

재령에 따른 포장용 콘크리트의 강도특성 예측식 개발

Development of Model Equations for Strength Properties with Age in Concrete Pavement

양성철* · 권수안** · 임유진***

Yang, Sung Chul · Kwon, Su Ahn · Lim, Yu Jin

Abstract

This study was carried out to find reliable relations between various concrete strength properties which are used as input data in concrete pavement design program. Concretes were made from different sources of coarse grained(granite, limestone and sandstone) and fine grained aggregates such as natural sand, washed sand and crushed sand. From strength test results, model equations were obtained based on the relation between strengths. For each coarse grained aggregate, models for compression-flexural strengths, compression-split tensile strengths, compressive strength-modulus and flexural-split tensile strengths with age were obtained. For concrete mixed with gneiss granite aggregates, concrete strengths were obtained from numerical mean values of concrete strengths mixed with fine grained aggregates. In addition models for concrete split tensile strengths and modulus values were provide by averaging numerically the estimated values obtained from the derived relationship and the experimental values. This is due to more scattered values of split tensile strengths and modulus values than other strength properties. Finally criteria for drying shrinkage strain as well as Poisson's ratio for concrete used in pavement were presented for all mixes with differed coarse grained aggregates.

Key words : material properties, strength, modulus, Poisson's ratio, drying shrinkage

요 지

본 연구는 콘크리트 포장설계법에 사용되는 재료입력변수의 DB화를 염두에 두고 신뢰성 있는 콘크리트 물성 정량화 수립을 목적으로 수행되었다. 실험에 사용된 포장용 콘크리트는 화강암, 석회암, 사암의 조골재를 사용하였으며 화강암 배합의 경우 세골재로서 자연사, 세척사, 부순모래 배합을 포함하였다. 먼저 콘크리트 강도시험을 통해 얻은 데이터를 이용하여 강도간의 상관관계 모델식을 정리하였다. 그리고 각 조골재별로 재령에 따른 압축강도, 휨강도, 쪼갬인장강도 및 탄성계수의 모델식을 제시하였다. 화강암 배합의 경우 세골재로서 사용된 자연사, 세척사, 부순모래 배합을 모두 포함한 산술평균을 적용하여 모델식을 제시하였다. 한편 쪼갬인장강도와 탄성계수는 실험방법 및 계측상 결과가 분산되는 경향이 있어서 상관관계식에서 예측된 값과 직접 구한 실험결과에 대해 산술평균을 적용후 보정하여 각 조골재별로 재령에 따른 탄성계수 및 쪼갬인장강도의 예측식을 제시하였다. 마지막으로 각 조골재 배합별 콘크리트의 포와송비 및 건조수축에 대한 기준 값을 제시하였다.

핵심용어 : 재료물성, 강도, 탄성계수, 포와송비, 건조수축

1. 서 론

근래 한국도로학회를 중심으로 수행된 한국형 포장설계법 연구 과제로부터 한국 고유의 포장설계법 수립을 위한 기본 설계모델과 설계로직이 개발되었다. 한국형 포장설계법에 사용될 입력변수에 대해서는 지난 9년의 연구를 통해 포장 재료물성에 대한 DB가 구축되었고 이를 토대로 개발된 포장설계법을 검증하는 최종 과정에 있다(김연복 등, 2010).

콘크리트 포장설계법에 사용되는 재료물성 DB는 콘크리트 배합구성물 중 조골재(화강암, 사암, 석회암 등)의 함수로 되

어 있다. 일반적인 콘크리트의 강도 및 탄성계수는 물시멘트 비나 시멘트량 등 다른 함수가 주요 영향인자이나, 포장용 콘크리트의 특성상 콘크리트에 사용되는 배합(공기량, 슬럼프, 시멘트량)이 일정하여 지역적으로 사용되는 조골재가 강도특성에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 포장용 콘크리트 배합은 조골재를 제외한 나머지 배합특성이 유사하다더라도 건조수축이나 열팽창계수 등이 조골재의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다(김연복 등, 2006).

콘크리트 포장구조해석 프로그램의 검증과정에서 사용된 직접적인 재료입력변수로는 콘크리트 탄성계수, 포와송비, 단위

*정희원 · 홍익대학교 건축공학부 부교수 (E-mail : scyang@hongik.ac.kr)

**한국건설기술연구원 도로연구실 선임연구위원

***정희원 · 배재대학교 건설환경철도공학과 교수 (교신저자)

중량, 열팽창계수 및 건조수축 변형률 등이 있다. 또한 재령 별 휨강도 또는 쪼갬인장강도는 피로시험 특성치에 관련한 공용성 결과에 영향을 미치는 주요 인자이다. 단위중량, 열팽창계수에 대해서는 본 논문에서 다루지 않았고 관련 연구내용은 관련보고서(김연복 등, 2010)를 참조하면 된다.

이러한 재료특성치 중 쪼갬인장강도나 탄성계수는 압축강도나 휨강도에 비해 직접 측정된 실험값의 변동성이 크게 나타나는 것으로 알려졌다. 또한 포외송비도 변동성이 크게 나타나지만 재령에 따른 뚜렷한 특성을 보여주지 못한다(김연복 등, 2010). 구조해석결과를 검증하는 과정에서 나타난 가장 큰 문제점은 기존에 구축된 재료물성 정량화 모델식(김연복 등, 2006) 중에서 휨강도에 관한 입력변수의 민감도가 콘크리트 포장설계법의 근간이 되는 피로모형에 매우 크게 영향을 미치며 탄성계수 또한 포장구조해석에서 영향을 미치는 것으로 나타났다.

따라서 신뢰성 있는 재료입력변수를 사용하여 포장구조해석을 수행하기 위해서는 기존에 제시된 콘크리트 물성에 대한 보완 및 수정이 절실히 필요한 시점에 이르렀다(양성철 등, 2007a; 양성철 등, 2007b; 양성철 등, 2010). 본 연구에서는 먼저 한국형 포장설계법 과제중 수행한 콘크리트 강도 시험으로부터 얻은 데이터를 이용하여 여러 강도 사이의 상관관계 모델식을 정리하였다.

