

반복하중을 받는 강구조 요소의 소성피로에 관한 연구

A Study on Plastic Fatigue of Structural Steel Elements under Cyclic Loading

박 연 수¹⁾ · 박 선 준²⁾
Park, Yeon Soo Park, Sun Joon
강 성 후³⁾ · 윤 영 필⁴⁾
Kang, Sung Hoo Yoon, Young Phil

요 약 : 본 연구에서는 먼저 강한 지진하중에 의해 발생하는 구조물의 파괴와 관련되어 있는 중요한 물리적 인자들의 상호관계를 정량화하기 위하여 반복하중을 받는 구조성분들에 대한 소성피로 문제에 대해서 검토하였으며, 강한 지진과 같은 극심한 반복하중하에서 구조성분들에 대한 극저사이클 피로파괴의 새로운 개념이 도입되었다. 또한 강구조물 요소에 대한 극저사이클 피로파괴 실험을 실시하였다. 실험은 수회에서 20회사이의 반복하중재하 과정에서 궁극적인 파괴를 실현하기 위하여 시도 되었다. 시험체는 H형강의 플랜지 단면처럼 강부재내의 얇은 평판요소를 의미하는 직사각형 평판을 사용하였다. 이 시험체에는 비탄성좌굴, 소성신장 또는 이들 2가지의 조합이 발생한 후 부재가 완전히 파괴에 이를때까지 축방향 반복하중을 가하였다. 그 결과 극저사이클 피로하중에 의한 극한파괴상태는 구조요소단면 최외단에서의 최대변형률과 밀접하게 관련되어 있음을 알 수 있었다.

ABSTRACT : In order to quantify the relationships of the important physical factors relating failure to strong earthquake loading, the plastic fatigue problems for structural components under repeated loading were reviewed first. A new concept of very low cycle fatigue failure for structural components under severe cyclic excitations as in strong earthquakes was represented. Also, an experimental study was made of the very low cycle fatigue failure of structural steel elements. It was attempted to realize the ultimate failure in the course of loading repetitions of the order of several to twenty. The test specimen had a form of rectangular plate, representing a thin-plated element in a steel member as wide-flange cross section. It was subjected to uniaxial loading repeatedly, until complete failure takes place after

1) 정회원, 전남대학교 공과대학 토목공학과 교수
2) 정회원, 전남대학교대학원 토목공학과 박사과정
3) 동신대학교 공과대학 토목공학과 교수
4) 정회원, 목포실업전문대학 토목과 교수

본 논문에 대한 토의를 1997년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면, 토의회답을 게재하겠습니다.

undergoing inelastic buckling, plastic elongation and/or their combination. It was seen as a result that the state of the ultimate failure is closely related to the maximum strain at the extreme fiber in the cross section.

핵심용어 : 강구조물, 손상모델식, 반복하중, 지진하중, 극저사이클 재하, 좌굴, 잔류변형을
KEYWORDS : steel structure, damage index, repeated loading, seismic loading, very low cycle loading, buckling, residual strain

1. 서론

지난 30여년 동안 강한지진과 같은 극심한 반복하중하에서 구조물과 그들 부재에 대한 손상도 평가에 관한 많은 연구가 수행되었다. 이러한 연구의 목적은 장대교량, 고층빌딩, 해저석유시추용 플랫폼 그리고 원자력발전소등 구조물이 대형화됨에 따라 이들 구조물들의 붕괴로 인한 인명피해는 물론 사회적, 경제적, 환경적으로 큰 손실을 예방하기 위한 것이었다. 구조물과 그들부재에 대한 정확한 내진 손상도평가 방법개발을 위한 많은 실험 및 수치해석적 연구가 실시되었지만 아직 결정적인 모델은 없는 상태이다. 그러므로 지진과 같은 극심한 반복하중에 대한 손상평가방법의 신뢰성을 높이기 위해서 손상과 파괴 메카니즘의 물리적 양상이 정확하게 고려된 새로운 손상도평가방법 개발이 필요하다.^{(1),(2)} 이를 위해 먼저 반복하중하에서 기존의 소성피로에 대한 연구의 문제점과 구조요소 레벨의 파괴 메카니즘을 정량적으로 분석하여 파괴규범을 구축하는 것이 필요하다. 일반적인 강재의 경우 저사이클 피로는 약 10,000사이클 이하의 반복을 대상으로 하는 소성피로를 의미하고 있으며, 이 용어는 탄성응력하의 고사이클 피로와 구별하기 위하여 사용되어 왔다.

본 연구에서 취급하는 반복하중수는 매우 적어서 이와같이 적은 반복하중에 의해 발생하는 피로를 극저사이클 피로라 하고, 적은 반복하중에 의해 일어나는 파괴를 극저사이클 피로파괴라고 부르기로 한다. 일반적으로 피로파괴라는 것은 거시적 변형을 수반하지 않고 균열이 진행되는 파괴를

말한다.^{(3)~(5)} 따라서, 본 연구에서 취급하는 것과 같은 큰 소성변형 영역에서의 반복재하에 의한 파괴를 일반적인 피로파괴로 부르기에는 많은 문제점이 있다.

강한 지진하중하에서 구조물의 탄·소성응답은 수백의 반복횟수를 셀 수 있지만, 그 중에서 구조물의 손상에 직접 관계되는 큰 소성변위응답은 그 수가 한정되어 있으며 최대 약 30회 정도이다.^{(1),(2)} 이와같은 적은 반복재하수 범위내에서 균열발생현상을 파악하기 위해서는 부재에서의 전체거동과 균열발생부의 국부변형을 동시에 취급하는 것이 필요하다. 그러나 이와같은 현상에 관련된 실험적·해석적 연구는 거의 취급되어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구의 주요 목적은 이와 같은 손상 과정을 해명하고, 지진시의 손상 평가법을 도출하기 위한 기초자료를 얻는데 있다. 또한 강부재가 큰 소성변형을 반복해서 받음에 따라 균열이 발생하고 파단에 이르는 파괴과정을 조사하고, 소성피로 손상과 파괴에 크게 영향을 주는 요인을 추출하여 구조적 파괴와 각 인자와의 정량적 관계를 파악하는 것이다.

