

리 열화인자(염해, 탄산화, 동결융해 등)로부터 건설될 콘크리트 구조물의 환경하중을 적절히 평가하여 내구성 설계를 수행하는 등의 철저한 대책을 수립하여야 한다.

콘크리트 구조물의 내구성이란 주어진 환경조건하에서 시간경과에 따른 내구적 성능저하, 즉 열화에 저항하는 성질을 뜻한다. 콘크리트 구조물의 내구성능은 시멘트풀이 경화되기 전에 유동 상태에 있는 타설 시공단계, 시멘트풀이 수화가 발생하는 초기 양생단계, 장기간에 걸친 환경작용하에서 여러 가지 외부 유해 인자가 콘크리트 내부로 이동하는 구조물의 공용단계 등, 전 생애주기(life cycle)에 관련이 있다^{13,16,19,29}. 또한, 재료 그 자체로서 콘크리트가 고내구성을 보유하고 있으나, 구조물로서의 콘크리트 구조물이 요구 내구성능을 만족하지 못할 수도 있다. 즉 내구성 설계란 콘크리트 구조물의 목표내구수명의 설정과 사용 기간 내에서의 구조물의 종합적인 내구성능을 보유하도록 하는 설계, 즉 주된 열화조건을 고려한 콘크리트 및 콘크리트 구조물의 내구성 설계 및 시공 전 내구성 평가까지도 포함한다. 구조물의 내구성 설계는 시공될 구조물이 목표내구수명기간 동안에 요구되는 내구성능을 확보하도록 하는 설계를 의미하며, 내구성 평가란 시공될 구조물이 목표내구수명기간 동안에 내구성능을 확보하는 것을 판단하기 위하여 수행하는 평가를 말한다^{3,20,21}.

본고에서는 콘크리트 구조물의 내구성 설계의 도입 배경 및 발전방향을 알아보기 위해서, 내구성 설계의 도입 배경을 포함한 내구성 규격의 역사를 살펴보고, 성능평가형 설계의 도입 배경 및 콘크리트 구조물의 내구성 설계 개념 및 방법을 살펴 본다. 또한 이를 근거로 최근에 적극적으로 도입되고 있는 성능평가형 내구성 설계 및 평가의 개념, 이에 따른 성능평가형 내구성 설계 절차, 그리고 내구성 설계 조사의 핵심내용으로서 내구성 평가 혹은 성능평가형 내구성 조사 시스템에 대해 소개한다.

2. 내구성 설계 도입배경

20세기 초 콘크리트 구조물에 관한 세계 각국의 기준 및 시방서가 본격적으로 도입되기 시작되었으나, 콘크리트 구조물의 내구성에 관련된 내용을 담은 규격, 즉 기준 및 시방서는 거의 개발되지 않았다. 예를 들어, 1910년대 세계 각국의 기준에서는 단지 주요재료인 시멘트, 골재 등과 양생에 대해 필요 요구 사항에 관하여 규정되었으며, 대부분의 규정은 콘크리트의 강도 차원에서 요구되는 규격만 다루어 졌다. 1960년대 들어서 시방서 요구사항에 최소피복두께, 최대 물-시멘트비, 최대균열폭등이 도입되었으나, 이 요구사항들은 여전히 콘크리트의 강도확보의 관점에서 규정된 것이었다. 20세기 중반 콘크리트 관련 규격에서 내구성에 대한 규정들이 서서히 도입되었으나, 대부분

내구성 관련 규정은 오랜 경험과 공학적이며, 직관적인 판단을 기초로 암시적으로 대략 50년의 일반적인 콘크리트 구조물의 사용수명을 만족하도록 도입 되어졌다. 최근 콘크리트 구조물의 내구성 향상 및 장수명화에 관한 관심이 집중됨에 따라 사회적으로 콘크리트 구조물의 내구성능에 대한 인식이 높아지고, 100년 이상의 사용수명을 요구하는 사회적인 기반 구조물로서의 콘크리트 구조물의 건설이 필요하게 되었고, 새로운 고성능 시멘트 및 혼화재료의 개발, 고내구성 콘크리트의 개발 등이 이루어 졌으나, 기존 기준을 사용 하여서는 내구성 설계를 할 수 없는 한계에 부딪치게 되었다. 이에 이러한 한계를 극복한 설계 방법의 개발이 시급히 요구되고 있는 실정이다.

1980년대 이후부터 발주자가 요구한 구조물의 성능에 근거하여 콘크리트 구조물을 설계하려는 세계적인 흐름과 설계방법, 사용재료 및 시공방법 등에 대한 가장 기본적으로 최소한의 품질 수준만을 규정하고 있는 소위 시방 혹은 사양 규정(prescriptive specification)만으로는 고내구성 콘크리트 구조물의 건설에 적절히 대응할 수 없다는 문제점이 제기됨에 따라, 최근 국제표준화기구, 유럽 및 아시아 지역 설계기준 작성 위원회를 포함한, 미국, 유럽각국 및 일본 등의 외국에서는 콘크리트 구조물의 요구 성능을 합리적으로 확보하기 위한 방안으로서 성능중심의 규격 즉 성능평가형 규정(performance based specification)의 도입을 본격적으로 하고 있다. 예를 들어, 콘크리트 관련 국제표준화기구(ISO) 규격을 제정하는 ISO TC 71(콘크리트, 철근콘크리트, 프리스트레스트콘크리트위원회)¹⁵과 Euro-code 및 EN규격을 제정하는 유로코드 제정위원회(CEN), 아시아 콘크리트모델코드(ACMC)를 제정하는 아시아 콘크리트 모델코드위원회(ICCMC)는 콘크리트 구조물 설계기준으로 성능 평가형 설계방법을 도입하고 있다^{11,12}. 또한 이웃나라 일본의 경우 1995년부터 준비를 시작하여 종래 사용해왔던 사양 규정형 시방서에서 성능조사형 시방서로의 시방서 개정작업을 지속적으로 수행하여²⁶⁻²⁸, 1999년에 제정된 시공에 대한 콘크리트 표준시방서 성능규정형 내구성편을 흡수하여 2002년에 콘크리트 표준시방서에서 내구성 설계를 포함한 구조설계에 성능평가형으로 설계 시방서를 개정하였다^{25,30}. 이와 관련하여 시공에 관련된 콘크리트 표준시방서도 성능규정으로 전환될 경우, 향후 레미콘의 발주에 있어서도 설계기준강도, 슬럼프, 굽은골재 최대치수 등만을 표시한 사양발주가 아닌 성능발주라는 새로운 개념의 발주시스템으로 변화할 것으로 예측되고 있다. 유럽각국도 1970년대 후반부터 콘크리트 구조물의 내구성을 확보하기 위하여 활발히 수행된 연구와 실적을 바탕으로 개발된 새로운 내구성 설계법인 DuraCrete 설계방법⁹ 등을 개발하였으며, 콘크리트 구조물의 내구성에 관해서는 본격적인 성능기

반형 설계방법을 사용하고 있다.