강도 및 탄성계수간의 상관관계식에 대해서는 기존의 연구 논문에서 각기 상이한 결과로 발표된 바 있다(양성철 등, 2007b; 양성철 등, 2010). 이는 2007년의 연구(양성철 등, 2007b)에서는 조골재, 세골재 및 시멘트량을 달리한 콘크리트 배합 모두에 대한 상관관계식을 도출하였던 반면 2010년의 연구(양성철 등, 2010)에서는 김연복 등(2006)과 조운호 등(2000)이 수행한 포장용 콘크리트 배합설계에 대한 모든 강도 데이터를 이용하여 그 상관관계를 발표하였기 때문이다. 이를 토대로 작성한 상관관계식은 고속도로 및 국도 구간의 탄성계수를 추정하는 데 그 목적이 있었다. 그러나 본 논문에서는 한국형 포장설계법 프로그램에서 입력변수로서 채택

한 데이터만을 이용하여 강도간의 상관관계 모델식을 정리하는데 그 목적이 있다.

강도 사이의 상관관계 모델식을 활용하여 각 조골재별로 재령별 압축강도, 휨강도, 쪼갬인장강도 및 탄성계수의 모델식을 제시하였다. 특히 화강암 배합의 경우 세골재로서 사용된 자연사, 세척사, 부순모래 배합을 모두 포함한 산술평균을 적용하여 모델식을 제시하였다. 일반적으로 쪼갬인장강도와 탄성계수는 실험방법 및 계측상 결과가 분산되는 경향이 있기에 앞에서 수행된 상관관계식을 사용하여 다음과 같이 보정하였다. 첫째, 압축강도 및 휨강도로부터 쪼갬인장강도를 환산하여 구한 예측값과 직접 구한 실험결과에 대해 산술평균을 적용하여 보정하였다. 둘째, 압축강도로부터 환산하여 구한 탄성계수와 직접 구한 실험결과에 대해 산술평균을 적용하여 보정하였다. 마지막으로 각 조골재 배합별 콘크리트의 포외송비에 대한 기준 값과 건조수축 변형률에 대한 모델식을 제시하였다.

2. 배합설계 및 강도 실험결과

2.1 배합설계

콘크리트 물성은 조골재(화강암, 석회암, 사암)를 변수로 하여 실험을 수행하였으며 한국도로공사 중부내륙고속도로 제1공구에 사용되었던 포장용 콘크리트의 배합설계를 기준으로 하였다(김연복 등, 2006). 현재 국내에서 사용되는 대표적인 포장용 콘크리트 배합을 기준으로 하여 표 1과 같이 화강암, 석회암, 사암의 조골재를 변수로 하였다. 그리고 표 2와 같이 세골재를 변수로 하여 자연사, 세척사, 부순모래를 사용하였다.

실험에 사용된 시멘트는 H사의 포틀랜드 시멘트(비표면적 3,315 cm²/g)로서 비중은 3.15이다. 자연사로서 금강산 잔골재(비중 2.63, F.M. 2.87, 흡수율 1.52%), 세척사(비중 2.61, 흡수율 1.45%), 부순모래(비중 2.51, 흡수율 0.91%)가 사용되었다.

표 1. 조골재의 종류에 따른 콘크리트 배합설계 1(기준: 1 m³)

조골재 종류	잔골재 종류	공기량 (%)	수량 (kg)	시멘트량 (kg)	물·시멘트비 (%)	잔골재량 (kg)	조골재량 (kg)		AE표준 감수제 (g)
							32 mm	19 mm	
화강암	자연사 (NS1)	4.5	144	340	42.3	682	660	532	510
석회암	자연사	5.0	144	315	45.7	822	1,073	-	788
사암	자연사	4.5	144	315	45.7	822	1,057	-	788

표 2. 세골재의 종류 및 시멘트량에 따른 콘크리트 배합설계 2(기준: 1 m³)

잔골재 종류	공기량 (%)	수량 (kg)	시멘트량 (kg)	물·시멘트비 (%)	잔골재량 (kg)	조골재량 (kg)	AE표준 감수제 (g)	고성능 감수제 (g)
자연사 (NS2)	4.4	132	322	41.0	731	1162	805	-
세척사 (WS)	4.5	135	329	41.0	752	1153	823	-
부순모래 (CS)	4.6	135	329	41.0	760	1115	988	-

※화강암을 조골재로 사용함

모든 골재에 대해 입도시험, 절대 건조 비중, 흡수율 시험 결과 모두 기준치를 만족시켰다. 자연사, 세척사, 부순모래의 절대건조비중, 흡수율, No.200체 통과량은 모두 기준을 만족하였으나, 세척사 및 부순모래의 경우 세척분이 표준입도범위를 약간 벗어나 있었다. 그러나 매우 전형적인 세척사 및 부순모래의 입도이어서 별도의 입도 조정 없이 그대로 사용하였다. 모든 배합은 한국도로공사의 고속도로공사 전문시방서 기준(슬럼프값 2.5 cm 이하, 공기량 4~7%)에 맞는 콘크리트의 배합설계를 시험배합을 통해 결정하였다.

2.2 콘크리트 강도 및 탄성계수 실험결과

다음 표 3~표 6은 재령에 따른 콘크리트 압축강도, 휨강도, 쪼갬인장강도, 탄성계수 실험결과를 정리한 것이다. 석회암과 사암 콘크리트 배합은 각각 1개의 배합에 대한 실험결과이다. 그러나 화강암 콘크리트는 압축강도 및 탄성계수 실험에서는 세골재를 달리한 자연사(NS1, NS2), 세척사(WS), 부순모래(CS)의 4가지에 대한 결과이며, 휨강도 실험에서는 자연사(NS1), 세척사(WS), 부순모래(CS)의 3가지 실험결과를, 그리고 쪼갬인장강도는 자연사(NS1)와 세척사(WS)의 2가지 실험에 대한 결과이다.

