

# 반복재하를 받는 각형강관기둥의 손상에 관한 연구

A Study on the Damage of Steel Square Tubular Columns under Cyclic Loading

박연수<sup>1)</sup> · 전동호<sup>2)</sup> · 서병철<sup>3)</sup> · 김욱<sup>4)</sup> · 최동호<sup>5)</sup>

Park, Yeon Soo · Jeon, Dong Ho · Suh, Byoung Chal · Kim, Wook · Choi, Dong Ho

**요약** : 본 연구에서는 강부재에서의 손상지수를 제시하여 반복하중재하를 받는 각형강관 기둥의 파괴에 이르는 과정을 손상지수를 이용하여 규명하였다. 이를 위해 유한요소 프로그램을 이용하여 비선형 해석을 수행하였고 이에 대한 손상과정을 비교·분석하였다. 재료시험을 실시하여 재료물성치와 강종별 변형률특성을 구하였으며 이를 바탕으로 강종과 하중재하조건의 변수를 주어 이 인자들이 부재의 손상에 미치는 영향을 비교하였다. 각 변수에 따른 변형률 특성과 누적소성변형률 이력곡선을 바탕으로 하중조건과 강종이 손상에 미치는 영향을 정량적으로 파악할 수 있었다.

**ABSTRACT** : This study proposed a damage index for steel members and examined a process where steel square tubular columns under cycle loading failed to meet the damage index. A nonlinear analysis was carried out and a damage process analyzed using a finite element program. Material properties and strain characteristics were obtained from material testing. The effect on the damage of members was analyzed according to varying kinds of steels and conditions of loading based on material testing results. According to strain characteristics and cumulative plastic strain of each variable, the effect of conditions of loading and kinds of steels on the damage could be estimated quantitatively.

**핵심용어** : 손상지수, 소성변형률, 누적소성변형률, 국소변형률

**KEYWORDS** : damage index, plastic strain, cumulative plastic strain, local strain

## 1. 서론

최근 국외는 물론 국내에서도 지진의 발생빈도가 높아져가고 있다. '87년 11회, '90년 15회'에서 '94년 25회'로 늘어났고 지난 '99년 한해에는 국내에서 기록된 규모 2.0이상의 지진이 40여 차례에 이른다. 이와 같은 지진의 발생에 대해 우리나라도 지진에 대한 안전지대가 아니라는 위기의식이 커지면서 국가 기반시설물이나 구조물들의 안전성을 확보하기 위한 방법으로 내진 설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 대형 토목구조물에 이용되고 있는 기둥, 보 및 브레이싱 등의 강구조부재의 지진시 반복재하의 복원력특성을 조사하기 위해 지금까지 많은 실험적 연구가 행하여졌으며 그 결과 국부좌굴을 수반하여 전체좌굴이 발생하였고, 국부좌굴에 의해 발생된 소

성변형에 의해 균열이 발생하고 나아가 부재 파단의 원인이 되는 것으로 나타났다.

이와 같이 지진하중과 같은 반복재하 하에서 균열발생 현상을 파악하기 위해서는 부재 레벨에서의 전체거동과 그 중에서 균열발생 부분의 국소거동을 동시에 취급할 필요가 있다. 그러나 이와 같은 현상에 관련된 연구는 아직 거의 전체거동과 국소거동이 연결되지 않은 현상이다. 본 연구의 주요 목적은 이와 같은 손상과정을 해명하고, 지진시의 손상 평가법을 도출하기 위한 기초 자료를 얻는 것이다.

이를 위하여 강부재가 큰 소성변형률을 반복해서 받음에 따라 파괴에 이르는 손상과정을 규명하고 이에 영향을 미치는 인자를 추출하여 분석한 후 이를 바탕으로 강부재의 손상을 예측할 수 있는 새로운 손상지수식을 제안하였다.

1) 정희원, 전남대학교 토목공학과 교수, 공학박사  
(Tel.062)530-1657, Fax.062)530-0177, E-mail:parkys@chonnam.ac.kr)

2) 전남대학교 토목공학과 박사과정(jeondho@hanmail.net)

3) 전남대학교 토목공학과 박사과정(suh-bc@hanmail.net)

4) 전남대학교 토목공학과 석사과정(wook0504@hotmail.com)

5) 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수, 공학박사(samga@hanyang.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

또한 재료 및 기하학적 비선형이 고려된 유한요소법을 사용하여 강부재에 대하여 하중재하 방법 및 강종을 변수로 하여 소성역에 있어서 변형 형상, 응력-변형률 이력 및 부재의 내력을 조사하여 분석하였다.

## 2. 손상도 평가

### 2.1 반복하중하에서 구조 부재중 소성부재의 피로연구 문제점

토목·건축구조물에 이용하고 있는 기둥, 보 및 브레이싱등 강구조 부재의 지진시 반복 재하하에서 복원력 특성을 조사하기 위해서 지금까지 많은 실험적 연구가 행하여져 왔으며, 그들 실험중에서 전체 좌굴이 국부좌굴을 동반하고 균열의 진전이 부재파단의 주 원인이 되는 현상이 관찰되었다. 또한 강부재에 국부좌굴 발생부분이 파단에 이르는 지진 재해의 예도 보고되고 있다.

이런 파괴는 일반적으로, 변동하는 응력에 의해 생기는 파괴이고, 다음과 같은 특징이 있다.

첫 번째로, 거시적 변형이 생기지 않고 균열만이 진행하고 파면이 아주 매끄러우며, 두 번째로 응력진폭 S에 대한 파괴까지의 반복수 N의 관계가 일반적인 S-N 곡선 또는 뮐러(wöhler)곡선 형태는 다음과 같이 표시된다.

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

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

여기서 A, m, a, b는 정수이다.

세 번째 특징은 일정 크기의 S에 대한 N의 편차가 크다는 것이다.

