

반복하중하에서의 강부재에 대한 손상지수 제안

A Proposal for Damage Index of Steel Members under Cyclic Loading

박연수¹⁾ · 강대홍²⁾ · 오정태³⁾ · 최동호⁴⁾ · 오백만⁵⁾

Park, Yeon Soo Kang, Dae Hung Oh, Jung Tae Choi, Dong Ho Oh, Back Man

요약: 본 연구는 강한 반복하중하에서 강부재가 파괴에 이르는 손상과정을 규명하고, 손상과 관련된 인자들을 이용하여 손상지수를 제시하며, 이와 관련된 해석 기법을 개발하는 것을 목적으로 한다. 제안된 손상평가 방법은 변형이 가장 심하게 집중된 단면에 있어서 국소 변형율의 이력에 초점을 맞추어 유도되었다. 해석모델은 좌굴변형의 발생 방향을 가정한 캔틸레버형 강상자형 부재이다. 파괴에 이르는 중심 압축하중과 일정 압축하중이 가해진 상태에서 반복 제어변위가 작용하는 강부재에 대해 비선형해석을 실시하였다. 본 해석에 적용된 주요 변수는 하중 재하패턴, 강종이다. 각 변수가 파괴모드, 변형능력, 그리고 손상과정에 미치는 영향을 기술하였고, 각각 강종에 따른 파괴 과정을 비교하였다. 그 결과 강한 반복하중하에서의 강부재의 파괴는 국부좌굴에 의해서 결정되고 특히 파괴와 직접적으로 연관성이 있는 국소 소성변형율과 관련되어 있음을 알 수 있었다.

ABSTRACT: This paper aimed to investigate the damage process of steel parts experiencing failure under strong repeated loading. Likewise, a damage index using various factors related to the damage was proposed. An analysis method for evaluating the damage state was also developed. The damage assessment method focused on the local strain history at the cross-section of the heaviest concentration of deformation. Cantilever-type steel parts were analyzed under uniaxial load combined with a constant axial load, considering horizontal displacement history. Loading patterns and steel types were considered as the main parameters in analyzing the models. The effects of the parameters on the failure modes, deformation capacity, and damage process as seen from the analysis results were also discussed. Each failure process was compared as steel types. In addition, the failure of steel parts under strong repeated loading was determined according to loading. Results revealed that the state of the failure is closely related to the local plastic strain.

핵심용어: 손상지수, 국소응력, 국소변형률, 소성변형률, 반복하중

KEYWORDS: damage index, local stress, local strain, plastic strain, repeated loading

1. 서론

강한 지진하중과 같은 극심한 반복하중하에서 대형구조물에 이용되는 기둥, 보 및 브레이싱 등 강부재의 내진 손상도 평가에 관한 많은 실험 및 수치해석적 연구가 이루어져 왔다. 그들 연구중에서 전체 좌굴이 국부좌굴을 동반하여 손상의 진전이 부재 파단의 주 원인이 되는 현상이 관찰되었다. 이는 그 구조물의 요소에 부분적으로 큰 소성변형을 반복적으로 받

게되기 때문이다. 이때 하중반복회수가 적어도 소성변형이 매우 크면 구조물은 파괴될 가능성이 있다. 따라서 수십회 정도의 소성변형영역에서 반복에 의해 부재가 파단에 이르는 큰 손상을 받을 가능성에 대해서 주목할 필요가 있다.

강부재의 붕괴형식으로는 부가힘에 의한 면내불안정, 횡좌굴에 의한 면외불안정 및 판요소의 국부좌굴 등이 있다. 이 중에서 세장비가 작은 부재에서는 축력에 의한 부가힘효과영향은 적고, 횡좌굴은 국부좌굴에 의해서 유발되므로 판요소

- 1) 정회원, 전남대학교 토목공학과 교수, 공학박사
- 2) 정회원, 전남대학교 토목공학과 박사과정
- 3) 학생회원, 전남대학교 토목공학과 석사과정
- 4) 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수, 공학박사
- 5) 정회원, 전남대학교 토목공학과 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2003년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

의 국부좌굴현상이 강부재의 주된 붕괴형식이 된다. 그리고 강부재의 파단·손상 형태는 일반적으로 응력·변형을 등의 역학적 인자, 부식 등의 화학적 인자, 사용되는 재료 특성과의 조합에 의해 변화한다.

본 연구에서는 강한 반복하중으로 인해 발생하는 변형으로부터 강부재의 성능을 확보하기 위하여 변형에 관련된 인자들을 가지고 예측할 수 있는 손상지수를 제안하고자 한다. 또한 강상자형 부재에 대해서 제안된 손상지수를 이용하여 손상평가 해석기법 개발과 평가결과에 따라 구조적인 거동을 분석·제시하고자 한다.

이를 위하여 본 논문에서 전개될 연구의 내용과 이를 수행하기 위한 연구방법은 다음과 같다. 강부재가 큰 소성변형을 반복해서 받음에 따라 파괴에 이르는 손상과정을 규명하고 이에 영향을 미치는 인자를 추출하여 분석을 한다. 이를 바탕으로 인자의 정량적 관계를 분석하여 강부재의 손상을 예측할 수 있는 새로운 손상지수식을 제안한다.

재료 및 기하학적 비선형성이 고려된 유한요소법을 사용하여 강부재에 대한 수치해석을 실시한다. 해석은 재하변위 종류 및 진폭과 파단까지의 사이클수, 그리고 여러 종류의 강종(SS400, SM570, Posten80)을 변수로 사용하여 소성변형역에 있어서 변형 형상, 응력-변형을 이력 및 부재의 내력을 조사하여 분석한다.

제안된 손상지수를 이용하여 강상자형 부재에 대하여 수치해석적으로 접근할 수 있는 손상평가 해석기법을 개발한다. 더불어 평가결과에 따라 강상자형 부재의 거동 및 손상특성을 분석·제시한다.

본 논문에서 제시한 손상평가 방법을 이용하여 구조물 및 부재가 큰 손상을 입거나 붕괴되어 그 기능을 손실하는 위험의 정도를 결정할 수 있다. 또한 보강을 해야 하는지 재시공해야 하는지 또는 그에 상당하는 위험을 받아 들여 그대로 계속 사용할 지의 여부를 판단할 수 있을 것이다.

2. 손상도 평가

최근 들어 내진상세가 적용되지 않은 기존 강구조물의 비선형 거동특성의 파악과 내진성능 평가를 위한 노력이 계속되고 있으며 손상정도를 파악하기 위한 척도로서 손상지수를 사용하는 경우가 많아지고 있다. 손상지수는 구조물과 부재의 손상된 정도를 평가할 수 있는 편리한 방법으로서 하중 재하에 따른 구조물과 부재의 손상정도를 수치적으로 표현하며 부재의 성능특성을 나타내는 지수이다. 이러한 손상지수는 구조물과 부재로 나누어 볼 수 있다. 구조물에는 구조물의 고유주기 변화를 이용하는 평가기법이 있고 부재에서는 강성의 변

화, 피로의 정식화, 이력곡선의 에너지 방출, 그리고 변형률의 변화 등을 이용하는 평가기법이 있다.

2.1 응력-변형을 관계

단순 응력-변형을 선도는 정적하중을 받는 부재와 구조물의 설계변수를 얻는데 사용되어 왔다. 마찬가지로 반복 응력-변형을 선도도 반복하중을 받는 구조물의 내구성을 평가하는데 유용하다(Fig. 1).

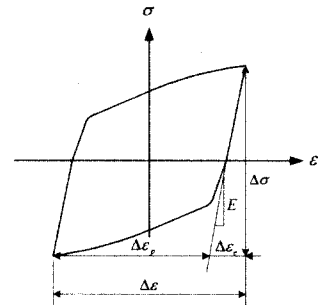


Fig. 1 Hysteresis loop of Stress-Strain

총변형률 ϵ_t 는 탄성 및 소성부분으로 나눌 수 있다. 선형탄성변형률은 하중을 제거하면 회복되는 변형률 부분(ϵ_e), 소성변형률은 하중을 제거하여도 회복할 수 없는 부분(ϵ_p)이다. 이것을 식으로 나타내면

$$\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_p \quad (1)$$

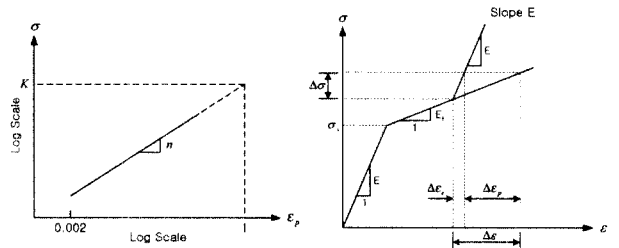


Fig. 2. Stress-Strain Relation (Log-Log Scale) Fig. 3 Stress-Strain Relation (Bilinear Hardening)

대부분의 강에서 응력 대 소성변형률 log-log 좌표로 그리면 직선으로 나타난다(Fig. 2). 결과적으로 이 선도는 지수함수를 사용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = K (\epsilon_p)^n \quad \text{또는} \quad \epsilon_p = \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n} \quad (2)$$

여기서, K = 강도계수
 n = 변형률 경화지수

대부분의 금속에서 n 의 값은 일반적으로 평균값이 0.15 정도의 값으로 0.10과 0.25 사이의 값을 갖는다.

