



## 축방향철근의 저주파 피로 모델

고성현<sup>1)</sup> · 이재훈<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>제주산업정보대학 토목과 <sup>2)</sup>영남대학교 건설시스템공학과

## Low Cycle Fatigue Model for Longitudinal Reinforcement

Seong-Hyun Ko<sup>1)</sup> and Jae-Hoon Lee<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Jeju College of Technology, Jeju 690-714, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Civil Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea

**ABSTRACT** The purposes of this study are to verify the existing model and to propose a rational model for the fracture characteristic of reinforcing steel which is manufactured in Korea being subjected to cyclic loading. This investigation deals with modeling of the low-cycle fatigue behavior for longitudinal reinforcement steel of reinforced concrete bridge substructure (piles and columns of piers). The proposed low-cycle model of longitudinal steel is modeled based on 81 experimental data. The non-linear analysis program was developed using the proposed low-cycle model. The non-linear analysis are applied to the 6 circular bridge column test results and the accuracy of proposed model is discussed.

**Keywords :** low cycle fatigue, fracture, longitudinal reinforcing steel, failure mode

### 1. 서 론

철근콘크리트 교각의 만족할만한 내진성능은 지진 하중에서도 하중성능의 손실 없이 큰 비선형 거동 능력과 에너지 소산능력, 즉 연성거동을 보이는 것이다. 이는 큰 비선형 거동을 거치는 과정에서 부재에 입력 또는 부과되는 에너지가 동적(kinetic) 에너지, 변형률 에너지, 감쇠(damping) 및 영구적인 잔류변형(residual deformation) 에너지로 소산된다는 개념이다. Chang 등<sup>1)</sup>은 철근콘크리트 교각의 해석방법으로 에너지에 기초한 손상평가법(damage assessment methodology)을 제안하였다. 지진하중은 교각 교각에 반복하중을 재하하는 효과를 주므로 요구되는 에너지 소산량과 일치하는 반복하중의 횟수 향으로 나타내어지는 지속효과로 표현될 수 있고 유사한 방법으로 에너지 소산 성능에 기초하여 부재가 파괴되기까지의 변위 주기의 수로 고려할 수 있다.

에너지에 대한 또 다른 관점은 저주파 피로(low-cycle fatigue)의 개념에 사용하는 것이다. 피로는 고주파 피로와 저주파 피로로 구별되며 고주파 피로는 탄성범위 내에서 반복되어  $10^3 \sim 10^7$ 회 정도의 피로수명을 보이며 응력과 피로수명의 관계를 설명하기 위해 사용된다. 저주파 피로는 항복상태를 초과하여 탄성을 벗어난 소성범위에서 반복

되며 피로수명이  $10^3$ 회 미만으로 에너지 또는 변형률과 피로수명의 관계를 설명하기 위해 사용된다.

지진과 같은 반복하중하에서 저주파 피로에 의한 비탄성 범위에서의 축방향철근 파단은 철근콘크리트 교각 교각의 파괴유형 중의 하나이며 방지될 수 없는 파괴유형이다.<sup>2)</sup>

지진하중이 재하될 때 축방향철근은 소성상태의 인장 및 압축변형률을 겪게 되리라고 기대되며 일반적으로 2~10회의 반복을 받게되며 30회 이상 반복되지 않는 것이 일반적이다. 내진공학적인 관점에서 볼 때 0.01~0.05 변형률 진폭(amplitude)에서 철근의 반복되는 하중에 대한 재료모델 연구가 필요하며 이러한 재료모델의 적용이 비선형 시간이력해석에서 직접 또는 간접적인 파괴유형을 결정할 수 있다.

이 연구에서는 기존의 모델을 토대로 국내산 철근의 재료특성을 고려한 수정모델을 제안하였으며 부재실험에서의 거동과 비교·검토하여 철근콘크리트 기둥의 비선형 해석에 대한 합리적인 재료 모델을 제시하고자 한다.

### 2. 저주파 피로 모델

현재 널리 사용되는 피로라는 단어는 1850년경에 최초로 August Wohler에 의해 반복되는 응력에 관계되는 손상 또는 파괴를 설명하기 위해 소개되었다.<sup>3)</sup> August Wohler에 의해 실험적 피로 연구를 통한 응력과 파괴횟수의 개념이 소개된 이후 1940년대까지 Fuchs 등<sup>4)</sup>의 피로 연구자들은 본격적인 실험을 통하여 피로수명에 영향

\*Corresponding author E-mail : jhl79@ynu.ac.kr

Received November 25, 2009, Revised January 31, 2010,

Accepted February 16, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

을 주는 많은 인자들을 입증하였다. 이러한 것들은 탄성 범위에서의 응력에 대한 연구들이었으며 백만번 이상의 고주파피로(high cycle fatigue)에 대한 것이었다. 1945년에 Miner<sup>5)</sup>에 의해 선형누적 피로손상 기준(linear cumulative fatigue damage criterion)에 기초한 피로손상에 대한 최초의 공식이 제안되었다. Manson<sup>6)</sup>과 Coffin<sup>7)</sup>은 고온에서의 금속 피로문제에 관심을 가졌으며 비탄성 범위의 효과를 연구하였고, 소성변형률과 피로수명간의 관계를 정량화하였고 저주파 반복 변형률(low cycle strain)은 현저하게 피로거동을 지배한다고 주장하였다. 그 후에 저주파 피로와 같은 변형률-피로수명간의 관계를 설명하기 위하여 많은 모델들이 제안되었다. 이 모델들은 파괴될 때까지의 반복 횟수에 대한 변형률량으로 구성된다. Koh 등<sup>8)</sup>은 고강도 강재에 대한 저주파 피로의 평균응력의 효과를 연구하였고 Smith 등,<sup>9)</sup> Lorenzo 등<sup>10)</sup>에 의해 제안된 다양한 평균응력 모델을 피로 실험 결과로 평가하였다. 이들의 연구에서 평균응력은 0.005보다 큰 변형률 진폭에 대한 피로수명에 영향을 주지 않는다고 보고하였다. 평균응력-평균 변형률 모델은 Hsu,<sup>11)</sup> Maekawa,<sup>12)</sup> 신헌목 등<sup>13)</sup>에 의해 연구가 진행되고 있다.

철근의 반복거동에 의한 응력-변형률 거동은 Mander 등,<sup>14)</sup> Dodd 등<sup>15)</sup>에 의해 연구되었으며 이 연구자들은 뉴질랜드에서 제작된 철근에 대한 실험을 수행하였고 바우싱어 효과와 반복응력-변형률 거동을 정의하였다. 에너지 소산과 축방향철근의 피로성능은 Mander 등<sup>14)</sup>이 철근실험을 수행하여 정량화 및 수식화 되었다.

