

탄산화를 고려한 콘크리트 구조물의 내구성 설계

Performance Based Durability Design of Concrete Structures Considering Carbonation



김규용*
Gyu-Yong Kim



김영선**
Young-Sun Kim



조봉석**
Bong-Suk Cho



김무한***
Moo-Han Kim

1. 머리말

구조물에 작용하는 외적 열화 요인 및 열화의 세기는 구조물을 구성하는 각 재료와 구조물의 부위에 따라 각각 다르게 작용하며, 이러한 열화현상은 구조물 전체에 작용하는 열화현상과 부분적, 국소적으로 구조물의 한정된 부위에만 작용하는 열화현상으로 크게 구분할 수 있다. 따라서, 설계자는 건축물이 위치한 환경조건에 따른 열화현상에 대하여 열화요인의 종류 및 세기를 설정하고 이를 설계해야 한다^{1,2)}.

일반적으로 한 가지 종류의 열화외력에 의한 열화현상을 단일현상만으로 특징지을 수는 없으며, AIJ(일본건축학회)의 내구설계지침에서는 콘크리트의 열화현상을 정의하는데 있어, 탄산화와 염해 및 그 밖의 다른 열화요인에 의한 「철근의 부식」, 동해, 알칼리골재반응, 화학적 부식 및 그 외의 원인에 의한 균열, 부풀음, 박락, 표면열화, 강도저하 등의 「콘크리트의 열화」 및 「그 외 열화현상」과 같이 열화현상을 3종류로 정의하고 있다.

한편, 내구설계를 실시하는 데 있어, 설계자가 고려해야 하는 열화요인으로는 ①탄산화, ②염해, ③동해, ④알칼리골재반응, ⑤화학적 부식, ⑥그 외의 열화현상을 정의하고 있으며, 이 중 본고에서는 다양한 구조물의 열화요인 중 탄산화를 대상으로 한 콘크리트 구조물의 내구성 설계수법에 관하여 기술하고자 한다.

2. 시방규정(示方規定)으로부터 성능규정(性能規定)으로의 전환시대

건축법, 표준시방서 등 기존의 규정은 사용재료, 구조방법 등

을 규정하고 있는 이른바 「시방규정(specification)」이며, 이러한 시방규정에서 규정되어있지 않은 재료, 구조방법 등을 건축물 등에 사용하려면 건설교통부 장관의 인증을 받아 사용해야 한다. 그러나 최근 사회구조가 발달하고 변화되면서 다양한 재료와 시공방법이 시시각각으로 출현 또는 소멸되는 등 변화무쌍한 정보화시대로 들어서면서 설계의 자유도 확대와 고비용 처리에 대한 구조개선 등이 요구되고 있다. 이러한 시대적 흐름에서 건축주 및 사용자도 건축구조물의 품질과 성능에 대한 인식도 높아져 이에 부응하는 기술력의 확보와 강화가 절실히 요구되고 있는 시점이라고 할 수 있다.

이와 같이, 건축구조물 설계의 자유도 확대와 광대한 고비용 처리 문제 등에 관한 개선이 요구되고 있으나, 가장 기본적으로 최저한의 품질수준을 규정하고 있는 기존의 시방규정만으로는 이러한 문제점 등을 해결할 수 없는 한계에 있고, 많은 부분에서 불합리한 점이 지적됨으로써 소요의 목표성능만을 만족하면 다양한 재료, 설비, 구조방법을 자유롭게 채용할 수 있도록 하는 규제방식인 「성능규정(performance based)」이 시대적으로 주목을 받고 있다.

이러한 성능지향형의 건축기준 동향은 영국에서 시작되어 1984년 건축법의 개정과 건축규제의 제정이 법으로 도입된 것이 최초라고 할 수 있다. 이후 1990년에 뉴질랜드와 오스트레일리아에서 빌딩코드를 성능지향의 건축기준을 단계적으로 개정하였으며, 1998년 일본에서도 건축기준법이 개정되었고, 2000년도부터 시행되고 있다. 또한, 캐나다에서는 현재 이러한 성능규정, 성능항목을 보다 구체적이고, 명확하게 하고자 하는 노력으로서 「목적지향(objective based)형」의 건축생산 규정 즉, "Canada's Move to Objective - Based Building Codes(캐나다의 새로운 진진- 목적지향형 건축생산코드)"가 검토되고 있다.

〈표 1〉에서 알 수 있는 바와 같이 「주택이 3세대에 걸쳐 대 규모의 개수가 없이 사용할 수 있음」으로 표현하기 위한 기술기준(시방기준)으로서 콘크리트의 시방이 정해져 있다. 즉, 고

* 정회원, 충남대학교 건축공학과 조교수
gyuyongkim@cnu.ac.kr

** 정회원, 충남대학교 건축공학과 박사과정

*** 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수

표 1. 열화의 저감성 등급
(일본 주택성능표시기준, 건설성 고시 1652호 발취)

등급3	3세대(대개 75~90년) 일반적으로 상정된 자연조건 및 유지관리의 조건하에서 대규모의 개수공사가 필요로 되기까지의 기간을 연장하기 위하여 필요한 대책이 강구되어 있다.
등급2	2세대(대개 50~60년) 상동
등급1	건축기준법에 정하여진 대책이 강구되어 있다.

