

# 유한 요소법을 이용한 콘크리트 벽체 균열을 발생시키는 철근의 임계 부식량에 대한 연구

## Study on the Amount of Critical Corrosion Products of Reinforcement inducing Concrete Cover Cracking with Finite Element Analysis

김 광 웅*	장 상 업*	조 용 범**	김 용 철**	고 영 태***
Kim, Kwang Woong	Jang Sang Yup	Cho Yong Bum	Kim Yong Cheol	Kho Young Tai

### ABSTRACT

The deterioration of concrete structure due to corrosion of the reinforcement has created big financial losses on the overall industries. The volume expansion of the corrosion products causes internal pressure to concrete wall around reinforcing bar. If the maximum principal stress induced by internal pressure exceeds the tensile strength of the concrete at any point of time, a crack forms at any point of material. Therefore, in terms of life assessment of concrete structure, it is very important to predict the amount of corrosion products which induces initial concrete cracking. With this objective, this paper proposes the critical amount of corrosion products at interface between reinforcement and concrete using finite element analysis. If an actual survey of corrosion rates could be made, the model might supply information for condition assessment of existing concrete structure. As the mechanical properties of corrosion product and instantaneous geometry of corroded steel are considered in the analysis, the value obtained will be more realistic.

### 1. 서론

염화물 침투에 의한 철근 부식은 철근 보강 콘크리트 구조물에서 가장 심각한 성능저하 문제 중 하나다. 콘크리트 자체는 pH 12 정도의 강알칼리성이며 보강 철근 외벽에 부식 진전을 억제시키는 부동태 피막을 형성시킨다. 그러나 외부 환경으로부터의 지속적인 염화물 침투는 철근의 부동태 피막을 파괴시키고 동시에 철근 부식을 초래한다. 부식 생성물의 부피는 건전한 철근의 부피에 비해 작게는 2.5배에서 많게는 7배 가량 크다. 이러한 부피 증가는 보강 철근 계면 주위의 콘크리트 벽체에 팽창 내압을 발생시키며, 부식이 계속 진행되어 팽창 내압이 증가함에 따라 구조물 내 주응력이 인장강도 이상 넘어서는 시점에서 미세 균열이 발생한다. 미세 균열은 계속되는 열화 진행으로 거시적인 균열로 발전하

\* 정회원, 한국가스공사 연구개발원 연구원

\*\* 정회원, 한국가스공사 연구개발원 선임연구원

\*\*\* 정회원, 한국가스공사 연구개발원 수석연구원

고 균열의 합체나 전파는 콘크리트 벽체의 깨짐(spalling), 분리이탈(delamination)과 같은 손상으로 나타난다. 철근 부식에 의한 균열발생은 콘크리트 구조물의 수명과 직접적인 관련이 있기 때문에 벽체에서의 최초 균열 발생 시점에서의 철근의 임계 부식량 산출은 콘크리트 수명평가에 있어서 필수적이다. 최근 유한요소해석과 같은 수치해석적 기법을 이용한 콘크리트 부식파괴에 대한 여러 가지 접근 방식이 시도되어 왔으나, 부식진행과 더불어 변화하는 철근의 형상 변화, 부식된 철근의 기계적 물성 저하를 함께 고려한 현실적인 모델에 대한 접근방식에는 해석의 복잡함뿐만 아니라 부식생성물의 역학적 물성 측정의 어려움 때문에 해석에 많은 제약이 있었음이 사실이다.

본 논문은 부식 진행에 따른 부식생성물의 팽창, 철근단면의 감소, 부식된 철근의 기계적 물성 저하를 고려하여 유한요소해석을 이용한 콘크리트 벽체의 최초 균열시점의 철근 부식량 산출에 목적이 있다. 해석 대상은 보강 철근으로 원형철근인 경우, 철근 둘레와 반지름 방향으로 균일 부식이 일어나는 경우, 부식에 의한 팽창 내압이 유일한 하중조건인 경우로 제한하였다

## 2. 콘크리트 및 부식생성물의 기계적 물성 측정

### 2.1 콘크리트의 기계적 물성 측정 및 평가

압축강도 측정을 위해 3개의 표준 크기 공시체가 제작되었으며, 배합은 아래의 표 1과 같다. 측정된 압축 강도의 평균값으로부터 경험식을 이용하여 인장강도와 탄성계수를 구하였으며, 포아송비는 일반적으로 알려진 0.18로 가정하였다.

