Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 27, No. 6, pp. 687~693, December, 2015
http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2015.27.6.687

pISSN 1229-5515
eISSN 2234-2842

혼화재 치환 콘크리트의 등가 압축강도에 대한 물-결합재비의 결정

윤현섭 [1)] · 양근혁 [2)*]

[1)]경기대학교 일반대학원 건축공학과 [2)]경기대학교 플랜트·건축공학과

Determination of Water-to-Binder Ratios on the Equivalent Compressive Strength of Concrete with Supplementary Cementitious Materials

Hyun-Sub Yoon[1)] and Keun-Hyeok Yang[2)*]

[1)]Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Seoul 03746, Rep. of Korea
[2)]Dept. of Plant·Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Rep. of Korea

ABSTRACT The present study proposed a *k*-value to determine the water-to-binder ratio of concrete using fly ash (FA) or ground granulated blast-furnace slag (GGBS) as a partial replacement of ordinary portland cement (OPC) with regard to an equivalent strength of OPC concrete. From the regression analysis using an extensive database including 7076 concrete mixes, *k*-values were determined for various water-to-binder ratios when the replacement ratio of OPC by the addition of FA or GGBS were below 50%. For deriving an equation to identify *k*-value, the relationship of concrete compressive strength and water-to-binder ratio was generalized by an exponential function. In general, *k*-values decreased with the increases in the addition of FA or GGBS for replacement of OPC and water-to-binder ratio. The rate in decreasing *k*-value against water-to-binder ratio was marginally affected by the addition of FA or GGBS, although a higher *k*-value was commonly obtained for GGBS concrete than for FA concrete at the same water-to-binder ratio. Consequently, the determined *k*-values were simplified as a function of water-to-binder ratio and the addition ratio of FA or GGBS as replacement of OPC.

Keywords : equivalent compressive strength, *k*-value, water-to-binder ratio, fly ash, slag

1. 서 론

최근 콘크리트 산업에서도 환경부하의 저감을 위하여 탄소 저감 및 천연자원 보존의 요구가 증가하고 있다. 이에 따라 탄소 원단위와 천연자원의 소모가 큰 보통포틀랜드 시멘트(ordinary Portland cement, OPC)의 사용을 줄이기 위하여 고로슬래그(ground granulated blast-furnace slag, GGBS) 및 플라이 애쉬(fly ash, FA)와 같은 혼화재(supplementary cementitious materials, SCMs)의 사용이 점차 증가하고 있다.[1)] 특히 산업부산물 기반의 SCM의 OPC 치환은 산업부산물의 재활용측면에서도 긍정적 환경영향을 기대할 수 있다.[2,3)]

SCM 치환 콘크리트의 경우 OPC 100%를 사용한 일반 콘크리트 대비 동등성능 확보를 위한 물-결합재비의 감소로 유동성 확보의 어려움 및 포졸란 반응 정도 저하에 따른 강도 발현율이 감소 할 우려가 있다.[4,5,6)] 이러한 현상의 방지목적으로 CEN/TR 16639[7)]에는 일반 콘크리트와 동등한 성능을 가지는 SCM 치환 콘크리트의 물-결합재비를 제시하기 위하여 EN 450에 부합되는 FA 및 EN 13263에 부합되는 실리카 흄(silica fume, SF)에 대한 *k*-값의 활용 방법을 제시하고 있다. 즉, *k*-값은 OPC 100%인 일반 콘크리트의 압축강도와 동등한 수준의 압축강도 발현을 위한 SCM 치환 콘크리트의 물-결합재비 결정을 위한 상수이다. 그러나 CEN/TR 16639[7)]는 FA 및 SF의 다양한 치환율에 대한 *k*-값의 제시가 부족하며, GGBS에 대한 *k*-값의 활용 방법은 축적 데이터의 부족 등으로 명확히 제시되지 않고 있다. 특히, CEN/TR 16639[7)]에서 제시하는 *k*-값 산정과정에서는 콘크리트의 물-결합재비와 압축강도의 관계를 직선비례로 가정하고 있는데, 이는 SCM을 다량 사용하는 콘크리트의 경우 물-결합재비 증가에 따른 압축강도의 변화는 음(-)의 영역으로 확대될 수 있는 문제점이 있다. 따라서, SCM 콘크리트의 압축강도에 대한 합리적인 *k*-값의 산정을 위해서는 각 SCM의 치환율과 물-결합재비 증가에 따른 콘크리트 강도 변화 기울기가 적절히 평가되어야만 한다.

