

## 극저사이클 재하하에서 앵글 강부재의 파괴실험

Tests on Failure of Steel Angles due to  
Very Low-Cycle Fatigue of Loading

박연수\* · 김성철\*\* · 임정순\*\*\*

Park, Yeon Soo · Kim, Sung Chil · Lim, Jung Soon

## Abstract

The objective of this study is to identify the quantitative relationships among the important physical factors associated with failure of steel members under strong seismic excitations through very low-cycle fatigue tests. Very low-cycle fatigue is meant to be structural fatigue causing cracks and rupture in about 5~30 cycle ranges. The angle specimen was subjected to repeated axial load after undergoing inelastic buckling. The test results reveal that the energy absorption capacities vary heavily with the history of loading and the failure mode. The maximum values of residual local strain at the initiation of a visible crack due to the very low-cycle fatigue were of the order of 25~40%, regardless of loading patterns, deflection modes, and width-to-thickness ratios.

## 요 지

본 연구의 목적은 지진에 의한 강구조 부재의 소성피로손상 및 파괴에 크게 영향을 미치는 중요한 인자를 추출하여 그들간의 정량적 관계를 규명하는 것이다. 이를 위해, 앵글 강부재에 대하여 5~30 사이클 정도의 극저사이클 피로파괴실험을 실시하였다. 실험은 축방향 상대변위에 의해 제어된 반복 하중하에서 행하였으며, 앵글 시험체는 재하초기에 비탄성 전체좌굴 또는 국부좌굴이 발생하였다. 실험결과, 극저사이클 피로파괴하에서 강부재의 에너지 흡수능력은 재하이력과 파괴모우드에 따라 크게 변한다는 것을 알 수 있었고, 균열발생부에서 잔류 국소변형률의 최대치는 재하패턴·변형모우드·폭두께비에 관계없이 25~40% 정도였다.

## 1. 서 론

구조물이 파괴적인 지진 등에 의해 심한 반복하중을 받을 경우, 그 구조물의 요소는 부분적으로 큰

\* 정희원 · 日本 京都大学防災研究所 都市施設耐震시스템研究中心  
센터 외국인 공동연구원

\*\* 정희원 · 경기대학교 공과대학 토목공학과 부교수

\*\*\* 정희원 · 경기대학교 공과대학 토목공학과 교수

소성변형을 반복해서 받는다. 이때, 반복사이클 수가 작더라도 소성화의 정도가 매우 크면, 구조물은 극저사이클의 소성피로에 의해서 파괴될 가능성이 있다<sup>(1,2)</sup>. 강구조물의 지진에 의한 피해의 대부분은 브레이스(Brace)제의 좌굴 및 파단에 의한 골조의 과도한 변형 및 붕괴에 기인한다<sup>(3-5)</sup>. 이와 같은 현상은 저사이클 피로파괴로서 포착한 지금까지의 연구에

있어서는 수십~수백 사이클의 반복하중하에서 파괴기준을 확립하려 하였다. 즉, 지진시 부재의 거동을 명확히 밝히기 위한 저사이클 피로실험은 재료적인 소성피로의 입장에서부터 파괴수명을 구하는 것이 중심이 되었다<sup>6~9)</sup>. 따라서 좌굴이 발생되지 않도록 시험체 형상을 선택해서 반복재하실험을 실시한 결과를 바탕으로 저사이클 피로파괴기준을 설정하려는 것이 많았다. 그 결과 강진하에서 구조물 파괴에 대한 명확한 정의, 피로파괴수명 또는 누적 피로손상 추정에 대한 결정적인 방법은 아직까지 없다<sup>11)</sup>.

지진시 실제 피해상황을 살펴보면 브레이크 등의 부재는 좌굴된 후 수회로부터 약 20회 정도의 극히 작은 횡수에서 인장·압축력을 반복해서 받으며, 그 결과 큰 반복소성변형이 초래되어 파단에 이른다. 더우기 H형강의 보 또는 기둥에 대한 부재실험<sup>10~12)</sup>에서는 오히려 플랜지(Flange)부에서 국부좌굴이 발생된 경우가 많고, 이 국부좌굴부분이 국소적으로 상당히 큰 인장·압축굽힘(Compressive Bending)의 반복소성변형을 받음에 따라 균열이 발생하고 파단에 이르는 경우가 관찰되었고 따라서 문제점으로 제기되었다. 이와 같이 부재가 압축재하에 의해 일단 좌굴된 후, 인장·압축의 극저사이클 반복하중을 받아 파단에 이르는 극저사이클의 피로파괴성상을 파악하는 실험적 연구가 강구조물과 부재의 내진손상도의 정량적인 파악을 위해 필요하다.

