

大韓造船學會論文集
 第28卷 第1號 1991年 4月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 28, No. 1, April 1991

船用材料의 反復硬化 및 低싸이클 疲勞特性에 관한 연구

趙相明*, 堀川浩甫**

A Study on the Cyclic Hardening Property and the Low Cycle Fatigue Behavior of Marine Materials by

S. M. Cho* and K. Horikawa**

요 약

船用材料中에는 靜的荷重에 의한 靜的舉動(응력-변형률관계)과 反復荷重에 의한 反復舉動(응력진폭-변형률진폭관계)이 相異하게 되는 경우가 많다. 특히 彈塑性 應力集中部에서 進展하는 초기의 짧은 疲勞龜裂은 材料의 反復舉動에 크게 의존하여 성장하므로 材料의 靜的 및 反復舉動의 비교, 검토가 요구된다.

본 연구에서는 2종류의 鐵鋼材料(SS41, HT80)와 5종류의 Al合金(A5083-O, A6N01-T5, A7N01-T4, A7016-T6, A7178-T6)에 대하여 靜的 및 反復荷重에 의한 材料의 應力-變形率 關係를 비교, 검토하였고, 各 材料常數를 구하였다. 또한 應力集中部에 일정 진폭의 反復荷重이 作用하여 彈塑性 變形할 때 그 先端의 應力과 變形率 振幅의 變化에 미치는 材料의 反復 硬化特性的의 영향에 대하여 Neuber法則과 中央노치材의 實驗에 의하여 考察을 行하였다.

Abstract

In the non-linear behavior of many materials, there is difference between the monotonic behavior by static load and the cyclic behavior by cyclic load. In particular, the short fatigue cracks to propagate in elasto-plastic stress concentrations(notches), are governed significantly by the cyclic behavior of materials. Accordingly, it is needed to investigate and compare the monotonic and cyclic behavior of materials.

In the present study, the stress-strain relations of materials by monotonic and cyclic load tests were examined for 2 kinds of steels(SS41, HT80) and 5 kinds of Al-alloys(A5083-O, A6N01-T5,

발표 : 1989년도 대한조선학회 추계연구발표회('89. 11. 11)

접수일자 : 1989년 12월 2일, 재접수일자 : 1991년 1월 21일

*정회원, 한국해기 연수원

**일본국 대판대학 용접공학연구소

A7N01-T4, A7016-T6, A7178-T6). And the constants for mechanical properties of the materials were determined by experimental results, Moreover, when a notch was subjected to cyclic load, the effect of cyclic hardening property of materials on the variation of stress-strain amplitude in the notch tip was discussed by the application of Neuber's rule and experiments for a center notched plate.

I. 序 論

船舶과 海洋構造物과 같은 熔接構造物에 있어서 應力 집중부인 노치(notch)에 比例限度이하의 靜的應力이 작용하면 應力과 變形率은 선형관계를 갖게된다. 또한 反復荷重에 의하여 노치근방의 材料는 反復硬化하거나 反復軟化하는 경우가 있지만 應力과 變形率振幅이 충분히 작으면 應力과 變形率은 선형탄성관계를 유지하게 된다. 이와같이 應力과 變形率의 관계가 선형탄성인 곳에 존재하는 긴 균열의 성장특성은 선형탄성파괴역학을 적용하여 정량화할 수 있다.

반면에 荷重의 反復작용에 의하여 노치에 塑性變形이 생기게 되면 그곳의 材料는 이미 선형탄성거동을 취하지 않게 된다. 경우에 따라서는 靜的荷重에 의한 應力-變形率 관계와는 상당히 다른 非線形 거동을 하는 材料도 있다 [1~4]. 이와같이 反復荷重에 의하여 非線形 거동을 하는 곳에 존재하는 균열의 성장속도를 평가하기 위해서는 非線形 파괴역학의 적용이 필요하게 된다[5~7].

