

콘크리트 품질·시공·유지관리의 조기판정시스템 개발

Development of Early Evaluation System for Concrete Quality, Construction and Maintenance

손용우¹⁾ 이증빈²⁾ 최미라³⁾ 박봉수⁴⁾

Sohn, Yong-Woo · Lee, Cheung-Bin · Choi, Mi-Ra · Park, Bong-Soo

Abstract

In the recent years, the early evaluation of concrete quality, construction and maintenance has been considered as all is of major concern due to the increase of loading and the degradation of structures related with time. This paper presents evaluation of structural safety performance using measured data of construction, on the basis of a field measurements for the prevention of unreliable concrete works. Measurements analyzed in this paper are early quality condition and performance assessment, serviceability performance by cracks and deflection, rating performance by loading, durability performance by chloride attack and carbonation. Thus, a quantitative assessment model of resistance capacity was developed here to meet the requirement for deteriorated concrete structures. The model focuses on damage mechanisms of concrete structures deteriorated by initial damage factors for concrete quality and environment factors such as chloride and carbonation attacks. These results could provide useful information for concrete structures interested in design, construction and maintenance.

key words : Initial Damage Factors, Early Quality Condition, Early Quality Performance, Serviceability·Durability and Rating Performance Assessment.

1. 서 론

공용 중에 있는 콘크리트구조물은 구조설계상의 오류나 품질선택 및 시공 부주의 등으로 인한 초기 결함을 가지고 공용 개시되거나, 공용기간 중 환경조건이나 하중조건 변화 등으로 성능저하 현상이 발생하게 된다. 최근 들어 연례행사처럼 발생되었던 대형건설사고나 신도시아파트 하자발생 문제 등의 사고사례 중에 설계, 품질 그리고 시공요인에 의한 사고가 80% 이상을 차지하고 있는 것으로 발표되고 있다. 이러한 시공 오류나 부실에 의한 품질결함은 준공 전 또는 공용초기에 대부분 나타나게 되며, 콘크리트를 타설 하기 이전 혹은 그 이후 사고발생 이전에 품질을 제대로 확인·평가하지 못했기 때문에 결함의 조기발견과 즉각적인 보수·보강조치가 매우 중요하다.

현재 국내현장에서는 콘크리트의 품질을 확인하기 위하여 타설 전의 콘크리트의 시공성 판단을 위한 슬럼프시험과 내구성 차원에서 동결융해작용에 대한 저항성 판단을 위한 공기량 시험을 수행하는 정도에 불과하며, 콘크리트의 품질특성 중에서 가장 중요한 압축강도는 기본적으로 타설 28일(부가적으로 3일, 7일강도 시험수행)이 경과된 다음에야 측정판정하게 된다. 따라서 콘크리트의 품질을 타설 전에 측정하거나 수일 이내에 측정하는 등 가능한 한 다른 시간 내에 확인할 수 있다면 그만큼 공사기간 지연 및 공사비 증가나 건설 사고를 미연에 방지할 수 있게 된다. 콘크리트 타설 전의 품질·시공·유지관리를 위한 조기판정시스템은 바로 경화후의 콘크리트의 품질을 사전에 예측하여 공사시공에 반영함으로써 품질향상에 기여함은 물론 부실시공을 방지하여 공사의 진행을 원활하게 하고 막대한 철거비용 지출을 방지하기 위한 것이며 나아가서는 콘크리트의 품질시험 결과를 신속하게 제조관리에 반영시킴으로써 품질변동을 최소화하기 위한 것으로 도입의 필요성이 절실하다.

이러한 조기판정시스템을 개발하기 위해서는 콘크리트구조물에 대한 시간 의존적 강도(응력)변화 예측의 해석과 콘크리트 배합설계에 따른 사전 콘크리트강도 예측이 매우 중요하다. 그러나 현재 국내에서는 단지 단면의 응력을 극한상태에서 평가하는 강도설계 법을 적용한 프리스트레스트 콘크리트의 크리프나 건조수축에 대해서만 시간 의존적 해석(Time Dependent Analysis)을 적용하고 있을 뿐 균열이나 처짐의 사용성 평가를 위한 사용하중 하에서의 콘크리트의 응력과 변형을 정확히 예측할 모델과 해석방법이 적용되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 인공신경망을 이용하여 현재 콘크리트 배합요소에 따른 압축강도 및 슬럼프 값을 초기에 추정함과 동시에 정성적이고 주관적으로 표현되는 콘크리트의 초기 손상·결함요인 등을 정량적이고 객관화 할 수 있는 수학적 방법인 퍼지 논리(Fuzzy Logic)이론에 기초하여 콘크리트의 품질·시공 상태를 평가할 수 있는 방법을 검토하고, 시간 의존적 해석을 이용하여 콘크리트 타설 전후의 압축강도, 품질·시공 상태 및 성능평가 및 신뢰성지수프로파일을 제안하고자 한다.

- 1) 순천건설(주), 연구이사, 공학박사
- 2) (유)한남기술공사 건설기술연구원, 공학박사
- 3) 순천제일대학 건축과, 교수, 공학박사
- 4) (유)한남기술공사, 대표이사

2 초기 콘크리트 발현강도 예측 모델

2.1 콘크리트 타설 전의 시간의존적 발현강도 추정

철근이나 구조용 강재는 시설이 갖추어진 제철공장에서 KS규격에 맞도록 조직적인 품질관리 하에 생산된다. 그러므로 강재는 소오의 품질을 가지며 품질의 변동이 거의 없다. 그러나 콘크리트는 동일한 재료를 사용하여 동일한 배합과 방법으로 제조하더라도 여러 가지 요인에 의하여 그 품질이 어느 정도 변동한다. 콘크리트 타설 전에 이러한 현장 콘크리트의 품질변동을 고려하여 콘크리트의 배합강도를 설계기준강도 보다 충분히 크게 정하여야 한다. 이렇게 하기 위해서는 실제로 시간에 따른 강도 발현속도, 즉 콘크리트 타설 전의 시간 의존적 해석방법이 필요하게 된다.

