

## 철근부식에 의한 철근콘크리트 구조물의 균열거동

오병환<sup>1)</sup> · 김기현<sup>1)\*</sup> · 장승엽<sup>1)</sup> · 강의영<sup>1)</sup> · 장봉석<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 토목공학과 <sup>2)</sup>한국건설자재시험연구원

(2002년 2월 7일 원고접수, 2002년 10월 21일 심사완료)

## Cracking Behavior of Reinforced Concrete Structures due to Reinforcing Steel Corrosion

Byung-Hwan Oh<sup>1)</sup>, Ki-Hyun Kim<sup>1)\*</sup>, Seung-Yeop Jang<sup>1)</sup>, Yi-Rong Jiang<sup>1)</sup>, and Bong-Seok Jang<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

<sup>2)</sup> Korea Institute of Construction Materials, Seoul, 137-073, Korea

(Received February 7, 2002, Accepted October 21, 2002)

### ABSTRACT

Corrosion products of reinforcement in concrete induce pressure to the adjacent concrete due to the expansion of steel. This expansion causes tensile stresses around the reinforcing bar and eventually induces cracking through the concrete cover. The cracking of concrete cover will adversely affect the safety as well as the service life of concrete structures.

The purpose of the this study is to examine the critical corrosion amount which causes the cracking of concrete cover. To this end, a comprehensive experimental and theoretical study has been conducted. Major test variables include concrete strength and cover thickness. The strains at the surface of concrete cover have been measured according to the amount of steel corrosion.

The corrosion products which penetrate into the pores and cracks around the steel bar have been considered in the calculation of expansive pressure due to steel corrosion. The present study indicates that the critical amount of corrosion, which causes the initiation of cracking, increases with an increase of compressive strength. A realistic relation between the expansive pressure and average strain of corrosion product layer in the corrosion region has been derived and the representative stiffness of corrosion layer was determined. A concept of pressure-free strain of corrosion product layer was introduced to explain the relation between the expansive pressure and corrosion strain. The proposed theory agrees well with experimental data and may be a good base for the realistic durability design of concrete structures.

**Keywords :** corrosion of steel bar, expansion of steel, critical corrosion, concrete cover cracking

### 1. 서 론

철근 콘크리트 구조물에서 콘크리트는 강알칼리성이기 때문에 일반적으로 철근의 부식을 억제하는 이상적인 환경을 형성한다. 따라서 일반 환경 하에서 철근의 부식은 잘 일어나지 않는다. 그러나 콘크리트의 품질이 나빠지거나 가혹한 환경 하에 노출되어 있는 경우에는 시간이 지남에 따라 철근의 부식이 발생할 수 있다. 콘크리트 내의 철근이 부식되면 철근단면의 손실에 의한 구조물의 내하력 감소와 철근 리브의 손상에 의한 부착력 감소 등의 문제를 일으켜 구조물의 내구수명을 줄이게 된다<sup>1~3)</sup>. 또한 콘크리트 내의 철근부식은 철근 부피의 팽창을 일으키게 되는데,

이는 부식에 소모된 철근의 양에 비하여 부식생성물의 양이 적게는 1~2 배에서 6~7 배까지 증가되기 때문이다<sup>1,2)</sup>. 철근부식에 의한 팽창은 철근 주위의 콘크리트에 응력을 유발시켜 콘크리트 피복에 균열을 유발하여 안전성에 큰 영향을 준다. 따라서 콘크리트 피복에 균열을 유발하는 부식량을 알아내고 부식량과 균열과의 상호관계를 실험 및 해석적으로 규명하는 것은 매우 중요한 사항이다.

본 연구의 목적은 철근부식의 진행에 따른 콘크리트 피복의 균열거동을 실험적으로 연구하여 피복에 균열을 일으키는 부식량을 실험적으로 규명하고, 이를 이용하여 철근부식에 의한 피복의 균열발생을 해석하여 상호관계를 규명하는데 있다. 이를 위하여 전위차를 이용한 촉진부식법을 이용하여 철근에 부식을 일으키고 각 부식량에 따른 콘크리트 표면의 변형률을 측정함으로써 피복에 균열을 일으키는 임계부식량을 구하였다. 실험변수로는 콘크리트

\* Corresponding author

Tel : 02-880-8308 Fax : 02-887-0349

E-mail : vipkkh@hotmail.com

강도의 영향을 고려하기 위하여 물시멘트비 세가지 경우를 고려하였으며 피복두께 네가지 경우를 고려하였다. 또 내부팽창압 증가에 따른 표면 변형률의 변화를 유한요소 해석을 통하여 구하고, 해석결과와 실험결과를 바탕으로 부식생성물 층의 역학적 특성을 구하였으며 균열 및 공극 속으로 흡수되는 부식생성물의 양을 고려하여 철근부식에 의한 피복의 균열생성을 해석하였다.

## 2. 철근부식에 의한 콘크리트의 균열발생기구

콘크리트 내부의 철근이 부식환경에 노출되어 부식이 시작되면 그 부피가 증가하기 시작한다. 그 부피증가량은 산화물의 종류에 따라 다양하며  $FeO = 1.7$ ,  $Fe_3O_4 = 2$ ,  $Fe_2O_3 = 2.1$ ,  $Fe(OH)_2 = 3.6$ ,  $Fe(OH)_3 = 4.0$ ,  $Fe(OH)_3 \cdot 3H_2O = 6.15$ 에 이른다<sup>1)</sup>.

철근의 부피팽창으로 인한 팽창압은 주위의 콘크리트에 영향을 주어 콘크리트는 응력을 받게 된다. 이러한 팽창압이 증가할수록 콘크리트의 변형률은 증가하고 균열을 일으킬 정도로 인장변형률이 커지면 콘크리트에는 내부에서부터 균열이 발생하게 된다. 내부의 팽창압이 증가할수록 콘크리트 피복 표면의 변형률도 증가하며 이것이 균열을 일으키는 변형률에 이르면 표면에도 균열이 발생하게 된다.

철근부식에 의한 피복의 균열발생을 해석하기 위하여 기존에는 Fig. 1과 같이 철근부식에 의한 철근의 부피팽창을 콘크리트에 미치는 내부압력의 증가로 모델링하거나, Fig. 2와 같이 철근의 최종형상으로 철근부식을 모델링하기도 하였다<sup>4,5)</sup>. 그러나 두 접근방안은 실제의 철근부식량에 대한 내부팽창압의 값 또는 철근의 최종형상과의 수치적인 관계를 알아내기 어렵다는 단점을 가지고 있다.

Fig. 3의 철근부식에 철근팽창 모사도를 살펴보면 다음과 같다. 철근 반경이  $r_b$ 인 콘크리트 내부의 철근이  $w_{corr}$  만큼 부식되어 철근에 균일하게 반경 손실이  $x_p$  만큼 발생한다고 하면 다음의 식 (1)이 성립한다.

$$\pi r_b^2 - \pi (r_b - x_p)^2 = \frac{W_{st}}{\rho_{st}} = w_{corr} \pi r_b^2 \quad (1)$$

여기서,  $w_{corr}$ 는 부식 전 원래 철근의 중량에 대한 부식으로 소모된 철의 중량비이며  $W_{st}$ 는 부식에 의해 소모된 철의 질량,  $\rho_{st}$ 는 철의 밀도이다.