화강암을 조골재로 사용한 모든 콘크리트의 강도 및 탄성계수의 실험결과에서 조골재의 영향에 비해 잔골재의 영향이 크지 않는 것으로 판단되어 2~4개에 해당되는 잔골재 배합의 평균치를 사용하여 화강암 콘크리트의 물성 환산식을 수정하는데 사용하고자 하였다.

3. 콘크리트 물성 상관관계식

콘크리트 강도 사이의 상관관계식 또는 탄성계수와 압축강도 사이의 상관관계식은 일반적으로 다음 식을 사용한다.

$$f_a = c \times f_b^n \quad (1)$$

여기서 f_a, f_b 는 상관관계를 갖고 있는 각각의 강도 또는 탄성계수이며, c 및 n 은 재료상수를 의미한다.

휨강도와 압축강도는 ACI 318(1999)에 의해 $n=0.5$ 인 제곱근의 공식이 상당히 오랫동안 사용되었다. 쪼갬인장강도와 휨강도의 상관관계식에서도 전통적으로 $n=0.5$ 를 일반적으로 사용하여 오고 있다. 탄성계수와 압축강도의 경우 $n=0.5$ 를 사용하는 ACI 318의 제안식이 전 세계적으로 관례상 통용되고 있다. 이는 통계에 사용된 실험식이 방대한 데이터를 토대로 작성되었고 그 상관성이 높기 때문이다. 국내에서는 ACI 318 식을 근거로 1999년 및 2003년에는 제곱근의 공식을, 2007년에는 $n=1/3$ 을 사용하여 탄성계수(E) = $8,500^3/\sqrt{\text{압축강도}+8}$ 로 계산(MPa 단위)한다(양성철 등, 2010). AASHTO '93 포장 설계법에서는 쪼갬인장강도와 휨강도 사이에 선형의 관계가 설정되었으며 쪼갬인장강도는 휨강도의 86%로 간주하고 있다(AASHTO, 2001). 한편 Ramaidah 등(2003)은 쪼갬인장강도를 휨강도의 를 사용할 것을 제안한 바 있다.

2장에서 정리한 실험결과를 바탕으로 강도 및 탄성계수간의 상관관계식을 구하여 표 7에 정리하였다(김연복 등,

표 3. 압축강도 실험결과 데이터

재령 (일)	압축강도(MPa)						
	화강암					석회암	사암
	NS1	NS2	WS	CS	평균		
1	12.7	-	8.4	-	10.6	8.4	13.4
3	23.3	16.6	17.6	18.2	18.9	22.8	20.1
7	30.1	24.7	25.5	27.0	26.8	33.5	29.7
14	30.2	-	30.8	-	30.5	38.0	37.0
28	33.6	34.2	34.3	37.0	34.8	38.6	37.7
56	37.7	36.5	36.3	39.4	37.5	39.3	38.3
180	-	-	37.9	-	37.9	-	-

표 5. 쪼갬인장강도 실험결과 데이터

재령 (일)	쪼갬인장강도(MPa)				
	화강암			석회암	사암
	NS1	WS	평균		
1	1.67	0.92	1.30	0.88	1.57
3	2.65	1.81	2.23	2.65	2.16
7	2.65	2.50	2.58	3.53	3.43
14	2.94	2.91	2.93	3.82	3.82
28	3.48	3.18	3.33	4.12	3.87
56	4.02	3.33	3.68	4.41	3.92
180	-	3.44	3.44	-	-

표 4. 휨강도 실험결과 데이터

재령 (일)	휨강도(MPa)					
	화강암				석회암	사암
	NS1	WS	CS	평균		
1	3.33	-	3.33	3.33	1.47	1.96
3	3.63	-	3.63	3.63	3.63	3.14
7	4.12	-	4.12	4.12	4.71	4.22
14	4.22	-	4.22	4.22	4.90	4.31
28	5.98	4.61	4.66	5.08	5.05	4.56
56	5.98	4.64	-	5.31	5.20	4.81
180	-	4.67	-	4.67	-	-

표 6. 탄성계수 실험결과 데이터

재령 (일)	탄성계수(GPa)						
	화강암					석회암	사암
	NS1	NS2	WS	CS	평균		
1	18.6	-	15.2	-	16.9	13.7	16.7
3	24.5	20.5	22.7	21.4	22.3	26.5	20.6
7	25.5	23.8	26.5	26.7	25.6	27.5	26.5
14	26.5	-	28.2	-	27.4	31.4	29.4
28	27.5	26.2	29.2	31.0	28.5	33.3	29.4
56	28.4	26.7	29.7	31.9	29.2	35.3	29.4
180	-	-	30.1	-	30.1	-	-

표 7. 콘크리트 강도 및 탄성계수간의 상관관계식

항목	MPa 단위	R ²
압축강도→휨강도	휨강도=0.7851×(압축강도) ^{0.5}	0.867
압축강도→ 쪼갠인장강도	쪼갠인장강도= 0.5932×(압축강도) ^{0.5}	0.633
휨강도→ 쪼갠인장강도	쪼갠인장강도=0.757×(휨강도)	0.950
압축강도→탄성계수	탄성계수=4968×(압축강도) ^{0.5}	0.859
	탄성계수= 9733×(압축강도-6.723) ^{1/3}	0.905

