

사회기반 콘크리트 시설물에 대한 확률론 기반 내구성 설계

Durability Design and Quality Assurance of Major Concrete Infrastructure

Odd E. GjØrv
Professor em., Norwegian University of Science and
Technology-NTNU, Trondheim, Norway

최석환 Sokhwan Choi
국민대학교
건설시스템공학부 교수

1. 머리말

1.1 서론

고부식성 환경에 건설되는 콘크리트 구조물에서 내구성 문제가 발생하는 경우가 많은데, 이는 시공 중 품질보증 절차가 미흡하고, 시공품질이 낮기 때문이다. 신설된 콘크리트 구조물을 대상으로 한 광범위한 현장조사 결과를 보면 시공품질에 변동성이 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 내구성 기준을 적용해 설계했다라도 시공에 결함이 있으면 배합과 상관 없이 사용 기간 내에 언젠가는 문제가 발생한다. 확률론적 내구성 설계법을 적용하면 시공시 발생하는 변동성과 편차에는 어느 정도까지 대응할 수 있다. 그러나 수치적 접근 하나만으로 내구성을 확보하기에는 충분하지 않다. 성능기반 내구성 기준을 정립하고, 시공 중에 이를 확인해서 품질을 확보하는 것이 필요하다. 중요한 사회기반 콘크리트 시설물을 신설할 때는 시공품질을 문서화 하고, 내구성 기준을 준수했다는 기록을 남기는 것이 내구성을 확보/증진시키기 위해서 반드시 필요한 핵심적인 내용이다. 또한 구조물의 사용수명을 늘이기 위해서는 정기적인 상태 평가 및 예방적 차원의 유지보수도 필수적이다. 이 특집기사에서는 극한 환경에서 콘크리트 구조물 건설 경험이 많은 노르웨이의 사례를 중심으로 ‘특집 1’에서는 확률론 기반 내구성 설계를 적용한 경험을 그리고 ‘특집 2’에서는 성능기반 콘크리트 품질보증 사례에 대해 살펴본다.

1.2 배경

최근 중대한 사회 문제의 하나가 주요 콘크리트 시설물의 노후화라 할 수 있다. 국가기관 혹은 사기업이 많은 예산을 들여 콘크리트 기간시설물을 유지, 보수하고 있으며, 그 비중도 점차 커지고 있다. 콘크리트 기간시설물에 대해 내구성 및 사용수명을 확보하고 이를 연장시키는 것은 비용적인 측면에서도 필요하지만 지속가능한 사회 모델 정립에도 직접적으로 영향을 미치는 중대한 사안이다¹⁾.

부식 환경에서는 여러 형태의 성능저하 혹은 열화가 콘크리트의 내구성에 영향을 미치지만 콘크리트 자체의 열화보다는 철근의 부식이 내구성 설계에서 해결해야 할 가장 큰 과제다. 경험적으로 콘크리트 조직이 충분히 치밀하다면 염화물이 침투하는 것을 많은 부분 막을 수 있고, 이것으로 대부분의 열화는 큰 문제가 되지 않는다. 제빙염의 사용이 늘어나면

서 여러 나라에서 많은 문제를 야기하고 있는 것도 사실이다. 항만구조물에도 염해로 인해 철근이 부식하면서 큰 경제적 손실이 발생하고 있다. Wig와 Ferguson은 1917년에 이미 미국 연안의 콘크리트 구조물에 대해서 광범위한 조사를 벌였고, 철근부식 문제를 지적하였다²⁾. 1924년 Atwood와 Johnson은 해양 환경에 노출된 콘크리트의 내구성에 관한 자료를 3,000건 정도 축적하였다³⁾.

이후 여러 나라에서 많은 조사가 이루어졌고, 내구성에 관한 수많은 논문 및 설계기준이 나왔다⁴⁾. 그럼에도 불구하고 아직까지도 염해로 인한 철근 부식이 주요 콘크리트 구조물의 운영, 안전에 가장 큰 위협으로 남아있다. 시공품질의 높은 변동성을 고려할 수 있는 방법으로 확률론에 기반을 둔 내구성 설계가 최근 세계적으로 많이 발전하고 있으나^{5~7)} 수치적 해법 자체만으로는 내구성을 확보하기에 충분하지 않다. 시공 중에 품질을 보증하는 절차가 미흡하고, 그로 인해서 시공품질이 낮아 내구성 문제를 일으키는 경우가 많기 때문이다. 따라서 콘크리트 품질을 내구성 항목과 서로 연결시킨 후 이를 시공 중에 확인하고 평가하는 절차가 반드시 필요하다.

