

배기다기관용 주강소재의 고온특성 평가

이규동¹ · 하태권[#] · 정재영²

Characterization of High Temperature Mechanical Properties of Cast Stainless Steels for Exhaust Manifold

Kyu-Dong Lee, Tae Kwon Ha, Jae Young Jung

(Received December 4, 2008)

Abstract

Automobile industries have been focusing their efforts on the development of exhaust manifolds using high temperature stainless steels. 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 and 4 ferritic stainless steels were investigated by performing a series of high temperature tensile and low cycle fatigue tests. One of the austenitic stainless steels was vacuum cast and the others sand cast. Fatigue life of ferritic stainless steels was higher than that of austenitic ones.

Key-Words: Exhaust Manifold, Cast Stainless Exhaust Manifold, Low Cycle Fatigue Properties, High Temperature Tensile Properties

1. 서 론

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 이루어져야 한다[1].

배기다기관은 엔진하부에 위치하여 엔진의 배기가스를 한 곳으로 모아서 배기계로 전달하는

부품이다. 종래에는 주로 가격이 저렴한 주철이 사용되어 왔으나 무겁고 두꺼워서 시동초기에 온도의 상승이 늦어져서 배기가스의 온도가 빨리 상승하지 못하여 배기가스 정화장치(catalytic converter)에서 공해물질의 정화효율이 떨어지는 단점이 있다. 특히 배기다기관은 900℃ 이상의 높은 배기 온도에 노출되기 때문에 소재의 고온특성이 중요한 문제로 대두되고 있다. 따라서 국내의 자동차 업계에서는 고온특성이 우수한 내열 스테인리스강을 이용한 배기다기관으로 빠르게 전환되고 있다[2~3].

보통 배기다기관용 스테인리스강 판재로는 페라이트계가 많이 사용되는데 이는 주철에서 스테인리스 판재로 전환 시 가격의 상승을 최소화하고 오스테나이트계에 비해서 열팽창계수가 작은 점을 이용하기 위해서이다. 일부 고급차의 경우에

1. 강릉대학교 금속재료공학과

2. 포항산업과학연구원 비철제련연구단

교신저자: 강릉대학교 금속재료공학과, tkha@kangnung.ac.kr

Table 1 Chemical compositions of cast stainless steels in this study(wt.%)

Comp. Spec.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	W	N
F1_1	0.44	0.66	0.74	0.02	0.006	1.68	18.5	1.56	1.36	0.05
F1_2	0.50	0.69	0.71	0.02	0.007	1.77	18.7	1.71	0.17	0.06
F2_1	0.44	0.63	0.70	0.02	0.004	1.61	21.5	1.72	1.42	0.08
F2_2	0.43	0.68	0.66	0.02	0.006	1.65	21.7	1.66	0.01	0.05
A1_1	0.54	1.02	1.11	0.02	0.21	20.2	23.6	2.84	0.02	0.07
A1_2	0.53	0.93	1.19	0.03	0.32	24.1	24.4	2.49	0.01	0.05
A2_1	0.57	1.34	1.31	0.03	0.29	20.1	24.5	2.56	1.86	0.08
A2_2	0.63	1.15	1.26	0.02	0.21	21.2	23.1	2.74	3.84	0.06
HA3	0.51	1.35	1.53	0.02	0.15	13.2	24.5	1.74	0.01	0.11

는 엔진의 성능을 높이기 위해 복잡한 형상의 배기다기관을 사용하는데 이 경우에는 고가의 오스테나이트계 스테인리스강을 사용하기도 한다. 스테인리스강을 이용한 배기다기관은 성형/용접한 관상(tubular) 다기관과 반중력 진공 주조 등에 의한 스테인리스 주강 (cast stainless steel) 배기다기관으로 구분된다.