지금 국내에서 적용되고 있는 콘크리트 구조설계기준, 콘크리트 표준시방서, 철근콘크리트 구조계산규준, 토목공사 표준시방서, 건축공사 표준시방서 등의 규정은 사양 규정으로 이들 구조설계기준에서 콘크리트의 내구성 개념이 구조설계에 완전히 적용되지는 않았으나, 내구성 설계에 대한 시방규격을 설계기준에 포함하여 구조물이 위치한 환경조건 및 부위별 특성을 부분적으로 반영하도록 하고 있다^{1,2)}. 2004년에는 콘크리트 표준시방서 내구성편을 제정하여 시공이전에 내구성 평가를 일부 성능평가형 개념을 도입하여 수행하도록 하여, 내구성 평가 결과를 콘크리트 배합설계 및 콘크리트 구조물 구조설계에 반영하도록 하였다^{3,4,22)}. 콘크리트 사회기반구조물에 대한 설계에서 뿐만 아니라 공공주택에 대한 내구성 향상 대책의 일환으로서, 최근 건설교통부에서 공업화 주택성능 인증기준에 2006년부터 주택성능등급 표시 제도를 시행하도록 하여 내구성 설계에서도 보다 본격적인 성능평가형 내구성 설계기준 및 시방서의 도입 필요성이 시급히 대두되고 있다.

3. 성능평가형 설계의 도입배경

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 성능 목표를 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. 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 2 참조)^{11,15,16)}.

일반적으로 PBD에 따른 설계기준의 체계는 <그림 3>과 같다. 먼저 목적하는 바(objectives)를 기술하고, 요구하는 성능(functional requirements, performance requirements)을 기술 하며, 그 다음 그 성능을 검증하는 방법 또는 검증 적합한

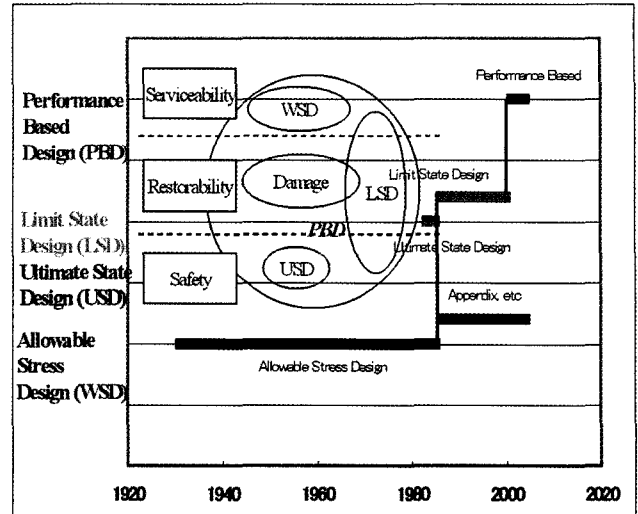


그림 2. 구조설계 개념의 변화 추이

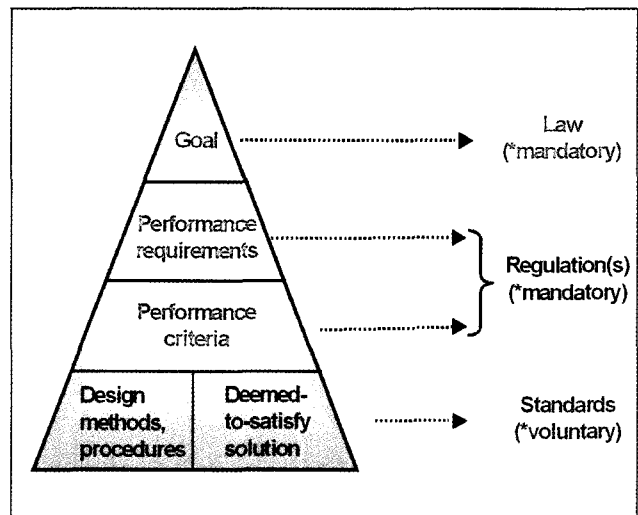


그림 3. 성능기반형 설계기준의 구조

사양(verification methods, accepted solutions) 순으로 기술되는 체계를 갖고 있다. 즉, PBD를 수행하기 위해서는 구조물의 목표성능이 정해져야 하며, 그 목표성능 달성을 위한 성능지표, 성능평가를 통해 성능을 예측하기 위한 계산방법, 시험방법 등이 준비되어야만 한다. 예를 들어 성능평가형 내구설계법을 이용하여 콘크리트 구조물의 내구설계를 실시할 경우에는 구조물의 목표내구성, 내구 성능지표, 내구 성능평가 방법, 열화 예측 방법, 성능계산 방법, 평가시험 방법 등이 준비 되어야만 한다. 즉, 성능평가형 내구성 설계란 구조물이 목표 내구 수명 기간동안에 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.

4. 내구성 설계방법

4.1 경험과 직관에 의한 사양설계(Level 1 design)

ACI, AASHTO, BS 및 Eurocodes같은 대부분의 기존 설계기준은 최소 콘크리트 피복두께, 최대 물-시멘트비, 최소 시멘트량, 허용 균열폭 등과 같은 제한 요소만을 고려한 "deemed-to-satisfy rules(만족할 만한 수준의 규정)"에 기초를 두고 있다⁵⁾. 이와 같은 기준에서 규정된 콘크리트 피복두께의 값은 시공성을 고려한 기술자의 직관 또는 경험으로 선정되며, 콘크리트 구조물의 부재 위치에 따른 상세한 미세 환경조건이 고려되지 않아 어떤 환경에서는 과소하여 부적절한 반면, 또 어떤 환경에서는 너무 과다한 설계가 된다. 일반적으로 대부분의 사양 설계기준은 규정이 지켜지면 묵시적으로 각각 50년(ACI, BS, Eurocodes)과 75년(AASHTO)으로 규정하고 있는 내구 수명이 달성되는 것으로 가정하고 있다. 하지만 각 설계기준에 있어서 목표 수명에 대한 어떠한 정의도 명시되어 있지 않고, 각 규정을 따를 경우 달성되는 내구수명을 구체화하기 위한 어느 정량적 자료도 없으며 대부분 각 설계사양들은 일반적으로 오랜 기간 축적된 경험에 근거하여 설정되었다^{10,20)}.

이러한 내구성 사양 설계기준의 단점은 열화조건을 고려한 환경 분류가 적절하지 못하다는 것으로. 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 다르다^{6,7)}. 물에 잠긴 수중구간, 대기에 노출된 대기구간, 그리고 비말대 구간간의 열화 물질(염소이온)의 침투 속도의 차이는 매우 크다. 또한 해중 침매터널을 예로 들면, 산소가 거의 존재하지 않으면서 영구적으로 바닷물과 접촉하는 침매터널의 바깥쪽과 비교하여 터널의 안쪽은 건조된 표면근처에 용해된 물질(특히 염화물)의 축적에 의하여 부식의 위험이 더 크며 차량 주행에 따른 탄산화의 영향도 무시할 수 없으며, 터널 내부 및 외부에서의 환경적 특성의 차이도 현저하다. 게다가 기존 기준이나 시방서에서는 설계 수명과 관련이 있는 콘크리트의 초기 품질에 대한 시험 방법 혹은 초기 품질 확보에 대한 평가방법이 규정되어 있지 않다는 단점도 존재한다.