이에 대하여 ACI에서는 예상되는 변동계수를 알면 식(1)으로 배합강도를 구하고, 표준편차를 알고 있는 경우는 식(2)의 큰 값으로 배합강도를 계산한다.

$$f_{cr} = \frac{f_{ck}}{1 - \eta V} \quad (1)$$

$$f_{cr} = f_{ck} + \eta s \quad (2a)$$

$$f_{cr} = (f_{ck} - 35) + \eta_1 s \quad (2b)$$

여기서, f_{cr} =배합강도, f_{ck} =설계기준강도, η , $\eta_1=f_{ck}$ 이하로 되는 확률에 의해 정해지는 계수, V =예상되는 변동계수, s =예상되는 표준편차

식(1)과 식(2a)식에서 표준편차는 무한 또는 100회 이상의 매우 많은 회수의 시험을 통하여 얻은 모집단의 값이 복잡하게 된다. 이런 문제점을 극복하기 위해서 본 연구에서는 초기손상결함 요인을 고려한 시간 의존적 해석을 적용하여 초기 콘크리트 발현강도의 예측모델 식을 쌍곡선 함수로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$f_{cu}(t) = \frac{t}{a + bkt} d(i) f_{ck} \quad (3a)$$

$$k = \frac{1}{1 - 1.34 a_k V} \quad (3b)$$

여기서, $f_{cu}(t)$ =재령 t 일의 콘크리트 발현강도, a, b =시멘트종류에 따라 다르며, 과거실적을 참고로 하여 정한 정수, k =초기손상결함을 고려한 배합강도의 증가계수, i =설계기준강도의 설계재령(일), $i=28$ 및 91, t =재령(일), $d(i)$ =재령 28일에 대한 재령 91일의 강도 증가율, f_{ck} =설계기준강도, a_k =초기손상결함 계수, V =변동계수

따라서 쌍곡선 함수에 의한 초기손상결함을 고려한 시간에 따른 강도발현 속도 $\beta_{cc}(t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$\beta_{cc}(t) = \frac{t}{a + bkt} d(i) \quad (4)$$

한편, 콘크리트 구조설계기준(한국콘크리트학회)에서 규정하고 있는 재령에 따른 콘크리트 강도발현은 시멘트의 종류와 양생온도 등에 영향을 크게 받는데 시간 의존적 초기 콘크리트 발현강도의 예측 모델 식은 다음과 같이 된다.

$$f_{cu}(t) = \beta_{cc}(t) f_{ck} \quad (5a)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left(\beta_{sc}\left(1 - k\sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right) \quad (5b)$$

여기서, $\beta_{cc}(t)$ =초기손상결함을 고려한 시간에 따른 강도발현 속도, β_{sc} =시멘트 종류에 따른 상수

2.2 콘크리트 타설 후의 시간의존적 발현강도 추정

현재 국내에서 사용되고 있는 비파괴 강도 추정식 들은 대부분 외국에서 개발된 것으로 우리나라 콘크리트 구조물에 직접 적용하기는 무리가 따른다고 할 수 있다. 특히 시간에 따른 반발도의 변화에 관한 시간 의존적 발현강도의 예측모델은 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 국내 조건에 맞는 시간 의존적 발현강도 추정식의 제안을 목적으로 국내에서 수행된 연구결과를 바탕으로 일반강도 범위에서 물-시멘트비, 재령 및 양생조건에 따른 반발도 및 복합법에 의한 강도와 시간의 영향을 분석하였다. 이에 대한 재령과 반발도 변화에 따른 콘크리트 타설 28일후의 시간 의존적 발현강도 예측모델 식은 다음과 같이 된다.

$$f_{cu}(t) = \left(1 - \frac{2550}{R^{2.56}} \cdot \frac{t-28}{t+61}\right) \cdot f_{ck}(28) \quad (6)$$

여기서, $f_{ck}(28)$: 재령28의 콘크리트의 설계기준강도, R =반발도

따라서 콘크리트 타설 28일후의 초기손상결함을 고려한 시간에 따른 강도발현 속도 $\beta_{cca}(t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$\beta_{cca}(t) = 1 - \frac{2550}{R^{2.56}} \cdot \frac{t-28}{t+61} \quad (7)$$

3. 학문근거적 방법에 의한 조기 품질·시공·유지 판정 모델

3.1 철근부식전의 콘크리트의 품질·시공·유지관리

3.1.1 시간의존적 품질·시공상태 평가

(1) 콘크리트 타설 전의 경우

전절 2.1의 식(3)~식(5)을 이용하여 품질상태지수를 품질손상결함에 의한 콘크리트 압축강도와 원래의 콘크리트 압축강도의 비로 표현하면 시간에 따른 품질상태지수는 다음과 같다.

$$Q_{cbd}(t) = \frac{f_{ckd}(t)}{f_{cko}(t_o)} \quad (8a)$$

$$Q_{cbo}(t) = \frac{f_{ck}(t)}{f_{cko}(t_o)} \quad (8b)$$

여기서, k =배합강도의 증가계수, $f_{ckd}(t)$ =결합시의 시간 의존적 콘크리트 압축강도, $f_{ck}(t)$ =본래의 시간 의존적 콘크리트 압축강도, $f_{cko}(t_o)$ =점검시점의 콘크리트 압축강도, $Q_{cbd}(t)$ =결합시의 품질상태 평가지수, $Q_{cbo}(t)$ =본래의 품질상태 평가지수

(2) 콘크리트 타설 후의 경우

콘크리트 타설 후의 압축강도는 시공상의 손상결함요인 중에서 양생과 경화요인에 의해 가장 영향을 많이 받는다. 따라서 압축강도 함수에 의한 시간에 따른 품질상태 예측은 무엇보다 더 중요한데 현재 콘크리트 타설 후의 품질상태평가는 28일 압축강도 시험 값으로 대신하고, 초기 손상결함을 고려한 품질상태 평가가 이루어 지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 초기손상결함을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 구분하면 콘크리트 타설 후의 품질상태평가(시공상태평가)는 각각 다음과 같이 된다.

$$Q_{sa}(t) = \lambda_{ckd}(1 - k_a \cdot t^2) \quad (9a)$$

$$Q_{sao}(t) = \lambda_{ck}(1 - k_a \cdot t^2) \quad (9b)$$

여기서, λ_{ckd} , λ_{ck} =결합시, 본래시 각각에 따른 강도발현속도의 비 계수, $Q_{sa}(t)$ =초기손상결함을 고려한 품질상태 평가지수, $Q_{sao}(t)$ =초기손상결함을 고려하지 않은 품질상태 평가지수, k_a =상태평가의 손상결함율, q_a = 점검시점의 강도감소계수, t_o = 점검시점(일)

