

Type 316LN 스테인리스 강의 열피로 특성

Thermomechanical Properties of Type 316LN Stainless Steel

김대환, 한창희, 김봉구, 강영환, 류우석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

316LN 스테인리스 강으로 상온~600°C에서 인장, 저주기피로, 열피로시험을 수행하였다. 인장강도는 온도증가에 따라서 감소하는 경향을 나타내었고 연신율은 온도증가에 따라서 감소하다가 400°C 근방에서 최소값을 나타낸후 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 저주기 피로수명은 300°C까지는 거의 일정한 값을 나타내다가 300°C 이상에서는 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 열피로시험은 300~600°C의 온도범위, 변형범위 2%에서 in-phase와 out of phase로 구속율 100, 50%에서 수행하였다. 열피로수명은 600°C에서의 저주기 피로수명보다는 in phase의 경우는 증가하고 out of phase의 경우는 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 원인으로서는 스테인리스 강은 열팽창이 크기 때문에 열응력이 기계적응력에 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

Abstract

Tensile, low cycle fatigue, and thermomechanical tests were conducted at RT~600°C for type 316LN stainless steel. Tensile strength decreased with temperature and elongation decreased, was minimum at 400°C, and increased with temperature. Low cycle fatigue life was almost same up to 300°C and decreases abruptly with temperature at above 300°C. Thermomechanical fatigue test was conducted at 300~600°C, 2% strain range, in or out of phase, 100 or 50% constraint. Thermomechanical

fatigue life of in phase was higher than low cycle fatigue life at 600°C but that of out of phase was lower than LCF life at 600°C. This behavior is considered that austenitic stainless steel has high thermal expansion.

1. 서론

고온, 고압하에서 사용되어지고 있는 원자력 발전소의 노내구조물과 배관에서는 가열과 냉각이 반복됨으로서 구조물이 변형된다. 원전 구조물은 이러한 온도변화에 의한 열팽창이 구속됨으로서 열응력이 발생함과 동시에 원자력발전소의 가동에 의해서 기계적 하중이 반복적으로 받게된다. 고온 구조물이 기계적하중과 온도변화에 의해서 점차적으로 손상되어 파손이 발생하는 현상을 열피로 손상으로 정의하고 있고, 일정한 온도에서 반복적인 하중이 가하여지는 고온 저주기피로와 구분하고 있다[1]. 따라서 열피로 시험은 고온에서 사용되어지고 있는 구조물의 손상을 실제와 가깝게 평가하여 설계시에 적용할 수 있다. 본 연구에서는 일정한 온도에서 피로시험을 수행하여 고온 저주기 피로수명을 측정하고 이러한 고온 저주기 피로수명과 기계적 하중에 열응력이 가해져 발생하는 열피로 수명을 비교하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 화학조성과 열처리

실험에 사용된 type 316LN 스테인리스 강의 화학조성을 표 1에 나타내었다. 시편은 1100°C에서 1시간 용체화처리하여 수냉하였고, 압연방향이 시편의 길이방향이 되도록 채취하였다.

2.2. 시험방법

인장 및 피로시험은 상온~600°C로 변화시켰고 시험기간중 온도편차를 $\pm 2^\circ\text{C}$ 이내로 제어하였다. 온도의 균일함을 얻기 위하여 시험온도에서 1시간 유지후 시험을 수행하였다. 인장시험은 평행부가 25 mm, 직경이 6 mm인 봉상시편으로 Instron 4505로 변위제어로서 $2 \times 10^{-3}/\text{s}$ 의 변형속도로 시험하였다. 저주기 피로시편의 형상은 평행부 길이가 8 mm이고 직경이 7 mm인 봉상시편이었고, 변형범위 0.8~1.5%, 변형속도 $2 \times 10^{-3}/\text{s}$, 삼각파를 사용하여 strain 제어로 Instron 8502를 사용하여 ASTM E606에 정하는 바에 따라서 수행하였다. 열피로 시험의 형상은 평행부가 8 mm, 직경이 7 mm인 봉상시편을 길이방향으로 직경 4 mm의 구멍을 뚫은 hollow type을 사용하였다. 열피로 변형범위는 2%,

변형속도는 0.0083 Hz, 온도와 기계적하중의 사이클이 삼각파가 되도록 하였고 가열과 동시에 인장이 걸리는 in phase, 가열과 동시에 압축이 걸리는 out of phase로 시험을 수행하였고 구속율은 100, 50%로 변화시켰다. 온도의 제어는 시편에 직접 직경 0.2 mm의 열전대를 용접하여 제어하였고 시험은 공기중에서 수행하였다.

