

---

# 콘크리트의 중성화로 인한 철근의 부식 정도 평가

## Evaluation of Rebar Corrosion Due to Carbonation of Concrete



이창수\*

Lee, Chang-Soo



설진성\*\*

Seol, Jin-Sung



윤인석\*\*

Yoon, In-Seok

---

### ABSTRACT

Recently, reinforced concrete structures exposed to severe environment are increased in metropolitan area. The acid rain and CO<sub>2</sub> penetrated toward rebar, thus rebar corrosion occurred. The corrosion of rebar in concrete is, as in most corrosion processes, an electrochemical nature. The corrosion may severely affect on durability and service life of such a concrete structures.

This study was performed for the purpose of acquiring data about corrosion condition and considering a countermeasure to prevent rebar from corroding due to carbonation of concrete. An accelerated carbonation testing procedure was applied to measure the evolution of carbonation and rebar corrosion with time for various water-binder ratios and cement types.

**Keywords** : carbonation, concrete cover, corrosion, durability, electrochemical nature, rebar, service life, water-binder ratio, wet-dry cycle

---

\* 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 서울시립대학교 대학원 토목공학과

· 본 논문에 대한 토의를 2000년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2000년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

콘크리트의 내구성을 저하시키는 주요한 원인은 공극이나 균열내부로 유체의 이동으로 인한 것이 지배적이며 이 유체는 수분, 유해이온, 그리고 이산화탄소 및 공기이다.<sup>(1)</sup> 콘크리트의 중성화는 대기 중의 이산화탄소가 콘크리트 내부로 침투되어 발생하는 현상으로서 콘크리트 조직체 내부의 공극감소<sup>(1)</sup>, C-S-H의 분해소실<sup>(2)</sup>, 흡착 및 탈착의 반복으로 인한 염화물의 이동현상<sup>(3)</sup> 등의 결과를 초래하지만 무엇보다도 주요관심사는 철근의 부식을 유발한다는 점이며 현장조사에서도 그 심각성이 확인된 바 있다.<sup>(4)</sup>

불행히도 최근의 급속한 경제성장으로 인하여 도심지의 산성비와 이산화탄소는 지속적으로 증가하는 추세에 있는데 즉 전세계적으로 매년 0.5% 씩 증가하는 추세에 있는 대기 중 이산화탄소는 1994년 서울에 430ppm, 산성비의 pH는 96년에 4.7로 측정된 바 있다.<sup>(5,6)</sup> 향후에도 산성비와 이산화탄소 양은 지속적인 증가를 보일 것으로 예상되며 이로 인한 도심지의 철근콘크리트 구조물의 내구성 저하는 더욱 우려되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 도심지의 가혹한 환경하에 놓인 콘크리트 구조물의 중성화에 따른 철근 부식을 알아보기 위하여 물-시멘트비, 시멘트의 종류, 플라이애쉬 치환율, 피복두께를 변화시켜 시험체를 제작한 후 10%로 이산화탄소의 농도를 높여 중성화 촉진 실험을 실시하였다. 또한 중성화에 따른 철근부식을 평가하기 위하여 철근의 자연전위, 부식전류밀도 및 중량감소량을 측정하여 분석, 고찰하였다.

## 2. 철근 부식으로 인한 철근콘크리트 구조물의 성능저하

철근의 부식은 철근콘크리트 구조물의 내구성이 저하되는 주요 원인이다. 전기화학적 부식전지는 캐소드와 애노드로 구성되어 있으며 콘크리트 내의 공극수는 전해질 역할을 한다. 중성화가 진행되면 산소 혹은 물로 인하여 캐소드 작용이 활발하게 진행되고 발착물이 생성되어 철근과 콘크리트

리트의 부착강도 저하와 철근의 횡단면적 감소가 초래되며 피복 콘크리트에 균열이 유발하게 된다. 피복 콘크리트의 균열은 콘크리트 부재의 유효 단면적을 감소시킬 뿐만 아니라 염화물이나 이산화탄소 혹은 산소 등의 침투를 더욱 용이하게 하여 부식-균열-부식심화 현상을 연쇄적으로 진행시키므로서 결국에는 구조물 전체의 파괴가 유도된다.(Fig. 1) 이산화탄소 혹은 염화물의 침투가 철근위치까지 도달되는 잠복기를 거치게 되면 부식의 팽창압으로 인하여 피복 콘크리트에 균열이 발생하는 부식진전기가 잇따르게 되는데 이 기간이 약 2~5년이라는 연구결과<sup>(7)</sup>에서 의미하는 바와 같이 일단 철근이 부식하기 시작하면 빠른 기간 내에 콘크리트 구조물의 내구성은 현저하게 저하된다.

