

LNG선박용 내조시스템 소재의 기계적 특성 및 피로강도 평가

심희진[†] · 김민태* · 윤인수** · 김영균** · 김정규***

Evaluation of the Fatigue Strength and the Mechanical Properties for Cargo Containment System in LNG Ship

Hee-Jin Shim, Min-Tea Kim, In-Su Yoon, Yung-Kyun Kim and Jung-Kyu Kim

Key Words: SUS 304L(스테인리스 304L), Cargo Containment(내조시스템), Fatigue Strength(피로강도), Stain-Life Curve(변형률-수명 곡선)

Abstract

The membrane type LNG(Liquefied Natural Gas) cargo containment system is a special design structure for the large deformation behavior at LNG temperature(-162°C). The design of membrane is required great confidence so that membrane can play role in the tightness of flammable fluid storing. LNG cargo containment is loaded and unloaded LNG between twice and five times in a week. During this process, the membrane has large deformation behavior due to the variation of temperature and pressure to the self weight.

In this study, the evaluation of the fatigue strength of membrane is very important to determine the design life of LNG storage tank and to evaluate the mechanical properties at the LNG temperature. Also, in the view point of large deformation, the evaluation method is applied conservatively $\epsilon-N_f$ curve of SUS 304L.

1. 서 론

액화 천연가스(liquid nitrogen gas, LNG)는 메탄(CH₄)을 주성분으로 하는 혼합가스로서, 이 가스는 가스전으로부터 인수기기까지 111K(-162°C)의 극저온 상태로 도입저장운반 및 보관 기화기로 운송된다.

LNG 운반선은 크게 자립형탱크와 멤브레인형(membrane type)으로 크게 나누며, 이 중에서 최근

에는 멤브레인형이 주종을 이룬다. LNG 선박용의 화물창은 LNG의 운송을 위한 선적/loading)과 하역(unloading)의 반복으로 111K(-162°C)에서 피로하중을 받게 된다. 또한, LNG의 액압과 파도에 따른 움직임으로 요동(sloshing)이라는 유체유동의 효과에 의한 동적압력 하중하에서 운전된다. 이러한 LNG선박용 내조시스템의 운전조건에 따라 화물창의 제작에 사용되는 소재의 선정은 매우 중요하며, 소재의 저온 기계적 및 피로특성에 대한 축적된 자료 확보가 매우 중요하다.

LNG 선박용 내조 시스템에 사용되고 있는 멤브레인 재료는 성형성이 뛰어난 뿐만 아니라 용접성, 내식성, 인성 및 피로강도가 우수하여야 한다. 이의 대표적인 재료로는 9%Ni강 그리고 오스

† 회원, 한양대학교 대학원

E-mail :wind1426@ihanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0563 FAX : (02)2291-6707

* 한양대학교 대학원

** 한국가스공사 연구개발원

*** 회원, 한양대학교 기계공학부

테나아트계 스테인리스강(SUS 304급)등이 알려져 있다. SUS 300계열의 스테인리스강들은 Fe-Cr-Ni 합금으로 상대적으로 강도가 높을 뿐만 아니라, 저온에서 뛰어난 연성과 인성을 가지므로 극저온 구조물의 적용에 많은 장점을 갖는다.

스테인리스 304강에 관한 국내외 연구 동향은 주로 미시조직학적 관점에서 극저온 환경 하에서의 기계적 특성 및 탄소성 파괴거동에 관한 연구⁽¹⁻⁵⁾가 수행되었다. 이의 대표적인 것으로 Gunter와 Reed⁽¹⁾는 스테인리스 304강의 저온에서의 기계적 특성이 마르텐자이트(martensite) 변태와 밀접한 관계가 있음을 밝혔으며, 김정규 등은 SUS 304강의 강도 및 파괴인성에 미치는 저온효과에 관한 연구⁽²⁾가 수행되었다. 그러나 탄소함유량이 SUS 304L강 보다 적은 SUS 304에 대한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 LNG 선박용 내조 시스템 소재의 SUS 304L에 대한 상온 및 저온환경 하에서의 기계적 특성 및 다양한 변형률 조건에서 변형률-수명의 피로특성을 평가 하였다. 또한, 이의 경험적 피로수명을 제안하였다.