### 2.1 변형률과 피로수명에 관한 모델

1950년대에 제안된 Coffin-Manson 식은 소성변형률 진폭  $\epsilon_{ap}$ 과 파괴가 발생할 때까지의 반전횟수  $2N_f$ 의 상관관계를 식 (1)과 (2)로 제안하였고, 로그 그래프 상에서 직선으로 나타내었다. 식 (1)의  $\epsilon_a$ 는 탄성변형률과 소성변형률의 합인 전체 변형률을 나타내고 식 (2)의  $\epsilon_{ap}$ 는 소성 변형률을 나타낸다.  $\epsilon'_f$ 는 피로 연성 계수를 나타내고  $c$ 는 주어진 재료에 대한 피로 연성 지수이다.

$$\epsilon_a = \frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b + \epsilon'_f(2N_f)^c \quad (1)$$

$$\epsilon_{ap} = \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f(2N_f)^c \quad (2)$$

Koh 등<sup>8)</sup>은 전체 변형률과 피로수명간의 관계로 나타내었는데 A356-T6 알루미늄 강에 대하여 식 (3)으로 제안하였다.  $M$ 과  $m$ 은 대상 재료에 대한 계수 및 지수이다.

$$\epsilon_{ap} = \frac{\Delta\epsilon}{2} = M(2N_f)^m \quad (3)$$

평균응력 중에 가장 널리 사용되는 모델이 Smith 등<sup>9)</sup>의 모델이다. 제안된 응력-변형률 함수는 식 (4)와 같고  $f_{max}$ 는 전체 변형률 이력에서 최대 응력(인장 또는 압축)의 크기이며  $\epsilon_a$ 는 탄성변형률과 소성변형률의 합인 전체 변형률을 나타내고  $C$ 와  $\gamma$ 는 대상 재료에 대한 계수 및 지수이다.

$$f_{max}\epsilon_a = C(2N_f)^\gamma \quad (4)$$

Lorenzo 등<sup>10)</sup>은 Smith-Watson-Topper 함수의 소성변형률에 기초한 저주파 피로 평균응력을 식 (5)로 제안하였다.  $f_{max}$ 는 전체 변형률 이력에서 최대 응력(인장 또는 압축)의 크기이며  $\epsilon_{ap}$ 는 소성변형률이고  $L$ 과  $l$ 은 대상 재료에 대한 계수 및 지수이다.

$$f_{max}\epsilon_{ap} = L(2N_f)^l \quad (5)$$

### 2.2 에너지와 피로수명에 관한 모델

피로파괴의 과정은 열, 진동 또는 음향전파(acoustic emission)의 형태로 나타나는 에너지의 연속적인 소산과 연관된다. 파괴가 발생될 때까지 소산되는 전체 에너지  $W_{fT}$ 와 반복 이력에너지  $\Delta W_p$ 를 포함하는 매개변수를 사용하여 반복 이력에너지  $\Delta W_p$ 는 소성변형률 이력의 면적으로 결정된다. Tong 등<sup>16)</sup>은 반복 이력에너지  $\Delta W_p$ 와 피로수명간의 관계를 식 (6)과 같이 제안하였고, 전체 에너지  $W_{fT}$ 와 피로수명간의 관계를 식 (7)과 같이 제안하였다. 이것들은 TWX 반복 에너지 모델과 TWX 전체 에너지 모델로 알려져 있다.  $W'_f$ ,  $W'_{fT}$   $\alpha$ 와  $\beta$ 는 대상 재료에 대한 계수 및 지수이다.

$$\Delta W_p = W'_f(2N_f)^\beta \quad (6)$$

$$W_{fT} = W'_{fT}(2N_f)^\alpha \quad (7)$$

에너지-변형률 진폭 모델은 응력과 변형률의 비율에 대한 피로수명의 관계를 나타내는데 식 (8)~(12)와 같이 전체 소산에너지는 변형률 범위 및 최대 응력과의 관계로 나타낸다.

$$W_{fT} = W_a(\epsilon_a)^p \quad (8)$$

$$W_{fT} = W_{ap}(\epsilon_{ap})^q \quad (9)$$

$$W_{fT} = W_{fa}(f_{max}\epsilon_a)^r \quad (10)$$

$$W_{fT} = W_{fap}(f_{max}\epsilon_{ap})^s \quad (11)$$

$$W_{fT} = c_1(f_{max})^{c_2} \quad (12)$$

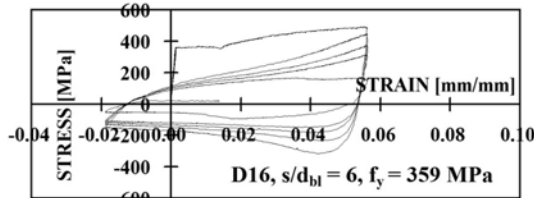
### 3. 축방향철근 저주파 피로 실험

국내의 현장에서 사용되는 구조적인 철근콘크리트 부재에서의 철근은 표면 처리(casehardened)된 마디가 있는 이형철근이 사용된다. 따라서 철근에 대한 실험의 경우 가공되지 않은 실제의 단면과 길이 및 표면 등이 있는 그대로의 상태를 가진 실험체로 수행되어야 기본적으로 실제적인 철근의 거동을 파악할 수 있다. 재료비선형 해석 결과를 기초로 Table 1과 같이 실험변수를 결정하여 전체 81개 실험체에 대해 실험을 수행하였다.<sup>17)</sup> Table 1에 나타난  $n$ 은 철근의 항복강도 규격을 기준으로 한 항복변형률의 배수이다. 실험변수 중 변형률 범위, 횡방향철근 수직 간격과 축방향철근 지름의 비율( $s/d_{bl}$ )와 항복강도가 철근의 파단이 발생할 때까지의 반복횟수에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고 Fig. 1에 응력-변형률 이력과 피로수명을 나타내었다.

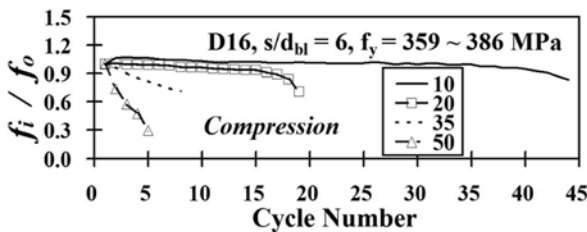
**Table 1** Variables of low-cycle fatigue test

Class	SR*	$s/d_{bl}$	Bar diameter (mm)	$f_y$ (MPa)	$n$
GROUP I	-3	6	15.9(D16)	300	10, 20, 35, 50, 65
GROUP II	-1	6		400	20, 35, 65
GROUP III	-3	8	19.1(D19)	500	20
GROUP III		10	22.2(D22)		

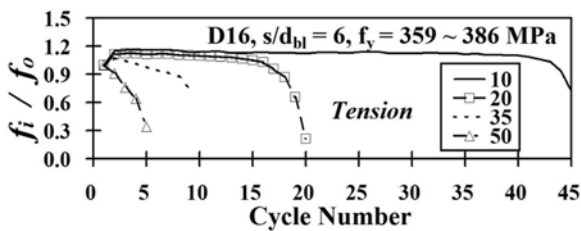
$$*S.R. = \frac{\epsilon_{max}}{\epsilon_{min}} = \frac{tension\ strain}{compression\ strain}$$