그러므로 총변형율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_t = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n} \quad (3)$$

Fig. 3은 응력-변형을 곡선을 Bilinear 형식으로 이상화시킨 것이다. E_t 는 소성역에 대한 일축 응력-변형을 곡선의 기울기이다. h 는 소성경화구배로 탄소성의 재료의 특성을 표현할 수 있다.

$$h = \frac{E_t}{1 - \frac{E_t}{E}} \quad (4)$$

2.2 부재의 손상지수

본 연구에서 손상은 잔류변형이 시작 q 되는 단계에서 파단될 때까지의 변형 이력 과정이라 정의한다. 이는 소성변형율이 손상정도를 정량적으로 나타낼 수 있음을 의미한다. 손상의 역량을 항복상태에서 파단상태까지 소성변형율이 차지하는 누적소성변형율을 이용하여 손상지수를 유도할 수 있다.

심한 반복하중하에서 강구조 부재의 손상지수의 산정은 변형접근법을 이용한 Park, Yeon-Soo의 연구를 이용하여 새로이 접근하였다. 제시된 손상지수식은 심한 하중에 의한 소성영역에서 소성변형율의 변화에 근거하여 부재의 손상이 정량적으로 평가되기 때문에 매우 효율적이다. 그리고 인장영역의 소성변형율과 압축영역에서의 소성변형율을 나누어서 접근하였기 때문에 손상과정을 명확히 평가할 수가 있다. 또한 본 연구에서는 소성영역에 대한 재료의 성질을 bilinear kinematic hardening으로 가정하여 접근하였다. 그러므로 소성영역에서의 응력-변형율의 관계가 지수식이 아닌 선형으로 표시가 가능하기 때문에 수치해석의 방법을 이용해 손상정도를 쉽게 알 수가 있다.

본 논문에서 제시하는 손상지수를 적용시키기 위해 다음과 같은 재료의 특성을 가정한다. 이는 이상적인 탄-소성 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 변형도 경화역을 나타내므로 이러한 가정으로 인한 오차가 있게 된다. 그러나 변형도 경화역에서 강도가 증가하므로, 이를 무시하게 되면 안전하

다. 그러므로, 오차가 있지만 그 정도가 경미하다.

- ③ Bauschinger 효과를 무시한다. - 이 역시 무시할 경우 오차가 경미하여 고려하지 않아도 무방하다.

손상지수는 다음과 같이 산출된다. Fig. 4에서와 같이 극심한 반복하중을 받는 강부재에서 제일 취약한 요소의 국소 파괴응력비-파괴변형율비 반복이력곡선을 구한다. 이 반복이력곡선에서 항복 응력과 변형율을 이용하여 계속 반복되는 소성변형율을 포함할 수 있는 포락곡선을 그린다. 파괴응력비는 σ_f / σ_y , 파괴변형율비는 ϵ_f / ϵ_y 로 한다. 이 포락곡선에서 각 하중단계와 극한하중상태의 누적소성변형율에 해당되는 응력비와 변형율비에 관한 면적비로서 손상능력을 평가할 수 있다.

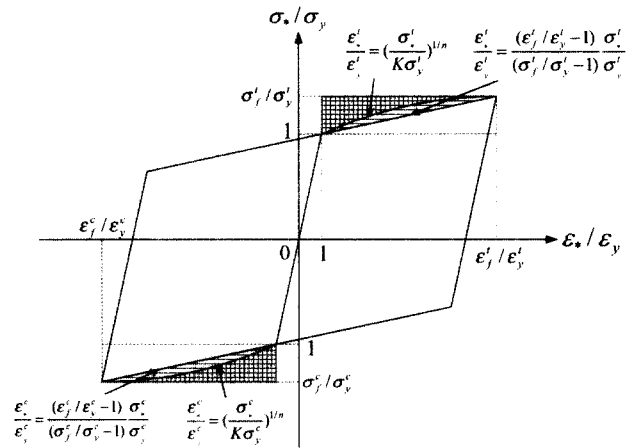


Fig. 4 Envelope of Failure Stress-Strain ratio Hysteresis Curve

위의 내용을 다음 식(5)과 같은 손상지수로 나타낼 수 있다.

$$D = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{A^t}{A^t_{limit}} + \frac{A^c}{A^c_{limit}} \right) \quad (5)$$

여기서, $A^t = \int_1^{\sigma'_t / \sigma'_y} \frac{(\epsilon'_t / \epsilon'_y - 1) \sigma'_t}{(\sigma'_t / \sigma'_y - 1) \sigma'_y} d\left(\frac{\sigma'_t}{\sigma'_y}\right)$ (5-1)

$$A^c = \int_1^{\sigma''_t / \sigma''_y} \frac{(\epsilon''_t / \epsilon''_y - 1) \sigma''_t}{(\sigma''_t / \sigma''_y - 1) \sigma''_y} d\left(\frac{\sigma''_t}{\sigma''_y}\right) \quad (5-2)$$

$$A^t_{limit} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma'_t}{\sigma'_y} - 1 \right) \left(\frac{\epsilon'_t}{\epsilon'_y} - 1 \right) \quad (5-3)$$

$$A^c_{limit} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma''_t}{\sigma''_y} - 1 \right) \left(\frac{\epsilon''_t}{\epsilon''_y} - 1 \right) \quad (5-4)$$

여기서 D 는 손상지수(damage index), A^* 는 재하된 하중단계에서 국소 파괴응력비-파괴변형율비 포락곡선의 소성변형율에 관한 면적, A^*_{limit} 는 국소 파괴응력비-파괴변형율비

포락곡선의 소성변형률에 관한 한계 면적, α 는 변형을 영역 상수로서 인장과 압축 변형률이 있을 때 2, 인장 혹은 압축 변형률만 있을지는 1, ϵ_* 는 재하된 하중단계에서의 국소변형률, σ_* 는 재하된 하중단계에서의 국소응력, ϵ_y 는 항복변형률, σ_y 는 항복응력, ϵ_f 는 파괴변형률, σ_f 는 파괴응력, n 는 변형을 경화계수, K 는 강도계수, 그리고 윗첨자 t 와 c 각각 인장과 압축을 나타낸다.

A_{limit} 값은 응력집중이 가장 심한 요소에서 변형률이 파괴 변형률에 도달했을 때의 포락곡선에서 소성변형률에 관한 면적을 의미한다. 손상지수 $D=1$ 이 되면 이에 대응되는 하중단계에서 부재가 파단이 되었음을 의미한다. $D < 1$ 이면 파단상태에 이르지 않는지만 어느 정도 손상을 입었는가를 수치적으로 보여준다.

일반적으로 국소응력-변형률 이력의 정확한 예측은 재료 및 기하학적 비선형성이 고려된 유한요소해석에 의해 가능하며, 소성변형률과 이를 이용한 A_{limit} 는 본 연구에서 해석적 방법으로 선택한 상용프로그램인 MSC/NASTRAN Version 70.7.2의 Sol106를 사용하여 강중에 따라 제시하여 손상 평가를 실시하였다.

3. 손상도 평가를 위한 유한요소해석

3.1 유한요소 해석 과정

3.1.1 비선형 해석을 위한 모델링

본 연구에서 제안한 손상지수식과 심한 반복하중하에서 강 부재의 해석기법을 개발하기 위하여 강상자형 부재를 이용하여 재료 및 기하학적 비선형 해석을 실시하였다.