2. 반복하중하에서 구조요소 및 부재의 소성피로 연구 문제점

본 연구는 지진시에 있어서 강구조 요소의 국부좌굴을 동반하는 균열 발생이라는 극한상태에 이르기까지의 과정을 대상으로 하였다. 반복재하하에서 대형구조물에 이용되는 기둥, 보 및 브레

이스등 강구조 부재의 지진시 복원력 특성을 조사하기 위해서 지금까지 많은 실험적 연구가 이루어져 왔으며, 그들 실험중에서 전체 좌굴이 국부좌굴을 동반하고 균열의 진전이 부재파단의 주 원인이 되는 현상이 관찰되었다. 또한 국부좌굴 발생 부분이 파단에 이르는 지진 재해의 사례도 보고되고 있다. 본 연구에서는 이와같은 파괴를 “극저사이클 (피로)파괴”라고 부르기로 한다. 일반적으로, 피로 또는 피로파괴는 변동하는 응력에 의해 생기는 파괴이고 다음과 같은 특성이 있다.^{(3)~(5)}

(1) 거시적 변형이 생기지 않고 균열만이 진행하고 파단면은 아주 매끄럽다.

(2) 응력범위 S 에 대한 파괴까지의 하중반복횟수 N 의 관계가 일반적인 $S-N$ 곡선 또는 뮐러 (*Wöhler*)곡선형태로 표시된다. 즉,

$$S = AN^{-m} \quad (1)$$

또는

$$S = a - b \log N \quad (2)$$

여기서 A, m, a, b 는 실험에 의해 구해지는 상수이다.

(3) 일정 크기의 S 에 대한 N 의 편차가 크다.

위의 특성들을 기준하여 보면, 본 연구에서 취급하고 있는 것과 같이 변형이 매우 큰 소성영역에서의 반복 재하에 의한 파괴를 일반적인 개념의 피로라고 부르는 것은 문제가 있음을 알 수 있다. 구조물이 파괴적인 지진 등에 의해 매우 심한 반복재하를 받는 경우, 그 구조물의 요소는 부분적으로 큰 소성변형을 반복해서 받게된다. 이때 하중반복횟수가 적어도 소성변형이 매우 크면 구조물은 파괴될 가능성이 있다. 구조물의 파괴·손상 형태는 일반적으로 응력·변형률등의 역학적 인자, 부식 등의 화학적 인자, 사용하는 재료특성과의 조합에 의해 변화한다.

강구조 레벨의 저사이클 피로문제는 브레이스

및 트러스부재와 같은 세장한 부재가 반복 축방향을 받는 경우 또는 H 형강과 같은 단면의 평판 부재 반복휨 또는 휨과 축력을 받는 경우에 종종 발생한다. 특히 부재의 반복 재하실험에서는 일단 좌굴하여 국소적으로 큰 소성변형을 받은 후, 인장·압축의 반복에 의해 매우 적은 사이클 수에서 파괴가 발생하는 현상이 관찰되었다.^{(6)~(10)} 따라서 강진시와 같은 수십회정도의 소성변형영역에서 반복에 의해 파단에 상응하는 큰 손상을 받을 가능성에 대해서도 주목할 필요가 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 반복에 의한 파괴 거동은 수회에서부터 20회 정도에서 파단에 이르는 “극저사이클” 피로파괴거동이다. 이와같은 파괴거동은 변위의 증가에 수반하여 균열이 발생·성장하는 연성파괴적인 양상을 보여 주고 있다. 일정 변위진폭하에서의 구조부재에 대한 반복 휨거동은 이력곡선이 정상상태가 되든지 열화하든지의 2종류로 크게 나눌 수 있다.^{(10)~(14)} 열화를 나타내는 경우는 국부 변형과 불안정 현상의 발생에 연관된 것으로서 정상상태로 되는 경우에 비해 보다 빨리 파괴에 도달하는 경우가 많다.⁽¹⁵⁾ 축방향 압축력이 존재하는 경우는 그 열화거동이 훨씬 빨라진다.⁽¹⁶⁾ 일반적으로 이들의 실험결과는 재하변형을 진폭과 파괴시의 반복횟수와와의 관계가 2축대수 그래프상에서 음의 기울기를 갖는 직선으로 표시되는 경우가 많다. 그러나 파괴상태의 정의는 각 연구자에 따라서 서로 다르고 아직 통일된 것이 없다. 실제 구조물에 작용하는 하중은 일정진폭이 아니고, 일반적으로 중간값과 진폭이 복잡하게 변화하는 불규칙 변동하중이다. 변동하중하의 피로강도는 하중 크기의 빈도 분포뿐만이 아니고 재하순서에 의해서도 변화한다. 그러나 일반적으로는 빈도 분포만을 고려한 일정진폭재하 시험결과에 근거하여 추정하는 선형피로손상누적법칙, 즉 Miner법칙⁽³⁾등이 널리 사용되고 있다. 이 관계는 재료레벨에서도 각 응력레벨의 반복수가 비교적 적고 응력변동 범위도 작은 주기적인 반복변동이 생기는 경우에는 성립한다. 그러나 반복횟수가 적은 경우에도

고·저 응력의 재하순서 등 하중패턴이 다름에 따라 누적된 피로손상의 정도가 다르다. 지진시에 있어서 구조물에 대한 대변형 재하하에서 피로수명 또는 누적된 손상을 평가하는 이론 및 해석방법은 많이 제안돼 왔지만 아직 정량적으로 확립된 이론 및 해석방법은 없다. 그 이유로서는 단순히 실험적인 현상 파악에만 치중한 연구가 주를 이루고 있고, 피로파괴기구 그 자체가 충분히 해명되지 않았으며 편차가 많은 현상으로서 엄밀하게 고찰하는 것이 곤란하기 때문이다.