(a) Hysteresis loops of stress-strain for 50 $\epsilon_y$



(b) Cycle numbers for tension strain



(c) Cycle numbers for compression strain

**Fig. 1** Test result of GROUP I (D16,  $f_y = 359\sim 386$  MPa)

### 4. 저주파 피로 수정모델의 제안

이 연구에서는 수행된 변형률 진폭의 범위가 0.0075~0.0752이므로 평균응력 및 평균변형률 효과는 피로수명에서 무시되었다. Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 실험에 수행된 81개의 실험체에 대한 소성변형률과 피로수명간의 관계를 Coffin-Manson 모델의 기본 형태에 기초하여 식 (13)의 평균값 수정모델을 제안하였으며 안전측 설계 및 평가를 위한 하한값 수정모델을 Fig. 2(b), 식 (14)와 같이 제안하였다. 하한값 수정모델은 도로교설계기준의 횡방향철근 간격 규정과 심부구속을 위한 횡방향철근 간격 규정과 동일한  $6s/d_{bl}$  실험 결과의 95% 신뢰수준에 해당된다. Fig. 2(c)는 철근 길이에 대한 지름의 비율이 6이고 변형률 비율 S.R.이 -3인 실험체들(39개)의 결과이다. Fig. 2(d)는 철근 길이에 대한 지름의 비율이 6이고 변형률 비율 SR이 -1인 실험체들(28개)의 결과이다. Fig. 2(e)에 나타난 철근 길이에 대한 지름의 비율이 8과 10이고 변형률 비율 SR이 -3인 실험체들(18개)의 결과이다. Mander 등<sup>14)</sup>도 Coffin-Manson 모델의 기본 형태에 기초하여 수정모델을 제안한 바 있는데 제안 모델은 식 (15)와 같다.

$$\epsilon_{ap} = 0.0455(2N_f)^{-0.5056} \quad (13)$$

$$\epsilon_{ap} = 0.033(2N_f)^{-0.5056} \quad (14)$$

$$\epsilon_{ap} = 0.0777(2N_f)^{-0.486} \quad (15)$$

Figs. 3~5는 변형률과 파단이 발생하는 시점까지의 반복횟수의 관계를 나타내는 모델들이다. Fig. 3은 국내 현장에서 사용되는 철근 실험체(81개)에 대한 실험 결과를 토대로 Koh-Stephens 모델을 수정한 모델로 전체 변형률과 반복횟수의 관계를 나타낸다. Fig. 4는 실험 결과를 토대로 Smith 등의 모델을 수정한 모델로 반복횟수에 대한 최대응력과 전체 변형률을 곱한 값과의 관계를 나타낸다. Fig. 5는 Lorenzo-Laird 모델을 수정한 모델로 반복횟수에 대한 최대응력과 소성변형률을 곱한 값과의 관계를 나타낸다. Figs. 6과 7은 에너지와 파단이 발생하는 시점까지의 반복횟수의 관계를 나타내는 모델들이다. Fig. 6은 피로수명의 1/2이 되는 횟수의 이력 에너지와 피로수명과의 관계를 나타내는 수정 모델이고, Fig. 7은 전체에너지와 피로수명과의 관계를 수정한 모델이다. 저주파 피로 수정 모델들을 Table 2에 정리하였다.

### 5. 제안된 저주파 피로 수정모델의 검증

비균질한 재료적 특성을 지닌 콘크리트와 철근으로 합성된 부재는 탄성계수, 변형률 거동의 차이, 균열, 부착, 강성 변화 등으로 인하여 매우 복잡한 비선형 거동을 나타낸다. 지진과 같은 반복횡하중과 축하중을 받는 철근콘크리트 부재에 대한 비선형 시간이력해석(nonlinear time

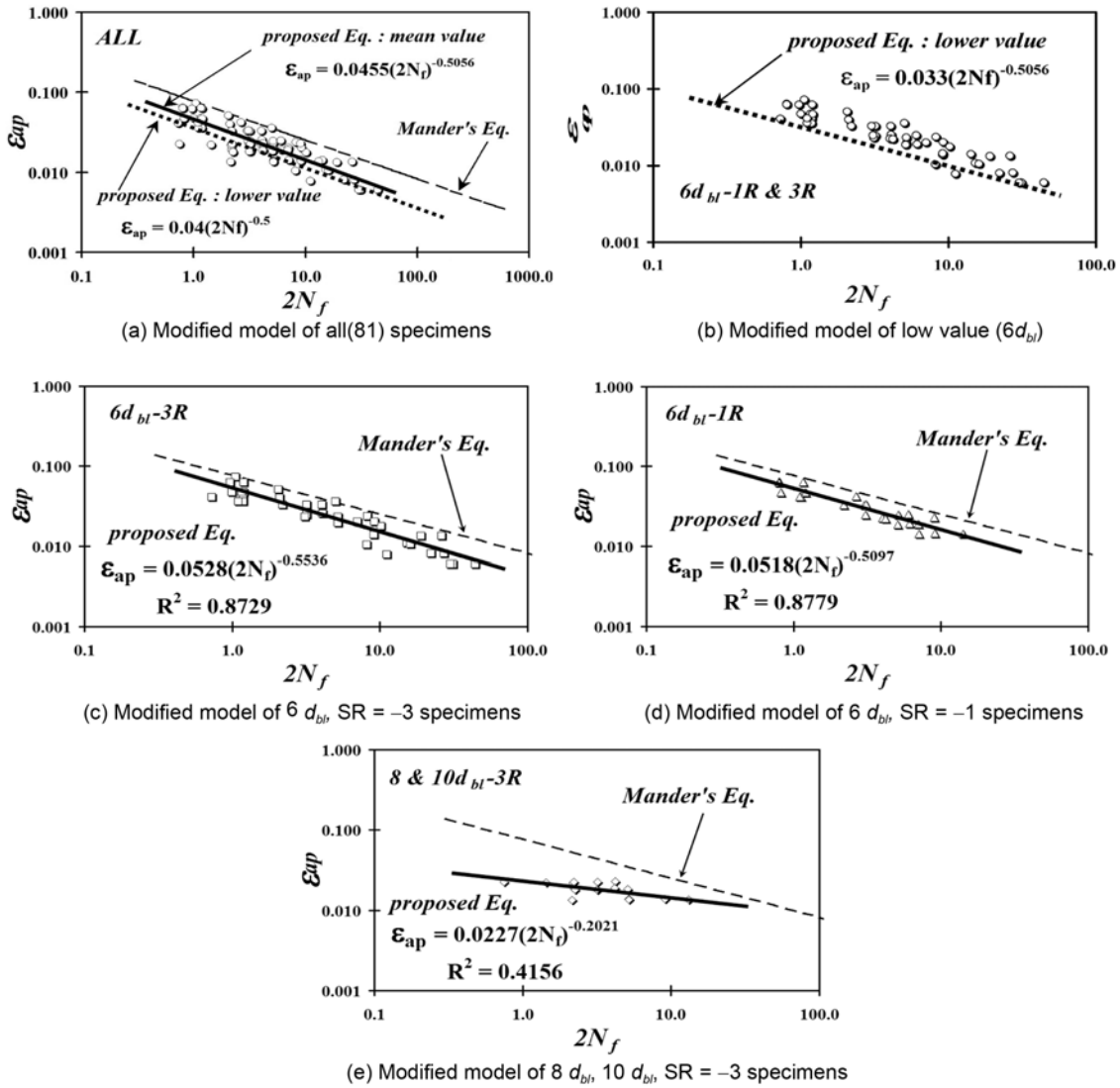


Fig. 2 Proposed model (Coffin-Manson model)

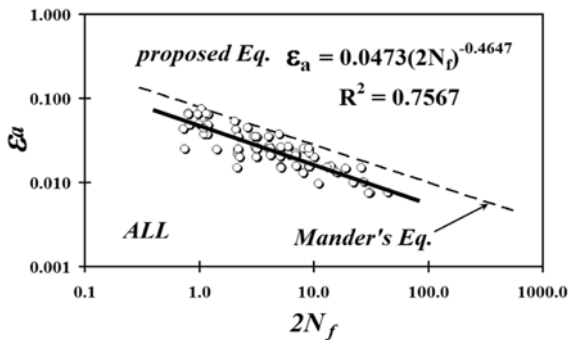


Fig. 3 Proposed model (Koh-Stephens model)