### 2.2 콘크리트 모델

콘크리트의 재료거동은 금속의 일반적 재료거동과 상이하다. 그림 1의 응력 변형률 곡선을 관찰하면

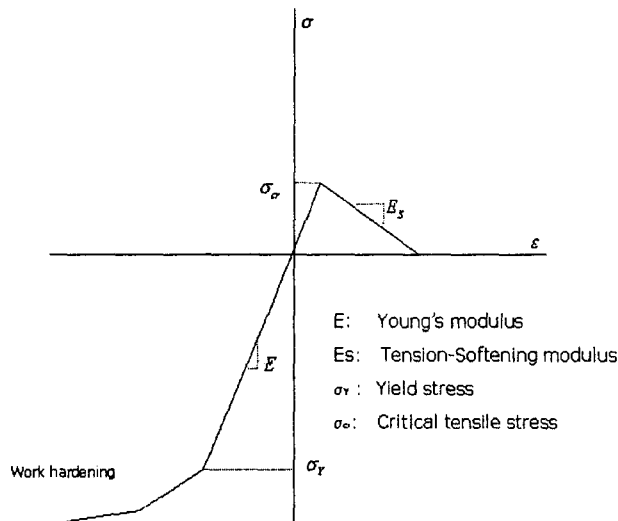


그림 1 일축상태에서의 콘크리트의 응력 변형률 선도

표 1 콘크리트 배합표

시멘트	잔골재(강사)	굵은골재(자갈, ≤20mm)	물
900g	2100g	2900g	450g

표 2 콘크리트의 기계적 물성

압축강도	인장강도	탄성계수	포아송비
28.82MPa	2.8MPa	24800MPa	0.18

압축강도에 비해 인장강도가 상당히 낮은 비대칭구조로 되어 있다. 응력은 인장균열 발생 이후 바로 소산(stress release)되지 않고 변형증가와 함께 서서히 감소되는 양상은 금속의 거동과 다른 점이다. 이를 응력 완화(softening)라고 하고 이 부분의 거동을 선형으로 나타내었다. 압축영역에서는 그림 2에서 보는 바와 같이 Mohr-Coulomb 항복 모델을 사용하였다. 모델을 구성하는데 필요한 응집 응력  $c$ 는 식(1)에서 구할 수 있으며, 평면 응력상태에서 마찰각  $\phi$ 는 30°이다.

$$c = \frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi} \sigma_{comp} \quad (1)$$

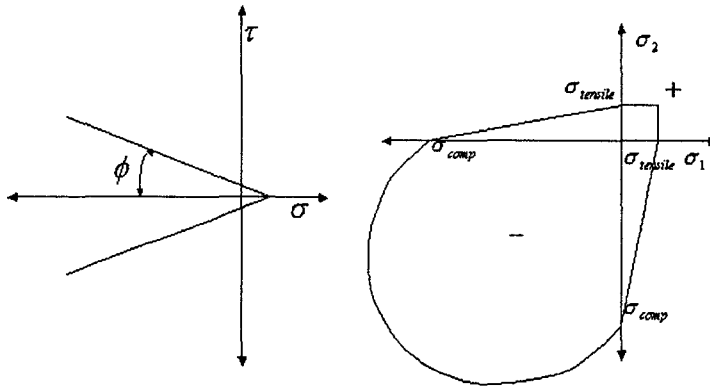


그림 2 콘크리트에서의 Mohr-Coulomb 항복면

### 2.3 부식생성물의 기계적 물성 측정 및 평가

부식 생성물의 체적팽창에 의한 내압은 체적팽창률, 철근의 강성 및 부식생성물의 강성의 상호작용에 의해 그 크기가 좌우된다. 따라서, 부식생성물의 기계물성 평가는 내압 발현의 사실적 모사를 위해 중요한 작업이다. 철근 부식생성물은 주위 부식환경의 pH, 현재의 철근상태, 습도 및 온도에 따라 철근의 계면 주위에 다양한 형태로 나타난다. 즉, 철근 계면 주위에 생성되는 부식생성물은 어느 방향으로도 기계적 물성이 다른 비균질 재료이고, 이에 대한 기계적 물성 측정은 다축 인장시험 등 다양한 종류의 재료시험이 수행되어야 하지만, 부식생성물의 경우 시편채취의 어려움, 재료시험의 기술적 어려움 때문에 쉽지가 않다. 등방성 균일 재료로의 가정은 기계적 물성의 오차로 인한 해석에서의 응력, 변형률 오차를 수반하지만 재료시험의 시행횟수를 늘려 등방성의 가정으로 인한 불가피한 오차를 제외한 오차를 감소시킬 수 있다.