이 연구의 목적은 CEN/TR 16639[7)]에 제시 되어진 *k*-값

*Corresponding author E-mail : yangkh@kgu.ac.kr
Received July 15, 2015, Revised September 1, 2015, Accepted September 3, 2015

산정 모델을 수정하여 다양한 물-결합재비 하에서 FA 및 GGBS의 치환율에 따른 *k*-값을 제시하는데 있다. 콘크리트 배합시 OPC의 일정량을 GGBS 및 FA 등의 SCM으로 치환하는 경우 SCM 사용량을 변수로 하여 *k*-값 산정 모델을 적용하고, 이를 통해 OPC 100%인 일반 콘크리트와 동등한 압축강도의 확보가 가능한 물-결합재비를 환산하는 방법을 기존 실험결과 분석을 기반으로 제시하였다. 결정된 *k*-값들은 FA 또는 GGBS의 치환율과 물-결합재비의 함수로 일반화하였다.

2. *k*-value

2.1 *k*-값의 개념

CEN/TR 16639[7]에 제시되어 있는 *k*-값은 FA, SF 등 OPC를 부분 치환하는 SCM을 사용한 콘크리트와 SCM을 사용하지 않는 일반 콘크리트의 내구성능 또는 강도를 비교하기 위한 지표이다. 즉, 압축강도 측면에서의 *k*-값은 OPC의 일부가 1종류 이상의 SCM으로 치환된 콘크리트에 대해 물-결합재비와 SCM의 사용량을 함수로 하여 일반 콘크리트의 압축강도와 동등한 수준을 얻을 수 있는 지표이다. SCM이 콘크리트의 압축강도 발현에 미치는 영향은 SCM 재료의 화학조성을 포함한 특성, 콘크리트 배합조건 및 양생온도 등에 의해 영향을 받는다. 따라서 SCM 콘크리트의 *k*-값 결정을 위해서는 다양한 요소들이 고려되어야 하지만 현실적으로 이들 모든 요소를 반영하는 것은 힘들다. CEN/TR 16639[7]에서도 SCM 콘크리트 배합을 위한 *k*-값의 결정은 SCM 치환율과 콘크리트 배합에서의 물-결합재비만을 고려하고 있다. 이는 SCM 콘크리트와 일반 콘크리트의 양생조건은 동일하게 가정하고 있으며, SCM 치환에 따라 손실되는 콘크리트의 압축강도를 물-결합재비를 낮추어 보정할 수 있기 때문이다. 본 연구에서도 SCM 콘크리트에서 *k*-값의 결정을 위하여 물-결합재비와 압축강도의 상관관계를 이용하였다. 따라서 SCM 치환에 관계없이 콘크리트의 동일한 압축강도의 발현이 가정되었을 때의 *k*-값은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.[6]

$$\omega_o = w_a/(c_a + k \cdot a) \tag{1}$$

$$k = (w_a/\omega_o - c_a)/a \tag{2}$$

여기서, ω_o는 OPC 100%인 일반 콘크리트의 물-시멘트비이며, w_a는 SCM을 사용하는 콘크리트의 단위수량, c_a는 단위 시멘트량이며, a는 단위 SCM 양이다.

2.2 콘크리트 압축강도와 물-결합재비의 관계

일반적으로 콘크리트의 압축강도는 물-결합재비의 증가와 함께 감소하는데, 그 감소기울기는 선형보다는 지수함수형식의 비선형에 가깝다(Fig. 1). 이를 고려하면 콘크리트의 압축강도와 물-결합재비의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_{ck(o)} = A_o \exp(B_o \cdot \omega_o) \tag{3}$$

$$f_{ck(a)} = A_a \exp\left(B_a \cdot \frac{w_a}{c_a + k \cdot a}\right) \tag{4}$$

여기서, $f_{ck(o)}$는 일반 콘크리트의 압축강도이며, $f_{ck(a)}$는 SCM 콘크리트의 압축강도이며, A_o, B_o, A_a 및 B_a는 압축강도와 물-결합재비 관계식의 기울기를 나타내는 실험상수이다. 따라서 식 (3)과 (4)는 각각 OPC 100%인 일반 콘크리트와 SCM 콘크리트에서의 물-결합재비와 압축강도의 관계를 나타낸다. SCM 치환에 관계없이 식 (4)의 $f_{ck(a)}$는 식 (3)의 $f_{ck(o)}$와 동등해야 하므로 이에 대한 경계조건에 대해 식 (3)과 (4)를 정리하면 *k*-값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{(c_a + a)(\ln A_o - \ln A_a + B_o \cdot \omega_o)}{a \cdot B_a \cdot \omega_o} - \frac{c_a}{a} \tag{5}$$

3. *k*-값 산정을 위한 실험상수 결정

3.1 데이터 베이스(data base, DB)