위 식을 반경 손실량  $x_p$ 에 대하여 정리하면  $x_p$ 는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$x_p = r_b(1 - \sqrt{1 - w_{corr}}) \quad (2)$$

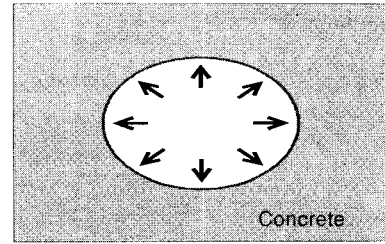


Fig. 1 Pressure

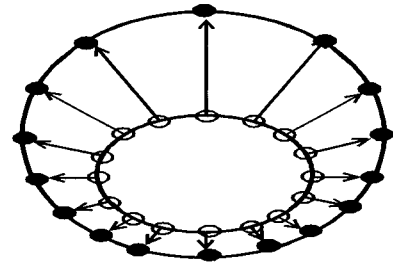


Fig. 2 Deformed shape

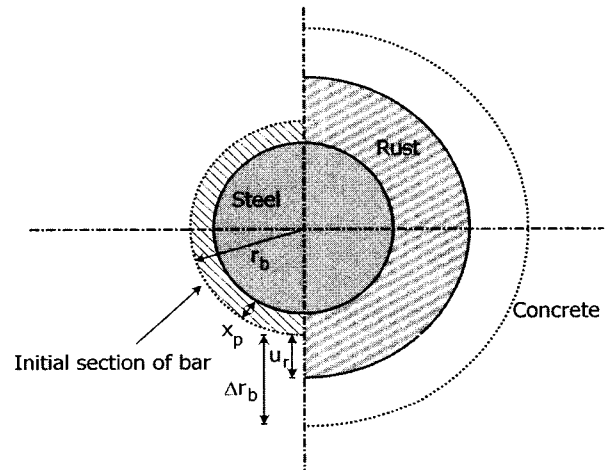


Fig. 3 Expansion of steel due to reinforcement corrosion

부식에 의하여 소모된 철이 만들어낸 부식생성물의 부피는 소모된 철의 부피 보다 크므로 철근의 반경은 부식되기 전의 철근위치 보다  $\Delta r_b$  만큼 더 커지므로 다음의 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \pi (r_b + \Delta r_b)^2 - \pi r_b^2 &= \frac{W_{rust}}{\rho_{rust}} - \frac{W_{st}}{\rho_{st}} \\ &= \frac{W_{st}}{\rho_{st}} \left( \frac{\rho_{st}}{\alpha \rho_{rust}} - 1 \right) \quad (3) \\ &= \frac{W_{st}}{\rho_{st}} (v_r - 1) \\ &= \pi r_b^2 (v_r - 1) w_{corr} \end{aligned}$$

여기서,  $W_{rust}$ 는 부식생성물의 질량이며  $\rho_{rust}$ 는 부식생

성물의 밀도이다.  $v_r$ 은 철의 밀도와 부식생성물의 밀도 사이의 상대적인 비로서  $v_r = \frac{\rho_{st}}{a\rho_{rust}}$ 이다.  $a$ 는 부식생성물 중 철 성분의 질량은 부식에 사용된 철의 질량과 같다는 사실, 즉  $W_{st} = aW_{rust}$ 로부터 얻어지는 값이다. Fe 1mol이 55.85g, O<sub>2</sub> 1mol이 32g, H<sub>2</sub> 1mol이 2g 임을 상기하면 부식생성물이 Fe(OH)<sub>3</sub> (hydrated red rust) 또는 Fe(OH)<sub>2</sub> (ferrous hydroxides) 임에 따라  $a$ 는 각각 0.523와 0.622의 값을 가짐을 알 수 있다. 일반적으로 부식생성물의 종류에 따라  $a$ 는 0.523과 0.622 사이의 값을 가진다고 알려져 있다<sup>1,2,3</sup>. 또 부식생성물의 밀도에 대한 철의 밀도비  $\gamma$ 는 보통 2에서 4 사이의 값을 가진다고 알려져 있다.

위 식을  $\Delta r_b$ 에 대하여 정리하면 철근의 최종 변형량은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\Delta r_b = r_b(\sqrt{1 + (v_r - 1)w_{corr}} - 1) \quad (4)$$

Fig. 3은 철근의 반경 손실에 의한 부식생성물 층의 부피팽창을 보여주고 있다.

Lundgren(2001)<sup>6</sup>은 그의 모델에서 실제로 부식생성물 층이 주변 콘크리트에 의해 다져지는 효과를 고려하여 철근이  $u_r$  만큼만 변형한다고 보았다[Fig.3]. 즉 부피가 증가된 부식생성물이 주위의 콘크리트에 압력  $P$ 를 가할 때 이론적으로는 부식생성물의 두께가  $(x_p + \Delta r_b)$ 가 되나 실제로는  $(\Delta r_b - u_r)$  만큼 압축된다고 생각하였다. 여기서 두 값의 비를 부식생성물 층의 변형률  $\epsilon_{rust}$ 라 정의하고 식 (5)와 같이 나타내었다.

$$\epsilon_{rust} = \frac{u_r - \Delta r_b}{x_p + \Delta r_b} \quad (5)$$

즉 부식생성물 층은 P의 압력을 받을 때  $\epsilon_{rust}$  만큼 수축하므로 Lundgren은 부식생성물 층의 역학적 특성을 식 (6)과 같이 나타내었다.

$$P = K_{rust} \epsilon_{rust}^q \quad (6)$$

이와 같이 Lundgren은 부식생성물 층의 역학적 특성을 정의하여 철근부식에 의한 피복의 균열생성을 해석하고자 하였다. 그러나 Lundgren의 모델에서는 철근팽창에 의해 발생하는 균열 및 콘크리트 공극 속으로 흡수되는 부식생성물의 양을 고려하지 않고 있다는 문제점이 있다.

### 3. 실험 계획

본 실험에서는 콘크리트 피복 바깥면에 변형률게이지를 접착하고 내부 철근의 부식 증가에 따른 변형률 값을 측정하였다. 측정된 콘크리트 피복의 표면 변형률을 이용하여 콘크리트 표면에 균열을 일으키는 임계부식량을 조사하였으며, 철근부식에 의한 피복의 균열발생을 해석하기 위한 자료로 사용하였다.

#### 3.1 실험변수

본 연구에서는 지름 19 mm의 일정한 원형철근에 대하여 피복두께의 영향을 분석하기 위하여 콘크리트 피복의 두께를 각각 2, 3, 4, 5 cm로 변화시켰다. 또 콘크리트 강도에 따른 영향을 분석하기 위하여 배합의 물시멘트비를 변수로 두어 0.35, 0.45, 0.55의 세 경우를 변수로 하였다. 본 연구에서의 변수는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 물시멘트비에 따라 H, N, L로 분류하고, 순피복의 두께에 따라 2, 3, 4, 5로 분류하였다. 실험변수명은 N2, N3, N4, N5, L2, L4, H2, H4이다.

#### 3.2 실험재료

본 연구에서 사용한 시멘트는 제1종 보통 포틀랜드 시멘트(비중 : 3.15)를 사용하였고 잔골재는 강사(비중 : 2.55, 조립률 : 2.6)를 사용하였으며 굵은 골재는 안성산 쇄석(비중 : 2.6)을 사용하였다. 슬럼프는 15 cm, 공기량은 45 %이며 그 배합사항은 Table 1과 같다. 재료에 대한 전반적인 강도특성은 Table 2와 같다.

#### 3.3 시험체의 제작

시험체는 20 cm×20 cm×20 cm의 정육면체로서 피복의 두께가 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm가 되도록 시험체에 직경 19 mm의 원형철근을 삽입하였다. 그에 따른 피복/철근직

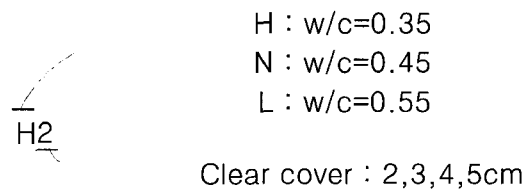


Fig. 4 Experiment variables

Table 1 Concrete mix property

W/C (%)	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Fine agg. (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse agg. (kg/m <sup>3</sup> )	AE agents (g)
35	172	491	608	1011	2949
45	170	378	712	1003	756
55	168	305	792	987	305

경의 비(c/d)는 각각 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 이다. 또 내부 철근이 부식되는 영역을 일정하게 확보하기 위하여 철근의 상부와 하부에 PVC관을 삽입하고 수분의 침투를 막아 철근의 상하부에서는 부식이 일어나지 않도록 하였다. 시험체에서 철근 중 부식이 일어나는 영역은 Fig. 5에서 빗금으로 칠해져 있다.

### 3.4 실험방법

#### 3.4.1 전위차를 이용한 촉진부식실험

시험체를 NaCl 3% 수용액에 침지하고 직류전원 공급장치를 이용하여 Fig. 6과 같은 부식회로를 형성하였다. 시험체의 철근은 양으로, 스테인리스 철판은 음으로 각각 대전하여 염수에 침지하면 Fig. 6에서와 같이 부식회로가 구성된다. 이 때 그림의 회로에서 양극과 음극의 전위차는 염소이온의 침투를 촉진시켜 철근의 부식을 촉진시키는 작용을 한다. 각 시편마다 저항을 연결하여 저항에 걸리는 전압을 30분 단위로 측정하고 동시에 피복의 인장변형률을 측정하였다.

실험의 종료는 콘크리트 표면의 변형률이 충분히 커져 최초의 피복균열이 발생한 후로 하였다.

#### 3.4.2 페러데이 법칙을 이용한 부식량의 산정

철근의 부식량은 페러데이 법칙을 이용하여 구하였다.