따라서 소성 대 변형영역에서의 반복 재하에 의한 파괴를 피로라고 부르는 것은 문제가 있다.

강한 지진하중하에서 구조물 탄소성 응답의 경우 반복수는 수백 회까지 셀 수 있지만, 그 중에서 구조물의 손상에 직접 관계되는 소성변위 응답의 수는 크지 않다.

이와 같이 아주 적은 반복수의 범위 내에서 균열발생 현상을 파악하기 위해서는 부재 레벨에서의 전체거동과 그 중에서 균열발생 부분의 국소거동을 동시에 취급할 필요가 있다.

구조물의 파괴·손상 형태는 일반적으로 응력·변형률 등의 역학적 인자, 부식 등의 화학적 인자, 사용하는 재료의 특성과의 조합에 의해 변화한다. 구조물에서 문제가 되는 파괴로서는 재료 중에 무엇인가의 요인이 잠재하다가 또는 성장한 마이크로 또는 마이크로한 결함과 균열로부터 순간적으로 파괴

를 유발시키는 취성파괴, 하중 또는 변위의 증가에 동반하여 안정한 균열이 발생·성장하고 최종적으로는 급속한 소성 불안정 파괴에 이르는 연성파괴, 반복하중에 의한 피로파괴, 기타의 응력부식파괴 그리고 크리프 파괴 등이 있다.

재료 레벨에 있어서 반복하중에 대한 피로강도는 잘 알려진 S-N 곡선을 사용하여 나타낼 수 있다. 이것은 재료, 열처리 조건 등의 내적 조건뿐만이 아니고, 부하양식, 결함, 치수, 표면처리상태, 환경 등의 외적조건에 의해서도 변하는 등, 이것에 영향을 주는 인자는 매우 다양하고 복잡한 거동을 보인다. 일반 연강의 경우 수명이 104회 이하인 피로를 저사이클 피로 또는 소성피로라고 부른다. 이 경우 수명의 평가는 변형률을 기준으로서 행하는 것이 보통이다.

강구조 레벨의 저사이클 피로문제는 브레이스 부재 및 트러스부재와 같은 세장한 부재가 반복 축방향력을 받는 경우 또는 H형강과 같은 박판 단면재의 플레이트 부가 반복휨 또는 휨과 축력을 받는 경우에 종종 생긴다. 반복 재하실험에서는 일단 좌굴하여 국소적으로 큰 소성변형을 받은 후, 인장 압축의 반복에 의해 매우 적은 사이클 수에서 파괴가 발생하는 현상이 관찰되었다. 따라서 강진시와 같은 수십회 정도의 소성변형영역에서 반복에 의해 파단에 상응하는 큰 손상을 받을 가능성에 대해서도 주목할 필요가 있다.

구조 부재를 사용한 지금까지의 연구성과에서는 주로 수십~수백 또는 그 이상 사이클의 반복재하에 의한 파괴를 대상으로 하는 것은 거의 없다. 구조부재가 일정 변위진폭하의 반복 휨거동은 이력루프가 정상상태가 되든지 열화하든지의 2 종류로 크게 나눌 수 있다 (Tanabashi, 1970). 열화를 나타내는 경우는 국부변형과 불안정 현상의 발생에 연관된 것으로서 정상상태로 되는 경우에 비해 보다 빨리 파괴에 도달하는 경우가 많다. 축방향 압축력이 존재하는 경우는 그 열화거동이 훨씬 빨라진다(Yamada, 1969). 이들의 실험결과는 일반적으로 재하변위진폭과 파괴시의 반복 수와의 관계가 양대수 그래프상에서 마이너스 기울기를 갖는 직선으로 표시되는 것이 많다.

그러나 파괴상태의 정의는 각 연구자에 따라서 서로 다르고 아직 통일된 것이 없다. 실제 구조물에 적용하는 하중은 일정진폭이 아니고 일반적으로 평균과 진폭이 복잡하게 변화하는 불규칙 변동하중이다. 변동하중하의 피로 강도는 하중 크기의 빈도뿐만이 아니고 재하순서에 의해서도 변화한다.

지진 시에 있어서 구조물에 대한 비정상 재하하에서 피로 수명 또는 누적된 손상을 평가하는 이론 및 해석방법은 많이 제안돼 왔지만 아직 정량적으로 확립된 것은 없다.

그 이유로서는 단순히 실험적인 현상 파악에만 치중한 연구가 주를 이루고 있고, 피로파괴기구 그 자체가 충분히 해명

되지 않았으며 편차가 많은 현상으로서 엄밀하게 고찰하는 것이 곤란하기 때문이다.

## 2.2 반복 재하하에서 강구조물에 대한 손상도 평가

여기서 사용한 손상평가식은 박연수(Park, 1993)가 제시한 것으로 내용은 다음과 같다.

심한 반복하중하에서 강구조 부재에 대한 새로운 손상도 평가 방법을 다음과 같이 제시할 수 있다. 먼저 각 사이클당 누적 소성변형률을 계산한 후 이것을 단순 인장재료시험의 파단 부에 있어서 국소 변형률의 한계치와 비교 한다. 즉 파괴상태는 응력집중이 가장 심한 단면에서 누적소성변형률이 한계 변형률의 90%에 도달했을 때를 의미한다.

따라서 강한 지진하중과 같은 반복가력하에서 손상지수는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{If } \sum_{i=1}^n \epsilon_i \geq \epsilon_{lim}, \text{ then failure state} \quad (3)$$

$$\text{If } \sum_{i=1}^n \epsilon_i < \epsilon_{lim}, \text{ then no failure} \quad (4)$$

여기서  $N$ ,  $\epsilon_i$ ,  $\epsilon_{lim}$ 는 사이클수, 사이클에서에서 압축응력이 할당되는 영역에 있어서 응력집중부 요소의 국소변형률, 한계 국소변형률을 각각 나타낸다. 이번 연구에서의 경우 극저사이클 재하하에서 한계국소변형률을 관찰한 결과 SS400의 경우 120%, 고강도강인 Posten 80의 경우 100%를 나타냈다.