Fig. 5는 해석에 사용한 강상자형 부재의 유한요소모델 및 기본좌표계를 보여주고 있다. 해석모델에는 Box형강 B-100×100×2.3를 사용했다. 모델은 상하단에서 단면을 통과하는 Y축에 대하여 자유롭게 회전하는 일단 고정 타단 힌지로서

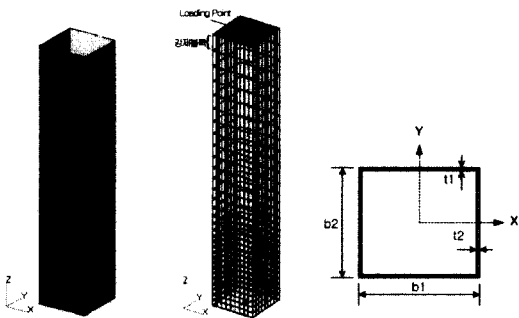


Fig. 5 Model for Analysis

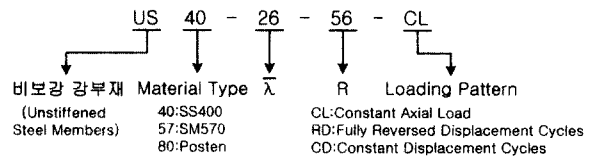
양단 부재길이 h 는 480mm로 일정하였다.

구조모델에는 쉘-평판형 Isoparmetric 요소인 사변형 요소(QUAD4)를 사용하였고 부재단 재하점 부근은 삼각형 요소(TRIA3)를 이용하였다. Isoparmetric 요소는 요소형상을 나타내는 함수와 변위함수가 같게되는 요소로, 이 경우 좌표 변환과 변위함수가 완전히 같은 변환을 하게된다. 이들 요소는 두꺼운 쉘의 모델링에도 사용될 수 있고, 또한 힘에 대해서는 두께방향의 응력이 산정되어 비선형 재료에도 적용이 가능하다. QUAD4는 요소내에서 곡률이 선형변화하는 것으로 되었고, TRIA3에서는 변형률과 곡률이 일정하다고 가정되었다. 본 해석의 모델은 1116요소 모델로 부재축 방향으로 31분할을 하고, 부재축 직각방향으로 한면에 대하여 9분할을 하였다(총4면). 이들 모델의 요소분할은 전체좌굴·국부좌굴 등 부재변형상황의 고찰뿐만 아니라 국소 변형률 등의 위치대응을 고려하고 실시한 것이다.

일반적인 3차원 해석의 경우 각 절점변위는 6자유도를 갖지만, 평판요소의 접선을 축으로 돌아가는 회전에 대해서는 강성이 정의되지 않는 즉, 회전구속을 실시하여 본 해석에서는 Body부분은 절점당 5개의 자유도를 갖는다. Fig.5의 모델에서 강제블록인 부분은 탄성계수와 항복강도를 크게 하여 강체에 가까운 거동을 하도록 한 것이다. 모델의 각 명칭 및 치수는 Table 1과 같이 정리하였다.

Table 1. Model Sizes and Identification for Analysis

길이 h(mm)	폭 b1(mm)	폭 b2(mm)	두께 t(mm)
480	100	100	3.2
단면적 A(mm ²)	회전반경 r(mm)	폭두께비 b/t	세장비 λ
1239.04	39.54	29.25	24.28



$\bar{\lambda}$ 는 압축부재의 세장비 파라미터이다.

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

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

R는 평판의 등가 폭 두께비 파라미터이다.

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

여기서, t는 평판의 두께, b는 평판의 폭, k는 평판의 좌굴계수(압축부재의 4변 단순지지 4)

3.1.2 재하방법의 설정

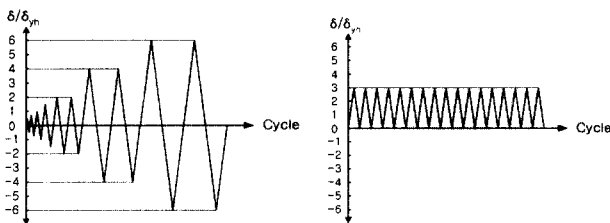
먼저 중심축하중을 받는 압축부재에 대하여 해석을 실시하였다. 그 다음에 재하절점에 0.2P_y의 압축력을 가한 상태에서 그림 1의 부재축의 직각(X축)방향으로 상대변위를 단계별로 주어서 설정하였다. 여기서 변위, 변형을, 하중 및 응력은 전부 압축이 주어지는 방향을 양의 방향으로 하고 있다. 반복 재하패턴은 Fig. 6에 보인것과 같이 (a) 인장·압축영역에서의 교번 점증(항복수평변위의 2배씩)변위재하 RD형, (b) 인장영역에서의 교번 일정(항복수평변위의 3배)변위재하 CD형의 2종류이다. 항복수평변위는 다음식에서 산출하였다.

$$\delta_{yh} = \frac{P_{yh} h^3}{3EI} \quad (8)$$

여기서,

$$P_{yh} = \frac{M_y}{h} \quad (8-1)$$

여기서, M_y는 항복모멘트, P_{yh}는 항복수평하중이다.



(a) RD Type (b) CD Type

Fig. 6 Loading Patterns

3.1.3 재료특성의 가정

재료특성으로서는 Fig. 7에 보인 이동경화형의 Bilinear 응력-변형을 관계를 사용하였다. 소성역에 대한 일축응력-변형을 곡선의 기울기 E_t와 영계수 E와의 관계, 항복공칭응력, 영계수, 포아송비 ν는 표 2에 명시하였다. 또 Von Mises의 항복조건을 이용하였다.

일반적으로 부재이력거동의 해석정밀도에는 재료 구성층의 영향이 크고, 변형을 경화역에 들어가는 해석에는 재료 구성

층의 정밀한 모델링이 필수적이다. 본 연구에서는 변형을 영역에서 강재의 반복응력-변형을 관계를 조사한 것으로서, 이로 인한 손상지수를 활용한 해석기법을 개발하기 위하여 본 연구에서는 Bilinear 응력-변형율의 재료 구성 관계를 사용하였다. 보다 정밀한 해석을 위해서는 등방경화가 포함된 이력 구성층의 모델링이 필요하다고 사료된다.

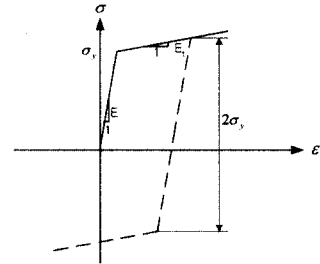


Fig. 7 Stress-Strain Relation(Bilinear Kinematic Hardening)

Table 2. Material Properties of Analyzed Steel Members

모델명	σ _y (MPa)	σ _u (MPa)	E _t /E	Material Type
US40-*	235.2	510	24	SS400
US57-*	460.6	597	15	SM570
US80-*	686.0	821	10	Posten80

Note: E=205GPa, ν=0.3, *=부속 명칭을 모두 포함

3.1.4 해석시 변수

본 연구에서는 강종과 하중 재하조건에 따라서 해석을 실시하였다. 강종은 일반구조용 압연강재인 SS400, 용접구조용 압연강재인 SM 570, 고장력강인 Posten 80에 각각 적용하였다. 또한 하중재하조건은 중심축 압축하중인 CL형, 중심축 압축하중 0.2P_y인 상태에서 인장·압축영역에서의 교번 점증변위인 RD형, 중심축 압축하중 0.2P_y인 상태에서 인장영역에서의 교번 일정변위인 RD형에 대하여 비선형 해석을 실시하여 손상과정 및 파괴거동을 비교·분석하였다. 이상의 것을 정리하면 아래 Table 3과 같다.

Table 3. Parameters for Analysis

모델명	Material Type	Loading Patten
US40-26-56-CL	SS400	CL
US40-26-56-RD	SS400	RD
US40-26-56-CD	SS400	CD
US57-26-56-CL	SM570	CL
US57-26-56-RD	SM570	RD
US57-26-56-CD	SM570	CD
US80-45-95-CL	Posten80	CL
US80-45-95-RD	Posten80	RD
US80-45-95-CD	Posten80	CD

3.2 해석 결과 및 분석

3.2.1 중심축 하중을 받는 강부재

중심축 하중을 받는 강부재는 최대내력에 도달한 후에 좌굴내력이 급격히 저하함을 알 수가 있었다. Box형 강부재는 강축과 양축 구분이 없고 사면이 용접되어 있어서 압축잔류응력의 효과가 크게 작용하기 때문이다.