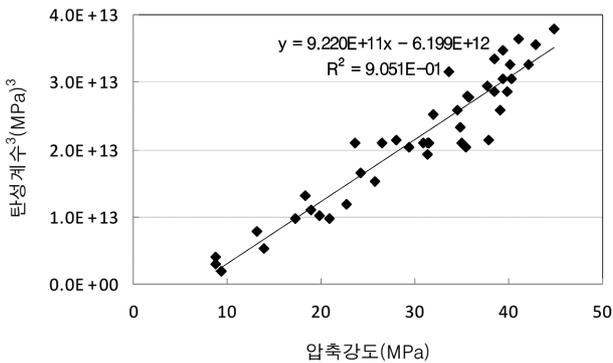


그림 1. 07년 콘크리트구조설계기준에 근거한 압축강도와 탄성계수 상관관계 그래프

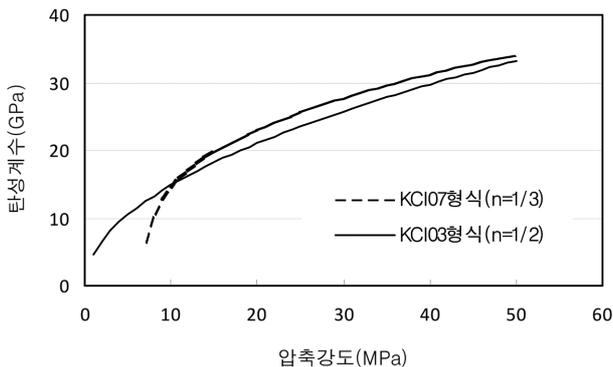


그림 2. n값의 차이에 따른 탄성계수와 압축강도의 상관관계

2010). 휨강도와 압축강도, 쪼갠인장강도와 압축강도는 가장 일반적으로 사용되는 $n=0.5$ 를 사용하였다. 그리고 휨강도와 쪼갠인장강도는 선형의 상관관계식을 사용하였다. 탄성계수와 압축강도의 상관관계식은 $n=0.5$ 와 $n=1/3$ 의 모델식을 함께 제공하였다.

그림 1은 콘크리트구조설계기준(한국콘크리트학회, 2007)에서 채택하고 있는 $n=1/3$ 을 사용한 탄성계수와 압축강도 사이의 상관관계 그래프를 보여준다. 여기서 y-축에 세제곱된 탄성계수를 사용하여 압축강도와의 상관관계를 선형적으로 표현하였다. 따라서 탄성계수(E) = $8,500^3/압축강도+B$ 의 형태로 표현하자면, $A = \sqrt[3]{9.220E+11} = 9,733$ 이 되며, $B = -6199E + 12/9.220E+11 = -6.723$ 이 된다. 한편 콘크리트구조설계기준(한국콘크리트학회, 2007)에서 제시하는 탄성계수의 상관관계식에서는 앞에서 설명한 바와 같이 세제곱근 안에 압축강도 +8 MPa이 더해진 변수로 표현되었다. 그러나 본 실험의 결과에서 얻어진 회귀분석에서는 그림 2와 같이 낮은 압축강도

수준에서 탄성계수가 작게 측정되는 경향으로 인해 y-절편이 (-)의 값을 나타낸다. 이는 콘크리트구조설계기준에서 제시한 식의 근간이 되는 ACI식에 사용된 콘크리트가 다양한 콘크리트 강도별로 탄성계수를 측정된 것에 비해, 본 실험에서는 일정한 포장용 콘크리트 강도에 대해 재령을 달리하여 측정된 압축강도와 탄성계수의 상관관계가 영향을 미친 것으로 파악된다(양성철 등, 2010). 다음 그림 2에는 n값의 차이에 의해 압축강도에 따라 예측되는 탄성계수의 차이를 보여준다. 콘크리트구조설계기준(한국콘크리트학회, 2007)식의 $n = 1/3$ 을 사용하는 경우, 압축강도가 6.723 MPa 이상인 경우에만 유효하며, 압축강도가 10 MPa인 경우, 두 모델식의 오차가 2% 정도를, 30 MPa인 경우 7.4%까지 차이가 나다가 이후 40 MPa, 50 MPa인 경우 각각 5.1%, 2.7%로 줄어들게 된다(김연복 등, 2010).

4. 콘크리트 강도 물성 예측식 수정 및 보완

4.1 수정 및 보완 원칙

표 2~5에 제시된 물성 예측식이 콘크리트 포장구조해석 과정에서 조골재별로 상당히 민감하게 나타났다. 특히 휨강도와 탄성계수는 구조해석에 필수적으로 사용되는 물성인데 비해 골재별로 ~까지 강도 예측값의 차이가 발생하였다. 이는 골재별로 강도 및 탄성계수 값의 차이가 난다기 보다는 재료수급 상의 문제점 또는 동일한 조건에서의 실험환경이 이뤄지지 못해 발생한 것으로 보인다. 따라서 앞에서 제시된 강도 및 탄성계수간의 상관관계식을 사용하여 취득한 콘크리트 물성간의 정량화식을 간접적으로 이용한 물성 값과 직접적으로 구한 물성 값의 산술평균을 바탕으로 다음과 같은 수정 및 보완 원칙에 따라 보정하여 데이터의 신뢰도를 높이고자 하였다.

(1) 화강암 배합의 경우 자연사, 세척사, 부순모래 배합을 모두 포함하여 분석하여 수정하였다.

(2) 일반적으로 쪼갠인장강도와 탄성계수는 실험방법 및 계측상 결과가 분산되는 경향이 있기에 앞에서 수행된 상관관계식을 사용하여 보정하였다.

-압축강도 및 휨강도로부터 쪼갠인장강도를 환산하여 구한 예측값과 직접 구한 실험결과에 대해 산술평균을 적용하여 보정하였다.

-압축강도로부터 환산하여 구한 탄성계수와 직접 구한 실험 결과에 대해 산술평균을 적용하여 보정하였다.

(3) 구조해석에 사용될 예측식은 28일 이후의 장기강도가 사용되므로 재령별 강도 및 탄성계수 예측식에서 초기 재령 1일에 대한 값은 회귀분석에서 제외하였다.