2. 실험 방법

2.1 재료 및 저온 실험장치

본 연구에 사용된 재료는 포항제철(POSCO)에서 생산된 SUS 304L 스테인리스 냉간 압연강판이며, 이의 화학성분은 Table 1과 같다. 인장 시험은 온도에 따른 기계적 특성의 변화를 검토하기 위하여 25°C, -80°C, -120°C 및 -160°C에서 수행하였으며, 시험편은 KS B 0801규정에 의하여 두께 1.5mm의 압연방향(L)으로 제작 되었으며 Fig. 1과 같다. 실험속도는 마텐자이트(martensite)의 변태와 열의 발생으로 인한 영향을 최소화하기 위하여 크로스헤드 속도 0.5mm/min 으로 시험하였다.

저온실험은 자체 제작한 저온용 챔버를 유압서보식 피로시험기(MTS 810 system)에 설치한 후 액체 질소의 주입량을 조절함으로써 저온 상태에서 실험을 수행하였다. 챔버 내에 유입된 액체 질소는 용기 내에서 기화되면서 온도를 저하시키고, 동시에 순환장치에 의하여 순환된 후 배출된

Table 1 Chemical composition of SUS 304L (wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS 304L	0.022	0.379	1.748	0.028	0.026	8.12	18.20

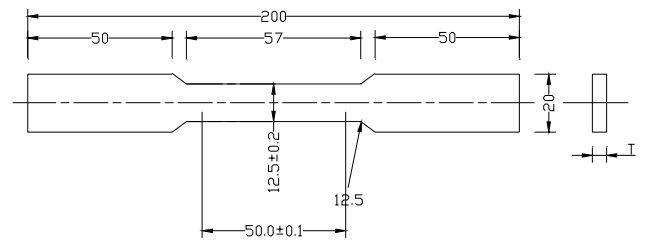


Fig. 1 Configuration of tensile test specimen(mm)

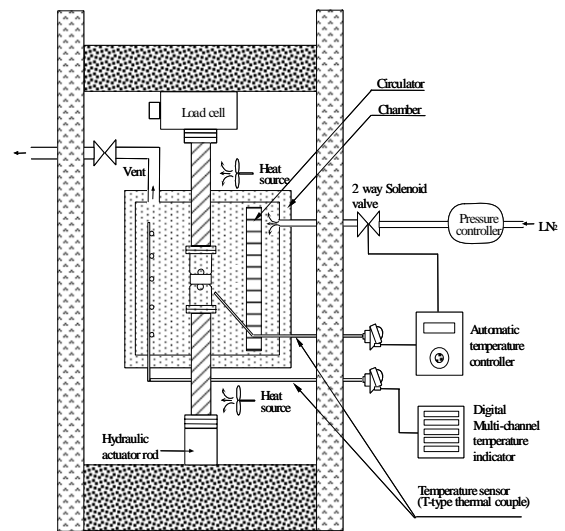


Fig. 2 Schematic diagram of the low temperature experimental apparatus

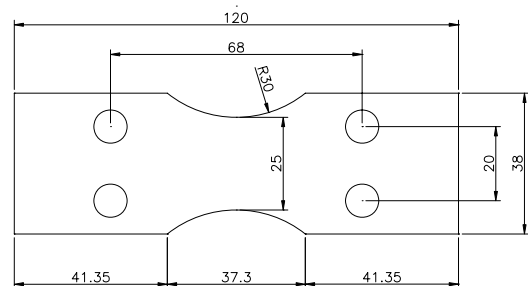


Fig. 3 Configuration of fatigue test specimen(mm)

다. 이 액체질소는 온도조절장치와 연결된 솔레노이드 밸브에 의하여 유입, 차단되며 챔버 내부의 분위기 온도는 설정온도의 $\pm 2^\circ\text{C}$ 이내로 유지되도록 하였다. 실험 환경의 온도(분위기)는 T-type 열전대를 저온챔버에 상하좌우의 및 시험편의 위치에 따라 장착하여 측정하였고, 시험편의 온도가 설정온도로 안정화된 후 실험을 시행하였다. Fig. 2는 저온 시험장치의 모식도를 나타낸 것이다.