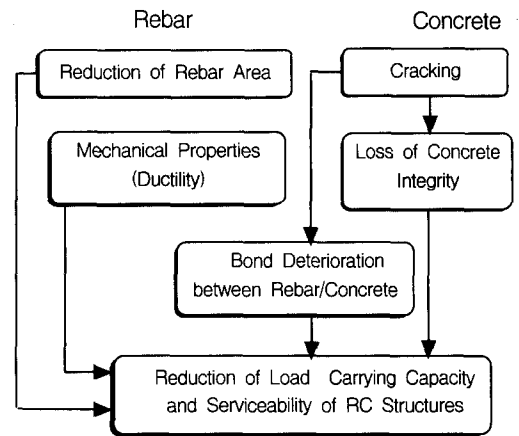


Fig. 1 Damage effects of rebar corrosion on concrete structures

## 3. 실험개요

### 3.1 사용재료

#### 3.1.1 결합재

보통포틀랜드시멘트(이하 OC로 약함), 고로슬래그시멘트(이하 SC로 약함) 및 플라이애쉬(이하 FA로 약함)를 사용하였으며 물리적, 화학적 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition and physical properties of cement

Item	Chemical composition (%)							Specific gravity	Specific surface (cm <sup>2</sup> /g)
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	lg. loss		
Type									
OC	21.8	5.8	3.56	60.6	3.54	2.6	1.0	3.14	3,422
SC	25.0	11.0	2.0	53.1	4.6	2.2	1.1	2.96	3,825
FA	68.0	25.0	2.9	2.0	0.9	-	3.5	2.15	4,546

3.1.2 골재

굵은골재는 부순돌, 잔골재는 강모래를 사용하였으며 각각의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

Table 2 Physical properties of aggregate

Item	G <sub>max</sub> (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	F.M	Organic impurities	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )
Agg.						
Fine agg.	-	2.59	1.50	2.80	good	1,620
Coarse agg.	10	2.74	0.90	7.20	-	1,734

3.1.3 철근

직경 12mm인 원형철근의 표면을 No. 800 샌드페이퍼로 연마한 후 아세톤으로 닦아 양 단면을 에폭시로 코팅하였으며, 한쪽 끝은 통전용 전선을 연결하였다. 철근의 화학조성은 Table 3과 같다.

Table 3 Chemical composition of rebar (%)

C	Si	Mn	Cu	S	Ni	Cr	Mo	P	Sa
0.24	0.24	0.95	0.02	0.009	0.03	0.045	0.012	0.017	0.0005

3.1.4 혼화제

목표 공기량을 확보하기 위하여 주성분이 리그닌술포산 칼슘인 표준형 AE감수제를 사용하였으며 물-결합재비 40%인 시험체는 고성능감수제를 사용하여 목표 슬럼프를 확보하였다.

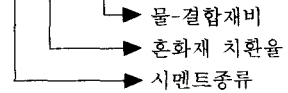
3.2 콘크리트 배합

콘크리트의 배합은 Table 4와 같으며 이때 굵은골재의 최대치수는 시험체의 피복두께를 고려하여 10 mm로 정하였다.

Table 4 Mix proportion of concrete

Item	G <sub>max</sub> (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )				
						W	C	S	G	Ad.
Type										
OC-40				40	38.4	120	300	735	1249	-
OC-50				50	40.4	150	300	742	1159	-
OC-60	10	10±1	4.5	60	42.4	180	300	746	1073	-
FC10-50				50	40.4	150	270	738	1153	30
FC20-50				50	40.4	150	240	734	1146	60
SC-50				50	40.4	150	300	736	1150	-

\* 배합기호 설명 FC 10 - 50



3.3 시험체의 제작 및 실험방법

3.3.1 시험체의 제작

Fig. 2와 같이 100×100×200mm의 콘크리트 시험체에 피복두께(이하 C.D.로 약함)를 10mm와 20mm로 하였으며 동일 배합의 시험체를 각각 2개씩 제작하였다. 완성된 시험체를 28일 동안 표준양생하였으며 각 시험체의 28일 압축강도는 Table 5와 같다.

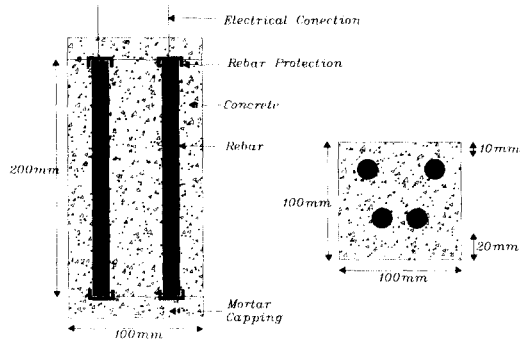


Fig. 2 Shape and size of concrete specimen

Table 5 Compressive strength of concrete (kgf/cm<sup>2</sup>)

OC-40	OC-50	OC-60	FC10-50	FC20-50	SC-50
346	322	258	320	309	331

### 3.3.2 콘크리트의 중성화 촉진 방법

이산화탄소 농도는 10%, R.H.는 50%, 온도는 60°C를 유지하고 3일 촉진 후 3일 물 속에 침지하는 과정을 1 사이클로 하여 총 61사이클을 수행하였다.

### 3.3.3 콘크리트의 중성화깊이

100×100×200mm의 각주형 콘크리트 시험체를 각 배합당 2개씩 할렬파쇄한 후 경화된 콘크리트의 중성화측정 방법<sup>(8)</sup>을 참고로 콘크리트의 파단면에 1% 페놀프탈레인-알코올 용액을 분무하여 평균적인 중성화깊이를 산정하였다.