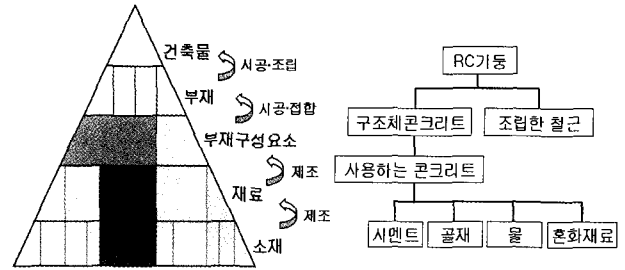


그림 1. 건축물의 구성⁷⁾

표 2. 내구성 등급3을 위한 콘크리트의 시방조건
(주택성능평가기준, 건설성 고시 1654호 발취)

시멘트의 종류	철근콘크리트조 등의 부분에 일본공업규격(JIS)에 규정된 포틀랜드시멘트, 플라이애쉬 시멘트 및 고로시멘트가 사용되고 있는 것
물시멘트비	물시멘트비를 50%이하(경량콘크리트의 경우 45%이하) 물시멘트비를 55%이하(경량콘크리트의 경우 50%이하)
슬럼프	콘크리트 강도가 33N/mm ² 미만에서는 180mm이하 콘크리트 강도가 33N/mm ² 이상에서는 210mm이하
단위수량	185kg/m ³ 이하
공기량	4~6%(오키나와 등 이외)
타설 및 다짐	확실하게 충전하기 위한 방법이 지정되어 있는 것
이여치기부 처리	지정되어 있는 것
양생방법	지정되어 있는 것

3. 건축물의 성능검증형 설계와 목적지향형 시방서

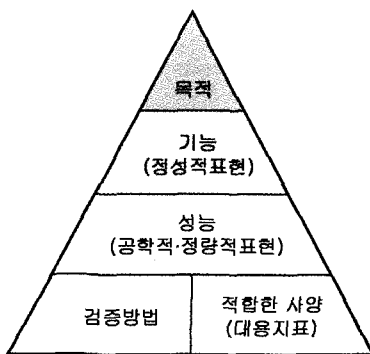
내구성설계에 대하여 언급하기 전에 내구성이라는 단어의 개념과 정의를 살펴보면, 기존에는 「열화작용에 대한 부재·재료의 저항성」으로서 부재와 재료의 고유성능으로 평가되어져 왔다. 그러나 최근의 내구성은 「건축물·부재에 요구되는 기능·성능의 유지존속능력」으로서 넓은 의미의 개념으로 활용되고 있어, 내구설계 실시 후에는 건축물과 그 구성요소(부재·재료)와의 관계를 파악하여 건축물 전체에 요구되는 기능 및 성능을 파악할 필요가 있다.

건축물은 <그림 1>에 나타난 바와 같이 기둥, 보, 벽, 슬래브, 지붕 등 복합부재의 집합체로 구성되어 있으며, 각 부재는 콘크리트 또는 철근 등 복수의 재료로 구성되어 있다.

현재, 건축물의 성능설계를 실시하는 경우, 실제로 건축물의 구성요소로서 부재, 재료, 소재가 가지고 있는 성능, 즉 「물질성능」으로 치환하여 설계를 실시하는 경우가 대부분이다. 그러나 소재, 재료 등의 최소구성요소에서 부재 및 건축물로 구성되기 위해서는 반드시 「제조 및 시공」이라는 인위적인 작업 행위가 실시되며, 그 작업 행위의 적합성 여부, 즉 「형이상적 성능」도 최종적인 성과물인 건축물의 성능을 크게 좌우할수 있게 된다.

따라서 건축물의 내구설계를 실시하는데 있어서는 「물질성능」뿐만 아니라 「형이상적 성능」 체계도 고려해야 하며, 「물질성능」

시에서는 시방의 예시에 의한 방법에서 성능이 담보되어 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 현행제도에 있어서 성능표시라는 것은 「목표성능을 달성하려면 확인된 시방을, 설계·시공에서 실현한 것을 평가한 것」이다. 성능을 달성할 수 있음이 검증되지 않는 시방에 의해 설계, 시공하는 경우에는 「사전에 소정의 성능이 달성됨을 실제적으로 검증(특인)」해야 한다. 이와 같이 현 단계에서는 성능규정형이라기 보다는 적합인증 시방형이라고도 할 수 있으며, <표 2>와 같은 성능표시기준에 「목적」을 명확히 규정하는 것이 필수적이라 할 수 있다.