따라서 N사이클까지의 강구조 부재에 대한 손상도 D는 다음과 같이 정규화하여 평가될 수 있다. 즉

$$D = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\epsilon_i}{\epsilon_{lim}} \right) \quad (5)$$

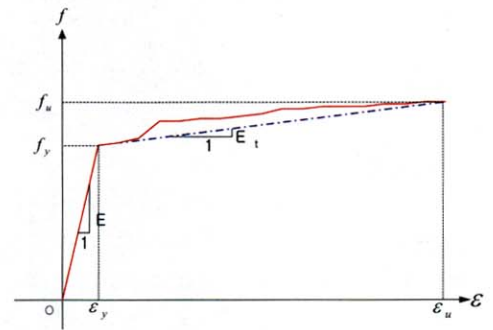
그러므로  $D \geq 1$ 은 대응되는 하중단계에서 파괴상태를 나타

내고, 반면에  $D < 1$ 은 파괴상태는 아니지만 어느 정도 손상을 입었는가를 수치적으로 보여준다.

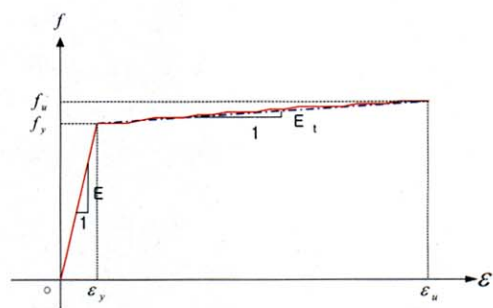
## 3. 유한요소해석을 통한 손상도 평가

### 3.1 재료시험 및 해석시 가정

재료특성을 얻기 위해서 인장시험을 실시하여 응력-변형률 곡선을 얻었다. 이 곡선으로부터 비례한도·탄성한도, 항복점·내력·탄성계수·인장강도 등의 기계적 성질을 확인할 수 있었으며 파단후의 시험편의 형상·치수에 의거하여 연신율·단면수축율을 산출할 수 있었다. 일반적으로 부재이력거동의 해석정밀도에는 재료 구성층의 영향이 크고, 변형률 경화영역에 들어가는 해석에는 재료구성층의 정밀한 모델링이 필수적이다.



(a) SS400



(b) Posten80

그림 1. Strain-Stress Relation

표 1. Material Property

시험체명	$F_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$F_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E_t/E$	Material Type
US40-*	3478	3751	1792.35	1987301.71	$9.02 \times 10^{-4}$	SS400
US80-*	6694	6889	3630.45	2018831.12	$1.80 \times 10^{-3}$	Posten80

Note :  $\nu = 0.3$ , \* = 부속 명칭을 모두 포함



본 연구에서 사용한 재료특성으로서 그림 1에서처럼 실제 실험값을 Bilinear형태로 이상화하여 이동경화형의 변형률 곡선의 기울기 Et와 영계수 E와의 관계, 항복공칭응력-변형률관계를 사용하였다. 소성영역에 대한 일축응력-응력, 영계수, 포아송비  $\nu$ 는 Table. 1에 명시하였으며 항복조건은 Von Mises 항복조건을 이용하였다.

일반적으로 부재이력거동의 해석정밀도에는 재료 구성층의 영향이 크고, 변형률 경화영역에 들어가는 해석에는 재료 구성층의 정밀한 모델링이 필수적이다.

본 연구에서는 변형률 영역에서 강재의 반복응력-변형률 관계를 조사한 것으로서, 이로 인한 손상지수를 활용한 해석 기법을 개발하기 위하여 Bilinear 응력-변형률의 재료 구성 관계를 사용하였다. 또한 본 연구에서는 소성영역에 대한 재료의 성질을 bilinear kinematic hardening으로 가정하여 해석적으로 접근하였다. 그러므로 소성영역에서의 응력-변형률의 관계가 지수식이 아닌 선형으로 표시가 가능하기 때문에 손상정도를 쉽게 알 수가 있다.

본 논문에서 제시하는 손상지수를 적용시키기 위해 다음과 같은 재료의 특성가정을 한다. 이는 이상적으로 완벽한 탄소성 거동을 나타낸다.

- ① 상위항복점을 무시한다. - 대다수의 강부재들이 실제 상위항복점을 갖지 않으므로 타당한 가정이라 볼 수 있다.
- ② 변형도 경화역을 무시한다. - 대개의 강부재들은 파단에 이를 때 즈음에 변형도경화역을 나타내므로 이러한 가정으로 인한 오차가 있게 된다. 그러나 응력-변형률곡선에서 볼 수 있듯이 그 기울기가 작고 또 변형도 경화역에서 강도가 증가하므로, 이를 무시하게 되면 안전하다. 또한 오차가 있지만 그 정도가 경미하다.
- ③ Bauschinger 효과를 무시한다. - 이 역시 오차가 경미하여 고려하지 않아도 무방하다.

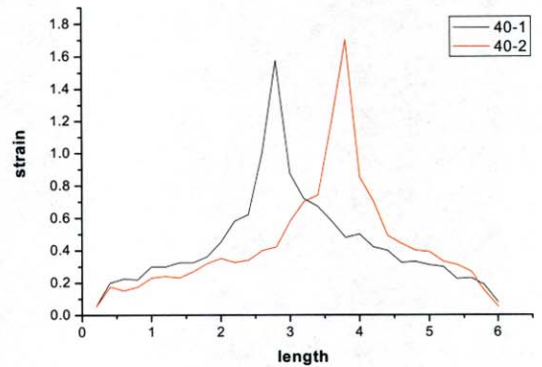
보다 정밀한 해석을 위해서는 등방경화가 포함된 이력 구성층의 모델링이 필요하다고 사료된다.