노르웨이는 2004년 좀 더 내구적인 콘크리트 항만구조물을 시공하고자 관련 지침 및 설계기준을 정립하였는데⁸⁾, 확률론에 기반을 둔 내구성 설계법을 도입하여 구조물의 내구성을 확보하였다. 그래서 성능기반 내구성 기준을 정립할 수 있었고, 시공하는 콘크리트 품질이 정해진 내구성 기준을 만족하도록 콘크리트에 대한 성능기반 품질관리, 품질확보 기준을 정립하게 되었다. 구조물의 사용수명은 정기적인 상태평가 및 유지보수에 의해서도 많은 영향을 받으므로 구조물을 사용하는 동안 침투되는 염화물 관리 매뉴얼도 새로 정립된 내구성 기준에 포함되어 있는 중요한 부분이다.

2. 내구성 설계

2.1 개요

확률론에 기반을 둔 내구성 설계가 여러 나라에서 최근 주요 콘크리트 구조물 건설에 적용되었다^{9~12)}. 노르웨이에서도 초기에는 2,000년 시작된 유럽연합의 'DuraCrete' 연구 프로젝트 결과물로 나온 지침에 의거해서 설계를 수행하였으며¹³⁾, 이후 현장에 적용하는 것이

좀 더 용이하도록 발전되었다⁸⁾. 이후 실제 프로젝트에 적용해서 얻은 경험을 바탕으로 설계기준 및 지침을 보완하여 'DURACON' 모델이 개발되었다. 동시에 시공된 콘크리트 품질을 문서화함으로써 시공 중 품질관리 및 품질보증이 가능하도록 만들었고, 아울러 운영 중 상태 평가 및 예방적 유지관리도 가능하게끔 확장되었다(그림 1).

'DURACON' 모델에서는 철근 부식이 시작될 확률이 일정 값이 되기 전까지의 기간을 사용수명으로 보며, 이 확률을 10%로 정한다. 그리고 전체적인 내구성 요구 조건을 이 사용수명을 기준으로 설정한다. 10%는 설계수명 동안에 한계상태를 넘어가지 않도록 하는 구조물의 신뢰성 기준으로 현 ISO기준이다^{15~17)}. 부식 확률을 산출하기 위해서 내구성 해석을 수행하며, 이를 바탕으로 콘크리트의 품질과 피복두께의 조합을 적절하게 선택한다. 이렇게 구조물을 설계하면 주어진 환경 조건 하에서 요구되는 사용수명을 만족시킬 수 있다. 그러나 이렇게 구한 사용수명은 구조물의 실제 사용수명이 아니고, 특정 환경 조건을 기준으로 특정 구조물의 내구성 영향인자들을 기술적으로 판단/선택해서 도출한 결과이다. 이렇게 하면 특정 환경 및 구조물을 대상으로 콘크리트의 품질 및 피복두께의 영향을 정량화하는 것이 가능하므로 최고의 내구성을 확보할 수 있는 기술적인 방안이 무엇인지 비교해서 선택하는 것이 가능하다. 이렇게 해서 성능기반 내구성 요구조건을 도출할 수 있고, 이것이 나중에 시공 중 성능기반 품질관리 및 품질보증의 기준이 된다.