부식생성물의 기계적 물성 평가를 위해서 1cm×1cm 탄소강 판 3개를 3.5% NaCl 수용액에 7일간 자연부식 시킨 후 각 시편당 4회의 나노 압입시험을 실시하였다. 초당 100μN의 압입속도로 500μN까지 증가시킨 후 압입속도와 같은 속도로 하중을 제거하였다. 그림 3의 하중제거 초기 구간에서 압입자와 부식생성물 모두의 영향을 반영하는 등가탄성계수 ( $E_e$ )를 구할 수 있으며 측정값은 아래의 표 3과

같다. 또한, 식 (2)에서 압입자의 탄성계수, 포아송비 및 부식생성물의 포아송비를 알면 평가대상인 부식생성물의 탄성계수를 구할 수 있다. 압입자로 사용된 Berkovich는 탄성계수가 1140GPa, 포아송비가

$$\frac{1}{E_r} = \left\{ \frac{1-\nu^2}{E} \right\}_{Specimen} + \left\{ \frac{1-\nu^2}{E} \right\}_{Indenter} \quad (2)$$

0.07로 알려져 있으며, 부식생성물의 포아송비는 세라믹계열의 0.24로 가정하여 부식생성물의 탄성계수를 측정하였다.

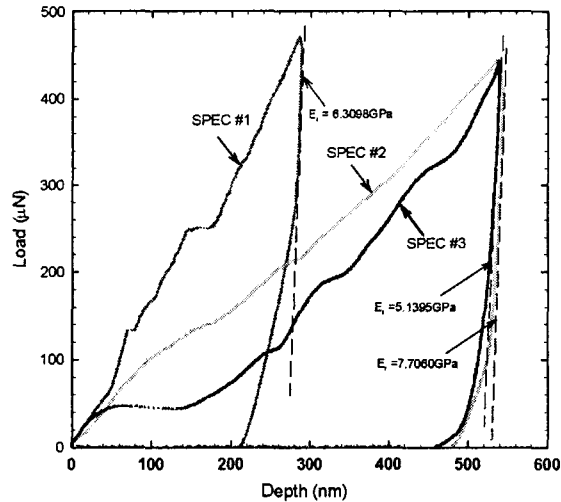


그림 3 나노 압입시험에서 부식생성물의 하중과 변형깊이와의 관계

표 3 부식생성물의 기계적 물성

SPEC 1		SPEC 2		SPEC 3		$(E)_{avg}$
$(E_r)_{avg1}$	$(E)_{avg1}$	$(E_r)_{avg2}$	$(E)_{avg2}$	$(E_r)_{avg3}$	$(E)_{avg3}$	
6.3098GPa	5.9793GPa	7.7060GPa	7.3113GPa	5.1395GPa	4.8653GPa	6.0520GPa

### 3. 해석 조건 및 결과

보강철근으로 원형철근인 경우, 철근 둘레와 반지름 방향으로 균일 부식이 일어나는 경우로 해석대상을 제한하였고, 부식생성물의 체적 팽창률은 철근의 2.5배로 가정하였다. 부식생성물의 유한요소격자는 최초 시간증분에서  $1\mu\text{m}$  크기의 폭을 가지는 4절점 평면응력 요소로서 한층으로 구성하였으며, 그림 4에서 보는 것과 같이 시간증분이 커짐에 따라서 요소의 크기가 증가한다.

부식개시시점과 부식종결시점을 해석의 시간 증분의 처음과 끝으로 가정한다. 해석의 시간 총 증분을 20개로 나누고, 부식개시시점의 부식 변위를  $0\mu\text{m}$ , 부식종결시점의 부식 변위를  $70\mu\text{m}$  할 때, 1단위시간당 부식속도는  $3.5(\mu\text{m}/\text{unit time})$ 이다.

그림 5를 관찰하면, 부식개시 후 5번째 시간 증분에서 철근 계면 주위의 콘크리트 벽체에서 최초균열이 일어남을 알 수 있다. 균열이 발생하는 부분에서는 응력이 완화되고, 응력이 완전히 소산하기 전

까지 변형이 일어난다. 이 때 해당되는 부식깊이는  $17.5\mu\text{m}$ 이고, 부식총량은 철근부피의 0.44%이다. 즉 최초균열 발생시점에서의 임계부식량은 0.44%이다. 또한, 균열이 성장하여 벽체의 두께가 38mm인 콘크리트가 완전히 관통하는 시점은 13번째 시간 증분으로 부식깊이는  $45.5\mu\text{m}$ 이고, 부식총량은 철근부피의 1.13%이다. 콘크리트 구조물의 형상과 철근의 크기에 따라 차이가 나겠지만 벽체두께가 38mm이고, 반지름이 8mm인 보강철근을 사용한 경우, 콘크리트 구조물은 1.13%의 부식량을 전 후로 완전히 파괴됨을 알 수 있다.