따라서 본 연구에서는 재하초기에 국부좌굴의 발생이 가능한 구조부재의 거동을 조사하기 위해서 앵글을 시험체로 사용했으며, 수회로부터 약 20회 정도 극저사이클의 반복재하에 의한 파괴현상을 관찰하였고, 특히 극저사이클 하중하에서의 파괴조건과 매우 밀접한 관계가 있다고 생각되는 국소변형률(Local Strain)에 초점을 두었다. 즉, 부재안에서 가장 심한 응력과 변형을 받고 있는 단면에 있어서 균열과 파단에 연루되는 국소적인 변형의 크기 및 반복재하에 의한 변형의 누적상황과 반복변위진폭, 반복재하의 수 및 재하이력과의 상관성을 조사하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 시험체

시험체는 SS41 상당의 앵글 L-40×40×3과 L-40

×40×5를 사용했다. 이들 각각에 대한 재료의 인장항복강도는 336N/mm<sup>2</sup>와 339N/mm<sup>2</sup>, 인장강도는 449N/mm<sup>2</sup>와 469N/mm<sup>2</sup>, 그리고 평균연신률(Average Elongation)은 30%와 27%였다. 총 10개의 시험체에 대하여 실험을 실시했으며(표 1 참조), 그림 1에 보여준 것과 같이 양단부에 9 mm 두께의 강관을 앵글 강부재에 수직으로 용접접합했다. 단 시험체 No.4~7은 단부강판이 없는 앵글 시험체뿐만 아니라, 시험부 길이  $l$ 은 300 mm였다. 그러나 판두께 5 mm의 앵글 시험체의 경우, 시험체 단부에서 고장력볼트의 마찰접합내역의 부족으로 재하 초기에 시험체 단부의 미끄러짐 현상을 방지하기 위해 No.8 이후의 시험체에 대해서는 단부강판을 부착하였다. 그 결과 시험부 길이는 18 mm 늘어나서 318 mm가 되었다(표 1 참조).

### 2.2 실험변수

본 실험에서는 시험체의 ① 폭두께비( $b/t$ ), ② 재하패턴(Loading Patterns) 그리고 ③ 변형모우드(Deflection Modes)를 실험변수로 하여 극저사이클 피로파괴거동을 조사하였다. 시험체의 공칭치수는 폭  $b=40$  mm와 2종류의 두께  $t=3$  mm 및 5 mm 이고, 공칭치수에 의한 폭두께비  $b/t$ 는 13.3과 8이 되지만, 실측치수에 의한 폭두께비는 표 1과 같이 각각 15.8~16.4와 8.6이 되었다. 축방향변위  $\Delta$ 를 제어변수로 하고 압축변위영역하에서 정적인 정속도재하를 행하였다. 재하패턴은 그림 2에 보여준 (a) 단계형 점증변위진폭 반복재하(I Type Loading)와 (b)정변위진폭 반복재하(C Type Loading)의 2종류를 채용했다. 표 1은 시험체의 실측치수와 각 시험체에 가해진 변위진폭 및 반복재하수를 보여주고 있다.

앵글 강부재가 중심압축하에 의해 좌굴변형할 때 변형의 발생방향은 그림 3에 보여준 것과 같이 2가지로 표현되었다. 따라서, 결과적으로 이 변형모우드가 제 ③의 중요한 실험변수가 되었다. 여기에서는 그림 3(a)의 모우드를 정변형(P형), 그림 3(b)의 모우드를 부변형(N형)으로 정의한다. 재하는 가능한 중심압축으로 했지만, 좌굴 후 변형모우드를 계획한대로 제어하기 위해서, 재하실험의 대부분은 예비재하에서 거의 중심압축상태의 변형률분포를 확인한 중심위치로부터 0.3 mm~0.7 mm 정도의 미

표 1. Test Parameters and Results

Specimen		l(mm)	b(mm)	t(mm)	b/t	$(\Delta/l) \times 100$	Mode of Deflection	$P_{cr}(kN)$	Number of cycle			Extreme Strain	
Name	No.								Crack 1	Crack 2	Rupture	tens.	comp.
L3IP	13	318	39.6	2.80	14.1	-0.5-0 (4)	P	70.60	17	18	-	-	-
						-1.0-0 (4)							
						-2.0-0 (4)							
						-4.0-0 (4)							
						-8.0-0 (4)							
-12.0-0 (4)													
L3IN	4	301	40.4	2.55	15.8	-0.5-0 (4)	N	58.02	20	21	-	-	-
						-1.0-0 (4)							
						-2.0-0 (4)							
						-4.0-0 (3)							
						-8.0-0 (4)							
-12.0-0 (4)													
L3CPa	6	300	40.3	2.55	15.8	-0.8-0(16)	P	62.92	9	10	-	27.5%	-29%
L3CPb	18	318	39.6	2.83	14.0	-0.8-0(23)	P	66.10	5	8	23	30%	-32.5%
L3CN	5	301	40.5	2.47	16.4	-0.8-0(30)	N	68.31	7	8	-	-	-41%
L5IP	9	318	39.2	4.56	8.6	-0.5-0 (4)	P	100.65	21	23	-	35%	-35%
						-0.9-0 (4)							
						-1.9-0 (4)							
						-3.8-0 (4)							
						-7.6-0 (4)							
-11.3-0 (4)													
L5IN	7	300	39.2	4.58	8.6	-0.5-0 (4)	N	119.07	22	-	-	-	-30%
						-1.0-0 (4)							
						-2.0-0 (2)							
						-4.0-0 (4)							
						-8.0-0 (4)							
-12.0-0 (4)													
L5CPa	8	317	39.3	4.55	8.6	-7.6-0(19)	P	95.55	9	12	19	32.5%	-35%
L5CPb	10	317	39.2	4.55	8.6	-7.6-0(19)	P	106.33	9	12	19	30%	-32.5%
L5CN	11	318	39.2	4.55	8.6	-7.6-0(20)	N	106.54	9	13	21	35%	-35%