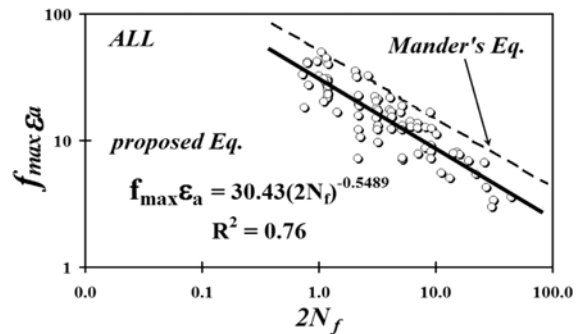


Fig. 4 Proposed model (Smith et al. model)

history analysis)이나 재료 비선형 해석을 수행할 경우 재료의 구성방정식 즉, 응력-변형률 곡선의 선택은 섬유요소의 파괴한계를 결정하기 때문에 해석의 결과에 큰 영향을 미칠 수 있다.

국외에서 제안된 저주파 피로 모델의 수정된 제안 모델들 중 재료모델의 검증에는 Coffin-Manson 수정 모델을 사용하였다. 타 모델들은 평균변형률, 알루미늄 강재, 스

테인레스 강재, 공업용 고강도 또는 고성능의 합금 강재 등의 재료들에 기초하였고, Coffin-Manson 모델은 철근의 저주파 피로 수명을 규명하는데 가장 많이 적용되므로 이 모델에 기초하여 철근콘크리트 부재에서의 철근의 수명을 파악하는 연구에 이용하였으며 실험 결과와의 비교에서 이 모델의 결정계수도 비교적 높은 점이 고려되었다.

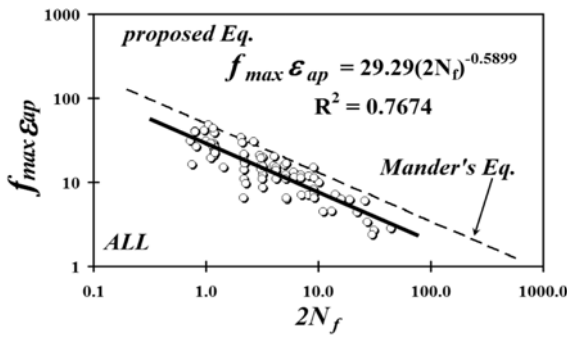


Fig. 5 Proposed model (Lorenzo-Laird model)

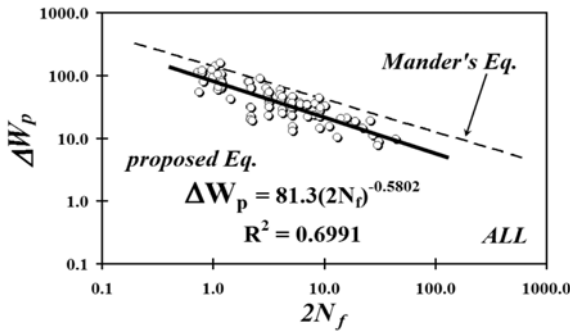


Fig. 6 Proposed model (TWX cyclic energy model)

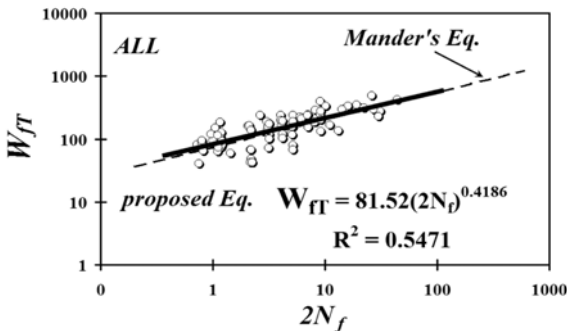


Fig. 7 Proposed model (TWX total energy model)

### 5.1 비선형 해석

철근콘크리트 교각의 경우 단면의 특성 및 작용하중 등의 여러 가지 요인에 의해 그 거동 특성이 달라지며 합리적인 설계를 위해서는 근본적으로 대상 구조물의 모멘트-곡률 관계 및 하중-변위 관계를 구성하는 것이 합리적이라고 할 수 있다. 콘크리트와 철근의 재료비선형 및 반복하중에 의한 특성 등을 고려한 비선형해석을 Fig. 8과 같이 수행하였다.

### 5.2 띠철근과 보강띠철근으로 구성된 횡구속철근

원형띠철근과 보강띠철근의 조합으로 구성된 심부구속철근의 경우에 보강띠철근의 영향을 고려하기 위해 심부구속철근비를 식 (16)으로 계산하여 사용하였다.

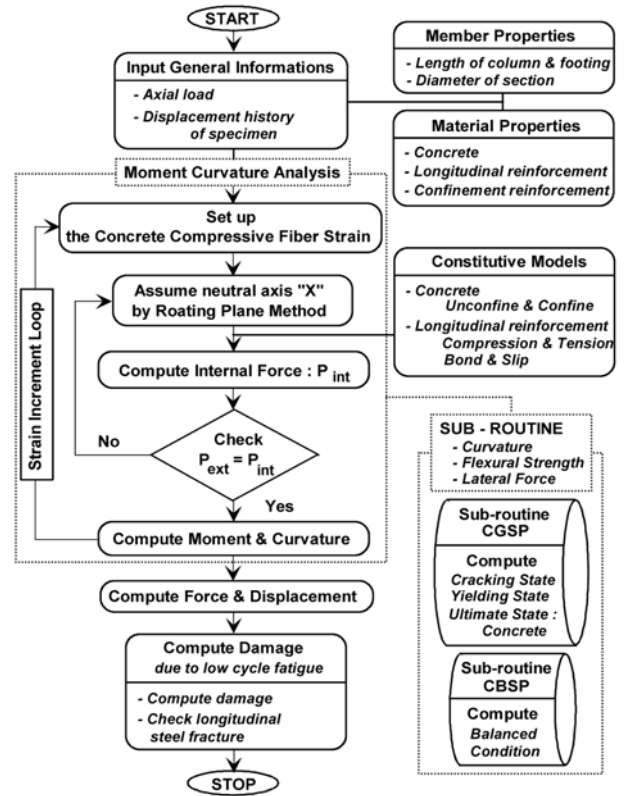


Fig. 8 Flow chart

$$\rho_s = \frac{A_{sp}\pi d_s}{\frac{\pi}{4}d_s^2 s} + \frac{nA_{ct}d_s}{\frac{\pi}{4}d_s^2 s} = \frac{4(A_{sp}\pi + nA_{ct})}{\pi d_s s} \quad (16)$$

여기서  $\rho_s$  : 심부구속철근비,  $d_s$  : 심부콘크리트의 직경  
 $n$  : 보강띠철근의 개수  
 $A_{sp}$  : 원형띠철근 1개의 단면적  
 $A_{ct}$  : 보강띠철근 1개의 단면적

### 5.3 축방향철근의 유효 파단반복횟수 결정

국내·외에서 수행된 철근콘크리트 기둥의 실험은 대부분 각각 다른 변위 단계에 대하여 수행되었다. 준정적 실험의 경우 항복변위 또는 변위비에 대한 비율 또는 변위를 결정하여 실험을 수행하고, 진동대 실험의 경우에도 시간에 따른 변위가 다르게 나타난다. 따라서 저주파 피로 모델, 즉 동일한 변형률에 대한 반복횟수의 함수 또는 식을 각기 다른 변위 단계에 대한 실험 결과에 직접 적용하기에는 무리가 따른다.

