

철근 콘크리트의 중성화 현상과 대책

Present Status of Researches on Carbonation of Concrete



정 재 동*

1. 서론

최근 철근 콘크리트 구조물의 내구성과 보수, 유지관리 측면이 강조됨에 따라 구조물의 조기 성능저하의 문제가 중요시 되고 있다.

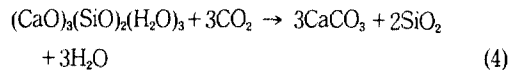
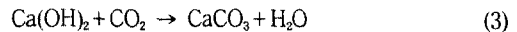
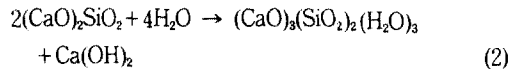
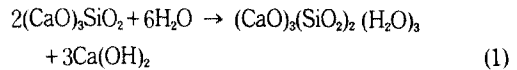
콘크리트는 반영구적이라는 일반의 상식과는 달리 콘크리트 자체는 조기 성능저하의 요인을 많이 내포하고 있으며, 또한 이러한 성능저하 요인을 방지해 두면 의외로 단기간중에 수명이 도달한다.

콘크리트 구조물의 성능저하 요인으로는 동해, 염해, 알칼리칼슘 반응 등이 열거되나 이것들은 각각 지역적인 특수요인에 기인하고 있다. 그러나 콘크리트의 중성화는 일반환경하에 있어서도 확실하게 진행하며 철근의 부식에 관계하는 가장 기본적인 중요 문제이다.

2. 중성화 현상의 메카니즘

시멘트의 수화 반응에서 시멘트량의 약 1/3이 생성되는 수산화칼슘은, pH 12-13 정도의 강알칼리성을 나타내며 또 이것이 시멘트 수화물 전체의 pH를 결정하고 있다. 수산화칼슘은 대기중에 포함되어 있는 약산성의 탄산가스(약 0.03%)와 접촉하여 다음과 같은 반응에 의하여 탄산

칼슘과 물로 변화한다.¹⁾



그리고 탄산칼슘으로 변화한 부분의 pH가 8.5-10 정도로 낮아지는 것으로 인하여 중성화라고 불리운다(넓은 의미로는 탄산화를 포함). 시멘트 페이스트에 있어서의 탄산화 반응은 수산화칼슘 뿐만 아니라 각종의 수화 생성물 및 미수화물에서도 일어나지만 중성화에 관해서는 수산화칼슘의 영향이 가장 크다.

중성화는 콘크리트의 표면에서 내부를 향하여 진행하며 콘크리트는 탄산가스와 반응한 중량만큼 무거워 지고 치밀해 진다. 그리고 중성화 함에 따라 약간의 극미세한 균열이 발생하지만 문제가 될 정도는 아니다. 따라서 중성화에 의하여 물리적 성능저하가 생기는 것은 콘크리트 내부 철근의 녹슴에 의한 것이다.

콘크리트 내부의 pH가 11이상에서 철근은 표면에 부동태를 형성하므로 산소가 존재해도 녹슬지 않지만, 중성화

* 정희원, 동양중앙연구소 연구실장, 공박

에 의하여 pH가 11보다 낮아지면 철근에 녹이 발생하고 또 이러한 녹에 의하여 철근은 약 2.5배까지 체적이 팽창한다.

그리고 이 녹의 팽창 압력에 의해 콘크리트 내부에 균열을 발생시키며 철근 부착강도의 저하, 피복 콘크리트의 박리, 철근 단면적의 감소에 의한 저항 모멘트의 저하 등의 물리적 열화의 진행과 함께 궁극적으로는 철근 콘크리트 구조물 전체의 위기를 초래한다(그림 1 참조).

