

# 인장 주근이 부식된 RC보의 비선형 해석

Nonlinear Analysis of RC Beams Damaged by Corrosion of Tension Main Rebar

신 성 우\*

Shin, Sung-Woo

이 한 승\*\*

Lee, Han-Seung

유 석 형\*\*\*

Yoo, Suk-Hyeong

## Abstract

This study was carried out to investigate quantitatively the relationship between the degree of rebar corrosion and the strength of reinforced concrete beams. After producing equations for the relationship between both the tensile properties of rebars and bond properties and the corrosion percentage of rebars, finite element analysis and bending tests were conducted for RC beams damaged by corrosion of tension main rebar. As a result, it was made that the strength of RC beams damaged by corrosion could be practically simulated by FEM analysis using experimentally determined material properties representing the bond and the mechanical characteristics of corroded rebars.

## 요 지

철근의 부식율에 따른 철근 콘크리트 보의 구조적 성능 저하를 정량적으로 고찰하기 위하여 실험 및 해석을 수행하였다. 이를 위하여 먼저 부식철근의 인장실험과 부착성능 실험을 통하여 철근의 부식율에 따른 항복강도와 탄성계수 및 부착성능을 정량적으로 산정할 수 있는 구성방정식을 구성하고, 인장주근이 부식된 RC 보 실험결과와 산출된 부식모델을 반영한 비선형 해석 결과와 비교하였다. 결론적으로 본 연구에서 제시된 철근부식 모델을 이용한 비선형 해석을 통하여 인장주근이 부식된 철근 콘크리트 보의 휨 거동을 합리적으로 예측할 수 있음을 검증하였다.

**Keywords :** Corrosion, Bond strength, Bond stiffness, Finite element method

**핵심용어 :** 부식, 부착강도, 부착강성, 유한요소해석

\* 한양대학교 건축학부 교수

\*\* 한양대학교 건축학부 조교수

\*\*\* 한양대학교 STRESS 연구교수

E-mail : piter31@ihanyang.ac.kr 031-400-5132

•본 논문에 대한 토의를 2005년 6월 30일까지 학회로 보내  
주시면 2005년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 연구배경 및 목적

철근 콘크리트 구조물은 공용 사용기간 동안 안전성과 사용성 뿐 만 아니라 내구성이 확보되어야 한다. 그러나 콘크리트 구조물은 시간이 지남에 따라 외부환경의 영향으로 내구성이 저하되며, 이러한 내구성의 저하는 부재의 구조적 성능을 저하시키는 원인이 될 수 있다. 구조물의 내구성과 구조적 성능의 관계를 규명하기 위해서는 재료와 구조를 통합하는 종합적이고 체계적인 연구가 진행되어야하나, 국내에는 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지 않다.

콘크리트 구조물의 여러 가지 내구성 저하 현상은 매립된 철근의 부식을 촉진시키면서 부재의 구조적 성능을 저하시키게 된다. 따라서 철근이 부식된 RC부재의 구조적 성능평가는 보수보강 여부 판정의 중요한 근거가 된다. 철근이 부식된 부재의 내력저하 원인으로는 피복콘크리트의 균열발생에 의한 콘크리트 유효단면의 감소, 철근의 단면감소에 따른 철근의 역학적 성능 저하 및 철근과 콘크리트의 부착성능의 저하를 들 수 있다. 철근부식이 부재의 구조적 성능에 미치는 영향에 대한 정성적인 연구<sup>(1),(2)</sup>는 진행되어 왔으나, 철근 부식이 부재의 구조적 거동에 영향을 미치는 주요인들에 대하여 정량적으로 평가하고 이를 FEM해석에 활용할 수 있는 철근 부식모델에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 철근이 부식된 철근 콘크리트 보의 휨 거동을 FEM에 의하여 해석할 수 있는 철근 부식모델을 구성하고자 한다. 실험에서는 철근의 부식 정도를 변수로 하는 철근 및 철근과 콘크리트 부착요소의 구성식을 도출하기 위하여 철근의 인장시험 및 인발부착시험을 실시하였다. 또한, 철근 요소 및 부착요소의 구성식을 이용하여 인장주근이 부식된 RC 보의 유효요소 해석을 실시하고 그 결과를 인장주근이 부식된 RC 보의 재하실험 결과와 비교하여 각 재료 구성식의 타당성을 검증하였다.