3. 반복재하를 받는 강구조 요소의 소성 피로 파괴실험

3.1 실험목적

본 연구에서는 강구조 요소가 압축에 의해 일단 좌굴한 후 여기에 압축·인장의 반복가력을 받아서 파괴에 이르는 과정을 실험적으로 조사하였다. 강구조 부재의 극한 내진성능을 알아내기 위한 관점으로부터 피로파괴의 기구해명 및 구조물 손상도의 정량적인 파악을 목표로 극저사이클의 소성피로파괴에 연루된 요인을 추출하기 위해서 강판 요소를 대상으로 평판의 국부좌굴 현상까지 포함하여 본 실험적 연구를 시작하였다. 특히, 초기에 좌굴이 발생한 후 압축·인장의 반복에 의한 요소의 파괴과정을 명확하게 밝히는 것을 목적으로 하였다.

3.2 실험계획

1) 실험변수

본 실험의 목표는 강재의 극저사이클 소성피로 파괴 발생영역을 찾는 것과 그 파괴양상을 얻는 것이다. 시험체의 형상은 ① 파괴를 발생시키는 단면을 1곳으로 특정지우는 것, ② H형 단면의 플랜지부와 같은 강판의 국부좌굴과 비슷한 크기의 소성변형을 발생시키기 위해서 변형을 국부에

집중시키는 일, ③ 수회로부터 20회 정도의 반복 재하에서 균열을 생성시키고 파단에 이르게 하는 경우의 각종 재하패턴에 의한 요소의 손상, 파괴 과정을 조사하는 것 등을 목표로 선정하였다.

조건 ①을 위해 시험체 지지조건을 양단고정보다는 양단힌지를 선택했다. 조건 ②를 위해서는 시험체의 중앙부를 두께가 얇은판으로 가공 하였으며 상대적으로 두께가 두꺼운 중앙부 이외 부분은 강체에 가까운 거동을 하도록 하여 시험체 전체의 소성변형이 중앙에 집중되도록 하였다. 조건 ③에 보인것과 같은 지극히 적은 횟수에서의 피로 파단을 실현시키는 것에 대해서는 중앙시험부 길이를 변경시켜 적절한 변형영역을 갖도록 하였다. 이상의 이유로부터 여기서 채용한 실험변수는 시험체 형상과 재하패턴의 2가지이다.

2) 시험체

시험체는 그림 1과 같이 중앙시험부를 두께 6 mm의 얇은 직사각형 단면으로 제작하였으며, 중앙시험부의 길이 l 을 72 mm, 18 mm, 9 mm의 3종류로 하였다. 사용재료는 SS41강재로서 평판에서 절삭 후 610°C에서 3시간 열처리 하였다. 재료의 인장 시험 결과 상향복점 응력은 $304 N/mm^2$, 하향복점 응력 $283 N/mm^2$, 그리고 인장강도는 $424 N/mm^2$ 이었다. 시험체의 이름은 중앙시험부의 길이에 따라 72 mm, 18 mm, 9 mm 경우를 각각 L72, L18, L09로 나타내었다.

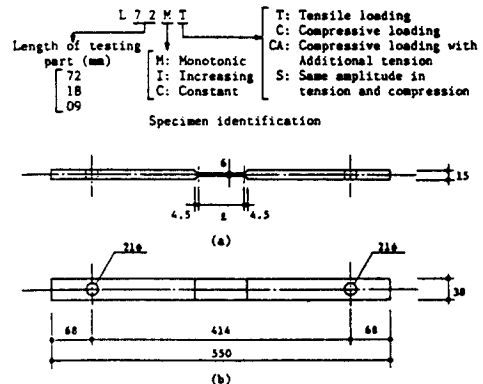


그림 1. 시험체(단위 : mm)

또한 여기에 2문자를 첨가하여 재하패턴을 표시하였다. MT 및 MC는 인장 및 압축영역에서 단조재하, IS는 진폭을 점차 증가시키면서 인장과 압축의 크기가 같도록 재하시킨 경우, CC 및 IC는 일정진폭 및 점증진폭으로 압축재하 시킨 경우를 의미한다. 마지막으로 A가 있는 경우는 부가적으로 인장재하를 실시한 것을 의미한다.

3) 재하장치 및 재하방법

실험은 유압식 가력기를 사용하였으며 Fig. 2는 재하실험 시스템을 보여주고 있다. 실험시스템에는 그림 3에 나타난 것과 같이 2대의 퍼스널 컴퓨터를 사용하였다. 1대는 프로그램에 의한 서보가력기 제어용으로 사용하였으며, 다른 1대는 계측용 기기의 제어 및 데이터 저장용으로 사용하였다. 2대의 퍼스널 컴퓨터를 RS-232C로 연결시켜 데이터 통신을 행하였다. 그림 4와 같이 양단 핀 지지 조건으로 시험체를 구속시키고, 축방향으로 인장·압축의 반복하중을 재하하였다.