4.2 콘크리트 압축강도 예측식

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

표 8. 조골재별 콘크리트의 압축강도 예측 값

배합		a	b	R ²
화강암	NS1만 포함	3.400	0.833	0.910
	모두 포함	2.892	0.896	0.993
석회암		2.019	0.917	0.955
사암		2.610	0.902	0.963

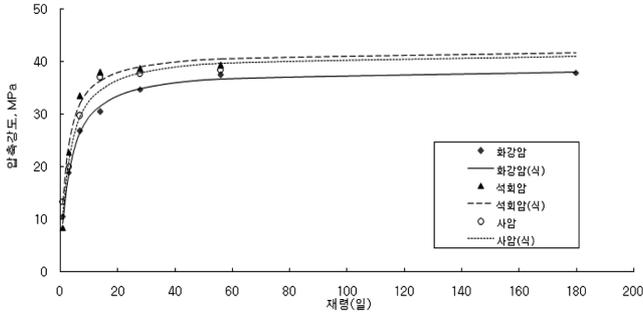


그림 3. 수정 보완된 조골재별 콘크리트 압축강도 예측 곡선

재령 28일을 의미한다.

$$A(t) = \frac{A_{28} \times t}{a + bt} \quad (2)$$

다음 표 8은 화강암, 석회암, 사암이 배합된 콘크리트의 압축강도 예측상수 및 R² 값을 나타낸 것이다. 화강암 배합의 경우 NS1만 포함한 경우에 비해 NS1+NS2+WS+CS 모든 배합을 포함시킨 경우의 R²의 값이 커짐을 보여준다. 화강암 조골재를 사용하여 모두 포함시킨 경우, 년에서의 장기 강도의 예측값이 약 8.5% 이내의 범위 내에서 석회암>사암>화강암의 순서로 예측되었다. 다음 그림 3은 수정 보완된 조골재별 콘크리트의 압축강도 예측 곡선을 나타낸 것이다.

4.3 콘크리트 휨강도 예측식

콘크리트의 휨강도에 대하여 제시된 예측식은 앞의 압축강도 예측식과 동일한 형태인 식 (2)를 사용한다. 다음 표 9는

표 9. 조골재별 콘크리트의 휨강도 예측 값

배합		a	b	R ²
화강암	NS34만 포함	0.811	0.996	0.604
	모두 포함	1.310	1.012	0.743
석회암		1.226	0.944	0.817
사암		1.442	0.932	0.958

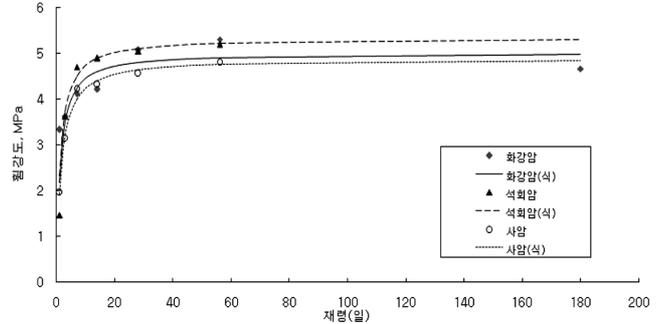


그림 4. 수정 보완된 조골재별 콘크리트 휨강도 예측 곡선

화강암, 석회암, 사암이 배합된 콘크리트의 휨강도 예측상수 및 R² 값을 나타낸 것이다. 콘크리트 압축강도 예측식의 경우와 같이 화강암의 경우 NS1만 포함된 경우에 비해 NS1+WS+CS 모두 포함시킨 경우 R²의 값이 커짐을 보여준다. 물론 표 9에서의 R²의 값이 화강암인 경우 0.743으로서 그리 높지 않다. 더 많은 데이터가 축적이 된다면 R²의 값이 커질 것으로 판단된다. 20년에서의 장기 강도 예측값이 약 9.4% 이내의 범위 내에서 석회암>화강암>사암의 순서로 예측된다. 그림 4에 조골재별 콘크리트의 휨강도를 예측하였다.

4.4 콘크리트 쪼갬인장강도 예측식

콘크리트의 쪼갬인장강도에 대하여 제시된 예측식은 앞의 식 (2)를 사용하였다. 표 10~12는 화강암, 석회암, 사암이 사용된 콘크리트에 대한 쪼갬인장강도 예측상수 및 R² 값을 정리한 것이다. 표 10의 (1)과 (2)는 직접 측정된 쪼갬인장강도를 나타내며 (3)은 환산식으로부터 예측된 값을 나타낸다.

표 10. 화강암 콘크리트의 쪼갬인장강도 예측 값

재령 (일)	NS34		NS34+NS33+WS33+CS33		환산식(3)				모델식	
	(1)		(2)		압축→쪼갬인장 (3-1)		휨→쪼갬인장 (3-2)		(2)+(3)	
	실험값	예측값	실험값	예측값	압축	압축→쪼갬	휨	휨→쪼갬	실험값	예측값
	R ²	0.829	R ²	0.910					R ²	0.910
	a	1.330	a	2.018					a	1.596
b	0.958	b	0.932					b	0.953	
1	1.67	1.52	1.30	1.13	10.58	1.93	3.33	2.52	1.92	1.40
3	2.65	2.48	2.23	2.07	18.93	2.58	3.63	2.75	2.52	2.40
7	2.65	3.03	2.57	2.73	26.83	3.07	4.12	3.12	2.92	3.01
14	2.94	3.31	2.93	3.09	30.48	3.27	4.22	3.19	3.13	3.33
28	3.48	3.46	3.33	3.32	34.76	3.50	5.08	3.85	3.56	3.52
56	4.02	3.55	3.67	3.44	37.47	3.63	5.31	4.02	3.78	3.63
180	-	3.61	3.44	3.53	37.89	3.65	4.67	3.54		3.70