Table 2 Physical properties of materials

	W/C (%)	35	45	55
Concrete	Comp. strength	44.30 MPa	40.28 MPa	27.54 MPa
	Tensile strength	4.12 MPa	3.93 MPa	3.10 MPa
	Elastic modulus	31481 MPa	30019 MPa	24821 MPa
	Poisson ratio	0.18	0.18	0.18
Steel	Yield strength	392.3 MPa		
	Ultimate strength	480.2 MPa		

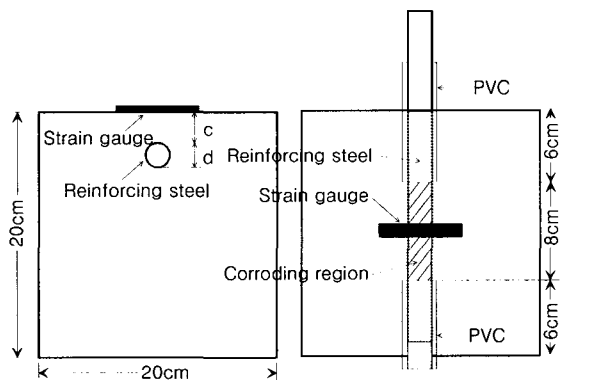


Fig. 5 Specimen

페러데이 법칙이란 같은 물질인 경우 전기분해에서 생성 또는 소모되는 물질의 양은 통해준 전기량에 비례한다는 것이다. 즉 1F의 전기량에 의해 생성 또는 소모되는 물질의 양은 물질의 종류에 관계없이 전자 1몰이 이동한 양인 1화학당량 만큼의 물질이 석출된다는 것이다. 식 (7)은 생성반응에 참여하는 전자의 수가 n인 물질을 I암페어의 전류로 t초동안 전기분해 할 때 석출되는 물질의 몰수 X를 나타낸 식이다.

$$X = \frac{It}{nF} \quad (7)$$

여기서, I는 부식회로를 흐르는 전류의 크기[암페어, A], n은 생성반응에 참여하는 전자의 수, F는 전자 1몰의 전기량으로 1F = 96,500C의 전하량과 같다.

본 실험에서는 부식회로에 전기저항을 설치하여 이 저항에 걸리는 전압을 30분 단위로 측정하였으며, 저항의 크기를 알기 때문에 부식회로를 흐르는 전류의 크기를 구할 수 있다. 이렇게 구한 전류의 크기를 시간에 따라 적분하여 부식회로를 통과한 총 전하량을 알 수 있으므로 페러데이 법칙을 이용하면 부식된 철근의 몰수를 알 수 있다. Fig. 7은 실험변수 N4에 대하여 시간에 따라 얻어진 부식 전류의 크기를 나타낸 것이며, Fig. 8은 시간에 따라 얻어진 전류의 크기와 페러데이 법칙을 이용하여 얻은 시간에 따른 부식량의 그래프이다.

#### 3.4.3 변형률 측정

내부 철근의 부식량에 따른 콘크리트 피복의 인장변형률을 측정하였다. 표면 인장변형률의 측정은 게이지 길이 60 mm인 콘크리트용 전기저항식 변형률게이지를 사용하였으며, Fig. 5에서 나타낸 것처럼 피복의 두께가 가장 작은 위치에 균열발생 예상 방향에 수직으로 변형률게이지를 콘크리트 피복에 접착하였다(Fig. 5 및 Fig. 6).

본 실험에서는 콘크리트 피복에 변형률게이지를 접착하고 내부 철근의 부식 증가에 따른 변형률 값을 측정하였

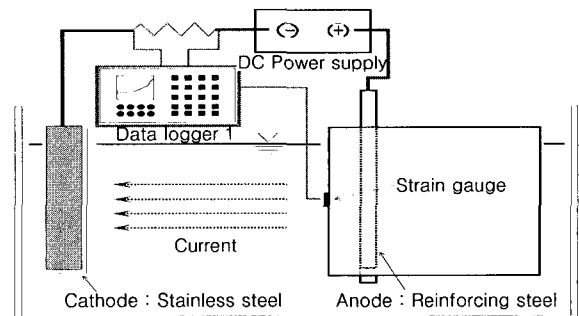


Fig. 6 Corrosion circuit

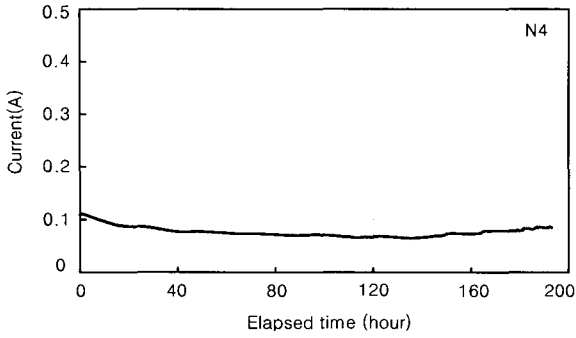


Fig. 7 Current according to time

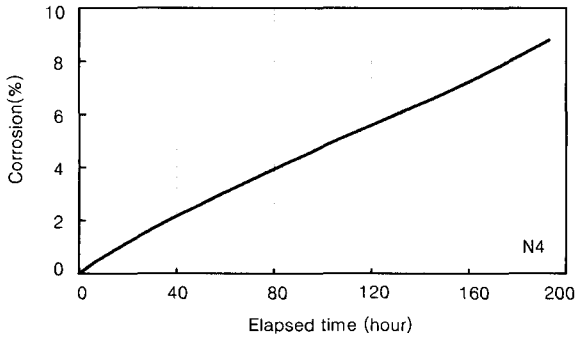


Fig. 8 Corrosion according to time

다. 측정된 콘크리트 피복의 표면 변형률을 이용하여 콘크리트 표면에 균열을 일으키는 임계부식량을 조사하였으며, 철근부식에 의한 피복의 균열발생을 해석하기 위한 자료로 사용하였다.

#### 4. 실험결과분석 및 고찰

##### 4.1 피복두께에 따른 표면 변형률

Fig. 9는 콘크리트 강도 40 MPa(물시멘트비 0.45)에 대하여 부식정도에 따른 표면 변형률을 피복의 두께별로 나타낸 것이다. 일반적으로 부식량이 증가할수록 측정된 콘크리트 표면 변형률은 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 부식초기에는 서서히 증가하다가 부식량이 어느 한계를 넘어서면 콘크리트 표면 변형률이 급격히 증가하는 것으로 나타나고 있다. 철근의 부식량에 따른 콘크리트 표면 변형률의 급격한 증가는 피복의 두께가 얇을수록 더 낮은 부식량에서 일어나고 있음을 알 수 있다.

##### 4.2 물시멘트비에 따른 표면 변형률

Fig. 10은 피복이 각각 2 cm, 4 cm인 경우에 대하여 부식정도에 따른 표면 변형률을 물시멘트비별로 나타낸 것이다. Fig. 9와 마찬가지로 부식이 진행됨에 따라 특정한 변형률 근처에서 각각 변형률의 경향에 큰 변화가 나타남

을 알 수 있다.

피복의 두께가 2 cm인 경우에는 물시멘트비가 변화함에 따른 표면 변형률의 변화양상에 큰 차이가 없으나 피복의 두께가 4 cm인 경우에는 물시멘트비가 작아짐에 따라, 즉 콘크리트 압축강도가 높아짐에 따라 동일한 크기의 변형률을 일으키는데 많은 부식이 필요함을 알 수 있다. 이것은 역학적 측면에서는 고강도 콘크리트의 경우 콘크리트 강도와 강성이 커서 동일한 크기의 표면 변형률을 일으키기 위해 더 많은 팽창압력이 필요하고, 재료적 측면에서는 물시멘트비가 낮을수록 조직이 치밀하여 염소 이온의 투과율과 흡수율 등이 저하되기 때문으로 여겨진다.

