

저주기 피로에 관한 고찰

김 창 주*

Review on the Row Cycle Fatigue

Chang Zoo, Kim*

엔지니어링 데이터로서 금속재료의 저주기 피로특성 규명은 중요한 의미를 가지며 이에 관한 연구는 1950년대 초부터 본격적으로 시작되었다고 볼 수 있다.

저주기 피로과정은 응력 반복수가 1~20,000회 정도에서 파괴가 일어나는 현상을 주 대상으로 하며 이의 이론적 설명을 위하여 Coffin¹⁾과 Manson²⁾의 정리를 요약하여 인용하고자 한다.

1. Coffin의 저주기

피로에 관한 정리

비교적 큰 塑性變形이 가해지면 응력과 변형의 관계는 다음 Fig.1과 같은 히스테리시스 루프와 이에 따른 식(1)의 관계가 얻어진다.

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_p + \Delta \varepsilon_e = \Delta \varepsilon_p + \frac{\Delta \delta}{E} \dots\dots\dots (1)$$

여기서

$\Delta \varepsilon$: 전변형 범위(Total strain range)

$\Delta \varepsilon_p$: 소성변형 범위(Plastic strain range)

$\Delta \varepsilon_e$: 탄성변형 범위(Elastic strain range)

$\Delta \delta$: 응력범위(Stress range)

E : 종탄성 계수(Young's Modulus)

* 창원본소 소재개발실 : Member of High Performance Materials Lab.

(註) '안의 숫자는 참고문헌 표시임

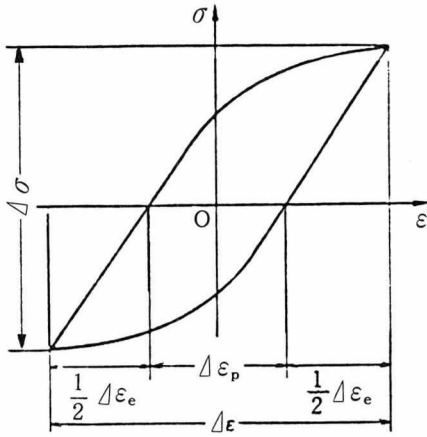


Fig. 1. A cyclic stress-strain curve and a hysteresis loop.

이는 또한 최대, 최소 負荷時의 시험편 직경을 각각 d, d_0 , 단면적을 A, A_0 라 할 경우

$$\Delta \epsilon : \log_e \frac{A_0}{A} = 2 \log_e \frac{d_0}{d} \dots\dots\dots(2)$$

가 되며 식(1)에서 유도된 식은 $\Delta \epsilon_p = \Delta \epsilon - \Delta \epsilon_e$ 이 된다.

Coffin 은 각 금속재료에 대해 이상에서 구한 $\Delta \epsilon_p$ 와 파괴반복수 N 의 관계를 규명하였으며 그 결과는 Fig. 2의 實驗例에서와 같이 N 이 20,000 회 이하에서 이 관계는 양대수 방인지상에 거의 직선으로 나타났고 그 기울기도 각 금속이 대체로 일치함을 보여 식(3)과 같은 간단한 직선식으로 나타내었다.

$$\Delta \epsilon_p N^b = C \text{에서 } b = \frac{1}{2} \text{ 일때}$$

$$N^{\frac{1}{2}} \Delta \epsilon_p = C \dots\dots\dots(3) \text{ (C : Constant)}$$

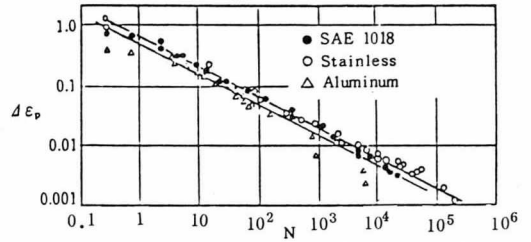


Fig. 2. Relation between plastic strain amplitude and number of cycles to failure

또한 실험점을 통하는 직선을 靜의引張에 상당하는 $N = \frac{1}{4}$ 회까지 연장하면 이 종좌표가 대수 변에서 나타난 진파단연신 D 에 거의 같아짐을 알 수 있다. 그러므로 식(3)에서 $N = \frac{1}{4}$, $\Delta \epsilon_p = D$ 라면 $C = D / 2$ 가 되어

$$N^{\frac{1}{2}} \Delta \epsilon_p = \frac{1}{2} D \dots\dots\dots(4)$$

이 식에 의하면 재료의 靜의引張에 있어서 진파단연신을 알고 반복되는 소성변형 범위가 주어지면 파단까지의 반복수를 추정할 수 있다. 금속재료는 塑性變形을 반복하면 피로파단을 일으키므로 應力 대신에 소성변형을 대입함으로써 $\Delta \epsilon_p$ 와 N 과의 관계가 식(3)과 같이 간단하게 표시된다.

