

# 비선형 부식분포를 고려한 철근덮개 파괴해석

## Fracture Analysis Considering the Non-uniform Corrosion Distribution

오 병 환\*    장 봉 석\*\*  
Oh, Byung Hwan    Jang, Bong Seok

### ABSTRACT

This study was performed to evaluate the effect of non-uniform corrosion distribution on the analysis of concrete cover failure. A series of experiments have been undertaken to measure the corrosion rate of reinforcement according to the concentration of chloride ion so as to suggest a relationship between the reinforcement corrosion rate and chloride ion density. The corrosion induced pressure depending on the density of chloride ion has been derived.

And nonlinear analysis assuming nonlinear corrosion distribution for cover cracking was achieved and compared with other experimental results to verify the accuracy of the model. Analysis was also performed for various parameters to compare their effects.

### 1. 서론

해수환경에 노출된 철근 콘크리트 구조물의 사용수명 예측은 구조물의 설계나 유지관리에 서 필수적이며, 많은 연구들이 이에 대한 예측방법을 제안하고 있다. 많은 연구들이 철근 콘크리트 구조물의 내구수명을 부식시작 시점(initiation time)과 철근덮개 파괴시간(propagation time)으로 제안하고 있다. 그러나, 제안된 방법들에서 철근의 부식으로 인한 철근덮개 파괴시점 해석에서 철근 단면에 대하여 부식 팽창 압력이 일정한 것으로 가정한 한계를 가지고 있다. 본 연구는 해수에 노출된 철근 콘크리트 구조물의 내구수명 예측의 합리적인 근거를 위하여 철근의 부식에 의한 콘크리트 두께 파괴에 대한 비선형 해석과 실험을 수행하였다.

먼저 실험을 통하여 염소이온의 농도에 따른 철근의 부식속도를 측정하여 염소이온의 농도와 철근부식속도와의 관계식을 제안하였으며, 이를 토대로 염소이온의 농도에 따른 부식 팽창압력식을 유도 제안하였다.

철근의 부식에 의한 철근 덮개 파괴는 비선형 부식분포를 가정하여 비선형 파괴해석을 수행하여 타 연구의 실험결과와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였으며 다양한 변수에 대하여 해석을 수행하고 변수에 따른 영향을 비교 분석하였다.

### 2. 부식 속도 측정 실험

#### 2.1 실험변수

기존의 연구들에서 콘크리트 내의 철근 부식속도는 일정하다는 가정을 하였으나, 이는 실제 콘크리트 내의 철근부식의 진행이 주로 pitting corrosion의 형태라는 사실을 반영하지 못한 것이다. 본 연구에서는, 해수에 노출된 구조물의 경우 외부 노출조건이 유사함을 고려하여, 철근부식 속도에 영향을 미치는 주된 인자를 철근주위의 염소이온 농도로 가정하였다.

\* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 서울대학교 공학연구소 특별연구원

이를 위하여 인공 세공용액 중의 염소이온 농도를 주요 변수로 철근부식속도 측정 실험을 수행하였다. 철근부식속도의 측정은 Potentiostat / Galvanostat Model 273A 이용하여 부식전류밀도를 측정하였다.

인공 세공용액의 pH는  $12 \pm 0.1$ 로 하였으며, 염소이온의 농도는 실제 환경에서의 염소이온 농도 범위가 되도록 0.05mol/L, 0.1mol/L, 0.3mol/L, 0.5mol/L 그리고 0.7mol/L 으로 하였다.

## 2.2 실험 결과

측정한 부식전류 밀도는 표.1에 나타내었으며, 그 결과는 Verbeck의 연구의 경향과 유사함을 알 수 있다.

인공 세공용액 내의 철근부식 시작시점과 콘크리트 내의 철근부식의 시작점이 같다는 가정을 사용하여, 본 실험의 결과를 콘크리트 내의 철근 부식속도로 환산하였으며, 그 결과는 식.1과 그림.1에 나타내었다.

$$i_{corr} = 12.8742 + 4.559 \log(C_f) \quad (\text{식. 1})$$

여기서,  $C_f$ 는 자유염소이온량 ( $g_{Cl}/g_{concrete}$ )으로 콘크리트 중량비에 대한 자유염소이온량이며, 본 연구에서 부식 임계농도(threshold concentration of chloride)는  $0.0015 g_{Cl}/g_{concrete}$ 을 사용하였다.

