

# Exhaust Manifold 용 오스테나이트계 스테인리스 강의 고온 변형특성

이규동<sup>1</sup>, 하태권<sup>1#</sup>, 정효태<sup>1</sup>

## HIGH TEMPERATURE DEFORMATION BEHAVIOR OF AUSTENITIC STAINLESS STEELS FOR EXHAUST MANIFOLD

K. D. Lee, T. K. Ha, H. T. Jeong

### Abstract

Domestic automobile industries have been focusing their effort on development of exhaust manifolds using high temperature stainless steel. Exhaust manifolds fabricated with stainless steels can be categorized into tubular and cast ones. The former is usually manufactured by forming and welding process and the latter by vacuum casting process. In the present study, high temperature mechanical properties of 5 austenitic stainless steels, one was sand cast and the others vacuum cast, were investigated by performing a series of high temperature tensile tests and high temperature low cycle fatigue tests.

**Key Words** : Exhaust manifold, cast stainless exhaust manifold, low cycle fatigue properties, high temperature tensile properties.

### 1. 서론

최근 자동차 업계에서는 엄격한 배기가스 규제 및 내구 보증기간 확대에 대응하기 위해서 엔진 본체개량, 엔진 전자제어 등의 엔진제어 기술과 촉매 활성화 시간단축 및 촉매자체에 관한 배기 후처리 기술개발에 주력하고 있다. 촉매 활성화 시간을 단축하기 위해서는 촉매장치를 가능한 한 엔진 가까이에 두고 배기다기관(exhaust manifold)의 중량 감소에 의한 열용량을 최소화하여야 한다. 그 결과 배기다기관의 온도는 점점 더 상승하게 되어 고온 내열 특성이 우수한 재질이 요구되며, 열용량 최소화에 따른 경량화도 함께 이루어야 한다.

특히 900℃ 이상의 높은 배기 온도에 노출되기

때문에 소재의 고온특성이 중요한 문제로 대두되고 있다. 따라서 국내의 자동차 업계에서는 고온 특성이 우수한 내열 스테인리스강을 이용한 배기다기관을 개발하고자 노력하고 있다. 스테인리스강을 이용한 배기다기관은 성형/용접한 관상(tubular) 다기관과 반중력 진공 주조 등에 의한 주조 스테인리스 (cast stainless steel) 배기다기관으로 구분된다. 본 연구에서는 반중력 진공주조로 만들어진 오스테나이트계 스테인리스강 1종과 사형주조된 오스테나이트계 스테인리스강 4종 등 총 5종의 주조합금강의 고온인장과 고온저주기피로 실험을 통하여 배기다기관의 제작에 필수적인 고온 물성치를 확보하고자 하였다.

1. 강릉대학교 금속재료공학과

# 강릉대학교 금속재료공학과, E-mail:tkha@kangnung.ac.kr

Table. 1 Austenitic stainless steel of compos

성분 구분	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	W	N
A1_1	0.5	0.8	1.2	0	0.2	20	24	2.5	0	0.05
A1_2						25			0	
A2_1						20			1.8	
A2_2						20			3.5	
HA3						12			1.7	
		1.5	1.5	0.04	0.15			1.7	0	0

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 오스테나이트계 합금은 표 1과 같고 합금 원소의 차이에 따른 인장시험 재료 물성치와 피로시험 재료 물성치 차이를 보고자 한다.

### 2.1 고온인장 특성평가

인장데이터 확보를 위해 봉상 시편을 제작하여 실험을 수행하였다. 사용된 시편의 형상과 치수는 그림 1과 같고 시험장비는 10ton MTS 810을 사용하였다. 시험 속도는  $1.0 \times 10^{-3}$  /sec의 변형률 제어로 수행하였고, 온도는 800℃로 실험을 수행하였다. 인장시험 결과로 얻어진 응력-변형률 관계에서 항복강도( $\sigma_y$ ), 인장강도( $\sigma_{uts}$ )를 얻을수 있었다.

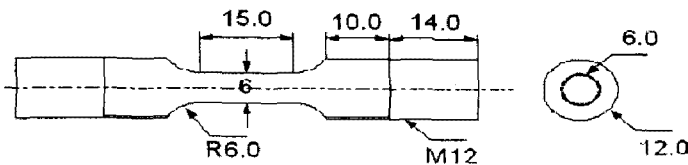


Fig. 1 Tensile or Fatigue test specimen

인장시험 후 파단면을 관찰하고자 전해에칭을 하여 전자현미경(SEM)으로 관찰하였다.

