

한국형 포장설계법에 사용된 콘크리트 물성의 수정 및 보완

Estimation of Concrete Strength Properties in Concrete Pavement

양 성 철* · 이 창 준** · 김 연 복*** · 이 성 준**** · 임 광 수*****

Yang, Sung Chul · Lee, Chang Joon · Kim, Yeon Bok · Lee, Sung jun · Lim, Kang Soo

1. 서 론

한국형 포장설계법에 입력변수로서 사용되는 콘크리트 재료 물성들은 비교적 단 시간에 측정하기 용이한 것(예-압축강도)과 장시간의 정밀한 측정이 요구되는 것(예-건조수축변형률)이 있다. 콘크리트 포장 설계를 위해서는 설계자들이 이들 재료 물성을 모두 실험하는 것이 원칙이나, 실험의 정밀도, 비용, 시간 등 여러 가지 어려움이 있어, 한국형 포장설계법에서는 국내에서 사용하고 있는 대표적인 재료를 이용하여 실험을 수행한 후 이들 결과를 데이터베이스화 하여 제공하고 있다.

본 연구에서는 콘크리트 물성에 가장 크게 영향을 미치는 요소를 살펴본 후 이를 근거로 실내실험을 수행하였다. 실험을 통해 얻은 결과를 포장설계법 프로그램에 사용한 후 물성 데이터의 보정이 필요하여, 쪼갬 인장강도 및 탄성계수는 상관관계식을 이용하여 직접 구한 결과와 산술평균의 개념을 적용하여 최종 수정 보완하는 과정이 수반되었다. 그리고 건조수축에 대한 모델식을 제공하였다.

2. 콘크리트 물성 영향인자

일반적으로 콘크리트 기초물성에 영향을 주는 인자로는 사용된 콘크리트 배합구성 물질, 재령, 온도, 습도 등으로 다음의 상관관계로 표현할 수 있다. 배합구성 물질 중에서는 시멘트량 또는 W/C가 콘크리트의 기본 강도에 가장 영향을 미치는 것으로 알려진다.

$$\text{기본 강도} = \text{기본 강도(시멘트량, W/C, 골재, 재령, 온도, 습도, 기타)}$$

한편, 콘크리트 열팽창계수에 영향을 주는 주요 인자로는 골재, 습도 등으로서 다음의 상관관계로 표현할 수 있다. 강도는 콘크리트 열팽창계수에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 파악된다.

$$\alpha = \alpha(\text{골재, 습도, 기타})$$

그리고 콘크리트 건조수축에 영향을 주는 주요 인자로는 부재크기, 골재, 재령, 온도, 습도 등으로 다음의 상관관계로 표현할 수 있다. 특히 콘크리트 배합구성 물질 중 골재는 건조수축에 가장 크게 영향을 미치는 요소로서 ACI나 CEB-FIP 건조수축 예측식에서 강조되고 있다. 이는 골재의 기본 특성 중 흡수율이나 비중 특성이 콘크리트 구조물의 부피변화(건조수축 및 열팽창계수)에 영향을 미치며 특히 외부에 직접적으로 노출되는 콘크리트 포장에 영향을 많이 미치는 것으로 이해된다.

마지막으로 콘크리트의 피로에 영향을 미치는 인자로는 공기량, 골재로서 보고된다. 공기량이 부족하면 내구성이 떨어지는 것으로 이해된다. 콘크리트 구성 물질 중 피로에 가장 많이 영향을 미치는 것이 조골재로서 알려지고 있다. W/C는 영향이 크지 않은 것으로 보고되고 있다.