非線形 파괴역학을 적용할때 동일한 外力을

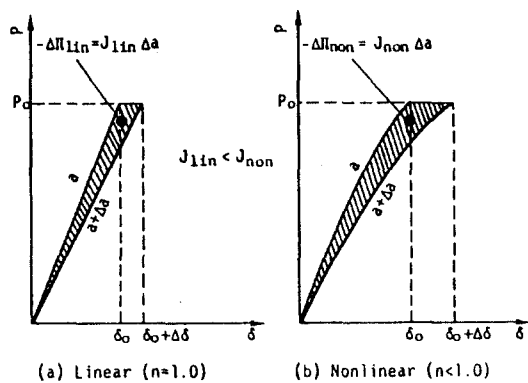


Fig. 1 Comparison of J-integral between the materials of n=1.0 and n<1.0

받아도 균열의 進展力은 材料의 應力-變形率 관계에 크게 지배된다. Fig. 1 (a) (b)는 그 일례로서 均열進展力으로서 J積分을 써서 나타낸 것이다[5]. (a)와 (b)는 두께가 1.0이고 형상 및 外力은 모두 같고 材料정수인 加工硬化指數 n 만 다른 것으로 한다. 均열 進展力인 J積分은 (a) (b)의 빗금친 부분의 면적에 비례하므로 같은 外力일지라도, n이 1.0보다 작으므로 非線形의 거동을 하는 (b)의 J積分이 크게 된다. 이것은 어떤 동일한 材料가 선형거동(n=1.0)을 하다가 荷重이나 온도의 履歷등의 영향으로 非線形 거동(n<1.0)을 하게 되면 같은 外力이 작용하여도 均열進展力은 크게 되는 것을 의미한다. 즉 선형탄성파괴역학에서의 均열進展力은 오직 外力과 部材의 형상에만 지배되지만, 非線形 파괴역학에서의 그것은 材料의 기계적 성질의 하나인 應力-變形率 관계에 크게 지배된다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 靜的 및 反復荷重에 의한 材料의 應力-變形率 관계를 비교, 검토하였다. 이것에 의하여 反復荷重을 받아 彈塑性 거동하는 노치에서의 材料의 기계적 성질의 하나로 써야할 應力-變形率 관계를 나타내기 위한 材料정수를 구하였다. 또한 반복하중을 받는 應力 집중부를 갖는 部材 즉, 노치材에 있어서 노치先端의 應力과 變形率振幅의 변화에 미치는 材料의 反復硬化특성에 대하여 고찰하였다.

2. 試驗材 및 실험방법

실험에 이용한 材料는 구조용 鋼板 2종류와 Al合金 5종류로서 모두 7종류로 하였다. Table 1에 각 試驗材의 명칭과 화학성분을 나타내었다.

靜的 인장시험 및 反復荷重시험(cyclic load

test)에 사용한 시험편의 형상은 Fig. 2와 같다. 사용한 材料試驗機는 전기유압식 疲勞試驗機(動的容量 5톤)이었고, 모든 實驗은 대기중의 室內에서 行하였다.

Table 1 Chemical composition of tested material (wt.%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	V	B
SS41	0.15	0.1	0.66	0.018	0.012	-	-	-	-	-
HT80	0.16	0.06	1.13	0.016	0.006	0.29	0.76	0.21	0.03	0.0015

Aluminum	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
A5083-0	0.13	0.21	0.02	0.64	4.51	0.13	0.01	0.01	-
A6N01-T5	0.76	0.21	0.01	0.2	0.46	Tr	0.06	0.02	-
A7N01-T4	0.05	0.13	0.09	0.5	1.2	0.23	4.79	0.02	0.1
A7016-T6	0.07	0.18	0.6	0.05	1.5	0.01	5.3	0.01	0.12
A7178-Y6	0.07	0.18	1.8	0.3	2.6	0.2	6.5	0.01	-

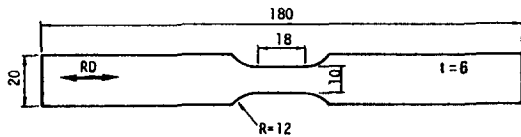


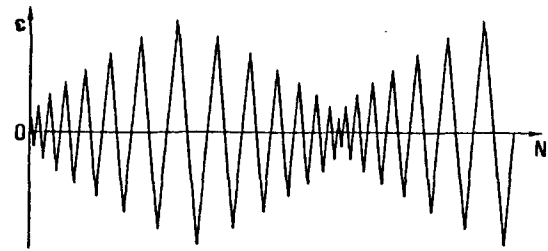
Fig. 2 Configuration of specimens

인장시험할때의 荷重신호는 荷重計로부터 취하였고 變位신호는 표점거리 10.0mm인 나이프 에지(knife edge type) 變位計(2320 μ /mm)로부터 취하여 기록하였다.

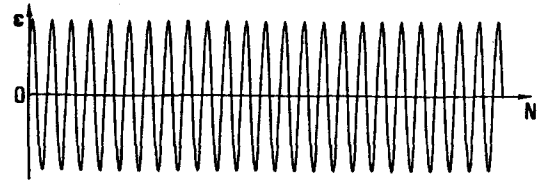
反復荷重시험은 完全兩振의 軸變形率계어 ($R\epsilon = -1$)로 行하고, 이 경우도 變形率 신호는 상기의 變位計로부터 취하였다. 이 變形率신호를 써서 시험편에 부가할 變形率을 제어하고, 變形率속도는 약 0.004/sec로 일정하게 유지시켰다. 反復荷重 시험은 Fig. 3(a) (b)와 같이 振幅變動法(incremental step test)과 多數試驗片法(companion specimens method) 2가지 방법으로 실시하였다[6]. (a)의 振幅變動法에서는 그림에서 보이는 바와 같이 1블록을 16단계의 變形率로 나누었고, 變形率範圍의 최대치는 약 3.0%까지로 하였다.

또한 시험편을 적에 물릴때 편심에 의한 굽힘 變形率을 방지하기 위해 모든 시험편에 3~4개의 變形率계이저를 붙여서 최대굽힘 變形率

이 負荷變形率의 5%이하가 되도록 하였다.