3.1.2 시간의존적 품질·시공성능 평가

(1) 콘크리트 타설 전의 경우

극한 한계상태는 콘크리트 구조물 또는 부재가 파괴 또는 파괴에 가까운 상태로 되어 그 성능을 상실한 상태를 말한다. 이것은 콘크리트 구조물의 최대내력에 해당하는 상태이다. 이 상태는 구조물의 강도와 안전성에 관련된 한계상태이므로, 염해 및 탄산화 등의 환경인자에 의한 열화에 의해서 저항 자체만이 감소하게 된다. 시간에 따른 콘크리트의 압축강도와 압축등가깊이 함수로서 콘크리트 타설 전의 품질성능평가지수는 다음과 같다.

$$Q_{rb}(t) = \frac{R_{bd}(t)}{R_{to}(t_o)} \quad (10a)$$

$$Q_{rbo}(t) = \frac{R_{bo}(t)}{R_{to}(t_o)} \quad (10b)$$

여기서, $Q_{rb}(t)$ =결합시의 품질성능평가지수, $Q_{rbo}(t)$ =본래의 품질성능평가지수, $R_{bo}(t)$ =본래(조치시)의 공칭휨강도, $R_{bd}(t)$ =결합시(무조치 시)의 공칭휨강도, $R_{to}(t_o)$ =점검시점의 공칭휨강도

(2) 콘크리트 타설 후의 경우

콘크리트 타설 후부터 철근부식이 발생하기 전까지는 콘크리트의 품질성능이 철근부식에 의한 철근단면적 감소보다는 콘크리트의 압축강도 및 압축등가깊이의 영향을 더 크게 받게 된다. 콘크리트 타설 후에 유지관리의 조치 유무에 따른 품질성능 저하율 및 품질성능평가지수는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{ra}(t) = \xi_{ckd}(28)(1 - k_{fa} \cdot t^2) \tag{11a}$$

$$Q_{rao}(t) = \xi_{ck}(28)(1 - k_{fao} \cdot t^2) \tag{11b}$$

여기서, $\xi_{ckd}(28)$ =결합시의 재령28일 시간에 따른 강도발현속도, $\xi_{ck}(28)$ =본래의 재령28일 시간에 따른 강도발현속도, k_{fa} = 결합시의 품질성능 저하율, k_{fao} = 본래의 품질성능 저하율, $Q_{ra}(t)$ = 결합시의 품질성능평가지수, $Q_{rao}(t)$ = 본래의 품질성능평가지수

3.2 철근부식후의 콘크리트의 품질·시공·유지관리

현행 도로교시방서나 콘크리트 표준시방서의 극한강도설계에서는 철근 단면적의 감소, 철근 체적의 감소, 손상 및 열화에 의한 저항계수의감소 등에 따른 철근부식의 성능저하를 고려한 설계가 이루어지고 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 점검시점의 공칭저항 휨 강도와 부식철근의 단면적, 체적변화를 및 압축블록의 깊이를 이용하면 철근부식후의 품질상태·성능평가 지수 $Q_{ai}(t)$ 은 다음과 같이 된다.

$$Q_{ai}(t) = R_{ai}(t)/R_{aio} = 1 - [(1 - f_{CR})/t_o^\alpha] \cdot t^\alpha \tag{12}$$

여기서, $f_{CR} = R_{ai}(t_o)/R_{aio}$ = 점검시점의 보유품질상태 및 성능지수, $R_{ai}(t)$ =결합시의 평가지수, R_{aio} =본래의 평가지수, $R_{ai}(t_o)$ =점검시점의 평가지수, t_o = 점검시점, i =품질상태 및 품질성능 함수, α =평가곡선식(0.5, 1, 2차 경우)

4. 확률론적 방법에 의한 조기 품질·시공·유지 판정 모델

4.1 철근부식전의 콘크리트의 품질·시공·유지관리

4.1.1 시간의존적 품질·시공상태 평가

(1) 콘크리트 타설 전의 경우

콘크리트의 품질한계상태에 대한 신뢰성지수를 시간에 따른 품질상태 평가지수와 최적신뢰성지수의 함수로 나타내면, 콘크리트 타설 전의 상태평가에 의한 시간 의존적 품질상태 평가 모델 식은 식(8a), 식(8b)을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta_{sb}(t) = Q_{cbd}(t) \cdot \beta_{opt}(t_o) \tag{13a}$$

$$\beta_{sbo}(t) = Q_{cbo}(t) \cdot \beta_{opt}(t_o) \tag{13b}$$

$$\beta_{opt}(t_o) = \beta_{to} + \beta_e(t_o) \tag{13c}$$

여기서, $\beta_{sb}(t)$ =타설전 결합시의 품질상태 신뢰성지수(안전성지수), $\beta_{sbo}(t)$ =타설전 본래의 품질상태 신뢰성지수, $\beta_{opt}(t_o)$ =점검시점의 최적신뢰성지수, β_{to} =목표신뢰성지수, $\beta_e(t_o)$ =점검시점의 요소신뢰성지수, $Q_{cbd}(t)$ =타설전 결합시의 품질상태 평가지수, $Q_{cbo}(t)$ =타설전 본래의 품질상태 평가지수

(2) 콘크리트 타설 후의 경우

콘크리트의 품질한계상태에 대한 신뢰성지수를 시간에 따른 품질상태 평가지수와 최적신뢰성지수의 함수로 나타내면, 콘크리트 타설 후의 상태평가에 의한 시간 의존적 품질상태 (시공상태)평가 모델 식은 식(9a), 식(9b)을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta_{sa}(t) = Q_{sa}(t) \cdot \beta_{opt}(t_o) \tag{14a}$$

$$\beta_{sao}(t) = Q_{sao}(t) \cdot \beta_{opt}(t_o) \tag{14b}$$

여기서, $\beta_{sa}(t)$ =타설후 결합시의 품질상태 신뢰성지수, $\beta_{sao}(t)$ =타설후 본래의 품질상태 신뢰성지수, $Q_{sa}(t)$ =타설후 결합시의 품질상태 평가지수, $Q_{sao}(t)$ =타설후 본래의 품질상태 평가지수