식 (5)를 이용하여 산정한 *k*-값을 이용하면 일반 콘크리트와 동등한 소요 압축강도 확보가 가능한 SCM 콘크리트의 물-결합재비를 결정할 수 있다. 식 (5)의 *k*-값 결정을 위해서는 실험상수(A_o, B_o, A_a 및 B_a)의 결정이 필요하다. 이들 실험상수들은 SCM 치환율과 물-결합재비에 의해 영향을 받으므로 다양한 실험결과를 바탕으로 전형적인 값을 결정할 필요가 있다. 실험상수 결정을 위하여 레미콘 배합실험결과를 포함한 기존 콘크리트 배합실험

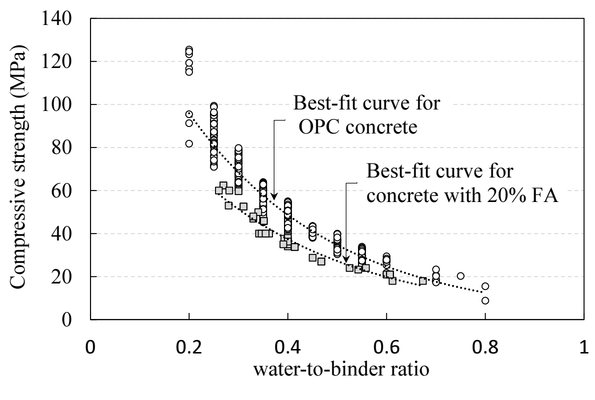

Fig. 1 Typical relationship between water-to-binder ratio and compressive strength of concrete

Table 1 Incidence of various parameter values in 7,076 concrete mixes

	Type of binder	Range of f_{ck} (MPa)									Total
		3-20	20-30	30-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-170	
f_{ck} (MPa)	OPC	239	1,039	714	922	487	224	105	13	1	3,744
	OPC+FA	423	1,346	312	227	99	9	-	-	-	2,416
	OPC+GGBS	21	434	189	113	80	45	27	7		916
	Type of binder	Range of W/B (%)									Total
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	
W/B (%)	OPC	-	20	713	958	971	774	276	30	2	3,744
	OPC+FA	-	2	153	428	772	766	265	26	4	2,416
	OPC+GGBS	-	80	75	188	383	179	10	-	-	916
	Type of binder	Range of R_F (%)									Total
		2-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	
R_F (%)	OPC+FA	678	1431	212	65	19	5	6	-	-	2,416
	Type of binder	Range of R_G (%)									Total
		3-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	
R_G (%)	OPC+GGBS	105	212	329	151	76	13	19	9	2	916

* Note: R_F = Replacement ratios of FA
R_G = Replacement ratios of GGBS

결과를 데이터베이스화하였다(Table 1). 구축된 데이터베이스는 전체 7,076 배합을 포함하는데, 이들 중 OPC 콘크리트는 3,744 배합, FA 치환 콘크리트는 2,416 배합, GGBS 치환 콘크리트는 916 배합으로 구성되었다. 콘크리트의 재령 28일 압축강도의 범위는 OPC 콘크리트의 경우 7.7~150 MPa, FA 치환 콘크리트의 경우 3~92.8 MPa이며, GGBS 치환 콘크리트의 경우에는 9.9~138.8 MPa이다. 물-결합재비의 범위는 OPC 콘크리트의 경우 13.86~88.94%, FA 치환 콘크리트의 경우 18.82~94.59%이며, GGBS 치환 콘크리트 경우에는 12.85~94.59%이다. SCM 콘크리트 배합에서 FA 치환율은 2.75~67%이며, GGBS 치환율은 3.39~81% 범위에 있었다.

SCM을 사용한 콘크리트의 압축강도($f_{ck(a)}$)에 대한 물-결합재비의 영향은 SCM의 종류 및 치환율에 따라 다르다. 즉, 동일한 물-결합재비의 범위에서 GGBS 및 FA를 사용한 SCM 콘크리트의 압축강도는 치환율이 증가할수록 압축강도는 감소하는 경향을 보이지만 그 감소기울기는 GGBS와 FA 치환율에 의해 영향을 받는다.[5] 본 연구에서는 기존 실험결과를 이용하여 GGBS 및 FA가 개별적으로 치환된 콘크리트에서 식 (4)의 실험상수를 결정하였다. GGBS 및 FA가 서로 혼용치환 된 콘크리트의 경우 일정 SCM 치환율에서 각 재료의 치환에 대한 경우의 수가 너무 많은 반면 그에 따른 실험결과는 매우 부족하기 때문에 본 연구에서는 각 혼화재료들의 개별치환 만을 고려하였다. 한편 SF의 치환은 보통 그 치환율이 15~20%까지는 콘크리트 압축강도를 향상시키며, 그 이상의 치환율에서도 콘크리트 압축강도 저하에 미치는 영향은 크지 않다. SF 치환율과 콘크리트의 압축강도의 관계 및 실험결과의 부족으로 본 연구에서는 SF 치환에 따른 k-값의 산정은 제외하였다.