(a) Incremental step tests



(b) Companion specimens method

Fig. 3 Type of cyclic load tests

3. 실험결과 및 고찰

3.1 反復荷重에 의한 材料의 應答특성

여기서는 우선 振幅變動法에 의한 材料의 應力-變形率 關係에 대해 기술한다.

Fig. 4(a) (b)는 振幅變動法을 써서 行한 SS41에 대한 실험결과로서, (a)는 제 1블록의 히스테리시스 루프群이며, (b)는 破斷블록數의 약 1/2에 해당하는 제 32블록의 그것이다. 여기서

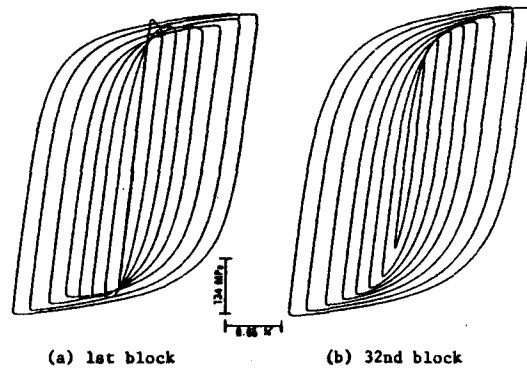


Fig. 4 Variation of hysteresis loops by incremental step tests(SS41)

각 루우프의 정점의 세로길이가 가로길이가 $\Delta\sigma$ 와 $\Delta\epsilon$ 으로 되고, 이것에 의하여 각 단계에서의 $\sigma_a(=\Delta\sigma/2)$ 와 $\epsilon_a(=\Delta\epsilon/2)$ 의 관계를 구한것이 反復應力-變形率 곡선으로 된다.

Fig. 5(a) (b)는 振幅變動法에 의하여 얻은 HT80에 대한 실험결과로서 (a)와 (b)는 각각 제 1블록과 제 35블록의 히스테리시스 루우프群이다. 제 1블록과 제 35블록을 비교하여 보면 각각의 變形率範圍는 일정하게 유지되지만(각 루우프의 가로폭은 일정), 그것에 대한 應力範圍(세로폭)는 상당히 작게 되어있어서 反復軟化의 경향을 현저히 나타내는 것을 알 수 있다.

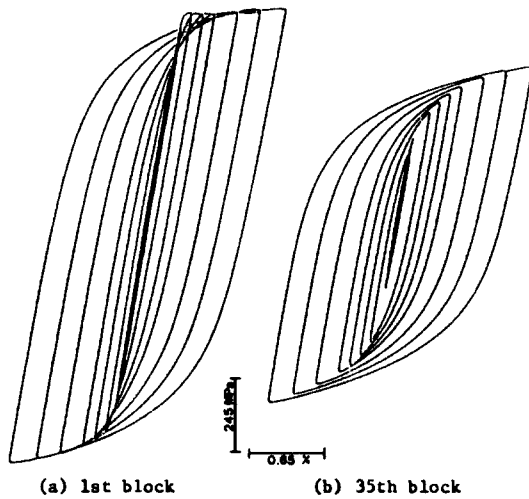


Fig. 5 Variation of hysteresis loops by incremental step tests(HT80)

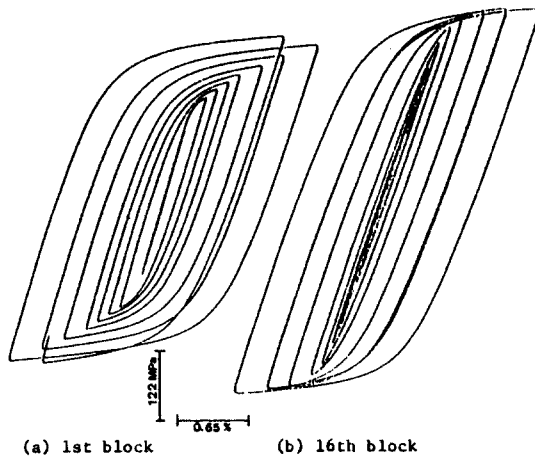


Fig. 6 Variation of hysteresis loops by incremental step tests(A5083-O)

다음은 多數試驗片法으로 反復荷重시험을 실시했을 때 材料의 應力-變形率關係에 대하여 기술한다.

Fig. 6(a) (b)는 각각 A5083-O에 대한 결과로서 (a)와 (b)는 각각 제 1블록과 제 16블록의 히스테리시스 루우프群이다. 여기서는 HT80과는 반대로 제 16블록의 應力範圍가 오히려 크게되어서 현저하게 反復硬化하는 것을 알 수 있다.

다음은 多數試驗片法으로 反復荷重시험을 실시했을 때 材料의 應力-變形率關係에 대하여 기술한다.