4.2 계산에 근거한 결정론적 설계(Level 2 design)

기존의 전형적인 내구성 설계에서 정량적인 내구성에 대한 고려가 부족하다는 사실을 바탕으로 내구성 설계가 콘크리트의 열화와 철근의 부식 그리고 이들 간의 상호작용을 지배하는 메커니즘을 규명하여 이를 이용하도록 변경되었다. 이는 특히 여

러 열화물질의 확산특성을 규명하여 콘크리트 자체의 수밀성을 결정짓는 배합의 종류와 콘크리트의 품질 등의 결정에 활용하도록 시도 되었다. 즉, 이러한 콘크리트 구조물에 대한 내구성 설계의 변화 및 발전은 콘크리트 구조물 내에서 일어나는 전달 메커니즘과 열화 메커니즘을 보다 정량적으로 이해하게 됨으로써 가능해졌다. 다양한 열화 메커니즘의 대부분은 주위 환경으로부터 콘크리트 내부로 침투한 여러 열화 물질(염소이온, 이산화탄소 등)들에 의하여 좌우된다. 이러한 물질들은 시간경과에 따라 그 농도가 증가하여 피복 콘크리트 층에 축적되거나 내부 철근쪽으로 이동하고, 내부 철근을 부식환경에 놓이게 하여 철근의 부식 팽창압을 발생시킴으로써 피복 콘크리트에 박리, 박락으로 인한 균열을 유발하며, 이에 따른 부식가속화를 야기시키고, 이를 방지하는 경우에는 중공에 구조물의 내하력 저하에 따른 붕괴를 일으킬 수 있다. 그러므로 콘크리트 구조물에 발생하는 열화는 열화물질 전달 메커니즘과 콘크리트나 철근 위치에서의 열화물질의 축적, 이동에 관련된 열화 메커니즘의 유발의 결합된 효과에 의하여 나타난다. 많은 연구자들이 최근 수십년간 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 확산되어 적용되고 있다(그림 4 참조)¹⁴⁾. 이를 기초로 한 내구성 설계 방법은 1) 외부환경의 열화에 대한 확인 및 정량화 2) 콘크리트와 철근에 대한 재료 변수 모델링 3) 콘크리트 내부 또는 내부로의 침입 물질의 전달에 대한 모델링 4) 열화과정에 대한 수학적 모델링의 순서로 수행된다. 이러한 새로운 방법에 기초한 내구성 설계 방법은 확률론적 기반의 반영여부에 따라 두 가지 다른 수준 (Level 2와 Level 3)으로 나눌 수 있다. Level 2는 예를 들어 ACI의 사용수명 예측 프로그램

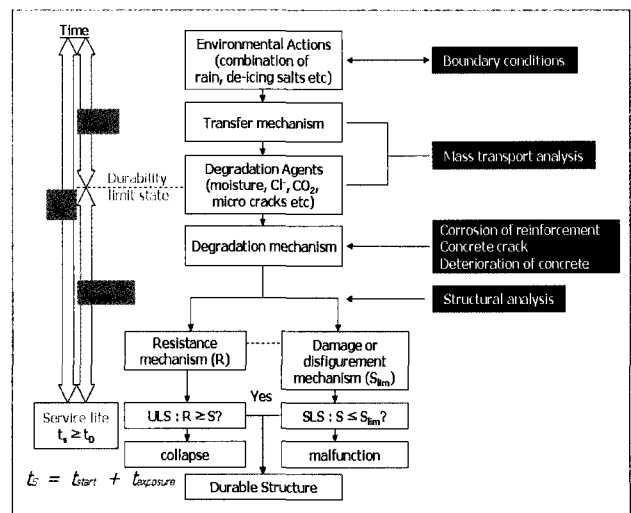


그림 4. 전달 및 열화 메커니즘과 내구성 한계상태(ISO/Wd 13823)

표 1. 수준별 내구성 설계 방법

	Level 1 사양설계	Level 2 결정론적 설계	Level 3 확률론적 설계
기본	경험과 직관	비확률론적 계산	확률론적 계산
설계 결과	반드시 만족해야 하는 사양 (최소피복, 최대 물/시멘트 비 등)	수행(열화 메커니즘)을 기초로 한 설계 (수명, 내구적 파괴 확률, 최소 피복 두께, 최대 염화물 확산계수, 최소 탄산화 속도계수 등)	상세한 환경 분류 (예, 수중구간, 대기구간, 비말대구간 등)
환경 분류	불충분한 환경 분류	상세하지 못한 환경 분류	상세한 환경 분류 (예, 수중구간, 대기구간, 비말대구간 등)
열화 모델	전달 및 열화 모델 없음	전달 및 열화 메커니즘에 대한 수학적 모델화	전달 및 열화 메커니즘에 대한 수학적 모델화
콘크리트 특성	실제 콘크리트 특성과는 무관	이론적인 콘크리트 특성에 기초(콘크리트 배합 에 근거한 이론적인 염화물 이온 확산계수)	실제 콘크리트 특성에 기초(콘크리트 실험에서 얻은 실제 염화물 이온 확산계수)
설계 기준에	ACI ⁵⁾ , AASHTO, BS, Eurocodes	Life 365 ²⁴⁾	DuraCrete ⁹⁾

램(Life 365)을 적용하여 내구성 염해설계를 수행하는 것과 같이 확률 개념이 도입되지 않은 결정론적인 방법이다²⁴⁾.

4.3 신뢰성 이론에 근거한 확률론적 설계(Level 3 design)

확률적 개념이 도입되지 않은 결정론적 설계법으로 내구성 설계를 수행하는 Level 2의 설계방법과는 달리 Level 3의 내구성 설계는 주변환경의 정도, 열화 과정과 재료 특성의 확률론적 현상을 고려한 통계학적 이론을 기초로 하는 확률론적 설계 방법이다. 이 방법은 확률 또는 신뢰성을 기초로 하는 내구 수명 설계방법으로 한계상태설계법(LSD), 하중저항계수설계법(LRFD) 등으로 대표되는 확률론적 구조 설계 방법론과 기본적인 개념이 동일하다. 즉, 하중에 대한 구조물 설계 기준과 유사하게, 설계 수명에 대하여 내구적 안전조건과 한계 상태가 정의된다.