4.1.2 시간의존적 품질·시공성능 평가

(1) 콘크리트 타설 전의 경우

콘크리트의 품질한계상태에 대한 신뢰성지수를 시간에 따른 품질성능 평가지수와 최적신뢰성지수의 함수로 나타내면, 콘크리트 타설 전의 시간 의존적 품질성능 평가 모델 식은 식(10a), 식(10b)을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta_{rb}(t) = Q_{rb}(t) \cdot \beta_{opt}(t_0) \quad (15a)$$

$$\beta_{rbo}(t) = Q_{rbo}(t) \cdot \beta_{opt}(t_0) \quad (15b)$$

$$\beta_{opt}(t_0) = \beta_{to} + \beta_e(t_0) \quad (15c)$$

여기서, $\beta_{rb}(t)$ =타설전 결합시의 품질성능 신뢰성지수, $\beta_{rbo}(t)$ =타설전 본래의 품질성능 신뢰성지수, $Q_{rb}(t)$ =타설전 결합시의 품질성능 평가지수, $Q_{rbo}(t)$ =타설전 본래의 품질성능 평가지수

(2) 콘크리트 타설 후의 경우

콘크리트의 품질한계상태에 대한 신뢰성지수를 시간에 따른 품질성능 평가지수와 최적신뢰성지수의 함수로 나타내면, 콘크리트 타설 후의 시간 의존적 품질성능(시공성능)평가 모델 식은 식(11a), 식(11b)을 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta_{ra}(t) = Q_{ra}(t) \cdot \beta_{opt}(t_0) \quad (16a)$$

$$\beta_{rao}(t) = Q_{rao}(t) \cdot \beta_{opt}(t_0) \quad (16b)$$

여기서, $\beta_{ra}(t)$ =타설후 결합시의 품질성능 신뢰성지수, $\beta_{rao}(t)$ =타설후 본래의 품질성능 신뢰성지수, $Q_{ra}(t)$ =타설후 결합시의 품질성능 평가지수, $Q_{rao}(t)$ =타설후 본래의 품질성능 평가지수

4.2 철근부식후의 콘크리트의 품질·시공·유지관리

실질적으로 구조적 성능은 확률적 도구를 이용하여, 즉 안전과 신뢰성에 기초한 측면에서 수명을 예측할 수밖에 없다. 이러한 측면을 극복하기 위하여 본 연구에서는 부식철근의 역학적 특성과 신뢰성지수를 동시에 고려한 공용수명에 따른 시간이력 구조저항에 대한 철근부식후의 품질상태·성능신뢰성지수 $\beta_{Qai}(t)$ 은 다음과 같이 된다.

$$\beta_{Qai}(t) = \beta_{Rai}(t)/\beta_{Rai0} = 1 - [(1 - \beta_{fer}/t_0^\alpha) \cdot t^\alpha] \quad (17)$$

여기서, $\beta_{CR} = \beta_{Rai}(t)/\beta_{Rai0}$ = 점검시점의 품질상태 및 성능신뢰성지수, $\beta_{Rai}(t)$ =결합시의 신뢰성지수, β_{Rai0} =본래의 신뢰성지수, $\beta_{ai}(t_0)$ =점검시점의 신뢰성지수, t_0 = 점검시점, i =품질상태 및 품질성능 함수, α =평가곡선식

5. 콘크리트 유지관리를 위한 경제성 분석 모델

5.1 확정적 경제성분석 모델의 정식화

콘크리트의 유지관리를 위한 생애주기비용(LCC)분석은 여러 가지 방법이 있는데 본 연구에서는 초기비용(폐기처분비용포함), 직접 및 간접손실비용으로 구성하여 유지관리조치 횟수에 따라 LCC를 정식화하면 확정론적 경제성분석 모델은 다음과 같이 된다.

$$C_T(t) = C_I + \sum_{\alpha_1}^A (C_R + C_U) \quad (18)$$

여기서, C_I = 초기비용(천원/ m^2), C_R = 직접손실비용(보수·보강·교체비용)(천원/ m^2), C_U = 간접손실비용(도로사용자비용)(천원/ m^2), $C_T(t)$ = 공용년수에 따른 총 생애주기비용(천원/ m^2), 단, t =보수·보강년수이며 $t = \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, A$ 로 된다. α_1 =첫번째의 보수·보강년수, α 의 첨자는 보수·보강횟수를 나타낸다. A =최종보수년수(시기)

5.2 확률적 경제성분석 모델의 정식화

식(18)과 같이 유지관리조치 횟수에 따라 LCC를 정식화하면 확률론적 경제성분석 모델은 다음과 같이 된다.

$$\text{Min}[C_T(t)] = \text{Min}[C_I + E(C_F)] \quad (19a)$$

$$E(C_F) = \sum_{\alpha_1}^A (C_R + C_U)[1 + P_f] \quad (19b)$$

여기서, n =보수·보강 횟수, t_{rn} =보수·보강시기, P_f = 파괴확률[= $\Phi(-\beta)$], β = 신뢰성지수, C_F = 파괴손실 기대비용(천원/ m^2) = (직접손실기대비용+간접손실기대비용)(천원/ m^2)

6. 적용 예 및 고찰

6.1 대상 콘크리트구조물의 조기품질상태 및 성능평가 결과

대상 콘크리트구조물은 문헌·1)에서 제시된 바와 같이 철근콘크리트 T형교이며 설계하중은 DB-13.5인 2등급교이다. 콘크리트의 품질과 시공관리상의 초기손상결함요인은 콘크리트구조물의 균열평가기법 및 보수·보강 전문시방서(건설교통부,1999)에서 사용한 균열과 누수제어시스템의 14가지 재료상 손상요인과 13가지 시공상 손상요인으로 레미콘 타설 전 후의 조기품질상태와 성능에 대한 내구성 평가를 평가하였다. 본 연구에서 사용하는 초기손상결함의 분석은 인공신경망 및 퍼지이론을 접목하여 전문가의 주관적인 판단에 의한 데이터로 평가하는 기존의 결함분석의 객관화 시키지 못하는 평가에 대한 문제점을 극복하였다. 대상구조물의 균열과 누수제어시스템의 데이터를 이용하여 Matlab에 의한 CAQC 및 CAQB프로그램으로 추론한 결과, 재료상 손상요인과 시공상 손상요인의 초기손상결함 등급이 공히 $x = 0.6044$ 로서 "C급"으로 판단되었다. 따라서 콘크리트구조설계기준(확정론적 방법)에 의해 콘크리트 구조물의 레미콘 타설 전·후에 대한 압축강도, 공칭휨강도, 상태지수, 성능지수를 산정하여 표 1 및 그림 1, 2에 나타냈다.