국부좌굴변형 위치는 US40-26-56-CL 모델인 경우 0.146h

Table 4. Analyzed Results under Axial Load

US40-26-56-CL				
최대내력 P _u (KN)	항복내력 P _y (KN)	최대응력 σ_{ult} (MPa)	항복응력 σ_{yf} (MPa)	국부좌굴 변형위치
409.32	303.13	437.12	237.16	0.146h
US57-36-78-CL				
최대내력 P _u (KN)	항복내력 P _y (KN)	최대응력 σ_{ult} (MPa)	항복응력 σ_{yf} (MPa)	국부좌굴 변형위치
726.59	578.79	577.22	460.00	0.125h
US80-45-95-CL				
최대내력 P _u (KN)	항복내력 P _y (KN)	최대응력 σ_{ult} (MPa)	항복응력 σ_{yf} (MPa)	국부좌굴 변형위치
927.80	853.47	926.85	686.00	0.114h

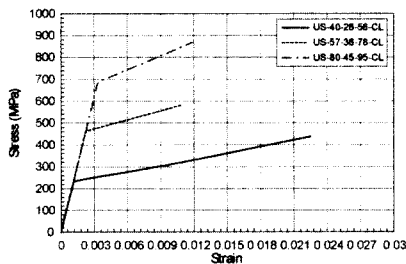


Fig. 8 Local Stress-Strain Curve under Axial Loading

에, US57-36-78-CL 모델인 경우 0.125h에, US80-45-95-CL 모델인 경우 0.114h에 좌굴방향의 반대 평면의 중앙부에서 발생하였다. 이는 강재의 내력이 클수록 국부좌굴변형 위치가 낮아짐을 알 수가 있었다. 중심축축 해석결과를 Table 4에 정리하였다. 이 표를 살펴보면 모델에 따라 내력과 응력의 크기 비율을 알 수 있다.

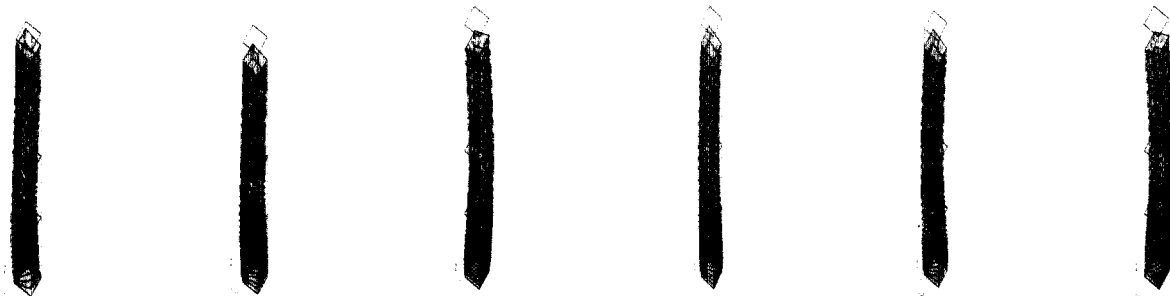
소성변형을 폭은 US57-36-78-CL 모델과 US80-45-95-CL 모델은 유사하였으나, US 40-26-56-CL 모델인 경우 상대적으로 앞의 모델에 비하여 소성변형을 폭이 2.53배 크게 나타났다. 응력집중이 가장 심한 요소의 국소 응력-변형을 이력은 Fig. 8과 같다.

3.2.2 교번 변위를 받는 강부재

가) 부재의 변형

인장·압축영역에서의 교번 점증 변위(RD)를 부재의 +X축 방향으로 가하였을 경우, 국부좌굴 위치는 강중에 상관없이 고정단에서 바로 위 0.04h 부근의 -X평면의 양 모서리 부근에서 발생하였다. 이는 고정단의 에너지분산효과가 급격히 떨어지기 때문이다. 또한 강성이 큰 모서리부근에 잔류응력이 집중된 상태에서 반복변형으로 인하여 급격히 좌굴내력이 저하되었기 때문이다.

Fig. 9는 모델이 파괴되기 직전의 재하된 반복변위가 0일 때의 변형모습이다. 모델 모두 전체 좌굴이 동반된 국부좌굴이 발생하였다. 좌굴 형상이 모델 모두 전 길이에 걸쳐 전반적으로 발생하지 않고 제일 먼저 좌굴이 일어난 부분에서 계속적인 변형이 발생하였다. 단면은 half wave 형태의 굴곡을 나타내고 있다. 항복내력까지 하중이 증가함에 따라 압축변형만 발생하다가 항복내력을 넘어서면 전체좌굴이 발생하였고, 하중의 증가에 따라 국부좌굴이 발생되었다. 모델과 하중조건에 따른 변형형상은 Fig. 9와 같다.



(a) US40-26-56-RD (b) US40-26-56-CD (c) US57-36-78-RD (d) US57-36-78-CD (e) US80-45-95-RD (f) US80-45-95-CD

Fig. 9 Deformed Shapes of Each Model

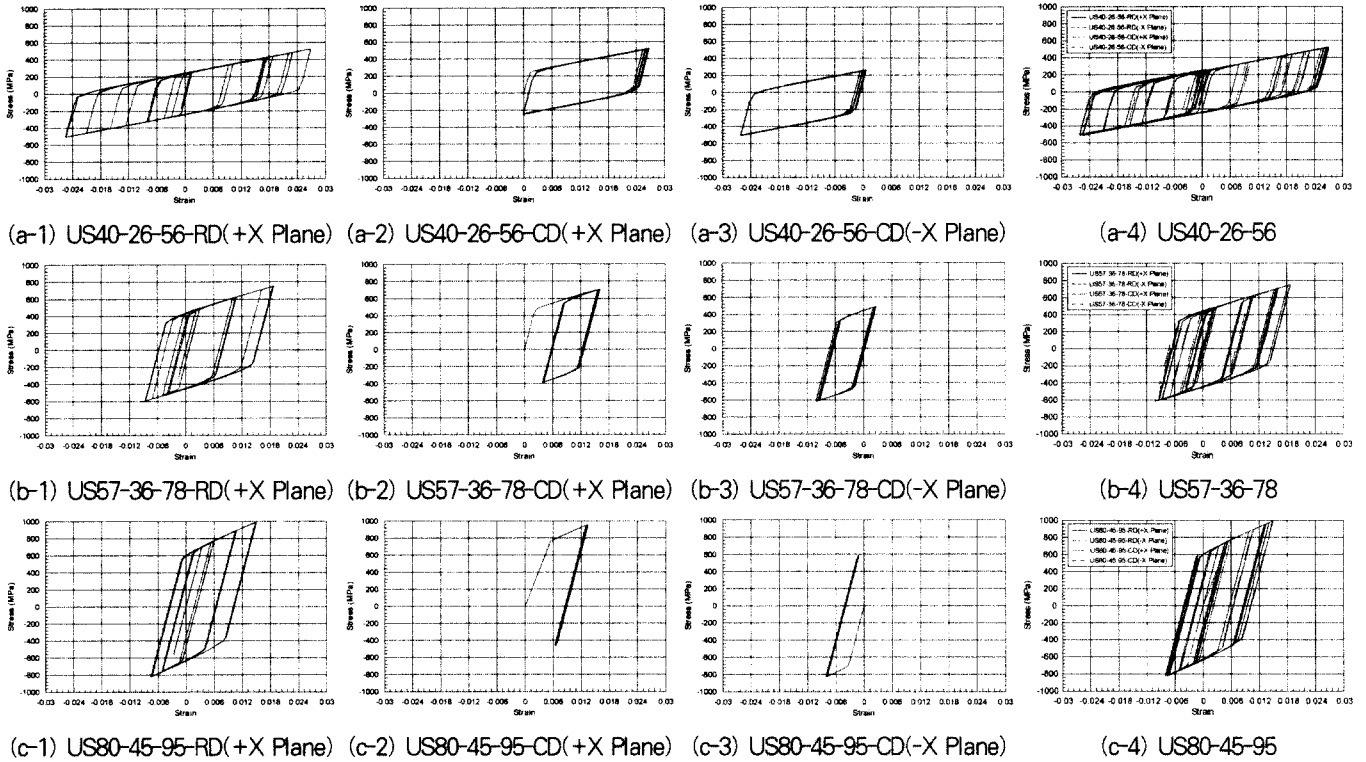


Fig. 10 Local Stress-Strain Curves of Analyzed Models under RD&CD-Type Loading

나) 국소 응력 변형을 이력 성상

Fig. 10의 각 그림은 국소 응력-변형을 관계를 보여주고 있다. 이들의 응력-변형을 이력은 국부좌굴변형이 발생한 단부 근처의 모서리요소에 대하여 휨인장축과 휨압축축의 상황을 보여주고 있다. 각 그림의 (a)는 강종에 따른 하중조건 RD형의 +X평면에 관한 이력곡선이고, (b)는 강종에 따른 하중조건 CD형의 +X평면에 관한 이력곡선이고, (c)는 강종에 따른 하중조건 RD형과 CD형 그리고 +X평면과 -X평면에 대한 이력곡선을 중첩시켜 놓은 것이다.