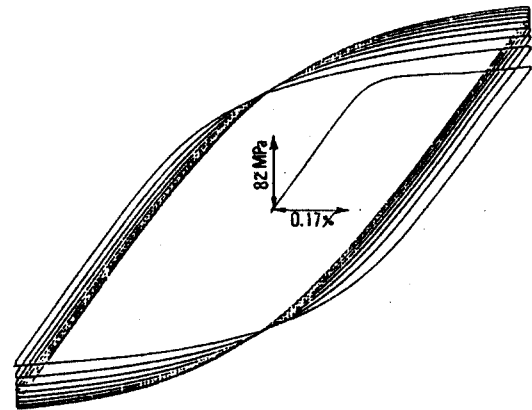


Fig. 7 Hysteresis loops from 1st cycle to 8th cycle by $\epsilon_a=0.6\%$ (A5083-O)

Fig. 7은 A5083-O에 대하여 $\epsilon_a=0.6\%$ 의 일정한 振幅의 變形率을 부가하였을 때에 얻은 제 1 사이클에서 제 8 사이클까지의 히스테리시스 루우프群이다. 일정 振幅의 變形率에 대하여 應力振幅이 두드러지게 크게 되어 A5083-O의 反復硬化특성의 일 단면을 볼 수가 있다.

Fig. 8은 多數試驗片法을 써서 얻은 SS41과 HT80에 대한 실험결과로서, 應力振幅과 反復數의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 SS41의 $\epsilon_a=0.22\%$ 의 경우는 反復數의 증가와 함께 應力振幅은 상당히 감소하지만, $\epsilon_a=0.6\%$ 인 경우는 應力振幅이 감소하지 않고 오히려 약간 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 HT80에 있어서는 $\epsilon_a=0.24\%$ 의 경우는 應力振幅이 거의 변화하지 않지만, $\epsilon_a=0.71\%$ 에서는 應力振

幅이 상당히 작게 되어 현저한 反復軟化의 경향을 나타내고 있다.

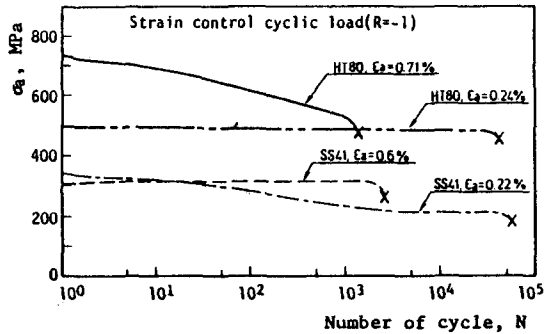


Fig. 8 Change of stress amplitude in companion specimene method(ss41 and HT80)

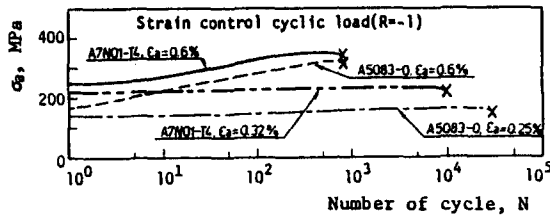


Fig. 9 Change of stress amplitude in companion specimens method(A5083-O and A7N01-T4)

Fig. 9에는 A5083-O와 A7N01-T4에 대한 마찬가지로의 결과를 나타내고 있다. 그림에서 變形率振幅이 작을 때, 즉 A5083-O의 $\epsilon_a=0.25\%$ 와 A7N01-T4의 $\epsilon_a=0.32\%$ 의 경우는 거의 應力振幅이 변화하지 않는다. 그러나, 變形率振幅이 큰 경우, 즉 A5083-O 및 A7N01-T4의 $\epsilon_a=0.6\%$ 의 경우는 應力振幅이 증가하여서 反復硬化의 경향이 현저한 것을 알 수 있다.

이상의 Fig.8과 Fig.9로부터 反復硬化특성은 같은 材料에 있어서도 負荷하는 變形率의 振幅의 크기에 현저하게 의존하는 것이 확인되었다. 이것은 反復硬化 또는 軟化가 일어나기 위해서는 兩振의 塑性變形이 反復하여 작용할 필요가 있다고 하는 일반적인 개념을 뒷받침하고

있다[1]. 즉 變形率振幅이 작으면 塑性變形이 거의 생기지 않으므로 靜的거동과 反復거동은 대체로 같게 된다. 그런데 變形率振幅이 크게 되면 塑性變形이 생기게 되므로 材料의 反復硬化특성이 나타나는 것으로 생각할 수 있다.

3.2 靜的 및 反復應力-變形率 관계의 비교

각 시험편에 대한 靜的인장시험 및 反復荷重시험의 결과를 정리하여 도시한 것이 Fig.10의 (a)(b)(c)이다. 세로축에는 公稱應力(靜的거동) 또는 應力振幅(反復거동)을 취하고, 가로축에는 公稱變形率(靜的거동) 또는 變形率振幅(反復거동)을 취하였다. 그림에서 실선은 靜的應力-變形率 관계이다. 검은 기호(solid marks)인 ▲●기호등은 振幅變動法에 의한 결과이고, 흰 기호(open marks)인 △○기호등은 多數試驗片法에 의한 결과이다.

