

2. 내구성 해석의 필요성

2.1 생애주기비용

지금까지의 우리나라의 건설 산업은 콘크리트구조물을 건설하는데 있어 초기건설비의 절감을 목표로 계획하고 설계하는 것이 일반적이었으나, 이미 선진 국가들에서 증명되었듯이 구조물의 공용기간동안에 소요되는 유지관리비가 차지하는 비율이 점점 커지는 것이 사실이다. 이에 따라, 세계 각국에서는 구조물의 생애주기 동안에 전체 비용에 관한 경제성 평가를 통한 설계, 시공 및 유지관리 방안을 선정하고자 하는 많은 노력들이 이루어지고 있는 실정이다. 최근 국내에서 사회기반 구조물이 목표 공용수명을 다하지 못한 상태에서 과도한 유지관리비가 소요되거나 재건 설되는 사례가 발생하고 있는 점을 고려한다면, 향후 계획되는 모든 콘크리트구조물은 설계 초기단계에서부터 생애주기비용(Life Cycle Cost, LCC)을 고려한 설계가 이루어지는 것이 합리적이라 할 수 있다.⁴⁾ 바꾸어 말하면 초기투자비용 또는 단기적인 유지보수비용의 절감이 아닌 구조물의 전체 생애주기를 고려한 비용분석을 신설구조물의 계획 초기단계에 실시하는 것이 필요하다는 것이다.

예를 들어 염해환경에 건설되는 콘크리트구조물의 경우 사용하고자 하는 목표내구수명에 따라 처음부터 유지관리를 하지 않는다는 ‘유지관리 프리(maintenance free)’의 개념을 갖고 설계를 수행하는 것보다, 점검에 따른 적절한 보수 및 보강을 수행하여 구조물을 보다 오래 공용할 수 있도록 하는 것이 경제적이다. 이런 경우 사용환경과 목표 사용수명을 고려하여 유지관리의 수행여부 등을 전제로 한 설계가 바람직하다. <그림 2>는 염해환경에 대한 LCC 분석을 한 사례로서, 염해 환경의 경우 설계 수명기간이 짧은 경우에는 소규모 혹은 대규모 유지보수를 실시하는 것이 전체 비용측면에서 유리하다. 반면에 설계 수명기간이 장기간인 구조물인 경우에는 처음부터 고내구성 재료와 마감 재료 등을 적용하여 처음 건설시부터 사용 수명기간 동안 필요한 콘크리트의 내구성을 확보하도록 설계하는 것이 전체 비용측면에서 유리한 경우가 있다. 즉 경제적인 설계는 유지관리를 전제로 보수 및 보강의 쉽고 어려움, 공용기간의 변경 가능성, 즉 장수명화 등 구조물이 건설될 환경조건을 고려한 LCC분석을 통한 유지관리의 개념을 도입하여 수행하는 설계이다. 이러한 LCC 분석에 있어서 대상 콘크리트구조물의 열화 예측은 반드시 선행되어야 한다. 이는 내구성 해석을 통하여 시간에 따른 구조물의 성능저하 수준을 정량적으로 예측을 할 수 있어야 하고 또한 보수 및 보강을 통한 성능복원 정도를 정확히 판단할 수 있어야 하기 때문이다. 이러한 내구성 예측 결과가 보다 정확한 비용 분석을 가능하게 한다.

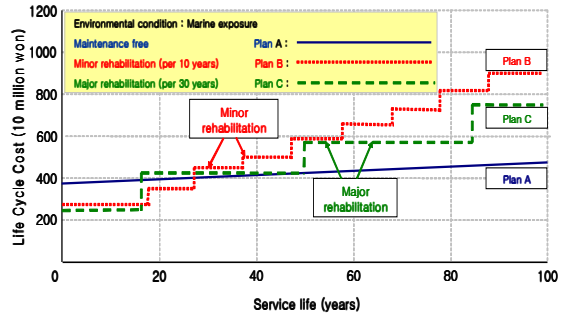


그림 2. 생애주기비용 분석과 내구성 해석

2.2 구조물의 장수명화

일반적으로 철근콘크리트구조물의 목표내구수명은 구조물의 사용성에 지장이 있는 내구적 한계상태에 도달하기까지의 기간으로 물리적 내구한계, 사회적 내구한계로 구분할 수 있다. 물리적 내구수명은 다수 부재가 보수보강을 필요로 하는 수준까지 열화되고 구조물 외부에서 반수 이상이 철근 부식에 의한 균열이나 피복 콘크리트가 박락한 상태이다. 사회적 내구수명은 경제성과 구조물의 중요성에 따라 결정된다.

콘크리트구조물은 준공시에 어느 정도 이상의 내구성을 갖고 있지만, 이는 주변의 환경하중의 영향 때문에 시간이 지남에 따라 서서히 저하하게 된다. 이 때문에 콘크리트구조물은 일정한 내구적 측면에서의 수명을 가지게 되고 이러한 내구수명이 목표 내구수명보다 작으면 목표수명에 도달하기 전에 내구적 파괴가 발생한다. 그러므로 내구적 파괴를 방지하기 위해서 콘크리트구조물의 내구성 설계 시에 구조물의 경제적 사회적 중요도에 따라 그에 적합한 목표내구수명을 설정하는 것이 공용기간동안 구조물의 내구성 확보에 있어서 중요한 첫걸음이 된다.

또한 현재 여러 국가에서 제시된 콘크리트구조물의 내구성 관련 기준에서는, 최근 콘크리트구조물의 내구성 향상 및 장수명화에 관한 관심이 집중됨에 따라 사회적으로 콘크리트구조물의 내구성능에 대한 인식이 높아졌다. 따라서 100년 이상의 내구수명을 요구하는 사회적인 기반 구조물로서의 콘크리트구조물의 건설이 필요하게 되어, 주요 사회 기반 시설물에 대해서는 100년 이상의 목표내구수명을 요구하게 되었다. 그러므로 콘크리트구조물의 장수명화를 보장하기 위하여 설계시에 구조물의 사용환경을 고려한 정확한 내구성 해석을 수행하여 설계 단계에서 구조물의 목표내구수명을 확보할 수 있어야 한다.