그림 2는 인장실험에서 파단이 일어난 후의 변형률을 나타낸 것이다. 일반구조용 압연강재인 SS400의 경우 파단부에서의 변형률은 최대150%였고 고강도강인 Posten 80의 경우 최대 130%였다. 변형률 분포를 보면 Posten80의 경우 파단부에 변형률이 집중되는 것을 볼 수 있으나 SS400의 경우는 길이 방향으로 완만한 변형률 분포를 보인다.

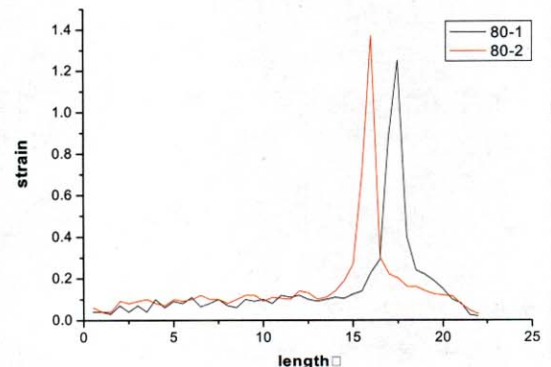
### 3.2 해석을 위한 유한요소 모델링

본 연구에서 제안한 손상지수와 심한 반복하중하에서 강부재의 해석기법을 개발하기 위하여 Box형 강부재를 이용하

여 재료 및 기하학적 비선형 해석을 실시하였다. 여기서 해석 대상으로 사용한 것은 반복재하에 의해 전체좌굴이 발생하고 동시에 국부좌굴변형을 동반한 후 큰 소성변형을 하는 Box형 강부재이다. 이와 같은 탄·소성거동은 재료 비선형 및 기하학적 비선형을 고려한 유한요소법을 적용함에 의해서 추적 가능하다. 본 해석에서는 구조해석 프로그램인 MSC/NASTRAN Version 70.7.2의 Sol106(재료 및 기하학적 비선형해석)을 이용하였다.



(a) SS400



(b) Posten80

그림 2. Strain Distributions in Test Pieces

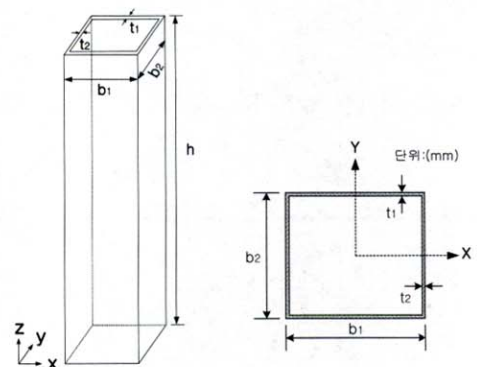


그림 3. Model for Analysis

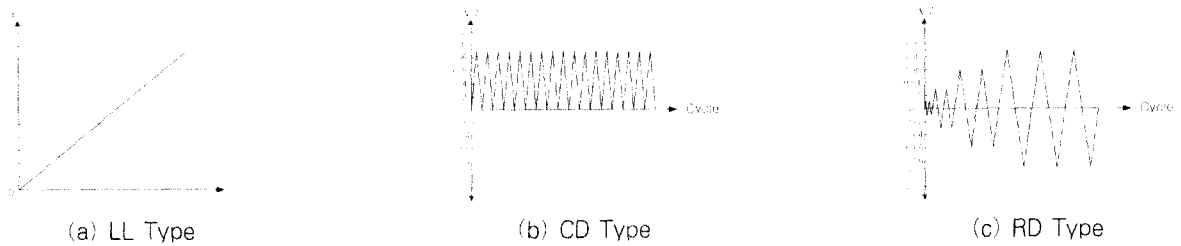


그림 4. Loading Patterns

그림 3은 해석에 사용한 Box형 강부재의 유한요소모델 및 기본좌표계를 보여주고 있다. 해석모델에는 Box형강 B-210×210×9를 사용하였다. 모델은 상하단에서 단면을 통과하는 Y축에 대하여 자유롭게 회전하는 일단 고정 타단 힌지로서 양단 부재길이 h는 1000mm로 일정하였다.

구조모델에는 쉘-평판 일방향 요소인 사변형 요소 (QUAD4)를 사용하였고 부재단 재하점 부근은 삼각형 요소 (TRIA3)를 이용하였다. 일방향 요소는 요소형상을 나타내는 함수와 변위함수가 같게되는 요소로, 이 경우 좌표변환과 변위함수가 완전히 같은 변환을 하게된다. 이들 요소는 두꺼운 쉘의 모델링에도 사용될 수 있고, 또한 휨에 대해서는 두께방향의 응력이 산정되어 비선형 재료에도 적용이 가능하다. QUAD4는 요소내에서 곡률이 선형변화하는 것으로 되었고, TRIA3에서는 변형률과 곡률이 일정하다고 가정되었다. 본 해석의 모델은 616요소 모델로 부재축 방향으로 22분할을 하고, 부재축 직각방향으로 한면에 대하여 7분할을 하였다(총 4면). 이들 모델의 요소분할은 전체좌굴·국부좌굴 등 부재변형상황의 고찰뿐만 아니라 국소 변형률 등의 위치대응을 고려하고 실시한 것이다.

블록인 부분은 탄성계수와 항복강도를 크게 하여 강체에서는 각 절점당 5개의 자유도를 갖는다. 모델의 각 명칭 및 치수는 표 2와 같이 정리하였다.

$\lambda$ 는 압축부재의 세장비 파라미터이다.