표 11. 석회암 콘크리트의 쪼갬인장강도 예측 값

재령 (일)	직접 측정된 쪼갬인장강도		환산식(2)				모델식		
	(1)		압축→쪼갬인장 (2-1)		휨→쪼갬인장 (2-2)		(1)+(2)		
	실험값	예측값	압축	압축→쪼갬	휨	휨→쪼갬	실험값	예측값	
		R^2	0.973					R^2	0.988
		a	2.394					a	1.352
	b	0.890					b	0.942	
1	0.88	1.25	8.43	1.72	1.47	1.11	1.24	1.69	
3	2.65	2.44	22.75	2.83	3.63	2.75	2.74	2.78	
7	3.53	3.34	33.54	3.44	4.71	3.56	3.51	3.41	
14	3.82	3.88	37.95	3.65	4.90	3.71	3.73	3.73	
28	4.12	4.22	38.64	3.69	5.05	3.82	3.88	3.91	
56	4.41	4.42	39.32	3.72	5.20	3.93	4.02	4.01	
180	-	4.56	-	-	-	-	-	4.08	

표 12. 사암 콘크리트의 쪼갬인장강도 예측 값

재령 (일)	직접 측정된 쪼갬인장강도		환산식(2)				모델식		
	(1)		압축→쪼갬인장 (2-1)		휨→쪼갬인장 (2-2)		(1)+(2)		
	실험값	예측값	압축	압축→쪼갬	휨	휨→쪼갬	실험값	예측값	
		R^2	0.956					R^2	0.967
		a	1.859					a	1.590
	b	0.926					b	0.932	
1	1.57	1.39	13.44	2.17	1.96	1.48	1.74	1.45	
3	2.16	2.51	20.10	2.66	3.14	2.38	2.40	2.50	
7	3.43	3.25	29.71	3.23	4.22	3.19	3.29	3.15	
14	3.82	3.66	36.97	3.61	4.31	3.27	3.57	3.50	
28	3.87	3.90	37.66	3.64	4.56	3.45	3.66	3.70	
56	3.92	4.04	38.34	3.67	4.81	3.64	3.74	3.81	
180	-	4.14	-	-	-	-	-	3.89	

표 10의 모델식에서는 (2)와 (3)의 데이터를 모두 포함하여 회귀분석한 결과를 나타낸 것이다. 표 11~12는 직접 측정된 쪼갬인장강도 (1)의 값과 환산식 (2)의 값을 평균적으로 적용하였다. 각각의 경우 데이터의 수가 많을수록 그리고 환산식을 추가로 사용할 경우 R^2 의 값이 양호함을 보여준다.

표 10~12의 최종 예측 결과 값을 비교해보면 석회암>사암>화강암의 순서로 쪼갬(할렐)인장강도의 장기 강도가 예측된

다. 이 경우 약 의 장기 강도 값의 차이를 보여준다. 그림 5는 조골재별 콘크리트의 쪼갬인장강도 예측 곡선을 보여준다. 앞에서 언급한 바와 마찬가지로 데이터의 수가 많으면 회귀 분석된 곡선이 보다 신뢰성이 있을 것으로 판단된다.

4.5 콘크리트 탄성계수 예측식

콘크리트의 탄성계수에 대하여서는 앞의 식 (2)를 사용하였다. 다음 표 13~15에 화강암, 석회암, 사암이 사용된 콘크리트에 대한 탄성계수 예측상수 및 예측값을 나타내었다. 쪼갬인장 예측식에서의 유사하게 각각의 경우 데이터의 수가 많을수록 그리고 환산식을 추가로 사용할 경우 R^2 의 값이 양호함을 보여준다. 표 13의 (1)과 (2)는 직접 측정된 탄성계수를 나타내며 (3)은 환산식으로부터 예측된 값을 나타낸다. 표 13의 모델식에서는 (2)와 (3)의 데이터를 모두 포함하여 회귀분석한 결과를 나타낸다. 마찬가지로 표 14~15는 직접 측정된 탄성계수 (1)의 값과 환산식 (2)의 값을 평균적으로 적용하였다.

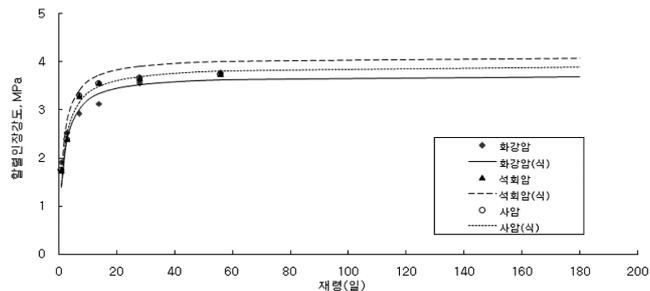


그림 5. 수정 보완된 조골재별 콘크리트 쪼갬인장강도 예측 곡선

표 13. 화강암 콘크리트의 탄성계수 예측 값

재령 (일)	NS34		NS34+NS33+WS33+CS33		환산식		모델식	
	(1)		(2)		(3)		(2)+(3)	
	실험값	예측값	실험값	예측값	압축 (MPa)	압축→ 탄성계수	실험값	예측값
	R^2	0.901	R^2	0.987			R^2	0.990
	a	0.93	a	1.000			a	1.125
b	0.97	b	0.958			b	0.956	
1	18.6	14.5	16.9	14.5	10.6	16.2	16.5	13.9
3	24.5	21.5	22.3	22.1	18.9	21.6	22.0	21.7
7	25.5	24.9	25.6	25.9	26.8	25.7	25.7	25.9
14	26.5	26.5	27.4	27.7	30.5	27.4	27.4	27.9
28	27.5	27.4	28.5	28.7	34.8	29.3	28.9	29.0
56	28.4	27.8	29.2	29.2	37.5	30.4	29.8	29.6
180	-	28.2	30.1	29.6	37.9	30.6	30.3	30.0

