

## 고온환경 조건하에서 고로슬래그를 사용한 콘크리트의 압축강도 증진 해석

한민철·신병철\*

청주대학교 건축공학부, \*중부대학교 환경조경학과  
(2006년 12월 19일 접수; 2007년 2월 27일 채택)

### Estimation of Compressive Strength of Concrete Using Blast Furnace Slag Subjected to High Temperature Environment

Min-Cheol Han and Byung-Cheol Shin\*

Division of Architectural Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea  
\*Department of Landscape Architecture, Joongbu University, Chungnam 312-940, Korea  
(Manuscript received 19 December, 2006; accepted 27 February, 2007)

In this paper, estimation of the compressive strength of the concrete incorporating blast furnace slag subjected to high temperature was discussed. Ordinary Portland cement and blast furnace slag cement (BSC; 30% of blast furnace slag) were used, respectively. Water to binder ratio ranging from 30% to 60% and curing temperature ranging from 20°C ~ 65°C were also chosen for the experimental parameters, respectively. At the high temperature, BSC had higher strength development at early age than OPC concrete and it kept its high strength development at later age due to accelerated latent hydration reaction subjected to high temperature. For the strength estimation, the Logistic model based on maturity equation and the Carino model based on equivalent age were applied to verify the availability of estimation model. It was found that fair agreements between calculated values and measured values were obtained evaluating compressive strength with logistic curve. The application of logistic model at high temperature had remarkable deviations in the same maturity. Whereas, the application of Carino model showed good agreements between calculated values and measured ones regardless of type of cement and W/B. However, some correction factors should be considered to enhance the accuracy of strength estimation of concrete.

Key Words : High temperature, Maturity, Strength development, Blast furnace slag, Logistic model, Equivalent age

#### 1. 서론

최근 산업발전을 환경문제가 발목을 잡는 경우가 많아졌다. 즉, 레미콘 산업의 경우도 환경과 관련된 문제와 자원의 유효한 재활용이라는 문제를 해결하기 위하여 더 많은 초점이 맞춰져서 관리되고 있는 것이 현실이다.

이러한 맥락에서 최근 제로에미션 (Zero emission)이란 용어가 레미콘산업에 있어 환경과 연관

하여 화두로 등장하고 있는데, 이는 배출제로를 의미하는 것으로 유상이든 무상이든 매립되는 최종 처분량을 제로화 시키는 운동으로 정의될 수 있다. 즉, 폐기물을 타 산업의 자원으로 재이용하고 산업 관련만으로 폐기물이 나오지 않게 네트워크시스템을 구축하는 것을 말한다.

레미콘 산업의 경우도 타 산업 및 레미콘 자체적으로 발생하는 폐기물을 재활용할 수 있고, 자체적으로도 폐기물의 발생을 최소화하는 방안도 존재한다. 이러한 폐기물 자원의 재활용과 관련하여 레미콘용 시멘트의 대체재로서 각광을 받는 것 중 하나가 고로슬래그로서 철을 생산하는 용광로 속에서 철광석 중 암석성분이 녹아 쇳물위에 떠있는

Corresponding Author : Byung-Cheol Shin, Department of Landscape Architecture, Joongbu University, Chungnam 312-940, Korea  
Phone: +82-41-753-2268  
E-mail: bcshin@joongbu.ac.kr

것을 흘러내려 냉각시킨 후 분쇄 제조한 것으로 그 자체로는 취약하나 시멘트와 혼합한 경우에는 수산화칼슘과 황산염의 작용으로 경화가 촉진되어 수화열저감, 장기강도향상 및 수밀성 증대 등을 기대할 수 있어 실무에서 많이 활용되고 있다.

한편, 콘크리트의 강도증진은 시멘트의 수화반응에 의하여 이루어지는 것으로서 이러한 수화반응은 양생온도에 많은 영향을 받게 되는데, 양생온도가 높을 경우 초기에 활발한 수화반응에 의하여 높은 강도증진을 보이거나, 양생온도가 낮을 경우 지연된 수화반응에 의하여 강도지연을 피할 수 없게 된다.

이러한 양생온도가 콘크리트의 강도증진에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 양생온도와 재령과의 관계를 고려하는 적산온도 개념을 이용하는 방법으로 전세계 많은 연구자들이 강도증진해석에 관한 다양한 연구결과를 보고하고 있다<sup>1~6)</sup>.