본 연구에서는 반중력 진공주조로 만들어진 오스테나이트계 스테인리스강 1 종과 사형주조된 페라이트계 스테인리스강 4 종, 그리고 오스테나이트계 스테인리스강 4 종 등 총 9 종의 스테인리스 주강의 상온 및 고온인장(항복강도, 인장강도)과 고온저주기피로 시험을 통하여 배기다기관의 제작에 필수적인 고온 물성치를 확보하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 스테인리스 강들의 화학조성은 Table 1 과 같고 합금 성분배에 따른 인장특성과 피로특성의 차이를 규명하고자 하였다. F 로 표시된 강종은 페라이트계 스테인리스 강으로 Cr 의 함량을 18%과 22%로 변화시켜 일차적으로 이의 영향을 알아보고 이차적으로는 W 첨가의 효과를 알아보고자 하였다. 한편 A 로 표시된 것은 오스테나이트계 스테인리스 강으로 Cr 함량은 24%로 고정시키고 Ni 의 함량을 20%와 25%로 변화시킨 것이다. HA3 은 진공주조로 제조된 오스테나이트계 스테인리스 강으로 Cr 의 양은 비슷하나 Ni 함량이 12%로 타 오스테나이트계 스테인리스 강에 비해 낮은 것이 특징이다.

본 연구에 사용된 사형주조 잉곳의 형태는 Fig.



Fig. 1 Appearances of sand-cast ingots used in this study

1 과 같고 잉곳들의 전형적인 미세조직을 Fig. 2 에 나타내었다. 페라이트계 스테인리스 강은 100 ml Alcohol + 5ml HCl + 4g Picric acid 용액을 사용하였고, 오스테나이트계는 100ml H₂O+100ml HNO₃ 용액으로 DC 5V 에서 전해에칭 하였다.

2.1 고온인장 특성평가

인장시험은 Fig. 3 과 같은 봉상 시편을 제작하여 수행하였다. 시험장비는 10 톤 용량의 MTS 810 을 사용하였고 변형률 속도는 $1.0 \times 10^{-3}/\text{sec}$, 온도는 상온, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800℃로 하여 실험을 수행하였다. 시편온도의 안정화를 위해 각각의 시험온도에서 30 분간 유지한 후 시험을 시작하였다. 인장시험 결과로 얻어진 응력-변형률 관

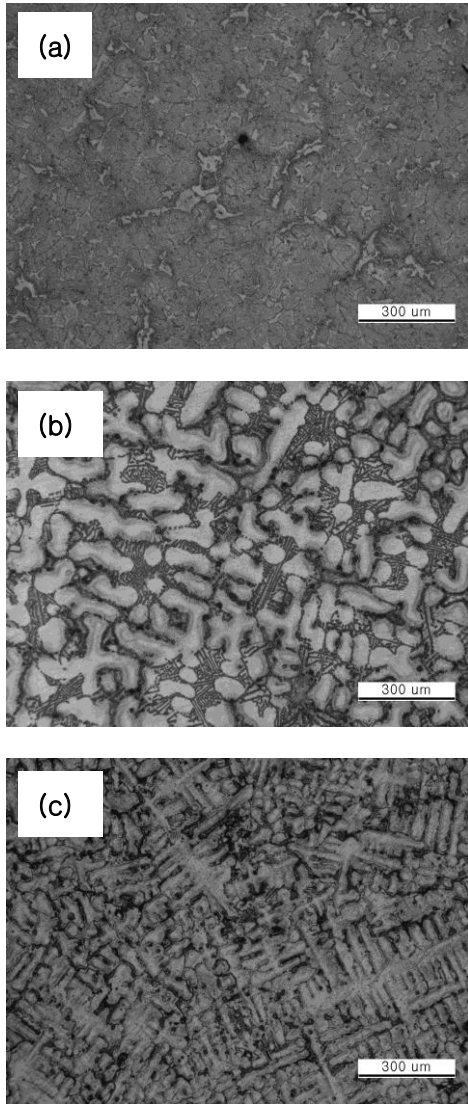


Fig. 2 OM image showing the microstructures of (a) F1_2 (b) A1_1 and (c) HA3

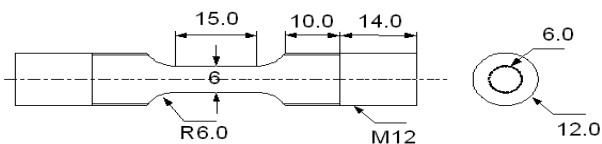


Fig. 3 Dimensions of tensile specimen used in this study(mm)

계에서 항복강도(σ_y), 인장강도(σ_{uts}), 연신율 등의 고온물성을 얻을 수 있었다.