2. Manson의 저주기 피로에 관한 정리

Manson 은 定變形 疲勞(Strain controlled fatigue) 데이터를 정리하고 전변형 범위(Total strain range)를 식(1)에 따라 彈性變形 범위와 塑性變形 범위의 합으로 본 양자의 변형범위를 각각 파괴반복수 N 과의 관계로 나타내어 저주기에서 고주기에 이르는 전변형 범위의 실험식을 구하였다.

여기서, D 를 대수변형으로 표시된 파단연신이라 하면 D 는 단면수축률 ϕ 를 알게 됨으로써 다음 식(5)로부터 구해질 수 있다.

$$D = \log_e \frac{100}{100 - \phi} \dots\dots\dots(5)$$

또한 Manson 은 29종의 금속재료에 대한 저주기 피로시험 결과를 이용하여 소성변형과 $D^{0.6}$ 의 비를 종축에, 파단반복수 N을 횡축에 취한 양대수 방안에 표시하여 Fig.3과 같은 직선을 얻었으며 이 직선의 기울기는 -0.6이 됨을 알았다.

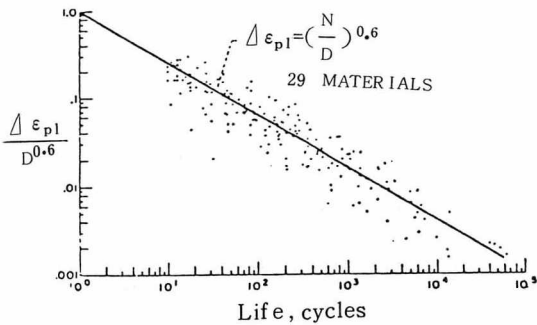


Fig.3. Relation between plastic strain ductility and cycles to failure

다음에 σ_B 를 인장강도, E를 종탄성계수로 한 탄성변형범위 $\Delta \epsilon_e$ 와 σ_B/E 의 비를 종축에, 파단반복수 N을 횡축으로 하여 양대수 방안에 표시한 Fig.4의 직선관계도 얻었다.

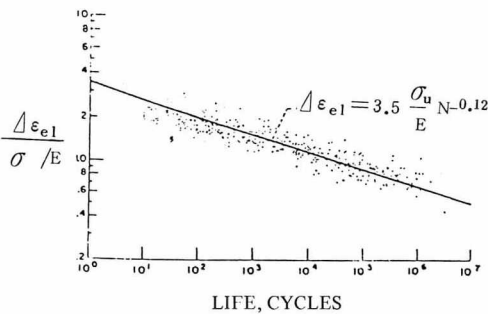


Fig.4. Ratio of elastic strain range to σ_B/E against cycles to failure (29 Materials)

이 직선의 기울기는 -0.12이며 이 직선이 $N = 1$ 에서 종축을 자른 값은 소성변형의 경우 1.0, 탄성변형의 경우 3.5이므로 $N = 1$ 에 있어서 $\Delta \epsilon_p = D^{0.6}$, $\Delta \epsilon_e = 3.5 \sigma_B/E$ 이다. 따라서 임의의 반복수 N에 대한 전변형범위는 탄성과 소성 변형의 합으로서 식(6)과 같이 정리된다.

$$\Delta \epsilon = 3.5 \frac{\sigma_B}{E} N^{-0.12} + D^{0.6} N^{-0.6} \dots\dots\dots(6)$$

이 관계를 圖示하면 Fig.5와 같이 $\Delta \epsilon_e$ 와 $\Delta \epsilon_p$ 는 양대수 방안에 표시한 직선으로 되며 $\Delta \epsilon$ 는 직선이 되지 못한다.

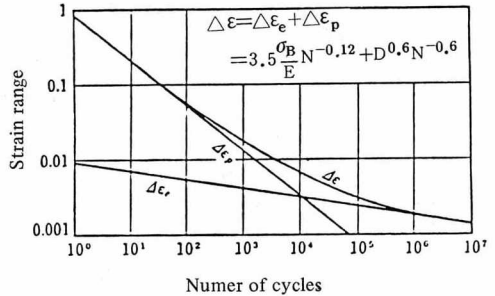


Fig.5. Relation between strain range and number of cycles

Fig.5에서 두직선의 교점에 해당하는 반복수를 경계로 하여 낮은 반복수 범위에서는 탄성변형이 급격히 감소하므로 소성변형만을 생각해도 좋고, 높은 반복수 범위에서는 소성변형을 무시하고 탄성변형만을 생각해도 좋다. 또 식(6)에 의하면 고주기 범위에서는 전 변형범위 $\Delta \epsilon$ 에 E를 곱한 것을 응력범위 $\Delta \sigma$ 로 생각해도 되므로 疲勞強度는 引張強度 σ_B 에 비례하여 높게 되어 引張強度가 높은 재료가 유리함에 대해, 저주기 범위에서는 허용 변형범위가 引張強度에 관계없이 $D^{0.6}$ 에 비례하여 증가하므로 단면수축률이 큰 延性材料일수록 유리함을 알 수 있다.