2.3 성능중심 설계기준의 발전

1980년대 이후부터 발주자가 요구한 구조물의 성능에 근거하

여 콘크리트구조물을 설계하려는 세계적인 흐름과 설계방법, 사용재료 및 시공방법 등에 대한 가장 기본적인 최소한의 품질 수준만을 규정하고 있는 소위 시방 혹은 사양 규정⁵⁻⁷⁾만으로는 고내구성 콘크리트구조물의 건설에 적절히 대응할 수 없다는 문제점이 제기됨에 따라, 최근 국제표준화기구, 유럽 및 아시아 지역 설계기준 작성위원회를 포함한, 미국, 유럽각국 및 일본 등의 외국에서는 콘크리트구조물의 요구 성능을 합리적으로 확보하기 위한 방안으로서 성능중심의 규격 즉 성능평가형 규정 (performance based specification)의 도입을 본격적으로 하고 있다.⁸⁻¹⁰⁾

기존 설계개념인 허용응력설계(working stress design)과 한계상태설계(limit state design) 또는 극한강도설계(ultimate stress design)개념에 근거한 사양설계기준의 장점은 기준에 기술되어 있는 규정에 따르면 되기 때문에 설계자가 설계에 대한 선택에 대하여 깊게 생각할 필요가 없고 적용이 쉽다는 것이다. 반면 새로운 개념의 성능중심의 성능평가형 설계(performance based design: PBD)는 설계에서 요구하는 성능목표를 이루기 위해 사양규정에 의존하는 것이 아니라, 설계자의 능력에 따라 검증된 여러 가지 방법을 동원하여 설계를 수행하여 성능목표를 이룰 수 있는 설계 방법으로, 고성능 재료의 개발, 설계자의 설계 능력 및 해석 기술을 능동적으로 반영 할 수 있으며, 국내의 건설 시장개방에도 적극적으로 대응할 수 있는 장점이 있다.¹¹⁾ 그러나 설계자는 보다 많은 지식 및 능력이 요구되며, 검증된 방법의 적용 등 보다 많은 책임이 따른다는 단점도 있다. 이러한 두 설계방법의 차이와의 장단점에도 불구하고, 기술력에 의한 차별성이 확실하며 기존의 WSD, USD, LSD의 설계범위를 모두 만족하는 PBD 설계방법이 국제적인 설계 추세이다<그림 3 참조>.^{8,9)}

성능평가형 설계법을 이용하여 콘크리트구조물의 내구설계를 실시할 경우에는 구조물의 목표내구성, 내구 성능지표, 내구

성능평가 방법, 열화 예측 방법, 성능계산 방법, 평가시험 방법 등이 준비 되어야만 한다. 즉, 성능평가형 설계란 구조물이 목표 내구 수명기간동안에 시간이 경과함에 따라 발생하는 열화현상에도 불구하고, 요구 되는 일정수준 이상의 내구성능을 유지할 수 있도록 설계변수를 결정하는 설계로서, 경험적인 시방에 따라 설계 사양을 결정하는 것이 아니라 구조물의 내구적 보유 성능을 평가하여 설계치를 결정하는 설계법을 말한다. 따라서 최신 내구성 설계 기법인 성능평가형 설계기법의 적용을 위해서는 우수한 내구성 해석 기술이 밀반침되어야 할 것이다.

3. 내구성 해석 기술

3.1 개요

CEB¹¹⁾에 따르면 콘크리트구조물의 내구성 설계를 위한 모델은 고려하는 영향인자의 수준에 따라 크게 매크로(Macro) 모델, 메조(Meso) 모델, 마이크로(Micro) 모델로 구분할 수 있다.

3.1.1 매크로(macro) 모델

매크로 모델은 콘크리트구조물이 충분한 사용기간(50년(ACI, BS, Eurocodes)에서 75년(AASHTO))내에서 구조적 관점에서의 안전성을 보장하도록 하는 수준1에서 최소 콘크리트 피복 두께, 최대 물-시멘트비, 최소 시멘트량, 허용 균열폭 등과 같은 제한 요소만을 고려한 “deemed-to-satisfy rules(만족할 만한 수준의 규정)⁶⁾”에 기초를 둔 것으로 ACI, AASHTO 및 Eurocode 같은 대부분의 설계기준에서 광범위하게 채택되어 사용되고 있다. 이와 같은 매크로 모델은 시간에 따른 환경하중 및 내구성능의 변화는 물론 콘크리트구조물의 부재 위치에 따른 상세한 미세 환경조건을 고려할 수 없기 때문에 어떤 환경에서는 과소하여 부적절한 반면, 또 어떤 환경에서는 너무 과다한 내구성 설계 및 평가 결과를 유발할 수 있다. 해상 교량 구조물 설계를 예로 들면, 대상 구조물의 교각의 하부구조와 상부구조를 비교할 때 동일 교각에 대해서도 미세 환경에 따른 철근의 부식 위험도와 전달 메커니즘이 아주 다르지만,¹⁹⁾ 실제로 매크로 모델을 적용한 내구성 설계에서는 이러한 차이를 고려하지 못한다.

3.1.2 메조(meso) 모델

매크로 모델에 기초한 설계가 정확한 내구성의 평가에 근거하지 못한다는 점을 극복하기 위하여 콘크리트의 열화와 철근의 부식 그리고 이들 간의 상호작용을 지배하는 메커니즘 및 외부 열화환경에 대한 보다 상세한 분류와 정량적 규명을 통하여 메조 모델을 내구성 설계에 활용하려는 시도가 이루어지고 있다. 다양한 열화 메커니즘의 대부분은 주위 환경으로부터 콘크리트 내부

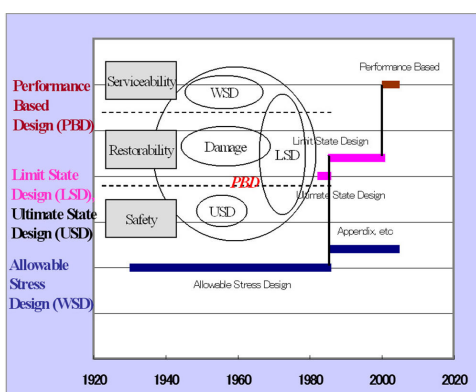


그림 3. 구조물 설계 개념의 변화 추이

로 침투한 여러 열화 물질(염소이온, 이산화탄소 등)들에 의하여 좌우되는데, 이러한 전달 및 열화 메커니즘에 대한 이론적 수치 해석 모델의 연구성과를 바탕으로 지금까지 대부분의 국가에서 사용하고 있는 규격, 즉 시방서 및 기준과는 다른 내구성 설계 접근 방법을 개발하게 되었으며, 국제적으로 인정되고 확대 적용되고 있는 추세에 있다.^{3,10,18)} 하지만 이러한 메조 모델도 시멘트 미시공극구조의 변화나 균열의 발생, 외부 환경조건의 변화 등 미세한 수준까지는 고려하지 못하기 때문에 보다 정확한 내구성 해석을 위해서는 마이크로 레벨의 모델이 요구된다.

3.1.3 마이크로(micro) 모델

마이크로 모델은 메조 모델에 비해 구조물이 처한 환경적/재료적 특성에 대해 미세하게 접근할 수 있는 해석 기법이다. 구조물의 미세환경(micro climate)특성은 구조요소의 특정 표면에서 온도와 상대습도의 변화, 간만대 혹은 비말대 등 노출주기의 변화, 강우 또는 태양 노출여부 및 흙, 지하수, 해수 등에 대한 접촉여부 등을 포함하며, 재료적 특성으로는 시멘트의 수화반응과 이에 따른 미시공극구조의 변화, 수화열 또는 건조수축에 의한 균열발생, 기타 재료의 성능 저하나 시간에 따른 물성의 변화 등을 모두 포함할 수 있다. 이러한 마이크로 모델을 적용하기 위해서는 콘크리트 내외부로의 물질(수분, 기체, 이온) 또는 열의 전달현상이나 화학적인 작용에 대한 수학적 모델에 기초하여 유한요소나 유한차분법 등을 적용한 수치해석을 적용해야 한다.