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \left( \frac{l_e}{r} \right) \quad (6)$$

여기서,  $E$ 는 영계수,  $l_e$ 는 유효좌굴길이( $K_l$ ,  $K$ 는 유효좌굴길이 계수(고정단 압축부재는 2.0)),  $r$ 는 회전반경이다.

$R$ 는 평판의 등가 폭·두께비 파라미터이다.

$$R = \frac{1}{\pi} \left( \frac{b}{t} \right) \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k}} \cdot \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (7)$$

여기서,  $t$ 는 평판의 두께,  $b$ 는 평판의 폭,  $k$ 는 평판의 좌굴계수(압축부재의 4면 단순지지는 4)

표 2. Model Size and Identification

길이 h(mm)	폭 b1(mm)	폭 b2(mm)	두께 t(mm)
1000	210	210	9
단면적 A(mm <sup>2</sup> )	회전반경 r(mm)	폭두께비 b/t	세장비 $\lambda$
7236	82.14	23.33	29.22

일반적인 3차원 해석의 경우 각 절점변위는 6자유도를 갖지만, 평판요소의 접선을 축으로 돌아가는 회전에 대해서는 강성이 정의되지 않는 즉, 회전구속을 실시하여 본 해석강제

### 3.3 해석시 변수

#### 3.3.1 재하방법의 설정

먼저 횡방향 하중을 가함에 따른 국소 부재의 변형률 변화율을 얻기 위해 중심축하중 0.2  $P_{cr}$ 의 압축력을 가한 상태에서 횡하중을 점차 증가 시켜서 해석을 실시하였다. 그 다음에 재하 절점에 0.2  $P_{cr}$ 의 압축력을 가한 상태에서 그림 2의 부재축의 직각(X축)방향으로 상대변위를 단계별로 주어서 설정하였다. 반복재하패턴은 그림 4에 보인것과 같이 (a) 인장영역에서 일방향 가력재하 LL형 (b) 인장영역에서의 교번 일정( $\Delta/\ell=0.09$ ) 변위재하 CD형 (c) 인장·압축 영역에서의 교번점중( $\Delta/\ell=0.01, 0.03, 0.06, 0.09$ ) 변위재하 RD형의 3종류이다.

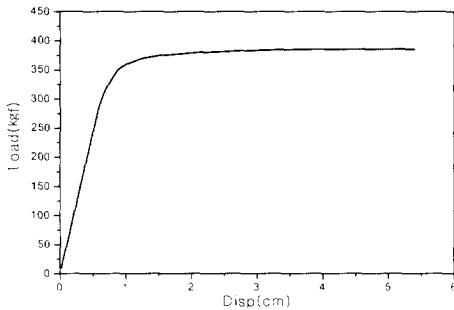
#### 3.3.2 강종에 따른 설정

본 연구에서는 강종과 하중 재하조건에 따라서 해석을 실

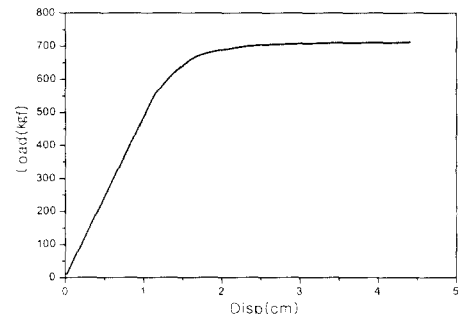
시하였다. 강종은 일반구조용 압연강재인 SS400과 고강도강인 Posten80에 각각 적용하였다. 각 강종에 대하여 중심축 압축 하중 상에서 인장영역의 일방향 가력 재하인 LL형, 중심축 압축하중 0.2  $P_{cu}$ 인 상태에서 인장영역에서의 교번 일정변위인 CD형, 중심축 압축하중 0.2  $P_{cu}$ 인 상태에서 인장·압축영역에서의 교번 점증변위인 RD형 이렇게 3가지 하중 대하여 비선형 해석을 실시하여 손상과정 및 파괴거동을 비교·분석하였다. 이상의 것을 정리하면 아래 표 3과 같다.

표 3. Parameters for Analysis

시험체명	Material Type	Loading Patten
US40-32-69-LL	SS400	LL
US40-32-69-CD	SS400	CD
US40-32-69-RD	SS400	RD
US80-44-95-LL	Posten80	LL
US80-44-95-CD	Posten80	CD
US80-44-95-RD	Posten80	RD

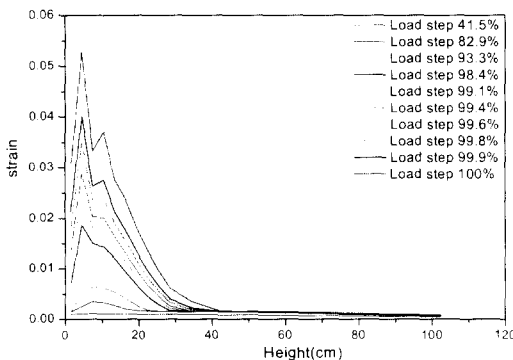


US40-32-69-LL

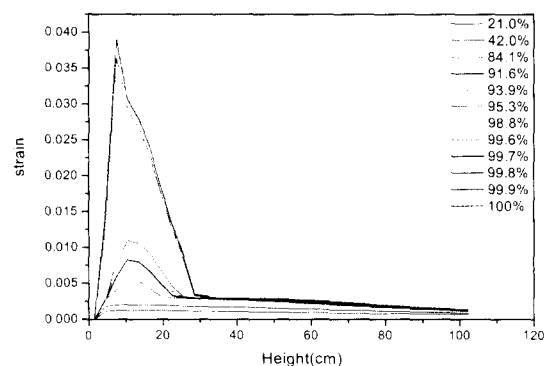


US80-44-95-LL

그림 5. Load-Displacement Curves under LL-type loading



US40-32-69-LL



US80-44-95-LL

그림 6. Strain Distribution Curves under LL-type loading

#### 4. 해석 결과 및 분석

##### 4.1 횡방향 하중을 받는 강부재

그림 5와그림 6은 각각 하중의 증가에 따른 횡방향 변위 (Δ)와 높이 방향으로의 변형률 분포를 나타낸 것이다.