##### 4.3 피복에 균열을 일으키는 임계부식량

앞의 Fig. 9 및 Fig. 10에 나타낸 것처럼 부식량에 따른 표면 변형률 그래프의 경사가 급변하는 점 근처에서 아주 미세한 초기 미세 균열이 발생한 것으로 평가된다. 따라서 본 실험에서는 각 변수별로 표면에 균열을 일으키는 부식량, 즉 임계부식량(critical corrosion)은 표면 변형률 그래프의 경사가 급변하는 지점의 부식량으로 정의하였으며, 이로부터 얻어진 각 변수별 임계부식량이 Table 3에 요약되어 있다. 본 실험의 실험기간 내에서 변수 H4와 변수 N5에 대해서는 균열발생까지의 부식시간이 오래걸려 임계부식량을 찾을 수 없었다. 피복두께가 작은 경우 콘크리트 압축강도에 따라 임계부식량의 변화는 아주 미소

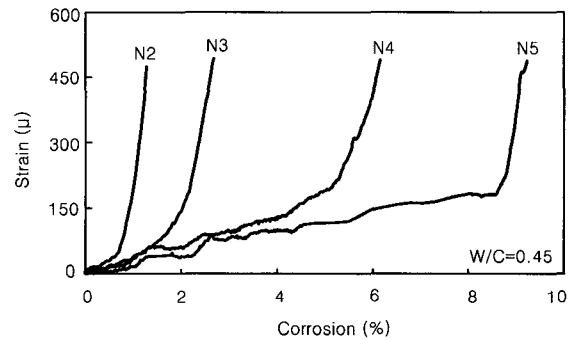


Fig. 9 Surface strain according to cover

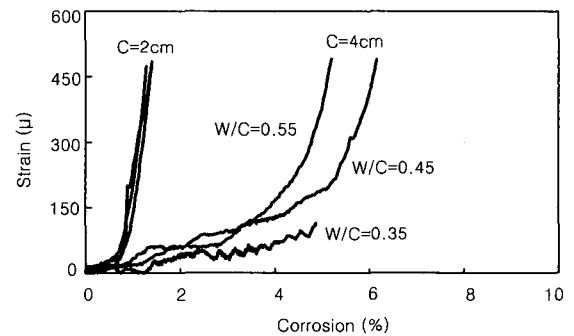


Fig. 10 Surface strain according to W/C

Table 3 Critical corrosion

Variables	Critical corrosion (%)
N2	0.875
N3	1.92
N4	4.064
N5	-
L2	0.89
L4	3.6
H2	0.995
H4	-

하나, 피복두께가 큰 경우에는 콘크리트 압축강도가 커짐에 따라 임계부식량이 점점 커지는 것을 알 수 있다.

### 5. 해석 모델

본 연구에서는 철근의 부식으로 인한 부피팽창에 의해 발생하는 균열과 콘크리트의 공극의 크기를 구하고, 이 균열 및 공극 속으로 흡수되는 부식생성물의 양을 고려하여 부식에 의한 피복콘크리트의 균열발생을 해석하였다. 즉, 철근 위치에서의 팽창압으로 인한 피복콘크리트의 표면 변형률을 유한요소해석으로 구하였다.

#### 5.1 유한요소해석

##### 5.1.1 해석개요

이번 절은 다음 절에서 설명하게 될 부식에 의한 피복의 균열발생에 대한 해석을 위하여 사전에 필요한 작업으로, 유한요소해석을 통하여 실험에서 사용한 시험체를 모델링하여 내부팽창압 P에 따른 반경 증가량 및 균열의 크기를 구하였다. 비선형 유한요소해석을 위하여 범용 프로그램인 DIANA를 사용하였으며 2차원 평면해석을 수행하였다. 이러한 유한요소해석은 다음 절에서 유도할  $K_{rust}$ 를 구하는 데 이용된다.

##### 5.1.2 콘크리트

콘크리트를 모델링하기 위하여 8절점 평면변형요소 (8 node plane strain element)를 사용하였고 재료특성은 실험에서 얻은 값을 사용하였다.

주응력과 Mohr-Coulomb 모델과의 관계를 Fig. 11에 나타내었고 콘크리트의 압축파괴기준을 Fig. 12에 나타내었다. Mohr-Coulomb 모델에서 부착력(cohesion)  $c$ 는 식 (8)로 표현된다.

$$c = \frac{1 - \sin \phi_0}{2 \cos \phi_0} \tag{8}$$

여기서,  $\phi_0$ 는 초기 마찰각으로 콘크리트의 경우 약 3

°이다.

인장응력에 대한 파괴기준으로 Linear Tension Cut-off를 도입하였다[Fig. 12]. 여기서 주인장응력이  $f_t$  또는  $f_t(1 + f_{lateral}/f_c)$  가운데 작은 값보다 커지면 균열이 발생하게 된다. 여기서,  $f_{lateral}$ 은 횡방향 주응력으로 2축응력상태를 고려하기 위한 값이다.

콘크리트의 응력-변형률 관계는 Hillerborg의 모델을 사용하였고 최대응력 이후의 거동은 쌍일차(bilinear)로 가정하였다. Fig. 13은 Hillerborg의 모델을 인장강도의 전후로 나누어 나타낸 것이다.

#### 5.1.3 해석기법

비선형 유한요소해석에서는 하중과 변위 사이의 관계가 더 이상 선형이 아니기 때문에 수렴조건을 만족할 때까지

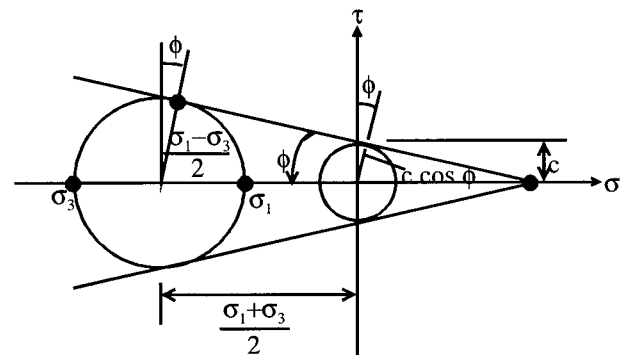


Fig. 11 Relationships between principal stresses for Mohr-Coulomb criteria

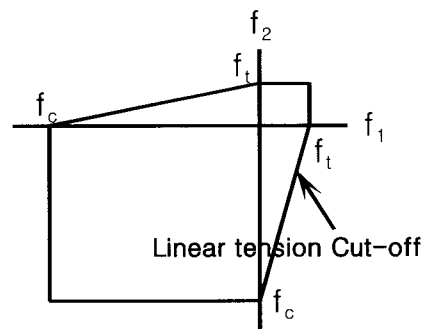


Fig. 12 Mohr-Coulomb failure criteria & linear tension cut-off

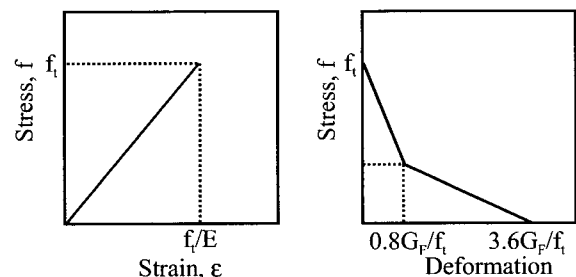


Fig. 13 Stress-strain relationship of concrete

반복계산과정(iteration procedure)을 수행하여 하중-변위 관계를 구해야 한다. 본 해석에서는 반복계산방법으로 Newton-Raphson Method를 사용하였으며 이를 Fig. 14에 나타내었다.

최대하중 근처에서는 Newton-Raphson Method로는 다음 단계의 하중을 찾기 어려워 변위가 아주 크게 나오기도 한다. 따라서 본 해석에서는 최대하중 근처에서는 Arc-Length Method를 사용하였다. Arc-Length Method는 Fig. 15에서와 같이 각 단계마다 정해지는 일정한 원호의 크기를 이용하여 하중-변위 곡선을 따라가면서 다음 단계를 찾는 방법이다. 이 방법을 이용하면 최대하중 이후의 거동을 계산할 수 있다.

### 5.1.4 메쉬 및 팽창압의 재하

Fig. 5에서 나타낸 시편의 모양에서 철근 주변의 요소를 자세히 나누고 철근 위치의 내부에 방사방향으로의 팽창압을 재하하였다.

내부의 팽창압 증가에 따른 콘크리트 피복의 인장변형률을 구하기 위한 비선형 유한요소해석의 메쉬를 Fig. 16에 나타내었다.

### 5.1.5 해석결과

Fig. 17은 물시멘트비 0.45인 경우에 피복이 각각 2, 3, 4 cm 일 때의 내부팽창압의 증가에 따른 표면의 인장변형률을 나타낸 것이다.