해석변수의 변동성을 다루는 관점에서 보면 내구성 해석기법은 다시 결정론적 방법과 추계학적 방법으로 나눌 수 있다. 지금까지는 해석변수의 변동성을 고려하지 않는 결정론적 방법이 대부분의 설계기준이나 내구성 해석에서 적용되어 왔으나 결정론적 방법의 한계가 대두되면서 최근에는 해석변수의 변동성을 확률론적 관점에서 정량화하는 추계학적 해석기법의 적용이 활발히 이루어지고 있다.

이하에서는 결정론적 방법에 기초한 내구성 해석모델을 소개하고 추계학적 기법을 적용한 해석기법에 관해 간략히 알아본다.

3.2 결정론적 방법을 적용한 내구성 해석

내구성 해석은 열화인자에 따라 그 메커니즘이 다르므로 해석 모델 또한 달라진다. 콘크리트의 중요한 열화인자로는 노출환경에 따라 염해와 탄산화, 그리고 이에 따른 철근부식, 동결융해, 황산염해, 알칼리 골재반응, 용출(leaching), 산에 의한 침식(erosion), 화학적 부식 등이 있지만, 여기서는 최근까지 가장 활발한 연구가 이루어져 온 염해와 탄산화, 그리고 철근부식에 대한 내구성 해석모델을 중심으로 설명하고자 한다.

3.2.1 염해 해석

콘크리트 내부의 염소이온 침투는 농도 구배에 의한 확산, 모세관 흡착, 전기장 내에서 이온의 이동, 압력차로 인한 흐름 등과 같은 여러 가지 메커니즘에 의해 발생한다. 이중에서 전기장의 영향이 없고 콘크리트의 공극이 안정적인 습윤상태를 유지하고 있는 경우, 콘크리트 내 확산이 염소이온 이동의 주된 메커니즘이라고 할 수 있다. 따라서 확산현상을 나타내는 Fick의 제2법칙이 콘크리트 내에서의 염소이온의 침투를 표현하는 기본 방정식으로 적용되고 있다(식 (1)). Fick의 제2법칙에서 재료특성을 반영하는 염소이온 확산계수와 환경하중특성을 반영하는 표면 염소이온농도를 시간에 대해 일정하다고 가정하여 구한 식 (2)가 가장 단순한 형태의 해석모델로 내구성 해석에 널리 사용되고 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right] \quad (2)$$

여기서 $C(x,t)$ 는 시간 t , 깊이 x 에서의 염소이온농도, C_s 는 표면염소이온농도, D 는 확산계수를 나타내며, erf 는 오차함수를 나타낸다.

하지만 실제로 대기 중 비례염분이나 조수간만대, 비말대에 위치한 해안가 콘크리트구조물의 경우 표면염소이온농도는 시간에 따라 변하게 되므로,¹³⁾ 표면염소이온농도를 시간에 따라 누적되는 함수의 형태로 두고 Fick의 제2법칙의 해를 구하여 적용하는 방법을 적용하는 경우도 있다(표 1). 또한 염소이온 확산계수를 시간에 따라 일정하게 가정하게 되면 실제 시멘트의 수화반응이 진행되면서 콘크리트 내부의 공극을 감소와 공극구조의 개선에 따라 확산계수가 감소하는 현상을 반영하지 못하기 때문에 확산계수를 과대평가하게 되는 문제가 있다. 이 때문에 최근에는 보다 합리적인 내구성 평가를 위해 확산계수의 시간에 따른 변동성을 고려하여 식 (2)를 보완한 모델이 적용되고 있으며(그림 4), 이러한 형태의 모델이 현재 개정 작업 중에 있는 우리나라 콘크리트 시방서 내구성편에 포함될 예정이다.

이상 식 (2)에 기초한 모델은 앞서 설명한 메조 모델에 해당한다고 볼 수 있다. 마이크로 모델은 식 (1)의 Fick 제2법칙 또는 확산 외에 수분의 이동과 공극의 포화도 변화까지 고려한 보다 개선된 침투방정식(식 (3))을 이용하고, 외부 환경조건의 변화와 재료물성의 변화를 모두 고려할 수 있도록 구성되는 것이 일반적이며, 유한요소법 또는 유한차분법을 적용하여 시간단계에

표 1. 표면 염소이온농도 변화를 고려한 염소이온 침투 해석모델¹⁴⁾

Cs functions	Solutions to Fick's 2nd law	References
Cs=constant	$C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$	Crank 1983 ¹⁵⁾
Cs(t)=k1t	$C(x,t) = k_1 t \left[\left(1 + \frac{x^2}{2Dt} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) - \left(\frac{x}{\sqrt{\pi Dt}} \right) e^{-x^2/4Dt} \right]$	Uji et al., 1990 ¹⁶⁾
Cs(t)=k2t ^{1/2}	$C(x,t) = k_2 \sqrt{t} \left[e^{-x^2/4Dt} - \left(\frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{Dt}} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \right]$	
Cs(t)= C0[1-e-γt]	$C(x,t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) - e^{\frac{x^2}{4Dt}} \operatorname{Re} [d^{-z^2} \operatorname{erfc}(-iz)] \right]$	Kassir et al. 2002 ¹⁷⁾
Cs(t)=a[ln(βt+ 1)]	$C(x,t) = \frac{2}{\pi} \int_{\frac{x}{2\sqrt{D}}}^{\infty} \left(t - \frac{x^2}{4Dw^2} \cdot e^{-w^2} \right) dw$	Song et al, 2006 ¹⁴⁾

따라 수치해석을 수행한다.

$$\frac{\partial(\phi S c_c)}{\partial t} = \nabla \cdot (D_c \nabla c_c - \phi S \vec{v}_l c_c) - Q_c \quad (3)$$

여기서 S는 공극의 포화도, φ는 공극율을 나타내며, c_c는 공극수에 녹아 있는 자유 염소이온 농도, \vec{v}_l 액체상(liquid phase) 즉 공극수의 이동속도를 나타낸다. Q_c는 자유염소이온의 손실율로 자유염소이온이 구속되어 손실되는 속도를 나타내는 항이다.