이러한 적산온도는 온도와 재령의 선형관계를 이용하는 방법과 Arrhenius의 수화반응속도에 의한 등가재령개념이 주로 적용되고 있는데, 현재까지 적산온도를 이용한 콘크리트의 강도증진해석에 관한 대부분의 연구는 저온영역에서 이루어진 것이 대부분으로 이 경우 강도증진해석 결과는 매우 양호한 정밀도를 갖는 것으로 보고되고 있다<sup>1~3)</sup>.

그러나, 서중환경조건에서 콘크리트 시공, 초고층 대형 구조물의 매스콘크리트 시공 및 콘크리트 2차제품의 증기양생 등의 경우에 있어서는 콘크리트가 초기에 비교적 높은 온도이력을 받게 되고 이로 인하여 초기강도는 높아지나, 이후의 장기강도는 점차로 저하되는 경향을 보인다. 따라서, 고온조건에서는 일반적인 온도조건에서와는 다른 온도이력으로 인하여 다른 강도증진 경향을 보이게 되어 기존의 적산온도 방법에 의한 강도추정에 비정확성이 나타나는 것으로 보고되고 있다<sup>7,8)</sup>.

또한, 고강도, 매스콘크리트 및 콘크리트 제품의 경우 경제성 확보, 수화열 저감 및 물성개선 등의 목적으로 고로슬래그와 같은 광물질 혼화제를 사용하는 경우가 일반적으로 이러한 고로슬래그는 고온에서 촉진된 잠재수경성 반응에 의하여 강도를 향상시키는 것으로 알려져 있다.

그러나, 이러한 고온조건이 콘크리트의 강도증진 및 강도추정에 미치는 영향에 관하여는 국외적으로 일부 연구자들이 보고된 사례가 있으나, 우리나라의 경우 이에 대한 연구가 부족한 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 고로슬래그를 사용한 콘크리트를 대상으로 고온양생조건에서의 강도증진 특성을 검토하고, 이를 토대로 적산온도기법에 의한 강도증진해석을 실시하므로써 궁극적으로는 고온조건이 콘크리트의 강도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합사항은 Table 2와 같다. 먼저, 물결합재비(W/B)는 30, 40, 50, 60%의 4수준으로 계획하고, 결합재는 OPC와 BSC의 2종류로 하며, 양생온도는 실무조건을 고려하여 표준양생온도인 20℃와 고온조건인 35, 50 및 65℃의 4수준으로 계획한다.

### 2.2. 사용재료

본 연구에 사용한 시멘트의 경우 OPC는 국내산 S사제를 사용하고, BSC의 경우는 고로슬래그 미분말이 30%혼입된 A사제의 고로슬래그 시멘트를 사용하는데, 각각의 물리적 성질은 Table 3과 같다.

한편, 유동성 및 공기량 확보를 위하여 사용되는 혼화제는 Table 4와 같고, 골재로서 잔골재는 충남 병천산 강모래(밀도:2.58 g/cm<sup>3</sup>, 조립율:2.43)를 사

Table 1. Design of experiments

Factors		Items	
	W/B(%)	4	30, 40, 50, 60
	Binder	2	Ordinary Portland cement(OPC) Blast furnace slag cement(30% of blast furnace slag:BSC)
Mixture	Target slump	2	21±1cm (W/B 30~40%) 18±1cm (W/B 50~60%)
	Target air content	1	4.5±1.5(%)
	Curing temperature(℃)	4	20, 35, 50, 65
Test	Fresh concrete	2	Slump, Air content
	Hardened concrete	1	Compressive strength

Table 2. Mixture proportions of concretes

	W/B (%)	S/A (%)	AE/C (%)	SP/C (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	Volume (ℓ/m <sup>3</sup> )		
						C	S	G
OPC	30	38	0.003	1.90	172	195	219	357
	40	39	0.002	0.84	179	146	244	382
	50	39	0.26*	-	182	116	256	401
	60	40	0.18*	-	181	96	264	414
BSC	30	36	0.004	2.30	184	208	203	360
	40	37	0.003	1.00	183	156	228	388
	50	39	0.3*	-	181	123	254	397
	60	41	0.4*	-	180	102	275	398

\* indicates AE water reducing agent

Table 3. Physical properties of cements

Cement	Setting time (Min.)		Compressive strength (MPa)			Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Soundness (%)	L.O.I (%)
	Ini.	Fin.	3ds.	7ds.	28ds.				
OPC	237	341	24.5	30.1	34.6	3,412	3.15	0.05	0.9
BSC	250	460	18.9	27.7	39.7	3,720	2.94	0.08	0.8

Table 4. Physical properties of chemical agents

Agents	Basis	Appearance	Color	Density(g/cm <sup>3</sup> )
Superplasticizer	sulfonic acid melamine based	grain	white	-
AE agent	Synthetic tensides	aequos	brown	1.02
AE water reducing agent	Naphtalene	aequos	brown	1.14

용하며, 굵은 골재는 충북 괴산산 20mm 화강암 부순돌(밀도:2.61 g/cm<sup>3</sup>, 조립율:6.70)을 사용한다.