Fig.8 및 Fig.9로부터 알 수 있는 바와 같이 反復荷重시험에 있어서 應力の 應答은 완전 탄성상태에서는 일정하게 되지만, 塑性變形이 생기면 변하여서 최후의 破斷까지 안정하지 않는 경우도 있다. 그래서 일반적으로 행하여지고 있는 것과 같이[3, 4], 여기에서도 振幅變動法에서는 1/2破斷블록數에서의 應力振幅을 취하고, 多數試驗片法에서는 1/2破斷回數에서의 應力振幅을 취하여 그때의 變形率振幅에 대한 값으로 하였다.

Fig.10 (a)(b)(c)의 각 실험결과를 식(1) 및 식(2)와 같은 指數硬化法則에 적용하여 각 材料정수를 근사적으로 구하여 나타낸 것이 Table 2 및 Table 3이다.

靜的거동 : $\sigma = E\epsilon, \sigma \leq \sigma_Y$ (1.a)

$(\sigma/\sigma_Y) = (\epsilon/\epsilon_Y)^n, \sigma > \sigma_Y$ (1.b)

反復거동 : $\sigma_a = E\epsilon_a, \sigma \leq \sigma_{YC}$ (2.a)

$(\sigma_a/\sigma_{YC}) = (\epsilon_a/\epsilon_{YC})^n, \sigma_a > \sigma_{YC}$ (2.b)

여기서, $\epsilon_Y = \sigma_Y/E, \epsilon_{YC} = \sigma_{YC}/E$

$\sigma_a = \Delta\sigma/2, \epsilon_a = \Delta\epsilon/2$

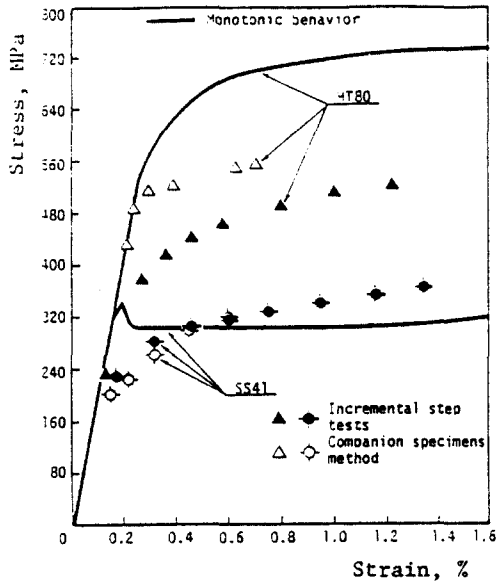
Table 2의 靜的 거동에 있어서의 材料정수는 公稱變形率로 약 3.5%까지에 대한 값이고, Table 3의 反復거동에서의 材料정수는 Fig.10에서 나타내고 있는 실험점에 대한 값이다.

Fig.10 (a)로부터 HT80은 反復荷重에 의하여

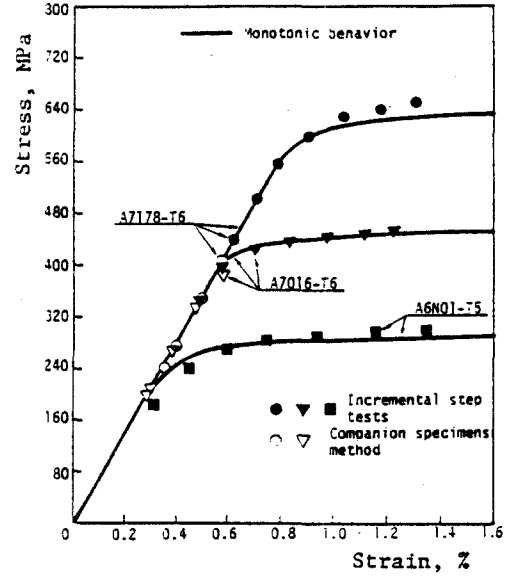
약 0.25% 이상의 變形率振幅에서는 靜的 應力-變形率 관계보다 훨씬 아래쪽으로 떨어져 있어서 분명하게 反復軟化하는 것을 볼 수 있다. SS41은 變形率振幅으로 약 0.1~0.5% 사이에서는 反復軟化하지만, 약 0.5% 이상의 變形率振幅에서는 反復硬化하는 경향이 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 동일 材料에 있어서 反復軟化와 硬化가 함께 나타나는 것은 뢰다스선 (Lüder's line)이 나타나는 金屬材料에 있어서

자주 보이는 경향이라고 알려져 있다[1]. Fig. 10(b)의 A6N01-T5, A7018-T6는 反復荷重에 의한 應力-變形率 振幅의 관계는 靜的 應力-變形率 관계와 거의 일치하고 있다. 그러나 (c)의 A5083-O와 A7N01-T4는 현저하게 反復硬化하고 있는 것을 알 수 있다.