본 실험의 재하장치에서는 시험체의 양단을 고정력볼트로 고정시키고 이후에도 하중의 편심량을 약간 조정하는 것이 가능하도록 베어링을 이용하여 회전중심위치에서 핀 지지 상태가 되도록 하였다. 압축력 작용시 축방향변위와 횡방향 변형량이 같은 정도의 값을 나타내고 특히 횡방향 변형량이 10 cm을 넘어서는 경우 변위계의 계측범위를 넘어서기 때문에 재하전에 미소한 편심을 주어 좌굴에 의한 변형방향을 미리 결정하였다. 재하패턴은 그림 5에 보인 것과 같이 시험체 지점사이의 축방향 상대변위 Δ 를 제어하는 정적인 일정속도 변위 제어방법을 사용하였다. 즉 그림 5의 시간 T와 Δ 의 관계에서 보인 것과 같은 (a) 단조재하, (b) 일정 변위진폭재하, (c) 계단형 점증변위진폭 재하의 3가지를 기본으로 하였으며, 또한 이들을 조합시킨 재하도 실시하였다. 각 시험체에 재하한 변위의 진폭 및 사이클 수()안의 숫자)를 표 1에 나타내었다. 표 1에서 축방향 변위의 범위는 Δ/l 의 백분율로 표시한 것이다. 이 실험시리즈에서 사용된

기본적인 재하속도는 0.048 mm/sec로서 0~7.2 mm의 사이를 한 번 왕복하는데 걸리는 시간은 약 5분 정도이다. 단순 인장시의 변형을 속도로 환산하면 L72시리즈에서는 0.067%/sec, L18시리즈에서는 0.27%/sec가 되어, 재료강도의 편차정도에 비해 동적 효과에 의한 강도상승이 거의 문제가 되지 않은 재하속도 영역이라 판단된다.

4) 계측방법

시험체의 축방향 변위 및 횡방향 변형은 비교적 신장량이 작은 유리섬유(Glass Fiber)로 된 실을 이용하여 그림 2와 같이 시험체와 가력장치의 기둥에 부착한 습동형 변위계를 연결시켜 계측하였다. 계측된 축방향 변위값은 서보 가력기의 Feed Back제어에 사용되었다. 시험자체가 큰 변형을 동반하고 있으므로 시험체가 파단하는 최종단계까지 연속적인 측정이 가능하도록 시험체 양단부에 활차를 그림 4와 같이 설치하고 실을 연결시켜 축방향 변위를 측정하였다.

표 1. 재하 패턴

Specimen No.	Time (s)	Amplitude Levels in axial displacement (mm)	Type of Failure
No. 1	1722	-100 -100	(12) W
	1722	-100 -100	
No. 2	1722	-100 -100	(12) W
	1722	-100 -100	
No. 3	1722	-100 -100	(12) W
	1722	-100 -100	
No. 4	1722	-100 -100	(12) W
	1722	-100 -100	
No. 5	1722	-100 -100	(12) W
	1722	-100 -100	
No. 6	1722	-100 -100	(12) W
	1722	-100 -100	
No. 7	1722	-100 -100	(12) W
	1722	-100 -100	
No. 8	1722	-100 -100	(12) W
	1722	-100 -100	
No. 9	1722	-100 -100	(12) W
	1722	-100 -100	
No. 10	1722	-100 -100	(12) W
	1722	-100 -100	
No. 11	1722	-100 -100	(12) W
	1722	-100 -100	

(Notes) () : No. of Cycles, W : Load 4.0 to end completely, - : Buckling Direction, W : Failure in Tension, C : Failure in Compression, W : In Failure.

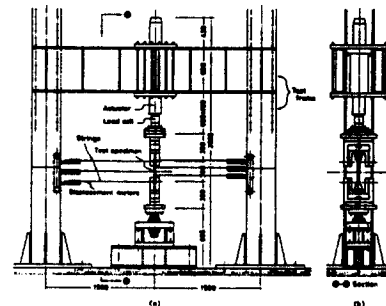


그림 2. 재하 및 측정 시스템(단위 mm)

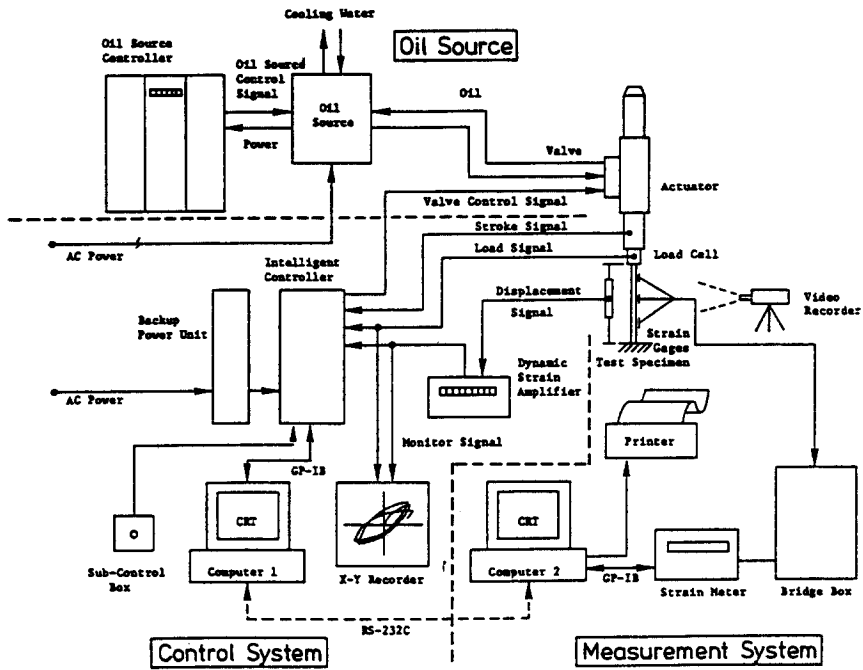


그림 3. 실험시스템

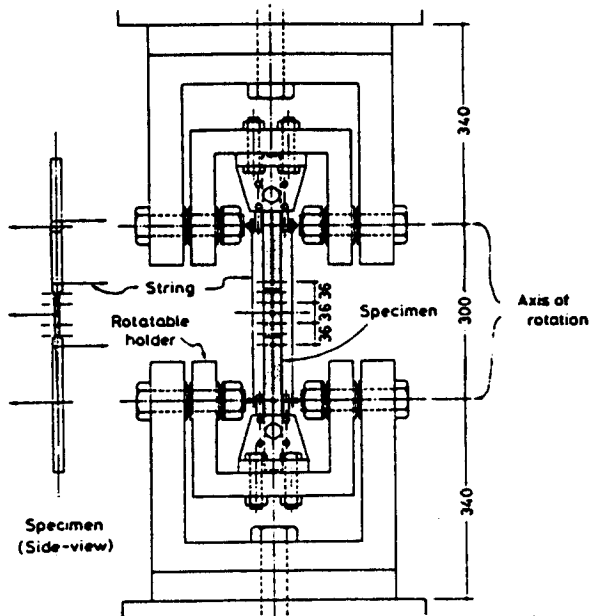


그림 4. 시험체의 실험부분 (단위 mm)