이와 같은 해석기법을 적용한 해석 프로그램으로 스웨덴 Chalmers 대학에서 개발된 ClinConc,¹⁸⁾ 미국콘크리트학회 내 구성 위원회의 주관 하에 개발된 Life-365,¹⁹⁾ 일본 동경대학의 DuCom²³⁾ 등이 있다. 특히 DuCom의 경우는 단순히 염소이온 침투 뿐 아니라 시멘트 수화반응에 따른 공극율과 미시공극구조 예측, 그리고 이에 따른 전달상수(확산계수 및 투수계수)의 산정에서부터 수분과 열의 이동과 이에 따른 콘크리트 수축과 균열의 영향, 이산화탄소의 이동과 반응에 의한 탄산화, 염해와 탄산화의 복합작용, 부식개시 이후의 부식반응과 이에 따른 부식균열의 발생, 부식에 의한 구조적 거동의 변화까지 모두 고려할 수 있는

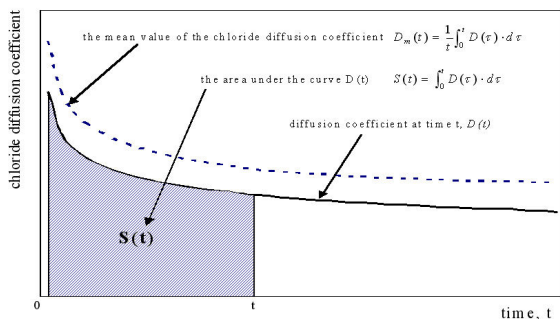


그림 4. 개선된 염소이온 확산계수 모델

다중 스케일 해석(multi-scale analysis)을 가능하게 한다<그림 5>. <그림 6>은 2차원의 염소이온 침투 해석결과의 예를 보여주고 있다.

3.2.2 탄산화 해석

콘크리트의 탄산화는 이산화탄소의 침투와 반응에 의해 발생하

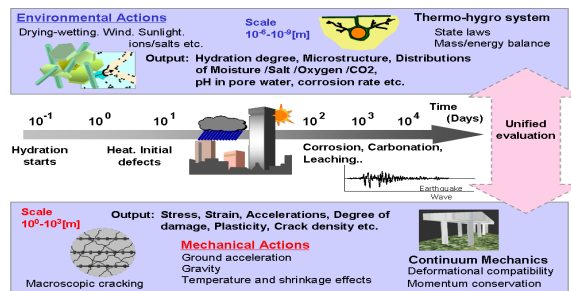


그림 5. 다중 스케일모델을 이용한 콘크리트구조물 성능평가 개념

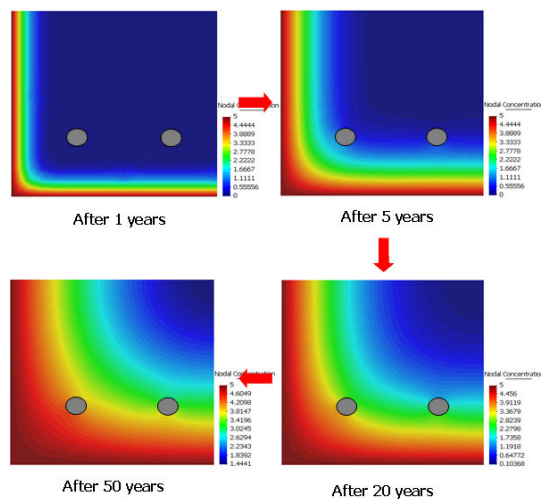
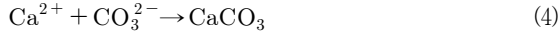


그림 6. 염소이온 침투해석 결과 예(우각부 2차원 해석)

며, 탄산화 화학반응을 간단하게 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.



여기서 칼슘이온은 주로 $Ca(OH)_2$ 가 용해되면서 생성된다. 기타 C-S-H, C_3S , C_2S 등도 칼슘이온의 생성과 탄산화 반응에 기여하지만 용해도가 $Ca(OH)_2$ 에 비해 매우 낮기 때문에 일반적으로 고려하지 않는다.

콘크리트 내에서 이산화탄소의 이동은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \phi[(1-S)c_{gCO_2} + S c_{dCO_2}]}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{gCO_2} \nabla c_{gCO_2} + D_{dCO_2} \nabla c_{dCO_2}) - Q_{CO_2} \quad (5)$$

여기서 c_{gCO_2} 와 c_{dCO_2} 는 각각 기체 CO_2 와 공극수에 녹아있는 CO_2 의 농도를 나타내고, D_{gCO_2} , D_{dCO_2} 는 각각의 확산계수를 나타낸다. 또한 Q_{CO_2} 는 탄산화 반응에 의한 CO_2 의 감소율을 나타내며, 식 (4)로부터 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{CO_2} = \frac{\partial c_{CaCO_3}}{\partial t} = k[Ca^{2+}][CO_3^{2-}] \quad (6)$$

여기서 상수 k 는 식 (4)의 화학반응 속도를 나타내는 평형상수이고, $[Ca^{2+}]$ 와 $[CO_3^{2-}]$ 는 각각 Ca^{2+} 와 CO_3^{2-} 의 농도를 나타낸다. 이온의 농도를 구하기 위해서는 각 이온의 생성과 소멸에 관여하는 화학반응으로부터 평형농도를 계산해야 하며, 각 이온의 이동을 고려해야 하므로 실제로는 식 (5)외에도 다양한 이온들의 이동과 반응속도를 동시에 모델링해야 한다.

위에서 설명한 모델을 이용하여 해석을 하자면 매우 복잡한 편미방정식을 풀어야 하기 때문에 실제 적용에는 어려움이 있는 게 사실이다. 탄산화에 의한 철근부식의 개시여부를 평가하기 위해서는 탄산화의 깊이가 중요하기 때문에 복잡한 모델을 구성하기 보다는 단순히 탄산화 깊이를 예측하는 모델을 적용해 볼 수 있다. Schiessl (1988)²⁴⁾에 따르면 탄산화 깊이를 x_c 라 할 때 다음과 같은 관계가 성립한다<그림 7 참조>.

$$x_c dx_c = D_{gCO_2} R_c dt \quad (7)$$

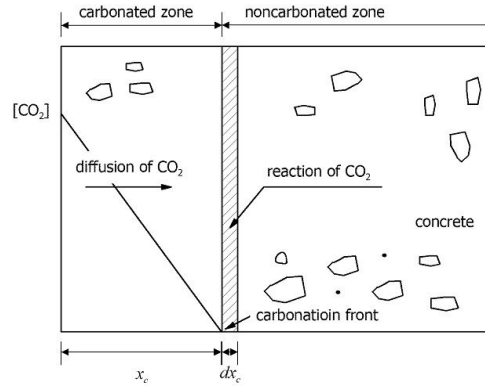


그림 7. 탄산화 깊이 모델의 개념도

여기서 R_c 는 CO_2 의 농도와 탄산화반응물질 농도의 비를 나타낸다.