표 14. 석회암 콘크리트의 탄성계수 예측값

재령 (일)	직접 측정된 탄성계수		환산식		모델식	
	(1)		(2)		(1)+(2)	
	실험값	예측값	압축 (MPa)	압축→ 탄성계수	실험값	예측값
	R^2	0.960			R^2	0.973
	a	1.317			a	1.029
b	0.949			b	0.962	
1	13.7	14.7	8.40	14.4	14.1	16.1
3	26.5	24.0	22.8	23.7	25.1	24.6
7	27.5	29.3	33.5	28.8	28.1	29.0
14	31.4	32.0	38.0	30.6	31.0	31.0
28	33.3	33.5	38.6	30.9	32.1	32.2
56	35.3	34.3	39.3	31.2	33.2	32.8
180	-	34.9	-	-	-	33.2

표 15. 사암 콘크리트의 탄성계수 예측값

재령 (일)	직접 측정된 탄성계수		환산식		모델식	
	(1)		(2)		(1)+(2)	
	실험값	예측값	압축 (MPa)	압축→ 탄성계수	실험값	예측값
	R^2	0.944			R^2	0.967
	a	0.948			a	1.259
b	0.974			b	0.950	
1	16.7	15.3	13.4	18.2	17.4	13.6
3	20.6	22.8	20.1	22.3	21.4	21.9
7	26.5	26.5	29.7	27.1	26.8	26.5
14	29.4	28.2	37.0	30.2	29.8	28.8
28	29.4	29.2	37.7	30.5	30.0	30.1
56	29.4	29.7	38.3	30.8	30.1	30.8
180	-	30.0	-	-	-	31.3

표 13~15의 모델식의 예측 결과 값을 비교해보면 석회암>사암>화강암의 순서로 탄성계수의 장기 강도가 예측된다. 이 경우 약 10.6%의 장기 탄성계수 값의 차이를 보여준다. 그림 6에는 조골재별 콘크리트의 탄성계수 예측 곡선을 보여준다.

5. 콘크리트 포와송비 및 건조수축 변형률

다음 표 16은 화강암 조골재를 기본으로 하며 세골재의 종류(자연사, 세척사, 부순모래)에 따른 재령별 포와송비 결과를 보여준다. 재령에 따른 포와송비의 변화를 예측하기 위하여 회귀분석을 실시하여 그림 7에 표현하였다. 직선식은 장기재령에서 약 0.3으로 너무 크게 예측되므로 배제하였고, 본 연구에서 강도 및 탄성계수 예측식으로 채택한 식 (2)는 초기 재령에서는 매우 작은 값을 예측하므로 배제하였다. 그러나 포와송비는 초기재령에서의 값을 측정하기 어렵고 재령별로 측정된 값의 경향을 정량화하기가 어려워 평균값을 적용하는

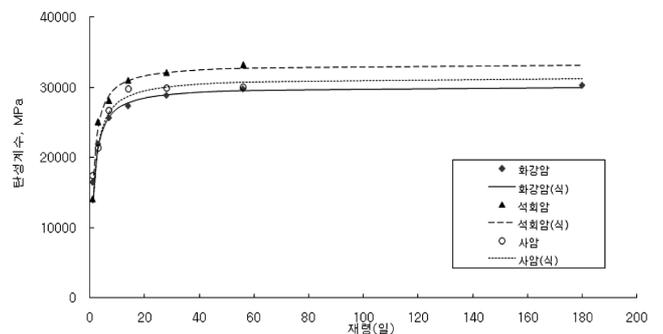


그림 6. 수정 보완된 조골재별 콘크리트 탄성계수 예측 곡선

것이 적합한 것으로 판단된다. 문헌조사를 토대로 다음 표 17에서와 같이 포와송비의 범위를 제안하였다(김연복 등, 2010).

그림 8은 재령에 따른 조골재 배합별 콘크리트의 건조수축 변형률 시험결과를 보여준다. 김연복 등(2006, 2010)에 의하면 조골재 배합 및 형상비가 콘크리트 건조수축의 주요인자

표 16. 포와송비 실험결과

재령 (일)	보통배합(330)		
	자연사(NS2)	세척사(WS)	부순모래(CS)
3	0.151	0.169	0.175
7	0.177	0.180	0.200
14	-	0.185	-
28	0.197	0.187	0.218

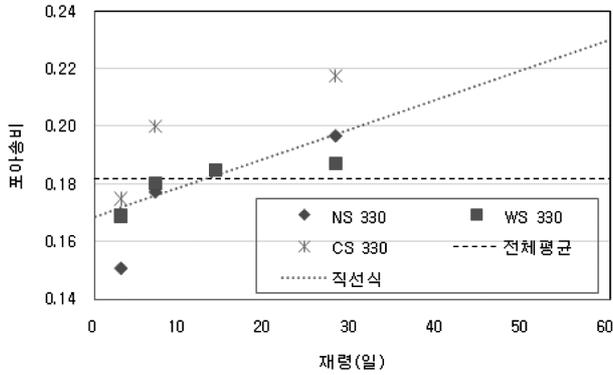


그림 7. 재령에 따른 배합별 포와송비

임을 설명하였다. 여기서 형상비란 콘크리트 시편이 외부에 노출된 표면적 대비 체적의 비율($\Delta V/S$)을 의미하며 본 논문에서는 화강암의 경우 형상비가 300 mm, 석회암과 사암은 200 mm인 경우의 시험결과만 다루었다. 참고로 포장용 콘크리트의 슬래브는 형상비가 300이 된다. 그림 8에서는 화강암, 사암, 석회암 콘크리트의 순서로 건조수축 변형률이 측정되었으나 추가적인 실험연구를 통해 그 타당성을 확인해야 할 것으로 판단된다.