2.2 내구성 해석

부식 확률은 기본적으로 몇 개의 수학적 모델과 소프트웨어를 이용해서 계산할 수 있다. 그러나 염해에 노출된 콘크리트 구조물을 대상으로 한 그 동안의 내구성

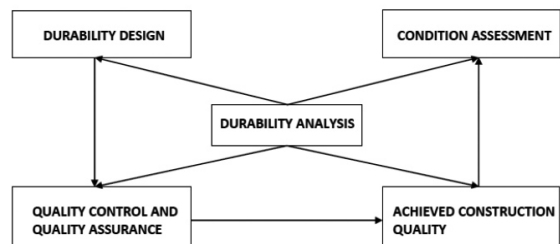


그림 1. 고부식성 환경에 노출된 콘크리트 구조물에 대한 내구성 설계, 시공, 운영이 가능한 'DURACON' 모델¹⁴⁾

설계 사례를 보면, 픽의 확산 제2법칙(modified Fick's Second Law of Diffusion)과 몬테카를로 시뮬레이션(MCS)을 간단하게 조합해서 계산한다^{18~20)}. 달리 계산할 수도 있겠지만 'DURACON' 소프트웨어를 이용할 수도 있으며, 입력 변수는 다음과 같다^{18,19)}.

- 1) 환경
 - 염소이온 농도(C_s)
 - 염분 노출 시간(t)
 - 온도(T)
- 2) 콘크리트 품질
 - 염소이온 확산계수(D)
 - 확산계수의 시간의존계수(α)
 - 염소이온 임계농도(C_{cr})
- 3) 콘크리트 피복두께(X_c)

이상의 입력 변수를 선택하고 값을 정하는 절차 및 방법 그리고 'DURACON' 소프트웨어를 무료 다운로드 받는 방법은 다른 자료에 나와 있다⁴⁾. 여기서 염소이온 확산(D)이 콘크리트 품질에 관한 매우 중요한 변수다. 'DURACON' 모델은 급속 염소이온 확산계수 실험 방법(RCM)을 기본으로 한다²¹⁾. 염소이온 확산계수 산정을 위한 염소이온 확산 실험법은 여러 가지가 있으나 콘크리트의 전양생(pre-curing)이 필요하지 않은 방법은 RCM이 유일하며, 콘크리트의 재령에 상관없이 단시간 내에 실험을 수행할 수 있다. 그러나 RCM은 아주 심한 축진 실험법이므로 확산계수는 단순히 상대적인 값으로 받아들여야 한다. 그럼에도 불구하고 콘크리트의 세공용액 내 이온 유동성뿐만 아니라 콘크리트의 밀도 및 침투성을 모두 반영하는 값이므로 염화물 침투에 대한 저항성과 일반적인 내구특성을 모두 나타내는 값이기도 하다. 따라서 28일 염소이온 확산계수(D_{28})가 내구성 설계의 중요한 입력 변수기 때문에 구조설계에서 사용되는 28일 압축강도(f_{28})에 비견될 수 있다. 28일 압축강도도 단순한 상대적인 값으로, 기본적으로는 압축강도이지만 콘크리트의 다른 일반적인 역학 특성도 반영한다.

높은 내구성과 긴 사용수명이 특히 중요하다고 할 수 있는 주요 콘크리트 사회기반 시설물은 10%의 부식 확률을 초과하기 전에 적어도 100년의 사용수명이 필요하다. 그러나 수명이 100년 이상인 경우는 부식 확률에 대

한 신뢰도가 점점 떨어진다. 따라서 사용수명 150년까지는 부식 확률은 10%가 넘지 않는 범위에서 가능한 한 낮게 잡아야 한다. 또한 부분적으로 스테인리스 스틸 또는 비부식성 보강재를 사용해서 추가적인 보호책을 마련하도록 권고해야 한다. 그러나 사용수명이 150년 이상인 경우 어떠한 부식 확률 계산도 결과를 신뢰하기 어렵다. 이런 긴 사용수명에 대해서는 부식 확률을 가능한 낮게 유지하고, 150년을 기준으로 10%를 넘지 않게 해야 한다. 그리고 추가로 항상 한두 가지 보호 대책을 규정해 두어야 한다. 만약 시공 중에 콘크리트가 충분한 성숙도(maturity) 및 높은 밀도를 확보하기 전인 초기 단계에 염화물에 노출될 위험이 많다면 별도의 예방책이나 특별한 보호책을 강구해야 한다.