이 연구에서는 일정 진폭에 대한 반복횟수와 각각 다른 진폭에 대한 반복횟수에 대한 상관관계를 파악하고 유효 파단 반복횟수(effective number cycles to fracture)를 결정하고자 한다. 변형률과 피로수명의 관계를 나타내는 식 (13) 및 (14)는 철근만에 대한 실험에서 얻은 재료단위에 관한 식이므로 부재에 적용시에는 보정이 필요하다. 콘크리트 강도, 축력비, 축방향 및 횡방향철근 상세, 콘크리트와 철근의 결합특성 등을 명확히 고려해야 되나, 현

**Table 2** Proposed fatigue-life models

Original model		Modified model	
Name	Equation	Equation	R <sup>2</sup>
Coffin-Manson <sup>6,7)</sup>	$\epsilon_{ap} = 0.0777(2N_f)^{-0.486}$	mean value : $\epsilon_{ap} = 0.0455(2N_f)^{-0.5056}$ lower value : $\epsilon_{ap} = 0.033(2N_f)^{-0.5056}$	0.7566
Koh-Stephens <sup>8)</sup>	$\epsilon_a = 0.0795(2N_f)^{-0.448}$	$\epsilon_a = 0.0473(2N_f)^{-0.4647}$	0.7567
Smith et al. <sup>9)</sup>	$f_{\max}\epsilon_a = 51.6(2N_f)^{-0.541}$	$f_{\max}\epsilon_a = 30.425(2N_f)^{-0.5489}$	0.7600
Lorenzo-Laird <sup>10)</sup>	$f_{\max}\epsilon_{ap} = 50.6(2N_f)^{-0.581}$	$f_{\max}\epsilon_{ap} = 29.291(2N_f)^{-0.5899}$	0.7674
TWX cyclic energy	$\Delta W_p = 142(2N_f)^{-0.550}$	$\Delta W_p = 81.3(2N_f)^{-0.5802}$	0.6991
TWX total energy	$W_{fT} = 74.4(2N_f)^{0.439}$	$W_{fT} = 81.52(2N_f)^{0.4186}$	0.5471
Energy-strain amplitude	$W_{fT} = 6.72(\epsilon_a)^{-0.961}$	$W_{fT} = 60.52(\epsilon_a)^{-0.2066}$	0.0604
Energy-plastic strain amplitude	$W_{fT} = 8.00(\epsilon_p)^{-0.884}$	$W_{fT} = 34.502(\epsilon_p)^{-0.3752}$	0.1485
Energy-stress×amplitude	$W_{fT} = 1840(f_{\max}\epsilon_a)^{-0.80}$	$W_{fT} = 335.74(f_{\max}\epsilon_a)^{-0.6218}$	0.1282
Energy-stress×plastic strain amplitude	$W_{fT} = 1456(f_{\max}\epsilon_{ap})^{-0.745}$	$W_{fT} = 314.98(f_{\max}\epsilon_{ap})^{-0.3086}$	0.1348

실적으로 모든 영향을 고려하기는 어려움이 있다. 이 연구에서는 국내<sup>18-22)</sup>에서 실험된 기둥 실험체 50개와 국외<sup>23-26)</sup>에서 실험된 기둥 실험체 13개 등 전체 63개의 실험모형 실험체 및 축소모형 실험체의 실험 결과를 대상으로 재료 모델을 적용한 비선형해석 결과와 비교·분석하여 다양한 영향인자들 중 가장 큰 영향을 미치는 인자들(축력비, 횡방향철근비)의 영향정도를 식 (17)-(20)과 같이 보정계수로 도출하여 적용하였다. 콘크리트와 철근의 결합특성을 반영하기 위해 Assa 등<sup>27)</sup>의 부착슬립 모델을 적용하였다. 식 (17)의  $k_{rc}$ 는 축력비와 횡방향철근비의 특성을 나타내는 계수이며  $N_{frc}$ 는 동일한 변위 또는 변형률에 대한 저주파 피로 특성에 의한 파단횟수에서 다른 진폭에 대한 파단횟수로 변환된 유효 파단 반복횟수이다.  $k_{rc}$ 는 축력비, 횡방향철근비에 따라 식 (18)-(20)로 나타내어진다.

$$N_{frc} = k_{rc} \cdot (2N_f) \tag{17}$$

$$k_{rc} = k_{AFR} \cdot k_{TSR} \cdot k_{LSR} \tag{18}$$

$$\left( \begin{array}{l} k_{AFR} = \alpha_{AFR} \left( \frac{P}{f_{cu} A_g} \right)^{\beta_{AFR}} \\ k_{AFR} \leq 12.81 \\ \alpha_{AFR} = 0.051 \\ \beta_{AFR} = -2.4 \end{array} \right) \tag{19}$$

$$\left( \begin{array}{l} k_{TSR} = \alpha_{TSR} (\rho_s)^{\beta_{TSR}} \\ k_{TSR} \leq 1.20 \\ \alpha_{TSR} = 7150 \\ \beta_{TSR} = 2.07 \end{array} \right) \tag{20}$$

또한 부재에서의 축방향철근의 파단은 Miner<sup>5)</sup>가 제안한 손상모델을 적용하였다. 식 (21)-(23)의 손상모델은 각각의 반복횟수에 대한 손상지수의 합이 1이 될 때 저주파 피로에 의한 파단이 발생한다. 이 해석에서는 식 (13)에서 구해지는  $(2N_f)$ 를 식 (17)에 대입하여 유효 파단 반복횟수( $N_{frc}$ )를 구한 후 각각의 부재 변위에 대한 손상지수의 합이 1이 되는 변위를 축방향철근이 저주파 피로에 의해 파단되는 변위로 결정하였다.

$$D_i = \frac{1}{(N_{frc})_i} \tag{21}$$

$$D = \sum \frac{1}{N_{frc}} \tag{22}$$

$$\sum_{i=1}^I D_i = 1 \tag{23}$$

**5.4 일정변위에 대한 영남대 기둥 실험 결과 비교**

이 연구를 위하여 축소모형 실험체를 제작하였고 일정 변위 실험을 수행하고, 실험 결과를 이용하여 제안된 재료특성 모델을 검증하였다. 실험 결과의 하중-변위 이력 곡선 비교하기 위하여 비선형해석 프로그램 YNU-RCCOL을 이용하여 해석을 수행하였다. 단면의 직경은 400 mm 이고 횡하중 재하 높이는 1,600 mm로 형상비는 4.0이다. 축방향철근은 D16이 8개 배근되었고 횡방향철근은 D10 철근을 사용하였다. 피복두께는 20 mm이다. 콘크리트 강도는 23.3 MPa이고 축방향철근과 횡방향철근의 항복강도는 356 MPa이다. 축방향철근비는 0.0126이며 횡방향철근