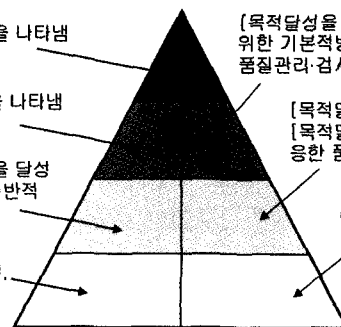
(a) 물질성능의 분류체계

목적
상위의[형태]에 대응한[형태]의 목적을 나타냄

목적달성을 위한 원칙
목적을 달성하기 위한 기본적인 원칙을 나타냄

목적달성을 위한 기본적 방법
목적달성을 위한 원칙에 따르고, 목적을 달성하기 위한 일반적인 상위의[형태]와 일반적인[형태]를 나타냄

목적달성을 위한 구체적 방법
목적달성을 위한 기본적 방법에 따라서, 목적을 달성하기 위한 구체적인 하위의[형태]와 구체적인[형태]를 나타냄



(b) 목적지향형 사양서의 분류체계

그림 2. 물질성능·목적지향형 사양서의 체계⁷⁾

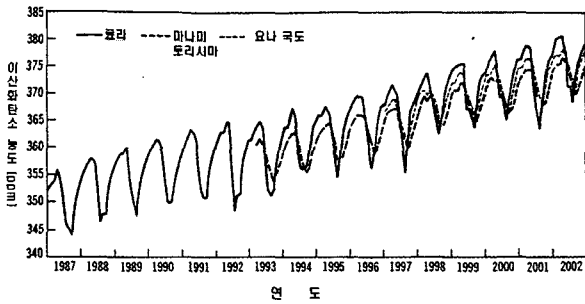


그림 3. 이산화탄소농도 월평균값의 변화(일본)⁹⁾

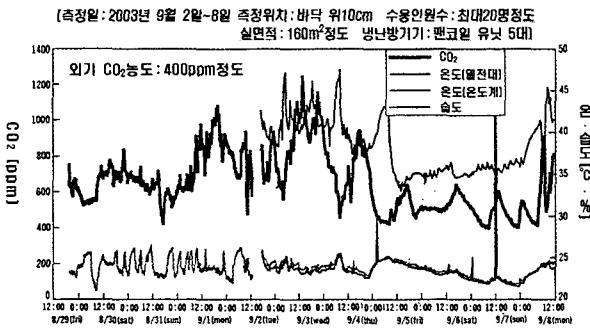


그림 4. 실내 이산화탄소의 농도 변화(일본)¹⁰⁾

에 관한 법기준향의 성능규정화 과정으로 <그림 2(a)>의 체계가 자주 나타나고 있으며, 한편 「형이상적 성능」에 있어서는 제조 및 시공이라는 작업을 정량화하여 표현하는 것은 불가능하므로, 성능으로서 정량화 표현은 작업·행위의 성과물로서 「물질성능」만 가능하다.

한편, 「형이상적 성능」체계는 <그림 2(b)>에 나타난 목적지향형 사양서의 체계를 제시할 수 있고, 「물질성능」의 체계와 같은 형태로 작업·행위의 목적이 되며, 아래쪽으로 갈수록 구체적인 작업내용으로서 표현된다.

4. 탄산화에 의한 콘크리트의 열화현상

서론에서 언급한 듯이 건축물의 위치 및 환경조건 등에 따라 열화의 세기에는 차이가 있으며, 이러한 열화 세기에 있어서

표 3. 탄산화를 고려한 내구성설계에서 고려하는 성능항목⁴⁾

열화의력	평가항목	설정방법	측정값이 없는 경우
탄산화	대기중의 이산화탄소농도		옥외: 0.05% 옥내: 0.20%
	대기중의 유황산물 농도	건축물의 부지에서	
	대기중의 질소산화물 농도	연속적으로 측정	신뢰성 있는 자료
	건축물에 접한 토양 및 물의 탄산농도		

상정된 열화현상마다 설계치는 설계열화의력의 종류 및 강도를

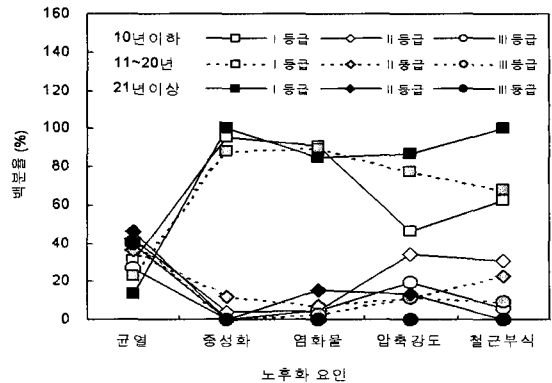


그림 5. 경과년수별 노후도 평가결과⁴⁾

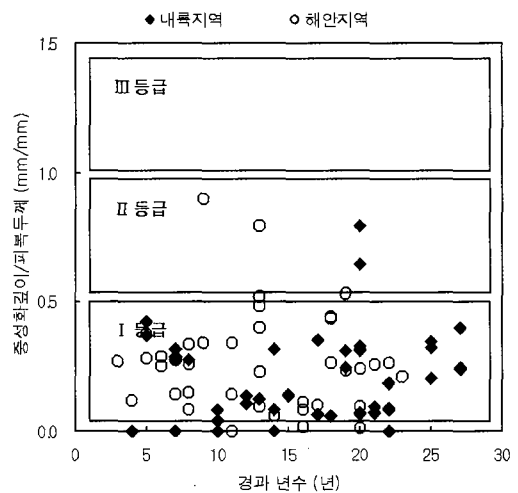


그림 6. 탄산화의 실태조사 및 노후도 평가 결과⁴⁾

설정하도록 해야 한다.

예로서 일본의 대기환경관측소(이와테현 소재), 南鳥島기상관측소(동경소재) 및 与那國鳥嶺정소(오кина와현 소재)의 3지점에 있어서 이산화탄소의 연평균 농도는 <그림 3>에 나타난 바와 같이 매년 증가하고 있는 추세이며, 2002년의 각 관측점에서의 이산화탄소 연평균 농도는 약 375 ppm이다. 또한, 공적 기관의 측정결과에 따르면, 인구밀집지역, 연소과정으로부터 생기는 발생원이 있는 경우에 이산화탄소농도 및 질소산화물 농도가 높은 것으로 나타났다.

한편, <그림 4>에 나타난 바와 같이 옥내의 이산화탄소농도는 옥외보다 약 1,000 ~ 2,000 ppm 높게 나타나고 있다. 이와 같은 사실에 근거하여, AIJ 내구설계지침에서는 대기중의 이산화탄소농도 측정값이 없는 경우, 옥외에서는 <표 3>에 나타난 바와 같이 500 ppm(0.05%), 옥내에서는 2,000 ppm(0.20%)으로 설계하고 있다.