식 (7)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_c dx_c &= d(1/2x_c^2) = D_{gCO_2} R_c dt \\ x_c^2 &= 2 \int_0^t D_{gCO_2} R_c d\tau = 2R_c \int_0^t D_{gCO_2} d\tau \\ \therefore x_c &= \sqrt{2R_c \int_0^t D_{gCO_2} d\tau} \end{aligned} \quad (8)$$

확산계수의 시간에 따른 변동성을 고려하여 다음과 같이 평균 확산계수 개념을 적용하면,

$$\overline{D_{gCO_2}} = \frac{1}{t} \int_0^t D_{gCO_2} d\tau$$

식 (8)은 다시 다음과 같이 단순화될 수 있다.

$$x_c = \sqrt{2R_c \overline{D_{gCO_2}} t} = k_c \sqrt{t} \quad (9)$$

식 (9)가 현재 설계기준에서 가장 일반적으로 적용되고 있는 모델의 형태이다. 여기서 상수 k_c 는 탄산화 속도상수로 식 (9)에서 알 수 있듯이 확산계수, 시멘트 조성 및 외부 CO_2 를 비롯하여 온도와 습도 등에 영향을 받는다. <그림 8>은 온도와 습도의 변화를 고려하여 시간에 따른 탄산화 깊이의 증가를 해석한 결과를 보여주고 있다.

3.2.3 염해와 탄산화 복합작용

탄산화가 발생하면 콘크리트의 물리적 특성이 변화하게 된다.

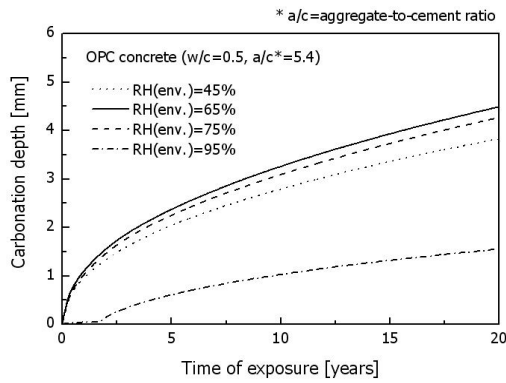


그림 8. 탄산화 깊이 해석결과와 예

따라서 탄산화와 염화가 복합적으로 작용하는 환경에서는 두 인자가 서로 상호영향을 미치게 된다. 탄산화에 의한 콘크리트의 물리적 특성변화를 요약하면 다음과 같다.

- 공극률의 감소
- 수분의 흡착력 감소
- (즉 동일 상대습도에서 자유 공극수의 감소)
- 탄산화된 수화생성물의 양에 비례하여 구축된 염화물 감소 (구속 염소이온이 해리되어 다시 자유염소이온으로 바뀌게 됨)

이러한 변화는 결국 표면에서의 자유 염소이온농도를 증가시켜 콘크리트 내부로 더 많은 염소이온이 침투하는 결과를 가져오게 되어 총 염소이온농도로 볼 때 탄산화 깊이 근처에서 가장 높은 총 염소이온농도를 나타내게 된다. <그림 9>는 탄산화된 콘크리트 내 염소이온의 이동 메커니즘을 보여주고 있다. 또 <그림 10>은 탄산화를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 염소이온 침투 프로파일과 열화정도를 비교하여 보여 주고 있다.

3.2.4 철근부식 해석

철근부식은 전기화학적 작용이기 때문에 염소이온 침투나 탄산화와는 달리 부식전지의 특징과 부식전위, 부식전류 등 전기화학적 작용에 대한 이해가 필요하다. 먼저 부식전지모델은 부식전지(cell)의 크기(양극과 음극의 거리)에 따라 매크로셀 부식과 마이크로셀 부식으로 구분할 수 있는데, 일반적으로 콘크리트 내부의 철근부식은 마이크로셀 부식으로 가정하는 경우가 많다. 마이크로 셀 부식으로 가정할 때, 양극과 음극의 거리가 매우 가깝기 때문에 부식반응에 관계하는 이온의 이동은 고려하지 않는다.

내구성 해석에서 중요한 것은 부식속도와 이에 따라 철근의 부피팽창을 예측하는 것이다. 부식속도는 패러데이(Faraday's) 법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{corr} = \frac{i_{corr} M_{Fe}}{z_{Fe} F} \quad (10)$$

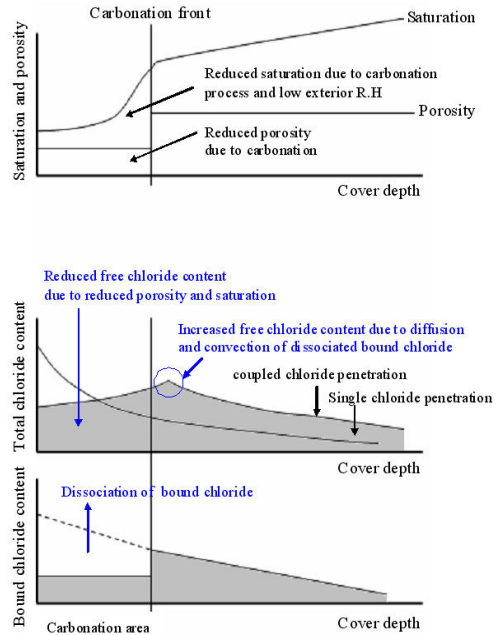


그림 9. 탄산화된 콘크리트에서의 염화물이온의 이동 메커니즘

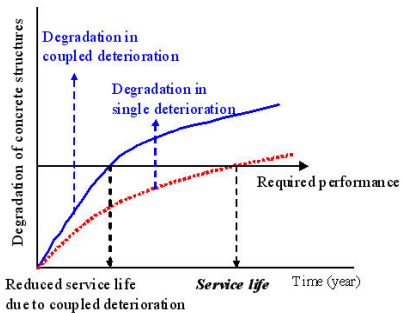
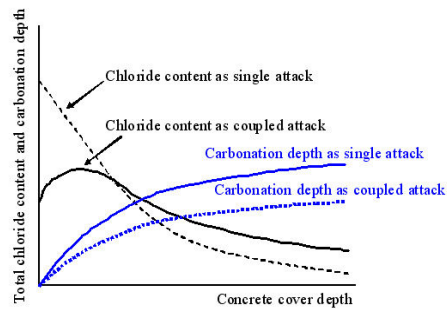


그림 10. 염화물 침투와 탄산화사이의 복합작용

여기서 i_{corr} 은 부식전류밀도(단위면적당 부식전류), M_{Fe} 는 철의 분자량, z_{Fe} 는 철의 이온가(=2), 그리고 F 는 패러데이 상수(=96,500C/equivalent)이다.