US40-26-56-RD모델인 경우 압축변형에서 인장변형의 진폭 차이가 1.49 ϵ_y 이다. 그리고 압축변형에 대한 인장 변형율의 복원이 93.7%였다. US57- 36-78-RD모델인 경

우 압축변형율에서 인장변형율의 진폭차이가 1.71 ϵ_y 이다. 그리고 압축변형율에 대한 인장 변형율의 복원이 69.6%였다. 그리고 US80-45-95-RD모델인 경우 압축변형율과 인장 변형율의 진폭차이가 2.24 ϵ_y 이다. 그리고 압축변형율에 대한 인장 변형율의 복원이 50.2%였다.

이 변형을 진폭차이는 US40-26-56-RD 모델 보다 US57-36-78-RD모델은 1.15배, US 80-45-95-RD모델은 1.51 배로 증가하였다. 이는 국소 변형율의 이력은 휨 압축축이 보다 심한 상황을 의미하고 있다. 또한 강도가 큰 강재일 수록 압축변형이 심하다는 것을 알 수 있다. 변형을 복원능력은 US40-26-56-RD 모델 보다 US57-36-78-RD모델은 74.3%, US 80-45-95-RD모델은 53.6%로 감소하였다.

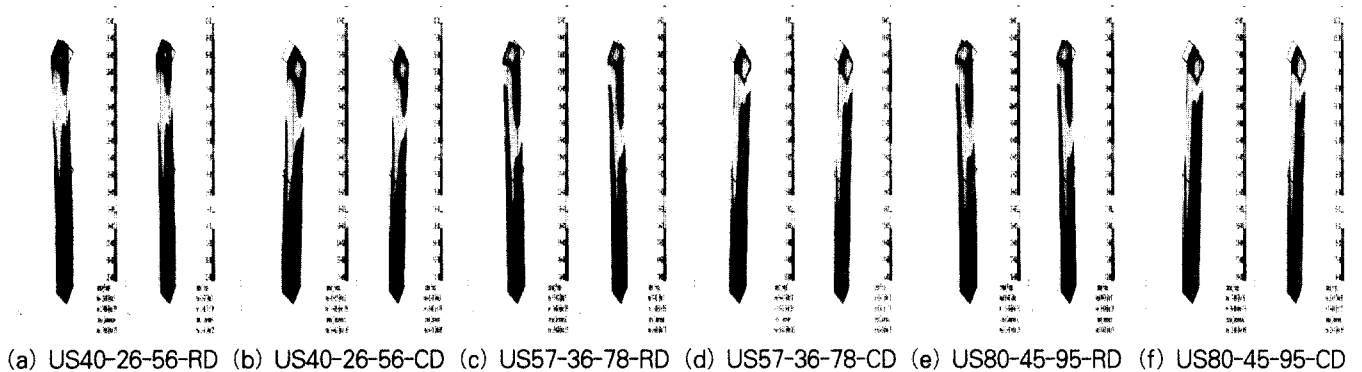


Fig. 11 Stress Diagrams of Analyzed Models(kgf/mm²)

하중조건에 따라서 +X평면에서는 압축변형률만 생기고, -X평면에서는 압축과 인장 변형률이 생겼다. 이는 중심축 하중을 받는 상태이므로 -X평면은 압축변형률도 생기게 된 것이다. +X평면에서의 복원능력은 US40-26-56-RD 모델은 98%, US57-36-78-RD 모델은 76.5%, 그리고 US80-45-95는 52%였다. 변형을 복원능력은 US40-26-56-RD 모델 보다 US57-36-78-RD 모델은 53%로 감소하였다. 또한 강도가 큰 강부재 일 수록 극한 변형률에 도달한 후 하중의 주기에 따라 소성변형률 폭이 급격히 감소함을 알 수가 있다. Fig. 11은 모델에 따른 각 부재의 응력 분포를 나타내고 있다.

평면에 대하여 Fig. 13과 14에 손상지수 분포도를 그려보았다. 지면 관계상 SS400강종의 모델만 제시한다. 다른 강종도 이와 마찬가지로 각각의 손상분포를 나타낼 수 있다. 각 그림에서 하중조건과 평면에 따라 손상의 정도가 다르게 나타났다.

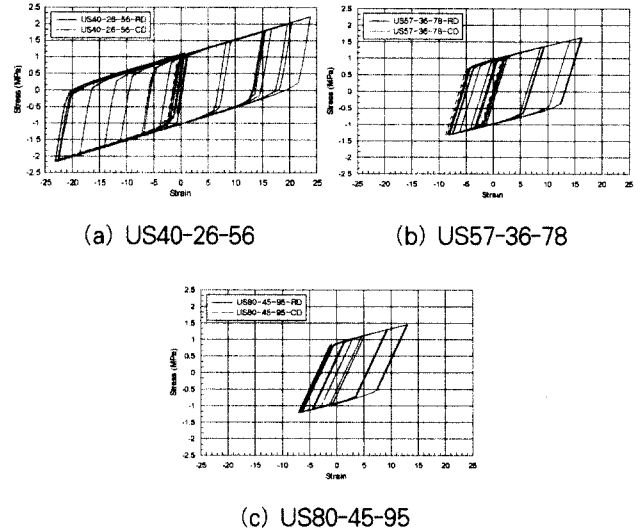


Fig. 12 Stress-Strain Ratio Hysteresis Curve Applied to Models(-X Plane)

4. 손상지수식을 이용한 손상 평가

4.1 모델별 손상평가

Fig. 12은 본 연구에서 수행한 총 6개의 모델에 대하여 2.1에서 언급한 국소 파괴 응력비-변형률비 곡선이다.

