

## 316L 스테인리스 강의 고온 인장곡선 변화특성

주용선, 주영상, 김종범, 김대환, 이재한

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150, [chooquick@kaeri.re.kr](mailto:chooquick@kaeri.re.kr)

## 1. 서론

오스테나이트 스테인리스 강은 고온 강도, 연성, 인성, 내식성 등이 우수해서 고온 원자력용기 및 구조재료로서 널리 사용되고 있다. 특히 SS316L 강은 고온에서 기계적 성질 및 부식성이 강화되어 차세대 원자로, 액체금속로 및 핵융합로의 구조재료로서 사용되는 유망한 재료이다 [1-2]. 본 논문에서는 액체금속로 고온구조건전성 평가용 NONSTA 코드[3]의 SS316L 강의 재료상수 결정 실험자료를 구축하기 위하여 25°C 상온부터 700°C 고온에 이르는 여러 온도 조건에서 인장시험을 수행하여 각 온도에 따른 SS316L 강의 인장곡선 변화특성을 분석하였고, RCC-MR 코드[4]의 인장곡선 데이터와 인장특성 경향을 비교하였다. 또한 고온 크립 피로시험을 위해 제작한 원통형 구조시편의 초기상태와 시험후 열화된 상태의 기계적 물성치 변화를 연속압입테스터 표면측정에 의해 관찰 분석하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

인장시험과 연속압입 테스터 표면측정에 사용된 시편과 실험방법 및 실험장치는 다음과 같다.

## 2.1 인장시험

인장시험편은 인발(extrusion)에 의해 가공된 봉상 재료로부터 선반작업을 수행하여 제작되었으며 시험편의 형상과 크기는 Figure 1 과 같다. 시험온도는 상온과 100°C 에서 700°C까지는 100°C 간격으로 증가시켰으며, 시험 기간중 온도 편차를  $\pm 2^\circ\text{C}$  이내로 제어하였다. 온도의 균일함을 얻기 위해 시험온도에서 90 분 동안 유지 후 안정된 온도조건에서 시험을 수행하였다. 실험에 사용된 인장시험기는 Instron 4505 이고 변형속도는 3mm/min 로 변위제어로 실험하였다.

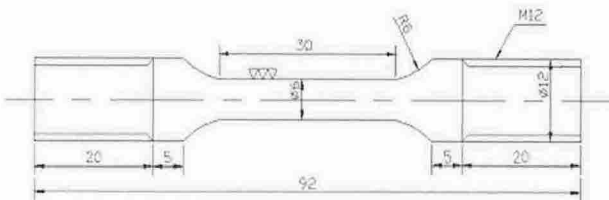


Figure 1. Specimen for tensile test.

## 2.2 구조시편 연속압입 테스터 표면측정

원통형 구조시편은 두께가 5mm, 외경은 600mm, 높이는 500mm 이다. 상온에서 초기상태의 구조시편 표면을 연속압입 테스터기로 10 $\mu\text{m}$  로 누르고 50%를 제하하는 방식을 반복해서 150 $\mu\text{m}$  까지 압입후 하중-압입 데이터를 처리하여 응력-변형을 곡선을 얻었다. 그리고 이 구조시편의 바깥표면을 550°C 로 가열하여 1 시간 동안 유지한 후 30 분 냉각하는 고온 크립 피로시험이 400 사이클 진행된 상태의 표면을 초기상태와 같이 측정하였다. 실험에 사용된 기기는 Frontics 사의 AIS2000 이다.

## 3. 실험결과 및 고찰

SS316L 봉재 시험편의 상온과 고온 인장시험에서 얻은 응력 변위 곡선은 Figure 2 와 같이 나타났다. 각 온도별 항복응력(yield stress)과 최대 인장강도(UTS)는 Figure 3 에서 보인 것처럼 500°C 까지는 온도가 증가할수록 7% 미만으로 점차 감소하다가 500°C 이상에서는 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 500°C 와 600°C 에서는 하중 변위곡선이 dynamic strain aging 효과가 나타나고 있다. 연신률은 상온에서 300°C 까지는 감소하지만 그 이후로 증가추세를 보이면서 700°C 에서는 급격히 증가하는 recovery 효과를 보이면서 상온과 같이 35%로 나타났다. 프랑스의 고온 액체금속로 설계코드인 RCC-MR 에 수록된 Figure 4 의 온도별 인장곡선과 비교하면 본 실험결과에서 보인 인장특성과는 달리 상온에서 고온으로 갈수록 인장강도의 감소폭이 줄어들고 있으며 전체적인 인장강도의 크기도 60% 정도 작게 나타났다. 이런 차이는 본 연구에서 수행한 인장시험 시험편의 봉재 냉간가공에 기인하는 것으로 사료되며, 자세한 분석을 위해서는 추가 연구가 필요하다.

