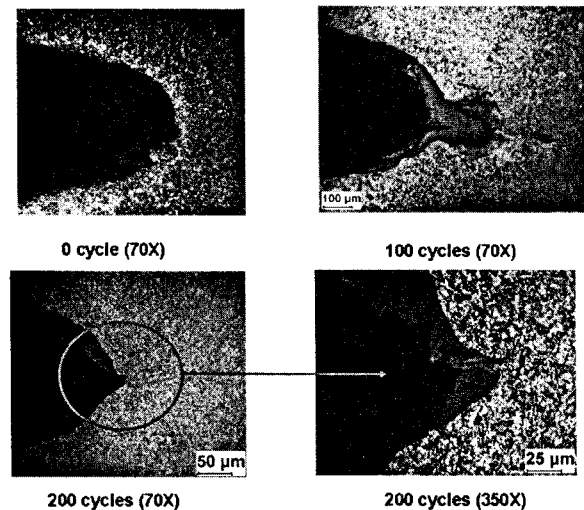


Fig.6 Observed image of the defects #3

### 3.2 유한 요소 해석 결과

#### 3.1.1 용접부의 모델링 해석

Fig.7,8,9은 각각의 열영향부의 관통부위의 노치부분의 요소를 해석하였으며 상온에서 응력이 0에서 시작하여, 싸이클이 90℃에서 끝마침으로 인하여 응력이 남아있다.

각 재료의 강도는 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Strength of material on normal temperature (MPa)

Mod.9Cr-1Mo	STS 316L	Inconel 82
604	275	255

Fig.7이 해석결과 상온에서 시작하여 525℃에서 2시간의 유지시간을 가진 후 90℃로 냉각되어지는 과정에서 최대 응력은 242MPa로 Mod.9Cr-1Mo 강은 상온에서의 최대 강도의 604 MPa 이하에서 작용함을 알 수 있다.

Fig.8이 해석결과 상온에서 시작하여 545℃에서 2시간의 유지시간을 가진 후 90℃로 냉각되어지는 과정에서 최대 응력은 296MPa로 STS 316L강의 상온에서의 최대 강도인 275Mpa 이상에서 작용함으로 인하여 크립-피로의 발생을 확인 할 수 있었다.

Fig.9이 해석결과 상온에서 시작하여 610℃에서 2시간의 유지시간을 가진 후 90℃로 냉각되어지는 과정에서 최대 응력은 525MPa로 Mod.9Cr-1Mo 강은 상온에서의 최대 강도의 604 MPa 이하에서 작용하였으나 열하중과 용접부의 결함 등의 이유로 손상이 관찰되었다고 사료되어진다.

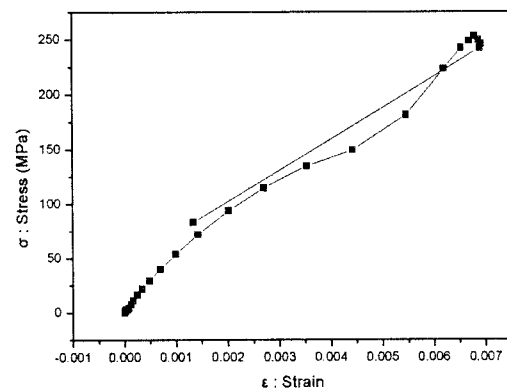


Fig.7 # 1's Stress and strain profile

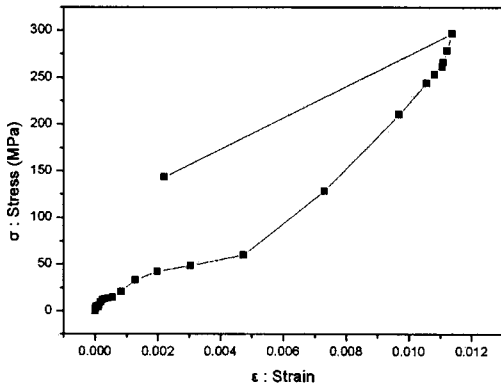


Fig.8 # 2's Stress and strain profile

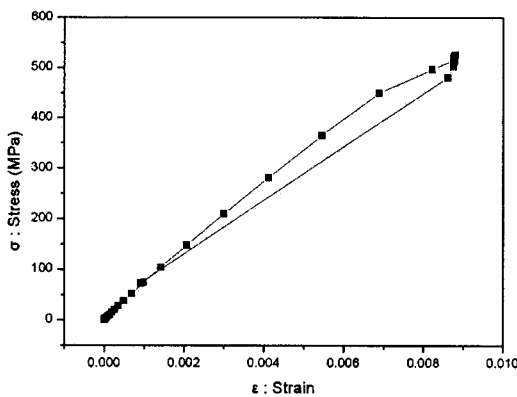


Fig.9 # 3's Stress and strain profile

### 참고 문헌

1. Lee,h.y., Kim,j.b. and Lee,J.H., : Creep-fatigue damage for a structure with dissimilar metal welds of modified 9Cr-1Mo steel and 316L stainless steel , International Journal of fatigue 29 (2007) 1868-1879
2. ASME: 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, (2004)
3. Hahn DH, et al. KALIMER-600 preliminary conceptual design report, KAERI/TR-2784. Daejeon:Korea Atomic Energy Research Institute; 2004

### 4. 결 론

본 연구에서는 액체금속로 동축배관 구조물의 구조시험을 위한 구조시편을 설계하였다. 또한 동중 및 이종용접 효과를 관찰하기 위하여 구조시편에 다수의 용접부를 두었으나 본 연구에서는 Mod.9Cr-1Mo강과 STS-316L 강의 용접부위만 관찰하여 평가하였다.

유한요소해석을 통하여 가상 열하중 및 기계하중을 가하고 온도 및 응력해석을 수행하였다.

실제 설계에서 고려하는 하중에 비해 더 많은 열하중을 받으며 200사이클의 크립-피로 하중을 받은 후 손상을 관찰한 결과 시편의 각 용접부에서는 STS 316L 강에서 적은 손상이 발생하였지만 비교적 구조적 건전성을 유지함을 확인하였으며, Mod.9Cr-1Mo 강 of 열영향부에서도 재료의 안전성을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 한국원자력연구원의 장비 및 연구비 지원에 의해 수행되었기에 감사를 드립니다.