### 3.3.4 철근의 자연전위

ASTM C 876<sup>(9)</sup>에 근거하여 철근의 자연전위를 측정하였으며 참조전극으로는 포화황산동 전극(CSE)을 이용하였다. 자연전위는 콘크리트 조직내 공극의 함수상태에 따라 유동적일 수 있으므로 측정 1일전에 콘크리트를 대기중에 방치하여 기전화하였다.

### 3.3.5 철근의 부식전류밀도

전기화학적 방법에 의한 철근의 부식속도를 나타내는 지표로써 부식전류밀도( $I_{corr}$ )를 이용하였다. 부식전류밀도를 구하는 방법 중 분극저항법은 미소한 전위차를 철근에 부하하였을 때 가해진 전위차와 측정전류가 직선관계를 유지한다는 아래의 Stern-Geary 방정식을 이용하고, 부식전류밀도 측정기(Gecor6)에 의한 측정결과는 Broomfield et al.의 기준<sup>(10)</sup>을 참고로 하였다.

$$I_{corr} = \frac{K}{R_p}$$

여기서,  $K$ 는 철근 상태에 따른 상수(26~52 mV)이며,  $R_p$ 는 분극저항이다.

또한 철근의 부식속도는 Faraday's law에 의하여 부식전류밀도로 부터 구할 수 있다.<sup>(10)</sup>

### 3.3.6 철근의 부식면적을 측정

철근의 부식발생부위를 트레이싱지로 스케치하여 방안지의 부식 면적의 교점수  $n$ , 철근 전개도의 전체교점수를  $N$ 으로 하여  $n \times 100/N$  (%)로

산정하였다.

### 3.3.7 철근의 중량감소율과 부식속도

부식된 철근의 녹을 ASTM G 1<sup>(11)</sup>에 의하여 클라크 용액으로 제거한 후 중량을 측정하여 다음 식으로 중량감소율을 계산하였다.

$$\text{중량감소율}(\%) = \frac{\text{시험전 중량} - \text{부식후 중량}}{\text{시험전 중량}} \times 100$$

그리고 철근의 부식속도(mcy)는 다음과 같이 중량감소량으로부터 얻어진다.

$$\text{부식속도}(\text{mcy}) = \frac{\text{중량감소}(\text{mg})}{\text{철근표면적}(\text{cm}^2) \times \text{시험기간}(\text{year})}$$

## 4. 실험결과에 대한 고찰

### 4.1 콘크리트의 중성화

재령 52주 동안 중성화촉진 시험결과 물-시멘트비와 시멘트 종류를 변수로 하여 중성화의 진전 상황을 Fig. 3과 Fig. 4에 제시하였다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 물-결합재비가 커질수록 뚜렷하게 중성화깊이가 상승하고 있음을 알 수 있다. 이러한 원인은 물-결합재비가 커지면서 콘크리트의 수화조직체에 모세공극량이 많아지고 골재와 시멘트 페이스트 사이 경계면의 강도저하와 함께 미세균열의 존재가 더욱 커져 투기성이 증가한 것으로 설명할 수 있다.<sup>(12)</sup>

콘크리트의 중성화속도는 투기성 및 콘크리트 수분량과 함수관계를 형성하며 모세관작용에 의한 물의 흡수와의 상관관계를 갖는다.<sup>(13)</sup>

Neville<sup>(1)</sup>에 의하면 중성화의 진행을 지배하는 기초적인 요인으로 경화된 시멘트 페이스트의 확산성을 들었는데 이는 이산화탄소의 확산이 진행되는 동안 경화된 시멘트 페이스트의 공극체계에 대한 함수이며 시멘트의 종류와 물-결합재비 그리고 수화도와 관련된다. 콘크리트의 투기성은 물-결합재비를 50% 이하로 할 때 현저하게 저하되는데<sup>(14)</sup>, 본 연구결과에서도 물-결합재비 40%인 시험체를 기준으로 50%인 시험체가 중성화속

도의 증가폭이 크게 나타나 이러한 경향을 반영하고 있다. 즉, 촉진기간 52주째에 50%, 60%인 시험체는 40%인 시험체의 각각 약 3.3배, 4.5배로 중성화 속도가 빠르게 진행되었다. 물-결합재비 40%인 시험체는 재령 12주까지 중성화 진행율이 전혀 없었는데 12주 이후에도 아주 느린 중성화 진행속도를 보임으로써 이산화탄소의 침투에 대한 콘크리트의 미세 공극 구조가 치밀하여 중성화의 저항성이 매우 우수하였다.