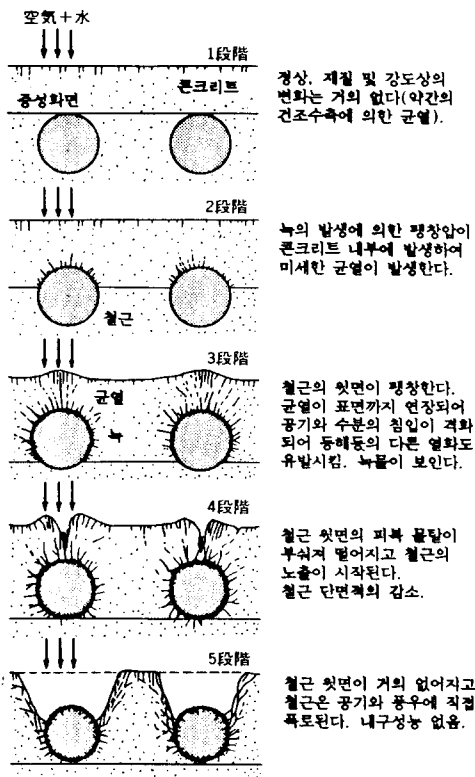


그림 1. 중성화에 의한 콘크리트 열화 진행의 모식도

3. 중성화와 콘크리트의 수명²⁾

철근 콘크리트 구조물의 실태조사에 의하면 일반환경하의 경우 철근의 부식은 중성화 깊이와 피복 두께의 상관관계에 의해 결정된다고 알려져 있다.

중성화와 철근 콘크리트의 수명과의 관계를 그림2에

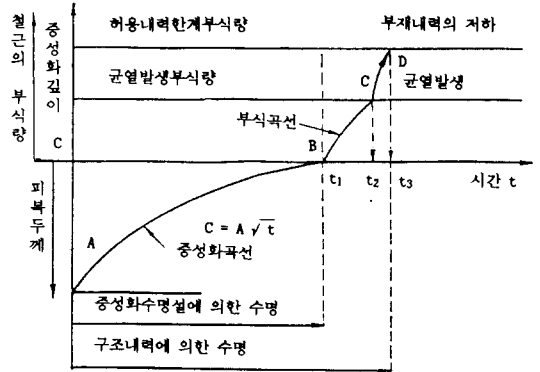


그림 2. 중성화와 콘크리트 수명 사이의 관계

나타낸다. 여기서 t_1 는 중성화 깊이가 철근의 표면에 도달하는 시점이며 지금까지는 철근 콘크리트 구조물의 수명을 t_1 의 시점으로 판단하여 왔다(중성화 수명설). 그리고 한편으로는 부재 내력이 한계에 도달하는 시점인 t_3 를 수명으로 보는 설도 있다(구조내력 수명설). 그러나 최근에는 t_1 의 시점은 부재 내력상 너무 안전하고 t_3 는 너무 위험한 영역에 속하여 철근이 부식되어 균열을 발생시키는 시점인 t_2 를 철근 콘크리트의 수명 산정점으로 정의하고 있다.

4. 중성화 진행속도의 평가

중성화의 판별 방법으로서 공시체의 파단면에 1% 페놀프탈레인-알콜 용액을 분무하여 변색의 여부를 관찰하는 방법이 가장 일반적이며, 무색이면 중성화한 것으로 적색으로 변화하면 비중성화(알카리)부분으로 구분하게 된다.

그리고 중성화 진행속도는 콘크리트 표면으로부터 상술한 중성화 부분과 비중성화 부분의 경계면까지의 길이(이하 "중성화 깊이"로 칭함)와, 경과한 시간의 함수로서 나타낸다. 중성화 깊이와 경과년수와의 관계는 일반적으로,

$$X = R \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

여기서, X: 기준이 되는 콘크리트 중성화 깊이(cm)

t: 경과년수(년)

R: 시멘트, 골재의 종류, 환경조건, 혼화재료,

표면마감재 등의 정도를 나타내는 상수

로 나타내며 상수 R은 실험에 의하여 구할수 있다.

이 식은 하마다에 의하여 제안된 것³⁾으로 중성화 속도를 나타내는 가장 기본적인 가정으로 인식되어 지고 있다. 그리고 카시타니는 하마다의 식이 몰시멘트비 60% 이하에서 자신의 실험식과 다소 차가 남으로 콘크리트의 종류를 인자로 한 중성화율에 표면 마감재 및 환경조건에 관한 인자를 고려한 중성화 속도식을 제안하고 있다.