## 2. 부식모델 산정

### 2.1 부식 철근의 구성식

일반적으로 FEM해석에서 사용하는 철근의 모델은 Fig. 1에 나타내는 바와 같이 Bi-Linear 모델을 사용하고 있으며, 그 구성식은 철근의 항복점 및 탄성계수로 구성되어 있다. 따라서 철근의 부식 정도를 식(1)과 같이 부식중량감소율( $\Delta w$ )로 표현하고 부식철근의 항복점 및 탄성계수를 철근의 부식 정도를 변수로 하여 산정하면 부식철근의 구성식을 작성할 수 있다.

$$\Delta w = \frac{\text{부식구간의부식감량}(g)}{\text{부식구간의철근중량}(g)} \times 100 \quad (1)$$

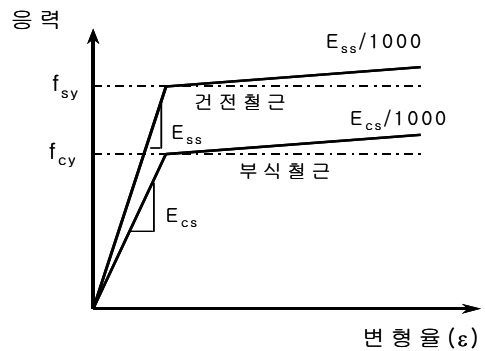


Fig. 1 부식철근의 응력-변형률 관계

그러나, 부식중량 감소율이 동일하더라도 항복점비(건전철근의 항복점에 대한 부식철근의 항복점비 ( $f_{cy}/f_{sy}$ ))는 부식된 철근의 단면형태(Fig. 2)에 따라 Fig. 3과 같이 다를 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 철근의 공식(pitting)을 고려할 수 있는 방법으로서 부식철근의 단면적은 건전철근의 단면적과 동일하게 하고 부식철근의 기계적 성질을 저하시키는 방법을 사용하였다.

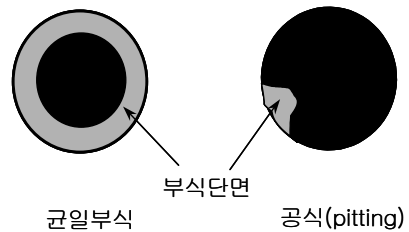


Fig. 2 부식단면의 형태

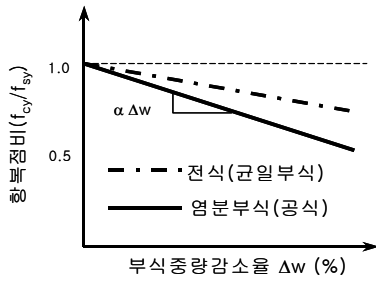


Fig. 3 부식중량감소율과 항복점비

또한, 철근 항복 후의 인장 경화를 나타내는 제2강성은 탄성계수의 1/1000을 사용하였다<sup>(5)</sup>. 따라서 부식철근의 구성식은 부식중량감소율을 변수로 하여 식(2), (3)과 같이 표현 할 수 있다.

$$f_{cy} = (1 - \alpha \Delta w) \cdot f_{sy} \quad (2)$$

$$E_{cs} = (1 - \beta \Delta w) \cdot E_{ss} \quad (3)$$

여기서,  $f_{sy}$ 는 건전철근의 항복강도를  $E_{ss}$ 는 건전철근의 탄성계수를 의미한다. 또한 중성화에 의한 철근 부식은 주로 전면균일 부식을, 염해에 의한 철근부식은 주로 공식(pitting)을 발생시키기 때문에 본 연구에서는 철근의 균일부식은 전위차인공부식촉진법에 의해 공식은 염분을 첨가한 콘크리트에 매설한 철근을 고온 건습 반복촉진양생(염분부식)에 의하여 발생시켜 부식 정도를 달리한 시험편의 인장시험을 실시하였다. 또한, 부식철근을 10% 구연산 제2암모니움 용액으로 씻어서 부식전후의 중량차로부터  $\Delta w$ 를 산출해 부식철근의 기계적 성질과의 관계를 구하였다. 동일 부식중량감소율이라도 염분부식한 철근의 기계적 성질은 전식에 의한 값보다 작은 값을 나타내고 있으며 이는 염분부식에 의한 공식 발생에 의해 국부부식의 영향이 나타났

기 때문인 것으로 판단된다. Table 1은 인장시험결과에 기초한 부식철근의 기계적 성질 산출식을 나타낸다. 따라서 부식철근의 부식중량감소율을 측정한다면, 건전철근의 항복점 및 탄성계수를 이용하여 부식철근의 기계적 성질을 산출할 수 있다. Table 1에서  $\alpha$  및  $\beta$ 는 실험상수이다.

