성능중심 콘크리트 구조설계기준

Performance Based Design Code for Concrete Structures

최정욱* *Jung-Wook Choi*　김 우** *Woo Kim*　정하선*** *Ha-Sun Jung*

1. 성능중심 연구 소개

1.1 연구 필요성

1995년 세계무역기구(World Trade Organization) 출범 이후, 세계가 하나의 교역을 위한 시장으로 개편되면서, 국경 없는 무한경쟁시대로 돌입하는 새로운 국제 무역 환경이 조성되었다. 이에 따라, 교역에 있어 국제 표준의 중요성이 부각되었고 현재, 세계 교역량의 80%가 이러한 국제 표준에 영향을 받는 것으로 파악되고 있다. 국제 표준에 관하여 WTO는 "참여국들이 성능 관점에서 상품의 요구 조건에 관한 기준을 정하여야 한다" 라고 규정하였다. 이것은 국제 교역에 있어, 참여국들이 상품의 제작 방법 및 절차가 아닌 성능에 기초한 요구 조건을 제시하라는 것이다.

이러한 성능중심 기준은 자동차, 항공기, 조선 등 다른 공학 분야에서는 전혀 새로운 개념이 아니다. 이들은 이미 제품의 성능에 기초하여 교역이 이루어졌으며, 성능기준에는 요구 성능을 만족시키기 위한 기술과 절차 등이 전혀 언급되어 있지 않다. 그러나 건설 생산품은 다른 생산품과는 달리 각 구조물마다의 독창성으로 인해 각각에 대한 요구 조건을 정의하기가 쉽지 않고, 요구 성능을 검증하고, 이를 만족시키지 못할 경우 이에 대한 보상이 어렵기 때문에, 현재까지 성능중심 개념의 건설시장이 전반적으로 형성되지 않았다.

그러나 성능중심 개념에 기초한 국제교역의 흐름은 향후 건설 시장 상황에 큰 변화를 야기할 것이다. 이미, 유럽, 미국, 일본 등은 건설 관련 기준을 성능중심 개념으로 표준화하고 이를 국제화하는 작업을 수행 중에 있다. 이러한 국제적인 환경에 적극적으로 대응하고 세계에서 우리 나라의 건설 경쟁력을 확보하기 위해서는 국제적으로 통용 가능한 수준의 성능중심 건설기준을 시급히 개발할 필요가 있다.

1.2 성능중심의 건설기준 표준화 연구단

건설기술 기반 구축 사업으로 "성능중심의 건설기술기준 개발 기본 계획 수립" 과제('05.12 ~ '06.12)가 수행되었고, 또한 경제정책조정회의('05.11)에서 논의된 "건설기술설계분야 경쟁력 강화 방안"의 주요 내용 중에 "설계도서의 국제표준화 및 설계기준의 성능기준화"가 포함됨으로써, 설계기준의 성능기준화를 위한 정책 방향이 제시되었다. 그리고 이에 따라 도로포장 및 콘크리트구조물 분야를 중심으로 성능중심의 건설기준 개발을 위한 "성능중심의 건설기준 표준화" 연구단이 발족되었다.

성능중심 건설기준 표준화 연구는 한국건설기술연구원 주관으로 건설교통부 지원을 받아 수행하는 과제로써, 연구기간은 4년 10개월(2006.9 ~ 2010.7)이고 총 연구비는 약 100억원이다. 이 연구단의 추진 조직은 <그림 1>과 같이 3세부와 2세부는 각각 콘크리트구조물과 도로포장 분야의 성능중심 건설기준 개발을 목적으로 연구를 수행하고 1세부는 콘크리트구조물과 도로포장에 포함되지 않은 각 분야의 성능중심 건설기준 개발을 위한 예비 연구를 수행한다.

한국콘크리트학회는 3세부과제의 주관기관으로써 연구의 목표는 "콘크리트구조물의 성능중심 구조설계기준"을 개발하는 것이다. 이와 관련하여, 이 기사는 먼저 건설 기술자에게는 조금 생소할 성능중심 건설기준의 의미를 고찰하고 한국콘크리트학회에서 수행중인 "성능중심 콘크리트 구조설계기준 개발" 과제에 관한 연구 내용을 소개하고자 한다.