4.1 하마다의 중성화 속도식⁴⁾

1928년 하마다의 1907년에 사노우가 시작한 자연폭로실험의 20년후의 조사결과 및 자신의 실험결과로 부터 철근이 녹슬기 시작하는 시간을 추정하는 식을 만들었다.

$$t = \frac{0.3(1.15 + 3W_0)X^2}{(W_0 - 0.25)^2} \quad (6)$$

여기서, t : 경과년수
X : 중성화깊이
W₀ : 몰시멘트비

4.2 키시타니의 중성화 속도식⁵⁾

키시타니는 하마다의 식을 기본으로 콘크리트의 종류 및 배합에 관련하는 요인이 중성화에 끼치는 영향을 촉진 및 자연폭로시험으로 부터 구한 후 이것들을 종합적으로 검토하여 다음과 같은 중성화 속도식을 제안하고 있다.

a. 몰시멘트비가 60% 이상인 경우

$$t = \frac{0.3(1.15 + 3W)X^2}{R^2(W - 0.25)} \quad (7)$$

b. 몰시멘트비가 60% 이하인 경우

$$t = \frac{7.2 \times X^2}{R^2(4.6W - 1.76)^2} \quad (8)$$

여기서, W : 몰시멘트비
X : 중성화 깊이(cm)
t : 시간(년)
R : 중성화율(=rc×ra×rs)

rc, ra, rs : 시멘트, 골재, 혼화제의 종류에 관한 계수

그리고 키시타니는 중성화 시험의 촉진성에 대해서도 연구하여 촉진시험(탄산가스 농도 15%, 상대습도 85%)의 촉진 중성화 속도는 일반 환경하에 있어서 중성화 속도에 비하여 약 40배 촉진된다고 밝히고 있다.

4.3 모리 등의 실험결과⁶⁾

모리 등은 시멘트의 종별, 환경 조건별로 10년간의 자연폭로(옥외, 옥내) 및 1년간의 농도 10%의 탄산가스 촉진시험결과로 부터 다음과 같은 콘크리트의 중성화 속도 추정식을 제안하고 있다.

$$t = \alpha\beta\gamma \frac{Q}{(R \cdot W/C - P)^2} X^2 \quad (9)$$

여기서, t 기간(년)

α : 콘크리트의 품질계수(시공조건)

β : 표면마감재의 자연효과계수

γ : 환경조건에 관한 계수

W/C : 몰시멘트비

X : 평균중성화깊이

P, Q, R : 실험에 의하여 구해지는 계수

그리고 이 식에서는 중성화에 미치는 표면 마감재의 효과와 환경조건의 영향도 포함하고 있으며 중성화 역제의 면에 있어서는 표면 마감재가 유효하고, 그 중에서도 모르타르나 만감이 페인트 계통으로 마감하는 것보다 효과가 있으며, 또한 환경조건 중에서는 온도의 영향이 큰 것으로 나타나 있다.

5. 중성화 속도에 영향을 미치는 요인

대기중에서 일정기간을 경과한 콘크리트의 중성화 진행 속도는 시멘트의 종류, 골재의 성질, 배합조건, 혼화재료, 시공정도, 폭로조건 등의 영향을 크게 받는다.

이하 주요한 요인들의 중성화에 미치는 영향에 관하여 간단히 요약한다.

5.1 시멘트의 종류와 중성화⁶⁾

표1과 같이 사용 시멘트의 종류에 따라서는 중성화 속도에 큰 차이가 난다. 혼합시멘트 혹은 실리카질의 혼화제를 사용하면 중성화 속도가 빠르고 철근 콘크리트의 내구성을 위해서는 포틀랜드 시멘트를 사용하는 것이 유효하며 그중에서도 조강시멘트가 보통시멘트보다 중성화가 늦고 더욱 좋은 효과가 얻어진다.

표1. 시멘트 종류에 따른 중성화 속도비

보통포틀랜드 시멘트	조강포틀랜드 시멘트	고로시멘트(슬래%)		실리카시멘트	플라이 애쉬 시멘트 (FA 20%)
		30-40	60 전후		
1.0	0.6	1.4	2.2	1.7	1.9

5.2 골재의 종류와 중성화 속도

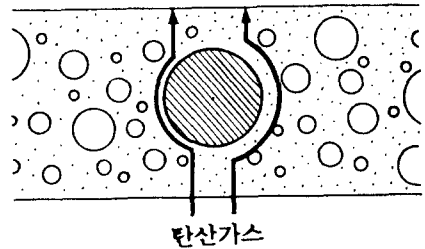
콘크리트에 사용되는 골재는 그 종류에 따라서는 중성화의 진행속도에 크게 영향을 미친다. 보통의 강모래, 강자갈, 쇠석 등과 같이 밀실, 견고한 골재는 시멘트페이스트 부분보다 투기성이 낮으므로 탄산가스는 시멘트페이스트 부분을 통하여 진행된다. 그러나 비중이 낮은 경량골재등을 이용한 콘크리트는 골재 내부에 많은 공극을 갖고 있기 때문에 탄산가스는 골재 내부를 통해서도 진행한다. 따라서 보통 콘크리트에 비하여 중성화가 빠르게 된다(그림 3).