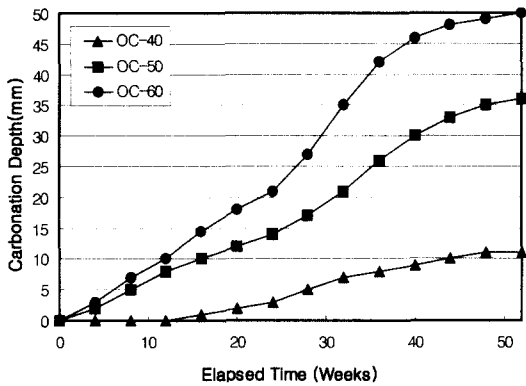


Fig. 3 Effect of exposure time on carbonation depth by w/c ratio under accelerated test condition

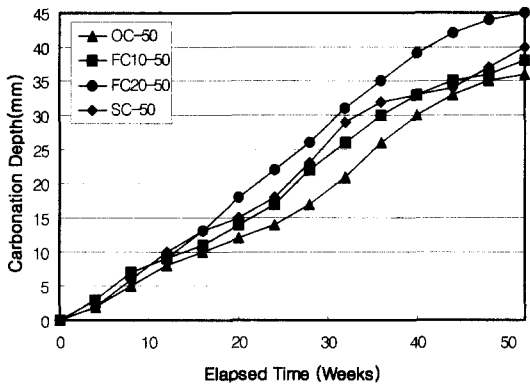


Fig. 4 Effect of exposure time on carbonation depth by cement type under accelerated test condition

또 한가지 주목할 만한 사실은 재령이 길어질수록 중성화깊이의 상승폭은 점차 작아지고 있다는 점으로서 이는 중성화진행속도가  $\sqrt{\text{경년}}$ 과 비례하다는 사실을 보이고 있다.

한편 Fig. 4는 시멘트 종류별로 콘크리트의 중

성화 진행상황을 보인 것으로 일반적으로 재료적 특성상 혼합시멘트를 사용한 콘크리트가 여러가지 장점이 있지만 중성화에 대한 저항성은 보통 콘크리트보다 취약하였다.

이러한 이유는 첫째, 플라이애쉬 내의 실리카가 포졸란작용으로 인하여 내부공극을 충전시켜 콘크리트의 조직체는 치밀해졌지만  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 소비되어 상대적으로 중성화에 대한 취약성이 떨어졌기 때문이다. 따라서 중성화에 대한 저항성은 물-결합재비를 줄여 치밀한 콘크리트 조직체를 만드는 것이 유효하되 포졸란작용에 의한 조직체의 치밀함보다도  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 양이 더 크게 좌우하는 것으로 판단된다.

둘째는 혼합시멘트를 사용한 콘크리트가 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트보다 CaO 함유량이 작아  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 생성이 작기 때문이다.

그러나 콘크리트의 압축강도를 목표로 콘크리트의 배합을 결정할 때 고로시멘트와 플라이애쉬 시멘트는 일반적으로 고로슬래그와 플라이애쉬량이 많을수록 재령 28일까지의 압축강도가 작으므로 목표하는 강도를 발현하기 위해서는 물-결합재비 또한 작아야 한다. 그러므로 실제적으로 고로슬래그시멘트를 사용한 콘크리트는 보통포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트와 중성화속도가 거의 동일할 것으로 생각된다.<sup>(15)</sup>

배합특성별 중성화진행 결과분석에서 알 수 있듯이 콘크리트의 중성화에 대한 저항성을 향상시키기 위해서는 물-결합재비 50% 이하가 요구되지만 실제 구조물의 내구성저하는 한가지 요인이 아닌 복합적인 작용으로 진행된다는 사실을 고려할 때 적정 혼화재의 선정 및 혼입량을 결정하여 사용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

#### 4.2 철근의 부식

철근의 자연전위는 Fig. 5에서 보이고 있는데 물-결합재비가 크고 피복두께가 작을수록 전위가 낮아지는 뚜렷한 양상을 보였다. 물-결합재비 60%인 시험체는 28주가 되면서 부식발생확률이 90%인  $-350\text{mV}$  이상을 보여 중성화깊이가 철근 위치 이상으로 도달된 것으로 추정된다. 대체로 재령이 올라감에 따라 작은 변동을 보이며 지속

적으로 낮아지는 추세를 보였는데 변동의 원인은 자연전위의 측정원리가 전위의 변화로부터 철근의 부식성을 판정하는 방법으로서 피복 콘크리트의 환경이나 철근의 상황에 따라 변화하기 때문인 것으로 판단된다.

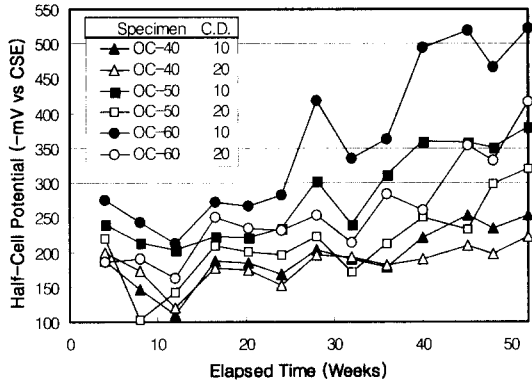


Fig. 5 Effect of exposure time on half-cell potential by w/c ratio under accelerated test condition

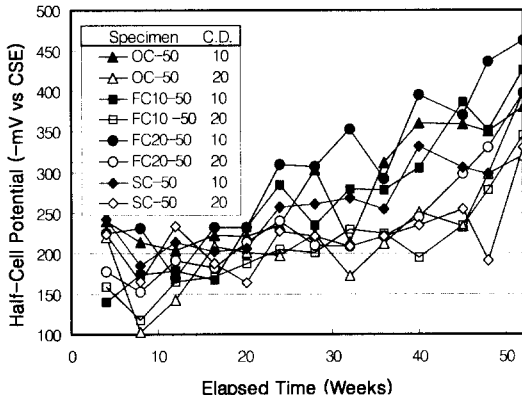


Fig. 6 Effect of exposure time on half-cell potential by cement type under accelerated test condition

또한 재령초기에는 일시적으로 전위가 높은 현상을 보이고 있는데 이는 초기에 생성된 철근의 부동태피막이 안정하지 못하고 불안정한 탓으로 주변환경에 민감하게 영향을 받은 것에 기인한 것으로 생각된다.