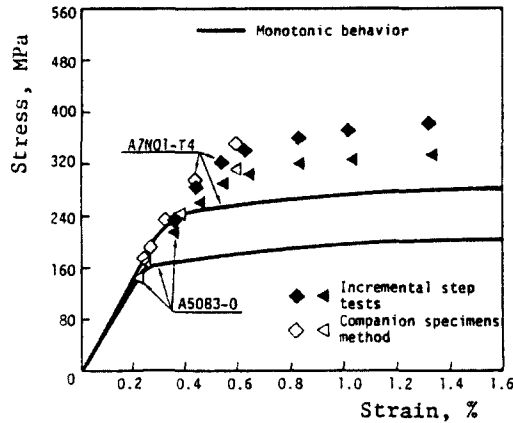
또한 Fig.10(a)(b)(c)로부터 SS41 및 5종류의 Al합금에 있어서는 反復荷重시험의 방법, 즉 振幅變動法(검은 기호)과 多數試驗片法(흰



(a) SS41 and HT80



(b) A6N01-T5, A7016-T6 and A7178-T6



(c) A5083-O and A7N01-T4

Fig. 10 Monotonic and cyclic stress-strain behavior of tested materials

기호)에 그다지 의존하지 않고 거의 같은 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 그렇지만 HT80은 振幅變動法(▲기호)와 多數試驗片法(△기호)에 의한 거동은 상당히 다르다. 이것은 反復應力-變形率 관계에 미치는 應力履歷의 영향의 相違에 기인하는 것으로 생각된다.

Table 2 Material constants by monotonic tensile tests

Material	E (GPa)	σ_{ys} (MPa)	σ_u (MPa)	YR**	σ_y (MPa)	n
SS41	205.8	305	480	0.64	-	-
HT80	205.8	676	800	0.85	630	0.1
A5083-O	68.6	174	321	0.54	172	0.17
A6N01-T5	68.6	276	298	0.93	260	0.08
A7N01-T4	71.6	254	400	0.64	235	0.16
A7016-T6	71.6	435	494	0.88	420	0.08
A7178-T6	71.6	619	666	0.93	598	0.08

σ_{ys} : Monotonic Yield Strength, ** YR = σ_{ys}/σ_u

Table 3 Material constants by cyclic load tests

Material	Incremental step tests		Companion specimens method	
	σ_{yc} (MPa)	n'	σ_{yc} (MPa)	n'
SS41	211	0.22	205	0.25
HT80	375	0.18	480	0.167
A5083-O	274.4	0.125	-	-
A6N01-T5	242	0.16	-	-
A7N01-T4	324	0.15	-	-
A7016-T6	416	0.12	-	-
A7178-T6	595	0.21	-	-

이상과 같은 反復硬化특성은 靜的 인장시험에 의한 降伏比인 YR值(= σ_{ys}/σ_u)에 의하여 판단할 수 있는 것으로 알려져 있다[1]. 그 예 외로서는 워다스션을 가지는 材料를 들 수 있다. 그러나 Table 2 및 Table 3으로부터 알 수 있듯이, Al합금 중에서 인공시효처리를 실시한 T5 및 T6재의 경우에 있어서도 YR值에 의한 反復硬化특성의 판단은 곤란한 것으로 보인다.

4. 材料의 反復硬化특성이 노치先端의 應力-變形率 관계에 미치는 영향

여기서는 材料의 反復硬化특성이 원형 노치

先端에서의 應力振幅과 變形率振幅의 관계에 미치는 영향에 관하여 고찰한다.

前節에서는 일정 變形率振幅에 대한 應力振幅의 변화상태에 근거하여 材料의 反復硬化특성을 기술하였다. 즉 그 기준은 變形率振幅이었다. 그러나, Fig.10(a)와 (c)에서도 알 수 있듯이, 材料의 反復硬化特性은 應力振幅을 기준으로 하여 설명할 수도 있다. 즉 외력의 振幅이 일정하여 동일한 應力振幅이 反復作用할 때, 變形率振幅이 점차 커지게 되는 경우는 材料가 低應力에서 降伏(軟化)하게 되어 塑性變形率이 커진 것 때문이며, 이 현상이 反復軟化인 것이다. 또한 일정한 應力振幅의 反復作用으로 彈性 變形하던 材料에서 變形率 振幅이 점차 작게 되는 경우는 材料가 高應力쪽에서 항복(硬化)하므로 塑性變形率이 작아지기 때문이며 이 현상은 反復硬化라고 할 수 있다.

따라서, 完全兩振의 荷重제어(R=-1)에 의하여 反復荷重을 받는 노치材에 있어서, 그 노치領域의 變形率의 정량적 변화를 측정하려고 시도한 것이 Fig.11이다. 試驗材로서는 현저하게 反復硬化한 A5083-O를 쓰고, 그림에서 보는 바와 같이 노치($K_t=2.3$)의 荷重방향變位를 측정하기 위해 고리형 變位計(clip gage, $640\mu/mm$)를 노치에 장착하였다.