내부에 하중으로 가한 팽창압력이 증가함에 따라 표면의 변형률이 점차 커짐을 확인할 수 있으며 이들의 경향

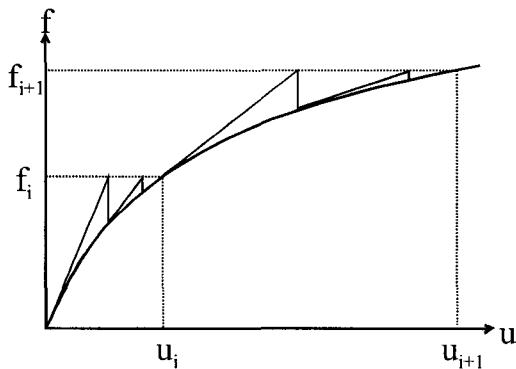


Fig. 14 Newton-Raphson method

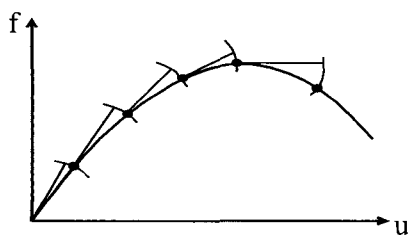


Fig. 15 Arc-Length method

은 실험결과와 비슷함을 알 수 있다. Fig. 18은 내부팽창압이 증가함에 따라 철근 주위에서의 균열이 진전하여 피복에 균열이 발생하는 과정을 나타낸 그림이다.

### 5.2 균열해석

유한요소해석의 결과로부터 내부팽창압에 따른 표면 변형률과 철근 위치의 변위량  $u_r$ 을 구하고 이로부터 P와 식 (5)의  $\epsilon_{rust}$ 의 관계를 도출하여 도시한 것이 Fig. 19의 그래프(a)이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 실험결과를 바탕으로 P와  $\epsilon_{rust}$ 의 관계를 도시하면 Lundgren이 제시한 식 (6)의 형태로 나타낼 때  $\epsilon_{rust}$ 의 미소한 변화에도 팽창압 P가 크게 변화하며 따라서  $K_{rust}$ 가 너무 크다는 것을 알 수 있다.

Lundgren은 그의 모델에서 부식생성물 층의 역학적 특성을 정의하여 철근부식에 의한 피복의 균열생성 문제를 해석적으로 접근하고자 하였다. 그러나 그의 모델에서는 실제로 철근부식이 증가하여 팽창압이 커지면 인장에 약한 콘크리트에서 균열이 발생하게 되고 발생한 균열 속으로 추가로 발생하는 부식생성물이 흡수된다는 사실을 무시하고 있다. 또 콘크리트 내부에 존재하는 공극 속으로도 부식생성물은 흡수되며 이 부식은 내부의 팽창압을 증가시키지 않으므로 부식에 의한 균열을 해석하는데 고려해야 한다.

본 연구에서는 Lundgren의 모델을 수정하여 철근부식

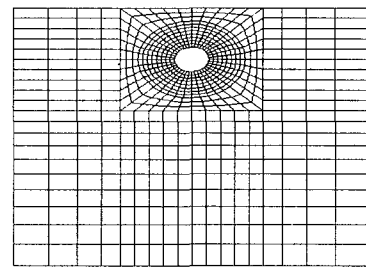


Fig. 16 Mesh

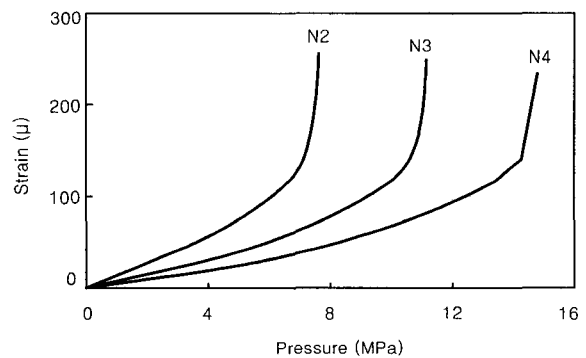


Fig. 17 Concrete surface strain due to internal pressure increase

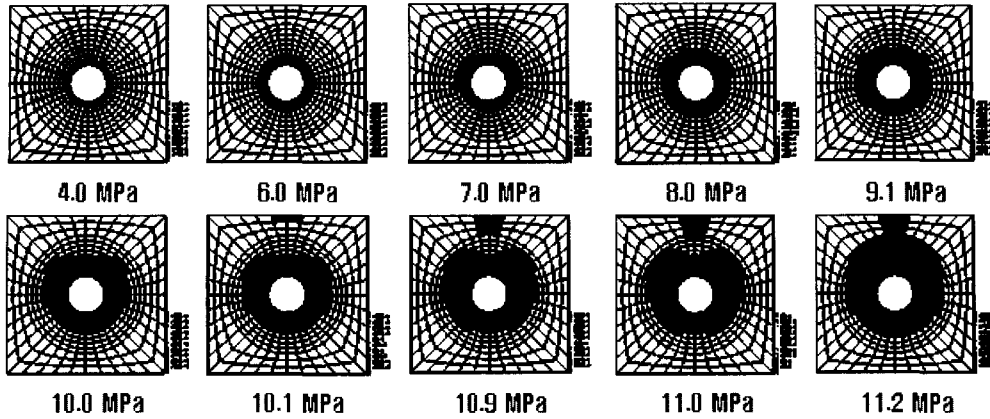


Fig. 18 Crack propagation in cover concrete

에 의해 내부에서부터 성장하는 균열 속으로 흡수되는 부식생성물의 양과, 콘크리트 공극 속으로 흡수되는 부식생성물의 양을 고려하였다. Fig. 20은 철근부식에 의한 부피 팽창으로 콘크리트 내부에 생긴 균열 및 공극 속으로 부식생성물이 흡수됨을 나타내고 있다.

철근의 부피팽창으로 인하여 주위의 콘크리트에 압력을 미치는 부식생성물의 양  $V_{net}$ 는 총 부식생성물의 양  $V_{rust}$ 에서 균열 속으로 흡수되는 부식생성물의 양  $V_{crack}$  및 공극 속으로 흡수되는 부식생성물의 양  $V_{pore}$ 를 빼주어야 한다[식 (9)].

$$V_{net} = V_{rust} - V_{crack} - V_{pore} \quad (9)$$

부식생성물의 양  $V_{rust}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{rust} &= w_{corr} W_0 \left( \frac{1}{a\rho_{rust}} - \frac{1}{\rho_{st}} \right) \\ &= w_{corr} \left( \frac{\pi d_b^2}{4} \rho_{st} \right) \left( \frac{1}{a\rho_{rust}} - \frac{1}{\rho_{st}} \right) \quad (10) \\ &= \pi r_b^2 (v_r - 1) w_{corr} \end{aligned}$$

Fig. 18에 나타난 철근의 부피팽창에 의하여 철근 주위에 발생하는 균열의 전파로부터 균열의 깊이를 구할 수 있고, 철근 둘레의 변형률의 변화로부터 생성된 균열의 폭을 구할 수 있다. 이렇게 얻어진 균열의 폭과 균열 깊이를 이용하여 균열의 형상을 Fig. 21과 같이 삼각형으로 가정하면 균열의 부피  $V_{crack}$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{crack} = \frac{1}{2} h(\Sigma w_c) \quad (11)$$

여기서,  $h$ 는 유한요소해석에서 각 팽창압에 따른 철근 주위의 균열의 평균 높이이며  $\Sigma w_c$ 는 철근 주위에 발생

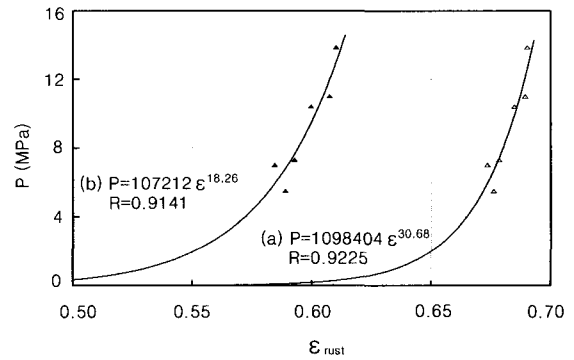


Fig. 19  $P$  vs  $\epsilon_{rust}$

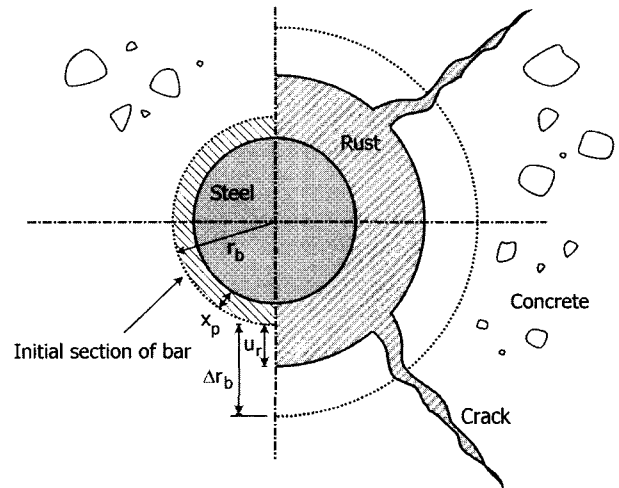


Fig. 20 Crack due to corrosion and pore

하는 모든 균열의 폭의 합이다. 내부에 팽창압이 가해져 철근의 반경이  $r_b$ 에서  $u_r$ 만큼 변했다고 할 때 철근둘레의 변형률은  $\epsilon_\theta = \frac{u_r}{r_b}$ 로 표현되므로 균열의 부피는 다음과 같이 표현된다.