Δ : Axial displacement
 T : time
 $d\Delta/dT = 0.048 \text{ mm/sec}$

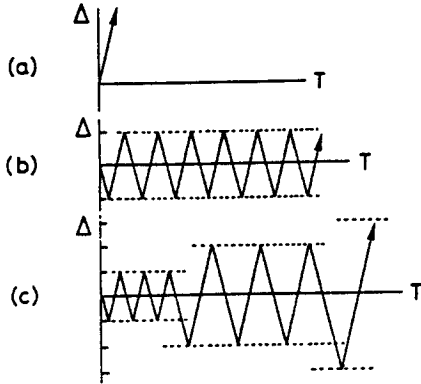


그림 5. 제하패턴

이와같은 시스템은 축방향 변위제어를 이용하기 때문에 어떠한 경우에도 제어 불능이 되지 않도록 하기 위한 목적으로도 사용하였다. 횡방향 변형량의 계측에는 시험체에 직접 실을 연결시키고 실의 고정위치가 미끄러지지 않도록 점성이 큰 고무로 접착하였다. 이러한 계측방법을 사용하여 소변형 영역에서 대변형 영역까지 거의 만족시킬 수 있는 계측결과가 얻어졌다. 시험체의 시험부 양면에는 길이 1 mm 및 2 mm의 스트레인 게이지를 그림 4에 표시한 위치에 부착하였다. 하중과 축방향 변위의 관계는 X-Y레코더로 실험중에 모니터 되었다(그림 3).

3.3 실험결과 및 고찰

1) 파괴 모드

시험체의 파괴모드는 2가지의 종류로 크게 나눌 수 있다. 하나는 인장파단형이고, 또 하나는 압축휨 반복파단형으로 이것이 극저사이클의 소성피로형 파괴라고 부르는 것이다. 시험체 No. 1(L72IS), No. 2(L72MT), No. 4(L72MCA)는 인장파단형 (Table 1에서 TF로 표시), No. 7(L18IC), No. 9(L18CCA), No. 10(L09IC), No. 11 (L09MC)은 압축휨의 극저사이클 피로형(Table 1에서 CF로 표시)이다. 본 실험에서 No. 3(L72CCA)은 시험부 길이가 긴 것

으로 상대변형각이 90° 이상이 되는 휨변형이 생겼지만 이 시험체만 파괴되지 않았다.

2) 하중-축방향 변위 관계

축방향 하중 P와 실험의 제어에 사용된 축방향 변위 Δ 의 관계는 실험에 사용된 전체 9개의 시험체에 대하여 그림 6~8에 각각 나타내었다. 하중은 인장 항복력 $N_y = 64.7 \text{ kN}$ 으로, 축방향 변위는 각 시험체의 시험부 길이 l로 나누어 각각 무차원화 하였다.

① 인장파단형 파괴

인장파단형 파괴는 보통의 인장재료시험과 같은 형태로 시험체가 똑바로 신장되어 Necking 현상이 생긴 후 파단에 이르는 것이다. 파단시 연신율이 보통의 SS41강재에 비해 약간 큰 것은 본 시험체의 평행부 길이가 재료시험규격에 지정되어있는 시험편의 형상에 비해 짧기 때문에 Necking에 의한 신장변형의 영향이 일반의 경우보다 큰 결과 때문으로 판단된다. 시험체 No. 1과 No. 2의 P- Δ 관계를 비교하여 그림 9에 나타내었다. 이것은 단조재하에 의한 곡선과 점중진폭 반복재하에 의한 각 진폭 제 1사이클의 포락곡선 및 파단점이 거의 일치하지 않고 있고, 파단시 연신율에서도 반복에 의한 효과가 보이지 않고 있다. 그러나 그림 6의 No. 3과 No. 4에서는 큰 압축소성변형의 영향 때문에 인장축 포락곡선의 변형을 경화시작점부터 최대 인장내력점까지의 곡선이 No. 1과 No. 2의 P- Δ 곡선과 다른 형태를 보여주고 있다. No. 4시험체에서는 파단시 연신율도 영향을 받아 파단이 빨리 생기고 있다. 이들은 재하이력의 차이가 하중-변위관계에 거의 영향을 미치지 않는 경우와 아주 심하게 영향을 주는 2가지 경우가 있음을 확실하게 보여주고 있다.

반복재하시의 인장축에서는 제 1사이클과 제 2사이클의 곡선형상에 있어서 큰 차이가 나타나 하중-변위 이력곡선의 면적으로부터 산정한 이력소비에너지량에도 영향을 주지만, 그림 9에 보인것

과같이 제 2사이클 이후는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 압축측에서는 시험체의 세장비에 의해서 좌굴강도가 많이 변하는 특성을 갖지만, 좌굴후는 각 진폭의 이력곡선에서 최대압축내력에 약간의 차가 보일 뿐 반복에 의한 차이는 없다고 말할 수 있다.