2.2 굽힘 피로시험

멤브레인의 부재는 액압 및 온도 변화에 따라 수축 및 팽창이 반복적으로 일어난다. 이를 특화시켜 제작한 주름부에서 대부분 일어나고 굽힘 변형의 형태를 갖게 된다⁽³⁾. 또한, 멤브레인 부재의 거동을 살펴보면, 평판 부에서는 열변형이 거의 발생하지 않고 주름 부에서 항복강도를 초과하는 고변형률이 발생하도록 디자인한 것으로, 기밀성, 저온 인성 및 열전도의 특성이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 굽힘 피로시험을 통한 변형률-수명 선도를 평가 하였다.

피로시험은 상온(298K) 및 저온(111K)에서 R (응력비) = -1, 변위제어(displacement control) 및 주파수 0.5~3Hz의 정현파형으로 수행하였다. 또한, 굽힘에 따른 시험편에 인장응력이 가해지지 않도록 하는 구조의 지그(jig)를 이용하였으며, 시험편 중앙부에 가해지는 변형률을 측정하여 시험을 수행하였다. Fig. 3은 굽힘 피로시험에 사용된 시험편을 나타낸 것이다.

2.3 변형률-수명 관계

저사이클 피로(low cycles fatigue)을 평가하는 방법중 가장 대표적인 Coffin-Manson식은 식 (2)의 형태로 반수명(half cycles to failure)에서의 히스테리시스 선도를 이용하여 변형률을 탄성 및 소성 변형률 성분 나눌 수 있다.

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

여기서, α_f' = 피로강도 계수, ϵ_f' = 피로연성 계수, b = 피로강도 지수 및 c = 피로연성 지수 이

다.

한편, Manson은 공통구배법에 의한 저 사이클 피로 곡선으로서 식 (3)과 같이 근사적으로 제안⁽⁶⁾하였다.

$$\epsilon_a = 1.75 \frac{\sigma_u}{E} N_f^{0.12} + 0.5 \epsilon_f^{0.6} N_f^{-0.6} \quad (3)$$

저온에 있어서는 식 (3)의 인장강도(σ_u) 및 피로연성 계수(ϵ_f)가 변화하게 되므로, 저온에서의 변형률-수명($\epsilon_a - N_f$) 관계는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{aL} = 1.75 \frac{\sigma_{uL}}{E} N_f^{0.12} + 0.5 \epsilon_{fL}^{0.6} N_f^{-0.6} \quad (4)$$

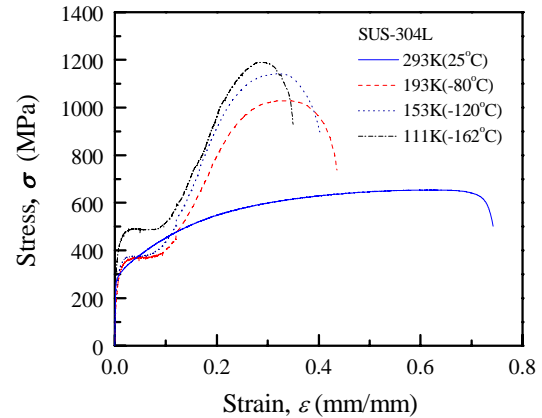


Fig. 4 Stress-strain curves in the temperature range of 298K to 111K

Table 2 Mechanical properties in the temperature range of 298K to 111K

Temperature	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
298K(25°C)	266	704	73
193K(-80°C)	315	1076	44
153K(-120°C)	319	1162	40
111K(-160°C)	343	1204	37