### 2.2 고온 저주기 피로 특성 평가

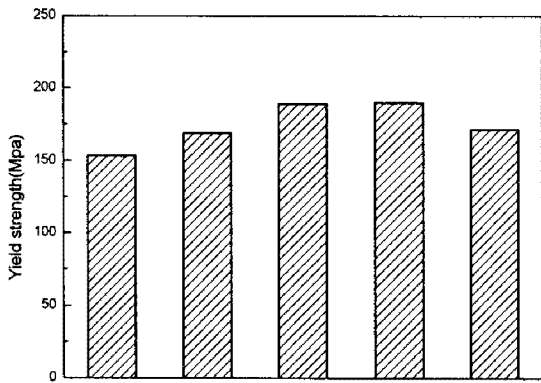
HA3 및 A1\_1~A2\_2 합금에 대하여 저주기 피로 데이터를 확보하기 위하여 저주기 피로시험 (low cycle fatigue test)을 수행 하였다. 사용된 시편의 형상과 치수는 인장시편과 동일한 것으로 그림 1과 같다.

저주기 피로시험은 800℃에서 변형률 진폭 (strain amplitude)은 0.3% (0.116Hz), 0.4% (0.087Hz), 0.5% (0.070Hz), 사이클의 파형은 삼각파형 (triangular waveform), 응력비(R)는 -1, 변형률 속도는  $1.4 \times 10^{-3}$  /sec 로 시편마다 동일하게 적용하였고 피로시험의 수명을 최대 인장응력의 80%으로 정의 하였으며 2 시간 동안 온도 안정화를 시키며 시험의 신뢰성을 높이고자 하였다.

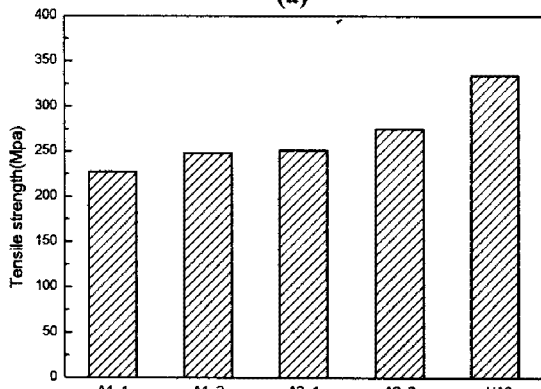
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 고온 인장 특성 평가

인장시험을 통해 항복강도와 인장강도 값을 비교하여 그림 2에 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 2. Result of tensile test (a) Yield Stress (b) UTS

항복강도는 A2\_2가 가장 높게 나오고 A1\_1이 낮게 나왔으며, 또한 인장강도는 HA3가 가장 높게 나오고 A1\_1이 낮게 나왔다.

합금원소의 차이로 인한 A1\_1과 A1\_2를 비교해보면 Ni 함유량을 더 많이 첨가해야 할 것으로 판단되며 A2\_1과 A2\_2를 비교해보면 W을 더 많이 첨가해야 할 것으로 예측할 수 있다.

파단면을 주사전자 현미경(SEM)으로 관찰한 결과를 그림 3에 나타내었다. 전반적으로 딴플로 대표되는 연성과파괴의 양상이며 강종별로 파괴기구의 특별한 차이를 관찰하기에는 어렵다.

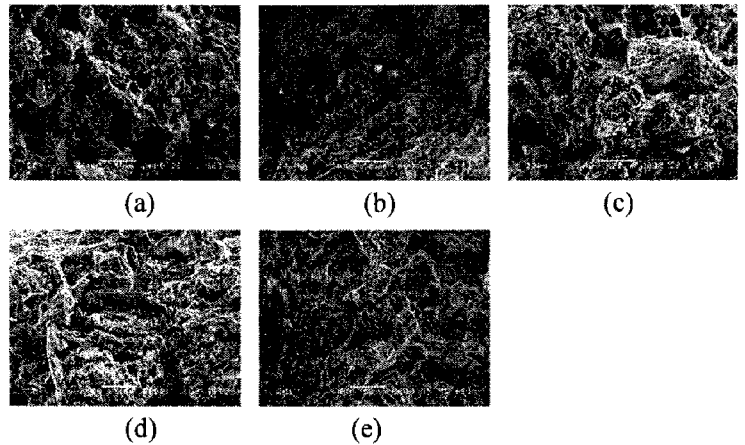


Fig. 3 SEM fractographs of (a) A1\_1, (b) A1\_2, (c) A2\_1, (d) A2\_2, (e) HA3 alloys showing ductile dimples.

### 3.2 고온 저주기 피로 특성 평가

식(1)과 같은 Ramberg-Osgood의 관계식[1]을 사용하여 응력 진폭-변형률 진폭에 대해 curve fitting을 함으로서 반복하중 상태에서의 재료 물성치를 구할수 있다. 그 결과를 그림 4에 표시하였고, 그에 대한 물성치를 표 2에 나타내었다.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \left( \frac{\sigma}{K'} \right)^{1/n'} \quad (1)$$