3.2 일반 콘크리트(OPC 100% 콘크리트)

OPC 100%인 일반 콘크리트에서 실험상수를 결정하기 위한 물-시멘트비(ω_o)와 압축강도($f_{ck(o)}$)의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 나타낸 분석결과는 비교적 높지 않은 상관계수를 보였는데 이는 콘크리트 배합 자료들의 제공처(source)의 차이로 인해 사용골재들의 함수율, 강도 및 입도분포와 양생조건(온도와 습도) 등이 각 배합에 따라 상이하며, 압축강도 측정에서도 가력속도 등도 차이가 있기 때문이다. Fig. 2에 나타낸 실험결과들의 회귀분

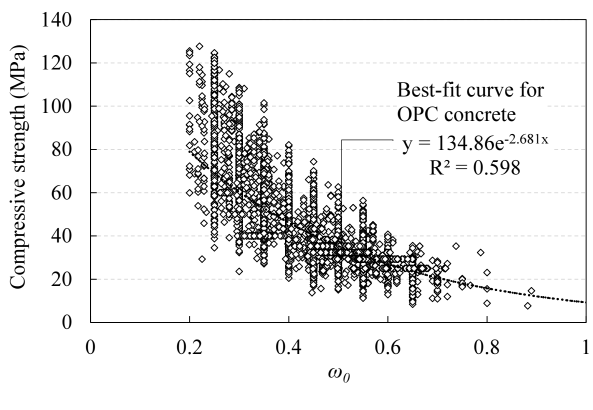

Fig. 2 Effect of water-to-binder ratio on compressive strength of OPC concrete

석으로부터 식 (3)의 실험 상수인 A_o 및 B_o는 각각 134.9와 −2.68로 결정될 수 있었다. 결과적으로 일반 콘크리트의 압축강도($f_{ck(o)}$)와 물-시멘트비(ω_o)의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{ck(o)} = 134.9\exp(-2.68 \cdot \omega_o) \quad (6)$$

3.3 FA 치환 콘크리트

FA를 치환한 콘크리트에서 실험 상수를 결정하기 위한 물-결합재비(ω_a)와 압축강도($f_{ck(a)}$)의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 FA의 치환율(R_F)은 실험결과들의 분포와 신뢰성을 고려하여 20~50%로 제한하였다. Fig. 3에 나타낸 실험결과의 회귀분석으로부터 식 (4)의 실험 상수인 A_a 및 B_a를 산정하여 Table 2에 나타내었다. FA 치환율이 20%에서 50%로 증가할 때 A_a 값은 136에서 142로 증가하였으며, B_a 값은 −3.2에서 −3.8로 감소하였다. 즉, FA 치환율이 증가할수록 A_a 값은 증가하는 반면 B_a 값은 감소하는 경향을 보였다.

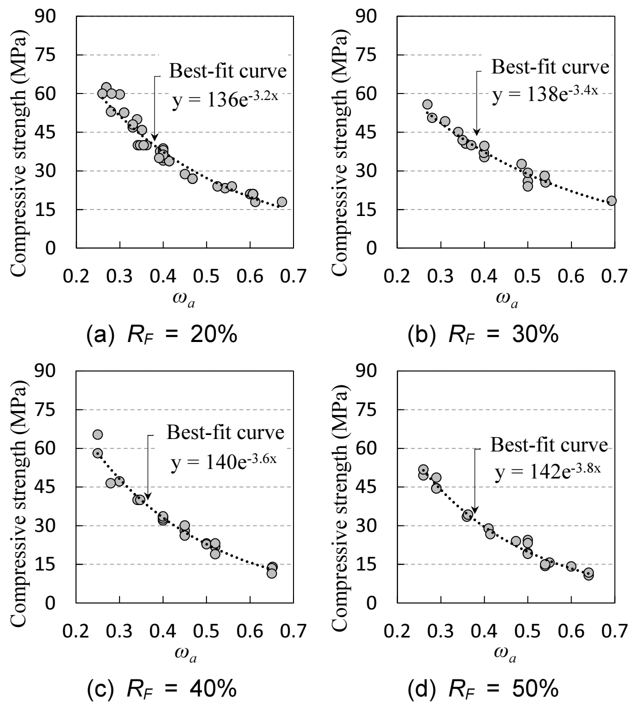

Fig. 3 Effect of water-to-binder ratio on compressive strength of concrete mixes with different FA additions

Table 2 Determination of experimental constants A_a and B_a for concrete mixes with FA addition