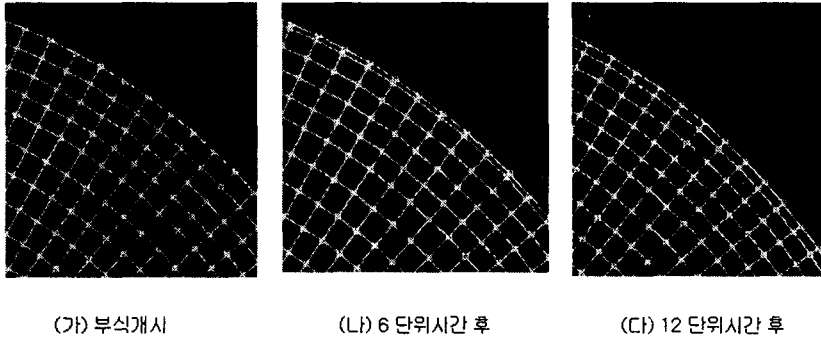


그림 4 시간증분에 따른 부식생성물의 유한 요소 격자 크기 변화

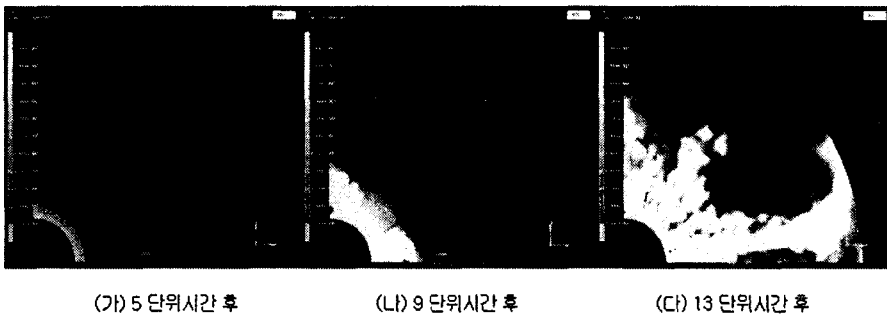


그림 5 시간증분에 따른 콘크리트 벽체에서의 균열진전 양상

#### 4. 결론 및 고찰

1) 단위시간당  $3.5\mu\text{m}$ 의 부식속도를 가지는 부식환경에서 위 구조물은 5 단위시간 후 최초 균열이 발생했으며, 이는 철근의 크기와 형상, 벽체의 두께와 형상에 따라 달라질 수 있는 값이다. 그러나 위의 결과를 보면, 반지름 8mm인 보강철근에 두께가 충분히 두꺼운 부재에서의 최초 균열이 일어나는 임계부식량은 약 철근부피의 0.4%가 됨을 알 수 있고, 벽체 두께가 38mm인 경우에는 부식량이 철근 부피의 1.1%가 될 때 균열이 성장하여 벽체를 완전히 관통함을 알 수 있다.

2) 본 해석에 의해 산출된 임계부식량은 부식진행에 따라 생성되는 모든 부식생성물이 콘크리트 벽체에 가해지는 팽창내압으로 참여할 때 그 의미를 가진다. 그러나 실제로는 부식생성물의 많은 부분이 기포가 많은 콘크리트 벽체로 스며들기도 하고, 부착력이 저하된 철근 계면을 타고 흘러내리기도 한

다. 따라서 위의 임계부식량은 실제보다는 보수적인 값이다. 반대로, 팽창내압에 참여하는 부식생성물의 손실이 적은 급속한 부식진행에서는 위의 임계부식량이 의미를 가질 것이다.

3) 철근 둘레와 반지름 방향으로 균일 부식이 일어나는 경우로 제한하였으나, 실제로는 균일 부식보다는 불균일 부식이 일반적이다. 어느 한 부분에서 더욱 부식이 가속화되는 현상을 볼 수 있고, 이 부분에서 부식생성물의 적층은 주변보다 빠르고, 이러한 적층은 벽체에 집중 하중을 가하게 되어 비교적 적은 부식생성량에도 일찍 파괴됨을 예측할 수 있다.

#### 참고문헌

1. H. J. Dagher, S. Kulendran, Finite Element Modeling of Corrosion Damage in Concrete Structures, ACI Structural Journal, V.89, No.6, 1992
2. Y. Liu, R. E. Weyers, Modeling the Time-to-Corrosion Cracking in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures, ACI Materials Journal, Nov.-Dec., pp.675-681.
3. W. C. Oliver, G. M. Pharr, Journal of Material Research., V.7, No.6, 1992 , pp.1564
4. B. S. Jang, Life Time Estimation Method of Reinforced Concrete Structures Considering the Effects of Reinforcements on the Chloride Diffusion and the Non-uniform Corrosion Distribution, Ph.D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea.
5. D. R. J. Owen, E. Hinton, Finite Elements in Plasticity :Theory and Practice, Pineridge Press Limited, U.K., 1980
6. Fracture Mechanics and Concrete Cracking, Msc. Marc Inofficial Document.
- 7 오병환 外 5인, 철근 부식에 의한 콘크리트의 표면변형률과 내부팽창압에 대한 실험 및 해석연구, 2001년도 가을 학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회, pp.777-780.