Fig.12는 公稱應力振幅 $\sigma_a=149.5MPa$ 의 荷重을 부가하였을 때의 노치變位の 振幅 $\Delta ND/2$ 을 反復수에 대하여 나타낸 것이다. 公稱應力振幅은 일정하게 유지하였음에도 불구하고 노

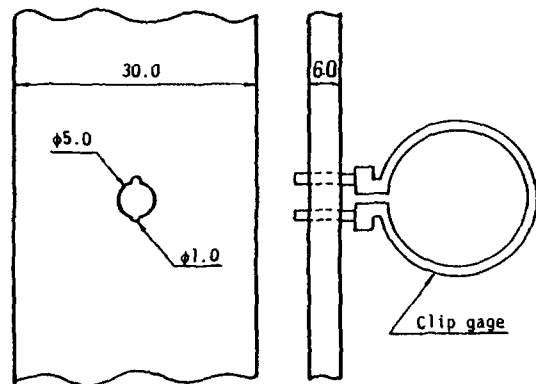


Fig. 11 Measurement of notch displacement

치變位の 振幅은 분명히 감소해 간다. 그 후 균열이 발생하여 전파함에 따라 다시 $\Delta ND/2$ 는 크게 되어 破斷에 이르게 된다.

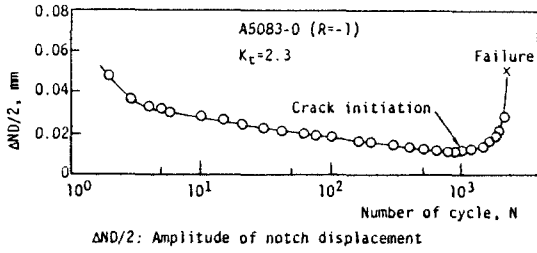


Fig. 12 Change of amplitude of notch displacement in cyclic load test(A5083-O)

한편, Fig.12에서 보는 바와 같이 노치變位の 振幅이 작게 되는 것은 노치領域에서의 變形率의 振幅이 작게 되기 때문이라고 말할 수 있다. 즉 A5083-O는 反復硬化하기 때문에 荷重을 일정하게 유지하는 荷重제어에 의하면 反復塑性變形하고 있는 노치領域은 硬化하며, 이것 때문에 變形率振幅이 작게 되어가는 것으로 생각된다.

Neuber法則에 의하면, 彈塑性變形하는 노치先端에 있어서 형상계수 K_t 와 材料정수를 써서 應力과 變形率을 추정할 수가 있다. 따라서 形상계수가 결정되어 있는 노치에 있어서 그 선단의 應力과 變形率의 값에 미치는 材料정수의 영향을 고려하기 위하여, 여기서는 Neuber法則을 적용하여 보기로 한다. 이미 많은 연구에 의하여 행해진 것과 같이[8, 9], Neuber法則을 피로에 적용하여 보면 다음과 같이 쓸 수가 있다.

$$K_t^2 = K_o \cdot K_e \quad (3)$$

여기서, $K_o = \sigma_a / S_a$ (S_a : 정미단면應力の 振幅)

$K_e = \delta_a / e_a$ (e_a : 정미단면 變形率의 振幅)

材料의 反復 應力-變形率 관계로서 식(2)와 같은 指數硬化法則을 쓰면, 노치先端의 應力振幅과 變形率振幅은 다음과 같이 구하여 진다.

$$\sigma_a = K_t \cdot S_a, \quad \sigma_a \leq \sigma_{yc} \quad (4.a)$$

$$\sigma_a = K_t \cdot S_a (K_t \cdot S_a / \sigma_{yc})^{(n'-1)/(n'+1)}, \quad \sigma_a > \sigma_{yc} \quad (4.b)$$

$$\epsilon_a = K_t \cdot e_a, \quad \epsilon_a \leq \epsilon_{yc} \quad (5.a)$$

$$\epsilon_a = K_t \cdot e_a (K_t \cdot S_a / \sigma_{yc})^{-(n'-1)/(n'+1)}, \quad \epsilon_a > \epsilon_{yc} \quad (5.b)$$

이들 식(4) 및 (5)에 있어서 노치先端의 應力과 變形率振幅의 값에 영향을 미치는 材料정수는 σ_{yc} 와 n' 인 것이다 그래서 Fig.11에서 나타난 노치材에 대하여 그 노치先端의 應力과 變形率 振幅에 미치는 材料정수의 영향을 도시한 것이 Fig.13 (a) (b)이다. (a)는 反復軟化한 HT80에 대한 것이다. 그림에서 굵은 실선은 靜的 材料정수(σ_y 및 n)를 쓴 것이고, 破線은 振幅

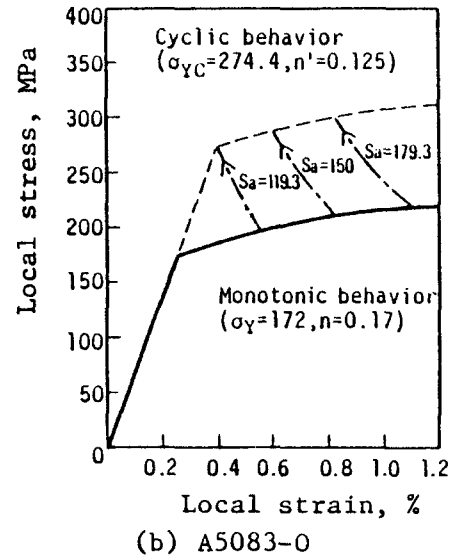
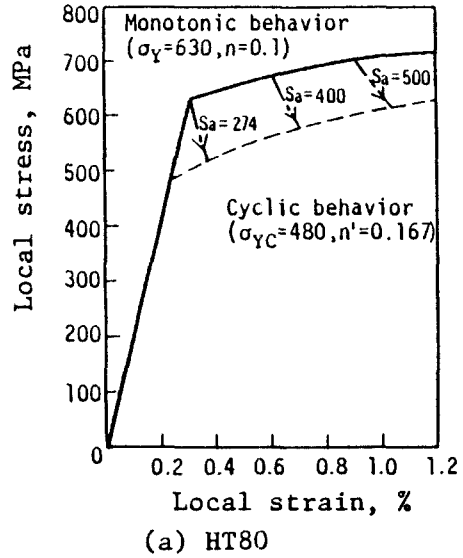