* 정회원, 콘크리트공학연구소 책임연구원
jwchoi@kci.or.kr
** 정회원, 전남대학교 토목공학과 교수
*** 정회원, 콘크리트공학연구소 소장

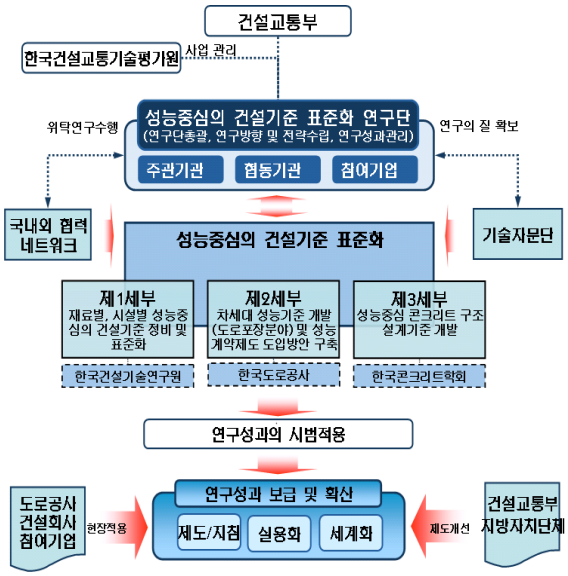

그림 1. 성능중심 연구단 연구 조직 및 전략

2. 성능중심 설계기준의 의미 및 연구 내용

2.1 성능중심 설계기준

국제표준기구(International Standard Organization)는 '성능' 이란 용어를 "일정 시점에서 핵심적인 특성에 관한 품질 수준" 라고 정의하고 있다. 건설 구조물에서의 핵심적인 특성은 내화성능, 내구성능, 내진성능, 사용성능 등으로 다양하게 나타난다.

'성능중심 기준'이란 "방법, 수행 절차 등을 제시한 것이 아닌, 의도된 최종 성과물의 요구 성능에 초점을 맞춘 기준"이라고 정의할 수 있다. 구조물에 대한 성능중심 기준의 개념은 사실 그 역사가 오래되어 기원전 18세기 함무라비법전의 건축물에 대한 규칙에서부터 전해지고 있다. 함무라비법전 229조는 "건축가가 인간을 위한 집을 지었는데 건물이 무너져 건물 소유자가 죽었다면, 건축가는 살해되어야 한다" 그리고 함무라비법전 230조는 "만약 소유주의 아들이 죽었으면, 건축가의 아들이 살해되어야 한다" 라고 규정하고 있다. 함무라비법전에 구조물에 대한 요구 조건은 무너지지 않도록 건물을 잘 지어라는 것이며, 설계 및 시공법과 사용할 재료는 별도로 명시하고 있지 않다. 결국, 함무라비법전에서의 건물 요구 성능은 다양한 자연조건과 하중 조건에 대한 안전성으로 정의된 것이다.

성능중심 설계기준의 구조는 각국에 따라 서로 다른 구조를 제시하고 있지만 일반적으로 <그림 2>의 단계를 통하여 설명할 수 있다. <그림 2>에서 볼 때 성능중심 설계기준의 개념은 먼저 목적하는 바(objectives)를 기술하고, 요구하는 성능

그림 2. 성능중심 설계기준 체계(예)

(performance requirements)을 기술하며, 그 다음 그 성능을 검증하는 방법(verification methods/accepted solutions) 순으로 기술하는 체계이다. 예를 들면, 주문자가 관광단지 내에 숙박용 호텔을 건설한다고 할 때 '관광호텔'은 구조물의 목적이다. 그리고 주문자는 이 관광호텔에서 요구되는 성능을 제시할 것이다. 예를 들면, 100년의 내구성능, 진도 7 지진에 대하여 인명피해가 없는 구조 등을 제시할 수 있다. 또한, 시공에 있어 주변 환경오염 등을 제한 할 수도 있고 유지관리에 관한 요구 조건을 명기할 수도 있다. 구조물의 설계 및 시공은 이러한 주문자의 요구 조건에 따라 진행될 것이다. 마지막으로 생산품이 주문자의 요구 조건과 부합하는지를 검증하여야 할 것이다. 검증에 있어 <그림 2>의 성능중심 설계기준 구조는 'verification methods'와 'accepted solutions'을 제시한다. 'verification methods'는 시험 및 실험을 통한 검증 또는 새로운 평가모델에 의한 검증이라 할 수 있다. 이를테면, 시공이 주변 환경에 미친 오염 정도는 환경 평가를 통하여 즉각적으로 검증할 수 있다. 'accepted solutions'는 시험 및 실험을 통해 즉각적인 검증이 어려운 항목(예를 들면, 구조안전성능과 내진성능)에 대하여 기존의 설계 방식을 이용하는 것으로 '극한 강도설계법' 또는 '한계 상태 설계법' 등이 이 범주에 속할 수 있다.