Fig. 12를 이용하여 포락곡선을 그린 후 각 모델의 4개의

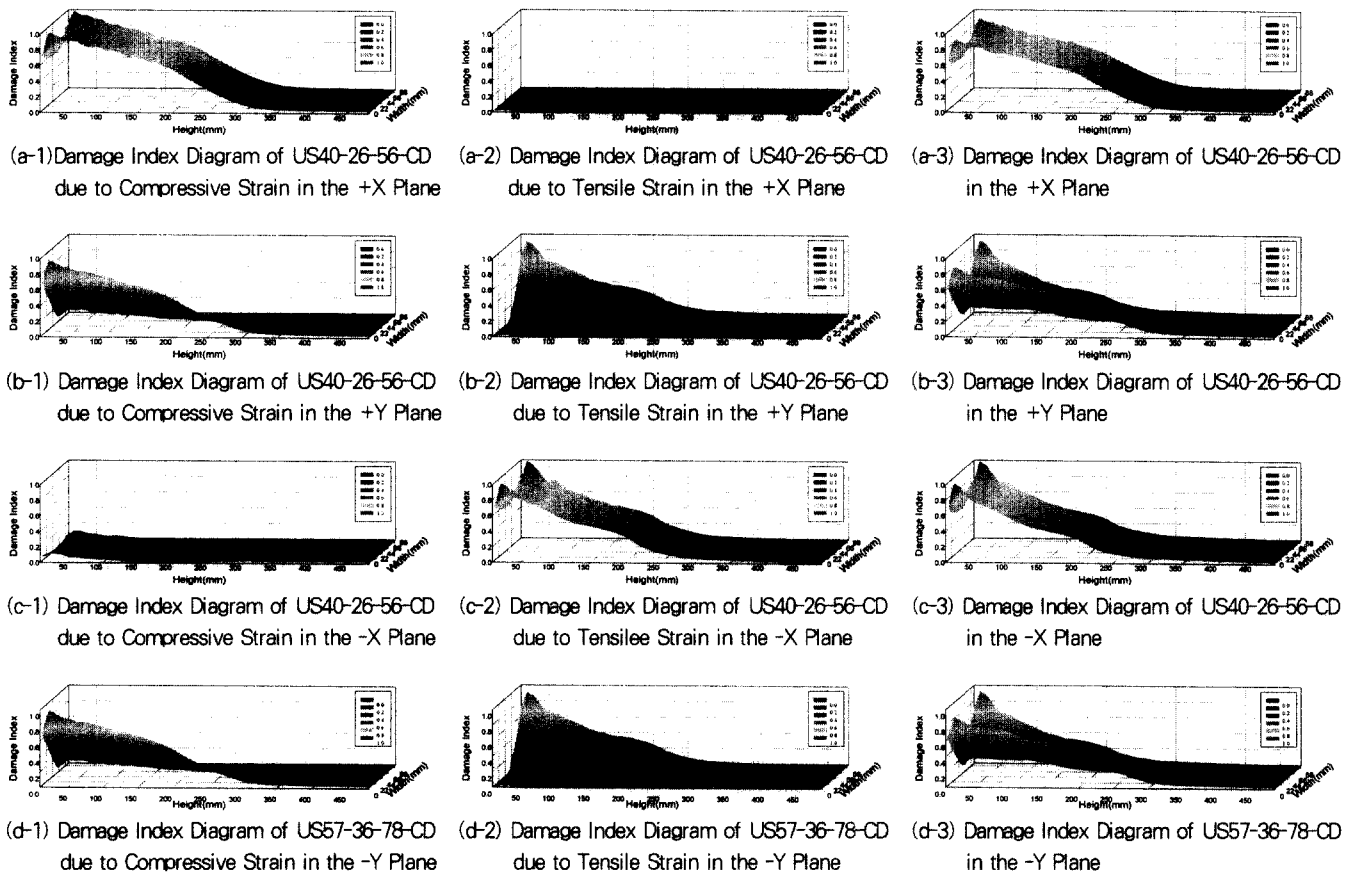


Fig. 13 Damage Index Diagrams of US40-26-56-CD in All Planes

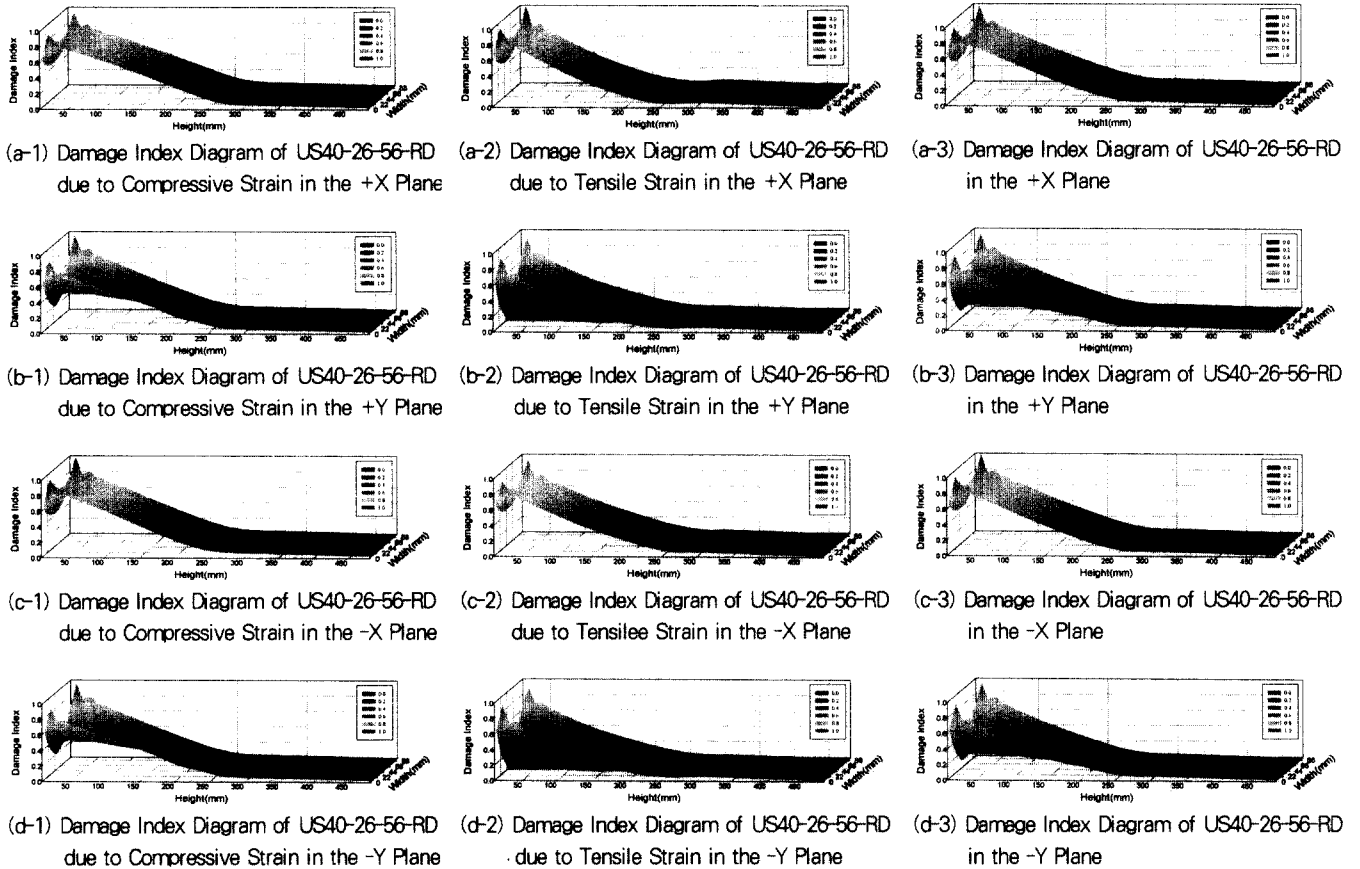


Fig. 14 Damage Index Diagrams of US40-26-56-RD in All Planes

US40-26-56-CD 모델의 경우 -X평면에서는 전단입술 현상으로 인하여 단부근처의 모서리 부근에서 손상지수가 1로서 제일 취약함을 알 수 있었다. 국부적인 손상굴곡이 단부근처에서 더욱 두드러지게 나타났다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.25h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.25h에서 0.46h까지로 나타났다. +Y평면에서는 중앙부위는 대체적으로 손상이 적어 손상형상이 V형으로 나타남을 알 수가 있었다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.35h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.35h에서 0.5h까지로 나타났다.

US40-26-56-RD 모델의 경우 -X평면에서는 전단입술 현상으로 인하여 단부근처의 모서리 부근에서 손상지수가 1로서 제일 취약함을 알 수 있었다. 국부적인 손상굴곡은 US40-26-56-CD의 경우와 다르게 대체적으로 나타나지 않았다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.25h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.25h에서 0.42h까지로 나타났다. +Y평면에서는 중앙부위는 대체적으로 손상이 적어 손상형상이 V형으로 나타남을 알 수가 있었다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.19h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.19h에서 0.38h까지로 나타났다.

US57-36-78-CD 모델의 경우 -X평면에서는 전단입술 현상으로 인하여 단부근처의 모서리 부근에서 손상지수가 1로서 제일 취약함을 알 수 있었다. 국부적인 손상굴곡은 대체적으로 완만히 나타났다. 또한 0.21h인 위치에서 손상지수가 급격히 낮아졌다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.21h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.21h에서 0.35h까지로 나타났다. +Y평면에서는 중앙부위는 대체적으로 손상이 적어 손상형상이 V형으로 나타남을 알 수가 있었다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.23h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.23h에서 0.35h까지로 나타났다.

US57-36-78-RD 모델의 경우 -X평면에서는 전단입술 현상으로 인하여 단부근처의 모서리 부근에서 손상지수가 1로서 제일 취약함을 알 수 있었다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.25h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.25h에서 0.42h까지로 나타났다. +Y평면에서는 중앙부위는 대체적으로 손상이 적어 손상형상이 U형으로 나타남을 알 수가 있었다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.13h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.13h에서 0.5h까지로 손상정도가 고르게 분포함을 알 수가 있다.

US80-45-95-CD 모델의 경우 -X평면에서는 전단입술 현상으로 인하여 단부근처의 모서리 부근에서 손상지수가 1로서 제일 취약함을 알 수 있었다. 국부적인 손상굴곡은 거의 일어나지 않았다. 또한 0.15h인 위치에서 손상지수가 급격히 낮아졌다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.15h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.15h에서 0.35h까지로 나타났다. +Y평면에서는 중앙부위는 대체적으로 손상이 적어 손상형상이 U형으로 나타남을 알 수가 있었다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.19h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.19h에서 0.35h까지로 나타났다.