또한, <그림 5, 6>은 국내 8개 지역(서울, 대전, 대구, 부산, 군산, 강릉, 포항, 여수)에서 경과년수 3 ~ 27년의 범위에 있는 총 42개단지 85개동의 철근콘크리트 조 아파트를 대상으로

1997년 8월 26일부터 11월 6일까지 아파트 노후도 실태조사⁴⁾를 실시한 것으로 구조물의 경과년수에 따라 탄산화의 평가등급은 차이가 크게 나타나고 있으며, 내륙지역 및 해안지역, 즉 구조물이 위치한 환경에 있어서도 차이를 나타내고 있어, 내구성능 설계 있어서 설계열화외력의 종류 및 강도를 설정하지 않으면 안된다.

5. 탄산화에 의한 내구설계

열화작용의 종류에 관계없이 내구설계의 기본적인 흐름은 <그림 7>에 나타낸 바와 같지만, 이하에서는 탄산화에 관한 내구설계를 중심으로서 열화현상 등을 ① 환경구분과 열화작용 레벨, ② 열화진행과정과 모델화, ③ 열화현상에 관련한 재료성능·대용지표, ④ 재료성능, 대용지표와 구체사양, 부재상세와의 관계로 한정하여 내구설계의 흐름을 기술한다. 탄산화에 있어서 열화작용의 주요인으로서 이산화탄소가 있고, 건축물의 경우에는 옥외와 옥내로서 다른 이산화탄소농도(옥내 : 약 0.2%, 옥외 : 약 0.05%)가 설정된다. 탄산화의 진행은 ① 콘크리트 내부로 이산화탄소의 침입과정, ② 이산화탄소와 수산화칼슘과의 반응에 의한 알칼리성의 손실과정 2단계로 구성이 되고, 식(1)과 같이 모델화된다⁷⁾. 그렇지만, 일반적으로는 식(1)의 이산화탄소와 수산화칼슘과의 반응을 포함한 형태의 이산화탄소 확산에 대한 해로서 유도되는 식(2)의 모델이 이용된다.

$$\frac{\partial CO}{\partial t} = D_{CO_2} \frac{\partial^2 CO}{\partial x^2} - k \cdot CO \cdot CH \quad (1)$$

여기에서, CO : 이산화탄소농도
 CH : 수산화칼슘농도
 t : 경과시간, x : 콘크리트표면으로부터의 깊이
 DCO₂ : 콘크리트중으로 이산화탄소의 확산계수
 k : 이산화탄소와 수산화칼슘의 반응속도정수

$$C_d = A \sqrt{t} \quad (2)$$

C_d : 탄산화 깊이
 t : 경과시간
 A : 탄산화속도계수

철근주위의 콘크리트가 탄산화된 후는 식(3)까지는 식(4)의

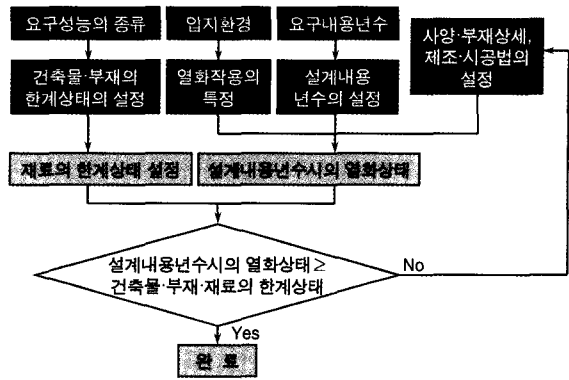


그림 7. 건축물의 내구설계 흐름도⁶⁾

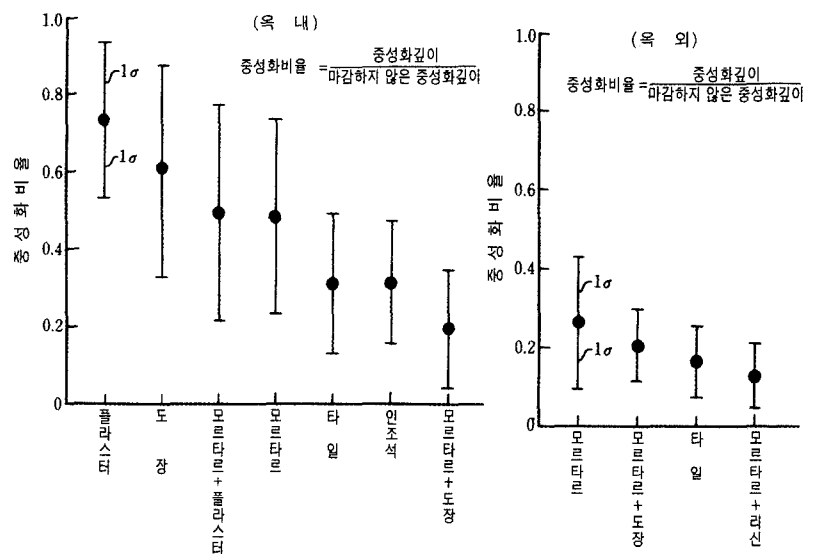


그림 8. 바탕마감재가 탄산화의 진행에 미치는 영향⁸⁾

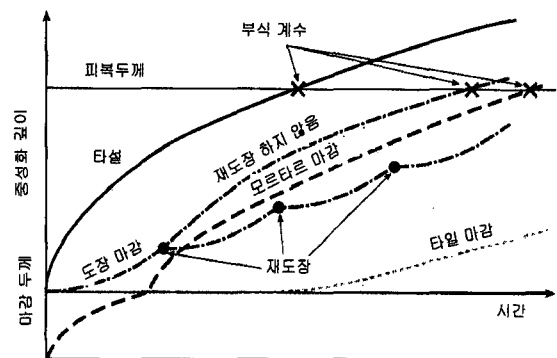


그림 9. 탄산화의 진행 모식도⁶⁾

부식속도 V에서 철근의 부식이 진행되는 과정으로 이행한다.