## 2.2 부식철근과 콘크리트의 부착 구성식

본 연구에서는 FEM해석에서 사용하는 부착요소로서 Fig. 4와 같이 부착강도( $\tau_{max}$ )와 부착강성( $D_s$ )으로 구성되는 판 bond 요소를 사용하였다. 따라서 철근의 부식정도를 변수로 하여  $\tau_{max}$ 와  $D_s$ 를 산정하면, 철근이 부식한 경우의 부착요소 구성식을 도출 할 수 있다. 이때 철근의 부식으로 인한 피복콘크리트의 균열은 없는 것으로 가정하고 부착강도와 부착강성을 변화시켜 피복콘크리트의 균열을 고려하였다. 인발부착시험은 콘크리트에 매립된 철근을 전위차인공부식촉진법을 이용하여 부식시킨 후 인발하중과 자유단의 Slip을 측정하였다. 전단응력은 철근의 길이방향에 따라 다르게 분포하나 본 연구에서는 인발하중을 철근둘레의 단면적으로 나눈 평균 전단응력을 산출하고 전단변형률

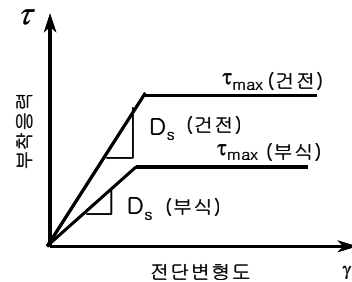


Fig. 4 판 본드요소의 구성치

Table 1 부식철근의 기계적성질 산출식

기계적성질	부식형태	부식철근의 기계적성질 산출식	저감계수
항복점	균일부식	$f_{cy} = (1 - 1.24 (\Delta w / 100)) \cdot f_{sy}$	$\alpha = 1.24$
	공식	$f_{cy} = (1 - 1.98 (\Delta w / 100)) \cdot f_{sy}$	$\alpha = 1.98$
탄성계수	균일부식	$E_{cs} = (1 - 0.75 (\Delta w / 100)) \cdot E_{ss}$	$\beta = 0.75$
	공식	$E_{cs} = (1 - 1.15 (\Delta w / 100)) \cdot E_{ss}$	$\beta = 1.15$

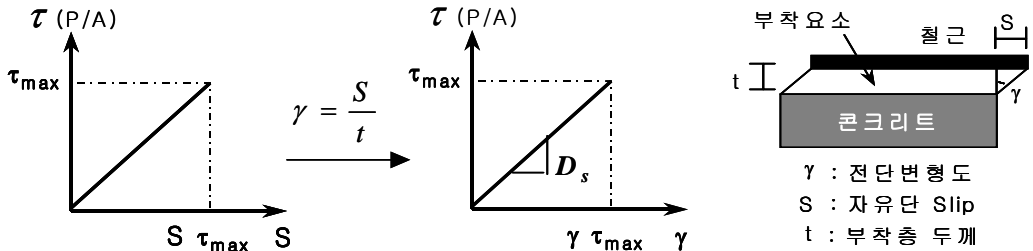


Fig. 5 부식강도와 부착강성의 산출방법

Table 2 부식중량 감소율을 변수로 하는 부착요소의 구성식

부식중량감소율(%)	부착강도, $\tau_{max}$ (MPa)	부착강성, $D_s$ (MPa)
$\Delta w = 0$	$\tau_{max} = 0.34f_{cu} - 1.93$	$D_s = 1.65f_{cu} - 16$
$\Delta w \geq \Delta w_c$	$\tau_{max} = 5.21e^{-0.0561\Delta w}$	$D_s = 1160\Delta w^{-1.014}$

은 자유단의 Slip을 부착층의 두께로 나누어 산출하였다. 따라서 Fig. 5와 같이 전단응력과 전단변형율의 관계로부터  $\tau_{max}$ 와  $D_s$ 를 산출하였다. 건전시험체( $\Delta w = 0$ )와 철근부식에 의한 균열발생 시험체의 부착강도와 부착강성의 산정식은 Table 2와 같다.