2.2 고온 저주기 피로 특성 평가

HA3 및 F1_1~A2_2 합금에 대하여 고온 저주기 피로 데이터를 확보하기 위하여 저주기 피로시험 (low cycle fatigue test)을 수행하였다. 사용된 시편의 형상과 치수는 인장시편과 동일한 것으로 Fig. 3 과 같다.

저주기 피로시험은 800℃에서 변형률 진폭 (strain amplitude)을 0.3%(0.116Hz), 0.4%(0.087Hz), 그리고 0.5%(0.070Hz)로 변화시키고, 사이클의 파형은 삼각파형(triangular waveform), 응력비(R)는 -1, 변형률 속도는 $1.4 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 로 시편마다 동일하게 적용하였다. 변형률 진폭에 따라 frequency가 다른 것은 변형률 속도를 일정하게 했기 때문이다.

저주기 피로시험에서의 피로수명은 명확하게 정의되어 있지 않고 있다. 현재 사용되고 있는 피로수명의 결정법은 일반적으로 다음 4 가지가 있다.

첫째 임의의 감지 할 만한 크랙이 발생할 때까지의 수명.

둘째 인장-압축하중(비틀림 하중)이 임의의 비율(%)로 감소할 때까지의 수명(ASTM E606 에서는 하중이 50%로 감소할 때까지로 권장).

셋째 인장-압축할 때의 탄성계수의 변화가 임의의 비율(%)로 될 때까지의 수명.

넷째 시편이 완전히 파괴될 때까지의 수명.

본 연구에서는 피로시험의 수명을 최대 인장응력의 80%으로 정의 하였으며 시험온도에서 2 시간 동안 유지시켜 온도를 안정화를 시킨 후 시험을 시작하였다. 변형률 제어를 위한 신장계 (Extensometer)는 표점거리(Gage length)가 12 mm, 최대 용량이 20%인 것을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고온 인장 특성 평가

고온 인장시험을 통해 얻은 항복강도, 인장강도, 연신율 값을 비교하여 Fig. 4 에 나타내었다. 항복강도 결과를 비교해 보면 상온에서 700℃까지는 페라이트계 합금이 오스테나이트계 합금보다 약 1.5~2 배 정도 높고 800℃에서는 오히려 페라이트계 합금이 약 1/2 수준으로 떨어지는 것으로 나타났다. 페라이트계 합금 중에서는 F1_2 합금이 전체적으로 높게 나타났고, F2_1 합금이 가장 낮은 값을 보였다.