이렇게 내구성 설계를 수행해서 콘크리트의 품질(28일 염소이온 확산) 및 피복두께에 대한 기준을 정립한다. 그리고 이를 시공 중 통상의 품질관리 및 품질보증을 실시하는 기초로 삼는다. 콘크리트 시공이 끝난 후에는 28일 염소이온 확산계수와 피복두께에 대한 측정치의 평균 및 표준편차를 사용해서 내구성 해석을 다시 수행한다. 이때, 처음 내구성 설계에서 값을 정하기가 까다로웠던 다른 변수들은 처음의 값을 그대로 사용한다. 따라서 여기서 설명하는 결과는 예측된 변동성 및 편차를 포함하여 28일 염소이온 확산 및 피복두께에 대해서 통상의 품질관리가 반영된 것이다. 이렇게 해서 시공된 품질 그리고 내구성 기준 충족도 등을 문서화 한다.

콘크리트 구조물을 운용하는 중에도 정기적인 상태 점검 및 예방차원의 유지관리를 위해 부식 확률을 다시 계산한다. 이때는 예측된 염소이온 침투 속도와 실측된 피복두께로부터 겉보기 확산을 구하고, 이를 이용해서 확률을 계산한다. 이렇게 구한 부식 확률이 너무 높아지기 전에 적절한 보호 조치를 취해야 한다⁴⁾.

다음은 지금까지 설명한대로 부식 확률을 계산하고, 이를 콘크리트 해양구조물의 내구성 설계에 적용한 사례를 살펴본다.

2.3 사례 연구

2.3.1 개요

신규 해양콘크리트 구조물에 적용된 내구성 기준은 10% 부식 확률에 도달하기 전 사용수명이 120년이었다.

환경 조건은 염화물량이 시멘트 중량의 5.5%로 상당히 많은 양이었고, 연평균기온은 20℃이었다. 이는 유사한 환경에 있는 콘크리트 구조물에서 일반적으로 관측되는 수준이다. 내구성 기준을 만족시키기 위해 콘크리트 품질과 적절하게 피복두께를 조합해서 선택하는데 이를 위해서 두 단계의 내구성 해석을 수행하였다. 하나는 콘크리트의 배합이 미치는 영향을 평가하기 위한 것이고, 다른 하나는 피복두께가 특정 사용수명을 기준으로 한 부식 확률에 미치는 영향을 평가하기 위한 것이다.

2.3.2 콘크리트 품질의 영향

콘크리트 배합이 미치는 영향을 평가하기 위해 네 가지 콘크리트 배합을 선정하고, 이에 대하여 28일 염소이온 확산계수(D_{28})를 측정하였다(RCM). 결합재를 제외하곤 다른 배합은 모두 같다. 또한, 물-시멘트비 0.4 이하, 결합재량은 330 kg/m^3 이상 등 100년 사용수명에 대한 최소 내구기준도 만족한다²²⁾. 네 가지 서로 다른 시멘트와 시멘트 중량의 10%에 해당하는 실리카폼(CSF)을 사용하였다. 네 가지 배합은 고성능 포틀랜드 시멘트(Type 1), 플라이애시 20%를 넣은 플라이애시 시멘트(Type 2), 그리고 34%와 70%의 슬래그를 함유한 고로슬래그 시멘트 두 가지(Type 3, 4)이다(표 1).

28일 염소이온 확산계수(D_{28}) 측정치 그리고 콘크리트 공칭 피복두께 70 mm(X_c) 및 이에 대한 표준편차 6 mm를 사용하고, 확산계수의 시간의존계수(α)와 임계농도(C_{CR})를 <표 1>처럼 가정하여 내구성 해석을 수행하였다. 염소이온 농도 $C_s(5.5:1.4\%)$, 염분 노출시간 $t(28$

표 1. 콘크리트 품질의 영향을 해석하는데 사용한 입력변수

Concrete Quality	Input Parameter		
	D_{28} ($\text{m}^2/\text{s} \times 10^{-12}$)	α	C_{CR} (% by wt. of binder)
Type 1 (CEM I 52.5LA + 10% CSF)	N ¹⁾ (6.0;0.64)	N(0.40;0.08)	N (0.4;0.10)
Type 2 (CEM II/A-V 42.5R + 10% CSF)	N(7.0;1.09)	N(0.60;0.12)	
Type 3 (CEM II/B-S 42.5RNA + 10% CSF)	N(1.9;0.08)	N(0.50;0.10)	
Type 4 (CEM III/B 42.5LH HS + 10% CSF)	N(1.8;0.15)		