* 정회원 · 홍익대학교 건축공학부 부교수 · 공학박사(E-mail:scyong@hongik.ac.kr) -발표자
** 정회원 · 한국건설기술연구원 · 도로연구실 선임연구원 · 공학박사(E-mail:cjlee4@kict.re.kr)
*** 정회원 · 한국건설기술연구원 · 도로연구실 책임연구원 · 공학박사(E-mail:ybkim@kict.re.kr)
**** 정회원 · 국토해양부 간선도로과 과장(E-mail:sungjlee@mltm.go.kr)
***** 정회원 · 국토해양부 간선도로과 서기관(E-mail:lim579@mltm.go.kr)



$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cs}(\text{부재크기, 골재, 재령, 온도, 습도, 기타})$$

$$\text{fatigue} = \text{fatigue}(\text{공기량, 골재, W/C, 기타})$$

한국형 포장설계법의 입력변수로 사용되는 콘크리트 재료물성의 DB를 구축함에 있어 위에 언급된 모든 영향인자에 대한 실험을 수행할 수가 없었다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 배합을 결정함에 있어 콘크리트의 기본강도, 열팽창계수, 건조수축, 피로특성을 모두 감안할 때 포장용 콘크리트 물성에 가장 크게 영향을 미치는 요소는 조골재임이 파악되었다.

3. 콘크리트 배합설계

콘크리트 물성은 조골재(화강암, 석회암, 사암) 및 세골재(자연사, 세척사, 부순 모래)를 변수로 하여 실험을 수행하였으며 한국도로공사 중부내륙고속도로 제 1공구에 사용되었던 포장용 콘크리트의 배합설계를 기준으로 하였다. '02-'04년도 및 '06-'07에 수행된 배합설계는 시멘트량이 골재에 따라 다소 차이가 있었으며 배합은 다음 표 1과 같다. 먼저 배합설계는 시멘트량이 315~340kg/m³이 사용된 보통 강도용 콘크리트 배합과 375kg/m³이 사용된 고강도 배합으로 구분된다. 보통 배합 콘크리트는 먼저 자연사와 조골재를 달리한 콘크리트 배합에 대한 실험을 수행하였고(1단계) 화강암과 세골재를 달리한 콘크리트 배합에 대한 실험을 수행하였다(2단계). 그리고 고강도 콘크리트 배합에서는 화강암의 조골재 및 자연사가 사용되었다(3단계). 다음 표 2는 실험 및 분석에 사용된 배합기호이다.

표 1. 1m³당 콘크리트 배합설계

배합 구분	굵은 골재 최대입경 (mm)	공기량 (%)	단위 수량 (kg)	단위 시멘트량 (kg)	물-시멘트비 (%)	절대 잔골재율 (%)	단위 잔골재량 (kg)	단위 굵은 골재량 (kg)	단위 AE표준 감수제 (g)	고성능 감수제 (g)
보통	32	4.4~5.0	132~144	315~340	41.0~45.7	37.7~44.7	682~822	1,073~1,192	510~988	-
고강도	32	3.5~4.0	135	375	36.0	39.0~40.0	694~736	1,130~1,149	26	2,603

표 2. 실험에 사용된 콘크리트 배합

구분	1 단계			2 단계			3 단계	
배합기호	화강암	석회암	사암	NS330	WS330	CS330	NS370	WS370
조골재 종류	화강암	석회암	사암	화강암			화강암	
세골재 종류	자연사			자연사	세척사	부순 모래	자연사	세척사
시멘트량	340	315	315	322	329	329	375	375

4. 콘크리트 강도 및 탄성계수 실험결과 및 수정 보완

4.1 콘크리트 강도 및 탄성계수 예측식

콘크리트의 강도 및 탄성계수에 대하여 제시된 예측식은 다음의 기본 강도식을 사용하였다. 이 식은 ACI Committee 209에서 제시한 정량화식으로서 각 시험항목의 28일 값을 기준으로 회귀분석을 통해 재료 상수 값 a, b를 결정하게 된다. 여기서 A(t)는 재령 t에서의 강도 또는 탄성계수이며, A₂₈의 숫자는 재령

28일을 의미한다.

$$A(t) = A_{28} \times \{t / (a + b \times t)\}$$

4.2 콘크리트 강도 및 탄성계수 상관관계식

콘크리트 강도간의 상관관계식 및 탄성계수와 압축강도는 일반적으로 다음과 같은 식을 사용한다.

$$f_a = c \times f_b^n$$

여기서 f_a , f_b 는 상관관계를 갖고 있는 각각의 강도 또는 탄성계수이며, c 및 n 은 재료상수를 의미한다. 물성간의 상관관계식에서 $n=0.5$ 이외의 관계식이 실험 데이터에 더 적합할 수 있지만, 현 단계에서는 가장 손쉽게 사용되는 제공근의 공식을 사용하고자 한다. 다음 표 3에는 물성간의 상관관계식을 kgf/cm^2 단위와 MPa 단위로 각각 표현하였다.