위에서 설명한 3개 수준의 내구성 설계 방법을 비교하면 <표 1>과 같다. 특히 확률론적 내구성설계는 PBD에 가장 근접한 설계방법으로 구조물의 환경특성을 미세(micro)하게 접근할 수 있다. 구조물의 미세환경(micro climate)특성은 구조요소의 특정 표면에서 강우 노출여부, 태양 노출여부 및 흙, 지하수, 해수 등에 대한 접촉여부 등을 구체적으로 고려하는 것으로서, 구조물 각 부위에 있어서 콘크리트 표면의 환경조건을 고려하여 콘크리트가 목표내구수명까지 소요의 성능을 유지할 수 있는가에 대하여 검증해야한다. 성능평가형 내구설계법을 이용하여 콘크리트 구조물의 내구설계를 실시할 경우에는 성능평가형 내구설계법의 최종목적인 "콘크리트 구조물의 목표내구수명 동안 외부의 열화요인에 대하여 콘크리트 구조물이 소요의 내구성능의 유지"토록 하기 위해 단계별 검증과정이 필요하며, 이때 구조물의 거동 예측 모델은 크게 1) 마이크로 모델(micro model: material science level), 2) 메조 모델(mezo model: material engineering level), 3) 매크로 모델(macro model: structural engineering level) 등 3종류로 분류된다.

5. 성능평가형 내구성 설계 및 평가

5.1 콘크리트 구조물의 목표내구수명

콘크리트 구조물은 준공 시에 어느 정도 이상의 내구성능을 갖고 있지만, 이는 주변의 환경하중의 영향 때문에 시간이 지남에 따라 저하한다. 이 때문에 콘크리트 구조물은 일정한 내구수명을 갖게 되고 이러한 내구수명이 목표내구수명보다 작게 되면 구조물에 있어서 사용기간내에 소위 내구적 파괴가 발생한다고 할수 있다. 그러므로 사용기간내에 구조물의 내구적 파괴를 방지하기 위해서 콘크리트 구조물의 내구성 설계시에 구조물의 경제적 사회적 중요도에 따라 그에 적합한 목표내구수명을 설정하는 것이 사용기간동안 구조물의 내구성 확보에 있어서 중요한 첫걸음이 된다. 일반적으로 콘크리트 구조물의 목표내구수명은 구조물의 사용에 지장이 있는 내구적 한계상태에 도달하기까지의 기간으로 물리적 내구한계, 사회적 내구한계로 구분할 수 있다. 물리적 한계는 다수의 부재가 보수·보강을 필요로 하는 수준까지 열화 되고 구조물 외부에서 철근 부식에 의한 균열이나 피복 콘크리트가 박락한 상태이다. 사회적 내구수명은 경제성과 구조물의 중요성에 따라 결정된다. 콘크리트 구조물의 목표내구수명은 일반적으로 경제·사회적 조건으로부터 설정한다. 사회적 조건으로는 구조물이 국가적 프로젝트와 관련된 구조물인지의 여부, 구조물이 붕괴하였을 때 인명에 어느 정도 중대한 피해를 발생시키는 지에 대한 사항을 포함한다. 또한, 경제적 조건으로는 구조물에 손상이 가해졌을 때 보수·보강으로 인한 경제적 손실정도 등이며, 이러한 사항들이 목표내구수명 설정에 있어서 기본적인 고려사항이 될 수 있다.

현재 제정된 콘크리트 표준시방서의 「내구성편」에서는 콘크리트 구조물의 시공이전에 수행할 내구성 평가의 표준을 위

표 2. 콘크리트 구조물의 목표내구수명에 따른 내구등급³⁾

구조물 내구등급	구조물의 내용	목표 내구수명
1등급	특히 높은 내구성이 요구되는 구조물	100년
2등급	높은 내구성이 요구되는 구조물	65년
3등급	비교적 낮은 내구성이 요구되는 구조물	30년

한 평가 원칙, 콘크리트 및 콘크리트 구조물에 대한 내구성 평가 방법, 콘크리트 구조물에 발생할 수 있는 균열에 대해 시공 이전 단계에서의 균열 평가 방법에 대한 일반적이고 기본적인 표준을 규정하면서, 일반적인 콘크리트 구조물의 목표내구수명을 구조물을 특별한 유지관리 없이 일상적인 유지관리 하에서 내구적 한계상태에 도달하기까지의 기간으로 정하였다. 콘크리트 구조물의 내구등급 결정은 구조물의 설계시에 설정된 콘크리트 구조물의 목표 내구수명에 따라 <표 2>와 같다.

5.2 내구적 파괴확률 및 신뢰성지수

PBD에 가장 근접한 확률론적 내구적 설계방법은 환경 하중, 열화 과정과 재료적 성질 등을 확률론적 접근을 통하여 다루고 있다. 성능평가형 내구성 설계 방법의 기본개념은 구조물에서 시간에 대한 환경 하중 $S(t)$ 의 존재이다. 구조물은 이러한 환경 하중에 대항하는 구조물의 열화에 대한 저항능력 $R(t)$ 를 가지며, 이들은 확률 변수와 시간에 따라 변한다. 내구적 한계상태 함수 $G(t)$ 의 도입 (식(1))으로 구조물이 환경 하중에 견딜 수 있는 충분한 내구적 저항력을 갖는지의 여부를 통해 임의의 시간에서 구조물의 내구성을 판단할 수 있다.

$$G(t) = R(t) - S(t) \geq 0 \quad (1)$$

즉, 한계상태함수 $G(t)$ 가 0보다 작아지면, 구조물의 저항할 수 있는 성능보다 하중이 커지게 되어 구조물은 내구적 파괴에 이른다. 이러한 형태의 한계상태함수는 구조설계에 사용되는 한 한계상태(ULS)와 사용성한계상태(SLS)와 유사하다. 극한한계상태는 종국한계상태와 관련되며, 이는 일반적인 구조물의 내하력 저하에 따른 구조적 파괴와 연관성이 크며, 극한한계상태에 도달하기 이전, 여러 단계의 사용성한계상태를 거치게 된다. 예를

들어, 부식진행단계에서 여러 사용성한계상태는 부식의 진행에 따른 최초의 녹 얼룩, 균열과 박리 등을 통해 나타나게 된다.

한계상태함수에 대한 확률론적 설계는 하중에 대항하는 저항 성능 $R(t)$ 와 하중 $S(t)$ 값이 모두 확률변수이므로, 한계상태함수 $G(t)$ 에 대해 확률적으로 신뢰할 수 있는 결과치를 제공한다. 내구수명예측에서 신뢰할만한 특정 한계상태의 파괴확률은 일반적으로 신뢰성지수(β)로 표현된다. 확률밀도함수에서 신뢰성지수는 평균값과 편차에 대한 계산으로 결정되며 한계상태함수에서 한계값에 대한 파괴확률과 신뢰성지수 사이의 관계는 <그림 5>와 <표 3>에서 보는 바와 같이 주어진 신뢰성지수에 대해 파괴확률은 확률밀도곡선 아래의 면적으로 주어진다¹⁰⁾.

파괴확률을 대신하여 신뢰성지수를 사용하여 내구수명을 예측하면, <그림 6>에서 보는 바와 같이 시간의 경과에 따른 내구적 성능저하를 더 쉽게 알 수 있다. 따라서 구조물의 설계자가 최소 신뢰성지수를 결정한 후에, 시간이 지남에 따라 요구되는 최소 신뢰성지수 아래로 신뢰도가 떨어지는 시점, 즉 내구적 한계상태를 계산하면 구조물이 갖는 내구수명을 예측 할 수 있다.