그리고 시멘트종류별 중성화 진행성과 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 자연전위가 가장 낮은 시험체는 플라이애쉬를 20% 치환한 콘크리트인데 이것은 혼합시멘트를 사용한 시험체 가운데 콘크리트의 중성화가 가장 빠른 것으로 중성화가

진행될수록 전위도 점차 낮아짐을 알 수 있다. 그러나 중성화 뿐만 아니라 염화물이 동반 작용한다면 고로시멘트나 플라이애쉬를 사용한 콘크리트는 포졸란 작용으로 치밀한 조직체를 형성하여 염화물의 침투에 대한 뛰어난 저항을 발휘할 뿐만 아니라 Friedel's salt를 형성하여 화학적으로 염화물을 구속하는데 중요한 역할을 하는 C3A 양이 감소되고, 공극의 표면력에 의한 흡착으로 염화물을 구속하는 C-S-H 형성의 증가되기 때문에 염화물의 고정화 성능이 향상된다. 따라서 궁극적으로 철근의 부식에 뛰어난 억제 효과를 보일 것으로 사료된다.<sup>(13)</sup>

한편 철근의 부식전류밀도는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 물-결합재비가 클수록 부식전류밀도의 상승 현상을 알 수 있다. 재령의 증가에 따라 물-결합재비 50%와 60% 시험체의 철근이 빠른 부식상승현상을 보였는데, 특히 물-결합재비 60%이며 피복두께 10mm인 철근의 경우 재령 16주가 지나면서 큰 폭으로 상승하여 28주에 이르러서는  $1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  이상의 전류밀도를 보였다.

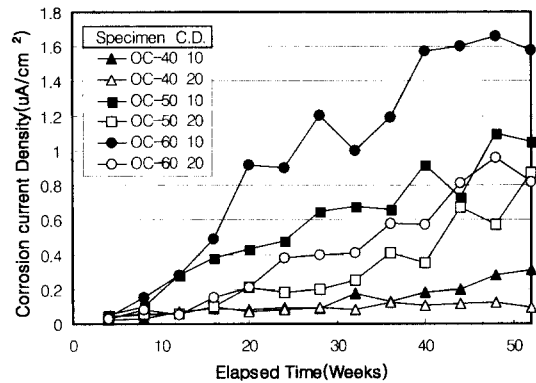


Fig. 7 Effect of exposure time on corrosion current density by w/c ratio under accelerated test condition

시멘트 종류에 따른 부식전류밀도는(Fig. 8) 실험종료하는 52주에서 플라이애쉬 20%를 치환한 콘크리트가 가장 빠르게 진행함을 보여 중성화로 인한 부식에 취약함을 알 수 있다.

또한 철근의 부식생성물과 부식환경관계를 추정하기 위하여 실험 종료 후 철근의 부식형태와 발청색을 살펴본 결과 국부적으로 깊게 발생하지 않고 평면적으로 넓은 형태를 보이며 발청물이

균일한 피막을 보였다. 이러한 균일부식의 발청물은 콘크리트의 중성 또는 약알칼리성으로 인하여 생성되는 무정형(無定形)의  $Fe_3O_4$ 인 것으로 사료된다.<sup>(3)</sup> 산화도가 낮은  $Fe_3O_4$ 는 콘크리트 내부의 철근 표면에 침착된 상태로 존재하며 철의 팽창비율의 약 2.09배로써 발청색이 검은색인데 본 연구결과에서도 부식면적의 상당부분이 동일한 검은색임을 확인하였다.

Table 7 Corrosion rate of rebar (mcy)

C.D.			C.D.		
Type	10mm	20mm	Type	10mm	20mm
OC-40	5.9	5.0	FC10-50	12.0	9.6
OC-50	10.9	9.2	FC20-50	13.7	9.6
OC-60	16.5	10.7	SC-50	12.2	9.3

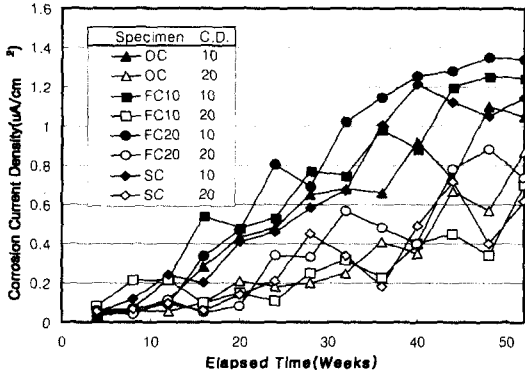


Fig. 8 Effect of exposure time on corrosion current density by cement type under accelerated test condition