[Note] I: Increasing amplitude, C: Constant amplitude, P: Positive deflection, N: Negative deflection b: Width of angle leg, t: Thickness of angle leg,  $\Delta$ : Relative axial displacement, ( ): Number of cycles, l: Specimen length between pin-supports,  $P_{cr}$ : Buckling load, Crack 1: Crack initiation at concave side, Crack 2: Crack initiation at convex side

소한 편심을 주었다. 또한, 시험부의 길이  $l=300\sim 318$  mm로써 세장비  $\lambda=38\sim 42$ 의 비교적 짧은 부재를 대상으로 했다.

### 2.3 재하 및 계속방법

그림 4 및 사진 1은 재하장치를 보여주고 있으며, 재하는 유압식 서보가력기(Hydraulic Servo Actua-

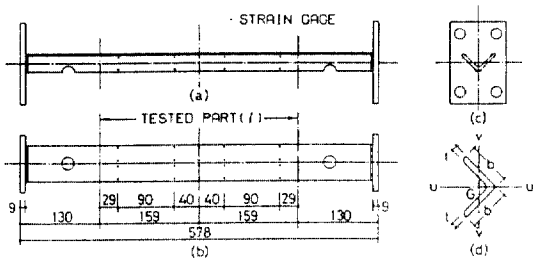
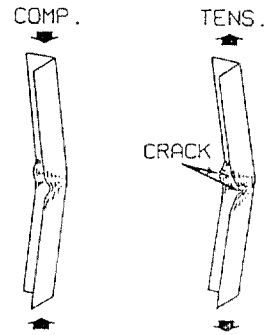


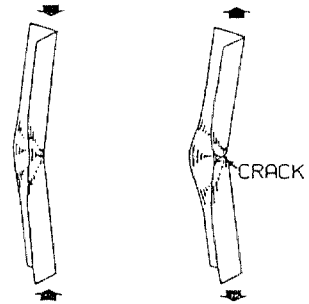
그림 1. Test Specimen(length in mm)

(a) 측면도(시험체의)

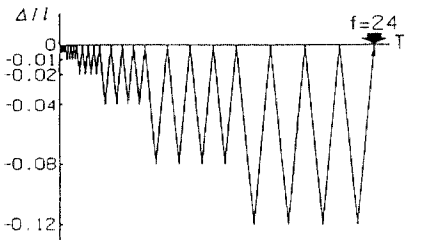
(b) 정면도(시험체의)



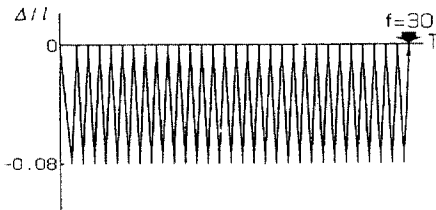
(a) Positive deflection [P] mode.



(b) Negative deflection [N] mode.



(a) I type loading.



(b) C type loading.

Δ: AXIAL DISPLACEMENT  
f: NO. OF CYCLES  
T: TIME

그림 2. Loading Patterns

tor)를 사용하여 행하였다. 그림 5 및 사진 1에 보여준 장치에 의해서 시험체를 고력볼트와 보통볼트로써 고정하고, 그림 1(d)의 단면중심 G를 통과하는 U주축에 대한 회전 및 재축에 대한 회전을 구속하였고, V주축에 대한 회전만을 풀어준 양단 핀지지 (Pin Support)조건하에서 재축방향의 반복가력을 행하였다.

균열 발생부에 대한 시험체 표면의 국소변형량을 측정하기 위해서, 빗커스경도시험장치(Vickers Hardness Tester)를 이용하여 시험체의 재축방향에 2 mm피치(Pitch)로 중앙시험구간 80 mm에 대하여 표점을 두었다. 재하실험 종료후 눈금이 붙여진 루페

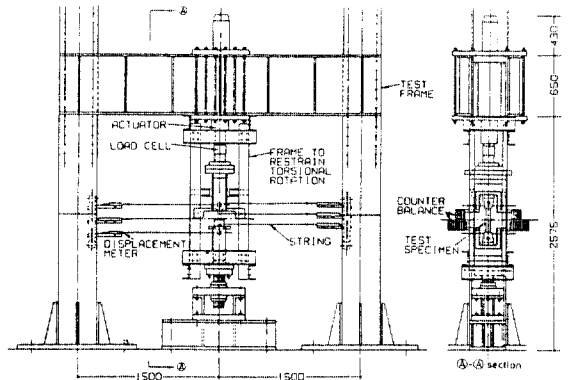


그림 4. Testing Apparatus(length in mm)

(Lupe)등을 이용해 1/10 mm 정도로 표점의 변형량을 읽었다. 이것은 균열과 파단에 관련된 큰 소성 변형을 계속할 수 있는 다른 방법이 없기 때문에 이와 같은 방법을 사용하였다. 또한, 길이 2 mm의