2.3. 열피로 시험장치 개요

열피로시험을 위한 장치의 개략도는 그림 1과 같다. 고주파유도 가열기로서 가열하고 냉각은 시편의 내부의 구멍을 통하여 압축공기를 분사하는 방식으로 삼각파가 되도록 하였다. 유도가열장치는 기준온도까지 가열후에 열사이클을 주도록 2중 제어방식을 채택하여 일정온도에서의 피로특성평가와 열피로특성을 평가하였다. 냉각시 필요한 출력 공기압은 6~7 kg/cm²이 되도록 하고 electric actuator가 solenoid 밸브의 간격을 조절함으로써 공기의 양을 변화시켜 냉각속도를 제어한다. 시편의 길이방향으로의 온도편차를 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 이내이었고 시험의 안전을 고려하여 냉각수와 냉각용 압축공기가 기준치 이하 일때는 고주파유도장치가 작동하지 않도록 하였다. 실험시 나타나는 하중, strain, 변위 등은 컴퓨터를 통하여 데이터를 저장하게 되고 온도의 측정시 유도에 의한 오차를 줄이기 위하여 직경이 0.2 mm인 열전대를 사용함과 동시에 pyrometer를 이용하여 온도를 측정함으로써 온도를 정확히 실시간으로 확인하였다. 구속율이 100%인 경우는 열팽창에 의해서 발생하는 하중이 100% 전달되도록 변형량을 기계적 하중장치가 조절하고 50%인 경우는 50% 전달되도록 변형량을 조절한 것을 의미하게 된다. 기계적 사이클과 열사이클의 phase를 일치시키기 위해서 변형장치에서 발생하는 신호를 가열장치가 받아서 매 사이클 마다 보정을 해주는 방식을 채택하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1. 인장특성

온도변화에 따른 인장결과를 그림 2에 나타내었다. 온도의 증가에 따라서 항복강도 및 인장강도는 감소하는 경향을 나타내었지만 연신율은 감소하다가 400 $^{\circ}\text{C}$ 근방에서 최소값을 나타낸 후 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 이와같은 거동은 동적변형시효의 영향에 의해서 발생하는 것으로 보고되고 있다[2,3].

3.2. 저주기피로

3.2.1. 온도에 따른 피로수명의 변화

온도의 변화에 따른 피로수명의 변화를 그림 3에 나타내었다. 피로수명이 300 $^{\circ}\text{C}$ 까지는 거의 일정한 값을 유지하다가 400 $^{\circ}\text{C}$ 이후로는 급격한 감소를 나타내었다. 고온에서의 피

로수명의 급격한 감소는 동적변형시효가 발생하여 강도를 증가시키고 연신율을 감소시켜 피로균열전파속도를 증가시키기 때문으로 알려져 있다[4,-6].

3.2.2. 응력-사이클 곡선

일정한 온도에서 변형범위 1.0%에서 피로시험한 경우 온도에 따른 저주기피로곡선의 변화를 그림 4에 나타내었다. 상온에서는 피로수명 곡선의 초기에 경화가 극히 짧게 나타나다가 계속 연화되는 경향을 나타내지만 온도가 증가할수록 피로수명곡선 초기에 경화가 발생하였다. 이러한 경화는 동적변형시효에 의해서 발생하는 것으로 알려져 있다[4,6]. 초기경화후에는 포화되다가 파단이 발생하게 된다.

3.3. 열피로

3.3.1. 온도변화에 따른 strain의 변화

온도에 따라서 시편이 팽창하기 때문에 strain에 변화가 발생하게 된다. 이것을 보정해 주기 위해서 온도에 따른 strain을 측정하여 그림 5에 나타내었다. 향후 열피로 시험에서는 이 곡선을 기준으로 변형량을 결정하게 된다.