Experimental constant	Range of R_F (%)			
	20	30	40	50
A_a	136	138	140	142
B_a	-3.2	-3.4	-3.6	-3.8

3.4 GGBS 치환 콘크리트

GGBS를 치환한 콘크리트에서 실험 상수를 결정하기 위한 물-결합재비(ω_a)와 압축강도($f_{ck(a)}$)의 관계는 Fig. 4와 같다. Fig. 4는 FA 치환 콘크리트와 마찬 가지로 GGBS의 치환율(R_G)은 20~50%로 제한하였다. Fig. 4에 타나난 실험 결과의 회귀분석으로부터 식 (4)의 실험 상수인 A_a 및 B_a를 산정하여 Table 3에 나타내었다. GGBS의 치환율이 20%에서 50%로 증가할 때 A_a 값은 136에서 142로 증가하여 FA 치환 콘크리트의 분석결과와 같은 경향을 나타냈다. 또한, B_a 값은 −3.1에서 -3.7로 감소하여, FA 치환 콘크리트와 같은 경향을 나타냈다. 즉, GGBS 치환 콘크리트의 A_a 값은 치환율이 20%에서 50%로 증가함에 따라 FA 치환 콘크리트와 같은 결과 값을 얻을 수 있었고, B_a 값은 FA 치환 콘크리트와 동일한 감소폭을 나타냈다.

3.5 *k*-값 산정

일반 콘크리트에서 결정된 상수 A_o, B_o와 SCM 콘크리트에서 결정된 A_a와 B_a를 식 (5)에 대입하여 산정한 *k*-값

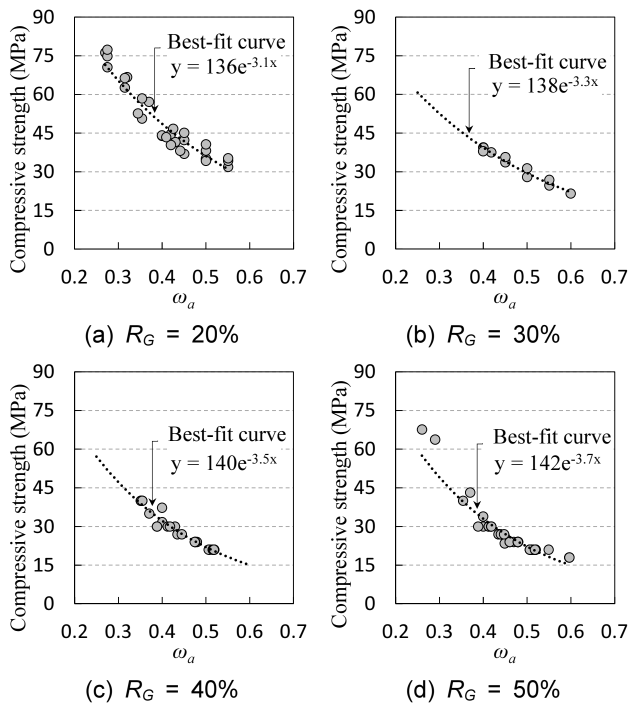

Fig. 4 Effect of water-to-binder ratio on compressive strength of concrete mixes with different GGBS additions

Table 3 Determination of experimental constants A_a and B_a for concrete mixes with GGBS addition

Experimental constant	Range of R_G (%)			
	20	30	40	50
A_a	136	138	140	142
B_a	-3.1	-3.3	-3.5	-3.7

을 Table 4와 5에 나타내었다. SCM 치환 콘크리트가 OPC 100%인 일반 콘크리트와 동등한 압축강도($f_{ck(a)}$)를 확보하기 위한 물-결합재비 결정에 있어 제시 될 수 있는 k-값은 FA 및 GGBS의 치환율이 감소 할수록 그리고, 물-시멘트비가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 또한 k-값의 범위는 0 이상 및 1 이하의 범위로 결정 할 수 있는데, 이는 SCM 치환 콘크리트의 물-결합재비 결정시 그 범위가 0%와 100%사이에서 있기 때문이다.