$$V = O_o \cdot \frac{A_c}{A_a} \cdot \frac{D_o}{L_c} \quad (3)$$

$$V = O_o \cdot \frac{D_o}{L_a} \quad (4)$$

여기에서, O_o : 대기중의 산소농도
 D_o : 산소의 확산계수
 L_c : 캐소드부의 산소확산 최단거리
 L_a : 아노드부의 산소확산 최단거리
 A_c : 캐소드 면적
 A_a : 아노드 면적

탄산화에 따른 유지관리한계상태를 목표로 내구설계를 실시하는 것은 「식(1)을 이용하여 설계내용연수 t 에 있어서 콘크리트표면부터의 깊이 x 에서 이산화탄소농도 CO 및 수산화칼슘농도 CH 를 계산하고, 철근위치에 따른 콘크리트 중의 수산화칼슘농도가 소정의 농도 이하로 되지 않기 위해 피복두께 및 콘크리트 중으로의 이산화탄소 확산계수 D_{CO_2} 를 결정」 또는 「식(2)를 이용하여, 설계내용연수 t 에 있어서 탄산화깊이 Cd 가 철근위치로까지 도달하지 않기 위해서 피복두께 및 탄산화 속도계수 A 를 결정」으로 해석된다.

한편, 종국한계상태를 목표로 하는 경우에는 「식(1) 또는 식(2)를 이용하여, 철근위치의 콘크리트가 탄산화되기까지의 시간을 계산한 후, 식(3) 또는 식(4)를 이용하여, 설계내용연수 t 에 따른 철근의 부식감량율을 계산하여, 그 값이 각 성능의 종국한계상태에 대응하는 부식량보다 미만으로 되기 위한 피복두께, 이산화탄소 확산계수 D_{CO_2} 에 의해 탄산화 속도계수 A 및 산소의 확산계수 D_o 를 결정」하는 것이 내구설계이다.

이산화탄소가 철근의 위치까지 도달하는데 필요한 시간은 피복두께 및 이산화탄소의 확산계수 또는 탄산화속도계수에 따라서 결정되고, 확산계수 및 탄산화속도계수는 콘크리트의 세공구조 및 그 함수상태와 밀접한 관계가 있으며, 세공구조는 물시멘트비, 시멘트의 반응을 및 혼화재의 종류·치환율의 영향을 받는다. 또한, <그림 8, 9>에 나타난 바와 같이, 마감재의 종류·두께는 이산화탄소가 콘크리트 중으로 침입하는데 크게 관여한다. 한편, 이산화탄소 도달부분의 알칼리성 손실에 요하는 시간은 수산화칼슘농도의 영향을 받으며, 수산화칼슘농도는 시멘트의 종류, 양, 반응을 및 혼화재의 종류, 치환율에 따라 결정된다.

따라서 상정된 피복두께의 조건하에 있어서 설계내용연수를 만족하기 위해서 이산화탄소의 확산계수 또는 탄산화속도계수를 구한 후에는 이것에 대응하는 콘크리트의 사용재료, 배합 등의 구체적인 사양을 결정하는 단계 또는 내구설계의 최종단계로 들어간다. 예를 들면 소오의 탄산화속도계수가 구하여진 경우에는 식(5) 또는 식(6)에 기초한 콘크리트의 구체사양을 결정

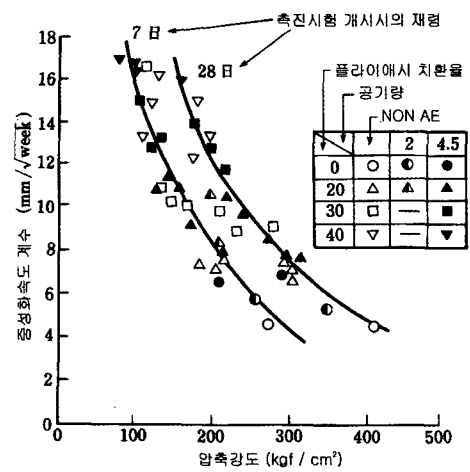
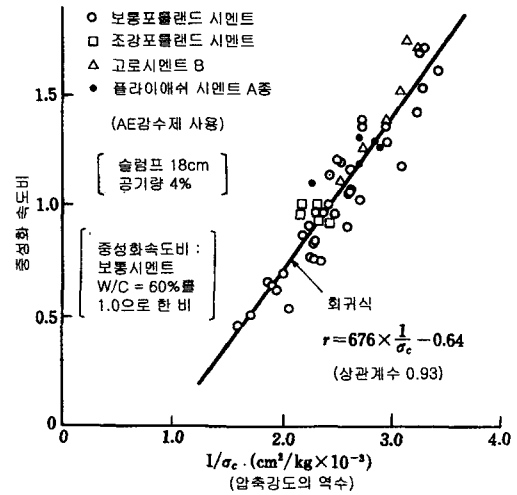


그림 10. 콘크리트의 압축강도와 탄산화 속도계수⁸⁾

한다. 1997년판 JASS5에서는 <그림 10>¹¹⁾에 나타난 바와 같이 탄산화속도계수는 시멘트의 종류 등에 관계없이 콘크리트의 압축강도에 따라 한 가지 의미로서 정해지는 것으로 하고, 내구설계기준강도의 개념을 도입해 두며, <표 4>에 나타난 바와 같이 설계내용연수에 대응한 내구설계기준강도를 정하고 있다. 한편 품질법으로는 설계내용연수에 대한 물시멘트비의 상한값을 규정하고 있다(표 4).