하마다는⁶⁾ 경량골재를 이용한 콘크리트는 강모래, 강자갈을 이용한 콘크리트의 약 3배, 우에무라는⁷⁾ 1.1-1.5 배 만큼 중성화가 빠르게 진행하며, 또한 이것을 개선하기 위해서는 AE제, 분산제등의 표면 활성제를 적당량 사용하는 것이 효과적이라고 한다.

그림 4의 골재의 비중과 중성화의 관계에 대하여 실험한 예를 보면,⁸⁾ 중성화 속도는 골재의 비중이 작아질수록 빨라지는 경향이 있으며, 그림의 시험 시리즈 중에서 슬럼프 8cm 콘크리트의 중성화 시험결과를 회기분석하면 $Y=1.56X+5.2$ (Y: 중성화율, X: 비중, 상관계수: -0.79)로 되며 높은 상관관계가 얻어짐을 알 수 있다.

또한 골재와 시멘트페이스트(보통 포틀랜드 시멘트,

[보통골재]



[경량골재]

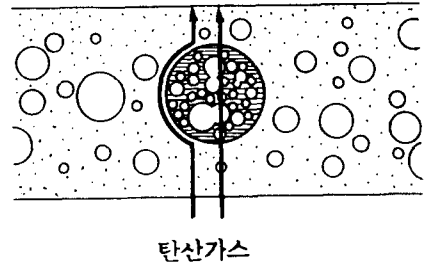


그림 3. 탄산가스 침입의 모식도

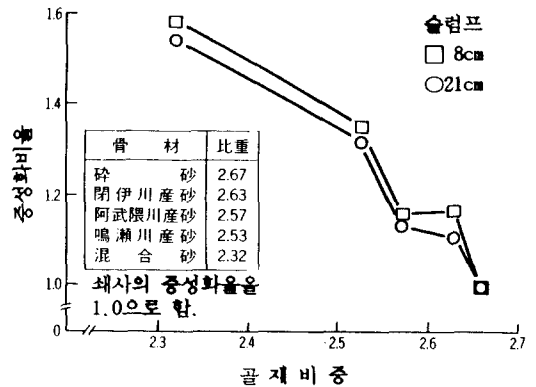


그림 4. 골재의 비중과 중성화 속도

W/C=65%)의 내부는 그림 5과 같은 세공분포를 하고 있으며, 시멘트페이스트는 반경 240nm(=2400Å) 이상의 큰 공극이 거의 없으나 인공 경량골재(메사라이트)는 비교적 큰 곳에 공극이 집중해 있어 탄산가스가 골재의 내부를 통과할 수 있다는 가능성을 보여주고 있다. 그리고 쇠석은 세공량의 절대량이 적어 그만큼 내부가 치밀하다는 것을 알 수 있다.