$$\begin{aligned}
 V_{crack} &= \frac{1}{2} h(\Sigma w_c) \\
 &= \frac{1}{2} h(2\pi r_b)(\epsilon_\theta - \epsilon_0) \quad (12) \\
 &= \pi r_b h \left( \frac{u_r}{r_b} - \epsilon_0 \right)
 \end{aligned}$$

$\epsilon_0$ 는 인장균열을 발생시키는 콘크리트의 변형률로 0.0002를 사용하였다.

한편, 공극의 부피  $V_{pore}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$V_{pore} = V_{net} \cdot \phi_i \quad (13)$$

여기서,  $\phi_i$ 는 팽창한 철근의 위치에서의 공극률, 즉 철근중심으로부터  $(r_b + u_r)$ 인 위치에서의 공극률이다.

식 (10), (12), (13)을 식 (9)에 대입하여 새로운 이론적 철근 반경 증가량  $\Delta r_b^*$ 를 식 (14)와 같이 구하였다.

$$\Delta r_b^* = r_b \left( -1 + \sqrt{\frac{1 + (v_r - 1)w_{corr}}{-(V_{crack} + V_{pore})/\pi r_b^2}} \right) \quad (14)$$

이에 따라  $\epsilon_{rust}$ 를 식 (15)와 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_{rust} = \frac{u_r - \Delta r_b^*}{x_p + \Delta r_b^*} \quad (15)$$

철근팽창에 의한 균열을 고려하고 공극률  $\phi=0.35$ 로 가정하여 내부팽창압  $P$ 와 식 (15)의  $\epsilon_{rust}$ 의 관계를 도시하면 Fig. 19의 그래프(b)와 같다.

Fig. 19의 두 그래프를 비교해보면 균열 및 공극으로 흡수되는 부식생성물의 양이 해석에서 고려됨에 따라, 동일한 부식량에 대하여 균열 및 공극을 고려하는 경우는 그렇지 않은 경우에 비하여 철근의 변위량은 작아지며  $K_{rust}$ 는 1/10 정도로 작아진다는 것을 알 수 있다. 한편  $P$ 와  $\epsilon_{rust}$ 의 관계는 콘크리트의 공극률과 부식생성물의 종류에 대하여 달라지므로 다음에서 이의 영향을 살펴보고자 한다.

### 5.2.1 공극률 $\phi$ 에 따른 $P$ 와 $\epsilon_{rust}$

철근과 콘크리트의 경계층(interfacial zone)에서의 공극률이 각각 0.25, 0.35, 0.45로 변화함에 따른  $\phi P$ 와  $\epsilon_{rust}$ 의 관계를 Fig. 22에 나타내었다. 이 그래프에서 보듯이 공극 속으로 흡수되는 부식생성물의 양이 공극률의 변화에 따라 크게 변화함을 알 수 있고, 특히 공극률  $\phi$ 의 증가에 따라 동일한 팽창압  $P$ 를 유발하는  $\epsilon_{rust}$ 가 작아지

고 있음을 알 수 있다. 즉 식 (15)의 정의에서 보듯이  $\epsilon_{rust}$ 가 작아진다는 것은  $\Delta r_b^*$ 가 커져 부식생성물이 많아진다는 것을 의미한다.

그러나 콘크리트의 공극률은 물시멘트비 및 골재시멘트비, 수화도 등에 따라 달라진다. Powers-Brownyard의 모델을 이용하여 콘크리트의 공극률을 식 (16)을 이용하여 구하였다.

$$\phi_p = \phi_{con} \left( 1 + \frac{\frac{a}{c} \frac{\rho_c}{\rho_a}}{1 + \frac{w}{c} \frac{\rho_c}{\rho_w}} \right) \quad (16)$$

여기서,  $a$ 는 골재량 [ $kg/m^3$ ],  $w$ 는 물량 [ $kg/m^3$ ],  $c$ 는 시멘트량 [ $kg/m^3$ ]이고,  $\phi_p$ 는 시멘트 페이스트의 공극률로서  $\phi_p = \phi_{cap} + \phi_{gel}$ 이다.

각 실험변수의 물시멘트비에 따라 구한 콘크리트의 공극률  $\phi_{con}$ 은 Table 4와 같다. 이 값은 철근과 콘크리트의 경계층에서 충분히 떨어진 지점에서의 콘크리트 공극률이다. 또한 앞절의 유한요소해석에서 피복 표면에 균열을 발생시키는 철근의 변위량  $u_r$ 을 변수별로 정리하여 Table 4에 나타내었다.

Table 4에 나타낸 반경 증가량은 일반적으로 알려진 경계층의 두께인 10~30  $\mu m$  보다 작은 값이므로 경계층 내

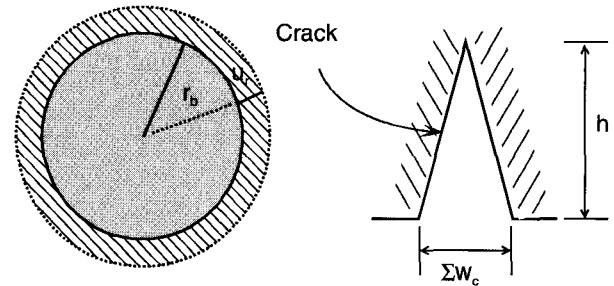


Fig. 21 Volume of crack

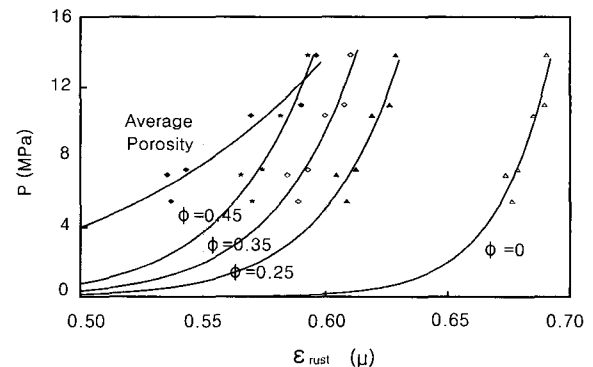


Fig. 22  $P$  &  $\epsilon_{rust}$  according to  $\phi$

에서는 Table 4에서 구한  $\phi_{con}$ 을 사용할 수 없고,  $\phi_{con}$ 은 Fig. 23에 나타난 것처럼 철근으로부터 거리가 증가함에 따른 공극률의 변화량의 그래프에서  $\phi_0$ 의 값으로 사용할 수 있다. 철근에서 거리가 증가함에 따른  $\phi$ 의 변화는 식 (17)과 같이 표현하였다.

$$\phi = \phi_0 + (\phi_i - \phi_0)\exp(-kd) \quad (17)$$

여기서,  $\phi_0$ 는 철근에서 멀리 떨어진 위치에서의 콘크리트 공극률,  $\phi_i$ 는 철근과 콘크리트의 접촉면에서의 공극률로서 0.9로 하였다.  $d$ 는 철근에서부터 떨어진 거리이고  $k=200$ 일 때 경계층의 두께가  $20 \mu m$  정도로 나온다.

유한요소해석에서 얻어진 반경 증가량  $u_r$ 의 값은 Table 4에 나타난 것처럼  $5 \sim 10 \mu m$  정도로 경계층의 두께 보다 작은 값을 가진다. 따라서 본 실험결과를 해석하는데는 Fig. 23에 도시한 것처럼 빗금 친 부분의 크기가 공극의 크기라고 할 수 있다. Fig. 23에 도시한 것처럼 변화하는 공극률의 크기를 평균한 값을 각 변수별 평균공극률(average porosity)이라 하고 Table 4에 각 변수별 평균공극률을 나타내었다.