### 2.3 변수별 영향검토

부식철근과 부착요소의 구성식을 이용한 FEM 해석을 수행하기 위하여 Fig. 6과 같은 요소를 이용하여 해석모형을 구성하였다. 콘크리트 solid 요소의 주 입력 자료는 콘크리트 압축강도, 탄성계수 그리고 인장강도 등이며, 철근 truss 요소는 von Mises의 항복조건을 적용하였으며, 주 입력 자료는 부식철근의 항복강도와 탄성계수이다. 또한 shell 부착요소는 부착강도와 부착강성을 입력하였다. 부식모델의 각 변수별

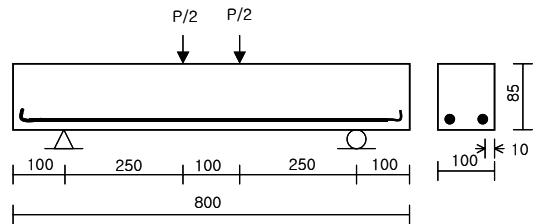


Fig. 7 철근콘크리트 단순보

영향을 검토하기 위하여 Fig. 7과 같이 단순 지지된 보를 대상으로 부식철근의 항복강도 및 탄성계수와 부착요소의 전단강도 및 전단강성을 차례대로 입력하여 해석을 수행하였다.

철근요소의 영향을 나타내고 있는 Fig. 8에서 부재의 내력에 가장 큰 영향을 미치고 있는 요인은 철근의 항복강도임을 알 수 있으며, 탄성계수의 변화는 부재의 강성에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 부착강도와 부착강성이 부재의 내력에 미치는 영향을 보여주고 있다. 이는 철근의 항복강도와 탄성계수에 비하여 부재의 내력에 적게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이상의 비교로부터 인장주근이 부식한 RC보의 내력에 영향을 미치는 요인은 부식으로 인한 철근단면적의 감소에 기인한 항복강도의 감소를 들 수 있으며, 강성저하는 철근의 탄성계수, 부착강도 및 부착강성의 저하가 그 원인을 알 수 있다.

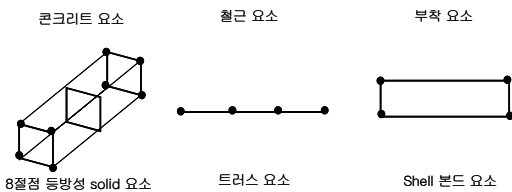


Fig. 6 각 요소의 FEM 해석모델

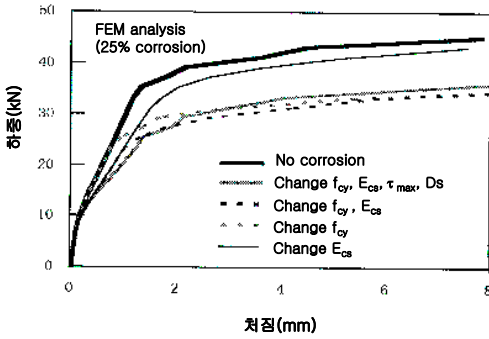


Fig. 8 철근요소의 영향

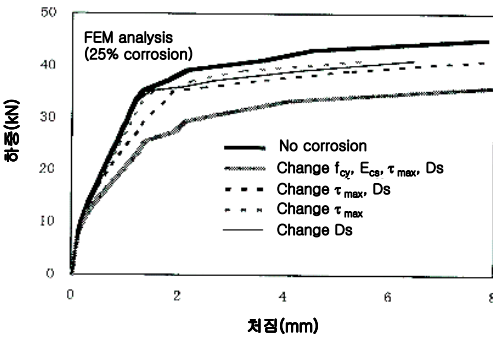


Fig. 9 부착요소의 영향

### 3. 철근부식 보 실험

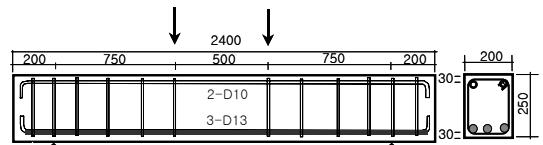
#### 3.1 실험체 제작 및 부식촉진 실험

2장에서 구성된 철근 부식모델을 검증하기 위하여 인장주근이 부식된 철근 콘크리트 보의 정적하중 재하 실험을 수행하였다. 실험체는 Table 3과 같이 철근의 부식율과 부식위치를 변수로 하는 5개의 실험체를 제

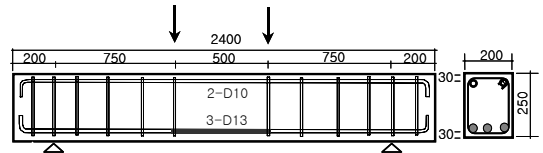
작하였으며, 실험체 제작에 사용된 콘크리트의 압축강도는 38MPa이고 철근의 재료 역학적 특성은 Table 4와 같다. 철근의 부식은 Fig. 11과 같이 전위차 인공부식촉진법을 이용하였으며, 가력실험 후 철근의 부식중량감소율을 측정하여 부식율을 산출하였다.