3.3.2. 응력-사이클 곡선

변형량 2.0%, 300~600℃에서 phase의 변화에 따른 응력 사이클의 곡선을 그림 6에 나타내었다. 일정온도에서의 실험결과와 같이 초기경화가 나타나지만 포화현상을 발생하지 않고 계속 경화되다가 파단되는 형태를 나타내었다.

3.3.3. 열피로 수명에 미치는 phase의 영향

그림 3에서 보는바와 같이 일정온도에서 저주기피로시험을 수행한 경우 변형범위 2%에서의 피로수명은 530 사이클 정도이다. 그러나 그림 6에서와 같이 기계적 하중은 주지 않고 300~600℃사이의 열응력만 가한 경우는 600℃ 일정온도에서 기계적 하중만 가한 경우보다 약 2배 정도 피로수명이 증가하였다. 또한 일정온도에서의 저주기 피로수명보다는 기계적 하중과 열하중을 동시에 가한 열피로 수명이 in-phase의 경우는 약 12배 정도 증가하는 경향을, out of phase는 약 2/3정도 감소하는 경향을 나타내었다.

3.3.4. 열피로 수명에 미치는 구속율의 영향

구속율이 감소할수록 강도는 증가하고 열피로수명은 감소하는 경향을 그림 7에 나타내었다. 이와같은 이유는 스테인리스 강의 열팽창 계수가 크기 때문에 열팽창에 의한 변형이 기계적 변형에 영향을 주었기 때문으로 판단된다.

3.3.5. 파면관찰

열피로시험후 파단면의 사진을 그림 8에 나타내었다. In-phase의 경우는 striation이 관찰되고 있지만 out of phase의 경우는 striation보다는 더 큰 간격으로 전파한 것을 알 수 있고 이러한 결과는 열피로 수명의 변화와 일치하는 경향을 나타내었다. 균열의 생성은 시편의 내부에서 주로 시작되어 전파되는 경향을 나타내지만 내부와 외부에서 동시에 발생하기도 하였다. 구속율의 차이에 의한 영향은 파면에서는 구분하기 어렵다.

4. 결론

Type 316LN 스테인리스 강으로 상온~600℃에서 인장, 저주기 피로, 열피로시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 온도가 증가하면 인장강도는 감소하지만 연신율은 최소값을 나타낸 후 다시 증가한다.
2. 피로수명은 300℃까지는 거의 변화가 없다가 그 이후 급격히 감소하였다.
3. 열피로 수명은 in-phase경우가 out of phase 경우 보다는 증가하였다.
4. 구속율이 증가하면 피로수명은 증가하였다.

후 기

연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발 중장기사업중 고온강도 평가 및 신재료 기술개발 과제에서 수행한 결과의 일부분입니다.

참 고 문 헌

1. D.A. Spera, ASTM STP 612 (1975) 3
2. D.W. Kim, W.S. Ryu, J.H. Hong, I.H. Kuk, S.K. Choi, J. Kor. Inst. Met. & Mater., 36, No. 3 (1998) 342.
3. L.H. de Almeida and P.R.O. Emygdio, Scripta Metall., 31 (1994) 505.
4. D.W. Kim, W.S. Ryu, J.H. Hong and S.K. Choi : J. Kor. Inst. Met. & Mater., 36 (1998) 1728.

5. Kaneaki Tsuzaki, Takashi Hori, Tadashi Maki, and Imao Tamura : Mat. Sci. Eng., 6 (1983) 247.
6. V. S. Srinivasan, R. Sandhya, K. Bhanu Sankara Rao, S. L. Mannan and K. S, Raghavan, Int. J. Fatigue, 13, No. 6 (1991) 471.

Table 1. Chemical composition of specimens (wt%)

Spec. ID	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	N	P	S	Grain size (μm)
316LN	0.019	0.70	0.97	12.46	17.23	2.38	0.10	0.007	0.002	47