US80-45-95-RD 모델의 경우 -X평면에서는 전단입술 현상으로 인하여 단부근처의 모서리 부근에서 손상지수가 1로서 제일 취약함을 알 수 있었다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.21h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.21h에서 0.72h까지로 나타났다. +Y평면에서는 중앙부위는 대체적으로 손상이 적어 손상형상이 U형으로 나타남을 알 수가 있었다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.15h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.15h에서 0.67h까지로 손상정도가 고르게 분포함을 알 수가 있다.

이상의 결과를 아래 Table 5에 정리하였다.

Table 5. Results of Damage Index (Each Model)

모델명	부재위치	손상지수	
		0.5~0.2	0.5이상
US40-26-56-CD	-X평면	0.25~0.46h	0~0.25h
	+Y평면	0.35~0.50h	0~0.35h
US40-26-56-RD	-X평면	0.25~0.42h	0~0.25h
	+Y평면	0.19~0.38h	0~0.19h
US57-36-78-CD	-X평면	0.21~0.35h	0~0.21h
	+Y평면	0.23~0.35h	0~0.23h
US57-36-78-RD	-X평면	0.25~0.42h	0~0.25h
	+Y평면	0.13~0.50h	0~0.13h
US80-45-95-CD	-X평면	0.15~0.35h	0~0.15h
	+Y평면	0.19~0.35h	0~0.19h
US80-45-95-RD	-X평면	0.21~0.72h	0~0.21h
	+Y평면	0.15~0.67h	0~0.15h

4.2 각 모델에 의한 강종별 손상평가

반복하중일 경우에는 하중의 형태에 따라 국부좌굴 이후의 거동에서 강성저하나 강도저하의 형태가 다르게 나타나므로, 본 연구에서 수행한 하중조건들을 다 포함할 수 있는 강종별로 손상 평가를 행하였다.

모델별 국소 파괴 응력비-변형율비 포락곡선(Fig.15)의 소성변형율에 관한 한계면적은 Table 6에 정리하였다. 먼저 하중조건 CL형, RD형, 그리고 CD형에 대하여 응력집중이 심한 단면에서의 국소 파괴 응력비-변형율비 이력곡선에 대하여 포락곡선을 그린다. 이 무차원된 포락곡선에서 한계면적을 구하여 강상자형 부재에 적용하였다.

Table 6. Limit Area of Stress-Strain Hysteresis Envelope Curve

	US40-26-56	US57-36-78	US80-45-95
A_{limit}^t	24.87	0.87	0.35
A_{limit}^c	27.30	2.91	1.57

위에서 구한 한계면적으로 본 해석에서 실시한 각 모델에 의한 강종별 강상자형 강부재의 손상정도를 규명할 수 있다.

Fig. 15를 이용하여 강종별 모델의 4개의 평면에 대하여 Fig. 16에 손상지수 분포도를 그려보았다. 그림에서 강종과 평면에 따라 손상의 정도가 다르게 나타났다.

US40-26-56 모델의 경우 -X평면에서는 전단입술 현상으로 인하여 단부근처의 모서리 부근에서 손상지수가 1로서 제일 취약함을 알 수 있었다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.25h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.25h에서 0.46h까지로 나타났다. +Y평면에서는 중앙부위는 대체적으로 손상이 적어 손상형상이 V형으로 나타남을 알 수가 있었다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.35h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.35h에서 0.50h까지로 손상정도가 고르게 분포함을 알 수가 있다.

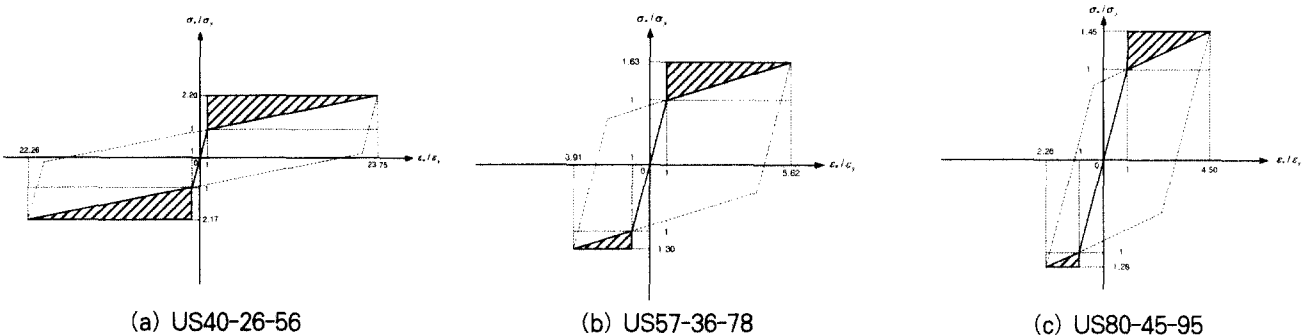


Fig. 15 Envelope of Stress-Strain Ratio Hysteresis Curve

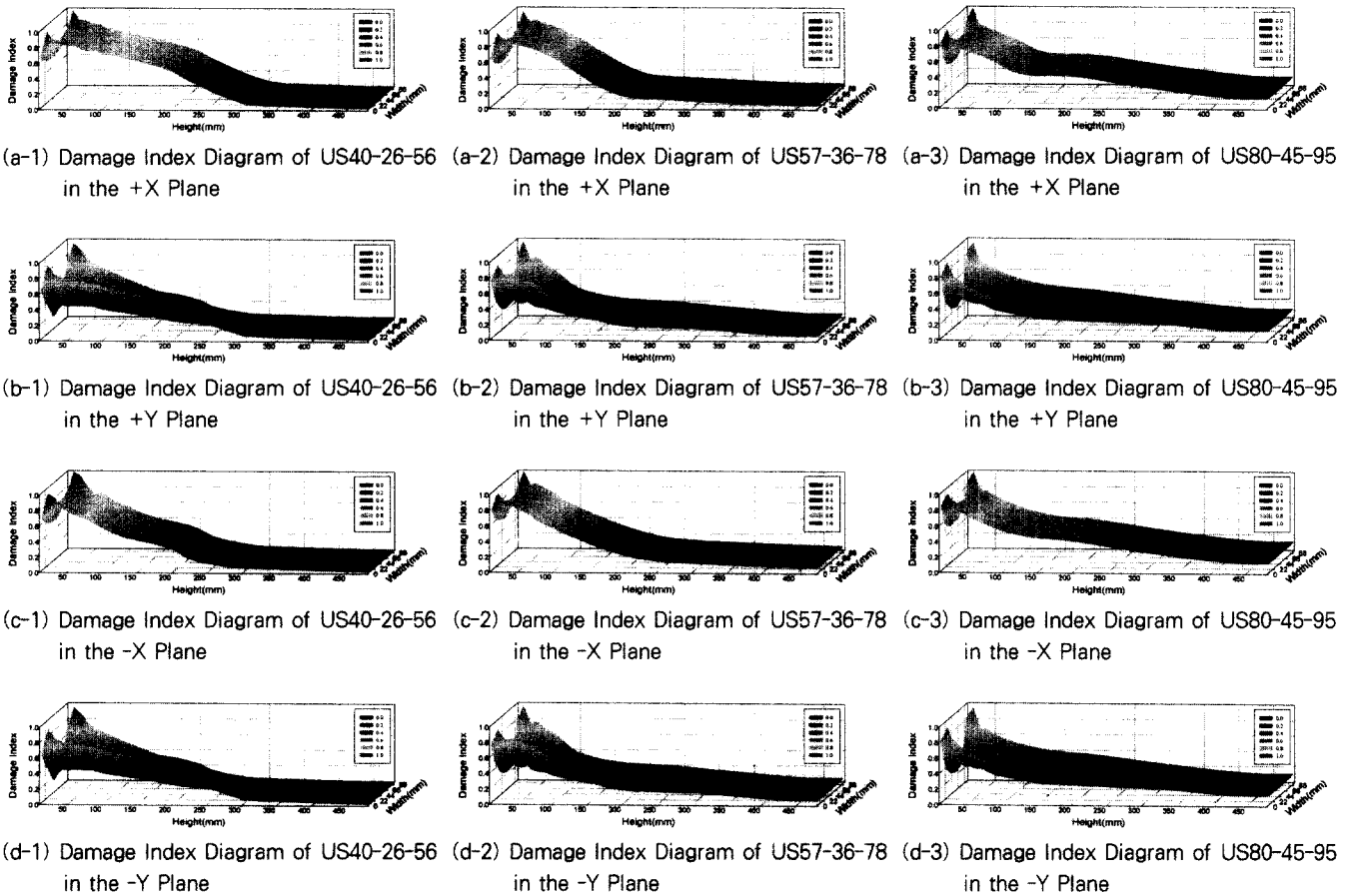


Fig. 16 Damage Index Diagrams of Steel Type

US57-36-78 모델의 경우 -X평면에서는 전단입술 현상으로 인하여 단부근처의 모서리 부근에서 손상지수가 1로서 제일 취약함을 알 수 있었다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.25h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.25h에서 0.42h까지로 나타났다. +Y평면에서는 중앙부위는 대체적으로 손상이 적어 손상형상이 V형으로 나타남을 알 수가 있었다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.23h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.23h에서 0.50h까지로 손상정도가 고르게 분포함을 알 수가 있다.