Table 4 철근의 재료 역학적 특성

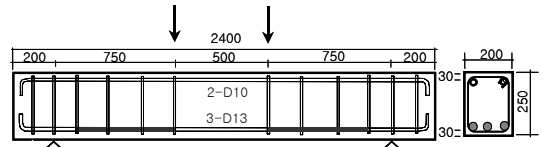
철근종류	$f_y$ (MPa)	$E_s$ (MPa)	$\epsilon_y (\times 10^{-6})$
D13	440.2	$2.0 \times 10^5$	2295
D10	521.3	$2.07 \times 10^5$	2500



(a) 전면부식 실험체 (CG1CB, CG2CB)



(b) 휨영역 국부부식 실험체 (FRCB)



(c) 전단영역 국부부식 실험체 (SRCB)

Fig. 10 실험체 배근상세 및 부식구간

Table 3 실험체 변수 및 부식상태

실험체명	부식율(%)	부식상태
SB	0	부식되지 않은 상태
CG1CB	3.32	전면부식, 콘크리트표면에 녹물발생, 부식균열이 0.06-0.08mm 발생
CG2CB	6.42	전면부식, 이형철근의 마디가 뭉그러짐, 부식균열이 0.1-0.4mm 발생
FRCB	13.69	휨 구간 50cm 국부부식, 이형철근의 마디 손실
SRCB	13.69	전단구간 양쪽 50cm 국부부식, 이형철근의 마디손실

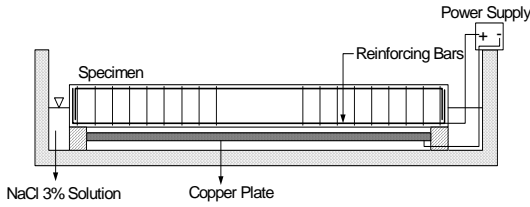


Fig. 11 전위차인공부식 촉진법

### 3.2 실험체 가력 및 실험결과

실험체의 가력은 Fig. 12와 같이 중앙부에서 H형 강을 이용하여 2점 가력하면서 중앙에서의 처짐을 측정하였다. 예상과피하중의 1/3까지는 하중조절방식으로 이하는 변위조절방식으로 가력하였다. 전체적인 파괴양상은 휨파괴를 나타내었다. CG1CB 실험체의 경우 균열 폭이 크게 나타났으나, CG2CB 실험체는 미세균열이 상대적으로 많이 나타났고, FRCB 실험체의 경우 휨 영역에서 균열이 나타났으나, SRCB 실험체의 경우 전단영역에서 일부 전단균열이 나타났다. CG1CB 실험체는 SB 실험체와 거의 유사한 내력을 보였는데, 이로부터 3.32%의 부식율이 보의 휨 내력에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 전체적으로 부식율이 증가함에 따라 휨 내력 및 강성이 감소하였다. 국부 부식은 철근의 응력집중을 유발하여 취성적인 파괴를 나타내는 것으로 보고<sup>(3)</sup> 되었으나, 본 연구에서는 국부부식 실험체의 부식구간이 50cm로서 응력집중의 효과가 분산되어 취성적인 파괴는 나타나지 않았다. 초기균열하중과 인장주근의 항복시의 하중 및 최대하중은 Table 5와 같다.