상기 언급한 것처럼 구조물의 요구 성능은 구조물의 종류, 환경 조건, 그리고 사용 목적에 따라 크게 달라질 것이고 경제성과 유지관리를 고려한 주문자의 판단에 의해서도 구조물의 요구 성능은 당연히 달라질 것이다. 이와 같이 구조물의 성능을 중심으로 설계를 수행하는 것이 바로 '성능중심 설계기준'이다.

새로운 접근 방법인 성능중심 설계기준(performance based design code)과 대비하여, 현재 우리가 사용하고 있는 설계기준을 시방중심 설계기준(prescriptive design code)으로 통칭하여 부른다. 성능중심 설계기준과 시방중심 설계기준의 장단점을 비교하면 <표 1>과 같다. 기존 설계 개념인 시방중심 설계기준은 구조물의 용도 및 내구연한 등의 요구 성능과 전혀 관계없이 기존 설계기준에 기술되어 있는 규정을 따르기만 하

표 1. 시방중심 설계기준과 성능중심 설계기준의 장단점 비교

	장점	단점
시방중심 설계기준	◦ 설계 및 시공에서 기준 사용이 용이 ◦ 발주자가 빠르고 쉽게 결과물에 대한 검토 수행 ◦ 법률적인 판단이 용이	◦ 신재료, 신기술의 반영이 곤란하여 설계기술개발에 한계 ◦ 최적 설계 곤란 ◦ 향후, 국제기준으로 인정받기 어려움
성능중심 설계기준	◦ 신재료, 신기술, 신공법의 반영으로 설계기술력 향상 도모 ◦ 생애주기비용 절감 ◦ 국제건설시장의 흐름에 맞는 기준	◦ 설계 및 시공자의 높은 전문지식 필요 ◦ 설계에 소요시간 증가 가능 ◦ 법률적 판단 복잡

면 되기 때문에, 적용이 매우 쉽다.

반면, 새로운 개념의 성능중심 설계기준은 구조물에서 요구되는 성능에 따라 설계가 이루어지는 것으로 목적하는 바에 따라 해결책이 달라진다. 이것은 설계의 방법 및 절차는 중요하지 않기 때문에 기존 설계기준에 얽매이지 않고 다양한 방법을 통하여 목적하는 바를 달성할 수 있다. 그러므로 설계자에게 보다 많은 지식이 요구되며 성능평가 및 검증에 대한 기술력의 축적이 필요하다는 문제가 있다. 그러나 기존 설계의 방법 및 절차를 따르지 않아도 되기 때문에 각자의 설계기술은 하나의 기술 경쟁력이 될 것이고 아직 기준화되어있지 않은 신재료, 신기술, 신공법의 반영이 용이하여 건설기술자의 기술개발 유도가 가능하다. 또한, 설계단계에서 구조물의 성능 및 유지관리를 고려함으로서 시공성과품의 생애주기 비용(life cycle cost) 절감이 가능하다.

2.2 연구 내용

한국콘크리트학회는 3세부과제의 주관기관으로써 연구의 목표는 '콘크리트구조물의 성능중심 구조설계기준'을 개발하는 것이다. 이 연구의 주 내용은 첫째 주문자가 제시한 요구 조건을 쉽게 수용할 수 있도록, 구조설계기준에 있어 성능중심 기준체계를 수립하고 둘째 이러한 요구 조건을 재료 성능, 내구성능, 구조 안전 성능 그리고 사용 성능에 대해 검증할 수 있는 검증방법론을 제시하는 것이다. 성능중심 콘크리트 구조설계기준 개발을 위한 구체적인 연구 내용 및 연차별 계획은 각각 <그림 3 및 4>와 같다.