표 3. 콘크리트 강도 및 탄성계수간의 상관관계식

항목	kgf/cm^2 단위	MPa 단위	R^2
압축강도→휨강도	휨강도= $2.508 \times (\text{압축강도})^{0.5}$	휨강도= $0.7851 \times (\text{압축강도})^{0.5}$	0.867
압축강도→조깅인장강도	조깅인장강도= $1.895 \times (\text{압축강도})^{0.5}$	조깅인장강도= $0.5932 \times (\text{압축강도})^{0.5}$	0.633
휨강도→조깅인장강도	조깅인장강도= $0.757 \times (\text{휨강도})$	조깅인장강도= $0.757 \times (\text{휨강도})$	0.950
압축강도→탄성계수	탄성계수= $15,870 \times (\text{압축강도})^{0.5}$	탄성계수= $4968.1 \times (\text{압축강도})^{0.5}$	0.859

4.3 수정 및 보완 원칙

'02-'04년도 및 '06-'07년도에 제시된 물성 예측식이 구조해석 과정에서 상당히 민감한 결과로 나타났다. 특히 휨강도의 결과가 조골재 배합별로 10% 이상 차이가 나는 것으로 분석되었다. 이는 물론 실험실에서 작성된 콘크리트 피로 수명식이 휨강도의 변화에 매우 민감하게 나타난 결과이긴 하지만 재령별로 수행된 콘크리트 재료물성 실험과정에서 빈번히 발생하는 문제이다. 일반적으로 조깅인장강도와 탄성계수는 실험방법 및 계측상 결과가 분산되는 경향이 있기에 물성간의 상관관계식을 사용하여 다음과 같이 보정하였다.

- 압축강도 및 휨강도로부터 조깅인장강도를 환산하여 구한 예측 값과 직접 구한 실험결과에 대해 산술평균을 적용하여 보정하였다.
- 압축강도로부터 환산하여 구한 탄성계수와 직접 구한 실험결과에 대해 산술평균을 적용하여 보정하였다.

4.4 수정 보완된 실험 결과

다음 그림 1-4는 콘크리트 압축강도, 휨강도, 조깅인장강도, 탄성계수 실험결과를 각각 정리하였다. 화강암 배합은 총 4회에 걸쳐 실험되었고 특히 '06-'07년도에는 잔골재로서 자연사, 세척사, 부순 모래를 변수로 하였다. 전체적으로 약 10%이내에서 골재별 강도 및 탄성계수 차이의 특성을 보인다.