횡방향 하중을 받는 강부재는 요소가 항복하중에 도달한 후에 횡방향 변위가 급격히 증가함을 알 수가 있었다. 이는 두가지 원인이 있다고 할 수 있는데 첫 번째가 확대 횡하중이다.

다음으로는 응력재분배에 따른 소성영역의 증가에 있다. 소성상태의 요소가 증가함에 따라 하중증가에 따른 변위 증가효과가 증폭되기 때문이다.

##### 4.2 교번 변위를 받는 강부재

그림 7의 각 그림은 강종과 하중조건에 따라 압축측 평면의 0.045h, 0.11h 0.67h에서의 국소 응력·변형률 관계이다.



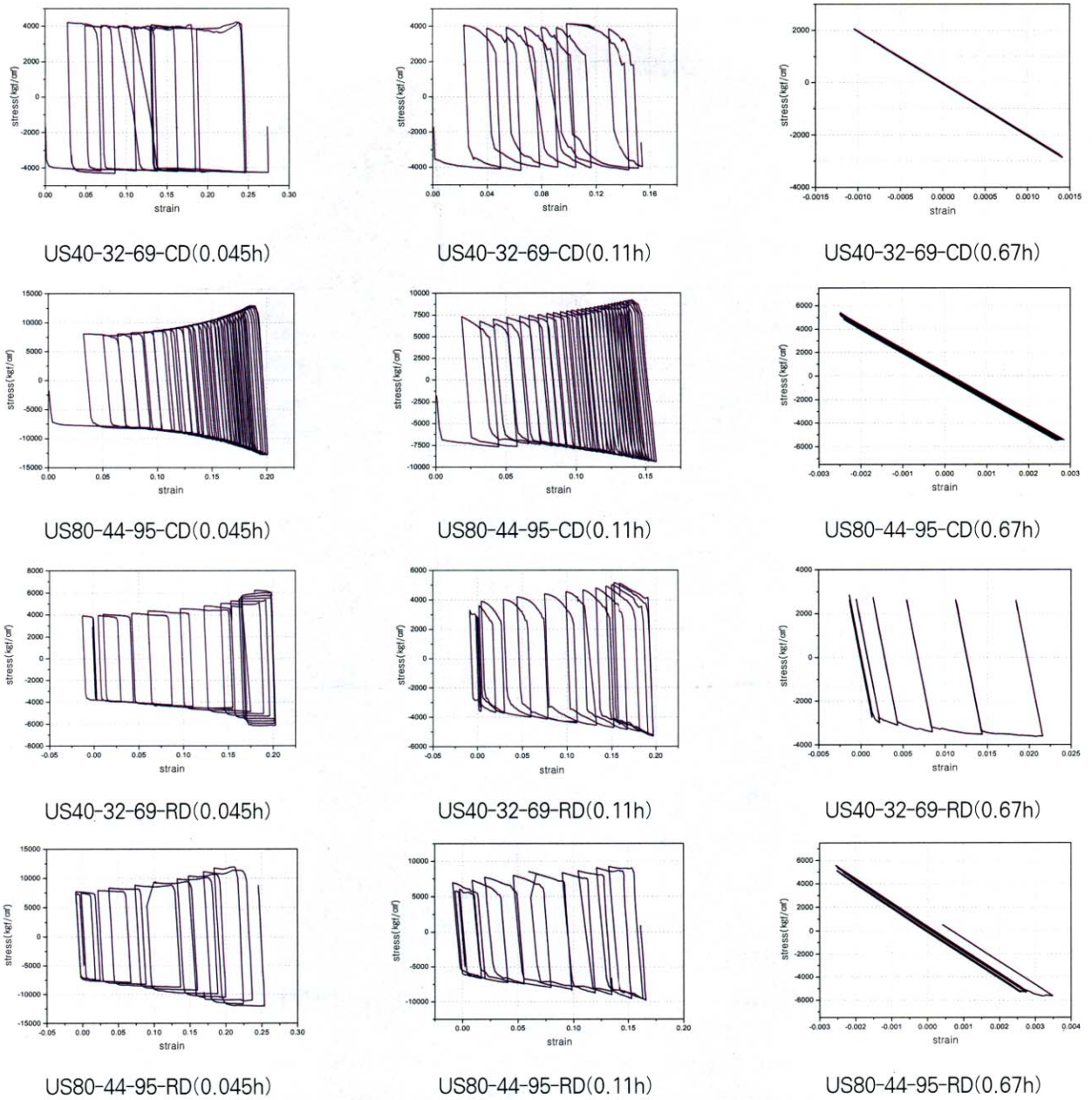


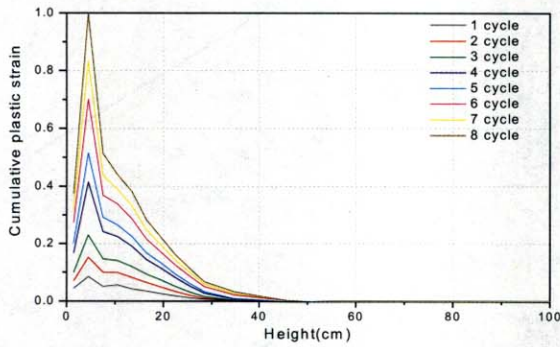
그림 7. Local Stress-Strain Curves under RD,CD-type Loading

최대 누적 소성변형률은 강종 및 재하조건에 상관없이 압축측 평면의 0.045h 부근에서 발생하였으며, SS400의 경우 재하조건 CD에서 최대 변형률은 0.27이었으며 재하조건RD에서 최대 변형률은 0.21이었다. Posten 80의 경우 이와는 반대로 재하조건 RD에서 최대 변형률이 0.26으로 재하조건 CD에서의 최대변형률 0.2보다 크게 나타났다.