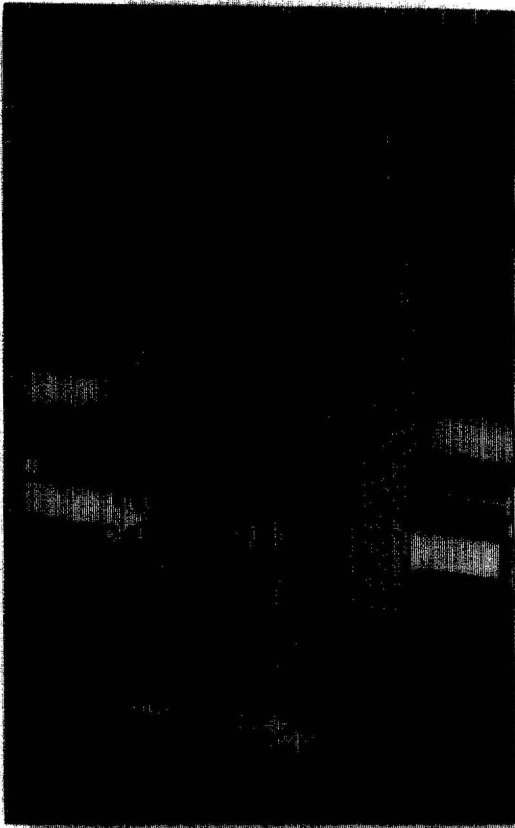


사진 1. Specimen Supporting System

게이지(Strain Gage)를 그림 1(a), (b)에 표시한 위치에 부착하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 좌굴변형 및 균열의 발생

실험초기의 압축재하에 의해 시험체는 전체좌굴을 일으킴과 동시에 정모우드의 경우는 부재 중앙부분에서 국부좌굴이 발생되었다. 좌굴강도의 실험치를 좌굴곡선(Column Curve)과 비교한 것이 그림 6이다. 여기서, 비탄성 좌굴곡선으로써 Engesser-Shanley의 Tangent Modulus이론에 의한 좌굴응력을 보여주고 있다. 이때 강재의 항복응력을  $\sigma_y$ 라 할때 비례한도  $\sigma_p$ 를

$$\sigma_p = 0.8 \sigma_y \quad (1)$$

로 가정하고, 비례한도 이상의 응력-변형을 곡선의

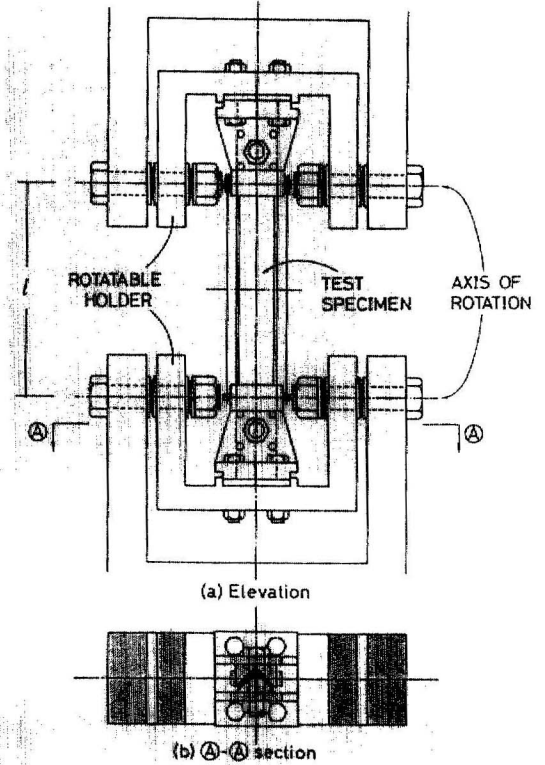


그림 5. Specimen Supporting System

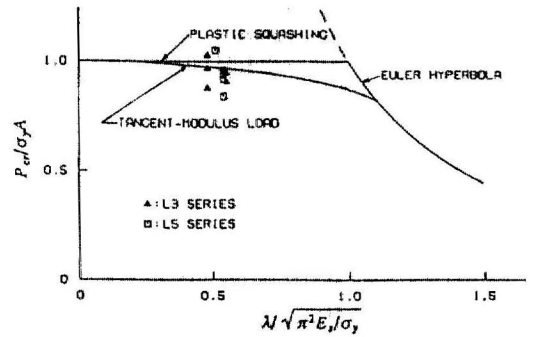


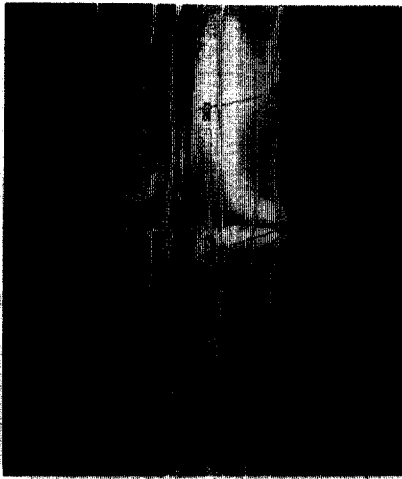
그림 6. Column Curve and Observed Strength

좌굴응력  $\sigma_{cr}$ 에 있어서 접선탄성계수  $E_t$ 는 식 (2)와 같이 계산된다.