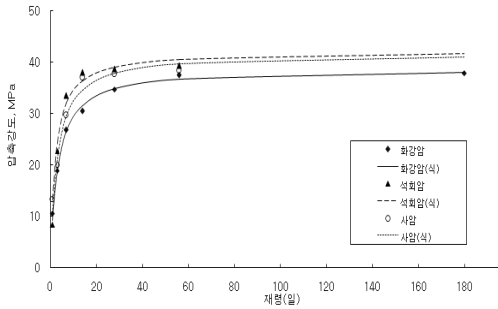


그림 1. 골재별 재령에 따른 압축강도

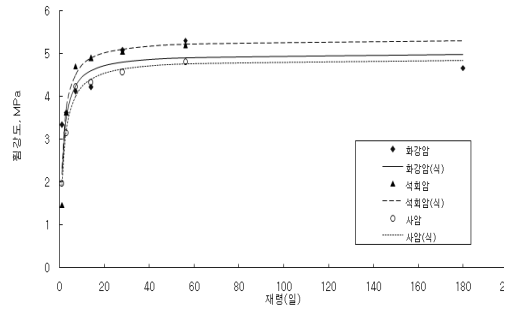


그림 2. 골재별 재령에 따른 침강도

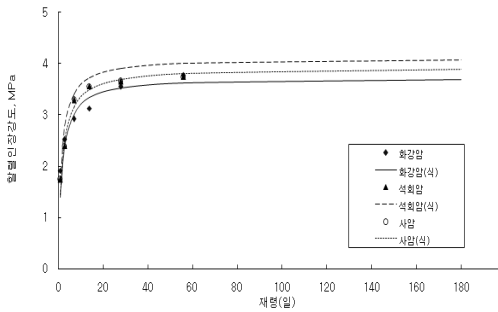


그림 3. 골재별 재령에 따른 조깅인장강도

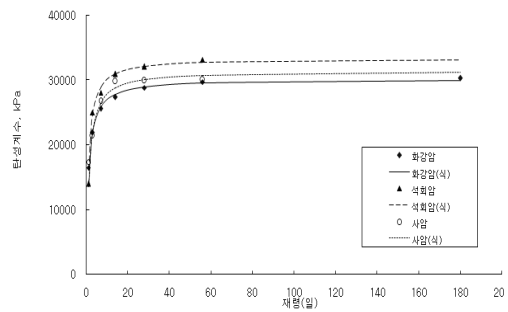


그림 4. 골재별 재령에 따른 탄성계수

5. 콘크리트 건조수축 실험 결과

다음 그림 5-8은 석회암, 사암 및 화강암(시험도로) 콘크리트 시편에 대한 건조수축 변형률 실험결과를 보여준다. 본 연구에서는 형상비(Volume/Surface, V/S)에 따른 골재별 콘크리트의 건조수축을 측정하였다. 그림 9에는 화강암 콘크리트에 대한 형상비별 건조수축을 비교하였다. 전체적으로 포장용 콘크리트에 해당되는 형상비가 클수록 건조수축이 작아짐을 보여준다.

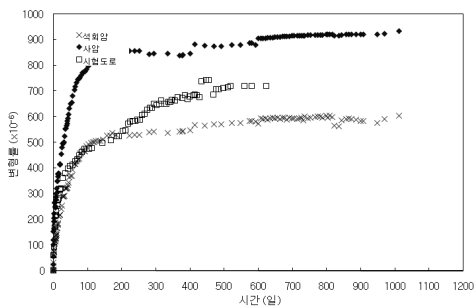


그림 5. 골재별 건조수축(V/S=22.2mm)

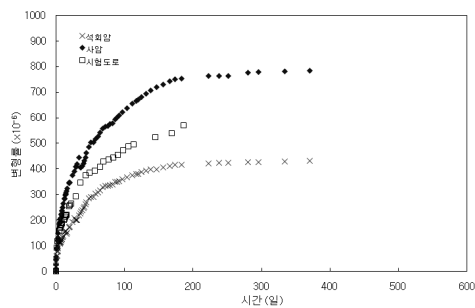


그림 6. 골재별 건조수축(V/S=40mm)

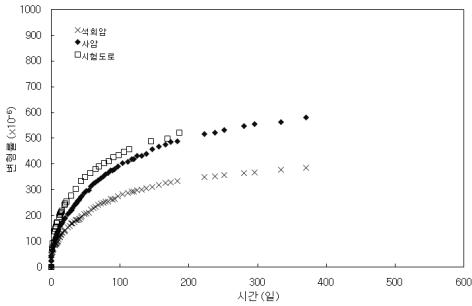


그림 7. 골재별 건조수축(V/S=85.7mm)