### 2.3. 실험방법

본 연구의 실험방법으로 콘크리트의 혼합은 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 혼합하였다. 굳지않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프는 KS F 2402 규정에 의거 실시하였고, 슬럼프 플로우는 슬럼프 측

정이 끝난 후 최대직경과 이에 직교하는 직경의 평균치로 하였다. 공기량 및 단위용적질량은 KS F 2421 및 2409의 규정에 따라 실시하였고, 응결시간은 KS F 2436의 프록터 관입저항 시험방법에 의거 측정하였다.

공시체의 양생방법은 콘크리트 타설후 소정의 양생온도가 유지되도록 1일간 기중봉함 양생을 실시한 후 탈형하여 소요의 재령까지 소정의 온도가

Table 5. Age and maturity for compressive strength

W/B (%)	Temperature (°C)	Age and maturity								
		1 days	3 days	7 days	14 days	21 days	28 days	56 days	96 days	
30	20	30	90	210	420	630	840	1725	2730	
	35	0.7	2	4.7	9.3	14	18.7	37.3	60.7	
40	50	30	90	210	420	630	840	1680	2730	
50		0.5	1.5	3.5	7	10.5	14	28	45.5	
60	65	30	90	210	420	630	840	1680	2730	
60		0.4	1.2	2.8	5.6	8.4	11.2	22.4	36.4	
		30	90	210	420	630	840	1680	2730	

유지되는 수중양생조에서 수중양생을 실시하였다.  
한편, 경화 콘크리트의 실험으로 압축강도는 KS F 2405 규정에 의거하여 실험계획된 소경의 양생 온도에서 계획된 재령까지 양생한 후 측정하였다 (Table 5 참조).

### 3. 적산온도, 등가재령 및 강도증진해석에 관한 고찰

#### 3.1. 적산온도 및 등가재령

적산온도는 콘크리트의 강도증진에 있어서 양생 온도와 시간이 미치는 영향을 정량적으로 표시하는 함수로서, 일정기준온도이상에서의 양생온도와 시간함수의 조합을 의미한다. (식(1) 참조)

$$M = \int_0^t H(T) dt \quad (1)$$

여기서,

- M : 적산온도(°C · day)
- H(T) : 적산온도 함수

적산온도 식은 Saul에 의한 온도와 재령에 의한 선형 관계식인 식 (2)와 Freisleben-Hansen에 의한 Arrhenius 화학반응속도식 (3)을 이용한 적산온도식인 등가재령식으로 표현되는데, 등가재령은 식(4)와 같이 실제 콘크리트의 양생에서 동일한 적산온도가 되는 표준온도(20°C)에서의 양생시간을 의미한다. 등가재령식은 식 (5)에 제시되어 있다.

#### 1) 온도와 재령에 의한 선형 적산온도

$$M = \int_0^t (T_c - T_0) dt \quad (2)$$

여기서,

- M : 적산온도(°C · day)
- T<sub>c</sub> : 시간 t동안의 온도(°C)
- T<sub>0</sub> : 기준온도(일반적으로 -10°C)

#### 2) Arrhenius의 화학 반응속도에 의한 적산온도

$$k_T = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

여기서,

- k<sub>T</sub> : 속도상수
- A : 빈도계수
- E<sub>a</sub> : 결보기 활성화 에너지(KJ/mol)
- R : 가스 상수(8.314J/mol · K)
- T : 절대온도(°K, 273+°C)

$$t_e = \frac{\int_0^t H(T) dt}{H(T_r)} \quad (4)$$

여기서,

- H(T) : 양생온도 T에서의 적산온도 함수
- H(T<sub>r</sub>) : 양생온도 20°C에서의 적산온도 함수

$$t_e = \int_0^t \exp\left(\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right) dt \quad (5)$$

여기서,

- t<sub>e</sub> : 등가재령(일)
- T<sub>r</sub> : 20°C에서의 절대온도(293°K)
- T : 양생온도 T<sub>0</sub>에서의 절대온도(°K, 273+°C)

#### 3.2. 콘크리트의 강도증진해석 모델

본 연구에서 적용한 강도증진 해석모델은 2가지를 사용하였는데, 온도와 재령의 선형적산온도를 이용하는 로지스틱모델과, 등가재령을 이용하는 Carino 모델이 적용되었다.