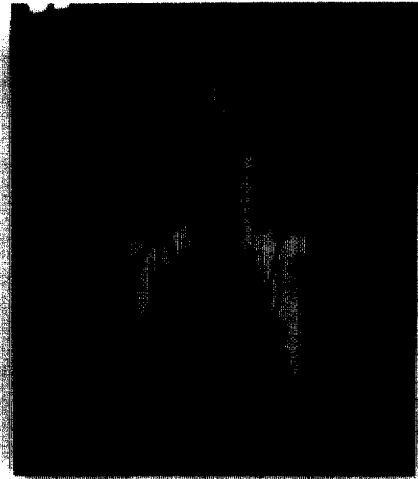
$$E_t = E_s \{1 - (\sigma_{cr} - \sigma_p)^2 / (\sigma_y - \sigma_p)^2\} \quad (2)$$

여기서 강재의 영계수(Young's Modulus)  $E_s = 206 \text{ kN/mm}^2$ 의 값을 사용했다.

그림 3(a)와 같은 정변형모우드에서는 먼저 국부



(a) Positive deflection mode (L5CPb)



(b) Negative deflection mode (L3CN)

사진 2. Cracking Patterns

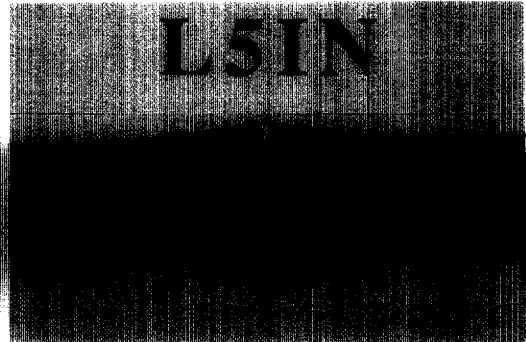
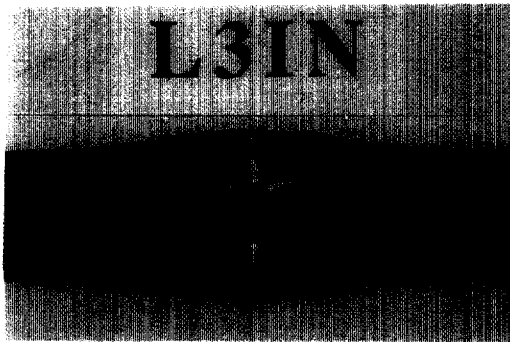
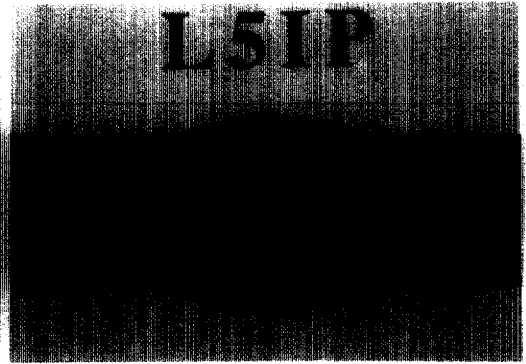


사진 3. Cracked and Ruptured Portions after Testing

좌굴변형이 발생한 앵글 단면의 양쪽 모서리(Edge)의 오목한 쪽과 볼록한 쪽의 2표면에 균열이 발생한 후, 재하와 함께 균열이 급속히 진행되어 두께방향으로 관통하고 단면중앙의 코너(Corner)부까지 확

장되었다(사진 2(a)). 그림 3(b)와 같은 부변형모우드에서는 역으로 코너부에 변형이 집중되어 전체좌굴변형의 오목한 쪽의 변형부가 인장력을 받을 때 초기균열이 발생되었다(사진 2(b)). 균열의 진행은

당연히 인장력을 받는 부위에서 볼 수 있지만, 어떤 경우의 재하에도 국부좌굴 또는 전체좌굴에 의해서 급협압축변형을 받았던 오목한 쪽 변형부의 관요소가 하중의 반전에 의해 인장력을 받았을 때 초기 균열이 발생하였다. 여기서 균열의 발생은 전부 육안으로 관찰하여 확인한 것으로, 사진 3은 실험 종료 후 시험체에 대한 균열발생부의 상태를 보여주고 있다.