3.5.1 FA 치환 콘크리트

FA 치환 콘크리트에서 R_F와 *k*-값의 관계를 Table 4 및 Fig. 5에 나타내었다. R_F가 20%에서 50%로 증가하면 *k*-값의 변화는 물-시멘트비가 0.2일 때 0.295에서 0.560으로 증가하고, 물-시멘트비가 0.7일 때에는 0.213에서 0.451로 증가하였다. 즉 FA 치환 콘크리트에서 *k*-값은 R_F의 증가와 함께 증가하는데, 그 증가기울기에 대한 물-시멘트비의 영향은 미미하였다. 또한 FA 치환 콘크리트에서 *k*-값은 동일 물-시멘트비에서 R_F의 증가와 함께 증가하였다. 이는 FA 치환율이 증가할수록 강도가 감소하므로 일반 콘크리트와 동등 수준의 압축강도를 얻기 위해서는 더 낮은 물-결합재비가 필요함을 의미한다. 이와 같은 분석으로부터 FA 치환 콘크리트에서 *k*-값은 R_F와 w_0의 함수로 나타낼 수 있다. *k*-값에 대한 이들 영향변수를 고려하여 회귀분석을 한 결과 FA 콘크리트에서 *k*-값은 다음과 같이 일반화할 수 있었다(Fig. 6).

$$k = 0.06 \cdot \ln(\omega_o^{-1.6} \cdot R_F^3) + 0.5 \tag{7}$$

Fig. 5 및 6으로부터 동일 물-시멘트비에서 R_F 증가에 따른 *k*-값의 증가 폭은 감소한다. 즉, 물-시멘트비가 0.4일 때 R_F가 20%에서 30%로 증가하면 *k*-값의 증가율은 52 %이고, R_F가 40%에서 50%로 증가하면 *k*-값의 증가율은 11 %이다.

3.5.2 GGBS 치환 콘크리트

GGBS 치환 콘크리트에서 R_G와 *k*-값의 관계를 Table 5 및 Fig. 7에 나타내었다. R_G가 20%에서 50%로 증가하면 *k*-값의 변화는 물-시멘트비가 0.2일 때 0.434에서 0.560으로 증가하고, 물-시멘트비가 0.7일 때에는 0.349에서 0.491로 증가하였다. GGBS 치환 콘크리트에서 *k*-값은 R_G의 증가와 함께 증가하는데, 그 값은 FA 치환 콘크리트에 비해 높았다. 즉 동일 물-시멘트비에서 GGBS 치환 콘크리트의 *k*-값은 FA 치환 콘크리트의 *k*-값에 비해 높았다.

이는 GGBS의 치환율이 증가할수록 강도의 감소는 FA 치환 콘크리트에 비하여 더 적게 있음을 의미한다. 즉, GGBS 치환 콘크리트는 일반 콘크리트와 동등 수준의 압축강도를 얻기 위한 물-결합재비의 감소율이 FA 치환콘크리트에 비하여 낮게 있을 수 있다. 반면, GGBS 치환 콘크리트의 *k*-값은 FA 치환 콘크리트와 마찬가지로 물-시멘트비 증가와 함께 감소하였는데, 그 감소기울기는 R_G에 의한 영향은 미미하였다. 또한 GGBS 치환 콘크리트에서 *k*-값은 동일 물-시멘트비에서 R_G의 증가와 함께 증가하였다. 따라서 GGBS 콘크리트에서 *k*-값은 R_G와 w_0의 함수로서 나타낼 수 있다. *k*-값에 대한 이들 영향변수를 고려하여 회귀분석을 한 결과 GGBS 치환 콘크리트에서 *k*-값은 다음과 같이 일반화할 수 있었다(Fig. 8).

Table 4 *k*-values determined from concrete mixes with different FA additions

ω_o	*k*-value			
	R_F = 20%	R_F = 30%	R_F = 40%	R_F = 50%
0.2	0.295	0.433	0.510	0.560
0.25	0.272	0.405	0.479	0.530
0.3	0.257	0.385	0.459	0.510
0.35	0.246	0.372	0.445	0.495
0.4	0.238	0.361	0.434	0.484
0.45	0.231	0.353	0.425	0.476
0.5	0.226	0.347	0.418	0.469
0.55	0.222	0.342	0.413	0.463
0.6	0.218	0.337	0.408	0.459
0.65	0.215	0.334	0.404	0.455
0.7	0.213	0.330	0.401	0.451

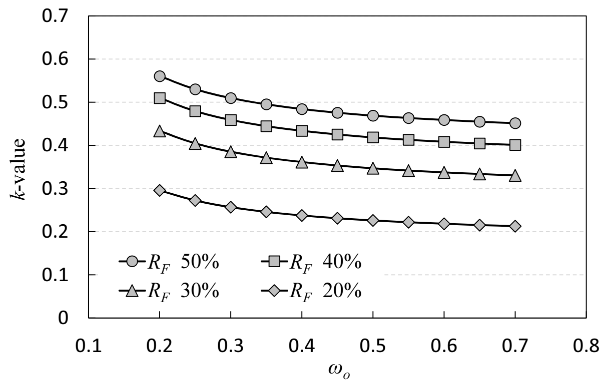

Fig. 5 Effect of water-to-binder ratio on *k*-value of concrete mixes with different FA additions