부식전류밀도는 <그림 11, 12>에 나타난 바와 같이 분극곡선

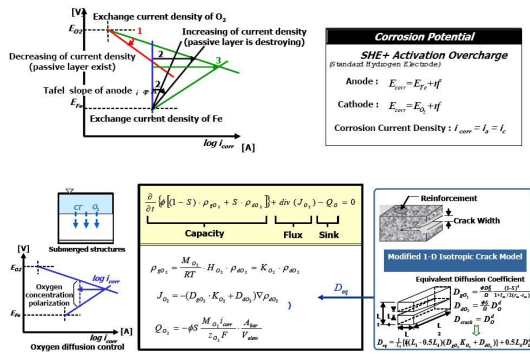


그림 11. 부식전류밀도와 산소환산 모델

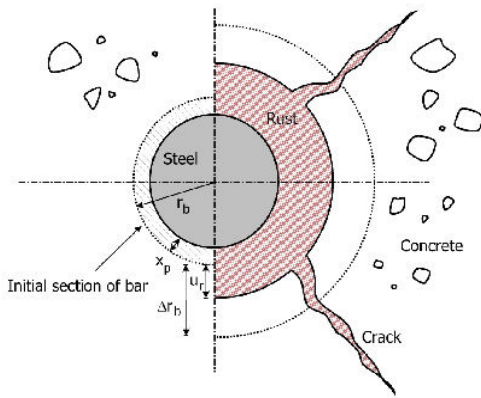
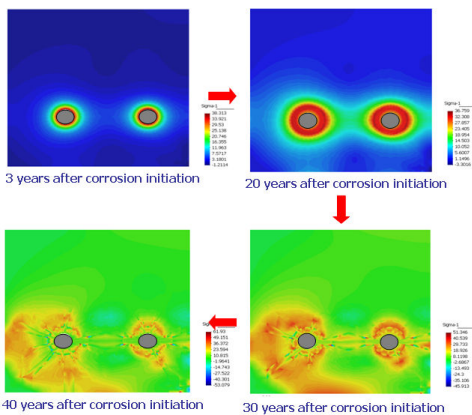
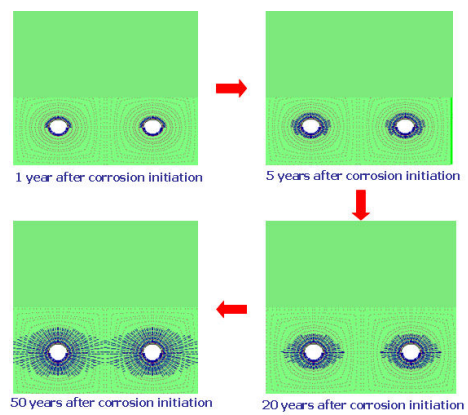


그림 12. 철근부식에 의한 팽창을 받는 콘크리트 해석모형

으로부터 Tafel 법칙에 의해 산정할 수 있는데, 분극곡선에 영향을 미치는 요소는 산소의 농도와 부동태층의 형성여부이다. 즉, 산소공급이 충분치 않은 경우, 부식속도는 산소의 공급속도가 지배하게 되고, 산소공급량이 충분할 경우 부식률은 부동태층의 형



(a) 콘크리트 내부의 팽창응력 분포



(b) 균열 진행 과정

그림 13. 철근부식에 의한 팽창응력과 균열진행과정 해석결과

표 2. 신뢰성 지수의 최소 권고값³²⁾

노출등급 (염화요인)	신뢰 등급	신뢰성 지수(β)	
		부식개시	구조적 붕괴
XC (Carbonation)	RC1	1.3 ($P_f=10^{-1}$)	3.7 ($P_f=10^{-4}$)
	RC2	1.3 ($P_f=10^{-1}$)	4.2 ($P_f=10^{-5}$)
	RC3	1.3 ($P_f=10^{-1}$)	4.4 ($P_f=10^{-6}$)
XD (Deicing salt)	RC1	1.3 ($P_f=10^{-1}$)	3.7 ($P_f=10^{-4}$)
	RC2	1.3 ($P_f=10^{-1}$)	4.2 ($P_f=10^{-5}$)
	RC3	1.3 ($P_f=10^{-1}$)	4.4 ($P_f=10^{-6}$)
XS (Seawater)	RC1	1.3 ($P_f=10^{-1}$)	3.7 ($P_f=10^{-4}$)
	RC2	1.3 ($P_f=10^{-1}$)	4.2 ($P_f=10^{-5}$)
	RC3	1.3 ($P_f=10^{-1}$)	4.4 ($P_f=10^{-6}$)

성, 공격수의 pH, 자유염화물 농도 등에 따라 조절된다. <그림 11, 12>는 DuCom²³⁾에서 적용된 부식셀모델과 산소환산모델의 개념을 보여주고 있다.

부식속도가 산정되면 부식에 의한 철근의 부피 팽창과 콘크리트 균열 발생과정은 간단한 해석모델을 통해 철근의 팽창과 이에 따른 균열 발생을 해석할 수 있다<그림 12>.²⁵⁾ 이 때 철근의 팽창은 시간에 따른 변위의 증가로 나타내는 경우도 있지만 실제로는 팽창압을 과대평가하는 결과를 낳게 된다. 따라서 부식량에 따른 팽창압을 정확히 추정하기 위해서는 부식생성물의 물리적 성질을 가정할 필요가 있다.^{25,26)} <그림 13>은 시간에 따른 팽창응력과 균열진행과정의 해석결과를 보여주고 있다.

3.3 추계학적 기법을 이용한 내구성 해석

확률적 개념이 도입되지 않은 기존의 결정론적 내구성 해석 기법^{3,10)} 등은 열화 관련 변수에 대한 변동성을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 확률적 개념이 도입된 추계

학적 내구성 해석 모델이 국내외 여러 연구자들에 의해 연구되고 있다.^{21,30,31)} 추계학적 해석 모델은 주변 환경의 정도, 열화 과정과 재료 특성의 변동성을 고려하기 위해 확률이론을 적용하는 해석방법이다. 이 방법의 기본개념은 구조물에서 시간에 대한 환경하중 $S(t)$ 과 이러한 환경하중에 대항하는 구조물의 열화에 대한 저항능력 $R(t)$ 이 확률 변수로서 시간에 따라 변동성을 가진다는 것이다. 내구적 한계상태함수 $g(t)$ 의 도입으로 구조물이 환경 하중에 견딜 수 있는 충분한 내구적 저항력을 갖는지의 여부를 통해 임의의 시간에서 구조물의 내구성을 판단할 수 있다.

$$g(t) = R(t) - S(t) \geq 0 \quad (11)$$

즉, 한계상태함수 $g(t)$ 가 0보다 작아지면, 구조물의 저항할 수 있는 성능보다 하중이 커지게 되어 구조물은 내구적 파괴에 이른다. 이러한 형태의 한계상태함수는 구조설계에 사용되는 극한한계상태(ULS)와 사용성 한계상태(SLS)와 유사하다. 극한한계상태는 중극의 한계상태와 관련되며, 이는 일반적인 구조물의 내하력 저하에 따른 구조적 파괴와 연관성이 크며, 극한한계상태에 도달하기 이전, 여러 단계의 사용성 한계상태를 거치게 된다. 예를 들어, 철근부식 문제에 있어서 부식진행단계에서 나타나는 여러 사용성 한계상태는 부식의 진행에 따른 최초의 녹 얼룩, 균열과 박리 등을 통해 나타나게 된다.