비는 0.0088로 수직간격 96 mm이다. 횡방향철근의 수직간격은 축방향철근의 6배로 결정하였다. 축력은 333.4 kN 이고 축력비는 12%이며 단면상세와 재료특성은 Table 3에 정리하였다. 표준시험체인 SPN-LN-23-12는 변위비  $\pm 0.25\%$ ,  $\pm 0.5\%$ ,  $\pm 1.0\%$ ,  $\pm 1.5\%$ ,  $\pm 2.0\%$ ,  $\pm 2.5\%$ ,  $\pm 3.0\%$  등에 대하여 실험을 진행하였다. 변위비 3% 이후에는 1%씩 증가시키면서 진행되었다. 전체 반복 24회인 변위비 7%에서 축방향철근이 파단되었다. SPN-LN-23-12-C 실험체는 변위비  $\pm 4.0\%$ 에 대하여 파괴될 때까지 반복하중을 재하 하였으며 26회 반복에서 축방향철근이 파단되었다. SPN-LN-23-12 계열 실험체에 대한 해석 결과는 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었으며 Tables 4, 5에 파괴유형과 변위 및 반복횟수를 비교하여 나타내었다. SPN-LN-23-12 실험체에 대한 해석은 실험 결과의 95%에 해당하는 반복횟수 22.9회 반복에서 축방향철근의 파단을 예측하였다. SPN-LN-23-12-C 실험체의 경우에 해석 결과는 실험 결과의 95%에 해당하는 24.7회 반복 후 축방향철근의 파단을 예측하여 실험 결과와 일치하는 파괴유형을 나타내었다.

### 5.5 일정변위에 대한 NCEER 기둥 실험 결과 비교

제안된 재료특성 모델의 검증을 위하여 NCEER(National Center of Earthquake Engineering Research, 1997)에서 수행된 Kunnath 등<sup>23)</sup>의 실험 결과를 이용하여 검증하였다. 실험체들의 단면상세와 재료특성은 Table 6에 나타내었다. Fig. 11~12, Tables 7과 8에 실험 결과와 해석 결과를 비교하여 나타내었다. 4개 실험체에 대한 실험 결과 중 A2, A4, A6 실험체는 횡방향철근의 파단으로 실험체가 파괴되었고 제안된 저주파 피로 모델을 적용한 해석에서 A2

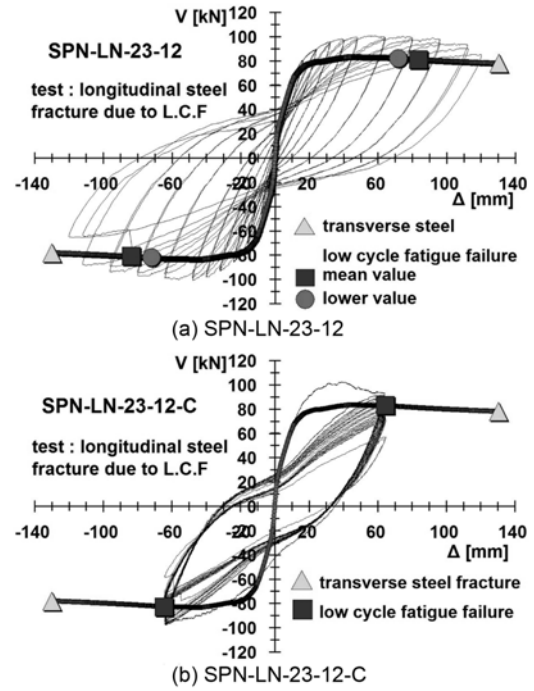


Fig. 9 Comparison of test and analysis result (SPN-LN series)

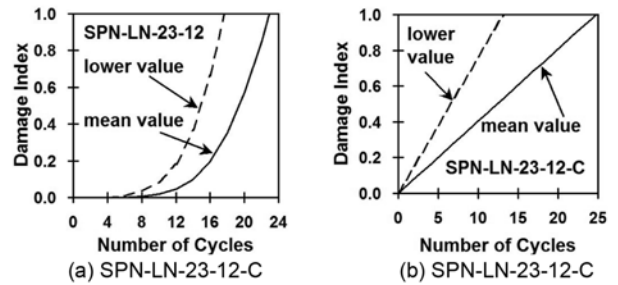


Fig. 10 Damage index and number of cycle (SPN-LN series)

Table 3 Test column details and material properties

Specimens	Longitudinal steel	Transverse steel				P (kN)	Axial load ratio (%)
		$f_{yh}$	s (mm)	$\rho_s$	$\rho_s / \rho_{s, code}$		
SPN-LN-23-12	8-D16 $f_y = 356$ MPa	$f_{yh} = 356$ MPa (D10)	96	0.0088	0.65	333	12
SPN-LN-23-12-C	$\rho_g = 1.26\%$ cover = 20 mm						

Table 4 Comparison of failure mode (SPN-LN series)

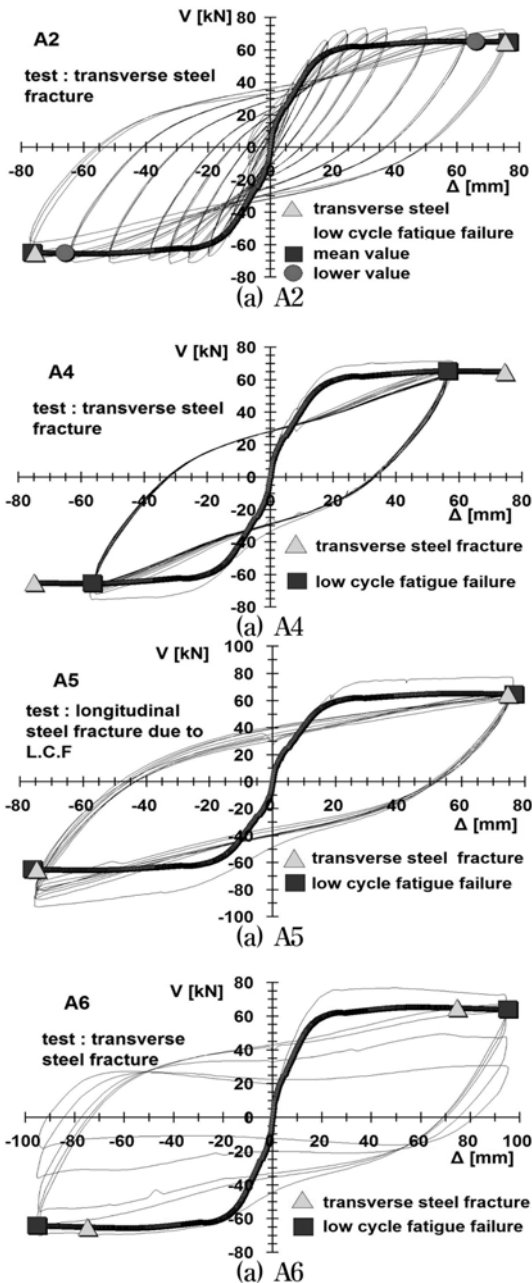
Specimens	Failure mode				Remark
	Test result		Analysis result		
	longitudinal steel fracture	transverse steel fracture	longitudinal steel fracture	transverse steel fracture	
SPN-LN-23-12	occurrence	-	prediction	-	correct
SPN-LN-23-12-C	occurrence	-	prediction	-	correct

Table 5 Comparison of test and analysis result (SPN-LN series)