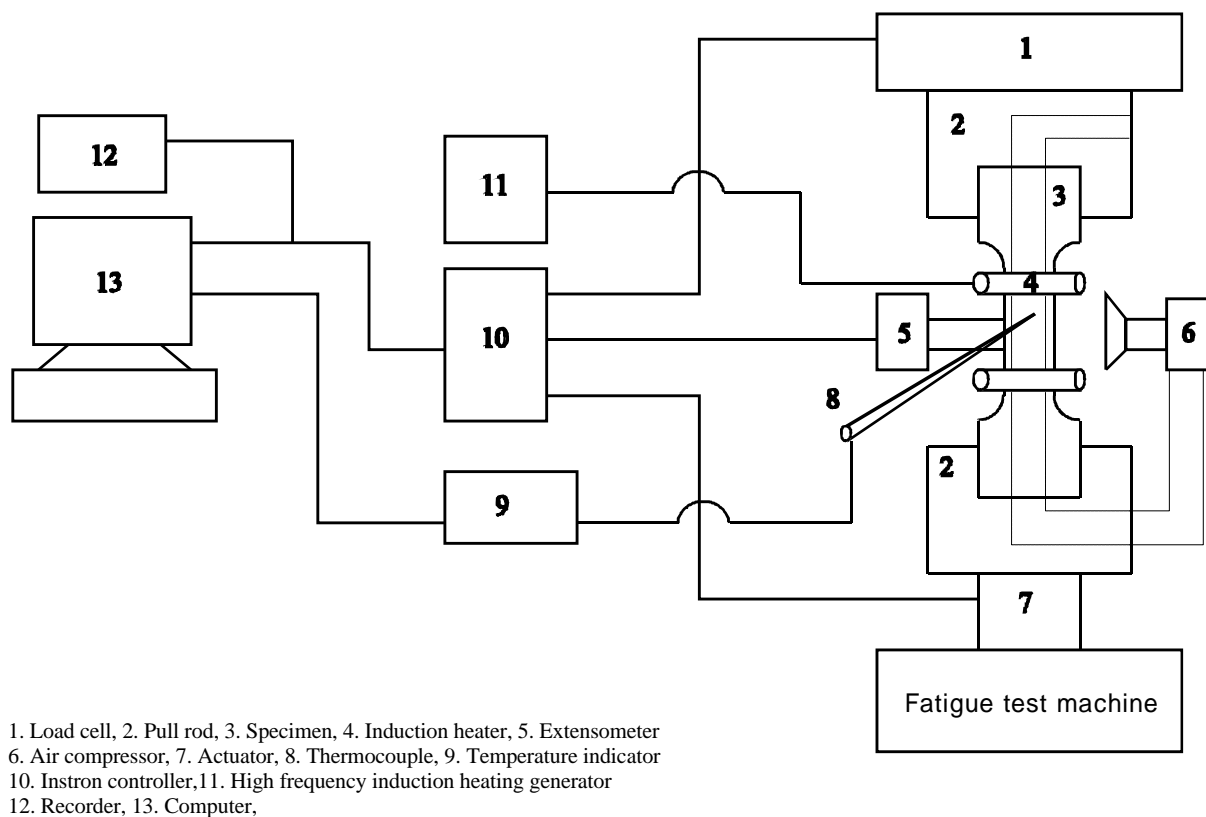


Fig. 1. Schematic diagram for thermomechanical fatigue test.

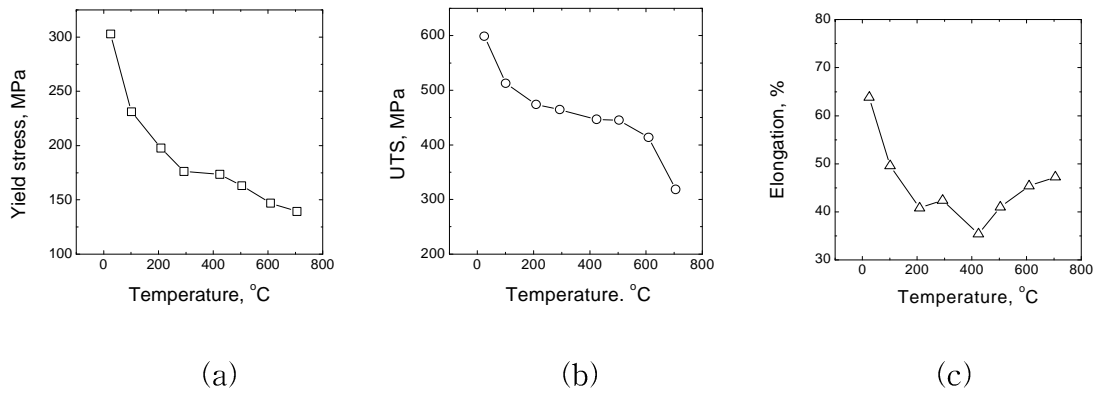


Fig. 2. Tensile properties of type 316LN stainless steel with nitrogen content : (a) Yield stress, (b) Ultimate tensile stress, and (c) Elongation.