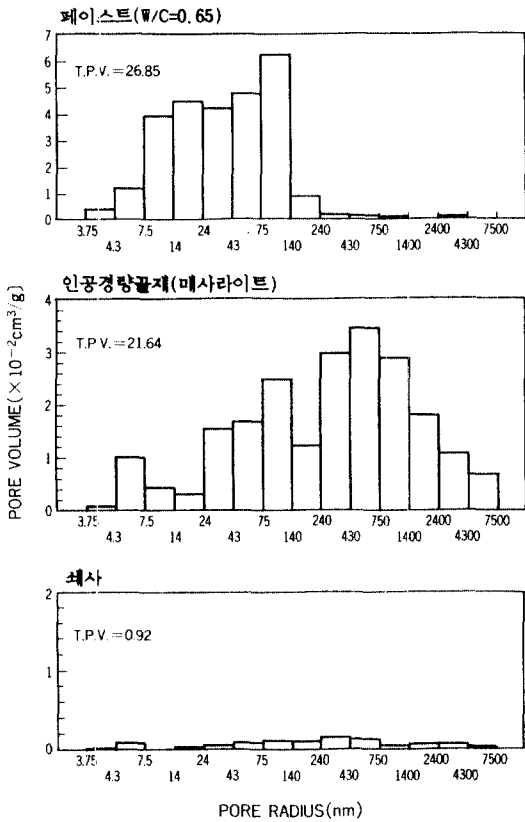


그림 5. 골재와 페이스트의 세공 분포

5.3 양생조건, 세공량, 물세멘트비와 중성화와의 관계

콘크리트 내부의 세공량과 그 분포상태는, 콘크리트의 내구성에 막대한 영향을 끼친다. 콘크리트의 동해에 미치는 세공의 영향에 관해서는 기존의 연구를 통하여 많은 것이 밝혀져 있으나, 중성화에 있어서의 세공의 역할은 투기성이 큰 콘크리트일수록 중성화가 빠르다는 것은 용이하게 예상되나, 세공량과 그 분포상태의 영향에 관해서는 거의 알려져 있지 않다.

1) 양생조건에의 영향

일반적으로 수화반응이 진행할수록 세공량은 적어진다. 그림 6은⁹⁾ 양생조건과 시멘트의 종류를 변화시킨 중성화 촉진시험의 결과이며 중성화 속도는 양생조건에 따라 큰 차이가 나며 수화반응이 빠른 시멘트일수록 중성

기호	수중양생 온도(°C)	내역
I	10	○—△—□
II	10	○—△—□
III	20	○—△—□
IV	20	○—△—□
V	30	○—△—□
VI	30	○—△—□

타설에서 양생종료까지의 지령

○ 콘크리트 타설 — 수중양생 --- 20°C 60%RH

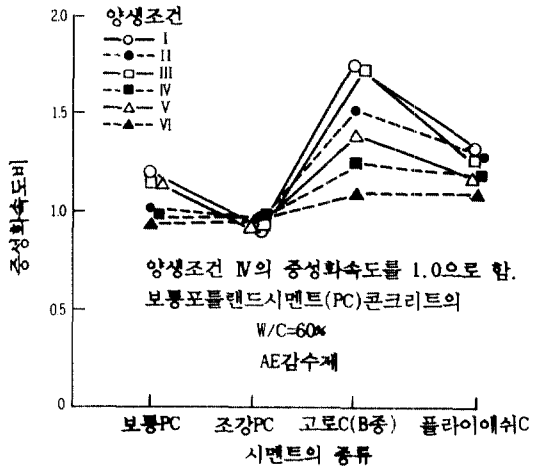


그림 6. 중성화 속도에 미치는 시멘트 종류와 양생 조건의 영향

화가 늦고, 수화반응이 늦은 시멘트라도 충분한 양생을 하면 중성화 진행속도를 지연시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 7은¹⁰⁾ 건물의 부위별 세공분포상태를 측정된 결과로서 건물의 슬래브 부분은 표면에 가까울수록 미세공량이 많고 큰 세공이 증가하고 있으며, 주각부의 NO.4는 미세공량 및 입경이 큰 세공도 적다. 이것은 블리딩(Bleeding) 및 콘크리트의 표면 건조의 영향에 의한 것이며, 동일 철근 콘크리트 건물에 있어서도 부위별 양생의 정도에는 큰 차이가 있음을 보여주고 있다.

그리고 지노우는¹¹⁾ 콘크리트의 수중양생과 공기중양생의 차이 및 표층부에 있어서의 양생방법의 세공분포에의 영향을 그림 8과 같이 보고하고 있다. 즉 수중양생을 행하면 전 범위 내의 세공이 확실하게 감소하는 것에 반해 기중양생의 경우는 콘크리트의 표면에 가까울수록 세공량은 많아지며 비교적 입경이 큰 세공쪽에 편중되는