Specimens	Test result		Analysis result					Remark				
	$\Delta_u$ (mm) ①	No. of cycle ②	$\Delta_u$ (mm)		No. of cycle		③/①	④/①	⑤/①	⑥/②	⑦/②	
			longitudinal steel mean ③	transverse steel lower ④	mean ⑥	lower ⑦						
SPN-LN-23-12	120.2	24	83.7	71.9	130.5	22.9	17.6	0.70	0.60	1.09	0.95	0.73
SPN-LN-23-12-C	64.2	26	64.2	-	130.5	24.7	13.2	1.00	-	2.03	0.95	0.51

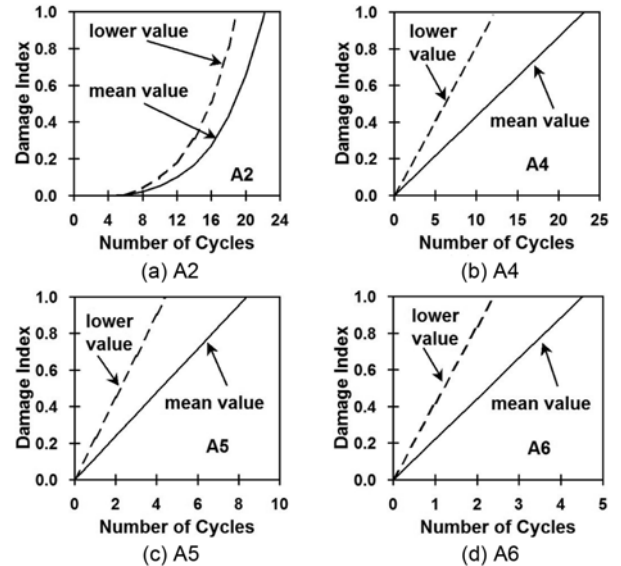
**Table 6** Test column details and material properties

Class	Content	Class	Content	Class	Content
$f'_c$ (MPa)	29.0.	s (mm)	19	$\rho_s$ (%)	0.94
$f_{yl}$ (MPa)	448	cover (mm)	14.5	$\rho_l$ (%)	2.04
$f_{yh}$ (MPa)	434	$d_l$ (mm)	9.5	P (kN)	200
$f_{su}$ (MPa)	690	$A_g$ (mm <sup>2</sup> )	73062	$d_s$ (mm)	4.0
D (MPa)	305	$A_{core}$ (mm <sup>2</sup> )	61575	H (mm)	1372



**Fig. 11** Comparison of test and analysis result (A series)

와 A6 실험체의 경우는 횡방향철근이 축방향철근보다 먼저 파단되는 실험과 동일한 파괴유형을 예측하였다. 횡방향철근의 파단 예측은 에너지 평형이론에 기초하여 제안된 Mander 등<sup>28)</sup>의 식을 수정하여 적용하였다. A5 실험체는 축방향철근의 파단으로 실험체가 파괴되었고 비선형



**Fig. 12** Damage index and number of cycle (A series)

해석에서는 횡방향철근이 축방향철근보다 먼저 파단되는 파괴유형을 예측하였다.

A2 실험체의 파괴유형은 극한변위 76.5 mm에서 횡방향철근의 파단이었으며 해석 결과의 극한변위는 저주파 피로에 의한 축방향철근의 파단이 75.6 mm(하한값 모델의 경우 66.7 mm)이고 횡방향철근의 파단이 74.6 mm로 예측되어 실험 결과와 동일한 파괴유형을 예측하였다. 또한 실험 결과의 74%에 해당하는 반복횟수 22.9회 반복에서 축방향철근의 파단을 예측하였다. A4 실험체의 경우에 26회 반복에서 횡방향철근이 파단되었는데 해석 결과는 23.2회 반복에서 축방향철근의 파단을 예측하여 실험 결과와 다른 파괴유형을 나타내었다. A5 실험체의 경우에 10회 반복에서 축방향철근이 파단되었으며 해석 결과는 횡방향철근의 파단을 예측하여 실험 결과와 다른 파괴유형을 나타내었다.

A6 실험체의 경우에 5회 반복에서 횡방향철근이 파단되었으며 해석 결과의 횡방향철근의 파단에 의한 극한변위는 74.6 mm로 예측하여 실험 결과와 동일한 파괴유형을 예측하였다. 해석 결과에서 축방향철근의 파단은 4.5회 반복에서 저주파 피로에 의한 축방향철근의 파단을 예측하였다.

## 6. 결 론

- 1) 국내 현장에서 사용되는 81개 철근 실험 결과를 토대로 변형률과 피로수명의 관계, 에너지와 피로수명의 관계에 대한 기존 모델들의 기본 형태에 기초하여 수정모델들을 제안하였다. 하중-변위 이력곡선 또는 포락곡선을 예측하는 해석에서 제안된 모델들 중 선택할 수 있도록 제시하였다. Coffin-Manson 모델의 기본 형태에 기초하여 소성변형률과 피로수명간의 관계를 평균값 수정모델로 제안하였으며 안전측 설



**Table 7** Comparison of failure mode (A series)

Specimens	Failure mode				Remark
	Test result		Analysis result		
	longitudinal steel fracture	transverse steel fracture	longitudinal steel fracture	transverse steel fracture	
A2	-	occurrence	-	prediction	correct
A4	-	occurrence	prediction	-	incorrect
A5	occurrence	-	-	prediction	incorrect
A6	-	occurrence	-	prediction	correct

**Table 8** Comparison of failure mode (A series)

Specimens	Test result		Analysis result					Remark				
	$\Delta_u$ (mm) ①	No. of cycle ②	$\Delta_u$ (mm)			No. of cycle		③/①	④/①	⑤/①	⑥/②	⑦/②
			longitudinal steel	transverse steel ⑤	mean ⑥	lower ⑦						
							mean ③					
A2	76.5	30	75.6	66.7	74.6	22.2	18.9	0.99	0.87	0.98	0.74	0.63
A4	57.0	26	57.0	-	74.6	23.2	12.3	1.00	-	1.31	0.89	0.47
A5	75.0	10	75.0	-	74.6	8.4	4.4	1.00	-	0.99	0.84	0.44
A6	94.8	5	94.8	-	74.6	4.5	2.4	1.00	-	0.79	0.90	0.48

계 및 평가를 위한 하한값 수정모델을 제안하였다. 하한값 수정모델은 설계기준의 횡방향철근 간격 규정과 동일한  $6s/d_{bl}$  실험 결과의 95% 신뢰수준에 해당된다.

- 철근의 저주파 피로 수명을 규명하는데 가장 많이 적용되고 실험 결과와의 비교에서 상관계수도 비교적 높은 Coffin-Manson 수정 모델을 비선형 해석에 적용하여 재료모델을 검증하였고 손상모델은 Miner의 모델을 적용하였다. 저주파 피로 모델을 각기 다른 변위 단계에 대한 부재 실험 결과에 적용하기 위해 콘크리트와 철근의 반복특성, 축력비, 횡방향철근비를 고려한 유효 파단 반복횟수와 계수들을 도출하였고 재료단위 모델을 부재단위에 적용하기 위한 방법론을 제시하였다.
- 재료모델을 검증하기 위해 축소모형 실험체를 제작하여 일정변위 실험 및 준정적 실험(증가변위 실험)을 수행하였다. 해석 결과의 극한변위는 준정적 실험 결과(120.2 mm)의 70%에 해당하는 83.7 mm를 예측하였다. 일정변위 실험 결과에서 26회 반복재하시 축방향철근이 파단되었고, 해석 결과에서도 실험 결과의 95%에 해당하는 24.7회 반복에서 저주파 피로에 의한 축방향철근의 파단을 예측하였다.
- 외국에서 실험이 수행된 A2 실험체의 파괴유형은 극한변위 76.5 mm에서 횡방향철근의 파단이었으며 해석 결과는 74.6 mm에서 횡방향철근의 파단을 예측하여 실험 결과와 동일한 파괴유형을 예측하였다. A4 실험체와 A5 실험체에 대한 해석 결과는 실험 결과와 다른 파괴유형을 예측하였다. A6 실험체에 대한 해석 결과는 실험 결과의 79%에 해당하는 74.6 mm에서 횡방향철근의 파단을 예측하여 실험 결

과와 동일한 파괴유형을 예측하였다.