5.3 내구성 한계상태

콘크리트 구조물의 한계상태는 내구성 설계 및 평가를 위해 고려되어야 한다. 콘크리트 구조물의 내구성 한계상태(durability limit state)란 <그림 4>에서와 같이 주된 열화의 개시가 일어나는 한계 상태이다. 이때, 구조물의 사용수명 t_s 는 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

표 3. 신뢰성지수와 파괴확률의 관계(정규분포의 경우)

신뢰성지수(β)	3.60	3.00	2.00	1.80	1.64	1.50	1.28	0.00
파괴확률(%)	0.02	0.14	2.28	3.59	5.00	6.68	10.00	50.00

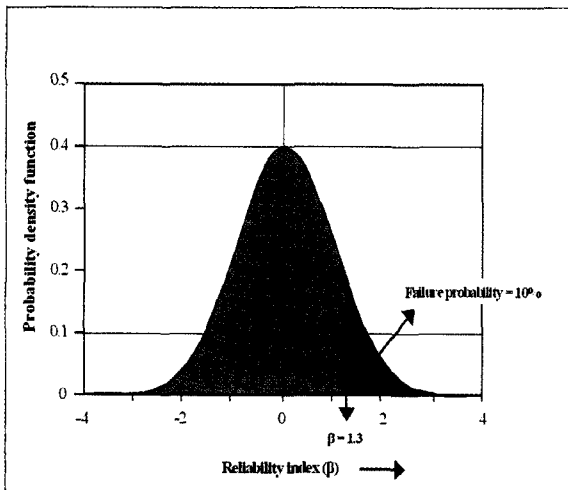


그림 5. 확률밀도함수와 신뢰성지수의 관계

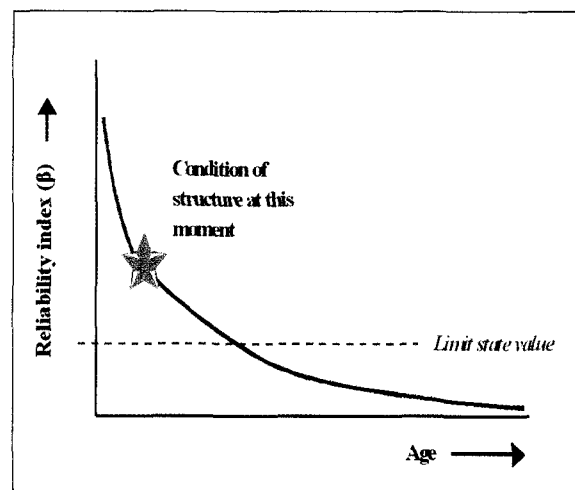


그림 6. 시간에 따른 신뢰성지수의 변화

$$t_s = t_{start} + t_{exposure} \quad (2)$$

여기서, t_{start} 는 열화 개시시기이며, $t_{exposure}$ 는 열화 개시 후 계속된 노출환경의 작용으로 열화의 가속화 및 손상이 발생하여 사용성, 더 나아가서는 안전능력이 감소하는 시기를 나타낸다. 내구성 한계상태는 <그림 4>에서와 같이 열화 개시시기 (t_{start})로 콘크리트 구조물내의 주된 열화가 개시되는 시점을 나타내며, 염해의 경우 철근에 부식이 시작되는 시기를 나타낸다. 예측된 구조물의 내구수명 t_s 는 설계내구수명 또는 목표내구수명 t_D 보다 크도록 설계해야 하며, 내구성 설계절차로서 기본적인 내구성능의 검토는 다음의 두 가지 형태로 구분된다.

- 1) 사용수명법에 의하면, 구조물의 설계내구수명 t_D 를 결정하기 위해서 구조물의 내구수명 t_s 를 예측하고, 식(3)과 같이 목표 신뢰도에 따라 구조물의 내구성을 검토한다.

$$P\{t_s \leq t_D\} \leq P_{target} \quad (3)$$

여기서, t_D 는 구조물의 설계내구수명, P_{target} 은 구조물의 목표 파괴확률을 나타낸다.

- 2) 한계상태법에 의하면, 설계내구수명에서 구조물의 저항능이 환경하중을 초과하는지에 대한 검토가 필요하며 내구성 한계상태에 대한 기본적인 설계 요구치는 식(1) 또는 식(4)와 같다.

$$R(t) \geq S(t) \quad (4)$$

여기서, $R(t)$ 는 시간 t 에서의 구조물의 저항성능이고 $S(t)$ 는 외부 환경하중을 나타낸다.

식(4)에서의 설계 요구치를 만족시키기 위하여 식(5)를 통해 목표 신뢰도를 검토한다.

$$P_f(t) = P\{R(t) - S(t) < 0\} \leq P_{target} \quad (5)$$

여기서, $R(t)$ 와 $S(t)$ 를 <그림 7>에 나타내었다. 한계상태에 대한 구조물의 내구적 파괴확률($P_f(t)$)는 $R(t)$ 와 $S(t)$ 에 대한 각각의 확률밀도함수가 겹치는 영역을 의미하며, $P_f(t)$ 는 P_{target} 을 초과해서는 안된다.

5.4 성능기반형 내구성 설계 절차

주어진 열화 환경 하에서 콘크리트 구조물의 내구성 설계를 수행하는 경우 환경조건은 노출 환경의 특성에 따라 미시환경

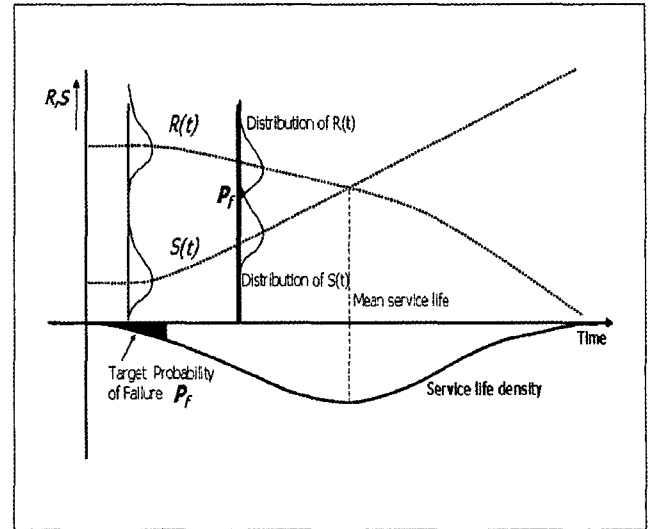


그림 7. 사용수명 예측을 위한 수학적 모델(ISO/WD 13823)

구간으로 분류하여야 한다. 즉 해안지역에 건설되는 콘크리트 교량의 경우를 예로 들면, 수중구간, 비탈대구간, 대기구간 등으로 분류하여야 하며, 각 노출구간별로 주탑, 교각, 교대 등으로 세분하여 설계를 수행한다. 구조물의 사용기간 동안의 한계상태함수는 식(1)과 같고, 대상구조물의 파괴확률은 신뢰성 해석을 위해 식(6)과 같이 표현될 수 있다.

$$P_f = P\{G(t) < 0\} < P_{target} = \Phi(-\beta_{target}) \quad (6)$$

여기서, P_f 는 시간 t 에서 내구성 한계상태에 도달할 확률, ϕ 는 표준정규분포 함수, β_{target} 은 목표신뢰성지수를 의미한다.