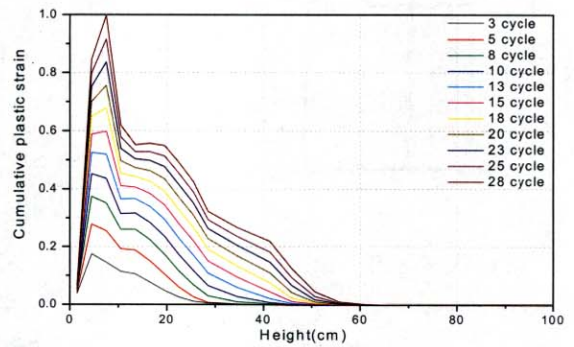
하중조건과 부재 높이에 따른 변형률의 변화를 살펴보면 강종이 재하조건에 따른 변형률 변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이런 특징들은 상대적으로 항복강도가 높은

Posten 80에서 더욱 뚜렷이 나타난다.

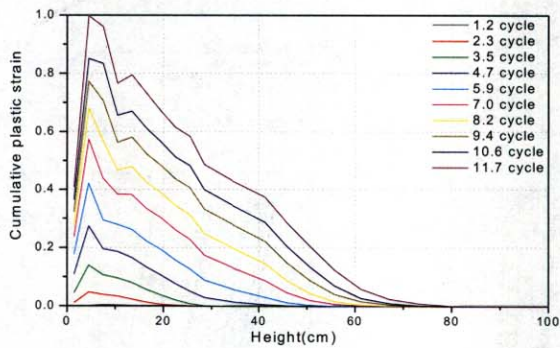
고강도강인 Posten 80의 경우 두가지 재하조건 모두에서 하중이 반복됨에 따라 요소에서의 소성변형률 증가속도가 둔해지고 있으며 높이에 따른 변형률 분포에도 크게 영향을 미치지 않았다. 반면에 SS400의 경우 재하조건에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 재하조건 CD상태에선 하중단계가 증가하여도 요소에서의 소성변형률 증가속도에 변함이 없었으며 Posten80과는 달리 0.67h 요소도 탄성거동만을 보이고 있다. 재하조건 RD상태에서는 하중단계의 증가에 따라 소성변형률 증가속도는 둔화



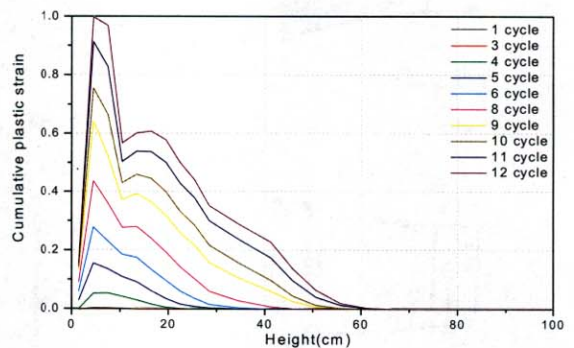
US40-32-69-CD



US80-44-95-CD



US40-32-69-RD



US80-44-95-RD

그림 8. Damage Index Curves by Loading Cycles

되었으며 0.67h 요소까지 소성이력을 보이고 있다.

최대 누적 소성변형률은 강중 및 재하조건에 상관없이 압축측 평면의 0.045h 부근에서 발생하였으며, SS400의 경우 재하조건 CD에서 최대 변형률은 0.27이었으며 재하조건RD에서 최대 변형률은 0.21이었다. Posten 80의 경우 이와는 반대로 재하조건 RD에서 최대 변형률이 0.26으로 재하조건 CD에서의 최대변형률 0.2보다 크게 나타났다.

하중조건과 부재 높이에 따른 변형률의 변화를 살펴보면 강중이 재하조건에 따른 변형률 변화에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이런 특징들은 상대적으로 항복강도가 높은 Posten 80에서 더욱 뚜렷이 나타난다. Posten 80의 경우 두가지 재하조건 모두에서 하중이 반복됨에 따라 요소에서의 소성변형률 증가속도가 둔해지고 있으며 높이에 따른 변형률 분포에도 크게 영향을 미치지 않았다. 반면에 SS400의 경우 재하조건에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 재하조건 CD상태에선 하중단계가 증가하여도 요소에서의 소성변형률 증가속도엔 변함이 없었으며 Posten 80과는 달리 0.67h 요소도 탄성거동만을 보이고 있다. 재하조건 RD상태에서는 하중단계의 증

가에 따라 소성변형률 증가속도는 둔화되었으며 0.67h 요소까지 소성이력을 보이고 있다.

### 5. 모델별 손상평가

그림 8은 강부재의 높이에 따른 누적소성변형률을 하중단계별로 도시한 것이다. 소성변형률의 발생 범위를 비교해 보면 Posten80시험체인 US80-44-95-CD시험체와 US80-44-95-RD시험체의 경우는 두 시험체가 0.6h까지 소성변형률이 발생한다. 그러나 SS400시험체인 US40-32-69-CD시험체와 US40-32-69-RD시험체를 비교해 보면 소성변형률이 발생하는 범위가 US40-32-69-CD시험체의 경우 0.5h정도까지이나 US40-32-69-RD시험체는 0.7h정도로 더 큰 범위에서 소성변형률이 발생함을 알 수 있다. 따라서 강도가 큰 강부재의 경우는 하중패턴에 상관없이 소성변형률이 비슷한 범위에서 발생하나 강도가 작은 부재는 인장과 압축을 반복하는 하중패턴에서 소성변형률의 범위가 더 큼을 알 수 있다.