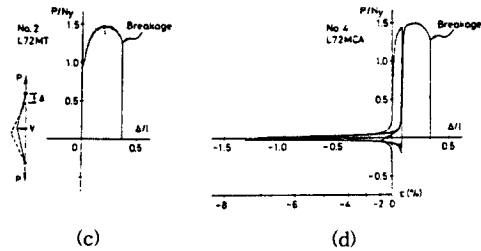
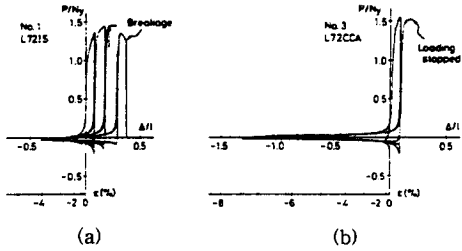


그림 6. 하중-축방향 변위관계(L72 시리즈)

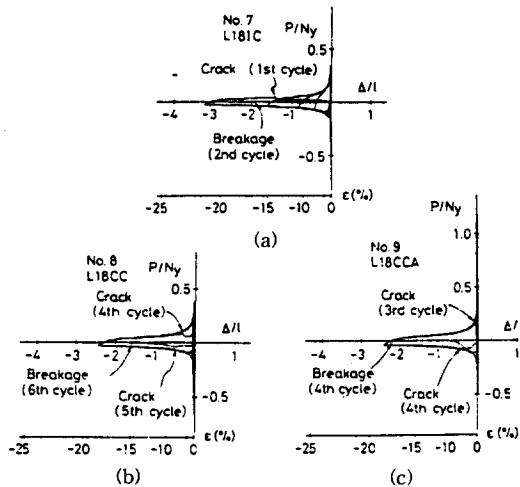


그림 7. 하중-축방향 변위관계(L18 시리즈)

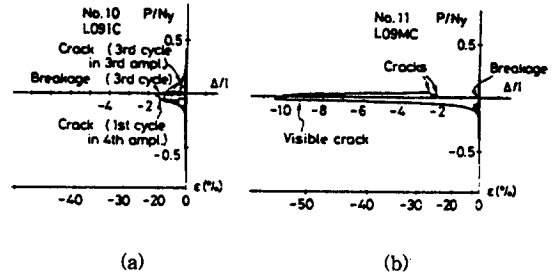


그림 8. 하중-축방향 변위관계(L09 시리즈)

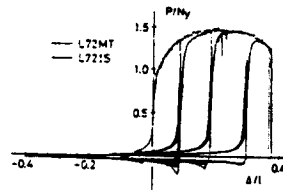


그림 9. 하중-축방향 관계

② 극저사이클 휨피로형 파괴

극저사이클 휨피로형의 파괴는 L18 및 L09시리즈의 시험체에서 발생하였다. 압축하중은 재하초기에 발생하는 좌굴후 항복내력의 10% 또는 그 이하의 값을 나타냈고 시험체에는 거의 휨만이 부하된 상태가 되었다. 그러나 작은 압축력이 작용해도 응력에는 영향을 미쳐 중앙 시험부의 휨인장축보다는 휨압축축이 약간 더 심한 응력을 받고 있는 현상이 나타났으며, 모든 시험체에서 축방향 변위가 최대압축점으로 부터 되돌아오는 도중에 오목한측 부분이 인장될 때 큰 소리와 함께 균열 발생에 의한 부재내력의 급격한 저하가 발생되었다. 그후 계속된 압축방향의 가력에서 볼록한측 부분에 큰 균열이 발생되고, 부재 중앙단면은 양측에서 균열손상을 받아 사실상 축방향력이 상실되는 결과를 얻었다. 본 시험체의 경우 큰 압축변형을 가할 때 휨인장축에서는 포아송 효과에 의한 것으로 볼 수 있는 축방향 신장에 연루된 폭방향의 가늘어짐이 나타났으며, 역으로 휨압축축에서는 폭방향으로 넓어져 전체로서는 안장형 곡면의 변형현상을 나타냈다. 이러한 요인으로 인해 변형

을 분포가 단면 폭방향으로 일정하지 않았으며, 이러한 요인이 균열발생과도 연관이 있을 것으로 판단된다. 급격한 내력저하는 균열이 시험부 폭방향 전체에 나타났을 때 일어났으며 동시에 큰 소리를 발생시켰다.

인장변위를 주지않고 압축변위 영역에서만 반복재하를 행한 시험체 No. 7에서는 Fig. 7에 보인 것과 같이 제 4변위진폭하의 제 1사이클에서 변위가 꺾어져 돌아오는 도중 휨압축축이 잡아당겨질 때에 큰 소리와 함께 균열이 발생되면서 인장내력이 급격히 떨어졌다. 그후 축방향변위를 영(zero)으로 되돌리고 다시 압축방향으로 가력하였을때 내력이 거의 상실되어 균열이 나타나기까지 파괴전의 현저한 정후도 없이 재하도중에 갑자기 파단되었다.

No. 8은 압축 변위영역에서 일정변위 반복재하를 행한 것이고, No. 9는 약간 인장소성변형을 포함시켜 No. 8과 같은 압축변위까지 반복재하를 실시한 것이다. 각각의 재료적인 편차에 의한 시험 결과의 차는 당연히 있을 것으로 생각되지만, 두 시험체의 비교에서는 심한 응력이력을 받은 No. 9의 쪽이 빨리 균열 및 파단에 이르렀다. 시험부 길이가 가장 짧은 No. 10과 No. 11의 경우 No. 10에는 No. 7에 상당하는 것과 같은 점중압축변위 영역에서 반복재하를 그리고 No. 11에는 압축단조 재하에 필적하는 매우 큰 압축휨 소성변형을 가하였다. 주목할 것은 No. 11로 시험부 길이 10배에 해당하는 변위까지 한방향으로 압축재하를 행함에 의해 눈에 보이는 균열을 발생시켰지만 내력의 급격한 저하는 발생하지 않았다. 이것으로부터 압축 변형관계를 정의하는 것이 어렵다는 것을 알 수 있다. 이 경우에도 변위를 되돌려 인장력을 작용시키는 과정에서 최종적인 구조파괴라고 부르는 상태에 도달했다.