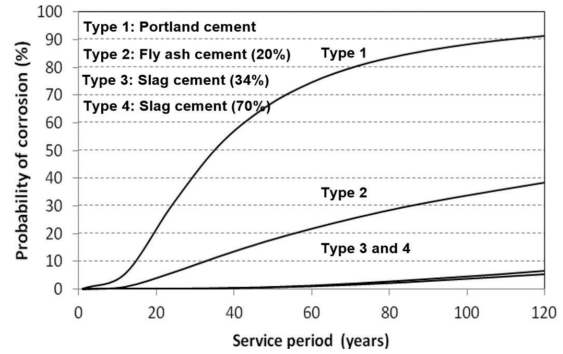


그림 2. 시멘트 유형이 사용기간에 미치는 영향

일), 그리고 온도 $T(20^\circ\text{C})$ 는 일정한 값을 사용하였다.

네 가지 배합 모두 100년 사용수명에 해당하는 기준을 만족함에도 불구하고 부식 확률 10%에 도달하기 전 사용기간은 상당히 다르다(그림 2). 포틀랜드시멘트 콘크리트(Type 1)는 사용기간이 15년이고, 플라이애시 콘크리트(Type 2)는 약 30년이며, 나머지 두 가지 슬래그시멘트 콘크리트(Type 3, 4)는 120년을 넘는다. 따라서 슬래그시멘트를 사용한 두 가지 배합만이 주어진 구조물에 대한 내구성 기준을 만족한다.

이상의 내구성 해석은 28일 염소이온 확산에 대한 측정치를 사용했으므로 이후 양생이 진행되면서 결합재의 종류에 따라 확산계수가 달라지지 않을까 하는 의문이 생긴다. 그래서 양생기간을 더 늘려 확산계수를 다시 측정한 후 추가적인 내구성 해석을 수행했지만 배합 선택에는 큰 영향을 미치지 못했다.

2.3.3 콘크리트 피복두께의 영향

공칭 피복두께 70 mm 이상을 사용했을 때 생기는 영향을 평가하기 위해 90 mm와 120 mm의 피복두께를 사용하여 추가적인 내구성 해석을 수행하였다(표 2). 이 해석에서는 포틀랜드시멘트 콘크리트(Type 1)만 사용했으며, 다른 모든 입력 변수들은 같은 값을 사용했다. <그림 3>을 보면 증가된 피복두께가 부식 확률에 많은 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 공칭 피복두께 70 mm의 포틀랜드시멘트 콘크리트는 사용기간이 15년이지만 90 mm와 120 mm의 경우에는 사용기간이 각각 30년과 70년까지 늘어났다.

<그림 3>에서 알 수 있듯이 Type 1 콘크리트로는 심지어 120 mm 피복두께를 사용해도 내구성 조건을 만족시키지 못한다. 또한 피복두께가 90 mm 이상이 되

표 2. 콘크리트 피복두께의 영향을 해석하기 위한 입력변수

Input Parameter	Average Value	Standard deviation	Comments
D_{28}	6.0	0.64	Chloride Diffusivity ($m^2/s \times 10^{-12}$)
α	0.40	0.08	Time Dependence Factor
C_{CR}	0.40	0.10	Critical Chloride Content (% by wt. of binder)
X_c	70	6	Nominal Concrete Cover(mm)
	90	6	
	120	6	

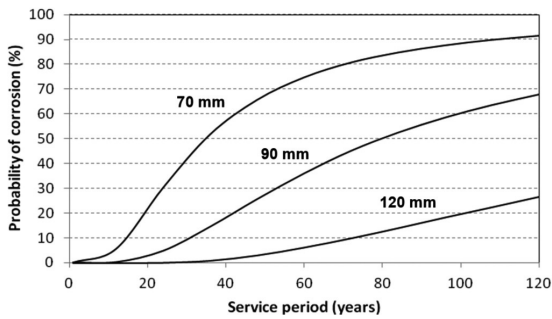



그림 3. 콘크리트 피복두께가 사용기간에 미치는 영향(Type 1 콘크리트)