표.1 부식전류 밀도

| Chloride concentration (mol/L) | Corrosion current density ( $\mu A/cm^2$ ) | pH    |
|--------------------------------|--|-------|
| 0.05                           | 0.71                                       | 12.53 |
| 0.1                            | 1.69                                       | 12.60 |
| 0.3                            | 2.37                                       | 12.44 |
| 0.5                            | 3.60                                       | 12.51 |
| 0.7                            | 7.35                                       | 12.50 |

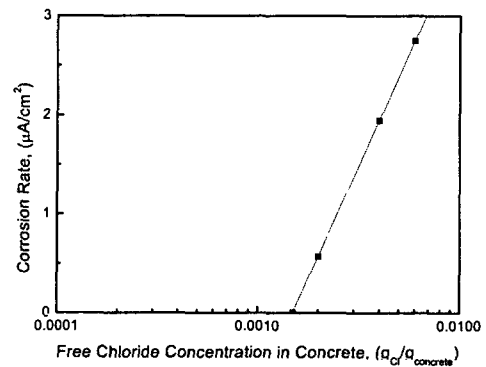


그림. 1  $C_f$  와  $i_{corr}$ 의 관계

## 2.3 팽창 압력식 유도

Thick wall 탄성이론을 이용하여 팽창 압력을 유도하였으며, 철근의 부식에 의한 부피팽창 계수는 3을 사용하였다. 식.2는 철근 직경  $d=8mm$ , 철근덮개  $c=4mm$ , 포아송비  $\nu=0.2$ 의 경우에 대하여, 임의의 염소이온 농도에 1년간 노출되었을 경우의 철근 부식에 의한 팽창압력을 계산한 예이다.

$$P = E_{ef} [0.00604 + 0.00214 \log C_f] \quad (\text{식. 2})$$

여기서,  $P$ 는 팽창압력 ( $N/mm^2$ ),  $E_{ef}$ 는 크리프계수를 고려한 유효탄성계수이다.

## 3. 유한요소해석

### 3.1 모델 및 해석변수

비선형 파괴해석을 위해 콘크리트의 소성모델은 Mohr-Coulomb Model과 bilinear tension

softening 모델을 사용하였으며, 파괴에너지  $G_F$ 는 0.1N/mm을 사용하였다(그림.2, 그림.3). 해석모델은 Williamson의 실험결과와 비교하여 검증하였고, 부식의 비선형성을 변수로 하여 해석을 수행하여 부식분포에 따른 철근뒹개 파괴 시간을 비교하였다.

해석에서 고려한 비선형 부식분포는 그림.5에 나타내었으며, 일반적으로 ununiform corrosion과 ununiform corrosion의 부식 깊이비  $\alpha$ 는 10 이하인 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는  $\alpha$ 를 2, 4, 8과 균일부식의 네 가지와 철근의 직경 그리고 철근피복 두께와 철근직경의 비(c/d)를 변수로 하여 해석을 수행하였다.(그림.6)

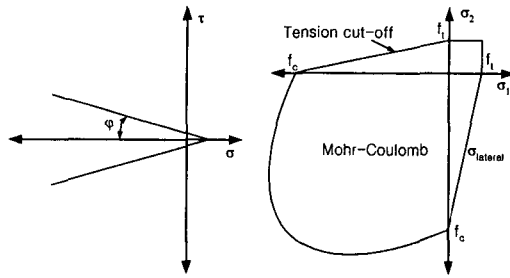


그림.2 Mohr-Coulomb compressive yield criteria

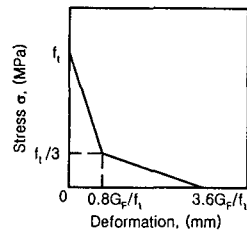


그림.3 Bilinear tension softening model

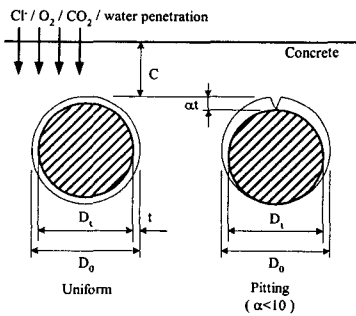


그림.4 균일 부식과 비균일 부식의 부식

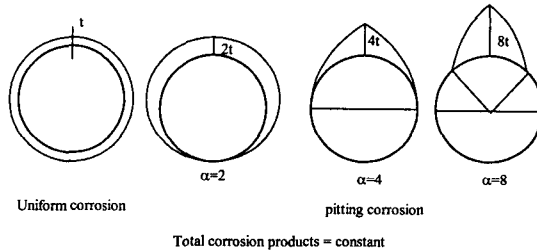


그림.5 부식 분포

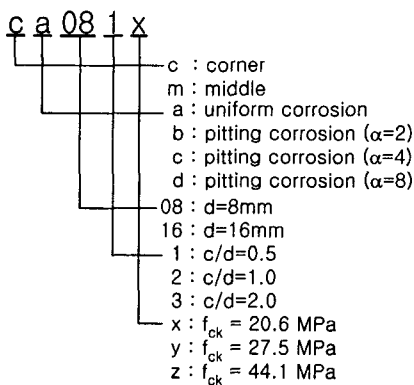
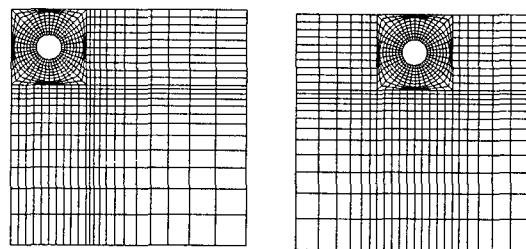