한국형포장설계법 연구(김연복 등, 2006; 2010)에서는 재령(t)에 따른 형상비를 고려한 건조수축 변형률이 아래 식으로 예측된 바 있다.

$$\epsilon_s(t) = \frac{a_1 t}{a_2 + t} [1 + a_3 \exp(-a_4 \Delta V/S)] \quad (3)$$

그러나 형상비와 재령이 동시에 고려된 다중 비선형 회귀 분석은 결정계수(R^2)의 값이 저하되기에, 그림 8에서는 단일 형상비에 대해서 건조수축 변형률을 식 (4)의 형태로 표현할 수 있었다.

$$\epsilon_s(t) = a_1 [1 - \exp(-a_2 t^{a_3})] \quad (4)$$

또한 표 18에 위 식의 예측상수 a_1 , a_2 , a_3 를 제시하였다. 표 18에 의하면 결정계수가 모두 0.988이상의 상당히 높은 값을 보여줌으로 건조수축 변형률을 식(4)으로 표현하는 것은 합당할 것으로 판단된다.

6. 결 론

1) 화강암, 석회암, 사암 등이 조골재로 사용된 포장용 콘크리트 시편에 대한 콘크리트 강도시험을 통해 압축강도-휨

표 17. 세골재 종류에 따른 포와송비

배합	세골재 종류	시멘트량	범위	평균측정값	제안값
화강암	자연사	330	0.176~ 0.198	0.176	0.186
	세척사	330		0.182	
	부순모래	330		0.198	

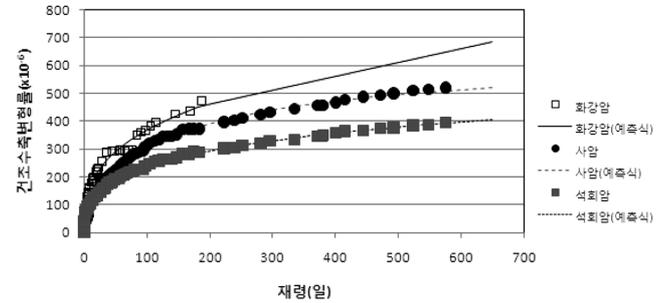


그림 8. 재령에 따른 배합별 건조수축 변형률

표 18. 건조수축 변형률 모델식에 사용되는 상수

배합	a_1	a_2	a_3	R^2
화강암	4810	0.01600	0.3494	0.9881
석회암	880.0	0.05960	0.3621	0.9967
사암	246.5	0.05216	0.5762	0.9978

강도, 압축강도-쪼갠인장강도, 압축강도-탄성계수, 휨강도-쪼갠인장강도 사이의 상관관계식을 제시하였다. 이 중 압축강도에서 쪼갠인장강도로 전환되는 결정계수는 $R^2=0.633$ 으로서 제일 낮은 상관관계를 보였으나 나머지는 $R^2=0.85$ 이상의 높은 상관관계로서 나타났다.

2) 재령별 강도 및 탄성계수 물성 예측식이 조골재별로 상당히 민감하게 나타났다. 따라서 앞에서 제시된 강도 및 탄성계수간의 상관관계식을 사용한 후, 콘크리트 물성간의 환산식으로부터 예측한 물성 값과 직접적으로 구한 물성 값의 산술평균을 구하는 보정절차를 제시하였다.

3) 재령별 휨강도 제안식의 경우 화강암 및 석회암 콘크리트의 경우 각각 $R^2=0.743$ 과 0.817 로 다소 낮은 상관수준을 보여주었지만 그 외의 재령별 압축강도, 쪼갠인장강도, 탄성계수 제안식은 $R^2=0.9$ 이상의 높은 상관수준을 보여주었다.

4) 재령(3, 7, 14, 28일)에 따라 포와송비가 증가하는 경향을 보였지만, 최적의 직선식으로 표현하면 장기 재령에서 0.3에 근접하는 값을 주므로 직선 식은 사용하지 못하는 것으로 나타났으며, 재령별로 측정된 값의 경향을 정량화하기가 어려워 평균값의 사용을 제안하였다.

5) 조골재별 재령에 따른 콘크리트 건조수축 변형률 데이터를 $\epsilon_s(t) = a_1 [1 - \exp(-a_2 t^{a_3})]$ 로 표현한 결과 결정계수(R^2)가 모두 0.988이상의 상당히 높은 값을 보여주었다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 홍익대학교 학술진흥연구비에 의해 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김연복 등 (2006) 콘크리트 포장 설계법 개발 연구보고서, 건설교통부.
- 김연복 등 (2009) 콘크리트 포장 설계법 개발 연구보고서, 건설교통부.
- 김연복 등 (2010) 콘크리트 포장 설계법 개발 연구보고서, 건설교통부.
- 양성철, 박종원 (2007a) 포장용 콘크리트의 강도 및 탄성계수 상관관계식, **한국도로학회논문집**, 한국도로학회, 제9권, 제4호, pp. 205-213.
- 양성철, 조윤희 (2010) 콘크리트 물성 정량화식을 이용한 LTPP 구간의 탄성계수 추정방법, **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제10권, 제2호, pp. 39-46.
- 양성철, 조윤희, 정진훈, 김연복 (2007b) 콘크리트 물성 정량화식을 이용한 LTPP 구간의 물성 추정, **한국도로학회 학술발표회 논문집**, 제9권, pp. 281-284.
- 조윤희 등 (2000) 콘크리트 포장의 잔존수명 추정을 위한 기초

- 물성 연구 연구보고서, 한국도로공사.
- 한국콘크리트학회 (2007) 2007년도 개정 콘크리트 구조설계기준 해설.
- AASHTO (2001) *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, AASHTO.
- ACI 318 (1999) *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, American Concrete Institute.
- ACI 363 (1997) *State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete*, American Concrete Institute.
- Ramaiah, S.V, McCullough, B.F, Dossey, T. (2003) *Estimating In Situ Strength of Concrete Pavements under Various Conditions*, FHWA/TX-04/0-1700-1 Report, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.

- ◎ 논문접수일 : 10년 10월 12일
◎ 심사의뢰일 : 10년 10월 13일
◎ 심사완료일 : 10년 11월 24일