표 1. 철근부식전 레미콘의 품질상태 및 성능평가(확정론적 방법) 결과

구분	레미콘 타설 전				레미콘 타설 후			
	압축강도	공칭휨강도 ($\times 10^7$)	상태지수	성능지수	압축강도	공칭휨강도 ($\times 10^7$)	상태지수	성능지수
본래시	170.688	2.24981	1.000	1.000	244.367	2.27368	1.432	1.011
점검시	144.119	2.03702	0.844	0.905	193.339	2.05878	1.133	0.915
한계시	145.085	2.03759	0.850	0.906	207.712	2.06319	1.217	0.917

• 레미콘 타설 후: 재령28일 기준, 점검시=결합시의 추정치임

현재까지 레미콘의 불합격 조치에 대한 규정은 KS F4009의 경우 언급이 없고, 다만 [KS 표시인증 공장심사] 규정에는 인증정지 및 취소에 대해서만 정하고 있다. 즉 3회 시험결과의 압축강도가 100% 이상이면 합격, 85%이하 이면 KS인증취소(치명결함), 85%초과 100%미만 이면 3개월 KS인증정지(중결함)로 규정하고 있다. 그리고 2003년도 개정 콘크리트표준시방서(콘크리트학회)의 [3.8 압축강도에 의한 콘크리트의 품질검사에] 의하면, 레미콘의 불합격 조치는 3회 연속한 압축강도의 시험값의 평균이 설계기준강도에 미달하는 확률이 1% 이하라야 하고 또한 각각의 압축강도 시험값은 설계기준강도보다 3.5 MPa에 미달하는 확률이 1% 이하인 것을 규정하고 있다. 본 연구에서는 위에서 언급한 [KS 표시인증 공장심사] 규정과 개정 시방서(2003년도)의 콘크리트의 품질검사에 대한 규정을 병행한 시간의존적 압축발현강도의 조기관정시스템을 개발하였다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트의 조기품질판정기준을 품질상태·성능 및 신뢰성지수프로파일의 추정치로 본래시의 추정치 < 점검시의 추정치 이면 무결함(품질상태·성능등급 A: 합격)이고, 본래시의 추정치 < 점검시의 추정치 < 한계시의 추정치 이면 경결함(품질상태·성능등급 B: 주의요)이고, 점검시의 추정치 < 한계시의 추정치 이면 중대 및 치명결함(품질상태·성능등급 C, D, E: 불합격)으로 품질상태·성능등급 C인 경우는 축정빈도 배가 및 감시체계강화, 품질상태·성능등급 D인 경우는 공사중단 및 품질·시공·안전대책 실시, 품질상태·성능등급 E인 경우는 구조물폐쇄로 규정하였다.

표 2. 철근부식전 레미콘의 품질상태 및 성능평가(신뢰성 및 확률론적 방법) 결과

구분	레미콘 타설 전				레미콘 타설 후			
	내구신뢰성지수		내구파괴확률		내구신뢰성지수		내구파괴확률	
	품질상태	품질성능	품질상태	품질성능	시공상태	시공성능	시공상태	시공성능
본래시	3.33428	3.33428	0.0004276	0.0004276	4.77354	3.36967	9.0619e-7	0.0003763
점검시	2.81528	3.01893	0.0024368	0.0012684	3.77675	3.05118	7.9471e-5	0.0011398
한계시	2.83414	3.01978	0.0022975	0.0012648	4.05751	3.05771	2.4812e-5	0.0011152

• 레미콘 타설 후: 재령28일 기준
• 점검시=결합시의 추정치임

현행 건설교통부의 공용수명 연장방안에 사용되는 LCP(Life Cycle Activity Profile)의 접근방식에서는 철근부식 전의 콘크리트의 조기품질상태와 품질성능을 전혀 고려하지 않고 형식적인 준공검사의 품질상태·성능상태의 외관상태등급을 적용하고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 본 연구에서는 콘크리트 구조요소의 시각적인 측면의 초기열화상태와 초기구조성능을 동시에 고려하는 신뢰성에 기초한 신뢰성지수프로파일(Reliability Index Profile: RIP)로 품질상태 및 성능평가 결과를 분석하면 표 2와 그림 3과 같이 된다.

표 3. 철근부식후 레미콘의 품질상태 및 성능평가 결과

구분	확정론적 방법				신뢰성 및 확률론적 방법			
	압축강도	공칭휨강도(× 10 ⁷)	상태평가	성능평가	내구신뢰성지수		내구파괴확률	
					상태평가	성능평가	상태평가	성능평가
본래시	195.459	2.08133	0.891820	0.915400	4.20430	3.00218	1.3102e-5	0.0013404
점검시	154.643	1.86939	0.705593	0.822185	3.32637	2.65357	0.0004399	0.0039823
한계시	166.140	1.87339	0.758047	0.823946	3.57366	2.67011	0.0001761	0.0039058

◦ 점검시=결합시의 추정치임

표 1, 2, 3에서와 같이 철근부식 전 및 후의 압축강도, 공칭휨강도, 상태지수, 성능지수의 추정치와 내구신뢰성지수의 추정치가 공히 점검시(결합시)의 추정치 < 한계시의 추정치이므로 품질상태 및 내구 성능이 불합격판정(C등급)로 품질관리조치(추정빈도 배가 및 감시체계강화 요망)가 필요한 상태이다. 그리고 레미콘 타설 후 28일의 압축강도, 공칭휨강도, 시공상태 및 성능지수의 추정치 또한 점검시(결합시)의 추정치 < 한계시의 추정치이므로 품질상태 및 내구성능 판정이 불합격(C등급)으로 시공관리조치(추정빈도 배가 및 감시체계강화 요망)가 필요한 상태이다. 이상의 결과로부터 본 연구의 품질상태 및 성능의 조기판정에 대한 제어시스템은 레미콘 타설 전에 초기의 재료상요인, 배합상요인을 미리 차단함으로써 건설한 레미콘제품의 품질향상에 기여할 수 있다. 그리고 레미콘 타설 후의 시공상요인을 면밀히 검토하여 레미콘 타설 후의 품질향상을 촉진시킴으로써 부실공사의 사전방지에 기여할 수 있다고 판단된다.