면 균열폭이 허용값을 벗어날 수도 있다. 섬유를 혼입하여 이 문제를 어느 정도 완화시킬 수는 있겠지만 피복두께가 늘어나면 고정하중도 증가하는 부차적인 문제가 생긴다. 따라서 염소이온 확산계수가 낮은 콘크리트 배합을 선택하는 것이 옳은 방법이 될 것이다. 또한 구조물의 최외곽층에 있는 철근을 스테인리스 스틸이나 비부식 보강재로 대체하는 것도 가능한 방법이다. 이 경우 안쪽에 남아 있는 기존의 철근은 피복두께가 자연히 늘어나는 효과가 있다. 이런 식으로 내구성 해석을 설계의 도구로 활용하여 비부식 보강재로 치환해야 철근의 양을 결정할 수 있다. 이제까지의 경험으로 보면, 주요 콘크리트 사회기반 시설물에 대해서는 노출이 가장 심하고, 또한 중요한 부재를 중심으로 스테인리스 스틸을 부분적으로 사용하는 것이 매우 간단하고도 확실한 기술적 해결 방안이며, 장기적으로 매우 좋은 투자라는 것이 드러나고 있다⁴⁾.

3. 맺음말

지금까지 설명한 부식 확률 계산은 1차원적인 염화물 침투를 기준으로 아주 단순한 확산모델을 적용하였으며, 여러 입력 변수가 불확실하기 때문에 특정 부식 확률을 기준으로 구한 사용 기간을 실제 부식이 시작되는 시점으로 간주해서는 안 된다. 그러나 거의 모든 추정 입력 변수를 같은 값으로 고정하고 확률을 계산했기 때문에 나온 결과를 기초 자료로 사용하여 콘크리트의 품질과 피복두께를 결정하고 이들의 조합을 서로 비교해서 내구성 기준을 만족하는 적절한 조합을 선택하는데 사용할 수 있다. 따라서 위에서 보여준 사례 연구와 관련해서는 공칭 피복두께 70 mm를 사용한다면 고로슬래그 시멘트 Type 3 혹은 Type 4가 적절한 선택이다.

확률론 기반 내구성 설계를 최근 수행된 여러 프로젝트에 적용하여 특정 환경에 놓은 특정 구조물을 기준으로 콘크리트의 품질(염소이온 확산)과 피복두께 사이에 최적의 조합을 구할 수 있었다⁴⁾. 또한 콘크리트의 실제 시공품질과 내구성 기준을 충족한다는 문서를 작성함으로써 시공된 콘크리트의 품질을 보증하는 것이 가능하게 되었다. 

담당 편집위원 : 신명수(울산과학기술대학교) msshin@unist.ac.kr

참고문헌

- Gjørsv, O. E. and Sakai, K.(eds.), "Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century", E & FN Spon, London and New York, 2000.
- Wig, R. J. and Furguson, L. R., "What is the Trouble with Concrete in Sea Water?", Engineering News Record, Vol. 79, 532, 641, 689, 737 and 794, 1917.
- Atwood, W. G. and Johnson, A. A., "The Disintegration of Cement in Seawater", Transactions ASCE, Vol. 87, 1924, pp. 204 ~ 230.
- Gjørsv, O. E., "Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments", Second Edition, Taylor & Francis, CRC Press, London and New York, 2014.
- Siemes, T., Vrouwenvelder, T. and Beukel, A. Van den, "Durability of Buildings: A Reliability Analysis", HERON, Vol. 30, No. 3, 1985, pp. 2 ~ 48.