이상과 같이 소성변형범위가 Coffin 식에서는 $N^{-1/2}$ ($=N^{-0.5}$)에 비례하고, Manson 식에서는 N

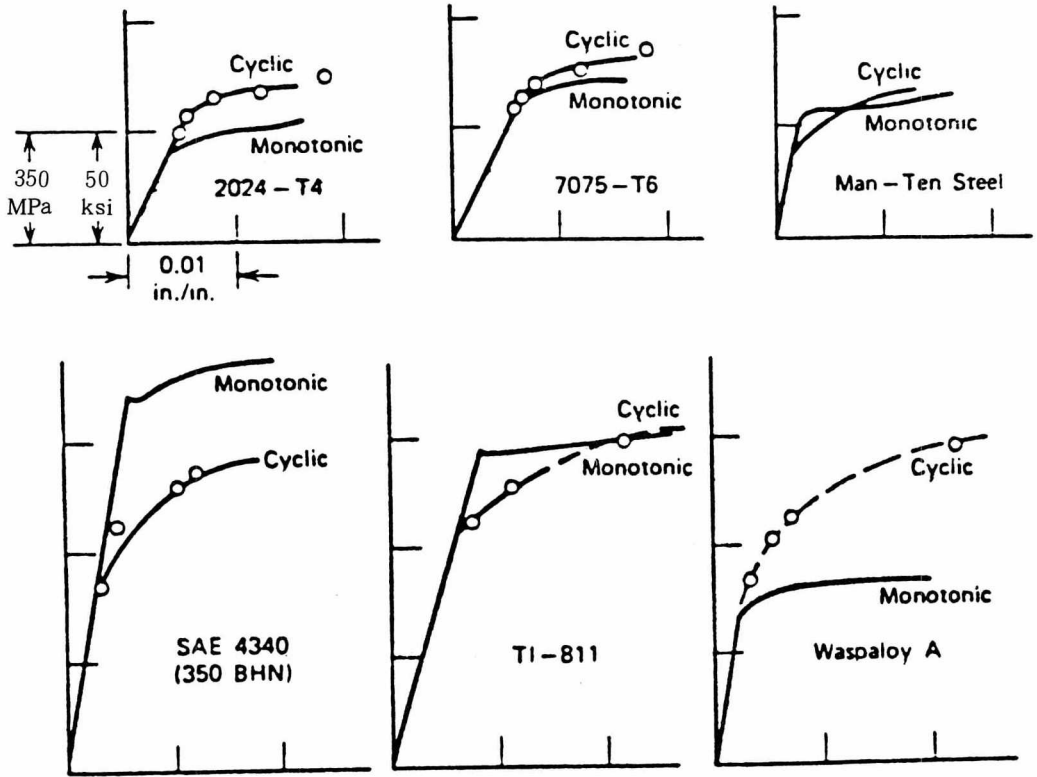


Fig.6. Monotonic and cyclic stress-strain curves for several materials³⁾

-0.6 에 비례하고 있으나 Coffin은 N 을 균열 발생까지의 반복수를 취하고 있음에 대해 Manson은 N 을 파단까지의 반복수로 취하였기 때문에 결국 이들간에는 모순이 없는 것이다.

한편 저주기 피로시험 결과에 의해 얻어진 반복응력변형 곡선과 각 해당 소재들의 靜荷重에 의한 응력변형 곡선과의 비교를 보면 Fig.6에서와 같이 여러가지 형태들을 얻게 된다.

이와같은 반복변형에 의한 硬化나 연화거동을 Manson의 설명으로 간단히 이해될 수 있다.

즉 Fig.7의 (a)에서 변형범위를 0.018로 일정하게 하여 첫주기 부하시 5회에서는 정하중 곡선에 해당하는 것으로 응력수준이 A점에 이른다.

그러나 반복을 계속하여 반복수가 600여회에 이를 쯤에는 (b), (c)에서 보아 응력수준은 초기 A보다 증가된 상태인 P_A 에서부터 거의 일정한 수준을 유지하며 1400여회 후에는 파단되고 있다. 여기서 600여회 이상 반복수의 응력수준은 반복응력변형 곡선상인 A'에 해당하는 것으로 이것은 같은 변형범위 0.018에 있어서 정하중일 때 보다 반복수 증가에 따른 硬化를 의미하는 것이다. 이러한 현상은 변형범위를 0.036으로 높이면 훨씬 낮은 반복수에서 硬化됨을 볼 수 있다.