$$A = a_1 + b_1 / (F + C_1) \quad (5)$$

$$A = a_2 + b_2 \times W / (C + k \times A_d) \quad (6)$$

여기에서, F : 콘크리트의 압축강도

W : 단위수량, C : 단위포틀랜드 시멘트 량

A_d : 단위혼화재량, k : 혼화재의 시멘트 환산율

a_1, b_1, c_1, a_2, b_2 : 신뢰가능한 자료에 의해 정해진 정수
 이상의 탄산화에 관한 내구설계의 흐름은 <그림 11>과 같이 나타낼 수 있으며, 성능설계요인을 고려한 콘크리트의 배합설계

표 4. 설계내용연수에 대한 구체사양·부재상세의 예⁶⁾
(내력벽, 외벽, 흙에 접하지 않는 부분, 마감이 없음)

설계내용연수	JASS 5		품확법	
	최소 피복두께(mm)	내구설계 기준강도(N/mm ²)	최소 피복두께(mm)	물-시멘트비
30년 정도	40	18	30	(12N/mm ²)
60~65년 정도	40	24	40	55% 이하
			50	60% 이하
90~100년 정도	40	30	40	50% 이하
			50	55% 이하

표 5. 철근의 허용부식확률⁷⁾

구조물의 중요성*	기둥, 보의 주근	이외의 철근 (띠근, 늑근, 벽철근, 슬럼프 근)	
		손상 가능성	손상이 없을 가능성
가장 중요	3% 이하	7% 이하	15% 이하
중요	5% 이하	15% 이하	30% 이하
보통	10% 이상	30% 이하	50% 이하

* 공공성, 유지관리의 편리성, 공용기간 등을 고려하여 설계자가 정한다.

의 흐름은 <그림 12>와 같이 나타낼 수 있다.

6. 탄산화에 대한 성능의 검증방법

구조체 및 부재는 설계내용연수의 기간동안 탄산화에 의해 설계한계상태에 도달하지 않기 위해서(또한 설계내용연수의 기간내에 유지보전을 실시하는 것을 계획하고 있는 경우) 유지보전기간동안은 탄산화에 의해 유지보전한계상태에 도달하지 않

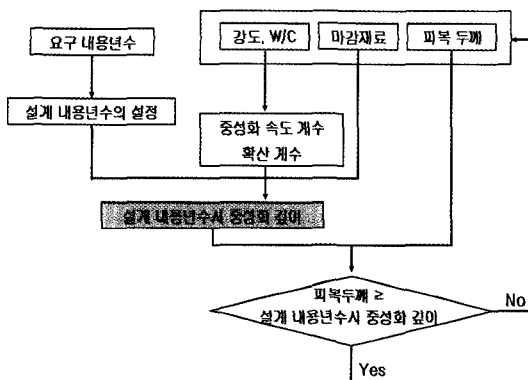


그림 11. 탄산화에 관한 내구설계의 흐름도⁶⁾

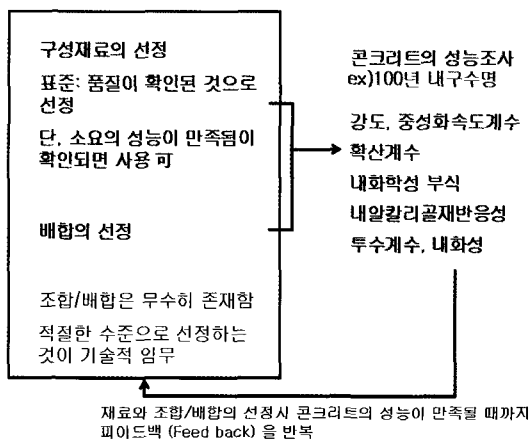


그림 12. 성능설계요인을 고려한 콘크리트의 배합설계

기 위한 재료, 배합, 공법의 사양을 선정하지 않으면 안된다. 이것은 염해, 알칼리골재반응, 동해 및 화학적부식 등에 대하여도 동일하다.

탄산화에 대한 콘크리트의 재료, 배합, 시공 및 마감재의 사양은 콘크리트의 탄산화 깊이의 평균 및 그 변동, 최외측 철근 피복두께의 평균 및 그 변동으로부터, 최외측철근의 부식확율을 산정하고, 설계한계상태까지는 유지보전한계상태에 도달하지 않는 것을 검증하여 정한다.

콘크리트 중의 철근은 일반적으로 최외측철근부터 부식하기 시작하기 때문에 사용안전성에 관한 유지보전 한계에 먼저 도달하고, 계속하여 사용안전성에 관한 설계한계상태 및 구조안전

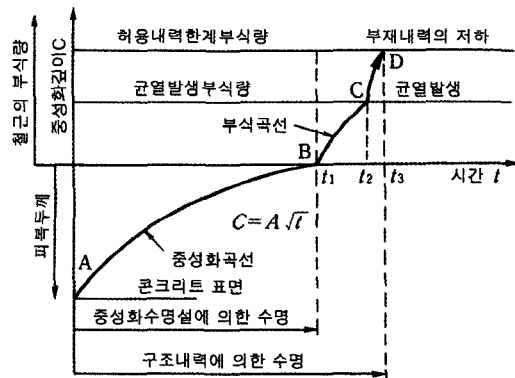


그림 13. 콘크리트 중의 철근부식 개념¹⁰⁾

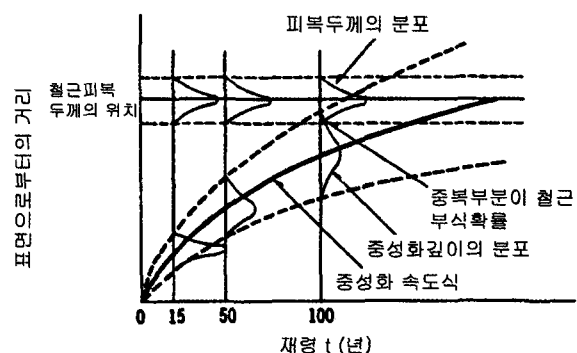


그림 14. 철근부식의 확률론적 판단방법²⁾

성에 관한 유지보전한계가 온다고 판단된다. 여기에서 탄산화에 대한 설계한계상태는 콘크리트의 탄산화가 진행하여 최외측 철근의 20%가 부식상태(구체의 일부에는 균열이 발생하는 정도)가 될 때라고 한다.