6. Siemes, T., Schiessl, P. and Rostam, S., "Future Developments of Service Life Design of Concrete Structures on the Basis of DuraCrete", in "Service Life Prediction and Ageing Management of Concrete Structures", Ed. by D. Naus, RILEM, 2000, pp. 167 ~ 176.
7. DuraCrete-Final Technical Report, The European Union-Brite EuRam III Research Project: "Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures", Document BE95-1347/R17, CUR, Gauda, 2000.
8. NAHE, "Durable Concrete Structures-Part 1: Recommended Specifications for New Concrete Harbor Structures, Part 2: Practical Guidelines for Durability Design and Concrete Quality Assurance", 1st Ed., Norwegian Association for Harbor Engineers(NAHE), TEKNA, Oslo, 2004(In Norwegian).
9. Stewart, M. G. and Rosowsky, D. V., "Structural Safety and Serviceability of Concrete Bridges Subject to Corrosion", *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 4, No. 4, 1998, pp. 146 ~ 155.
10. McGee, R., "Modelling of Durability Performance of Tasmanian Bridges", *Proceedings*, Eight International Conference on the Application of Statistics and Probability, Sidney, 1999.
11. Gehlen, C. and Schiessl, P., "Probability-Based Durability Design for the Western Scheldt Tunnel", *Structural Concrete*, Vol. 2, (P.1), 1999, pp. 1 ~ 7.
12. Gehlen, C., "Durability Design According to the New Model Code for Service Life Design", *Proceedings* Vol. 1, Fifth International Conference on Concrete under Severe Conditions – Environment and Loading, ed. by F. Toutlemonde, K. Sakai, O. E. Gjrv and N. Banthia, Laboratoire Central des Ponts et Chausses, Paris, 2007, pp. 35 ~ 50.
13. "DuraCrete - General Guidelines for Durability Design and Redesign", The European Union – Brite EuRam III Research Project: "Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures", Document BE95-1347/R15, CUR, Gauda, 2000.
14. PIANC/NAHE, "Durable Concrete Structures –Part 1: Recommended Specifications for New Concrete Harbor Structures, Part 2: Practical Guidelines for Durability Design and Concrete Quality Assurance", 3rd Ed., Norwegian Association for Harbor Engineers (NAHE), TEKNA, Oslo, 2009(In Norwegian).
15. ISO 2394:2015, "General Principles on Reliability for Structures", ISO, 2015.
16. ISO 16204:2012, "Durability-Service Life Design of Concrete Structures", 2012.
17. EN 1990, Eurocode: Basis of Structural Design, 1990.
18. Ferreira, R. M., "Probability-Based Durability Design of Concrete Structure in Marine Environment", PhD Thesis, University of Minho, Guimarães, 2004.

19. Ferreira, R.M., Gjrv, O. E. and Jalali, S., "Software for Probability-Based Durability Design of Concrete Structures", *Proceedings* Vol.1, Fourth International Conference on Concrete under Severe Conditions-Environment and Loading, ed. by B.H. Oh, K. Sakai, O. E. Gjrv and N. Banthia, Seoul National University and Korea Concrete Institute, Seoul, 2004, pp.1,015 ~ 1,024.
20. Kim, J. S., Jung, S. H, Kim, J. H., Lee, K. M. and Bae, S. H., "Probability-Based Durability Analysis of Concrete Structures under Chloride Attack Concrete Environments", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 2, 2006, pp. 239 ~ 248.
21. AASHTO TP 64-03, "Predicting Chloride Penetration of Hydraulic Cement Concrete by the Rapid Migration Procedure", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2003.
22. CEN, Survey of National Requirements Used in Conjunction with EN206-1:2000, Technical Report CEN/TR 15868, CEN, Brussels, 2009.



Odd E. Gjrv 박사는 Norwegian an University of Science and Technology(NTNU) 교수이며, Norwegian Academy of Technical Sciences 회원으로, 콘크리트 분야에서 400편 이상의 논문 및 3권의 저서를 발표한 국제적인 콘크리트 전문가다. 1971년부터 20여 년 동안 북해의 거의 모든 석유/가스 시추용 콘크리트 해양플랫폼의 설계 및 시공에 참여하였다. 주 연구 분야는 사회기반 콘크리트시설물에 대한 내구성 및 사용수명, 그리고 고성능 콘크리트에 대한 재료특성 및 시공이다.
odd.gjorv@ntnu.no



최석환 교수는 미국 노스웨스턴 대학교에서 콘크리트 파괴역학 연구로 박사학위를 취득하였으며, ACBM 센터 및 한국해양연구원을 거쳐 1999년부터 국민대학교 건설시스템공학부에 재직하면서 콘크리트 구조설계 및 재료 분야의 교육 및 연구를 수행하고 있다.
shchoi@kookmin.ac.kr