또한 누적소성변형률곡선의 특성을 보면 고강도강인



Posten80시험체는 두 시험체 모두 0.045h에서 최대누적소성변형률이 발생하며 파단부분 이상의 높이에서 응력재분배에 의한 누적소성변형률의 특성 또한 비슷하다. 그러나 SS400 시험체의 경우에는 하중패턴이 RD인 경우는 파단부분 이상의 높이에서 응력재분배 효과에 의한 소성변형률 발생의 범위가 크나 하중패턴이 CD인 경우는 응력재분배 효과가 크지 않았으며, 9cycle 정도의 낮은 하중단계에서 파괴가 일어난 것으로 미루어 볼 때 SS400의 경우 압축 반복재하의 패턴에 매우 취약한 특성을 보인다. 따라서 강도가 큰 강부재의 경우는 하중패턴에 관계없이 소성변형률의 특성이 비슷하나 강도가 작은 강부재의 경우는 하중패턴이 소성변형률의 특성에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

앞에서 제시한 손상평가 기법으로 모델별 손상지수를 비교해 보면 US40-32-69-CD의 경우 하중단계 4cycle 정도에서 급격히 손상지수가 증가하여 9cycle에서 파괴상태인 손상지수 1에 이르렀으며, US40-32-69-RD의 경우 대체적으로 일정하게 손상지수가 증가하다가 40 cycle 정도에서 1에 이르렀다. 다음으로 US80-44-95-CD의 경우 15cycle까지는 손상지수가 일정하게 증가하다가 그 이상의 단계에서는 증가 추세가 둔화된 후 28cycle의 하중단계에서 파괴에 이르렀고 US80-44-95-RD의 경우는 US40-32-69-RD의 경우와 비슷한 양상을 보였다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 강부재에서의 손상지수식을 제시하여 반복재하를 받는 각형강관 기둥의 파괴에 이르는 과정을 손상지수를 이용하여 규명하고 하중조건 및 강종에 따른 변수를 주어 유한요소 프로그램을 이용한 비선형 해석을 수행하였다. 이에 대한 손상과정을 비교·분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 강한 반복하중을 받는 강부재의 손상정도를 정량적으로 평가할 수 있는 손상지수를 다음과 같이 제안하였다.

$$D = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\epsilon_i}{\epsilon_{lim}} \right)$$

- (2) 재료시험을 실시하여 얻은 재료특성값을 유한요소 해석에 적용하였고 강종별로 부재의 파단시 국부변형률을 측정하여 비교·분석한 결과 일반구조용 압연강재인 SS400의 경우 최대국부변형률은 150%였으며, 응력분배 효과에 의한 변형률 분포를 보인 반면, 고강도 강인 Posten80의 경우 최대국부변형률은 130%였으며

응력분배 현상이 거의 나타나지 않았다.

- (3) 강부재의 높이에 따른 누적소성변형률을 하중단계별로 도시한 결과를 분석해 보면 강도가 큰 강부재의 경우는 하중패턴에 상관없이 소성변형률이 비슷한 범위에서 발생하나 강도가 작은 부재는 인장과 압축을 반복하는 하중패턴에서 소성변형률의 범위가 더 큼을 알 수 있다. 또한 강도가 큰 강부재의 경우는 하중패턴에 관계없이 누적소성변형률의 특성이 비슷하나 강도가 작은 강부재의 경우는 하중패턴이 누적소성변형률의 특성에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.
- (4) 손상평가 기법으로 모델별 손상지수를 비교해 보면 고강도강인 Posten80의 경우는 하중재하조건이 강부재의 손상에 크게 영향을 미치지 않았지만, SS400의 경우는 압축반복재하의 하중패턴에 취약한 양상을 보였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-000-0-0484-0(2003))지원으로 수행된 것으로 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 박연수, 박선준 (1998) 강한 지진하중하에서 강부재의 정량적인 손상모델, 한국강구조학회 논문집 제10권 3호, pp. 339-353.
- 박연수 (1997) 강부재의 지진하중 재하에 의한 구조적 파괴 규명을 위한 실험적·수치해석적 연구, 97K029, 포항종합제철(주)
- 최창근 (1989) 유한요소해석, 집문당
- 박연수, 박선준, 강성후, 윤영필 (1997) 반복하중을 받는 강구조 요소의 소성피로에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집 제9권 2호, pp.193~204
- 강재교각 설계요령 (1998) 강구조 연구소
- 이승우 (1999) 강재 라멘교각의 설계와 해설, 도서출판 과학기술
- Park, Yeon-Soo (1993) Damage Process of Steel Members under Very-Low-Cycle Loading, Dissertation of Civil Engineering Department, Kyoto University.
- Shengbin Gao, Tsutomu Usami (2000) Eccentrically Loaded Steel Columns Under Cyclic In-Plane Loading, *Journal of Structural Engineering*/ August 2000, pp. 964-972.

MSC/NASTRAN (1992.) Nonlinear Analysis, The Macneal-Schwendler Corporation.  
M.A. Crisfield (1997) Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures, Volume 1.2, John Wiley & Sons Ltd.  
Julie A. Bannantine, Jess J. Comer James L. Handrock (1990) Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice-Hall Inc  
Yamada, M (1969) Low Cycle Fatigue Limits of

Various Kinds of Structural Members subjected to Alternately Repeated Plastic Bending under Axial Compression as an Evaluation Basis or Design Criteria for Aseismic Capacity *Proc. of 4th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 1, pp. 137-151

(접수일자 : 2003. 5. 7 / 심사일 2003. 5. 20 /  
심사완료일 2003. 7. 16)