### 3.2 하중-변형관계

그림 7은 축방향 상대변위의 점증반복 및 정변위 진폭반복에 의한 하중  $P$ 와 축방향변위  $\Delta/l$ 의 전형적인 이력관계를 보여주고 있다. 여기서  $N_y$ 는 앵글

단면의 항복축력이다. 변위진폭의 점증형재하에서는 각 진폭역에서 4사이클씩 반복을 기본으로 행하였다. 그 결과, 시험부 길이의 8%의 변형률에 해당하는 제 5진폭역의 반복재하까지는 균열이 보이지 않았고, 대부분의 경우 12%변위에 해당하는 최종 제 6진폭역의 제 1사이클째에 초기균열이 발생되었다. 정변위형재하는 점증형재하의 제 5진폭과 같은 8% 변형률에서 반복재하를 행하였으며, 제 5~9사이클에서 최초의 균열이 확인되었다. 각 사이클의 이력곡선이 수렴하여 안정하는 경향과 역으로 발산하는 불안정 현상을 그림 7을 통해 알 수 있다. 재하초기의 좌굴에 의해서 압축저항력은 급격히 저하되지만, 재료적인 손상이 아직 초래되지 않았기 때문에

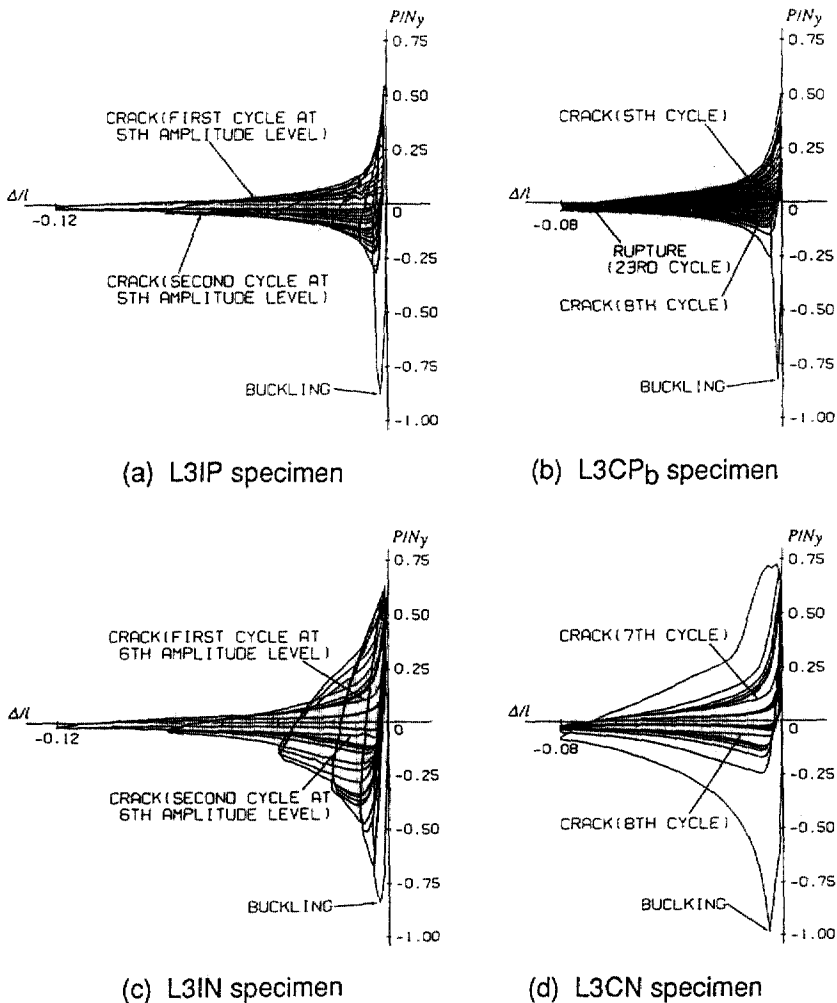


그림 7. Load-Axial Displacement Relation

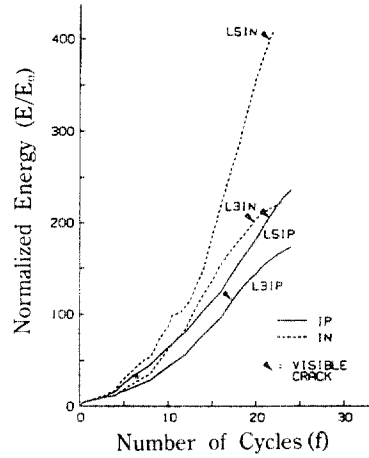
인장저항력은 저하되지 않고 균열이 발생하기 전까지 이력곡선이 안정되는 경향을 볼 수 있다. 그러나, 균열이 발생하기 시작하면 인장저항력 및 압축저항력이 함께 심하게 떨어져서 과단에 이른다.

### 3.3 에너지 흡수능력

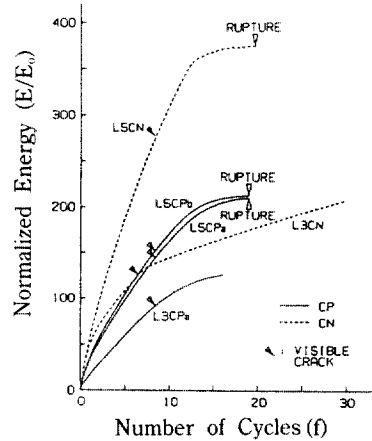
P- $\Delta$ 곡선에 의해 둘러싸인 면적으로 산정한 이력 흡수에너지(Dissipated Energy)의 누적치 E와 반복수 f와의 관계를 재하패턴별로 나타낸 것이 그림 8이다. 에너지량은 시험부 전체길이에 대해 축적될 수 있는 최대탄성 변형률에너지(Maximum Elastic Strain Energy)