염해 환경 하에 노출된 콘크리트구조물의 추계학적 내구성 해석에서는 환경하중과 내구성능으로 표현되는 한계상태함수 $g(t)$ 를 통해 식 (11)과 같이 시간 t 에서 구조물이 내구적 한계상태에 도달할 확률을 계산할 수 있다.

$$P_{f,t} = \frac{n(g(t) < 0)}{N} = \frac{n(C_{lim} - C_d(t) < 0)}{N} = \Phi(-\beta_t) \quad (12)$$

여기서 $C_d(t)$ 는 시간 t 에서의 염소이온농도, $P_{f,t}$ 는 시간 t 에서 내구적 한계상태에 도달할 확률을 나타내며, N 은 전체표본개수, $n(g(t) < 0)$ 은 $g(t) < 0$ 을 만족하는 개수, Φ 는 표준정규분포함수, β_t 는 신뢰성 지수를 나타낸다.

문헌에 따르면, 염해와 탄산화에 대하여 부식개시 시점까지를 구조물의 내구성 한계상태로 보았을 때, 구조물의 내구수명은 사용 개시 후 내구적 파괴확률이 10%에 도달하였을 때로 정의되며³²⁾ <표 2>, 이는 신뢰성 지수 1.3에 해당하는 값을 의미한다. 파괴확률을 대신하여 신뢰성지수를 사용하여 내구수명을 예측하면, 시간의 경과에 따른 내구적 성능저하를 더 용이하게 파악할 수 있다. 따라서 구조물의 설계자가 최소 신뢰성 지수를 결정한 후에, 시간이 지남에 따라 요구되는 최소 신뢰성지수 보다 구조

물의 신뢰도가 떨어지는 시점, 즉 내구적 한계상태를 계산하면 구조물이 갖는 내구수명을 예측 할 수 있다. 이러한 추계학적 내구성 해석 기법을 적용한 구조물의 내구성 평가 흐름은 <그림 14>와 같다.

앞서 설명한 확률론적 내구성 해석 기법은 주로 메조 모델의 수준에서 적용되는 것이 일반적이지만, 최근에는 컴퓨터 연산속도의 비약적 발전에 기대어 유한요소해석과 확률론적 기법을 접목한 해석방법(Stochastic FEM)이 연구되고 있다.^{27,34)} 이런 방법으로는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 방법(Monte Carlo FEM, 이하 MCFEM)이나 Perturbation 기법을 적용한 유한요소 해석법 등이 있다. <그림 15>는 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 유한요소해석법의 해석절차를 나타내고 있으며, <그림 16>은 추계학적 유한요소해석 기법을 적용하여 제철염으로 인한 염소이온 침투 프로파일을 구한 예를 보여주고 있다.

4. 결 론

콘크리트는 적절한 재료를 선정하여 적절한 배합설계에 의한 시공을 하게 되면 좋은 내구성을 가지게 되지만 합리적으로 콘크

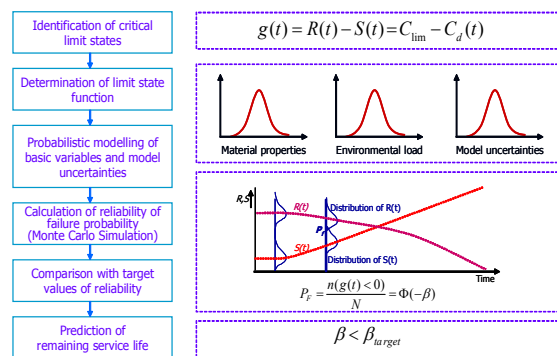


그림 14. 추계학적 내구성 해석 모델을 활용한 내구성 평가 흐름

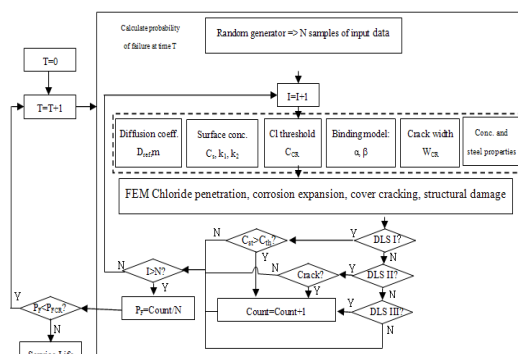


그림 15. 신뢰성 이론에 근거한 MCFEM의 내구성 해석 절차

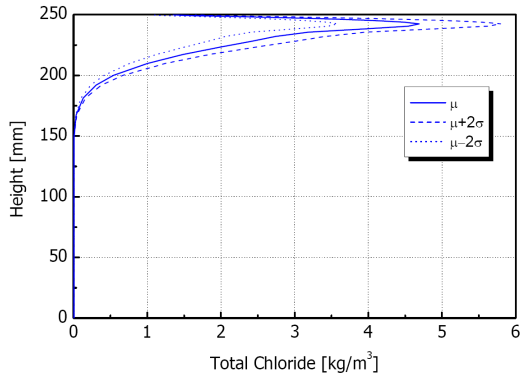


그림 16. 추가학적 유한요소해석 기법을 적용한 해석 예

리트구조물의 내구성을 평가할 기술이 없으면 콘크리트구조물의 고내구성을 만족하는 재료 및 설계조건으로 시공된다 할지라도 이에 대한 적절한 내구성능을 평가할 수가 없다. 또한 지금까지는 콘크리트구조물을 설계하는 경우에 구조적 설계는 과다하게 (over-designed), 내구성 설계는 상대적으로 과소하게 설계 (under-designed)되는 경향으로 콘크리트구조물의 조기열화, 안전성 위협 등의 사회적 문제로까지 확대되기도 하였으며, 그 원인중의 하나는 실제 장기내구성 측정 자료에 근거한 합리적인 내구성 해석 기법이 없었다는 점이다.

거제-가덕도 연결 도로나 인천대교 등의 목표내구수명 100년 이상의 구조물의 설계 사례에서 알 수 있듯이, 최근 구조물의 건설에 있어서 사회기반 시설에 대한 경제성 측면에서 VE(Value engineering)이나 LCC(Life cycle cost)에 대한 개념이 보편화되고 있을 뿐만 아니라, 지속가능한 개발이 중요한 사회적인 개발 이슈로서 대두되고 있다.

또한 연구 결과들에서 콘크리트구조물의 경우 내구성이 잘 고려되어 설계가 된 구조물은 이미 90%정도의 지속가능한 개발이 실현된 것으로 보고되고 있어 콘크리트구조물의 정확한 성능평가 및 예측을 위한 내구성 해석의 필요성이 더욱 강조되고 있음을 상기하여야 할 것이다.