Fig. 13 Change of local stress-strain by cyclic hardening property in notch tip

變動法으로 부터 얻은 材料정수(σ_{yc} 및 n')에 의한 것이다. 反復荷重을 받아서 材料가 軟化하면 그림에서 화살표로 나타내고 있는 것과 같이 쌍곡선을 따라 應力振幅은 작게 되고 變形率振幅은 크게 되는 것을 알 수가 있다. (b)는 反復硬化한 A5083-O에 대한 것이다. 이 경우 HT80과는 반대로 反復荷重을 받아서 應力振幅은 크게 되고, 變形率振幅은 작게 되는 것을 알 수 있다. A5083-O에 있어서 이경향은 상기의 Fig.12에서 나타낸 노치變位の 振幅 $\Delta ND/2$ 의 변화에 관한 실험결과를 충분히 뒷받침하는 것으로 사료된다.

이상의 고찰로부터 노치先端에서의 應力과 變形率振幅은 荷重과 형상이외에 材料의 反復應力-變形率 관계에도 매우 큰 영향을 받게 되는 것이 확인되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 反復荷重을 받아서 彈塑性거동하는 노치領域에 있어서 材料의 應力-變形率 거동을 파악하기 위하여, 2종류의 鋼材와 5종류의 Al합금에 대하여 靜的 및 反復荷重에 의한 材料의 應力-變形率 관계를 구하였다. 또한 反復荷重에 의한 材料의 應力-變形率 應答 특성을 검토하였다. 더우기, 材料의 反復硬化특성이 노치先端의 應力 및 變形率振幅에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) SS41은 變形率振幅이 작을 때 ($\epsilon_a=0.1\sim 0.5\%$)는 反復軟化하지만 클 때 ($\delta_a\geq 0.5\%$)는 反復硬化하고, HT80은 反復軟化하였다. 또한 A5083-O와 A7N01-T4는 反復硬化하고, A6N01-T5, A7016-T6 및 A7178-T6는 靜的 및 反復 應力-變形率거동이 거의 같은 관계를 보였다.

2) 같은 材料에서도 變形率振幅이 작을 때는 靜的 및 反復거동은 거의 같지만, 變形率振幅이 크게 되면 材料가 硬化하거나 軟化하여 그 反復硬化특성이 나타난다.

3) HT80이외의 6종류의 試驗材에서는 材料의 應力-變形率 관계가 振幅變動法과 多數試

驗片法에 그다지 의존하지 아니함을 알 수 있었다.

4) 材料의 反復硬化특성은 노치先端의 應力과 變形率의 振幅에 매우 큰 영향을 미치는 것을 Neuber法則과 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) M.Klesnil, P.Lukas, "Fatigue of Metallic Materials", Czechoslovakia(1980), pp.12~56
- 2) B.M.Wundt, "Effect of Notches on Low-cycle Fatigue", ASTM, STP 490(1972)
- 3) 西島, 田中, 松岡, 阿部, 神律, "JIS機械構造用炭素鋼なちびに Cr及び Cr-Mo鋼の軸荷重疲勞特性", 日本機械學會論文集(A編)46-412(昭55), pp.1314-1328
- 4) K.Kanazawa, K.Yamaguchi, K.Kobayashi, "Cyclic Stress-Strain Behaviors of Carbon Steel and Cr-Mo Steel", Trans. National Research Institute for Metals, Japan, 27-3(1985), pp.157~162
- 5) 久保, 彈塑性破壞力學と J積分, 破壞力學入門, 日本材料學會破壞力學 部門委員會(昭58) pp.21~27
- 6) 幡中, "金屬材料の繰返し應力-ひずみ特性と低サイクル疲勞壽命", 日本機械學會論文集(A編), 50-453(昭59), pp.831~838
- 7) M.M.Hammauda, K.J.Miller, "Elastic-Plastic Fracture Mechanics Analysis of Notches", ASTM, STP 668(1979), pp.703~719
- 8) K.N.Smith, T.H.Watson, T.H.Topper, "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals", J. Materials 5~4(1970). pp.767~778
- 9) A.Conle, H.Nowack, "Verification of a Neuber-based Notch Analysis by the Companion specimen Method", Experimental Mechanics(February 1977), pp.57~63