$$E_0 = \sigma_y^2 AL / (2E_s) \quad (3)$$

로 무차원화 하였다. 여기서 A는 시험체의 단면적이다. 에너지 흡수의 누적과정은 I형(그림 8(a))과 C형(그림 8(b))에 따라 즉, 재하패턴에 의해서 완전하서로 다른 모양을 보여주고 있다. 또, 재하패턴이 같은 경우에도 횡방향의 변형모우드(그림 3의 P형과 N형)의 영향도 받는 것을 알 수 있다. 부변형(N형)의 경우가 정변형(P형)의 경우보다 같은 반복재하수에서도 에너지 흡수능력이 컸다. 폭두께비의 영향을 비교해보면 두께 5 mm(L5시리즈 시험체)의 것이 두께 3 mm(L3시리즈 시험체)의 것보다 에너지비가 더 컸다. 그러나, 동일한 판 두께의 시험체를 이용해 동일한 재하패턴과 변형모우드를 발생시킨 경우(그림 8(b)의 L5CPa와 L5CPb)에는, 균열발생시의 반복재하수 및 균열발생 후의 열화의 정도 그리고 이력곡선의 형태가 거의 일치하는 실험결과가 얻어져 에너지 흡수능력에 관해서도 극저사이클 피로시험의 재현성이 매우 높다는 것을 알 수 있었다. 이들 이력흡수 에너지곡선의 균열발생시에 있어서 누적 에너지량이 일정하다고 해석할 수 없으며, 또 최종적인 과단에 관계되는 에너지량을 특정한 값으로 표시하는 것은 어렵다. 그러나 다른 방향에서 해석하면, 누적이력 흡수에너지는 극저사이클 피로과과와 단순한 관계는 없지만, 재하이력 · 폭두께비 · 변형모우드의 상이함을 현저히 반영하고 있음을 알 수 있다. 이것은 극저사이클피로에 의한 부재의 손상 과정을 에너지흡수량의 변화에 의해서 표현할 수 있는 모델화의 가능성을 시사하고 있다.



(a) I type loading



(b) C type loading

그림 8. Comparison of Energy Absorption Capacities in the course of Increasing Number of Cycles

### 3.4 국소변형률의 분포

재하종료후 국소변형률의 크기와 균열과의 관계는 그림 9에 보여준 단면의 모서리와 코너부근에서 측정된 재축방향의 변형률 분포도에 의해 알 수 있다. 그림에서 실선부분은 인장변형률을 점선부분은 압축변형률을 표시한다. 정변형모우드의 앵글 모서리에서는 소성화 영역이 좁은 범위에 집중되어 있고 소성영역의 길이는 단면의 4~6배 정도였으나, 코너부에서는 소성화영역의 길이가 길고 판두께의 20배 정도였다(그림 9(a)). 부변형모우드에서는 국소



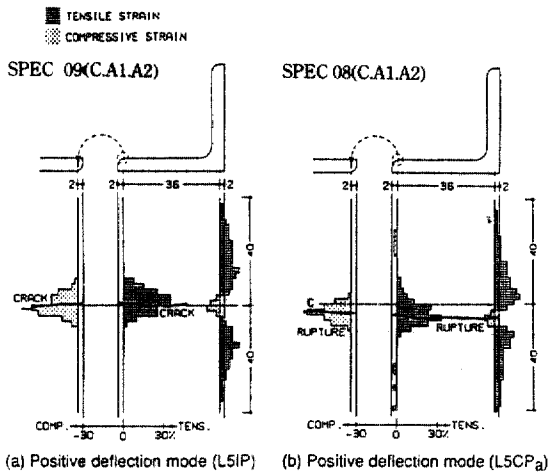


그림 9. Distribution of Residual Local Strain in Angle Test

변형률 계측을 행한 길이 80mm구간의 영역전체에 소성화가 진행되어 있다(그림 9(b)). 각 시험체에서 얻어진 균열발생부의 잔류 국소변형률의 최대치는 표 1에 보인 바와 같이 인장측에서는 27.5~35% 그리고 압축측에서는 -29~-41%의 범위였다. 이 값은 재하이력 및 폭두께비 그리고 변형모우드에 관계없이 거의 일정하다는 것이 주목할만하다.

단순 인장재하실험을 행한 JIS(Japanese Industrial Standard)의 13B호 재료시험편에 대해서 국소 변형률을 같은 방법으로 조사한 결과의 예를 그림 10에 보인다. 그림의 횡축은 시험편의 재축방향의 좌표를 표시하고 있으며, 파단이 발생된 단면위치를 좌표 0으로 하였다. 표점간 거리 50 mm에서의 평균연신률은 30% 정도이지만, 1.5 mm 피치 또는 2 mm 피치에서 계측한 국소변형률의 최대치는 약 100%에 도달하고 있다. 따라서, 위의 앵글 시험체의 균열발생에 관계되는 변형률의 크기와 비교하면, 앵글의 경우가 상당히 작은 것을 알 수 있고 이것은 반복재하의 효과에 의한 것으로 생각되어진다.