- 실험 결과의 파괴유형에 대한 예측정도와 같이 극한 변위의 예측 정도를 확보하기 위해서는 재료들의 결합 특성, 강성 변화, 이력에너지 등에 대한 추가연구가 수행되어야 한다고 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단(KBRC) 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

### 참고문헌

- Chang, G. A. and Mander, J. B., "Seismic Energy Based Damage Analysis of Bridge Columns: Part-Evaluation of Seismic Capacity," *Technical Report NCEER-94-0006*, NCEER, New York, 1994, pp. 2-57~2-58.
- Dutta, A. and Mander, J. B., "Energy Based Methodology for Ductility Design of Concrete Columns," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 12, 2001, pp. 1374~1381.
- Kocanda S., *Fatigue Failure of Metals*, Sijthoff & Noordhoff International Publishers, Poland, 1978, 379 pp.
- Fuchs, H. O. and Stephens, R. I., *Metal Fatigue in Engineering*, Willey Interscience, New York, 1980, 472 pp.
- Miner, M. A., "Cumulative Damage in Fatigue," *Journal of Applied Mechanics*, Trans. ASME, Vol. 67, 1945, pp. A159~A164.
- Manson, S. S., "Behavior of Materials under Conditions of Thermal Stress," *Heat Transfer Symposium*, University of Michigan Engineering Research Institute, 1953, pp. 9~75.
- Coffin, L. F. Jr., "A Study of the Effects of Cyclic Thermal

- Stress on a Ductile Metal,” *Trans. ASME*, Vol. 76, 1954, pp. 931~950.
8. Koh, S. K. and Stephens, R. I., “Mean Stress Effects on Low Cycle fatigue for a High Strength Steel,” *Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 14, No. 4, 1991, pp. 413~428.
  9. Smith, K. N., Watson, P., and Topper, T. H., “A Stress-strain Function for the Fatigue of Metals,” *Journal of Materials*, ASTM, Vol. 5, No. 4, 1970, pp. 767~778.
  10. Lorenzo, F. and Laird, C., “A New Approach to Predicting Fatigue Life Behavior under the Action of Mean Stresses,” *Materials Science and Engineering*, Vol. 62, 1984, pp. 205~210.
  11. Hsu, T. T. C., *Unified Theory of Reinforced Concrete*, CRC Press, Inc., Boca Raton, 1993, pp. 205~256.
  12. Maekawa, K., Pimanmas, A., and Okamura, H., *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon press, New York, 2003, pp. 682~711.
  13. Shin, H. M., “Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Members Subjected to lead Reversals,” Doctoral Thesis, University of Tokyo, 1988, 224 pp.
  14. Mander, J. B., Panthaki, F. D., and Kasalanati, A., “Low-Cycle Fatigue Behavior of Reinforcing Steel,” *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 6, No. 4, 1994, pp. 453~468.
  15. Dodd, L. L. and Restrepo-Posada, J. I., “Model for Predicting Cycle Behavior of Reinforcing Steel,” *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, No. 3, 1995, pp. 433~445.
  16. Tong, X., Wang, D., and Xu, H., “Investigation of Cyclic Hysteresis Energy in Fatigue Failure Process,” *International Journal of Fatigue*, Vol. 11, No. 5, 1989, pp. 353~359.
  17. 이재훈, 고성현, “축방향철근의 저주파 피로 거동,” 콘크리트학회 논문집, 22권, 2호, pp.
  18. 이재훈, 배성룡, 윤석구, “나선철근교각의 내진성능실험,” 대한토목학회논문집, 21권, 1-A호, 2001, pp. 109~121.
  19. 이재훈, 김광수, 배성룡, 윤석구, “고강도콘크리트 나선철근교각의 내진거동특성,” 대한토목학회논문집, 21권, 5-A호, 2001, pp. 707~718.
  20. 이재훈, 석상근, 윤석구, “원형띠철근 교각의 내진성능에 관한 실험적 연구,” 대한토목학회논문집, 22권, 1-A호, 2002, pp. 159~170.
  21. 이재훈, 김광수, 배성룡, “지진하중에 대한 고강도콘크리트 나선철근교각의 한정연성거동,” 대한토목학회논문집, 23권, 3-A호, 2003, pp. 385~395.
  22. 박창규, 정영수, 고성현, 이재훈, “주철근 겹침이음된 실물교각의 횡구속 정도에 따른 내진성능평가,” 콘크리트학회 논문집, 16권, 5호, 2004, pp. 687~696.
  23. Kunnath, S., K., El-Bahy, A., Taylor, A., and Stone, W., “Cumulative Seismic Damage of Reinforced Concrete Bridge Piers,” *Technical Report NCEER-97-0006*, National Center for Earthquake Engineering Research, 1997, 147 pp.
  24. Calderone, A. J., Lehman, D. E., and Moehle, J. P., “Behavior of Reinforced Concrete Bridge Columns Having Varying Aspect Ratios and Varying Lengths of Confinement,” *Pacific Earthquake Engineering Research Center Report*, 2000/08, 2000. 136 pp.
  25. Kowalsky, M. J., Priestley, M. J. N., and Seible, F., “Shear and Flexural Behavior of Lightweight Concrete Bridge Columns in Seismic Regions,” *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 1, 1999, pp. 136~148.
  26. Stone, W. C. and Cheok, G. S., “Inelastic Behavior of Full-scale Bridge Columns Subjected to Cyclic Loading,” *NIST BSS 166, Building Science Series*, Center for Building Technology, National Institute of Standards and Technology, 1989, 252 pp.
  27. Assa, B. and Nishiyama, M., “Prediction of Load-Displacement Curve of High-strength Concrete Columns under Simulated Seismic Loading,” *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 5, 1998, pp. 547~557.
  28. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804~1826.

**요약** 이 연구는 기존 모델에 대한 검증 및 국내에서 생산되고 있는 철근이 반복하중을 받는 경우의 파괴특성에 대한 적합한 모델을 제시하는 것을 목적으로 한다. 이 논문은 철근콘크리트 하부구조(파일과 교각)에 배근된 축방향철근에 대한 저주파 피로 거동에 대한 모델링을 다루었고, 전체 81개의 저주파 피로 실험 데이터에 기초하여 저주파 피로 모델을 제안하였다. 제안된 저주파 피로 모델을 적용하여 비선형해석 프로그램을 개발하였고 원형 기둥 실험체에 대한 6개의 실험 결과를 대상으로 비선형 해석을 적용하고 제안모델의 정확성을 평가하였다.

**핵심용어** : 저주파 피로, 파괴, 축방향철근, 파괴양상