Table 6 Corrosion area of rebar (%)

C.D.			C.D.		
Type	10mm	20mm	Type	10mm	20mm
OC-40	42	39	FC10-50	82	48
OC-50	72	62	FC20-50	83	55
OC-60	93	72	SC-50	82	61

Table 6은 철근의 부식면적을 정리한 것으로 물-결합재비가 증가할수록 부식면적율도 뚜렷하게 상승하였는데 즉 물-결합재비 50%, 60%인 시험체는 40%인 시험체의 각각 약 1.7배, 2.2배의 부식면적율에 해당한다. 또한 피복두께 10mm와 20mm로 매입된 철근의 부식면적율 차이는 물-결합재비가 클수록 뚜렷하게 커지는 경향을 보였다. 반면 사용한 시멘트 종류에 따른 부식면적율은 모든 혼합콘크리트가 80% 이상으로 비슷하였다.

다음은 동일 배합조건의 시험체에 매입된 철근 4개에 대한 중량감소율의 평균값을 산정하여 정리한 것이 Table 7이다.

Table 7에서 보는 바와 같이 물-결합재비가 증가할수록 철근의 부식속도도 증가하였으며 철근의 부식면적율에서 고찰했던 바와 같이 물-결합재비가 증가할수록 피복두께에 따른 부식속도의 차이는 커지는 경향을 보였다. 상대비교 결과 물-결합재비 50%, 60%인 시험체는 40%인 시험체의 각각 1.8배, 2.8배의 빠른 부식속도를 보였다. 그리고 가장 부식속도가 빠른 것은 중성화 진행이 가장 큰 물-결합재비 60%인 보통콘크리트에 피복두께 10mm인 철근이다. 그러나 중성화로 인한 철근의 부식량은 모든 철근의 중량감소율(%)이 소숫점 이하의 미세한 변화를 보여 부식량이 크지는 않았다.(Table 10)

Table 8 Determinant coefficient of relation between carbonation depth and corrosion current density

C.D.			C.D.		
Type	10mm	20mm	Type	10mm	20mm
OC-40	0.77	0.67	FC10-50	0.81	0.80
OC-50	0.95	0.81	FC20-50	0.85	0.73
OC-60	0.97	0.86	SC-50	0.84	0.75

Table 8은 중성화깊이와 철근의 부식전류밀도를 선형회귀분석하여 상관관계를 결정계수로 나타낸 것으로 물-결합재비 40%, 피복두께 20mm인 시험체의 결정계수 0.67을 제외하고는 대체로 만족할만큼 밀접한 관계를 보였다.

Fig. 9는 배합조건을 고려하지 않고 중성화깊이의 피복두께까지 도달유무에 따른 부식전류밀도의 종합적인 상관관계를 나타낸 것으로 결정계수 0.87의 관계를 보여 중성화 진행성과 철근의 부식정도가 선형으로 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

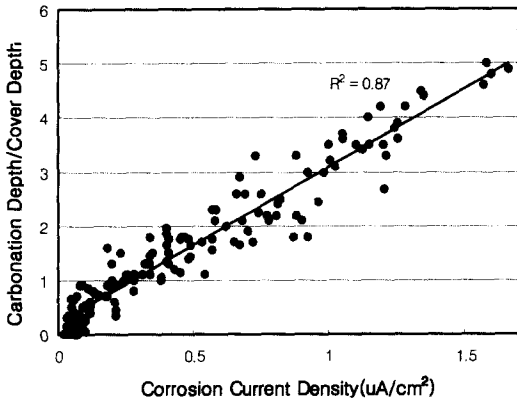


Fig. 9 Relationship between carbonation depth/cover depth and corrosion current density

Table 9는 중성화깊이가 철근의 직경중앙까지 도달한 시기에 대한 부식전류밀도를 나타낸 것이다. 각 시험체의 평균적인 부식전류밀도를 산정한 값이  $0.35 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로서 Gonzalez<sup>(16)</sup>의 철근 부식활성상태를 의미하는  $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 과 비교적 근접하였다. 따라서  $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  이상 측정된 부식전류밀도로 평균적인 부식전류밀도를 산정한 값을 중량감소로 환산한 부식전류밀도와 비교하여 Table 10에 정리하였다.

Table 9 Estimated corrosion current density on time when destructed passivate film of rebar

Cement type \ C.D.	10 mm	20 mm
OC-40	0.31	-
OC-50	0.21	0.41
OC-60	0.49	0.40
FC10-50	0.48	0.25
FC20-50	0.34	0.33
SC-50	0.20	0.45
Mean	0.35	

Fig. 10은 부식전류밀도와 중량감소 상관관계를 보인 것으로서 결정계수 0.81의 밀접한 관계가 형성되었으며 중량감소로 환산한 부식전류밀도가 부식전류밀도 측정기로 측정된 전류밀도보다 높은 것을 알 수 있다.