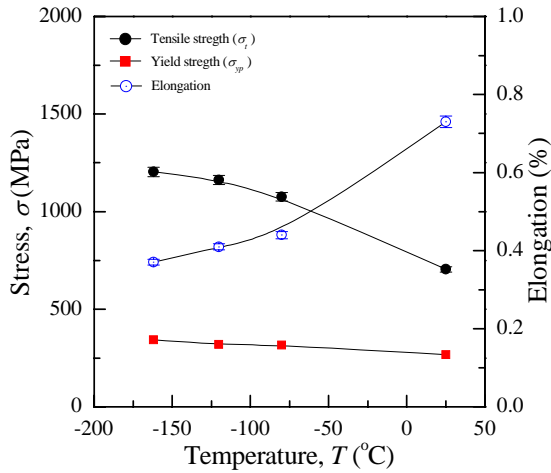


Fig. 5 The temperature dependence of yield strength, tensile strength and elongation

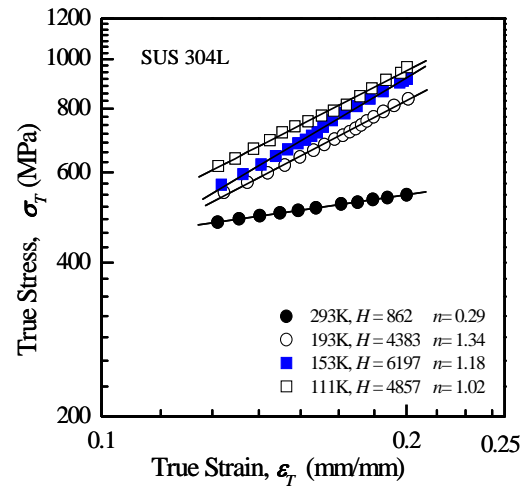
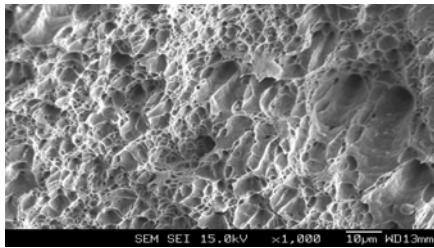
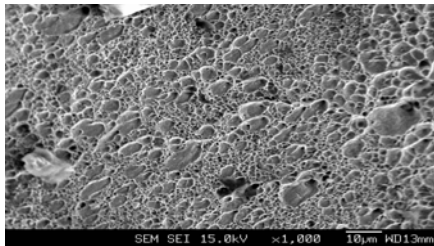


Fig. 7 The effect of temperature on strain hardening



(a) 298K(room temperature)



(b) 111K(LNG temperature)

Fig. 6 Micro-fracture surfaces tensile-tested at 298K(a) and 111K(b)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 기계적 특성 평가

Fig. 4는 온도변화에 따른 SUS 304L 강의 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다. 그림에서 응력-변형률 선도의 형태는 온도가 저하함에 따라 포물

선에서 S자형으로 변하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 스테인리스 304강에 대한 기존의 연구 결과와 일치하는 것으로 저온에서 나타나는 굴곡 현상(inflexion)은 마르텐사이트(martensite) 변태와 밀접한 관련이 있다고 보고^(1,4)되고 있다. 각 시험 온도에서 평가된 재료의 기계적 특성의 평균 값들은 Table 2와 같다. Fig. 5는 온도 변화에 대한 인장강도, 항복강도 및 연신율 변화율을 나타낸 것이다.

저온(111K)에서 항복강도는 상온에서 보다 소폭 증가하는 경향을 보이거나 인장강도는 현저히 상승하였다. 또한, 연신율은 약 50% 정도 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 6(a,b)은 상온(298K) 및 저온(111K)에서 인장시험된 시험편의 파면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 것을 나타낸 것이다. 저온(111K)에서의 연신율이 상온과 비교하여 50% 감소에도 불구하고 파괴양상은 딴플(dimple)을 동반한 연성파괴임을 알 수 있다. 그러나 이의 딴플의 크기는 상온(298K)에서 보다 현저히 작으며, 이것은 미소공동의 성장 및 합체에 의하여 파괴가 쉽게 일어났음을 의미하는 것이다.

한편, 가공경화의 정도를 나타내는 가공경화지수(n)는 진 응력(σ_T)과 진 변형률(ϵ_T)의 관계로부터 식 (5) 와 같이 표현된다.

$$\sigma_T = H\epsilon_T^n \quad (5)$$

여기서, H 는 강도계수를 의미한다.