이렇게 구한 평균공극률  $\phi$ 의 값을 사용하여 구한 내부 팽창압  $P$ 와  $\epsilon_{rust}$ 의 관계를 Fig. 22에 함께 나타내었다.

### 5.2.2 $v_r$ 에 따른 $P$ 와 $\epsilon_{rust}$

각 변수별로 구한 평균공극률을 사용하면서 철의 밀도와 부식생성물의 밀도에 관계하는 값인  $v_r$ 이 변화함에 따른  $P$ 와  $\epsilon_{rust}$  사이의 관계를 Fig. 24에 나타내었다.

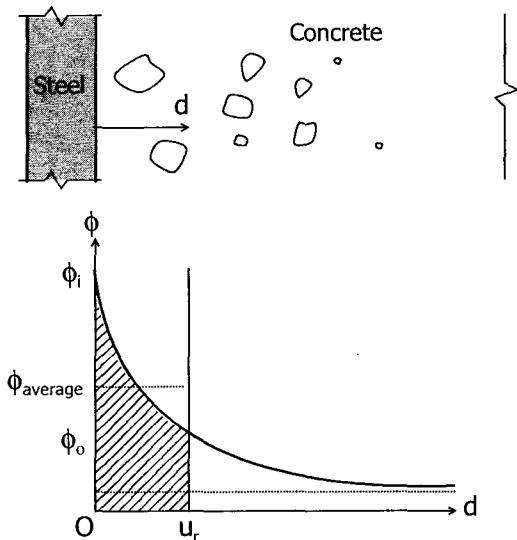


Fig. 23  $\phi$  according to distance from reinforcing bar

일반적으로 부식생성물의  $v_r$ 은 2.5~3.5의 값을 가지므로 이 범위의 값에 대하여 나타내었다. Fig. 24에 나타난 바와 같이  $v_r$ 의 값이 커짐에 따라 동일한 압력을 유발하는 부식변형률  $\epsilon_{rust}$ 가 점점 커지는 것을 보여주고 있다. 즉, 부식생성물의 밀도가 작으면 반경 팽창률이 작아야 동일한 압력  $P$ 를 유발할 수 있다.

### 5.2.3 $\epsilon_{free expansion}$ 의 도입과 $K_{rust}^*$

Fig. 24는  $v_r$ 의 변화에 따른 팽창압  $P$ 와  $\epsilon_{rust}$ 의 관계를 보여주고 있다. Lundgren의 모델에 의하면 Fig. 24에서 실선과 같이 거동을 보이나 실제로는 실험결과에서 보듯이 팽창압을 유발하기 전에 일정량의 부식량이 자유롭게 팽창하게 되므로 본 연구에서는 이것을  $\epsilon_{free expansion}$ 으로 Fig. 24와 같이 정의하였다. 따라서  $\epsilon_{rust}^*$ 를 다음과 같이 새롭게 정의하였다.

$$\epsilon_{rust}^* = \frac{u_r - \Delta r_b^*}{x_p + \Delta r_b^*} - \epsilon_{free expansion} \quad (18)$$

여기서, 각 변수별 평균공극률을 사용할 때  $v_r$ 의 변화에 따른  $\epsilon_{free expansion}$ 을 Table 5에 나타내었다. 식 (18)과 같은 개념을 이용하여 부식생성물 층의 역학적 특성을 나타내는 식 (6)을 수정하여, 팽창압  $P$ 의 증가에 따른 부식생성물층의 변형률  $\epsilon_{rust}^*$ 의 관계를 식 (19)와 같이 선형적

Table 4  $u_r$  & porosity

Variables	$w/c$	$\phi_{con}$	$u_r$ ( $\mu m$ )	Average porosity, $\phi$
N2	0.45	0.0568	5.689	0.62
N3	0.45	0.0568	8.272	0.52
N4	0.45	0.0568	11.239	0.43
L2	0.55	0.0697	5.387	0.64
L4	0.55	0.0697	10.975	0.45
H2	0.35	0.0510	5.626	0.63

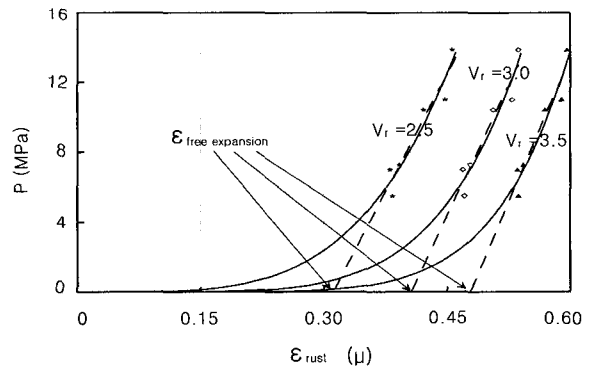


Fig. 24  $P$  &  $\epsilon_{rust}$  according to  $v_r$

으로 나타내었다. 여기서 선형관계의 계수  $K_{rust}^*$ 를 Table 5에 나타내었다.

$$P = K_{rust}^* \epsilon_{rust}^* \quad (19)$$

Fig. 25는 변수  $v_r$ 에 따라 본 연구에서 새롭게 정의된 식 (19)의 형태로  $P$ 와  $\epsilon_{rust}^*$ 의 관계를 선형으로 나타낸 것이다.

Fig. 24와 같은 개념을 이용하여, 공극률이 0, 0.25, 0.35, 그리고 평균공극률인 경우에  $v_r$ 이 각각 2.5, 3.0, 3.5로 변화함에 따른  $\epsilon_{free\ expansion}$ 와  $K_{rust}^*$ 를 Table 5에 나타내었다.

### 5.3 실험결과와 해석결과의 비교

부식생성물층의 역학적 특성인  $K_{rust}^*$ 과  $\epsilon_{free\ expansion}$  등을 이용하여 균열 및 공극 속으로 흡수되는 부식생성물의 양을 고려한 균열해석 과정을 설명하면 다음과 같다. 즉, 식 (2)로부터 부식량  $w_{corr}$ 에 따른 철근 반경의 감소

Table 5  $\epsilon_{free\ expansion}$  &  $K_{rust}^*$

Porosity	$v_r$	$\epsilon_{free\ expansion}$	$K_{rust}^*$
0.25	2.5	0.4246	193.81
	3.0	0.5182	244.04
	3.5	0.5858	299.18
0.35	2.5	0.4014	180.28
	3.0	0.4956	230.37
	3.5	0.5625	265.43
0.45	2.5	0.3798	177.85
	3.0	0.4745	219.51
	3.5	0.5443	264.70
Average porosity for each variables	2.5	0.3114	89.87
	3.0	0.4062	99.40
	3.5	0.4783	109.86

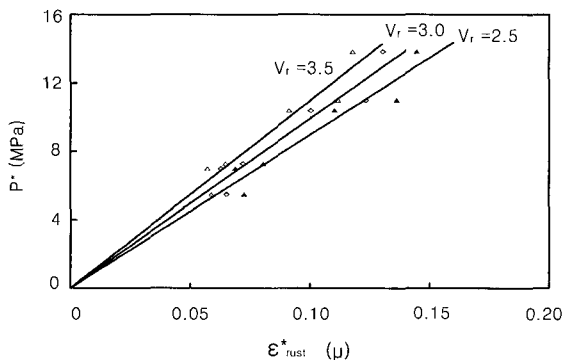


Fig. 25  $P^*$  &  $\epsilon_{rust}^*$

량  $x_b$ 를 계산한 뒤 주변 공극과 발생된 균열 속으로 흡수된 부식생성물의 양을 고려한 반경 증가량  $\Delta r_b^*$ 를 식 (14)에 따라 계산한 뒤, 식 (18)로부터  $\epsilon_{rust}^*$ 를 구하여 식 (19)에서  $P$ 를 계산한다. 식 (19)의  $K_{rust}^*$ 는 Table 5에서 알고 있는 값이며, 유한요소해석으로부터 각 하중  $P$ 에 따른  $u_r$ 과 콘크리트 표면 변형률 등을 구할 수 있다.

Fig. 26은 물시멘트비가 0.45인 경우에 피복두께 변화에 따른 표면 변형률  $\epsilon$ 과 부식률  $w_{corr}$  사이의 관계에 대한 실험결과와 해석결과를 비교한 그래프이다. 피복두께에 따라 실험결과와 해석결과가 비교적 유사한 경향을 보이고 있다.