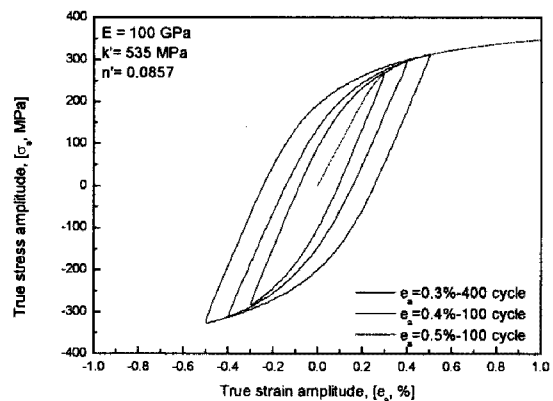


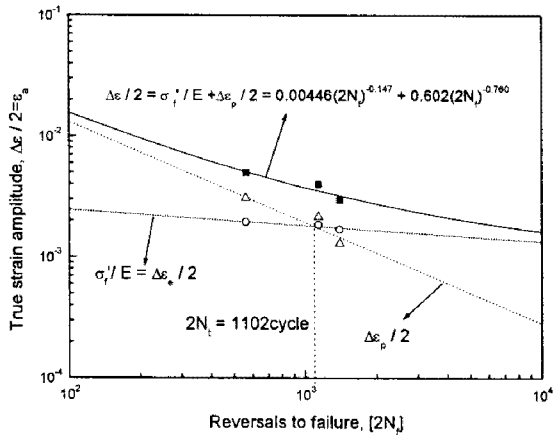
Fig. 4 Stable hysteresis loops HA3 800°C for determining the cycle true stress-strain

**Table. 2** Cyclic stress-strain properties of A1\_1~A2\_2, HA3

	온도	K'	N'
A1_1	800℃	537.9	0.160
A1_2		584.6	0.166
A2_1		1104.8	0.266
A2_2		854.5	0.207
HA3		535.5	0.086

식(2)의 Basquin & Coffin-Manson 관계식 [2],[3],[4])을 이용하면 피로기구에 따른 피로수명의 분할을 알 수 있다. 변형률 진폭과 피로수명의 관계를 그림 5 을 통해 알 수 있으며 그에 따라 피로강도 계수( $\sigma_f'$ ), 피로강도 지수(b), 피로연성 계수( $\epsilon_f'$ ), 피로연성 지수(c) 값을 도출 할 수 있다. 그 결과를 표 3 에 정리하였다.

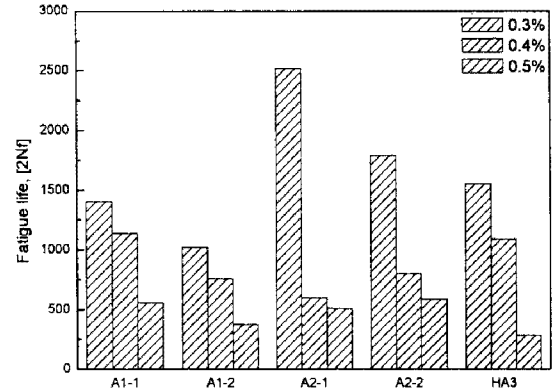
$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \epsilon_a = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (2)$$



**Fig. 5** Total true strain amplitude vs  $2N_f$  - A1\_1 - 800℃

**Table. 3** Cyclic stress-strain properties of A1\_1~A2\_2, HA3

	온도	$\sigma_f'$	b	$\epsilon_f'$	c
A1_1	800℃	545.6	-0.147	0.293	-0.760
A1_2		457.1	-0.117	0.039	-0.452
A2_1		745.0	-0.017	0.534	-0.848
A2_2		453.3	-0.066	0.376	-0.918
HA3		211.0	-0.065	0.118	-0.507



**Fig. 6** Result of Fatigue test

그림 6.에는 5 종류의 연구용 합금에 대해 800℃ 시험온도에서 피로수명의 변화를 도식화 하였다.

0.3% - A2\_1 > A2\_2 > HA3 > A1\_1 > A1\_2 순서이며, 0.4% - A1\_1 > HA3 > A1\_2 > A2\_2 > A2\_1 순서이며, 0.5% - A2\_2 > A1\_1 > A2\_1 > HA3 > A1\_2 순서로 피로 수명이 길었다.

#### 4. 결 론

저주기 피로수명과 고온강도 증가에 W 첨가는 유효한 것으로 판단되나 일정량 이상의 첨가는 도움이 되지 않는 것으로 판단 되어 진다.

또한 Ni 함량 증가는 고온강도에서 약간의 상승이 있으나, 특히 저주기 피로 수명에는 개선 효과가 미비하거나 악화된다. 따라서 HA3 합금보다 Ni 함량을 낮추는 방향으로의 합금개발이 필요할 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] W. Ranmberg, W. R. Osgood, Determination of stress-strain curves by three parameters. Technical note no. 503, National Advisory Committee on Aeronautics (NACA), (1941)
- [2] O. H. Basquin, Proc. ASTM, vol.10, p.625(1910)
- [3] S. S. Manson, NASA, TN, 1993 (1954)
- [4] L. F. Coffin, Trans. ASMD, vol. 76,931(1954)