6.2 대상 콘크리트구조물의 경제성분석(LCC) 결과 비교

1) 외관상태등급에 따른 신뢰성평가 및 잔여수명평가

외관상태등급 C등급(x= 0.6044)에 따른 신뢰성지수는 2.312(현시점등급), 2.719(최소등급), 2.503(평균등급), 2.273(최대등급) 이고, 파괴확률은 0.0012(현시점등급), 0.0033(최소등급), 0.0061(평균등급), 0.0115(최대등급) 이므로 나타났다, 유지관리조치 후의 잔여수명은 27.5(현시점등급), 33.6(최소등급), 29.7(평균등급), 27.1(최대등급) 정도 연장될 수 있다고 판단된다. 따라서 본 연구의 신뢰성 및 잔여수명 평가 분석은 외관상태등급의 손상영향인자와 잔여수명의 영향인자를 복합적으로 고려한 보다 정량화된 잔여수명평가 방법으로써 현행 전문가집단의 조사결과를 활용하여 산정한 건설교통부의 상태평가 곡선에 의한 잔여수명평가 방법 보다 신뢰할 수 있는 방법이라 판단된다.

표 4. 외관상태등급에 따른 유지관리조치시기 평가 결과 분석 비교

구분		유지관리조치시기(년)			
		점검시점의 외관상태등급			
		현시점	최소	평균	최대
예방유지관리	1차 조치시기	10	10	10	10
	2차 조치시기	19.4103	25.9794	21.8209	19.0119
	3차 조치시기	48.8426	47.6907	48.4199	48.4199
	4차 조치시기	70.6852	68.3813	69.8398	70.8250
사후유지관리	1차 조치시기	-	-	-	-
	2차 조치시기	27	27	27	27
	3차 조치시기	48.8426	47.6907	48.4199	48.4199
	4차 조치시기	70.6852	68.3813	69.8398	70.8250

2) 외관상태등급에 따른 유지관리조치시기 평가

표 4는 외관상태등급에 따라 유지관리조치시기를 예방유지관리와 사후유지관리 방법으로 비교 평가 분석한 것이다. 예방유지관리의 2차 조치시기가 최소인 경우 25.9년, 평균인 경우 21.8년, 최대인 경우 19.0년으로 상당한 차이를 두고 있다. 이는 같은 외관상태 C등급에서도 외관상태지수가 낮을수록 유지관리조치시기가 연장됨을 알 수 있었다. 따라서 콘크리트 구조물의 외관등급상태를 조기에 예측하여 적절한 유지관리조치를 취함으로써 유지관리에 필요한 보수보강 및 교체비용의 절감효과를 가져올 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 LCC분석기법을 실무에 보급하면, LCC분석의 고려요소(할인율, 수명, 비교시점 등) 및 분석방법을 통일시킬 수 있고, 모든 형식의 콘크리트구조물에 대한 비용 데이터를 제시할 수 있으며, 현재 한국도로공사에서 보급한 LCC산출 프로그램(Excel 형식)보다 설계자의 혼선을 줄일 수 있다.

그리고 본 연구의 LCC분석을 통하여 관리자의 투자비용의 절감이 주요 요구인 관리주체의 경우는 관리자이익이 최대가 되는 대안을 선택할 수 있으며, 콘크리트 구조물의 사용자이익을 극대화시키고자 하는 관리주체의 경우에는 사용자 이익이 최대인 조치를 선택할 수 있다. 기본적으로 프로그램은 비용당 유지관리비가 가장 작은 대안으로 경제적인 대안으로 선택함이 바람직하다고 본다.

3) 외관상태등급에 따른 경제성분석(LCC) 평가

표 5와 그림 4는 유지관리수준별로 생애주기에 소요되는 모든비용을 입력하여 대상 콘크리트구조물의 LCC산정결과에 대한 총생애주기비용(TLCC) 결과를 보여주고 있다. 이에 따르면 총 LCC는 예방 유지관리수준의 경우 3656.65천원/m²(현시점)으로서 사후유지관리수준의 경우 4283.06천원/m²(현시점)보다 전체적인 총비용 면에서 626.41천원/m² 더 저렴함을 알 수 있으며, 이는 14.63%의 절감효과를 갖는다.

표 5. 외관상태등급에 따른 생애주기비용(LCC) 평가 결과 분석 비교

구 분		생애주기비용 평가(천원/m ²)			
		점검시점의 외관상태등급			
		현시점	최소	평균	최대
예방유지관리	1차 조치시기	1958.91	1744.12	1861.16	1978.20
	2차 조치시기	2524.83	2095.24	2329.32	2563.40
	3차 조치시기	3090.74	2446.36	2797.48	3148.60
	4차 조치시기	3656.65	2797.48	3265.84	3733.80
사후유지관리	1차 조치시기	-	-	-	-
	2차 조치시기	2356.35	1990.71	2234.57	2389.19
	3차 조치시기	3319.71	2588.42	3076.14	3385.37
	4차 조치시기	4283.06	3186.14	3917.71	4381.56

다음에는 유지관리전략상 보수수준인 외관상태등급 C등급에 따라서 총LCC가 어느정도의 차이를 보이고 있는가를 파악하기 위하여 예방유지관리의 경우로 현시점등급(x= 0.6044), 최소등급(x= 0.375), 평균등급(x= 0.50), 최대등급(x= 0.625)에 대한 총LCC 산정결과를 보여주고 있다. 그 결과 3656.65천원/m²(현시점), 2797.48천원/m²(최소), 3265.83천원/m²(평균), 3733.80천원/m²(최대)과 비교할 때 최소 외관등급수준이 가장 경제적임을 보여주고 있다. 이는 현행 한국도로공사에서는 유지관리전략상 외관상태 등급에 관계없이 전문가의 주관적 판단에 의해 유지관리조치와 경제성분석(LCC)이 행해지고 있는데 반하여 본 연구의 유지관리전략은 초기손상과 열화요인을 반영한 외관상태등급을 정량적으로 세분화함으로써 보다 정확하고 합리적인 유지관리전략을 세울 수 있고 판단된다.