그림.6 파괴해석 변수



(a) d=16mm c/d=1.0

(b) d=16mm c/d=1.0

그림.7 해석 예

### 3.2 해석 결과

유한요소 해석 결과는 표.2와 그림.8에 나타내었다.  $\alpha$ 가 4인 경우와 8인 경우 그리고 부식이 일정한 경우를 비교해보면 (González et al.의 결과  $\alpha$ 는 4~8), 철근의 부식분포가 균일하지 않은 경우의 철근덮개의 파괴를 일으키는 팽창압력이 철근부식이 균일한 경우의 파괴압력보다 더 작음을 알 수 있다. 또한  $\alpha$ 의 값이 커질수록 파괴압력이 작아짐을 알 수 있다.

표.2 철근덮개 파괴압력  $f_{ck}=27.5\text{MPa}$ , (MPa)

| $f_{ck}=27.5$<br>$f_t=1.83$ | d                  | cover depth | uniform | non uniform |            |            |
|-----------------------------|--------------------|-------------|---------|-------------|------------|------------|
|                             |                    |             |         | $\alpha=2$  | $\alpha=4$ | $\alpha=8$ |
| Corner                      | $\phi=8\text{mm}$  | 4           | 1.49    | 1.54        | 0.76       | 0.5        |
|                             |                    | 8           | 3.10    | 3.36        | 1.79       | 1.23       |
|                             |                    | 16          | 6.29    | 6.87        | 3.93       | 2.91       |
|                             | $\phi=16\text{mm}$ | 8           | 1.48    | 1.52        | 0.76       | 0.48       |
|                             |                    | 16          | 3.08    | 3.33        | 1.78       | 1.26       |
|                             |                    | 32          | 6.20    | 6.75        | 3.81       | 2.84       |
| Middle                      | $\phi=8\text{mm}$  | 4           | 1.40    | 1.44        | 0.78       | 0.54       |
|                             |                    | 8           | 2.95    | 3.05        | 1.71       | 1.23       |
|                             |                    | 16          | 5.96    | 6.20        | 3.59       | 2.74       |
|                             | $\phi=16\text{mm}$ | 8           | 1.37    | 1.40        | 0.78       | 0.52       |
|                             |                    | 16          | 2.87    | 3.03        | 1.70       | 1.22       |
|                             |                    | 32          | 5.86    | 6.33        | 3.66       | 2.76       |

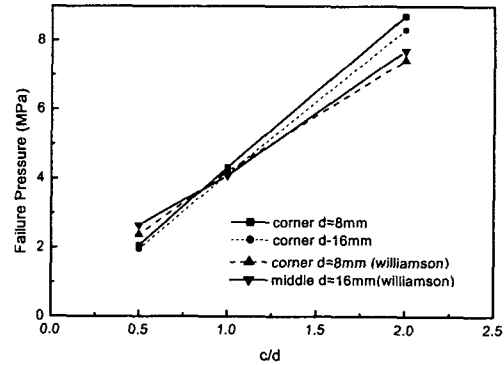


그림.8 해석 결과와 실험 결과 비교

### 4. 결론

철근 부식에 의한 철근덮개의 파괴해석에 있어서 철근의 부식분포의 가정에 따라서 파괴압력이 큰 차이를 나타낸다. 따라서 내구수명 산정의 중요한 한 요소인 철근덮개 파괴 시점을 해석을 통하여 추정하는 경우, 실제 부식분포를 고려한 해석을 통하여 보다 합리적인 결과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- Abdul-Hamid, Al-Tayyib and J., Khan, M.S.(1988), "Corrosion Rate Measurements of Reinforcing Steel in Concrete by Electrochemical Techniques," ACI Materials Journal, pp.172-177.
- C. Andrade and C. Alonso(1996), " Corrosion Rate Monitoring in the Laboratory and On-site," Construction and Building Materials, Vol.10, No.5, pp.315-328.
- H.J. Dagher and S. Kulendran(1992), " Finite Element Modeling of Corrosion Damage in Concrete Structures," ACI Materials Journal, V.89, No.6, pp.699-708.
- Jones, D.A.(1997), "Principles and Preventions of Corrosion," 2nd Ed., Prentice Hall International Limited, London.
- Liu, Y. and Weyer, R.E.(1998), "Modelling of Time-to-Corrosion Cracking in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures," ACI Materials Journal, Nov.-Dec., pp.675-681.
- S.E. Hussain, A.S. Al-Gahtani and Rasheeduzzafar(1996), "Chloride Threshold for Concrete of Reinforcement in Concrete," V.94, No.6, pp.534-538.
- S.J. Williamson and L.A. Clark(2000), "Pressure Required to Cause Cover Cracking of Concrete Due to Reinforcement Corrosion," Magazine of Concrete research, Vol.52, No.6, pp.455-467.