4) 하중-변형을 관계

스트레인 게이지의 계측결과로부터 시험부재의 두꺼운 부분은 모든 재하과정을 통해 탄성거동을 보임이 확인되었다. 시험체의 변형상태 관찰에

근거하여 중앙 시험부는 같은 곡률의 휨 변형이 일어나고 그외의 두꺼운 부분은 강체거동을 한다고 가정하여 시험체의 중앙시험부에 대해서 단면 최외측 연단변형을 ϵ 의 크기를 계산하여 그림 6~8의 횡축에 대응시켜 나타냈다. 그림 10에 보인 것과같이 시험체의 전체길이를 L , 중앙시험부 길이 l 부분의 두께를 t , 양단 두꺼운 부분의 길이를 $2x$ 로 놓는다. 이때 횡방향 변형각을 θ 로 하면 중앙부의 곡률은 $2\theta/l$ 가 되고 최외측연단변형을 ϵ , 축방향 변위 Δ 및 중앙 휨변형량 v 는 기하학적 관계로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \pm t\theta/l \quad (3)$$

$$\Delta = L(1 - \frac{l}{L} \frac{\sin\theta}{\theta} - \frac{2x}{L} \cos\theta) \quad (4)$$

$$v = x(\sin\theta + \frac{l}{2x} \frac{(1 - \cos\theta)}{\theta}) \quad (5)$$

윗식에 의하면 본 실험의 경우 시험체 L72시리즈에서는 최대 압축변위를 주었을 때에도 7.5%의 변형율이 생기는 정도이고 휨압축재하에 의한 파괴는 발생하지 않았다. 이에비해 피로파괴가 발생한 L18 및 L09시리즈에서는 변형률 값이 15-20%가 되어 큰 변형이 발생됨을 알 수 있다. 변형률 20%는 보통 SS41강재의 파단변형률 정도이고, 재료특성으로서의 파단 변형률과의 상관성이 유추될 수 있다. 물론 단면의 변형률 구배로 인해 표층으로부터 조금 안쪽으로 들어가면 변형률 값이 급격히 변하기 때문에 연단변형률값과 균열 및 파단과 직접적으로 연관시키는데는 많은 어려움이 있다.

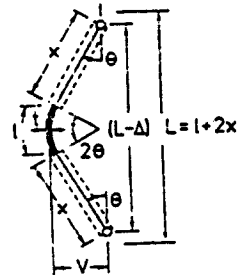


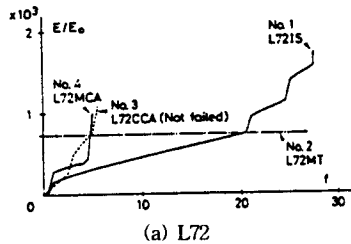
그림 10. 국소 변형 계산을 위한 모델

또 반복효과가 어느 정도 영향을 주었는지도 정확히 알 수 없다. 그러나 20%정도의 연단변형율에서 설정한 재하에 의해서 극저사이클 피로파괴를 실현시킨 것이 본 실험에서 얻은 중요한 성과이다. 이러한 소성파괴 과정을 명확하게 밝히기 위해서는 수치해석적 연구를 통하여 국부변형을 이력을 조사하는 것이 꼭 필요하다.

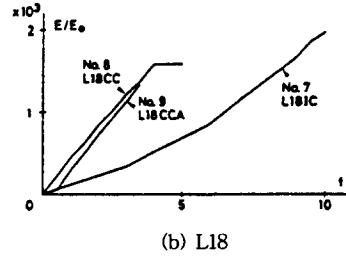
5) 이력소비에너지

각 시험체 하중-변위 이력곡선의 면적으로부터 산정한 누적이력소비에너지 E 와 반복횟수 f 와의 관계를 그림 11에 나타내었다. 그림의 종축에는 누적소비에너지 E 를 시험부에 축적되는 최대 탄성변형률에너지 E_0 로 무차원화하여 표시하였다. Fig. 11(a)에서 일점쇄선은 No. 2에 의한 단조재하 파단시의 이력소비에너지를 의미한다. 시험체 No. 1, 3, 4에서 누적에너지의 급격한 상승은 각 진폭의 제 1사이클에서 인장축 이력에 의한 영향이 크기 때문에 생긴 것이다. 반복재하시의 인장 파단점에서 에너지량이 단조재하시의 것에 비해 큰 것은 손상평가를 행할 때 반복효과의 고려가 필요함을 보여주고 있다. 또 파단에 도달하지 않은 No. 3의 경우가 No. 4의 파단점에서 이력소비에너지 보다도 큰 것으로부터 재하이력의 영향도 고려해야 함을 알 수 있다.

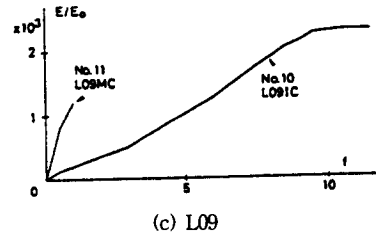
압축변위 영역에서만 재하를 실시하여 파단한 시험체의 경우(그림 11(b), (c)) 각 사이클당 이력소비에너지는 큰 변동이 없이 거의 일정하게 증가하였으며 누적에너지량을 보아도 파괴전에 현저한 징후를 찾을 수 없었다.



(a) L72



(b) L18



(c) L09

그림 11. 하중 반복 횟수와 소비에너지

이력소비에너지량이 구조체의 파괴에 관계가 있을 것으로 추정되었으나 이 연구의 실험결과에서는 직접적인 관계를 찾아보기 어려웠다. 그러나 하중-변위관계에 있어서 균열발생과 동시에 급격히 내력이 감소된 것으로부터, 하중-변위관계, 이력소비에너지량 및 재하이력을 잘 조합시킬 경우 손상평가 또는 파괴시기 예측에 도움을 줄 수 있는 것으로 판단되며 이후 연구가 요구된다.