7. 결 론

본 연구에서는 보다 체계적이고 합리적인 콘크리트의 품질·시공·유지관리의 조기관정을 확정적 방법 및 신뢰성적 방법 모델을 제시하였고, 인공지능기술 이론을 도입하여 초기손상 및 열화요인을 반영한 조기관정시스템에 관한 기초연구의 일환으로 실제 신뢰성지수프로파일로 시간의존적 품질상태·성능평가와 경제성 분석방법을 제시하였다. 따라서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 최근 각 지방단체에서 [건설공사의 부실시공 사전방지를 위한 조례]를 제정하고, 건설교통부에서는 [건설공사 사전안전성 평가제도의 관련법령을 개정하여 2005년 하반기부터 이 제도를 실시할 방침]이나 건설공사의 부실공사 사전방지 및 건설공사의 사전안전성 평가에 대한 조례와 법령만 만들어져 있을 뿐 프로그램이 전문한 상태이므로 본 연구의 확률적 방법과 신뢰성방법에 기초하여 개발한 신뢰성프로파일을 이용한다면, 콘크리트 품질·시공·유지관리의 조기관정시스템은 각종 건설공사의 부실공사 방지와 사전안전성평가 제도에 유용하게 활용될 수 있다고 판단된다.

2) 일반적으로 콘크리트구조물의 LCC분석을 위한 비용분류구조는 NIST에서 개발한 교량LCC분석 프로그램인 Bridge LCC 1.0에서 사용하였던 LCC비용분류구조가 주로 사용되어지고 있으나 콘크리트 구조물의 초기손상 및 열화요인을 고려한 외관상태등급의 비용분류구조를 체계적으로 제시하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 Matab프로그램을 이용하게 되면 콘크리트 구조물의 초기손상 및 열화현상을 고려한 외관상태등급의 비용분류구조를 체계적으로 제시할 뿐만 아니라 기본적으로 계획 및 설계시 대상 콘크리트 구조물의 공용수명동안의 구조형식별, 구성요소별 LCC를 산정하여 설계의 타당성을 검토하거나, 설계 VE를 수행하기 위한 기본도구로 활용 가능하게 된다.

참고문헌

1. 김종길·손용우·이중빈·안영기, “교량구조물의 유지관리를 위한 신뢰성해석 모델”, 한국구조물진단학회 논문집, 제8권 제3호, 2004, 7, pp 251-261.
2. 김종길·손용우·이중빈·이채규·안영기, “성능평가를 고려한 철근콘크리트교의 경제성 분석”, 한국구조물진단학회 가을 학술발표회 논문집, 제7권 제1호, 2002, pp 119-130.
3. 건설교통부, “콘크리트 구조물의 균열평가기법 및 보수보강 전문시방서의 개발,” 1999. 12.
4. 건설교통부, “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(교량),” 2002.12.
5. 한국도로공사, “고속도로교량의 구성요소별 생애주기비용(LCC)분석 연구,” 2002. 12

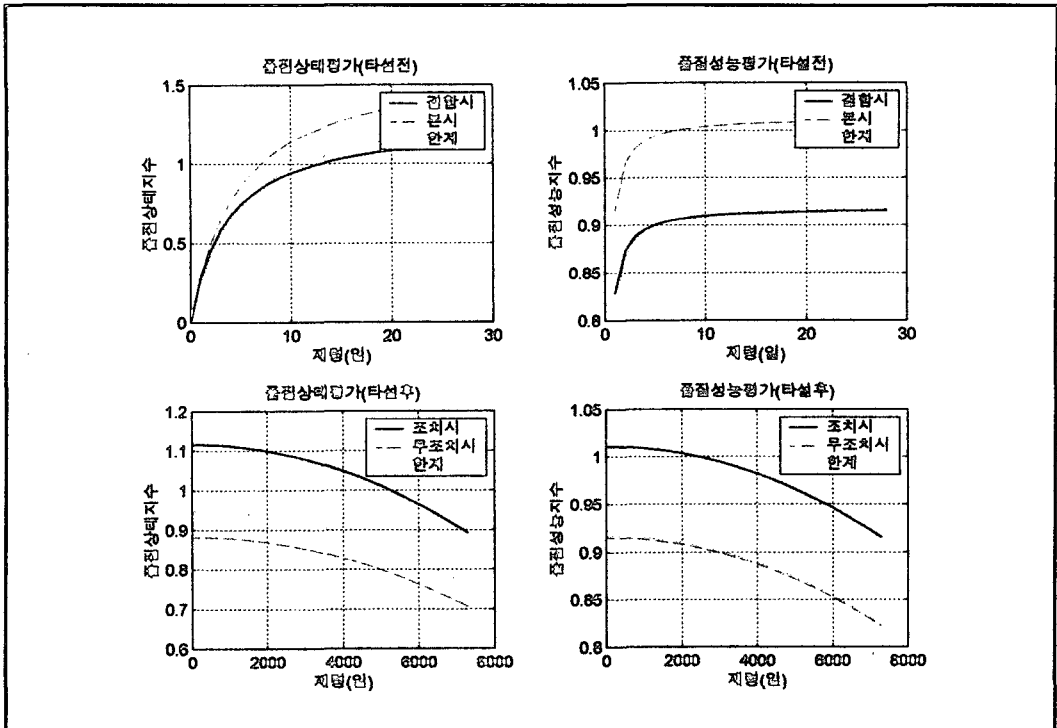


그림1. 레미콘타설 전·후의 점진상태 및 성능평가(확정론적 방법)