고온크립피로 시험을 수행한 원통형 구조시편에 대한 연속압입테스터 표면측정 결과는 Figure 5 와 같이 크립 피로시험으로 인해 열화된 상태의 인장강도가 초기상태보다 현격히 감소하고 있음을 보여주고 있으며, 열화된 상태의 인장특성은 400°C 에서의 인장시험 결과와 비슷하게 나타났다.

4. 결론

액체금속로 고온구조건전성 평가용 NONSTA 코드의 SS316L 강의 재료특성 실험자료를 구축하기 위해 액체금속로 원자로용기 구조재료로 사용되는 SS316L 재료의 고온 인장 특성실험을 수행하였다. 고온크리프로 손상시험에 사용된 원통형 구조시편에 대한 연속압입테스터 표면측정을 수행하고 인장시험 결과와 비교하여 열화된 상태의 인장특성이 400°C에서의 인장시험 결과와 유사함을 알 수 있었다. 향후 고온인장시험의 추가 실험과 고온 저주기 피로시험을 수행하여 NONSTA 코드의 재료상수 기본자료를 구축할 예정이다.

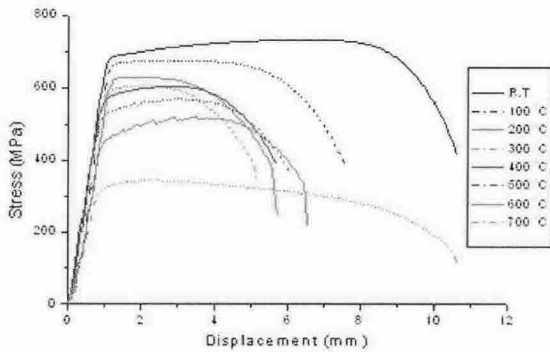


Figure 2. Stress-displacement curve of SS316L in tensile test.

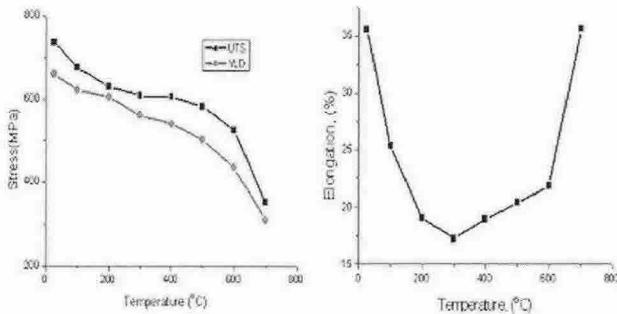


Figure 3. Tensile properties of yield stress, ultimate stress and elongation.

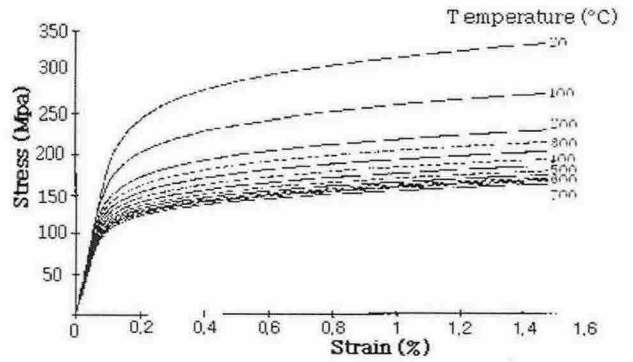


Figure 4. Tensile stress-strain curve of SS316 in RC C-MR code.

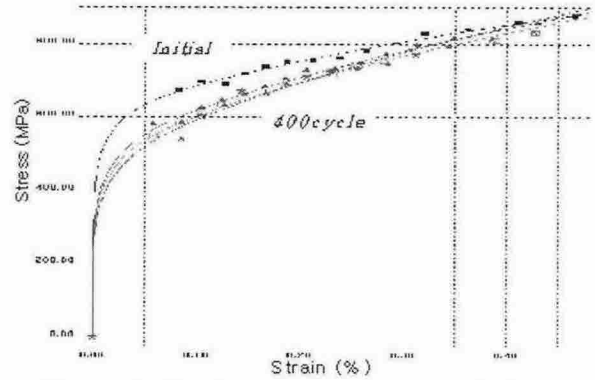


Figure 5. Tensile stress-strain curve of micro indentation test.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 지원을 받아 2004년도 원자력연구개발사업을 통해 수행되었음.

참고문헌

- [1] 류우석 등, "액체금속로 구조재료 개요", KAERI/AR-487/98, 한국원자력연구소.
- [2] 김대환 등, "액체금속로 구조재료의 고온 기계적 특성", KAERI/AR487/98, 한국원자력연구소.
- [3] 김종범 등, "액체금속로 고온구조 설계해석을 위한 NONSTA 코드 개발", KAERI/TR-1256/99, 한국원자력연구소.
- [4] 프랑스 고온 액체금속로 설계코드, "RCC-MR", 2002.