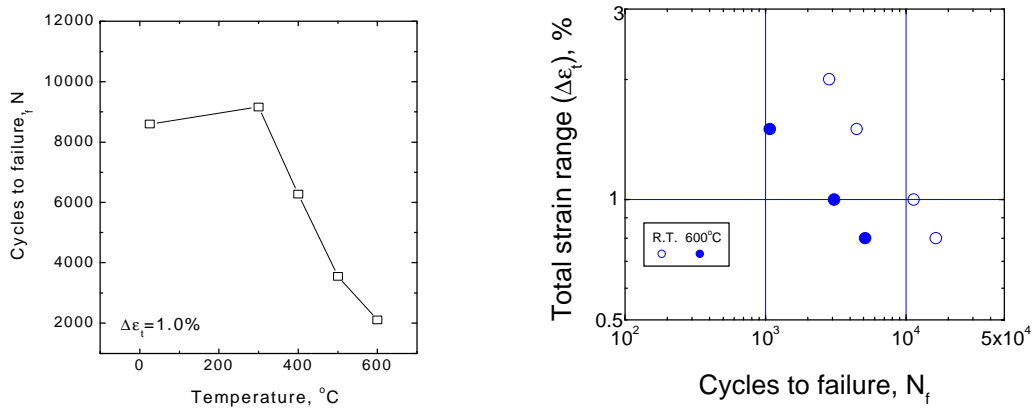


Fig. 3. LCF life of type 316LN stainless steel with temperature

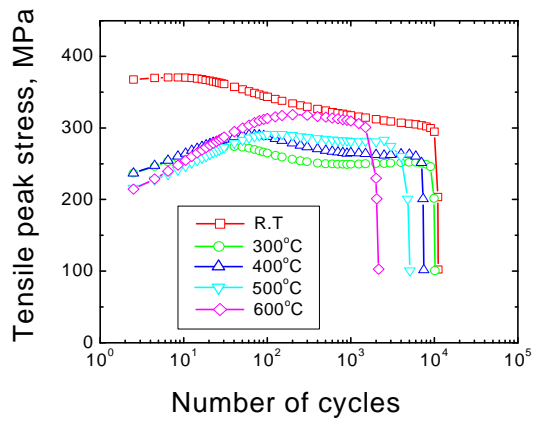


Fig. 4. Cyclic curve of type 316LN stainless steel with temperature at $\Delta \epsilon_t = 1.0\%$

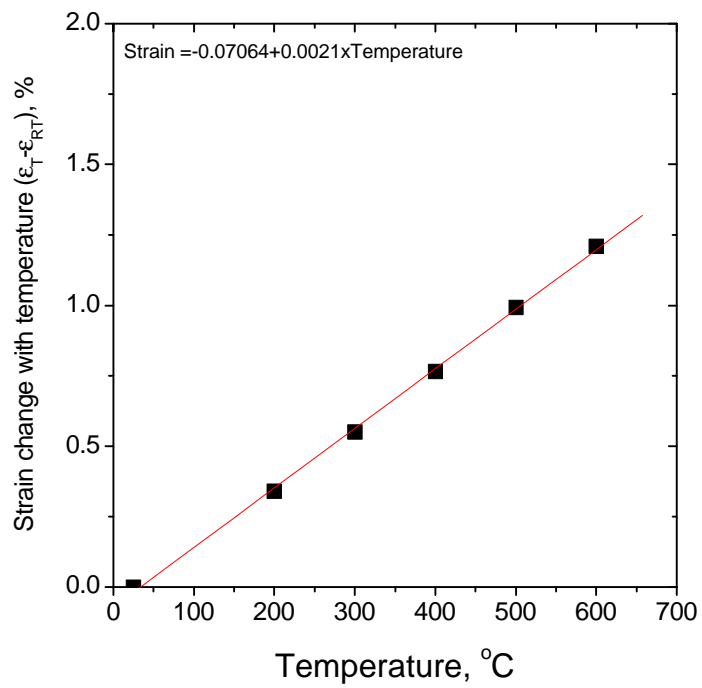


Fig. 5. Strain change with temperature for type 316LN stainless steel.