#### 4. 결 론

본 실험결과 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 균열의 발생은 어떤 재하의 경우에서도 국부 좌굴 또는 전체좌굴에 급힘 압축변형을 받는 오목한 변형부의 판요소가 반복재하에 의한 하중 반전시에

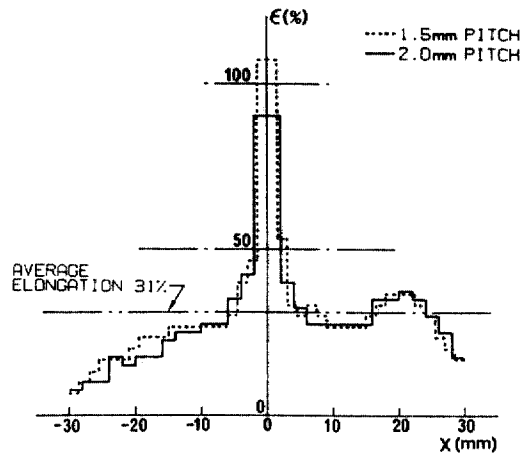


그림 10. Distribution of Residual Local Strain in Material Test

인장력을 받을 때 초기의 균열이 관찰되었다.

2) 완전히 동일한 재하조건하에서 실험을 행한 2개의 시험체는 거의 똑같은 이력거동을 보였고 최종적으로 같은 사이클수에서 파단되었으며, 극저사이클 피로에 있어서 본 실험의 재현성이 확인되었다.

3) 하중-축방향변위곡선으로 둘러싸인 면적으로부터 산정한 누적이력 흡수에너지는 균열발생시에 있어서 누적치가 일정하지 않았으며, 또 최종적인 파단에 관계되는 에너지량을 특정치로 나타낼 수 없었다. 즉 이력흡수에너지는 재하이력·폭두께비·변형모우드의 영향을 현저히 반영하고 있음을 알 수 있었다.

4) 극저사이클 반복하중하에서 시험체 균열발생부의 잔류 국소변형률의 최대치는 인장측 및 압축측에서도 25~40%의 범위였다. 이 값은 재하이력 및 폭두께비 그리고 변형모우드의 실험변수에 관계없이 거의 일정하였다.

#### 참 고 문 헌

1. 岩井 哲, 野中泰二郎, “繰り返し載荷を受ける構造部材の塑性疲労—研究の現状分析と展望—”, 京都大学防災研究所年報, 第31号 B-1, 1988, pp. 89-104.
2. Iwai, S., Nonaka, T., Bourgund, U. and Kameda, H., “Structural Failure due to Very Low Cycle Fatigue of Steel Members and Elements under Earthquake Loading”, *Proceedings of 8th Japan*

- Earthquake Engineering Symposium*, Vol. 2, 1990, pp. 1377-1382.
3. 日本鋼構造協会鋼構造物震害対策調査団, “1978年宮城県沖地震による鋼構造物の被害調査報告”, JSSC, Vol. 14, No. 153, 1978, pp. 1-55.
  4. 若林 實, 中村 武, 南 宏一, 吉田 望, 岩井 哲, 淺草 肇, “1978年宮城県沖地震による建築物の被害”, 京都大学防災研究所年報, 第22号 B-1, 1979, pp. 217-242.
  5. 岩井 哲, 北原昭男, 神田 仁, 亀田弘行, “1987年千葉県東方沖地震被害調査報告, 都市耐震センター研究報告, 第2号, 京都大学防災研究所都市施設耐震システム研究センター, 1988, pp. 117-141.
  6. Tanabashi, R., et al., “Load-Deflection Behaviors and Plastic Fatigue of Wide Flange Beams subjected to Alternating Plastic Bending(Part 1 Experimental Investigation)”, *Trans. AIJ*, No. 175, 1970, pp. 17-29.
  7. 後藤尚男, 亀田弘行, 小池 武, 泉並隆二, 脇田和試, 杉原 豊, “くり返し曲げ荷重下における構造用鋼材の破壊過程に関する一考察”, 京都大学防災研究所年報, 第17号, B, 1974, pp. 157-169.
  8. Popov, E. P. and Pinkney, R. B., “Cyclic Yield Reversal in Steel Building Connections”, *Jour. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 95, No. ST3, 1969, pp. 327-353.
  9. Bertero, V. V., Popov, E. P. and Krawinkler, H., “Beam-Column Subassemblages under Repeated Loading”, *Jour. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 98, No. ST5, 1972, pp. 1137-1159.
  10. 椋代仁朗, 今田忠則, 松尾 彰, “繰り返し曲げを受けるはりのフランジ局部座屈後の特性について(その1 履歴特性)”, 日本建築学会大会梗概集(東海), 1976, pp. 1083-1084; 同(その2 塑性疲労), pp. 1085-1086.
  11. 福知保長, 小倉正憲, “H型梁のフランジ局部座屈と履歴性状に関する研究”, 日本建築学会論文報告集, 第228号, 1975, pp. 65-71.
  12. 宇田川邦明, 高梨晃一, 田中 尚, “繰り返し荷重を受けるH形鋼はりの復元力特性(その1 定変位振幅繰り返し荷重時の塑性ヒンジ回転能力)”, 日本建築学会論文報告集, 第264号, 1978, pp. 51-59.

(接受: 1992. 7. 15)