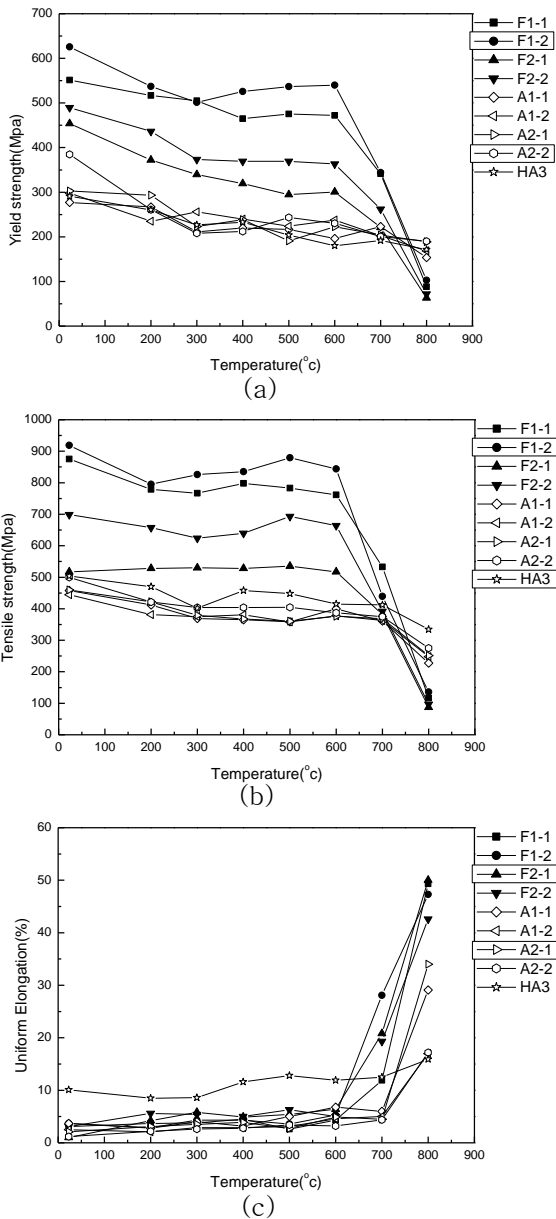


Fig. 4 Result of tensile tests obtained at various temperatures; (a) YS, (b) UTS, and (c) uniform elongation, respectively

인장강도의 경우에는 항복강도와 마찬가지로 상온에서 600°C까지는 페라이트계 합금이 오스테나이트계 합금보다 약 1.5~2 배 높게 나타났고, 700°C에서는 그 차이가 현저하게 줄면서, 800°C에서는 오히려 페라이트계 합금이 약 1/3 수준으로

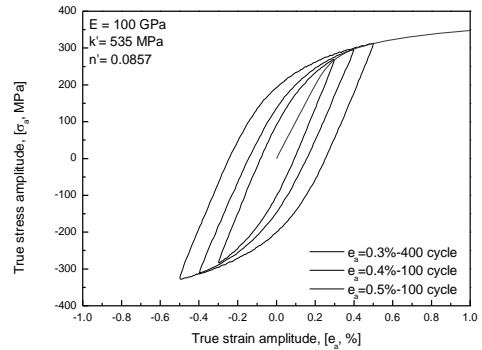


Fig. 5 Cyclic stress-strain curve for HA3 obtained at 800°C for the determination of cyclic strength coefficient and strain-hardening exponent

감소하였다. 페라이트계 합금 중에서는 F1_2 합금이 전체적으로 높게 나타났으며, F2_1 합금이 가장 낮은 값을 보였다.

연신율은 상온에서부터 600°C까지는 오스테나이트계 합금인 HA3가 10% 정도로 가장 높았고, 나머지 합금은 5% 이하의 비슷한 수준이었다. 700°C 이상에서는 페라이트계 합금이 약 40~50%의 연신율을 보였고, 오스테나이트계 합금은 15~35%의 범위를 나타내었다.

인장시험 결과는 크게 페라이트계와 오스테나이트계 스테인리스 강에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있다. 페라이트계의 경우 강도가 상온에서 600°C까지는 완만한 감소를 보이다가 600°C를 기점으로 크게 감소하여 800°C까지 급격한 감소를 보인다. 500°C와 600°C의 항복강도가 400°C에서 보다 높은 것은 σ 상의 석출이 개시되기 때문으로 판단된다[4]. 반면에 오스테나이트계 스테인리스 강들은 600°C를 기점으로 페라이트계에 비해서는 상대적으로 작은 강도의 감소를 보이고 있다. 이와 같이 페라이트계 스테인리스 강의 고온인장강도가 오스테나이트계에 비해 상대적으로 낮은 온도에서 급격한 변화를 보이는 이유는 재결정 온도가 상대적으로 낮기 때문으로 판단된다[4].