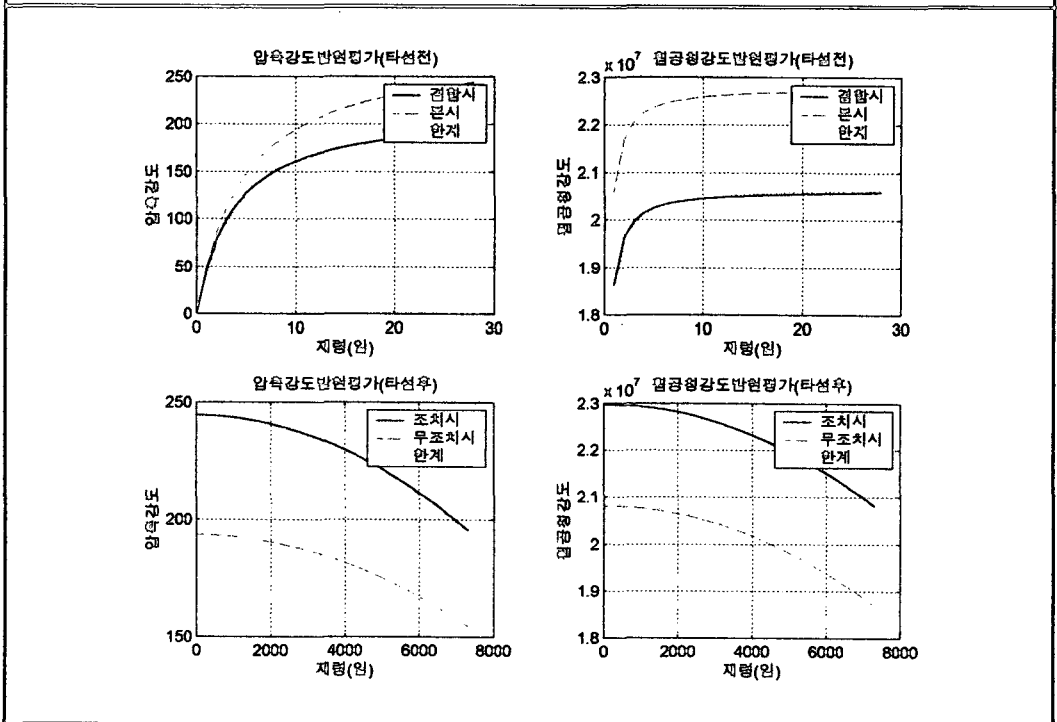


그림2. 레미콘타설 전·후의 압축발현강도 및 휨강도평가(확정론적 방법)

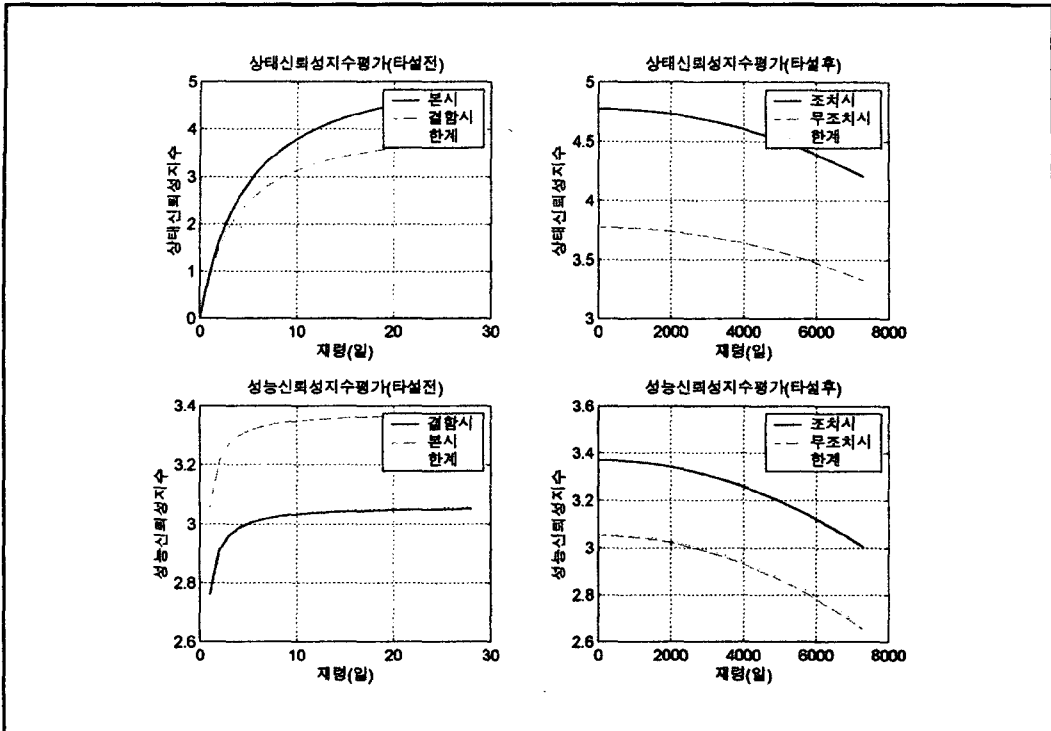


그림3. 레미콘타설 전·후의 품질상태 및 성능평가(확률론적 방법)

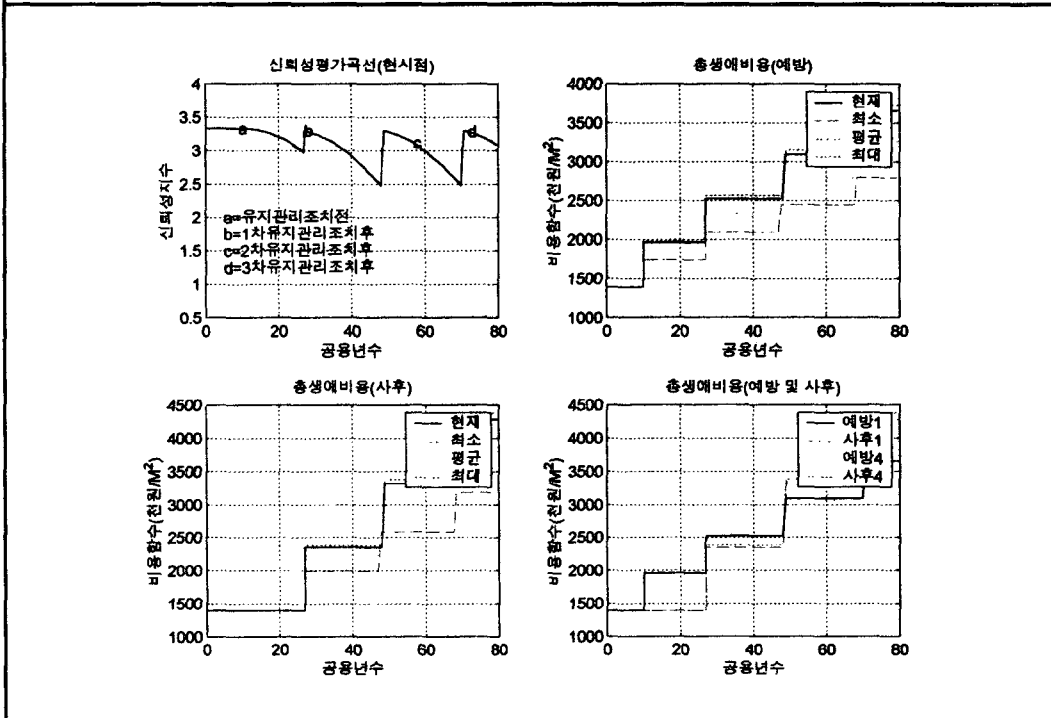


그림4. 외관상태등급에 따른 신뢰성 프로파일 및 생애주기비용분석