Fig. 27과 Fig. 28은 각각 피복이 2 cm 및 4 cm인 경우에 강도(물시멘트비)가 변화함에 따른 부식량과 표면 변형률 사이의 관계를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 실험결과와 해석결과가 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 비교에서 보듯이 피복이 2 cm인 경우는 강도에 따른 차이가 작으나 피복두께가 4 cm인 경우에는 강도(물시멘트비)에 따른 차이가 잘 나타나고 있음을 볼 수 있다. Table 6은 각 변수별로 해석에 사용된 공극률 및  $v_r$ 의 값을 제시한 것이다.

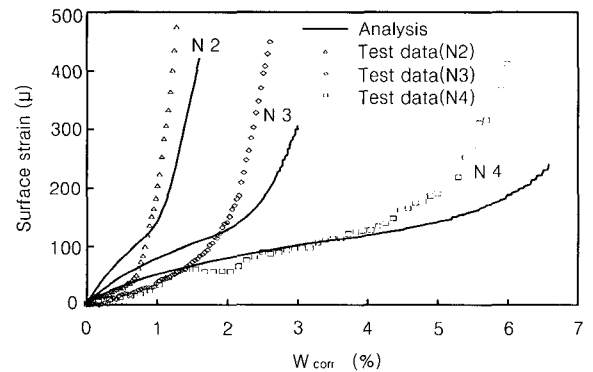


Fig. 26 Experiment and analysis according to cover depth (W/C=0.45)

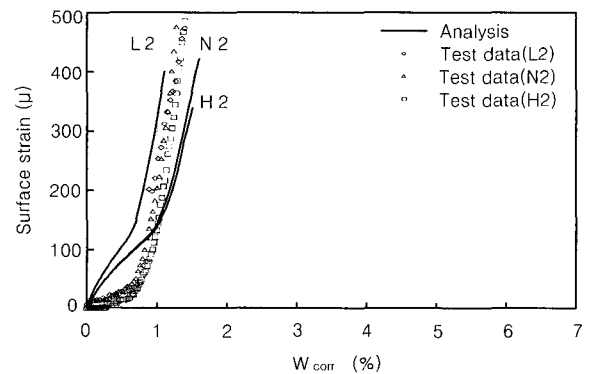


Fig. 27 Experiment and analysis according to compressive strength (Cover=2 cm)

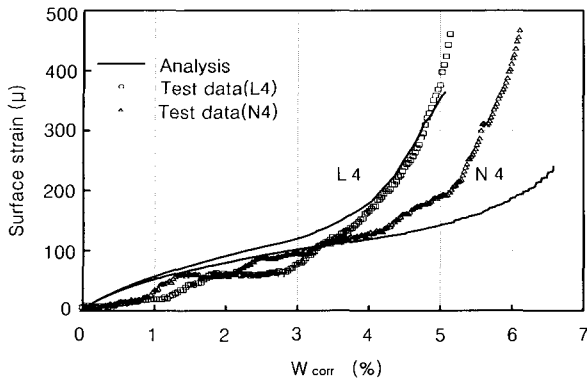


Fig. 28 Experiment and analysis according to compressive strength (Cover=4 cm)

Table 6 Porosities &  $\nu_r$  used in analysis

Variables	Porosity	$\nu_r$
N2	0.35	3.5
N3	0.35	3.5
N4	0.25	2.5
L2	0.52	3.5
L4	0.35	3.5
H2	0.35	3.5

## 6. 결 론

본 연구에서는 철근의 부식에 따른 팽창과 이로 인한 균열거동을 규명하기 위하여 실험과 해석적인 연구를 수행하였다. 실험에서는 주요변수로서 강도와 피복두께를 고려하였으며, 해석은 내부 팽창압에 따른 균열 거동을 고찰하였다. 본 연구로부터 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 본 연구를 통하여 콘크리트 피복에 균열을 일으키는 임계부식량은 강도증가에 따라 커지는 결과를 보였다. 피복의 두께가 아주 작은 경우에는 강도에 따른 임계부식량의 차이가 크지 않으나, 피복의 두께가 어느 정도 이상이 될 때는 콘크리트의 압축강도가 커짐에 따라 임계부식량이 커지는 경향을 보였다.

2) 부식생성물질이 철근 주위의 공극과 균열로 흡수되는 과정을 고려하였으며, 이 흡수량  $V_{crack}$ 과  $V_{pore}$ 를 유도하여 제시하였다.

3) 부식으로 인한 팽창압  $P$ 와 변형량  $\epsilon_{rust}^*$ 와의 관계식을 유도하였다. 실험에서 얻어진 임계부식량의 자료와 내부 팽창압을 가하는 유한요소해석을 통하여 부식생성물층의 역학적 특성인  $K_{rust}^*$  및  $\epsilon_{free\ expansion}$ 의 값을 제시하였다. 이들의 값을 구할 때 콘크리트의 공극률이 다양

하게 변화함에 따른  $K_{rust}^*$  및  $\epsilon_{free\ expansion}$ 의 값을 제시하였다.

4) 이와 같은 자료를 바탕으로 실험적으로 구한 철근 부식량에 따른 표면 변형률의 관계를 해석적으로 구한 값과 비교하였으며 실험결과와 해석결과가 비교적 잘 일치하였다.

본 연구의 결과는 앞으로 철근부식에 의해 내하력의 감소 등 손상을 받는 해양환경 하의 철근콘크리트 구조물 등의 수명예측과 안전성 평가에 효율적으로 사용될 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- Liu, Y. and Weyers, R. E. (1998), "Modelling the Time-to Corrosion Cracking in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures," *ACI Mat. J.*, 95(6), pp.675-681.
- Martin-Perez, B. (1998), "Service Life Modelling of RC Highway Structures Exposed to Chlorides," Ph.D Dissertation, Dept. of Civ. Engrg., University of Toronto, Toronto.
- Bazant, Z. P. (1979b), "Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures-Application," *J. Struct. Div., ASCE*, 105(6), pp.1155-1166.
- Masayasu Ohtsu, Shinichi Yosimura, "Analysis of Crack Propagation and Crack Initiation Due to Corrosion of Reinforcement," *Construction and Building Materials*, Vol.11, No.7-8, pp.437-442, 1997.
- H. J. Dagher and S. Kulendran, "Finite Element Modeling of Corrosion Damage in Concrete Structures," *ACI Structural Journal*, V.89, No.6, Nov.-Dec., 1992.
- K. Lundgren, "Modelling Bond Between Corroded Reinforcement and Concrete," *Proceedings of the Fourth International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, Cachan, France, 28 May ~ 1 June 2001, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Vol. 1, pp.247-254.
- Jang, B. S., "Life Time Estimation Method of Reinforced Concrete Structures Considering the Effects of Reinforcements on the Chloride Diffusion and the Non-uniform Corosion Distribution," Ph.D Dissertation, Dept. of Civ. Engrg., Seoul National University, Seoul.

---

## 요 약

철근의 부식에 의해 발생하는 부식생성물은 부피팽창으로 인하여 주위의 콘크리트에 압력을 가한다. 이 팽창압은 철근 주위의 콘크리트에 인장응력이 생기게 하며 결국 콘크리트의 피복에 균열을 발생시킨다. 콘크리트 피복의 균열발생은 콘크리트 구조물의 사용수명을 감소시킬 뿐만 아니라 안전성에도 영향을 미친다.

본 연구의 목적은 콘크리트 피복에 균열을 일으키는 임계부식량을 조사하는 것이다. 이를 위하여 포괄적인 실험 및 이론적 연구를 수행하였다. 주요 실험변수로는 콘크리트의 강도와 피복두께이고 부식량의 증가에 따른 콘크리트 피복 표면의 인장변형률을 측정하였다.

철근 팽창에 의한 팽창압의 계산에 공극 및 균열 속으로 흡수되는 부식생성물을 고려하였다. 본 연구를 통하여 균열을 일으키는 임계부식량은 콘크리트 압축강도가 커짐에 따라 증가한다는 사실을 확인하였다. 부식층 내의 팽창압과 변형 사이의 관계를 유도하였으며 부식생성물층의 강성을 결정하였다. 팽창압과 변형 사이의 관계를 설명하기 위하여 압력을 유발하지 않는 변형량의 개념을 도입하였다. 본 연구에서 제안된 이론은 실험결과와 잘 일치하며 콘크리트 구조물의 내구성 설계에 기초가 될 수 있을 것이다.

**핵심용어** : 철근부식, 철근부식팽창, 임계부식량, 균열, 콘크리트피복균열

---