US80-45-90 모델의 경우 -X평면에서는 전단입술 현상으로 인하여 단부근처의 모서리 부근에서 손상지수가 1로서 제일 취약함을 알 수 있었다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.21h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.21h에서 0.72h까지로 나타났다. +Y평면에서는 중앙부위는 대체적으로 손상이 적어 손상형상이 V형으로 나타남을 알 수가 있었다. 손상지수가 0.5이상인 부재의 높이는 0.19h이고, 0.2이상 0.5미만인 부재의 위치는 0.19h에서 0.67h까지로 손상정도가 고르게 분포함을 알 수가 있다.

-X평면에서는 단부근처의 국부적인 손상굴곡은 US40에서

만 두드러지게 나타났다. 0.5이상의 손상지수 분포는 강도가 큰 부재일수록 작아지지만, 0.2정도의 손상지수 분포는 강도가 큰 부재일수록 고르게 분포함을 알 수가 있었다.

Y평면에서는 US40인 경우 V자 형상이 0.5h, US57인 경우 V자 형상이 U자 형상으로 바뀌어 0.27h, US80인 경우 0.17h까지 분포하였다. 특히 US80인 경우 모서리 부분에 미소한 U자 형상의 손상이 0.67h까지 분포하였다. 강도가 큰 부재일수록 일정한 손상의 정도가 부재의 상부로 전달됨을 알 수가 있었다.

이상의 결과를 아래 Table 7에 정리하였다.

Table 7. Results of Damage Index (Each Steel-Type Model)

모델명	부재위치	손상지수	손상지수
		0.5~0.2	0.5이상
US40-26-56	-X평면	0.25~0.46h	0~0.25h
	+Y평면	0.35~0.50h	0~0.35h
US57-36-78	-X평면	0.25~0.42h	0~0.25h
	+Y평면	0.23~0.50h	0~0.23h
US80-45-95	-X평면	0.21~0.72h	0~0.21h
	+Y평면	0.19~0.67h	0~0.19h

5. 결론

강부재가 큰 소성변형을 반복해서 받음에 따라서 파괴에 이르는 손상과정을 규명하고, 손상과 관련된 인자들을 이용해 손상도 평가법에 새롭게 접근하며, 이 평가법에 의한 손상 해석기법을 개발하기 위하여 심한 반복하중을 받는 Box형 강부재에 대해 비선형 해석을 수행하였다.

- (1) 강한 반복하중으로 인해 발생하는 대변형으로부터 강부재의 성능을 확보하기 위하여 무차원된 국소 응력비-변형율비 포락 곡선을 이용하여 손상정도를 파악할 수 있는 손상지수를 제안하였다.
- (2) Box형 강부재에 대하여 제안된 손상식을 이용하여 비선형 해석 손상기법을 개발하여 변형 형상과 응력-변형률 이력 성상 및 부재의 내력 등 구조적인 거동을 분석하였으며, 강종에 따른 모델에 대하여 손상특성을 파악하였다.
- (3) Box형 강부재의 손상식을 이용하여 손상평가 결과 가장 심하게 손상된 부분은 국부좌굴이 발생하는 위치와 비슷하였다. 이는 강요소의 국부좌굴이 손상인자인 소성변형율과 밀접한 관련이 있음을 의미한다. 또한 강성이 적은 모델은 손상정도가 단부근처에서 집중되었으며, 강성이 큰 모델일수록 손상의 정도는 부재의 상부로 고르게 분포함을 알 수가 있었다.
- (4) 강재의 내력이 클수록 국부좌굴 위치가 낮아짐을 알 수가 있었다. 또한 고장력강인 Posten80 강재의 강도가 SM570보다 1.5배 높음에도 불구하고 Posten80 강재의 소성변형능력이 SM570 강재에 비하여 그다지 떨어지지 않았다.

6. 향후 연구과제

- (1) 강부재의 파괴모드를 정량적으로 평가하기에는 본 논문에서 제시한 내용으로는 미비한 점이 있다. 부재는 국부좌굴뿐만 아니라 전체좌굴에 의해서 파괴에 이른다. 손상도를 평가할 수 있는 전체손상과 국부손상을 함께 고려한 일반화된 식의 정식화가 필요하다. 따라서 본 논문에서 제시한 국부좌굴에 대한 손상도 평가식을 이용하여 전체좌굴이 고려된 새로운 손상도 평가식을 도출하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.
- (2) 다양한 형태의 반복하중을 받는 강부재(H형강, Box형강, Γ 형강)에 대해서 본 연구에서 제안된 손상도 평가법이 실험과 해석을 통하여 검증되는 것이 필요하다.

더불어 여러 하중조건, 폭두께비, 세장비, 보강재의 효과를 고려한 손상비교 평가가 필요하다고 사료된다.

- (3) 내진성이 우수한 고성능 강재에 대한 수치적 해석 접근을 실시하여 새로운 손상해석 기법을 개발함과 동시에 실험을 통하여 검증이 뒷받침되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단의 연구비 지원(과제번호 R01-2001-00484), 2001 전남대학교 학술연구비 지원에 의한 것으로 감사드립니다.

참고 문헌

1. Shengbin Gao, Tsutomu Usami, 2000, "Eccentrically Loaded Steel Columns Under Cyclic In-Plane Loading", Journal of Structural Engineering/August 2000, pp.964-972.
2. Hanbin Ge, Cyclic Tests of Concrete-Filled Steel Box Columns, Journal of Structural Engineering ASCE/October 1996, pp.1169~1177.
3. Lizhi Jiang, Yoshiaki Goto, Makoto Obata, Multiple Spring Model for 3D-Hysteretic Behavior of Thin-Walled Circular Steel Piers, Structural Eng./Earthquake Eng. JSCE/Vol.18 No.2, pp.111s~127s.
4. MSC/NASTRAN, 1992, "Nonlinear Analysis", The Macneal-Schwendler Corporation,
5. MSC/PATRAN, 1998, MSC/PATRAN user Manual, The Macneal-Schwendler Corporation,
6. M.A. Crisfield, 1997, "Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures", Volume 1, John Wiley & Sons Ltd.
7. M.A. Crisfield, 1997, "Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures", Volume 2, John Wiley & Sons Ltd.
8. Julie A. Bannantine, Jess J. Comer James L. Handrock, 1990, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice-Hall Inc, pp.47~64
9. T. Nomaka and S. Iwai, 1998, "Failure of Bar Structures under Repeated Loading", Jhon & Sons, pp.389~433
10. Anil K. Chopra, 1995, "Dynamics of Structures -Theory and Applications to Earthquake Engineering", Prentice Hall
11. Park, Yeon-Soo, 1993, "Damage Process of Steel Members under Very-Low-Cycle Loading",

Dissertation of Civil Engineering Department,
Kyoto University.

12. 최창근, 1989, "유한요소해석", 집문당, pp.509~538
13. 박연수, 박선준, 1998, "강한 지진하중하에서 강부재의 정량적인 손상모델", 한국강구조학회 논문집 제10권 3호, pp. 339-353.
14. 박연수, 박선준, 강성후, 윤영필, 1997, "반복하중을 받

는 강구조 요소의 소성피로에 관한 연구", 한국강구조학회 논문집 제9권 2호, pp.193~204

15. 박연수, 1997, "강부재의 지진하중 재하에 의한 구조적 파괴규명을 위한 실험적·수치해석적 연구", 97K029, 포항종합제철(주)

(접수일자 : 2002년 5월 8일)