4. 결 론

본 연구결과 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 지진과 같은 극심한 반복하중하에서 소성피로에 대해 새로운 극저사이클 피로파괴 개념이 도입되었다.
- 2) 실험적 연구에 의해 10회 정도의 극저사이클에서 피로파괴를 발생시킬 수 있다고 생각되는 영역을 연단변형율이 20%정도 되도록 설정한 재하에 의해서 실현하였다.
- 3) 이력소비에너지량은 구조체의 파괴에 대하여 직접적인 관계가 있을 것으로 추정되었으나 이

연구에서는 단순하게 직접적으로 관계를 지우는 것이 매우 어려운 것으로 나타났다.

4) 파단점에 이르기까지의 반복재하에 의한 누적이력소비에너지량은 단조재하에 비해 크고, 손상 및 파괴에 대한 반복효과로서 고려할 필요성이 있음을 보여주고 있다. 즉, 이력소비에너지량과 재하이력의 지표를 조합하여 사용한 손상평가 및 파괴시기의 예측방법의 가능성에 대하여 앞으로 연구가 요구된다.

5) 인장변위를 주지않고 압축변위 영역에서만 반복재하를 실시하여 파단에 이른 시험체에서는 각 사이클의 소비에너지량과 그 누적량에서 파괴시 현저한 정후가 나타나지 않았지만, 하중-변위 거동에 있어서는 균열발생과 함께 급격한 내력감소가 나타났다.

감사의 글

이 논문은 1995년도 전남대학교 학술연구비(신진연구) 지원에 의하여 연구된 것으로, 지원에 감사드린다.

참 고 문 헌

- (1) Y.-S., Park, 1993, "Damage Process of Steel Members under Very-Low-Cycle Loading", Thesis of Doctor of Engineering, Kyoto University, Japan.
- (2) Y.-S., Park, S., Iwai, H., Kamada and T., Nonaka, 1996, "Very-Low-Cycle Failure Process of Steel Angle Members", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 2, pp. 133-141.
- (3) Miner, M. A., 1945, "Cumulative in Fatigue, Jour. Applied Mechanics", ASME, Vol. 12, pp. A159-A16.
- (4) Rolfe. S. T., and Barsom, J. M., 1977, "Fracture and Fatigue Control in Structure (application of fractural mechanics)", Prentice-Hall, Inc., New York.
- (5) Yokobori, T., 1966, "Strength Material",

Gihodo Book Co., Tokyo, Japan.

- (6) Aslani, F., and Goel, S. C., 1991, "Stitch Spacing and Local Buckling in Seismic-Resistant Double-Angle Braces", J. Struct. Engrg., ASCE, Vol. 117(8), pp. 2442-2463.
- (7) Bertero, V. V., Popov, E. P., and Krawinkler, H., "Beam-Column Subassemblages Under Repeated Loading", 1972, J. Struct. Div., ASCE. Vol. 98(5), pp. 1137-1159.
- (8) Black., R. G., Billwenger., W. A., and Popov, E. P., 1980, "Inelastic Buckling of Steel Struts under Cyclic Load Reversals" Rep. No. UCB/EERC-80/40, University of California, Berkeley.
- (9) Goto., H., Kameda, H., Koike, T., Izunami, R., Wakita, K. and Sugihara, Y., 1974, "A Consideration on Failure Process of Structural Steel under Repeated Flexural Loads", Annuals of Disarter Prvcnriion Res. Inst., Kyoto, Japan, Vol. 17B, pp. 157-169, 1974, (in Japanese).
- (10) Kaneta, K., Kohzu, I. and Nishizawa, 1984, "Cumulative Damage of Welded Beam-to-Column Connections in Steel Structures subjected to Destrucive Earthquakes", Proc. 8th World Conf. Earthq. Eng., San Francisco, Vol. 6, pp. 185-192.
- (11) Tanabashi, R., Yokoo, Y., Wakabayashi, T., Nakamura, M., Kunieda, H., Matsunara, H. and Kubot, T., 1970a, "Load-Deflection Behaviors and Plastic Fatigue of Wide-Flange Beams Subjected to Alternating Plastic Bending Part I Experimental Investigation", Trans. AIJ, No. 175, pp. 17-29.
- (12) Tanabashi, R., Yokoo, Y., Nakamura, T., Kubota, T. and Yamamoto, A., 1970b, "Load-Deflection Behaviors and Plastic Fatigue of Wide-Flange Beams Subjected to Alternating Plastic Bending Part II Hysteretic and Skeleton Stress-Strain Relations and Plastic Fatigue of Flange", Trans. AIJ, No. 176, pp. 25-36.
- (13) Tanabasi, R., Yokoo, Y., and Nakamura, T., 1970c. "Load-Deflection Behavior and Plastic Fatigue of Wide-Flange Beams Subjected to

Alternating Plastic Bending Part III Steady-State Theory", Trans. AIJ, No. 177, pp. 35-46.

- (14) Krawinkler, H., Zohrei, M., 1983, "Cumulative Damage in Steel Structures Subjected to Earthquake Ground Motions", Computers and Structure, Vol. 16, No.1-4, pp. 531-541.
- (15) Neale, K., Schroeder, J., 1969, "Instability under Cycles of Plastic Deformation", Instability of Continuous Systems (IUTM Symposium Herrenalb [Germany], Edited by Leipholz, H.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 329-333.

- (16) Yamada, M., 1969, "Low Cycle Fatigue Fracture Limit of Various Kinds of Structural Members Subjected to Alternately Reported Bending under Axial Compression as an Evaluation Basis or Design Criteria for Seismic Capacity", Proc. 4th World Conf. Earthq. Eng., Santiago, Vol. I, B2, pp. 137-151.

(접수일자 : 1997. 4. 21)