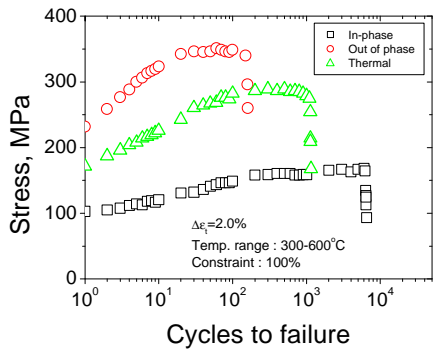


Fig. 6. Thermomechanical fatigue curve of type 316LN stainless steel at $\Delta \epsilon_t = 2.0\%$ and $300 \sim 600^\circ\text{C}$.

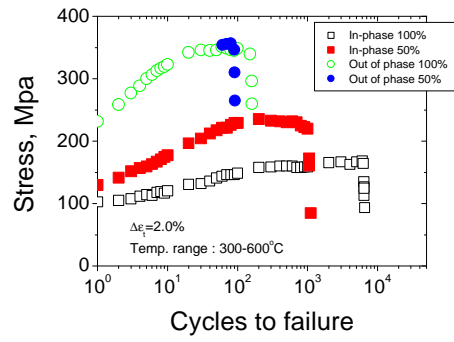


Fig. 7. Effect of constraint on thermomechanical fatigue curve of type 316LN stainless steel at $\Delta \epsilon_t = 2.0\%$ and $300 \sim 600^\circ\text{C}$.

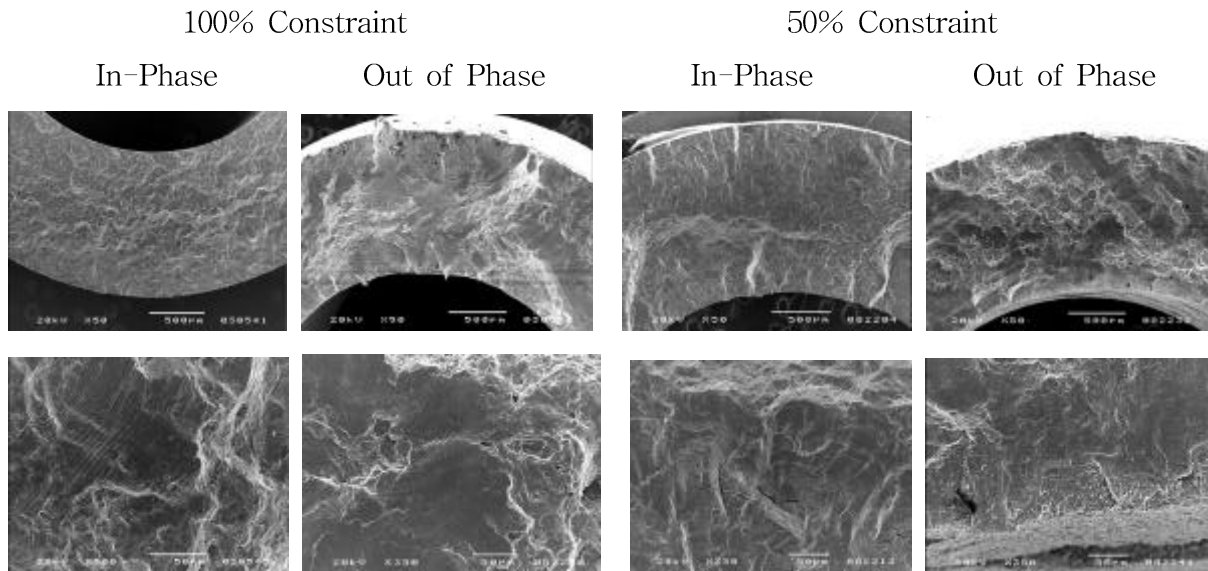


Fig. 8. Fracture surface of type 316LN stainless steel after thermamomechanical fatigue test at $300 \sim 600^\circ\text{C}$, $\Delta \epsilon_t = 2.0\%$.