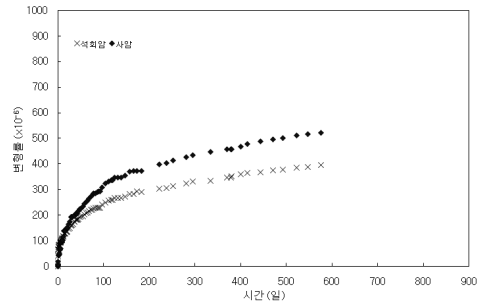


그림 8. 골재별 건조수축(V/S=200mm)

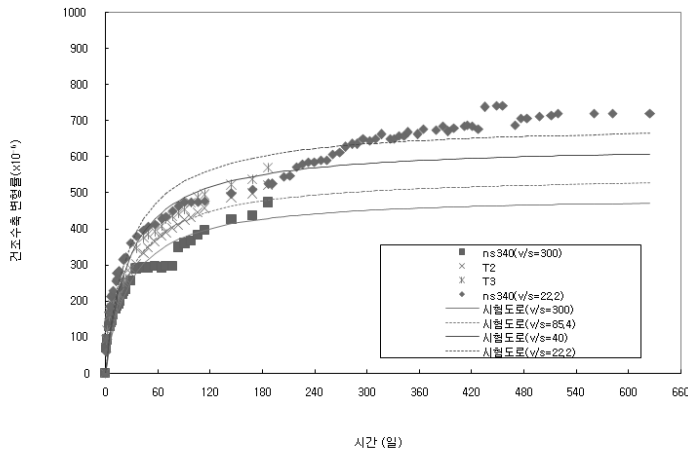


그림 9. 화강암 콘크리트의 건조수축 변형률 및 예측식

형상비에 따른 건조수축 측정결과를 가지고 재령(t)과 형상비(V/S)를 변수로 한 다중 비선형 회귀분석을 수행한 결과, 현행 ACI 건조수축 모델식 형태의 $\frac{a_1 t}{a_2 + t} \times \exp(-a_3 V/S)$ 보다는 크리프의 모델식 형태인

$\frac{a_1 t}{a_2 + t} \times [1 + a_3 \exp(-a_4 V/S)]$ 예측식이 더 큰 상관관계가 있었다. 다음의 표 4에 상수를 모델식에 적용하면 석회암, 사암, 화강암 배합을 사용한 콘크리트 시편의 형상비를 고려한 재령별 건조수축 변형률($\times 10^{-6}$)을 예측할 수 있다.

표 4. 건조수축 모델식에 사용되는 상수(수정 및 보완)

배합	a_1	a_2	a_3	a_4	R^2
석회암	362.9	36.71	1.613	0.0372	-
사암	431.7	33.30	2.204	0.0194	-
화강암	491.7	27.43	0.635	0.01956	0.960



6. 결 론

1. 한국형 포장설계법의 입력변수로 사용되는 콘크리트 배합을 결정함에 있어 콘크리트의 기본강도, 열팽창계수, 건조수축, 피로특성을 모두 감안할 때 포장용 콘크리트 물성에 가장 크게 영향을 미치는 요소는 조골재임이 파악되었다.
2. 일반적으로 쪼갬인장강도와 탄성계수는 실험방법 및 계측상 결과가 분산되는 경향이 있기에 물성간의 상관관계식을 사용하여 직접 구한 실험결과와의 산술평균을 적용하여 최종 보정하였다.
3. 골재별 형상비에 따른 콘크리트에 대한 건조수축실험을 통해 건조수축 모델식을 수정 보완하여 제시하였다. 사암이 흡수율에 따른 골재특성상 건조수축이 가장 크게 발생하였고 석회암이 가장 작게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국형 포장설계법 과제의 일환으로 국토해양부의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김연복 등, 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구, 설계입력변수 정량화, 국토해양부, 2008. 8.
2. F.W Klaiber and D. Lee, "The effect of air content, water-cement ratio, and aggregate type on the flexure, fatigue strength of plain concrete," Fatigue of Concrete Structures, SP-75, American Concrete Institute, 1982., pp.71-110.
3. S. Mindess, J.F. Young, D. Dawin, Concrete, 2nd Ed, Prentice Hall, 2003.