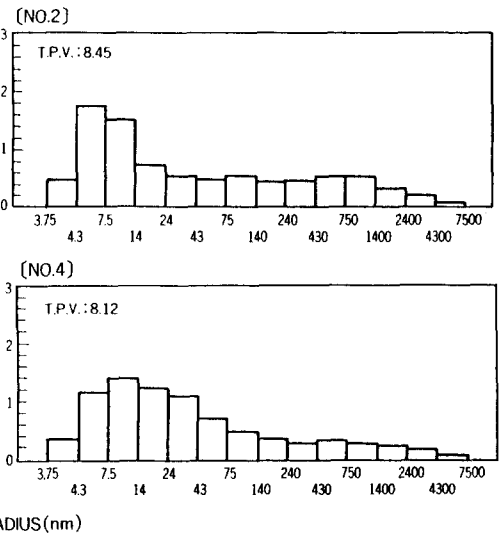
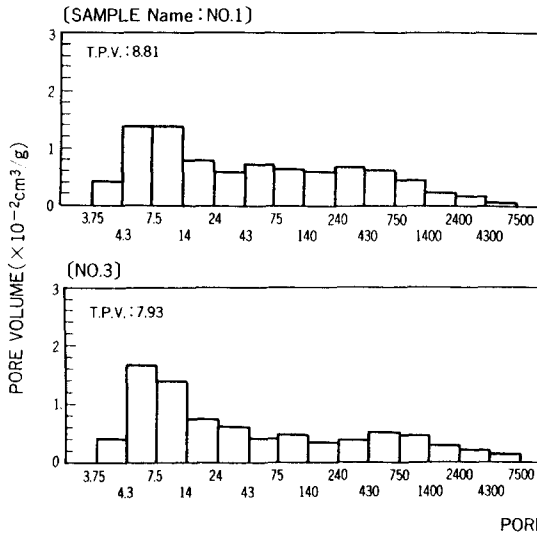
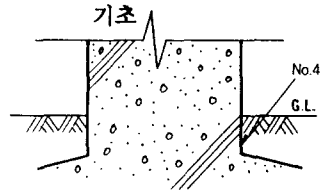
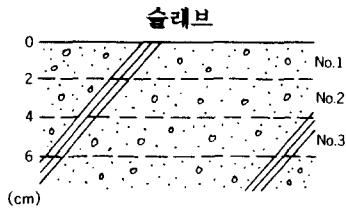


그림 7. 건물의 부위별 세공 분포

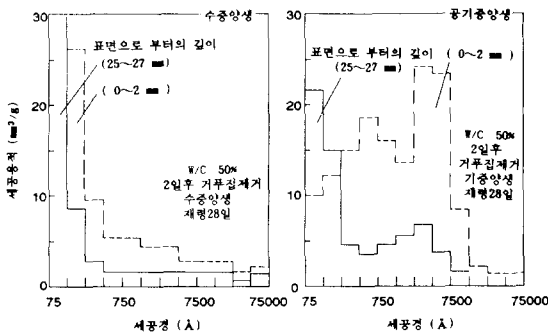


그림 8. 양생 조건과 세공 분포의 관계

영향을 미치며, 물시멘트비가 커질수록 중성화가 빨라지는 것이 일반적이다. 그리고 콘크리트의 세공량도 물시멘트비의 증가와 함께 많아지는 것으로부터 세공량의 증가는 중성화진행속도를 촉진시키는 요인의 하나로서 간접적으로 추측할 수 있다(그림 9 참조).

그러나, 세공량(분포상태)을 중성화속도 추정의 직접적인 인자로서 사용한 예는 아직 없으며, 향후 이 부분에 관한 연구의 진전이 기대된다.

5.4 환경조건의 영향

경향을 보이고 있다.

2) 세공량 및 물시멘트비의 영향

콘크리트의 물시멘트비는 중성화 진행속도에 가장 큰

중성화에 영향을 미치는 환경인자로서는 온도, 습도, 탄산가스 농도, 옥내외, 방위등이 있다. 온도는 기체인 탄산가스의 활성화와 콘크리트 내부의 확산속도 및 중성화 반응에 관계하며 온도가 상승하면 중성화는 빨라진

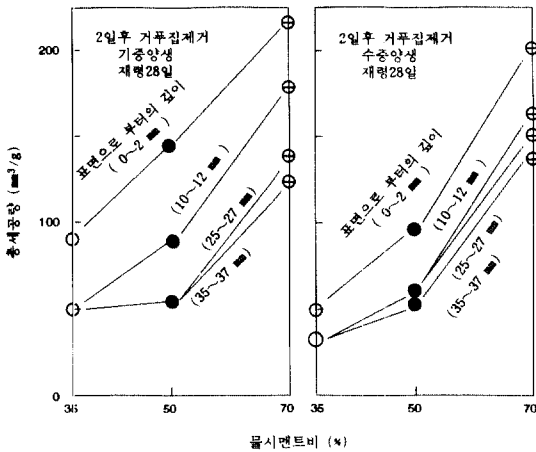


그림 9. 물시멘트비와 세공량의 관계

다.