2.2.1 성능중심 구조설계 기준체계 수립

성능중심 구조설계에서 주문자는 구조물의 성능에 대한 요구조건을 제시하여야 한다. 그러나 주문자의 대부분이 콘크리트 구조물에 있어 비전문가라고 할 때 이들이 구조물의 요구 성능을 명확히 제시하기는 매우 어려운 일이다. 성능중심 기준체계 관련 연구의 주 내용은 주문자가 구조물의 요구 성능을 보다 쉽고 명확하게 제시할 수 있도록, 설계기준에서 구조물의 요구

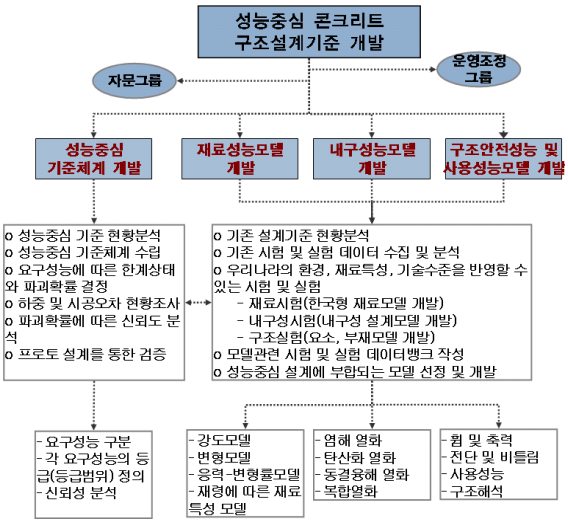

그림 3. 성능중심 콘크리트 구조설계기준 개발을 위한 연구 내용

그림 4. 연차별 주요 연구 내용 및 추진 방법

성능 종류와 각 종류에 따른 등급을 구분하고 구분된 등급의 범위를 정의하는 것이다.

예를 들면, 요구 성능의 종류는 내구성능, 내진성능, 사용성능 등으로 구분할 수 있고, 여기서 사용성능은 다시 균열, 처짐, 진동 등으로 세분할 수 있다. 그리고 세분된 진동성능의 등급은 최상급, 1급, 2급 등으로 나눌 수 있고 이에 따른 진동범위 즉 진동의 상하한치를 정의할 수 있다. 이때, 등급의 범위는 주문자가 정성적으로 제시하는 요구 조건을 정량화할 수 있도록 정해야 한다. 예를 들면, 최상급은 주로 반도체 공장 등과 같이 구조물 진동을 최대한 미세하게 제어해야 하는 진동범위, 1등급은 일반적으로 사람이 진동을 감지할 수 없을 정도의 진동범위, 2등급은 교량과 같이 사람이 진동을 감지하나 크게 위험을 느끼지 않을 진동범위 등의 정성적인 범위를 공학적인 즉 정량적인 수치로 표현하여야 한다.

2.2.2 구조 성능 평가 및 검증 방법론 정립

주문자가 요구 성능을 제시하면 생산품이 해당 요구 성능을 확보했는지에 대한 검증이 필요하다. 만약, 성능중심 설계기준에서 요구 성능을 검증하기 위한 방법을 제시하지 않는다면 차후 생산품의 성능에 대한 어떠한 보장도 할 수 없다.

생산품의 요구 성능을 가장 간단하고 명확하게 검증하는 방법은 시험 및 실험을 수행하는 것이다. 예를 들면, 시공회사 즉 주문자는 압축강도 60 MPa인 콘크리트를 레미콘회사에 요구할 수 있다. 이때, 레미콘회사가 만든 콘크리트의 압축강도를 가장 명확하게 검증하는 방법은 직접 압축강도 시험을 수행하여 이를 확인하는 것이다. 이것은 자동차의 안전성능을 검증하기 위해 자동차 충돌 시험을 수행하는 것과 동일하다.

재료 및 내구성능의 시험을 통한 검증은 이를 위한 표준화된 시험 방법이 요구된다. 그러나 이러한 표준 시험 방법은 각 나라마다 다를 수 있고 어떤 것은 시험 방법이 명기되지 않은 것도 있다. 그러므로 이 연구에서는 콘크리트 재료성능 및 내구성능 시험 방법을 정립하고 이를 KS와 ISO 규격에 반영하기 위한 연구를 수행 중에 있다.

시험 및 실험이 요구 성능을 검증하는 가장 명확한 방법이기는 하나 시험 및 실험을 통한 검증이 어렵거나 또는 이미 이에 관한 많은 데이터를 확보하여 결과가 쉽게 예측되는 상황이 있다. 이를 위하여, 이 연구에서는 콘크리트 재료성능 및 내구성능과 구조안전성능 및 사용성능에 대한 설계 모델들을 개발하고 있다. 설계 모델 개발에 있어 한국콘크리트학회에서 추진하는 중요한 원칙은 다음과 같다.