Fig. 7은 σ_T 와 ϵ_T 의 관계를 log-log 그래프에 나타낸 것이며, 가공경화지수(n)는 상온에서 0.29, 193K, 153K, 111K의 저온에서 각각 1.24, 1.25 및 1.36으로 평가되었다. 이와 같이 저온 환경 하에서의 가공경화지수는 상온의 값과 비교하여 상당히 증가하였음을 알 수 있다. 즉, 저온으로 갈수록 준안정 오스테나이트의 마르텐사이트 변태가 촉진되어 가공경화가 급속히 일어나는 것으로 판단된다.

3.2 변형률-수명 평가

Fig. 8은 상온 및 저온(111K)에서의 변형률-수명선도($\epsilon_a - N_f$)을 나타 낸 것이다. 저온(111K)의

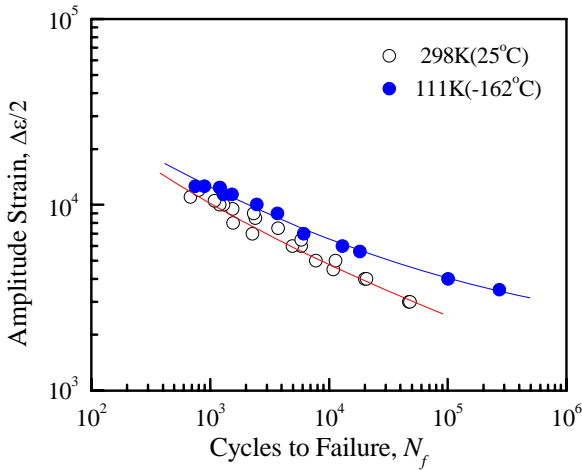


Fig. 8 Strain-life curve in the temperature range of 298K and 111K

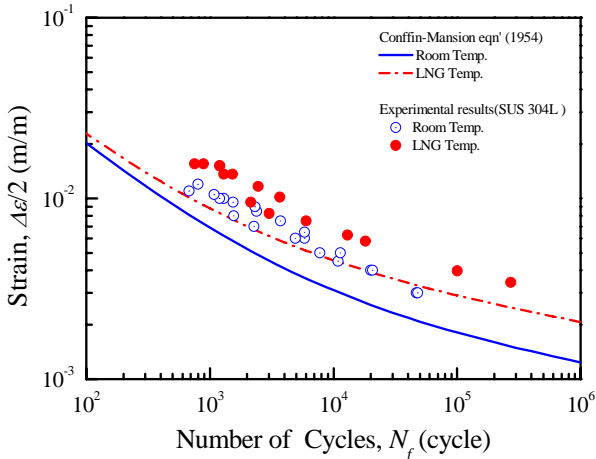


Fig. 9 Comparison of the equation and test results in the temperature range of 298K and 111K

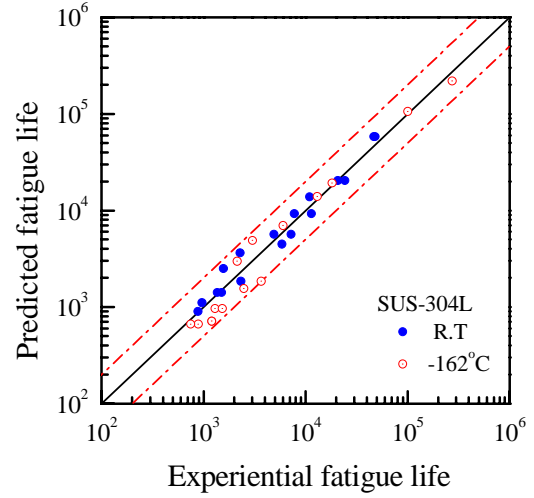


Fig. 10 Comparison of the modified Manson equation and test results in the temperature range of 298K and 111K

피로강도 특성이 상온보다 좋은 것으로 평가 되었다. 또한, 고수명(high cycles)영역에서 이의 차이는 더욱 현저해지는 것을 알 수 있다.