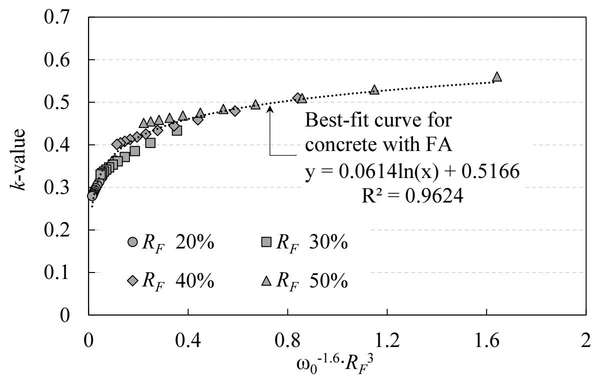

Fig. 6 Modeling of *k*-value for concrete with FA

$$k = 0.1 \cdot \ln(\omega_o^{-0.7} \cdot R_G^{1.75}) + 0.6 \qquad (8)$$

Fig. 7 및 8로부터 동일 물-시멘트비에서 R_G의 증가에 따른 *k*-값의 증가 폭은 감소한다. 물-시멘트비가 0.4 일 때 R_G가 20%에서 30%로 증가하면 *k*-값의 증가율은 18%이고, R_G가 40%에서 50%로 증가하면 *k*-값의 증가율은 7%이다.

Table 5 *k*-values determined from concrete mixes with different GGBS additions

ω_o	k-value			
	R_G = 20%	R_G = 30%	R_G = 40%	R_G = 50%
0.2	0.434	0.517	0.567	0.603
0.25	0.410	0.488	0.536	0.571
0.3	0.394	0.468	0.515	0.550
0.35	0.383	0.454	0.500	0.536
0.4	0.374	0.443	0.489	0.524
0.45	0.368	0.435	0.480	0.516
0.5	0.362	0.428	0.473	0.509
0.55	0.358	0.423	0.468	0.503
0.6	0.354	0.418	0.463	0.498
0.65	0.351	0.414	0.459	0.494
0.7	0.349	0.411	0.455	0.491

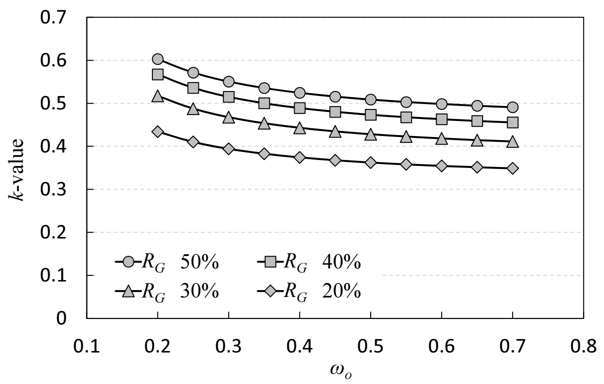

Fig. 7 Effect of water-to-binder ratio on *k*-value of concrete mixes with different GGBS additions