Table 5 실험결과

실험체 명	초기균열하중		항복하중		최대하중	
	$P_{cr}$ (kN)	$\delta_{cr}$ (mm)	$P_y$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	$P_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)
SB	25.1	0.94	87.4	9.52	90.3	20.2
CG1CB	25.9	1	82.2	7.36	89.7	26.02
CG2CB	18.3	0.76	79.6	7.6	82.8	15.62
FRCB	24.2	0.98	73.6	8.18	80.9	17.84
SRCB	24	1.78	79.5	7.46	82.1	16.94

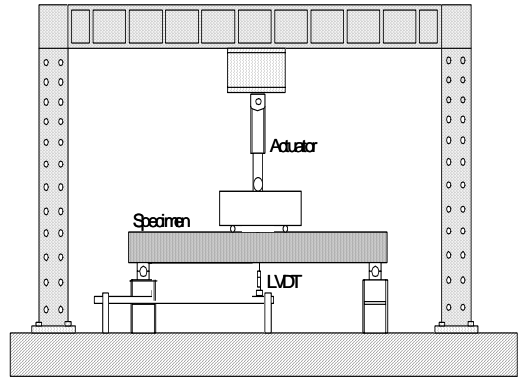


Fig. 12 실험체 가력상황

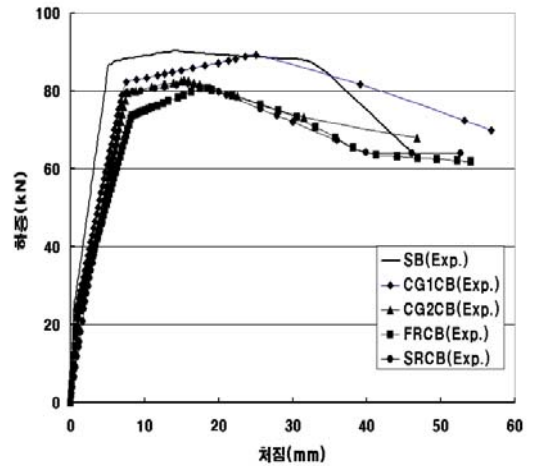


Fig. 13 하중-처짐곡선

### 4. 실험 및 해석결과의 비교

부식율과 부식위치를 달리하는 RC보의 휨 거동을 관찰한 3장의 실험결과에 대하여 2장에서 제시한 부식모델의 적합성을 검증하기 위하여 Table 1, 2에 제시한 각 요소의 구성식을 이용하여 산출한 재료정수를 Fig. 14와 같은 해석모델에 적용하여 비선형유한요소 해석을 Total-RC 프로그램을 이용하여 수행하였다. Fig. 16의 하중-처짐 곡선으로부터 해석결과는 전체적으로 하중의 증가부분에서 실험치의 강성 및 내력과 유사한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다.

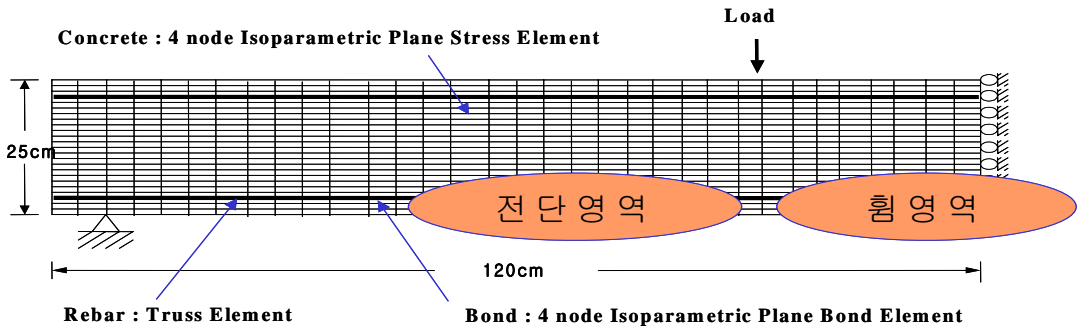


Fig. 14 유한요소해석모델

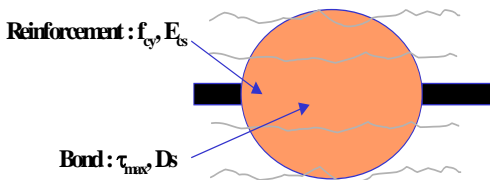
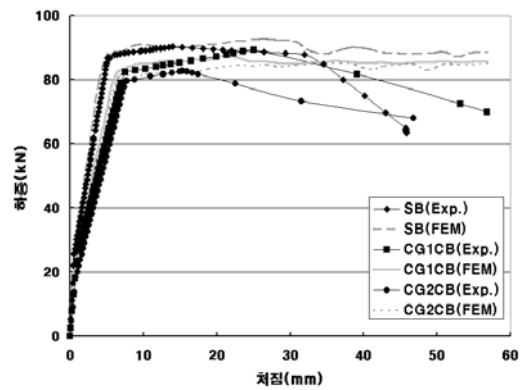