또한, 탄산화에 대한 유지보전한계상태는 탄산화 깊이가 철근표면을 부식시킨 위치에 도달할 때라고 한다. 그리고, 중요 구조물에서 균열이 허용하지 않는 경우는 <표 5>를 참고하여 부식확률을 설정하는 것이 좋다. 여기에서 말하는 「부식상태」는 철근이 탄산화 영역에 존재하는 상태를 말하며, 「부식확률」은 전체적으로 철근 중 부식상태에 있을 확률을 나타낸다.

철근부식의 개념도는 <그림 13> 및 철근의 부식확률 판단방법은 <그림 14>에 나타낸 바와 같다. 철근의 피복두께는 시공의 정밀함에 따라 불균일하며, 탄산화 깊이도 콘크리트 품질의 변동 등에 의해서 불균일해질 수밖에 없다. 이 때문에 부식확률을 산정하는 경우, 이러한 불균일한 경우를 고려하지 않으면 안 된다. 여기에서는 불균일한 경우를 정규분포로 판정하고, 탄산화 깊이의 변동은 콘크리트의 재료, 배합, 제조 및 시공방법에 대하여 신뢰할 수 있는 자료에 근거하여 변동계수를 설정한다. 보통의 경우, 피복두께의 표준편차는 10 mm로 고려하는 것이 좋다.

이 그림으로부터 탄산화 깊이는 시간의 경과와 함께 철근에 근접하고, 상호 정규분포범위의 일부가 결국 중복하는 것을 알 수 있다. 이 중복부분에 존재하는 철근은 부식상태에 있다고 판단하고, 전체 철근중에서 부식상태에 있는 철근의 비율을 「철근의 부식확률」로 정의한다. 또한, 철근이 부식하기 시작할 때의 탄산화 깊이는 콘크리트의 함수율 등의 영향을 고려하여 시험 또는 신뢰 할 수 있는 자료에 의해 정한다.

시험을 실시하지 않은 경우 및 신뢰 할 수 있는 자료가 없는 경우는 옥외의 빗물이 닿는 부분 및 물이 접하는 습도가 높은 부분에서는 탄산화 깊이를 철근의 피복두께까지 도달했을 때로 하고, 옥외의 빗물이 닿지 않는 부분 또는 일반적인 옥외에서는 탄산화 깊이가 철근의 피복두께로부터 20 mm 깊이까지 도달했을 때로 상정한다.

탄산화의 진행은 콘크리트 중의 탄산화 영역에서 이산화탄소(CO₂)의 확산으로 탄산화 영역과 미탄산화영역의 경계영역에서 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과 CO₂의 반응으로 2가지의 현상을 합친 현상으로 이해되며, 콘크리트가 대기중에 접하는 면의 평균탄산화 깊이는 콘크리트의 재료, 배합, 환경조건을 근본으로 식(1)에 의해 산정하며, 탄산화 속도계수는 신뢰할 수 있는 자료 또는 시험 등에 기초하여 정한다.

탄산화 깊이는 이론적으로 시간의 제곱근(\sqrt{t} 법칙) 및 CO₂농도의 제곱근에 비례하며, 또한 콘크리트 표준시방서(유

지관리편(2005))으로부터 콘크리트의 조직이 치밀한 경우, 확산계수 D 의 값은 작게 되고, 탄산화 깊이는 작게 된다. 따라서, Ca(OH)₂의 생성량이 적은 시멘트 또는 포졸란 반응 등에 의해서 Ca(OH)₂를 소비하여, 콘크리트의 단위체적당 Ca(OH)₂량이 작게 될 경우 탄산화 깊이는 크게 되는 것을 알 수 있다. 탄산화의 진행이 시간의 제곱근에 따른 탄산화 속도식은 수없이 제안되어 왔으며, 그 대표적인 것으로서는 浜田·岸谷에 의한 식, 이것을 수정한 白山에 의한 식, 또한, 최근에는 和泉에 의한 식 등이 있다.

$$C = A \cdot \sqrt{t} \tag{7}$$

여기에서, C : 콘크리트의 평균탄산화 깊이(mm)

t : 재령(년)

A : 콘크리트의 재료, 배합, 환경조건에 의해 결정할 탄산화 속도계수

식(7)에 의해 탄산화 깊이를 구하기 위해서는 탄산화속도계수 A 를 결정해야 하는 것을 알 수 있다. 그래서 아래에 탄산화 속도계수의 결정수준을 나타냈으며, 탄산화 속도계수는 콘크리트의 재료, 배합, 환경조건의 영향을 고려하여 식 (8)에 나타내었다.

$$A = k \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \tag{8}$$

여기에서, k : 岸谷식에서는 1.72, 白山식에서는 1.41로 되는 계수

α_1 : 콘크리트의 종류 (골재의 종류)에 의한 계수

α_2 : 시멘트의 종류에 의한 계수

α_3 : 배합 (물-시멘트 비)에 의한 계수

β_1 : 기온에 의한 계수

β_2 : 습도에 의한 계수

β_3 : 이산화탄소농도에 의한 계수

여기에서 탄산화속도계수 A 를 산출하기 위해서는 다음에 나타내는 2가지 방법이 고려된다.