앞에서 설명한 내구성 해석 기술로서의 다중스케일 모델은 시간적 다수준(초기재령에서 장기열화)과 공간적 다수준(미시공극 구조에서 거시적 대형 콘크리트구조물)에 근거하여 재료 과학적 거동, 재료역학 및 재료 공학적 거동, 구조적 거동 등을 통합한 성능평가 시스템의 구현에 그 초점을 두고 있다. 최근 들어 콘크리트 재료 및 환경인자에 대한 장기계측 자료들이 축적되어 보고되고 있으며, 이를 활용한 확률론적 기법을 내구성 해석에 적용하게 되면 콘크리트구조물의 사용 재료, 사용환경의 불확실성을 고려하여 보다 합리적인 내구수명의 평가가 가능해질 것으로 기대된다. □

참고문헌

1. ISO/TC59, *Buildings and Constructed Assets-Service Life Planning-Part 6: Guidelines for Considering Environmental Impacts*, SC14, DIS 15656-6, 2003.
2. Kroff, J. and Hilsdorf, H. K., *Performance Criteria for Concrete Durability*, Rilem Report 12, E&FN Spon, London, 1995.
3. 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서(내구성편), 한국콘크리트학회, 2004.
4. 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서(유지관리편), 한국콘크리트학회, 2004.
5. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2007.
6. ACI 318-05, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute, 2005.
7. 日本土木學會, *コンクリート標準示方書[施工編]*, 日本土木學會, 2003.
8. ICCMC, *Asian Concrete Model Code*, ICCMC, 2006.
9. ISO/TC71, *Performance and Assessment Requirements for Acceptance of National Standards for Structural Concrete*, SC4, DIS 19338, 2005.
10. 日本土木學會, *コンクリート標準示方書[構造型能照査編]*, 日本土木學會, 2002.
11. Comité Euro-International du Béton(CEB), *New Approach to Durability Design : An example for carbonation induced Corrosion*, CEB, 1997.
12. 송하원, “콘크리트구조물의 내구성능 설계의 도입배경 및 발전방향,” 콘크리트학회지, 18권, 4호, 2006, pp. 14 ~ 23.
13. Song, H. W., Lee, C. H., and Ann, K. Y., “Factors Influencing Chloride Transport in Concrete Structures Exposed to a Marine Environment,” *Cement and Concrete Composite*, Vol. 30, 2008, pp. 113 ~ 121.
14. Song, H. W., Pack, S. W., and Moon, J. S., “Durability Evaluation of Concrete Structures Exposed to Marine Environmental Focusing on a Chloride Build-up on Concrete Surface,” *Proceeding of the International Workshop on Life Cycle Management of Coastal Concrete Structures*, Nagaoka, Japan, 2006.
15. Crank, J., *The Mathematics of Diffusion. The Clarendon Press (2)*, Oxford, 1975.
16. Uji, K., Matsuoka, Y., and Maruya, T., “Formulation of an equation for surface chloride content of concrete due to permeation of chloride,” *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, Elsevier Applied Science, 1990, pp. 258 ~ 267.
17. Kassir, M. K. and Ghosn, M., “Chloride-Induced Corrosion of Reinforced Concrete Bridge Decks,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, 2002, pp. 139 ~ 143.

18. Tang, L., *Chloride Transport in Concrete*, Publication P-96:6, Division of Building Materials, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1996.
19. Thomas, M. D. and Bentz, E. C., *Life-365 Manual*, Silica Fume Association, 2001.
20. Maekawa, K., Chaube, R. P., and Kishi, T., *Modeling of Concrete Performance*, Spon Press, 1999.
21. DuraCrete Final Technical Report, *Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures*, Document BE95-1347/R17, European Brite-Euram Programme, 2000.
22. Ann, K. Y. and Song, H. W., "Chloride Threshold Level for Corrosion of Steel in Concrete," *Corrosion Science*, Vol. 49, 2007, pp. 4113 ~ 4133.
23. DuCOMS Engineering Korea, *Manual of DuCOM for Material Characteristics*, 2008.
24. Schiessl, P., *Corrosion of Steel in Concrete*, Rilem Report, Technical Committee 60-CSC, Rilem, Chapman & Hall, London, 1988.
25. Kim, K. H., Jang, S. Y., and Oh, B. H., "Modeling Mechanical Behavior of Reinforced Concrete due to Corrosion of Steel Bar," *ACI Materials Journal*, Submitted for Publication, 2007.
26. Lundgren, K., "Modeling Bond between Corroded Reinforcement and Concrete," *Proceeding of the Fourth International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Cachan, France, Vol. 1, 2001, pp. 247 ~ 254.
27. Song, H. W., Kim, H. J., Saraswathy, V., and Kim, T. H., "A Micro-Mechanics Based Corrosion Model for the Prediction of Service Life in Reinforced Concrete Structures," *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 2, 2007, pp. 341 ~ 354.
28. 권성준, 송하원, 변근주, "복합열화에 노출된 균열부 콘크리트 내의 염화물 침투 해석 기법에 대한 연구," 콘크리트학회 논문집, 19권, 3호, 2007, pp. 359 ~ 366.
29. 권성준, 송하원, 변근주, 이승훈, "균열을 가진 초기재령 콘크리트의 탄산화 해석," 대한토목학회 논문집, 24권, 5-A호, 2004, pp. 1011 ~ 1022.
30. ISO/TC98, *General Principles on the Design of Structures for Durability*, SC2, WD 13823, 2005.
31. Song, H. W., Pack, S. W., and Ann, K. Y., "Probability-Based Service Life Prediction of Fixed Link Bridge Exposed to a Marine Environment," *The 4th Civil Engineering Conference in the Asian Region*, Taipei, Taiwan, 2007.
32. CEB-FIP, *Model Code for Service Life Design*, the International Federation for Structural Concrete (fib), Task Group 5.6, 2006, pp. 38 ~ 39.
33. Song, H. W., Dao, N., and Lee, C. H., "Remaining Life Prediction of Concrete Structures Subjected to Chloride Induced Corrosion," *Proceeding of ASEM 08*, 2008.
34. Maekawa, K., Ishida, K., and Kishi, T., "Multiscale Modeling of Concrete Performance-Integrated Material and Structural Mechanics, Advanced Concrete Technology," *J. of Japan Concrete Institute*, Vol. 2, 2003.

2007년도 개정 콘크리트구조설계기준 해설

| 한국콘크리트학회 편 | 524쪽(A4변형) | ISBN 9788970863238 |
| 비회원 38,000원, 회원 30,500원 | 출판사 기문당 | 2008. 1. 5 개정판 발행 |

■ 소개

본서는 건축·토목 분야 전문가로 구성된 공동 연구위원회의 집필과 건설교통부 중앙건설기술심의 위원회의 심의를 거쳐 2007년도 개정된 통합 설계기준의 구체적 인 해설서이다.