◦ 재료성능 및 내구성능 관련 모델은 미국과 유럽이 아닌 우리나라의 환경 특성과 우리나라에서 생산되고 이용되는 건설재료의 특성을 적극적으로 반영하여야 한다. 이를 위해서는 우리나라에서 수행한 기존 재료 시험의 결과를 통합 분석하고 부족한 부분에 대해서는 적극적인 시험을 수행하여 우리나라의 환경 및 재료 특성이 반영된 모델을 개발하는 것이다. 재료성능 모델은 주로 콘크리트의 강도 모델(압축강도, 인장강도), 변형 모델(자기수축, 건조수축, 크리프), 철근과 콘크리트의 응력-변형률 모델, 그리고 재령에 따른 콘크리트 특성변화 모델 등이다. 그리고 내구성능 모델은 주로 염해, 탄산화, 동결융해, 복합열화에 관한 모델이다.

◦ 구조안전성능 및 사용성능은 통합이론에 기초하여 설계 모델을 작성한다. 통합 이론에 기초한 설계 모델이란 부재 및 구조물의 거동을 재료 및 요소 모델에 기초하여 설명 가능하도록 하여 재료, 부재, 구조가 하나의 역학적인 기초에서 유기적인 관계를 갖도록 설계 모델의 형태를 갖추는 것이다. 예를 들면, 신 재료가 개발될 경우 개발된 신 재료에 대한 재료 및 요소 모델만 정의 된다면, 새로운 부재 모델을 개발할 필요 없이 신 재료의 특성이 부재 모델에 바로 반영되어 구조물의 거동을 설명할 수 있도록 작성하는 것이다. 이와 관련된 역학적인 모델은 주로 부재의 휨 및 축력, 전단 및 비틀림, 사용성, 구조 해석에 관한 설계 모델이다.

◦ 콘크리트구조물의 성능중심 구조설계기준은 이것이 국제표준기구(ISO) 규격에 부합되도록 신뢰도 기반이여야 하고 한계상태 설계법에 기초하여야 한다. 신뢰도 기반이란, 구조설계가 확률론적 신뢰성 분석에 기초하여야 한다는 것이다. 예를 들어, 확률론적 신뢰도는 의도하는 수명 동안에 발생가능 파괴확률로 표현되고, 만약 계산된 파괴확률이 미리 설정한 목표 파괴확률보다 작다면 그 구조물이 안전한 것으로 간주되는 것이다. 구조물의 한계 상태는 균열, 진동, 처짐 등의 사용 한계 상태, 최대 저항 강도가 발휘되는 강도 한계 상태, 최종 붕괴가 발생하는 극한 한계 상태 등의 구조물의 거동에 따라 구분할 수 있고 요구 성능에 따라 기능성, 내구성, 안전성 등의 한계 상태에 따라 구분할 수 있다. 결국 한계상태 설계법이란, 이러한 다양한 한계 상태에 대하여 적절한 설계 상황을 선정하고 이에 부합되도록 설계를 수행하는 것이다.

3. 기대 파급효과

성능중심 구조설계기준의 활용 계획 및 파급효과는 <그림 5>와 같다. 먼저, 활용 계획은 성능중심 구조설계기준을 ISO 규격(신뢰도 기반과 한계 상태 설계)에 부합되게 개발하고 이를 국내의 표준 건설기준은 물론 세계의 표준 규격으로 이용하도록 하는 것이다.

파급효과에 있어, 성능중심 설계 기준은 최종적인 구조물의

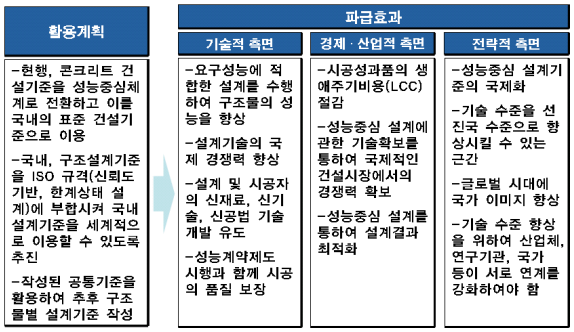

그림 5. 연구 활용 계획 및 파급효과

성능에 중점을 둔 기준으로 이를 충족시키기 위한 다양한 신재료, 신기술, 신공법 등의 기술 개발 분위기가 확산될 것이다. 또한, 성능 설계 및 시공, 성능평가, 유지관리에 따른 구조물의 체계적인 관리가 이루어지고 이를 통하여 구조물의 생애주기비용은 크게 절감될 것이다. 마지막으로 건설 기술의 선진화와 시공품의 경제성을 토대로 세계의 건설 시장에 있어 국가 경쟁력이 확보될 것이다.