성능기반형 내구성 설계의 기본조건은 “대상구조물은 목표내구수명내에 적절한 신뢰성 범위 내에서 구조물이 설계시 설정된 내구적 한계상태에 도달하지 않아야 한다”는 것이다. 성능기반형 내구성 설계 방법을 근거로 한 구체적 내구성 설계 절차는 <표 4>와 같다⁹⁾. 이러한 내구성 설계절차를 통해, 내구설계의 주요설계변수를 도출할 수 있다. 염해의 경우를 예로 들면, 설계 4단계에서 목표신뢰도 설정에 따른 확률론적 해석으로부터, 최대 염화물이온 확산계수, 최소 피복두께 등이 결정되며, 피복두께가 구조계산을 통해 결정된 경우에는 최대 염화물이온 확산계수를 만족하도록 사용콘크리트의 구조물의 구체적인 배합 설계 조건(물-결합재비, 혼화재 혼입률 등)을 결정할 수 있다.

한편, 한계상태의 설정을 예로 들면, 설계 1단계는 염해의 경우 철근부식 한계상태의 설정으로, 철근 부식을 발생시키는 임계염소이온농도(C_{cr} 혹은 CTH)의 설정은 <그림 8>과 같이 구조물이 위치한 미세 환경조건의 변화 등을 고려하여 설정하는 것이 바람직하다.

표 4. 성능기반형 내구성 설계 절차

단계	설계 항목	설계 내용(염해의 경우(DuraCrete) ⁹⁾)
1	한계상태의 설정	$C(x,t) \geq C_{cr}$ $C(x,t)$: 예측염소이온농도, C_{cr} : 임계염소이온농도
2	열화모델의 선택	$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i) \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{k_c D_d t}}\right)\right)$
3	확률변수의 정량화	확률변수의 변동특성을 고려하여 정량화
4	목표신뢰도 설정에 따른 확률론적 해석 및 설계치 도출	설정된 목표신뢰도(내구적 파괴확률 P_f 또는 신뢰성지수 β) 범위내에서 구조물의 구체적인 설계조건(물-결합재비, 혼화제 혼입율 등)을 도출, $P\{C_{cr} - C(x,t) < 0\}_t \leq P_{target}$

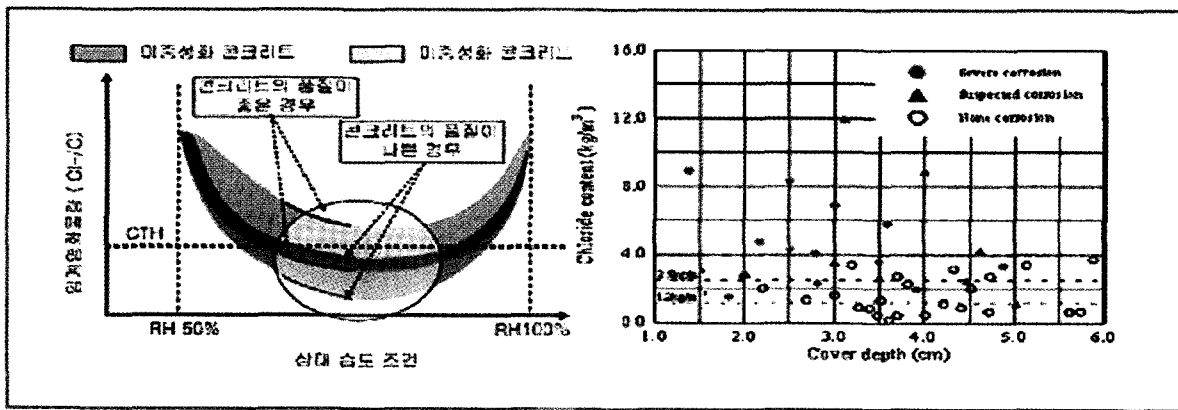


그림 8. 환경조건에 따른 임계염소이온농도의 변화

6. 성능평가형 내구성 설계의 핵심

내구성 성능설계의 핵심중 하나는 내구성 설계에 따라 수행 되어 시공될 구조물이 주어진 환경조건하에서 목표내구 수명을 보유하는가에 대한 조사, 검증하는 방법을 확립하는 것이다. 즉, 구조물이 주어진 환경조건하에서 보유하고 있는 내구성을 평가, 예측하기 위한 신뢰 가능한 계산방법, 내구성 평가 시스템 혹은 신뢰할만한 시험방법을 확립하는 것이다. 이러한 내구성 평가 시스템을 이용하여 계산 또는 컴퓨터 시뮬레이션을 실시해 요구되는 내구성 이하로 열화가 발생하지 않도록 콘크리트 구조물의 설계치를 정하는데 사용 될 수 있어야 한다^{8,23)}. 최근에 다중 스케일모델(multi-scaling model)에 기초하여 컴퓨터 연산속도가 비약적으로 발전해 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 내구 성능저하 즉 열화의 예측이 가능하게 되었다. 여기서 다중 스케일모델이란, 평가, 예측하려는 대상 구조물의 스케일과 환경조건, 역학적 거동모델을 공간스케일과 시간스케일의 크기의 관점으로 마이크로 모델, 메조 모델, 매크로 모델을 혼합하여 구성된다. 즉, 설계된 콘크리트 구조물의 목적하는 내구수명을 확보하고 있는 가를 성능조사하기 위해서는 시간과 공간에 대한 다중 스케일모델을 사용하여 초기재령 콘크리트의 거동해석과 장기적인 열화에 대한 열화거동과의 연성 해석이 필요하다. 예를 들면 콘크리트의 염해 및 탄산화에 관한 내구성 설계에

대한 성능조사의 방법으로 수행하는 장기 열화거동 해석에서는 수화반응, 미세공극구조형성, 열과 수분이동 그리고 이온의 확산침투와 같은 다양한 초기 재령 거동 특성¹⁷⁾에 대해 모두 고려하여야 하며, 경우에 따라서는 시공시 발생한 균열의 영향 및 염해와 탄산화, 동해, 화학적 침식등과의 복합열화의 영향 등을 고려해야 한다(그림 9 참조). 이런 검증된 다중스케일 내구성 조사방법은 현 콘크리트 표준시방서의 내구성편에서 요구하는 콘크리트 구조물의 시공 전 내구성평가에 사용될 수 있는 성능평가 도구로서 적절하게 사용될 수 있다.