습도의 영향은 상대습도가 0% 혹은 100%부근에서 중성화는 진행하지 않고, 상대습도 40에서 50%의 경우에 중성화 속도가 최대이며¹²⁾ 그보다 습도가 높은 경우에는 콘크리트 내부공극중에 존재하는 수분으로 인하여 탄산가스의 확산이 저지되어 중성화는 늦어진다. 또한 옥외는 옥내보다 탄산가스농도가 낮기 때문에 중성화가 늦으며, 옥외라도 비에 젖는 부분보다 비에 젖지 않는 부분의 중성화가 빠르다.

5.5 표면 마감재의 종류와 중성화 진행속도

콘크리트의 표면 마감재는 기체인 탄산가스의 침입을 저지시켜 중성화 진행속도를 효과적으로 지연시킬 수 있다. 그러나 콘크리트 구조물에 사용되는 마감재의 종류는 상당히 많으며 마감재 그 자체도 시간의 경과와 함께 열화되므로 실제 시공되어 있는 마감재의 중성화 억제 효과를 정확하게 파악하기는 곤란하다.

마감재가 가지고 있는 성능중에서 중성화 억제효과를 좌우하는 특성은 마감재의 투기성이며, 투기성이 적을 수록 중성화 억제효과는 커진다. 지금까지 마감재의 중성화 억제 효과를 정량적으로 밝히기 위한 각종의 연구가 행해져 왔으며, 모리나가는¹³⁾ 그림 10과같이 탄산가

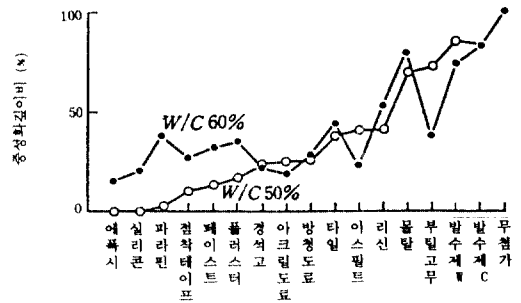


그림 10. 표면마감재의 종류와 중성화 깊이

스 농도 100%에서의 기압 중성화 시험에 의한 마감재가 없는 경우에 대한 중성화 깊이의 비율을 각종의 마감재에 대하여 구하였다.

그러나 이러한 촉진시험에 의한 마감재의 억제 효과는 마감재 그 자체의 경시적 성능저하가 상정되어 있지 않기 때문에 실제의 경우보다 더 큰 중성화 억제 효과가 나타났을 가능성이 있다.

6. 중성화 억제 대책

중성화에 관한 기왕의 연구결과를 토대로 중성화진행의 억제 방법을 정리하면 다음과 같다.

1) 재료 및 조합인자에 관하여

콘크리트에 혼입되는 재료의 종류 및 조합조건은 중성화 진행속도에 커다란 영향을 미치는 것이 명확하므로 사용재료의 선정 및 조합조건의 결정시에는 콘크리트 자체의 품질이 가능한한 치밀, 견고하도록 조강, 보통포틀랜드 시멘트의 사용(일반적으로), 고비중의 양질 골재의 사용, 혹은 물시멘트비, 공기량, 세공량이 낮게 되도록 해야한다.

2) 시공인자에 관하여

중성화 진행속도에는 양생조건, 타설, 다짐방법등의 시공인자의 영향이 명확하므로 현장시공시에는 충분한 초기양생과 소요부분의 내구성을 감안하여 콘크리트의 피복 두께를 충분히 상정하여야 할 것이며, 타설시에는

모르타르의 누출, 콘크리트의 분리, 피복 콘크리트의 결손(Rock pocket, honeycomb)이 생기지 않도록 거푸집의 제작 및 다짐방법등에 고려가 있어야 한다.