① 재료, 배합, 환경조건의 영향을 고려하여 정한다.

② 실험결과 (축진탄산화 시험)으로 부터 정한다.

①의 경우는 계수 $k, \alpha_1 \sim \beta_3$ 은 AIJ·내구설계지침(해 5.2.11)식 ~ (해 5.2.14)식 및 해설 표 5.2.2 ~ 5.2.14를 참고하여 산출한다. ②의 경우는 탄산화축진시험의 방법은 JIS A 1153-2003(콘크리트의 축진탄산화 시험방법)에 의한다. 이 시험방법은 탄산가스농도를 5%로 하는 것으로서 대기중의 탄산화 깊이는 식(9)에 나타냈다.

$$C = A' \sqrt{CO_2/5.0} \cdot \sqrt{t} \quad (9)$$

여기에서, C : 탄산화 깊이(mm)
 CO_2 : 대기중의 탄산가스농도(%)
 A' : 정수(축진탄산화 시험에 의한 정수 :
 mm · \sqrt{t})
 t : 재령(주)

식(9)를 이용한 축진탄산화 시험결과를 토대로 옥외 및 옥내에 있어서 탄산화 깊이가 동일하게 되는 기간을 예측하고, 옥외의 경우는 $CO_2 = 0.05\%$ 로 하면 축진탄산화 시험결과가 대기중에 있는 옥외에 있어 100배의 기간에 상당하며, 옥내의 경우는 $CO_2 = 0.2\%$ 로 하면 축진탄산화 시험결과가 대기중 옥내의 결과에 25배의 기간에 상당하는 것이 된다. 또한, 구조체 및 부재에 마감재를 실시할 경우는 마감재에 의한 탄산화 제어효과 및 탄산화 제어효과의 지속성을 검토하고, 탄산화 깊이의 산정에 기입된다. 이 경우, 마감재의 탄산화제어효과를 고려하고, 식(1)을 수정한 평가식도 제안되고 있으며, AIJ, 내구설계지침 중에 나타내고 있는 것을 참고로 하였다.

7. 맺음말

향후의 건설 구조물은 앞서 언급한 바와 같이 최소성능을 법적으로 규정하고 있는 표준시방서 규정에서 벗어나 요구 사항에 따라 목표성능이 구체적이고 다양하게 대응하는 성능 설계를 중심으로 전환될 것으로 예상된다. 이를 위해 성능설계요인을 고려한 콘크리트의 배합설계가 필요할 것으로 판단되며, 또한 성능을 검증할 수 있는 내구설계의 정착이 필요할 것으로 판단된다. 철근콘크리트조 건축물의 수명을 정확히 예측하고 평가하기 위해서는 마감재의 초기성능과 열화에 따른 성능저하도의 정량화, 자연환경작용에 대응하는 열화시험방법의 확립, 미관성의 정량적평가지표의 확립 등이 체계화로서 라이프사이클 관리와의 연관성도 필요하며, 차후, 철근콘크리트의 내구성에 관하여 연구가 활발하게 전개될 것으로 기대하며 본고를 마치고자 한다. ☐

참고문헌

1. 野口貴文, "性能設計法を本格投入した〔鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)〕の概要とポイント", その1. 方針・劣化外力・限界状態, セメントコンクリート, No.695, Jan. 2005.
2. 鹿毛忠繼, "性能設計法を本格投入した〔鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)〕の概要とポイント", その2. 性能検証型一

般設計法セ, メントコンクリート, No.696, Feb. 2005.

3. "特集: 構造物の高性能化を目指す21世紀のコンクリート技術", 콘크리트工學, Vol.39, No.1, Jan. 2001, pp.667~670.
4. 김무한, 송병창, 고진수, 정성철, 권영진, 김규용, 강석표, "국내 철근콘크리트조 아파트의 노후도 평가에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 16권 6호, Sep. 2000, pp.89~94.
5. 日本建築學會, 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説, 日本建築學會, 1991.
6. 野口貴文, "鉄筋コンクリート造建築物の性能検証型耐久設計", 콘크리트工學, 40권 5호, 2002. 5.
7. 榎田佳寛・榎野博之, "コンクリートの中性化進行予測モデル", 콘크리트工學論文集, Vol.2, No.1, 1991, pp.125~133.
8. 日本建築學會, 鉄筋コンクリート工事標準仕様書 JASS5, 日本建築學會, 1997.
9. 氣象廳, 報道発表資料「増え続ける大氣中のp二酸化炭素-國內および世界の最新状況」, 일본기상청, 2003.
10. 日本建築學會, 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説, 日本建築學會, 1991.
11. 日本建築學會, 鉄筋コンクリート工事標準仕様書 JASS5, 日本建築學會, 1997.

연구 모집 안내 ▶▶▶

「콘크리트학회지」는 콘크리트 관련 학문과 기술에 대한 정보를 제공하기 위해 발행되고 있습니다. 우리 학회지를 통해서 연구 결과, 경험한 사례 등을 콘크리트 관련 기술자들과 함께 나누시길 원하시는 분께서는 다음과 같은 형태로 참여하실 수 있습니다. 여러분의 육고를 기다리겠습니다.

- 원고 주제 : 포토에세이(사진, 서예, 시 등), 논문, 특집, 기술기사, 공사기사, 문헌조사, 해외번역기사, 해외연구소 소개, 국제학술회의참가기, 현장탐방, 우리회사소개 등
- 원고 분량 : 4매 ~ 6매 내외(A4 용지 기준)
- 제출처 : E-Mail : mjh@kci.or.kr
TEL (02)568-5985