페라이트계 스테인리스 강의 경우 Cr 함량이 높을수록 고온강도는 30% 정도 낮아지고 W 첨가에 의한 영향은 크지 않음을 알 수 있었다. 오스테나이트계 스테인리스 강의 경우에는 Ni 함량이 증가함에 따라 약간의 강도 향상이 관찰되나 그 영향은 매우 작고, W 첨가도 고온특성에는 큰 영향이

Table 2 Cyclic strength coefficient and cyclic strain-hardening exponent of stainless steels used in this study

	Temp.(°C)	K'	n'
F1_1	800°C	274.2	0.126
F1_2		309.2	0.127
F2_1		253.9	0.162
F2_2		238.5	0.145
A1_1		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

없는 것으로 나타났다. 연신율의 경우에는 진공주조로 제조된 오스테나이트계 스테인리스 강이 전반적으로 우수한 것으로 평가되었다.

3.2 고온 저주기 피로 특성 평가

Fig. 5는 HA3 합금에 대한 800°C에서의 저주기 피로시험결과 얻어진 반복 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. 이러한 이력곡선을 이용하여 식(1)과 같은 Ramberg-Osgood 관계식[5]에 curve fitting을 함으로써 반복하중 상태에서의 재료 물성인 반복강도계수(K')와 반복가공경화지수(n')를 결정할 수 있었고 Table 2에 그 결과를 정리하였다.

$$\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'} \right)^{1/n'} \quad (1)$$

어떤 피로수명(N_f)에서의 변형률 진폭(total strain amplitude)은 정상상태에서의 이력곡선(hysteresis loop)으로부터 탄성 변형률과 소성 변형률의 합으로 표시되는데, 큰 변형률 혹은 짧은 피로수명을 가질 때에는 소성 변형률 항이 우세하고 작은 변형률 혹은 긴 피로수명을 가질 때에는 탄성 변형률 항이 우세하다. 이러한 관계를 나타낸 것이 다음의 식 (2)로 Basquin 이 제안한 탄성거동에 대한 부분과 Coffin-Manson 의 소성 변형률을 기술하는 관계식을 합친 것이다. 이를 이용하면 각각의 피로기구에 따른 피로수명을 분해할 수 있다[6-8].

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

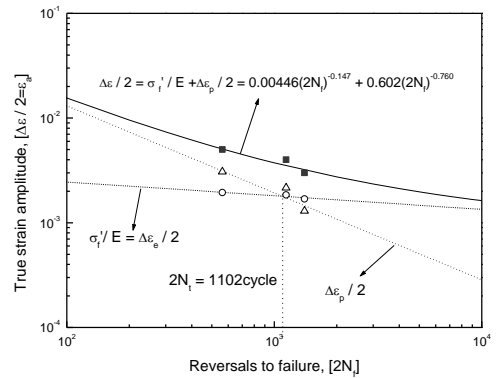


Fig. 6 Fatigue strain-life curve obtained by superposition of elastic and plastic strain-life equations for A1-1 at 800°C

이 식의 해를 구하는 방법은 수치해석적인 방법 (numerical solution)과 도식해법(graphical solution)이 있는데 해석결과의 차이는 없다. 본 연구에서는 수치해석적인 방법으로 피로수명을 예측하였다. 변형률에서 탄성 및 소성 변형률 항이 같아지는 곳의 피로수명을 천이수명(transition fatigue life: 2N_t)이라 한다. 이 천이수명은 탄성 및 소성 변형률에 의한 피로수명이 교차되는 수명으로 그 이상에서는 탄성 변형률 항이 우세하고 그 이하에서는 소성 변형률 항이 우세하다. 변형률 진폭에 따른 피로수명의 관계를 Fig. 6의 예를 통해 알 수 있으며 이러한 해석으로부터 피로강도 계수(σ_f'), 피로강도 지수(b), 피로연성 계수(ε_f'), 피로연성 지수(c) 값을 도출할 수 있다. 그 결과를 Table 3에 정리하였다.