PBD는 각 단계에 있어서 목표성능 지표를 순차적으로 만족 하도록 진행되지만 모델의 스케일 레벨에 따라 그 조사 시점은 다르게 된다. 예를 들면, 마이크로모델에 의한 성능예측을 하는 경우, 시멘트의 수화반응 모델 등을 이용한 콘크리트의 온도분포 및 온도균열예측, 즉 수화거동 및 자기수축예측 등을 통하여 목표성능 지표인 초기재령에서의 균열의 발생여부 등을 확인하는 것이 성능조사의 기점이 된다. 또한, 이러한 마이크로 모델은 변형해석, 응력해석 등의 단계를 거쳐 수축균열, 손상의 발생예측과 검증의 조사과정으로 진행된다. 또한, 이러한 다른 다중 스케일모델링 기법은 <그림 10>에 나타난 바와 같이 시간적 마이크로 스케일단계인 초기재령 콘크리트의 거동 모델링과 공간적 마이크로 스케일 단계인 미세공극구조의 형성, 수분 및 열의 이동모델링으로부터 해석을 시작하여 공간적 매크

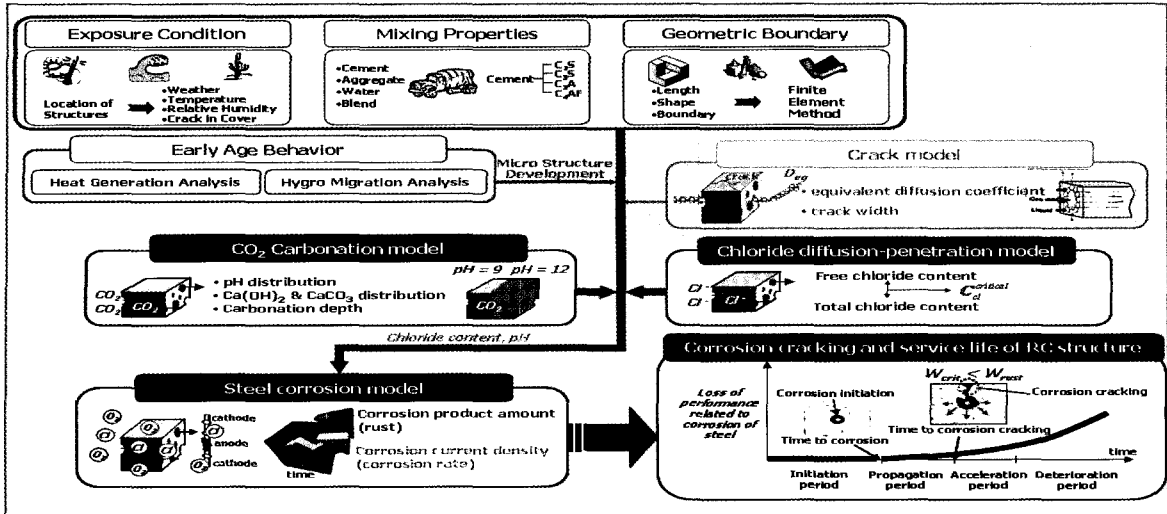


그림 9. 다중스케일 내구성 평가 시스템

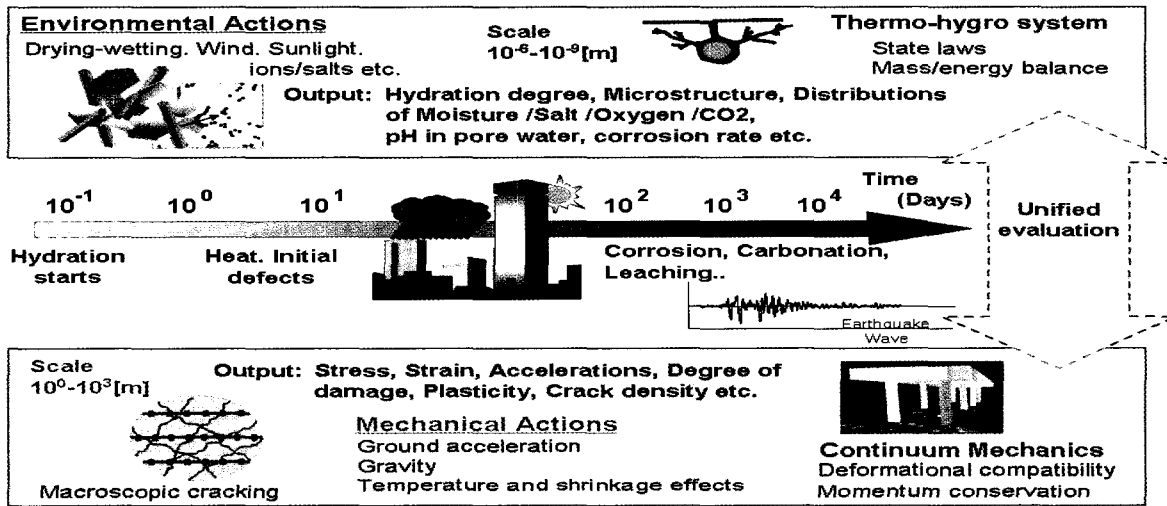


그림 10. 다중스케일링 모델링 방법을 이용한 콘크리트 구조물 성능평가 시뮬레이터

로 단계인 연속체적 구조물의 소성, 손상, 파괴 역학적 거동을 모델링하여 안전성능 해석을 가능 하도록 하며, 시간적 매크로 스케일 단계인 장기적인 열화거동과 통합하여 종합적인 사용수명 해석이 가능하게 한다. 이러한 해석모델링 기법의 개발은 내구성 설계 더 나아가서 콘크리트 구조물의 성능 평가형 안전성 설계에도 핵심적인 내용이라 할 수 있다.

7. 맺음말


WTO 출범 이후, 세계가 하나의 시장으로 개편되면서, 국제 표준의 중요성이 부각되고 있고, 세계가 하나의 표준으로 통용되는 global standard의 시대가 되면서, 선진국을 포함한 지역적 연합체들은 학문적 성과를 충분히 활용하여 성능 중심의 표준개발을 통하여 자국의 표준을 높게 설정하여 내부시장을 방어하는 장벽으로 활용하고 있으며, 개발도상국에 대해서는 자국

에 유리한 국제표준을 준수토록 함으로써 수출시장을 확대하려고 하고 있다. 이에 따라, 각 국에서는 국제시장에서의 경쟁력확보를 위하여 자체적인 기준의 국제화를 위한 노력과 함께 국제표준을 자국의 이익이 되는 표준으로 선점하고자 부단한 노력을 하고 있으며, 내구성 분야에서도 성능 기반으로 국제 표준과 자국 기준의 일치를 위한 연구들을 수행하고 있다.