부식은 전기화학적 반응이기 때문에 부식속도와 전류는 같지만 부식전류밀도 측정기로 측정된 전류밀도는 순간적인 부식속도로써 콘크리트의 화학적 및 물리적 성상의 불균일에 영향을 받는데 특히 피복 콘크리트의 함수량, 온도, 용존산소 및 전하량 이동속도 등에 의해 측정치가 변동하여 중량감소량과 차이를 보인 것으로 사료된다.

Table 10 Calculated corrosion rate and metal loss

C.D.	10 (mm)					20 (mm)					
	Item	Metal loss (%)	Corrosion rate <sup>(1)</sup> (mcy)	Corrosion rate <sup>(2)</sup> ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Corrosion rate <sup>(3)</sup> ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Rust growth <sup>(4)</sup> ( $\mu\text{m}/\text{year}$ )	Metal loss (%)	Corrosion rate <sup>(1)</sup> (mcy)	Corrosion rate <sup>(2)</sup> ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Corrosion rate <sup>(3)</sup> ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Rust growth <sup>(4)</sup> ( $\mu\text{m}/\text{year}$ )
OC-40		0.22	5.92 (55)	0.31	0.64	15.39	0.17	5.01 (54)	-	0.55	13.22
OC-50		0.40	10.85 (100)	0.71	1.19	28.61	0.32	9.21 (100)	0.57	1.01	24.28
OC-60		0.61	16.49 (152)	1.21	1.80	43.27	0.38	10.67 (116)	0.62	1.06	25.48
FC10-50		0.41	11.99 (111)	0.86	1.31	31.49	0.35	9.60 (104)	0.41	1.05	25.24
FC20-50		0.47	13.73 (127)	0.97	1.50	36.06	0.28	9.56 (104)	0.56	1.04	25.00
SC-50		0.43	12.18 (112)	0.85	1.33	31.97	0.33	9.28 (101)	0.46	1.01	24.28

【주】 1) 중량감소로 산정한 부식속도 ( $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \approx 1.1 \mu\text{m}/\text{year}$ )  
 2)  $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  이상의 평균 부식전류밀도  
 3) Faraday's law로 중량감소를 환산한 부식전류밀도

4) 단면감소로 환산한 부식속도를  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 팽창율인 2.09배로 환산한 녹생성속도  
 \* ( )안은 OC-50을 기준으로 한 비임.



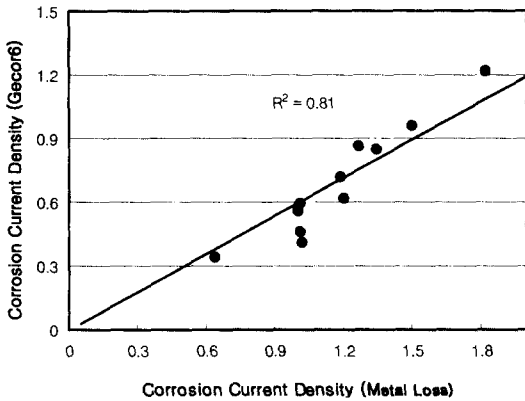


Fig. 10 Relationship between corrosion current density by Gecor 6 and metal loss (unit :  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

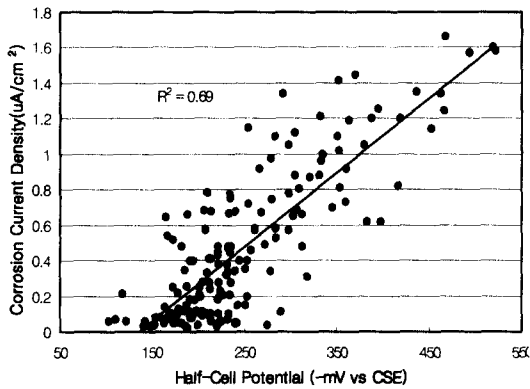


Fig. 11 Relationship between corrosion current density and half-cell potential

Fig. 11은 부식전류밀도와 자연전위와의 상관관계를 보인 것으로 부식전류밀도  $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이 회귀직선 상에서 부식확률 50%의 상한치인 자연전위  $-200\text{mV}$ 과 대응하여 상호간에 긴밀한 관계가 있음을 알 수 있다.

한편, 철은 이온화 때의 자유에너지 변화<sup>(17)</sup>에서 알 수 있는 바와 같이 수소발생에 의한 자유에너지 변화와 산소환원에 의한 자유에너지 변화가 낮은 빈(貧)금속이다. 따라서 콘크리트의 중성화로 인하여 철근 표면의 부동태피막이 파괴되었지만 콘크리트 내부에 용존산소의 공급속도가 작아 부식전지의 음극반응의 산소환원반응이 경미하여 부식량이 미소한 것으로 판단된다. 그러므로 중성화는 철근 표면의 부동태가 안정하게 존재할 수 없게 하는 상황을 조성하여 부식활성반응을

일으킬 수 있는 요인이지만 활성화 물질이 동반되지 않는다면 철근 부식에 대한 우려는 적을 것이며 반대로 외부의 활성물질이 철근의 이온화에 적극적으로 개입한다면 부식속도는 상당히 급진전할 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구의 고찰 결과 다음 결론을 도출하였다.