Fig. 7은 본 연구에서 사용한 9 종류의 연구용 합금에 대한 800°C에서의 피로수명을 나타낸 것이다. 전체적으로는 페라이트계 합금의 피로수명이 긴 것으로 나타났고, 페라이트계 합금 중에서는 Cr 함량이 높은 F2-1와 F2-2 합금의 수명이 높았고, W에 의한 영향은 거의 없거나 높은 변형률 진폭에서는 오히려 수명을 단축하는 것으로 나타났다. 오스테나이트계 스테인리스 강의 경우에는 진공주조한 HA3의 피로수명이 가장 높았고, 사형주조의 경우에는 A2_1의 수명이 가장 높은 것으로 나타났다. 그림에서 보면 Ni 함량의 증가는 피로수명에 도움이 되지 않으며 W의 첨가는 피로수명을 향상시키지만 3.5wt.%로 많은 양이 첨가되면 오히려 수명이 낮아지는 것을 알 수 있다.

Table 3 Fatigue strength coefficients, fatigue strength exponents, fatigue ductility coefficients, and fatigue ductility exponents obtained from low cycle fatigue tests at 800°C on the cast stainless steels

	σ_r'	b	ϵ_r'	c
F1_1	280.3	-0.089	0.040	-0.705
F1_2	202.5	-0.083	0.452	-0.615
F2_1	491.3	-0.131	0.602	-0.831
F2_2	214.9	-0.094	0.318	-0.566
A1_1	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

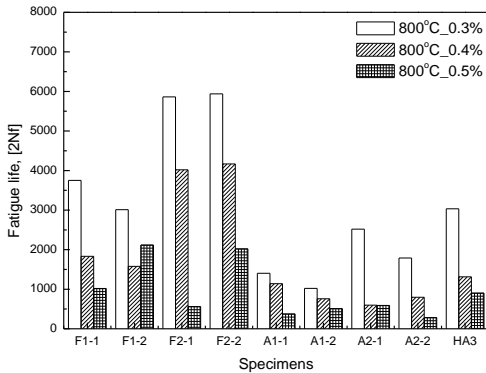


Fig. 7 Summary of fatigue life of cast stainless steels

4. 결론

배기계용 스테인리스 주강의 저주기 피로수명과 고온 인장시험을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

페라이트계 스테인리스 강은 고온 저주기 피로수명이 오스테나이트계 스테인리스 강에 비해 높은 것으로 나타났다.

페라이트계 스테인리스 강은 고온 저주기 피로수명이 오스테나이트계 스테인리스 강에 비해 높은 것으로 나타났다. 또한 Ni 함량 증가는 고온강도를 약간 상승시키나, 저주기 피로수명 개선에는 그 효과가 작았다.

오스테나이트계 스테인리스 강은 고온 저주기 피로수명이 우수하고 저주기 피로수명도 높았다. 사형주조한 오스테나이트계 스테인리스 강에서 W 첨가는 고온강도와 저주기 피로수명 향상에 유효한 것으로 판단되나 일정량 이상의 첨가는 도움이 되지 않는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- [1] N. Matsuura, 1998, 2nd Annual conference of international stainless steel forum, Market Development Committee, pp. 1~16.
- [2] J. W. Kwon, Y. H. Kim, Y. D. Lee, 2000, The 7th steel symposium on development of automotive materials and parts for weight reduction(ed. By O. Kwon, Y. S. Jin, S. J. Kim, W. P. Lee), pp. 285~295.
- [3] N. Fujita, N. Ohmura, E. Sato, A. Yamamoto, 1996, Nippon Technical Report No. 71, pp. 25~30.
- [4] J. R. Davis, 1994, Stainless steels, ASM Specialty Handbook, pp. 445~485.
- [5] W. Ramberg, W. R. Osgood, 1941, Determination of stress-strain curves by three parameters. Technical note N. 503, National Advisory Committee on Aeronautics(NACA).
- [6] O. H. Basquin, 1910, The experimental law of endurance limit, Proc. ASTM, Vol.10, pp. 625~630.
- [7] S. S. Manson, 1953, Behavior of materials under conditions of thermal stress, Heat Transfer Symposium, NACA TN 2933.
- [8] L. F. Coffin, 1954, A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal, Trans. ASME, Vol. 76, pp. 931~950.