4. 성능중심 콘크리트 구조설계기준 개발

4.1 연구 개요

성능중심 건설기준 표준화 연구는 한국건설기술연구원 주관으로 건설교통부 지원을 받아 수행하는 과제로써, 연구 기간은 4년 10개월(2006.9~2010.7)이고 총 연구비는 약 100억 원이다. 이 연구단의 추진 조직은 <그림 6>과 같이 3세부와 2세부는 각각 콘크리트구조물과 도로포장 분야의 성능중심 건설기준 개발을 목적으로 연구를 수행하고 1세부는 콘크리트구조물과 도로포장에 포함되지 않은 각 분야의 성능중심 건설기준 개발을 위한 예비 연구를 수행한다.

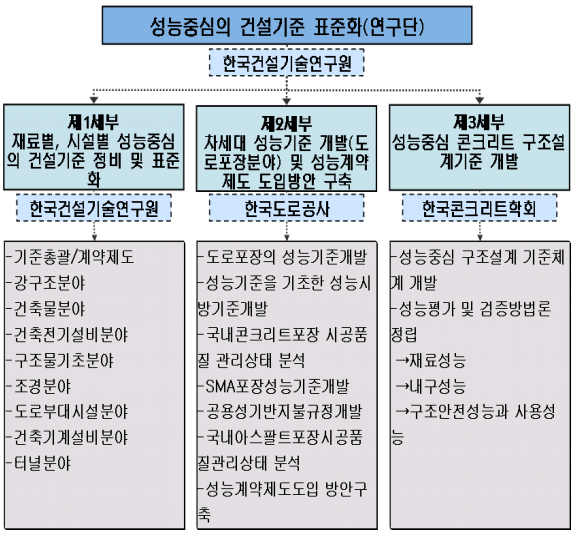

그림 6. 성능중심 건설기준 표준화 연구

5. 맺음말

근래 우리나라 건설업체들의 시공 기술력은 급격히 향상되었고 이를 입증하듯 우리나라의 해외 건설 공사 수주는 2003년 이후 매년 증가하는 추세에 있다. 그러나 이러한 추세는 급변하는 국제 경제 상황에 따라 크게 변화할 수 있다. 세계시장에서 우리나라의 건설 시장 경쟁력을 확보하기 위해서는 세계시장의 흐름을 정확히 파악하여야 하고 국제사회가 교역에 있어 무엇을 요구하는가를 명확히 판단할 필요가 있다.

세계무역기구(World Trade Organization) 출범 이후, 국제 교역에 대한 국경은 사라지고 생산기술로써 경쟁하는 국제 무역 환경이 조성되었다. 이러한 국제 환경에서 향후 세계 건설시장은 구조물의 성능에 기초한 교역이 주종을 이룰 것이다.

이에 편승하여 우리나라의 건설 산업 또한 국제적인 요구와 흐름에 맞게 건설기준을 성능중심으로 표준화하고 이를 국제화하는 노력을 아끼지 않아야 한다.

참고문헌

1. A. Emin Aktan, Bruce R. Ellingwood, and Brian Kehoe, "Performance-Based Engineering of Constructed Systems", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, March 2007, pp.311~323.
2. 한국콘크리트학회, "성능중심 콘크리트 구조설계기준 개발 연구보고서", 한국콘크리트학회, 2007. 7.
3. 정하선, 김우, "성능기반 콘크리트 구조설계기준", 콘크리트학회지, 19권 3호, 2007, pp.20~23.
4. 구재동, 김태송, 송하원, "성능중심의 건설기술기준 개발의 필요성", 콘크리트학회지, 18권 4호, 2006, pp.8~10.
5. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조물의 성능평가형 설계기법(Performance Based Design)의 개발", 2005. 10.