한편, SUS 304L강의 변형률진폭과 피로수명과의 관계를 Manson의 식 (3) 및 (4)에 따라 평가한 결과를 나타낸 것은 Fig. 9와 같다. 이 그림에서 실험결과와 Manson에 의해 평가된 피로수명 보다 변형률진폭이 클수록 과소평가됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 저온 및 상온 모두에서 나타나고 있다. 따라서 실험결과로부터 변형률-수명 ($\epsilon_a - N_f$)의 관계를 검토한 결과 식 (6)의 수정된 Manson의 식을 얻었다.

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = 3.92 \frac{\sigma_u}{E} N^{-0.16} + 0.4 \epsilon_f^{0.56} N_f^{-0.56} \quad (6)$$

또한, 저온에서는 온도에 따른 기계적 성질을 고려하여 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = 3.92 \frac{\sigma_{uL}}{E} N^{-0.16} + 0.4 \epsilon_{fL}^{0.56} N_f^{-0.56} \quad (7)$$

Fig. 10은 상온 및 저온에서의 실험결과와 식 (6) 및 (7)을 비교하여 나타낸 것으로, 수정된 Manson 식은 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 LNG선박용 내조시스템의 주 재료인 SUS 304L을 대상으로 상온 및 저온의 기계적 및 피로 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SUS 304L강의 저온(-162°C)에서 기계적 성질은 상온(298K)에 비하여 인장강도가 70%, 항복강도는 23% 정도 증가하였으며, 연신율은 50% 감소하였다.

(2) 멤브레인 재료인 SUS 304L강의 상온 및 저온(-162°C)에서 변형률-수명의 실험결과는 피로강도가 상온보다 저온에서 증가하였다.

(3) 변형률-수명의 실험결과로부터 다음의 수정된 Manson의 식이 평가되었다.

$$\epsilon_a = 1.75 \frac{\sigma_u}{E} N_f^{0.12} + 0.5 \epsilon_f^{0.6} N_f^{-0.6}$$

저온에서의 변형률-수명선도는 -162°C 의 기계적 성질을 고려하여 평가 할 수 있다.

$$\epsilon_a = 1.75 \frac{\sigma_{uL}}{E} N_f^{0.12} + 0.5 \epsilon_{fL}^{0.6} N_f^{-0.6}$$

이의 평가식을 이용한 결과 LNG 선박용 소재의 SUS 304L에 대한 변형률-수명 관계는 잘 일치 하였다.

후 기

본 연구과제는 한국가스공사의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Gunter, C. J. and Reed, R. P., 1962, "The Effect of Experimental Variables Including the Martensitic Transformation on the Low-Temperature Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel," Advances in Cryogenic

Engineering-Materials, Vol. 28, pp. 83~92.

(2) Jung-Kyu Kim, Chul-Su Kim, Dong-Hyuk Cho, Dosik Kim and In-Su Yoon, 2000, "Low Temperature Effects on the Strength and Fracture Toughness of Membrane Material for LNG Storage Tank," Trans. of the KSME(A), Vol. 24, No. 3, pp. 710~717. (in korean)

(3) Hyung-Sik Kim., 2001 "The evaluation of mechanical properties and fatigue life for domestic 304 stainless steel used as membrane material in LNG storage tank," Trans. of the KSME(A), Vol 25, No. 10, pp. 1644~1650.(in korean)

(4) Huang, G. L., Matlock, D. K. and Kaus, G., 1989, "Martensite Formation, Strain Rate Sensitivity, and Deformation Behavior of Type 304 Stainless Steel Sheet," Metallurgical Transactions A, Vol. 20A, No. 7, pp. 1239~1246.

(5) In-Su Yoon and Jung-Kyu Kim, 2005, "The Effect of Plastic Working on the Membrane Fatigue Life," Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 9, No. 4, pp. 1~5.

(6) Coffin, L. F., Jr., 1954, "A Study of Effects of Cyclic Thermal Stress on a Ductile Metal," Trans. of the ASME, Vol 76, pp. 931~950; Manson, S. S., 1964, In Fatigue-An Interdisciplinary Approach, Syracuse University Press, N. Y., pp. 133~178.