Fig. 15 부식모델

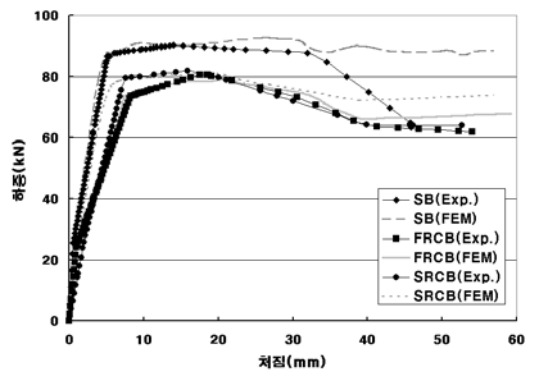
그러나 최대하중 이후 하중의 감소부분에서 실험결과와 다소 차이가 나타났으며, 이는 최대하중 이후 잔류응력의 물성치에 대한 평가가 명확히 해석에 반영되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 16(a)는 부식율을 달리 하는 CG1CB 실험체와 CG2CB 실험체 및 건전실험체의 실험결과와 해석결과를 비교한 하중-처짐곡선이다. 부식율의 증가에 따른 강성의 저하 및 최대내력의 감소가 해석을 통하여 잘 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 16(b)에 나타난 바와 같이 국부부식 구간을 달리하는 FRCB 실험체와 SRCB 실험체의 경우 국부부식구간의 위치에 따른 차이는 크게 나타나지 않고 있으며, 이는 국부부식구간 50cm 범위에서 응력집중현상의 분산으로 보의 휨거동에 큰 영향을 미치지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 인장철근이 부식된 RC보의 거동을 유한요소 해석 모델을 구성하기 위하여 실험 및 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.



(a) 부식율



(b) 부식위치

Fig. 16 실험결과와 해석결과와의 비교

- 1) FEM 해석에서 필요한 철근요소의 구성요인인 항복점 및 탄성계수를 부식중량감소를 및 부식형태에

따라 계산할 수 있는 산출식을 도출하였다. 또한, 부착요소의 인자인 부착강도 및 부착강성을 계산할 수 있는 산출식을 철근의 부식중량감소율을 변수로 하여 도출하였다.

- 2) 철근요소 및 부착요소의 재료물성을 부식중량감소율을 변수로 하는 산출식으로부터 계산해 철근이 부식한 RC보의 FEM 해석에 적용한 결과, 해석결과는 정적재하 실험결과와 좋은 일치율을 보여 각 재료물성 산출식의 타당성을 검증하였다. 따라서, 철근이 부식한 RC보의 철근의 부식정도를 조사하면 본 연구에서 제시한 부식모델을 적용한 FEM 해석에 의해 그 내력성능을 합리적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 인장주근의 부식을 3.32% 범위 내에서 철근의 부식은 RC보의 휨내력에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 국부부식구간이 50cm 이상일 경우 응력집중현상이 크게 나타나지 않아 휨내력에 미치는 영향이 적을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2004년도 건설핵심기술연구

개발사업 (과제번호 : 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 정란, 원중호, 조승호, “주근 및 띠철근의 부식에 따른 철근콘크리트 기둥의 구조성능”, 대한건축학회논문집(구조계), 제20권 3호, 2004. 3. pp.7~14.
2. 안창준, 윤상천, 지남용, “철근부식에 따른 철근콘크리트보의 휨내력저하에 관한 연구”, 대한건축학회 추계학술발표대회논문집(구조계), 제22권 2호, 2002. 10. pp.371~374.
3. 신성우 외 6인, “철근 부식위치를 모델화한 RC보의 휨거동에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 학술발표논문집, 제19권 2호, 1999. 10, pp. 846~851.
4. 신성우 외 5인, “철근 콘크리트보의 휨내력 산정에 관한 연구”, 한국구조물진단학회 학술발표논문집, 제4권 2호, 2000.11, pp.293~298.
- 5.鈴木紀雄, “RC構造の非線形FEM解析のためのガイドライン(2), 콘크리트工學, Vol31, No.9, 1993.9
- 6.李翰承, “腐食劣化した鐵筋コンクリート構造部材の耐力性能評價及び補強に關する研究”, 博士學位論文, 東京大學, 1997.

(접수일자 : 2005년 3월 22일)