종래에 콘크리트 구조물을 건설하는 경우에 구조물 설계는 과다하게(over-designed), 내구성설계는 상대적으로 과소하게 설계(under-designed)되는 경향이 콘크리트 구조물의 조기열화, 안전성 위협등의 사회적 문제로까지 야기 되어 왔으며, 그 원인의 일부는 올바른 내구성 설계방법이 없었다는 점이었다. 최근 구조물의 건설에 있어서 지속가능한 개발이 중요한 사회적 개발 이슈로서 대두되고 있으며 콘크리트 구조물의 경우 내구성이 잘 고려되어 설계가 된 구조물은 이미 90% 정도의 지속가능한 개발이 실현된 것으로 연구되어 보고되고 있어 울

바른 내구성설계의 필요성이 더욱 강조 되고 있다.

콘크리트 구조물에서의 내구성 문제는 재료 문제이자 구조 문제로서, 성능평가형 내구성 설계는 내구적 콘크리트 재료의 개발보다 내구적 콘크리트 구조물의 설계라는 측면이 보다 강조된 최신의 설계방법이다. 성능기반에 근거한 확률론적 내구성 설계는 내구성 한계상태를 이용한 성능중심의 내구성 설계라는 진보된 설계개념으로 현재까지 개발된 시방에 근거한 내구성 설계법보다 진일보한 설계 방법이다. 즉, 성능평가형 내구성 설계는 설계될 콘크리트 구조물이 건설되게 될 위치의 미세 환경 조건을 고려하여 구조물의 각 부재별 정확한 내구설계가 가능한 설계 방법이고, 또 설계단계에서 내구성능을 평가함으로 설계단계에서 정량적으로 목표내구수명의 보유를 확인할 수 있도록 하는 보다 진보된 설계방법이다.

성능기반형 내구성설계의 경우 설계자의 능력에 따라 보다 우수한 내구설계가 가능하여, 능력을 보유한 설계자가 우대 받는 만큼 설계자의 책임소재도 분명하게 되었다. 내구성 설계에서 사용되는 소위 내구성능조사 시스템은 설계단계에서 뿐 아니라 시공이전 내구성평가에서도 중요하게 사용되는 성능조사 도구로서 내구성 설계의 핵심으로 설계자들이 안심하고 사용할 수 있는 신뢰성 있는 내구성능 조사 시스템의 개발이 매우 필요한 실정이다. 최근 축진 열화 및 장기폭로열화실험 데이터의 축적과 시간적 다수준(초기재령에서 장기열화)과 공간적 다수준(미시공극구조에서 거시적 대형 콘크리트 구조물)에 근거하여 재료과학적거동, 재료역학 및 재료공학적거동, 구조적거동 등을 통합하여 성능평가 시스템의 개발에 관한 연구가 국내외적으로 많이 수행되고 있어, 멀지 않은 장래에 콘크리트 구조물의 성능평가형 확률론적 내구성 설계에 안심하고 신뢰성 있게 사용할 수 있는 내구성 설계 도구가 개발될 것으로 판단된다. 

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2003.
2. 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서, 한국콘크리트학회, 2003.
3. 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서(내구성편), 한국콘크리트학회, 2004.
4. 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서(유지관리편), 한국콘크리트학회, 2005.
5. ACI 318-05, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute, 2005.
6. CEB, *CEB Design Guide for Durable Concrete*, Thomas Telford Services, Ltd, 1997.
7. CEB Task Group 5.1, 5.2, *New Approach to Durability Design*, CEB, Sprint-Druck, 1997.
8. CEB General Task Group 20, *Durable Concrete, Structure-Design Code*, CEB, Thomas Telford, 1989.
9. DuraCrete Final Technical Report, *Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures, Document*

BE95-1347/R17, European Brite-Euram Programme, 2000.

10. Gehlen C. and Schiessl P., "Probability Based Durability Design for the Western Scheldt Tunnel", *Proc. of the Workshop on Durability of Concrete*, Berlin, Germany, June, 1999, pp.1~20.
11. ICCMC, *Asian Concrete Model Code*, ICCMC, 2006.
12. ICCMC, *Recommendation for Maintenance and Rehabilitation of Concrete Structures against Chloride Induced Deterioration*, ACMC Level 3, ICCMC, 2003.
13. ISO/TC59, *Buildings and Constructed Assets-Service Life Planning-Part 6: Guidelines for Considering Environmental Impacts*, SC14, DIS 15656-6, 2003.
14. ISO/TC98, *General Principles on the Design of Structures for Durability*, SC2, WD 13823, 2005.
15. ISO/TC71, *Performance and Assessment Requirements for Acceptance of National Standards for Structural Concrete*, SC4, DIS 19338, 2005.
16. Kroff, J. and Hilsdorf, H. K., *Performance Criteria for Concrete Durability*, Rilem Report 12, E & FN Spon, London, 1995.
17. Maekawa, K., Chaube, R. P., and Kishi, T., *Modeling of Concrete Performance*, Spon Press, 1999.
18. Maekawa, K., Ishida, K., and Kishi, T., "Multiscale Modeling of Concrete Performance-Integrated Material and Structural Mechanics", *Advanced Concrete Technology*, Japan Concrete Institute, Vol.2, 2003.
19. RILEM International Workshop, *Durability of Concrete Structures*, Copenhagen, Workshop Report, Ed. S. Rostam, 1988.
20. Sarja, A. and Vesikari, E., *Durability Design of Concrete Structures*, Rilem Report 14, E & FN Spon, London, 1996.
21. Schiessl, P., "Durability of Reinforced Concrete Structures", *Construction and Building Materials*, Vol.10, No.5, 1996, pp.289~292.
22. Song, H.-W., Byun, K. J., Seo, C. H., Kim, J. K., and Kim, E. K., "A Development of Korean Standard Specification of Concrete Structures for Durability and Maintenance in Korea", *Proceeding of the International Symposium on Latest Achievement of Technology and Research on Retrofitting Concrete Structures*, Japan Concrete Institute, 2004.
23. Song H.-W., Kwon S.-J., Byun K.-J., and Pack C.-K., "Predicting Carbonation in Early-Aged Cracked Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.36, 2006, pp.979~989.
24. Thomas, M. D. and Bentz, E. C., *Life-365 Manual*, Silica Fume Association, 2001.
25. 内田裕市, 下村匠, "2002年制定 土木學會コンクリート標準示方書(構造性能照査編)の改正概要", *コンクリート工學*, Vol.40, No.4, April 2002, pp.3~8.
26. 梶田佳寛, 野口貴文, 兼松學, "日本建築學會 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説の概要", *コンクリート工學*, Vol.43, No.2, Feb. 2005, pp.11~18.
27. 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", *コンクリート工學*, Vol.40, No.5, Feb. 2002, pp.59~66.
28. 日本土木學會, *コンクリート構造物の耐久性設計指針(案)*, 콘크리트 라이브러리, 第82号, 1995, 11.
29. 日本土木學會, *コンクリートの耐久性に関する研究の現状とデータベース構築のためのフォーマットの提案*, 콘크리트 라이브러리-109, 日本土木學會, 2002.
30. 日本土木學會, *コンクリート標準示方書(構造性能照査編)*, 日本土木學會, 2002.