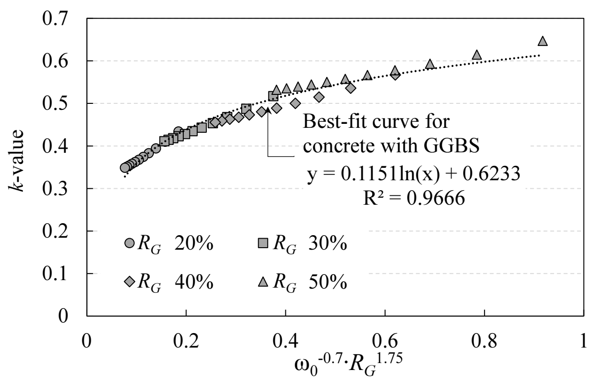

Fig. 8 Modeling of *k*-value for concrete with GGBS

4. 결 론

SCM 치환 콘크리트의 경우 시멘트 100%인 일반 콘크리트와 동등한 압축강도의 확보가 가능한 물-결합재비의 산정을 위한 *k*-값을 결정하고 모델식을 제시하였다. *k*-값 수식의 유도를 위한 콘크리트의 압축강도와 물-결합재비의 관계는 지수함수로 모델링 하였다. 본 연구에서 제시한 *k*-값은 FA 또는 GGBS가 단독으로 최대 50% 치환율 범위내에서 적용할 수 있는 한계를 갖는다. SCM 치환 콘크리트의 등가 압축강도를 위한 *k*-값 결정으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 등가 압축강도에 대한 *k*-값은 FA 및 GGBS의 치환율이 증가 할수록, 그리고 물-시멘트비가 증가할수록 감소하였다.
2) 물-시멘트비 증가에 따른 *k*-값의 감소기울기는 FA 또는 GGBS 치환율에 의해 영향을 받지 않았다.
3) 동일 물-결합재비에서 GGBS 치환 콘크리트의 *k*-값은 FA 치환 콘크리트의 *k*-값에 비해 높았다.
4) SCM 치환 콘크리트의 *k*-값은 물-시멘트 비와 각 SCM 치환율의 함수로 제시될 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 국토교통과학기술진흥원 건설기술혁신사업(과제번호:12CCTI-C063722-01)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Moon, J. H., and Lee, S. S., “Dynamic and Durability Properties of the Low-carbon Concrete using the High Volume Slag”, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.13, No.4, 2013, pp. 351-359.
2. Jung, Y. B., Yang, K. H., and Choi, D. U., “Influence of Fly Ash on Life-Cycle Environmental Impact of Concrete”, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.14, No.6, 2014, pp. 515-522.
3. Yang, K. H., Seo, E. A., Jung, Y. B., and Tae, S. H., “Effect of Ground Granulated Blast-Furnace Slag on Life-Cycle Environmental impact of Concrete”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.26, No.3, 2014, pp. 13-21.
4. Jaung, J. D., Cho, H. D., and Park, S. W., “Properties of Hydration of High-Strength Concrete and Reduction Strategy for Heat Production”, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.12, No.2, 2012. pp. 203-210.
5. Lee, J. H., Kim, Y. R., Park, J. H., and Jeong, Y., “Study on the Mineral Admixture Replacement Ratio for Field Application of Concrete with High Volume Mineral Admixture”, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*,

Vol.1, No.2, 2013, pp. 93-100.
6. Lee, S. S., Song, H. Y., and Lee, S. M., "An Experimental Study on the Influence of High Fineness Fly Ash and Water-Binder Ratio on Properties of Concrete", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.21, No.1, 2009, pp. 29-35.
7. CEN/TR 16639, "Use of k-value Concept, Equivalent Concrete Performance Concept and Equivalent Performance of Combinations Concept", *CEN/TC104*, 2014.

Appendix A: *k*-값 활용의 예

물-시멘트비가 0.5이고, 압축강도($f_{ck(o)}$)는 35 MPa인 OPC 100%인 일반 콘크리트가 있다. FA가 20% 치환된 콘크리트에서 일반 콘크리트와 동일 압축강도 확보를 위한 물-결합재비 결정을 위한 절차

a) 일반 콘크리트 배합 회귀 분석을 통한 실험 상수 A_0 및 B_0의 결정 : 식 (3) 및 Fig. 2
- 실험 상수 A_0 : 134.86
- 실험 상수 B_0 : -2.681

b) FA 20% 치환 콘크리트 배합 회귀 분석을 통한 실험 상수 A_a 및 B_a의 결정 : 식 (4) 및 Fig. 3
- 실험 상수 A_a : 136
- 실험 상수 B_a : -3.15

c) 식 (5)에 의한 *k*-값 산정

$$k = 5 \cdot \frac{(\ln 134.86 - \ln 136 - 2.681 \cdot \omega_0)}{-3.15 \cdot \omega_0} - 4$$

$$= 0.293$$

$$35 = 136\exp(-3.15 \cdot \frac{w_a}{80 + 0.293 \cdot 20})$$

$$w_a = 36.99$$

따라서 필요한 물-결합재비(ω_a)는

$\omega_a = \frac{36.99}{80+20} = 0.37\%$로 결정 될 수 있다.

요 약 본 연구에서는 플라이애시(fly ash, FA) 및 고로슬래그 (ground granulated blast-furnace slag, GGBS)를 치환한 콘크리트의 등가 압축강도를 얻기 위한 물-결합재비 결정의 지표인 *k*-값을 제시하였다. 기존 콘크리트 실험결과(7,076 배합)를 기반으로 FA와 GGBS 치환율이 각각 50% 이내에서 다양한 물-결합재비에 대한 *k*-값을 결정하였다. *k*-값 수식의 유도를 위한 콘크리트의 압축강도와 물-결합재비의 관계는 지수함수로 모델링하였다. 일반적으로 등가 압축강도에 대한 *k*-값은 FA 및 GGBS의 치환율이 증가 할수록, 그리고 물-결합재비가 증가할수록 감소하였다. 물-결합재비 증가에 따른 k-값의 감소기울기는 FA 또는 GGBS 치환율에 의해 영향을 받지 않았다. 동일 물-결합재비에서의 *k*-값은 FA 치환 콘크리트에서보다 GGBS 치환 콘크리트에서 높았다. 궁극적으로, *k*-값은 물-결합재비와 FA 또는 GGBS 치환율의 함수로 일반화하였다.

핵심용어 : 등가 압축강도, *k*-값, 물-결합재비, 플라이애쉬, 고로슬래그