3) 표면 마감재의 사용 및 표층부의 치밀화¹⁴⁾

적당한 표면 마감재의 사용은 탄산가스의 침입을 억제하여 중성화 속도를 지연시킬 수 있다. 따라서 표면 마감재는 에폭시, 혹은 아크릴 수지등의 고분자 계통이 억제 효과가 크며 일반적인 타일에 의한 마감도 억제효과가 높은 것으로 알려져 있다.

또한 중성화의 진행은 콘크리트 표층부의 기포분포특성과 탄산가스 확산 및 수분의 이동으로 시작되므로, 콘크리트 표층부의 성질을 치밀화 시키므로서 중성화 진행속도를 지연시킬 수 있다. 최근 외국에서는 투수형(透水型) 거푸집을 사용하여 표층부의 치밀화, 표면강도 개선에 이용하는 방법이 고내구성을 요하는 구조물들에 사용이 시작되고 있다.

7. 결론

이상에서 정리한 바와 같이 중성화는 철근 콘크리트의 내구성 부문에 있어서 가장 기본적이며 동시에 중요한 성능저하 요인의 하나이며, 중성화 진행에 의한 모재의 파손이 성능저하가 국부적인 것이라 하여도 부재의 수리 혹은 교환이 곤란하기 때문에 철근 콘크리트 구조물 전체의 내구수명을 단축시킨다.

중성화에 관한 연구는 여러 나라에서 많은 연구가 되어 다수의 성과가 보고되어 있다. 그러나 상술한 바와 같이 중성화에 영향을 미치는 인자는 매우 많으며 인자 각각의 중성화에 미치는 영향 혹은 인자 상호간의 복합적인 영향에 대해서는 아직까지 명확하게 판명되지 않은 부분이 많다.

철근 콘크리트의 중성화에 의한 성능저하의 메카니즘, 즉 콘크리트 자체의 중성화와 그후 철근이 부식하여 콘크리트에 균열이 발생하기까지의 과정은, 철근 콘크리트 구조물의 수명을 예측하여 내구설계에 활용하기 위해서는 대단히 중요하고 필요불가결한 부분이므로 급후 기초연구의 충실과 함께 연구의 폭을 넓혀 나갈 필요가 있는 것으로

사료된다.

참 고 문 헌

- 1) 岸谷孝一, 鐵筋コンクリートの耐久性, 鹿島建設技術研究所出版部, 1963.
- 2) 岸谷孝一外, 耐久性シリーズ, 中性化, 技報堂, 1986.
- 3) 内田祥三, 浜田稔, 鋼及びコンクリートの耐久試験, 建築雑誌, 第516號, 1928.
- 4) 浜田稔, 콘크리트의中性化와鐵筋의腐蝕, セメント・コンクリート, No.272, 1969.
- 5) 森, 白山, 上村, 依田, 高爐セメントコンクリートの炭酸化について, セメント技術年報, XXVL, 1972.
- 6) 岸谷孝一, 鐵筋コンクリートの耐久性向上に關する考察, 日本建築學會論文報告集, 第65號, 1960.
- 7) 上村克郎, 人工輕量骨材コンクリートの中性化, セメント・コンクリート, No.273, 1969.
- 8) 鄭載東, 平井和喜, モルタルの中性化に及ぼす骨材品質の影響, 日本建築學會東北支部研究報告集, 第47號, 1986.
- 9) 和泉, 嵩, 押田, 西原, 콘크리트의中性化에及ぼすセメントの種類及び養生條件の影響について, 第7回 콘크리트工學年次講演論文集, 1985.
- 10) 平井和喜, 콘크리트의Popout現象に關する二三の考察, 日本建築學會東北支部研究報告集, 第42號, 1983.
- 11) 地濃茂雄, 仕入豊和, 콘크리트表層部その養生條件と細孔構造, セメント・コンクリート, No.468, 1986.
- 12) 鄭載東外, モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に關する實驗的研究, 콘크리트工學論文集, 第1卷 1號, 1990.1.
- 13) 森永 繁, 콘크리트의中性化及び鐵筋의發錆に關する研究(そのり), 日本建築學會大會, 1977.
- 14) 鄭載東 外, 有孔型わくを用いたモルタル表層部の微細構造變化と中性化遲延效果, 콘크리트工學論文集, 第1卷 1號, 1990. 1.
- 15) 鄭載東 外, 콘크리트의中性化に關する研究の現狀と課題, セメント・コンクリート, No.496, 1988.6.