- 1) 중성화의 진행속도는 52주째에 물-결합재비 50%, 60%인 시험체가 40%인 시험체의 각각 3.3배, 4.5배 빨랐다. 또한, 플라이애쉬 치환율이 높고 혼합시멘트를 사용한 콘크리트의 중성화 진행속도가 빠르게 진행되었으며 이러한 현상은 부식전류밀도와 자연전위를 통한 부식정도와 상호 일치하였다.
- 2) 철근의 부식형태는 균일부식으로서 발착물은 검은색의  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 로 사료되며 부식면적율은 물-결합재비가 50%, 60%인 시험체가 각각 40%인 시험체의 약 1.7배, 2.2배를 보였다. 혼합시멘트의 경우 10mm 피복두께인 철근의 부식면적율은 80% 이상이었다.
- 3) 중량감소량으로 피복두께 10mm인 철근의 부식속도를 측정된 결과 물-결합재비 50%, 60%인 시험체는 각각 40%인 시험체의 약 1.8배, 2.8배를 보였다. 또한,  $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  이상의 실측 부식전류밀도를 평균하여 중량감소로 환산한 부식전류밀도와 비교한 결과 결정계수 0.81의 밀접한 관계가 형성되었다.

이상과 같이 콘크리트의 중성화로 인한 철근의 부식정도 및 특성을 고찰한 결과 철근의 부식형태는 균일부식으로써 심각한 단면손실은 없었다. 그러나 균일부식이 심화하면 국부부식보다도 철근과 콘크리트의 부착강도 저하가 클 수 있으므로 이에 대한 이론적 검토와 실험적 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 감사의 글

본 논문은 서울특별시의 연구비 지원에 의하여 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. A. M. Neville, "Properties of Concrete," Fourth Edition, Longman, 1995, pp.482-506.
2. K. Kobayashi, K. Suzuki, Y. Uno, "Carbonation of Concrete Structures and Decomposition of C-S-H," Cement and Concrete Research, Vol. 24, 1994, pp. 55-61.
3. 小林一輔, 小林農治, 米澤海男, 出頭圭三, "鐵筋腐食の診斷," 콘크리트構造物の耐久性, 三北出版, 1993.
4. 이창수, 윤인석, "서울시내 철근콘크리트 교량의 내구성 현황 조사," 대한토목학회 가을학술발표회 논문집, 1999. 10.
5. 지구규모 대기 환경기초 및 기반기술-"지구 대기 조성 변화감시," 환경부 과학기술처, 1997.
6. 지구규모 대기 환경기초 및 기반기술-"산성비 감시 및 예측기술 개발," 환경부 과학기술처, 1997.
7. P. D. Cady & R. E. Weyers, "Deterioration Rates of Concrete Bridge Decks," Journal of Transportation, Vol. 110, 1984, pp. 35-44.
8. RILEM Draft Recommendation CPC-18, "Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth," Materials and Structures, 21, No. 126, 1988, pp. 453-455.
9. ASTM C 876 "Standard Test Method for Hal-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete," V 04.32, S4, 1993, pp. 626-629.
10. J. P. Broomfield, "Corrosion of Steel in Concrete," E & FN SPON, 1997, pp.30-81.
11. ASTM G1-72 "Standard Recommended Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens," 1979, pp. 440-445.
12. P. K. Mehta., "Concrete : Structure, Properties and Materials," Prentice-Hall, 1986, pp. 120-122.
13. J. Kropp and H. K. Hilsdorf, "Performance Criteria for Concrete Durability," RILEM Report 12, E & FN SPON, 1995, pp. 143-145.
14. ACI Building Code 318 / 318R-35
15. 대한토목학회, "고로슬래그시멘트를 사용한 콘크리트의 설계 시공지침(안)," 1995, pp.48-50.
16. J. A. Gonzalez, S. Algaba, and C. Andrade, "Corrosion of Reinforcing bars in carbonated concrete," British Corrosion Journal, Vol.15, No.3, 1980, pp. 135-139.
17. Mars G. Fontana, "Corrosion Engineering," McGraw-Hill, 1987.

## 요 약

도심지의 대기오염으로 인한 산성비와 이산화탄소는 계속적으로 증가하는 추세에 있어 콘크리트의 중성화에 의한 철근 콘크리트 구조물의 내구성 저하가 크게 우려되고 있다.

본 연구는 전보다 더욱 혹독해진 도심지 환경을 모사하여 건습반복과 10%의 이산화탄소 농도 속에 피복두께, 물-결합재비, 콘크리트의 종류, 그리고 혼화재 치환율을 변수로 한 포괄적인 중성화촉진 실험을 실시하여 철근의 부식 정도에 대해 고찰하였다.

실험결과 콘크리트의 중성화는 물-결합재비가 증가할수록 뚜렷하게 상승하는 경향을 보이며, 플라이애쉬 치환율이 높고 혼합시멘트일수록 빠른 중성화속도를 보였다. 중성화로 인한 철근의 부식형태는 균일부식의 형태로써 모든 시험체가 철근 부식으로 인한 중량감소량이 작았지만 중성화가 빨리 진행된 콘크리트일수록 부식속도가 커지는 경향을 보였다.

(접수일자 : 1999.12.14)