이와는 반대로 Fig.8의 경우는 반복수 증가에 따른 연화거동을 설명하고 있다.

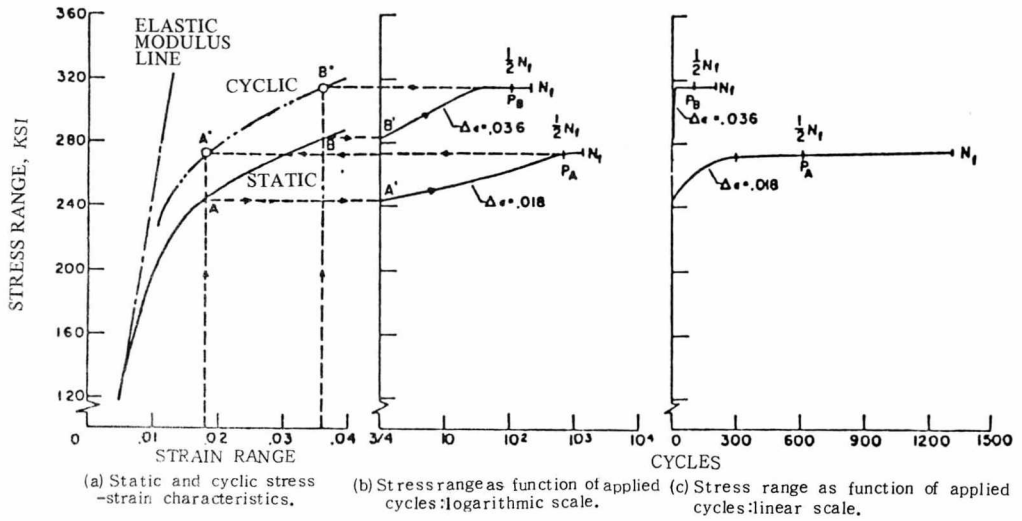


Fig.7. Static and cyclic stress-strain characteristics of 304 stainless steel²⁾

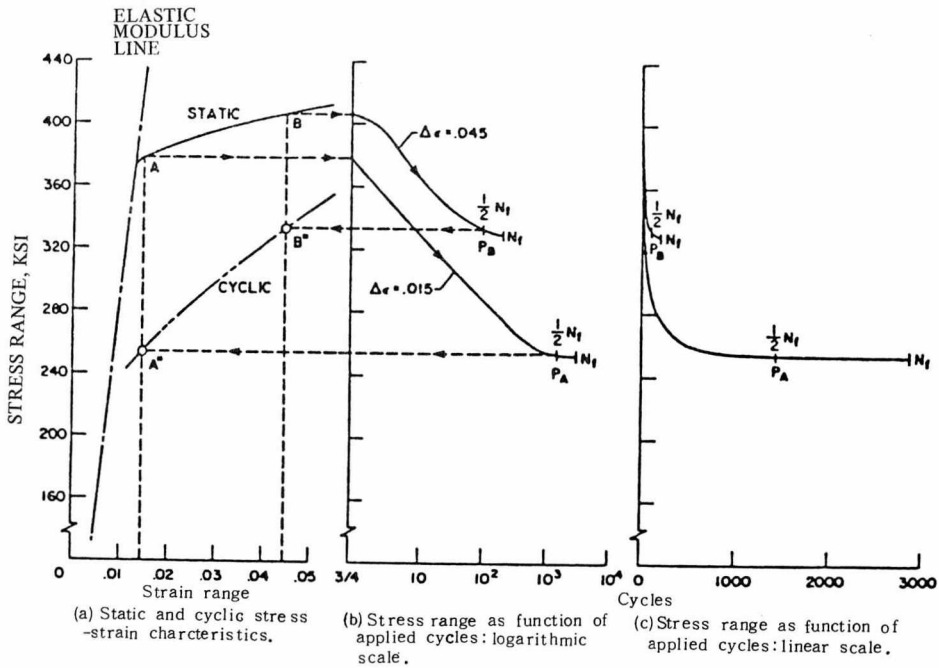


Fig.8. Static and cyclic stress-strain characteristics of 4340 steel²⁾

김창주 : 저주기 피로에 관한 고찰

《 参 考 文 献 》

1. 川田雄一, 金禹의 疲勞と設計, オーム社 179-185, (1982)
2. S.S. Manson, "Experimental Mechanics", July, 1-35 (1965)
3. H.O. Fuchs and R.I. Stephens, "Metal Fatigue in Engineering," 26, (1980)