##### 3.2.1. 로지스틱(Logistic) 모델

콘크리트의 강도증진 해석을 위한 로지스틱 모델은 복잡한 시멘트 수화반응을 일차의 단분자 자촉반응으로 판정하고, 반응속도를 고려하는 방법을 이용하여 강도증진 곡선으로 활용한다. 여기서 단분자 자촉반응이라는 것은 생성물 자체가 반응을 촉진하여 생성물의 양이 시간과 함께 증가하는 것을 말한다. 한편 반응속도식은 생성물의 양이 들어와 혼합되어 얻어지는 과정을 나타내는 식 (6)과 같이 표현된다<sup>9)</sup>.

$$\frac{dx}{dt} = k(a-x) \cdot x \quad (6)$$

- 여기서, a : 반응에 의한 총량
- x : 시간 t에서의 반응량
- k : 반응속도 상수

이식을 변형하여 적산온도에 대응하는 압축강도 증진곡선 식 (7)을 얻는다.

$$S = \frac{S_u}{1 + \exp(-k \cdot \log M + m)} \quad (7)$$

- 여기서, S : 압축강도 (MPa)
- S<sub>u</sub> : 최종도달강도 (MPa)
- M : 적산온도 (°C · day)
- k, m : 실험상수

##### 3.2.1 쌍곡선 모델

양생온도에 따른 콘크리트의 강도증진해석을 위

Table 6. Test results of fresh concretes

Items	OPC				BSC			
	W/B(%)				W/B(%)			
	30	40	50	60	30	40	50	60
Slump (cm)	22.3	21.5	17.6	16.7	20.9	22.2	18.0	16.7
Air content(%)	3.8	3.9	4.1	4.9	3.9	4.0	4.1	3.4
Setting time(hr.)	16.0	14.5	14.0	13.5	18.7	17.2	16.0	15.8

하여는 강도와 적산온도와의 관계가 필요하다. 적산온도에 의한 강도증진해석은 적산온도에 의하여 온도와 재령의 복합적인 효과가 정량화된 후 적산온도를 강도의 환산 지수로 적용되기 시작하였다. Bernhardt<sup>10)</sup>는 콘크리트의 상대강도가 콘크리트의 미수화된 부분의 크기와 비례하며 시멘트의 수화시 이를 지표화하는 비례상수로서 반응을 상수 (k)를 도입하였다.

$$\frac{d(S/S_u)}{dt} = k(1 - \frac{S}{S_u}) \quad (8)$$

여기서, S : 콘크리트강도  
 S<sub>u</sub> : 무한 적산온도에서의 종국강도  
 k : 반응을 상수(rate constant)

한편, Carino<sup>1)</sup>는 쌍곡선함수의 회귀모델은 지수함수보다 정확한 예측값을 얻을 수 있다는 것을 보고하고 시멘트의 수화반응 과정시 잠재기(dormant period)를 설명할 수 있는 세 번째 변수를 도입하여 다음 식 (9)와 같은 모델을 제시하였다. 이식에서 강도증진은 t<sub>0</sub>에서 시작되며 응결기간 동안의 점진적인 강도증진은 고려되지 않는다. 여기서 S<sub>u</sub>, k, t<sub>0</sub>는 최소제곱법에 의한 회귀분석을 통하여 구할 수 있다.

$$S = \frac{S_u(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)} \quad (9)$$

여기서, S : 재령 t에서의 강도  
 S<sub>u</sub> : 한계강도  
 k : 반응을 상수(rate constant)  
 t<sub>0</sub> : 강도증진이 시작되는 재령

#### 4. 실험결과 및 분석

##### 4.1. 굳지않은 콘크리트의 기초물성

Table 6은 시멘트 종류 및 W/B별 굳지않은 콘크리트의 기초물성을 나타낸 것이다. 전반적으로 슬럼프 및 공기량은 배합설계를 실시하여 모두 목표한 값을 만족시키는 것으로 나타났다. 한편, 응결시간의 경우 BSC가 OPC를 사용한 경우보다 약

간 지연되는 것을 알 수 있었다.

##### 4.2. 재령경과에 따른 압축강도증진

Fig. 1은 시멘트 종류별로 구분하여 W/B 및 양생온도별로 재령경과에 따른 콘크리트의 강도증진 성상을 나타낸 것이다.

전반적으로 재령이 경과함에 따라 압축강도는 증진되고 W/B가 감소할수록 높은 강도를 나타내

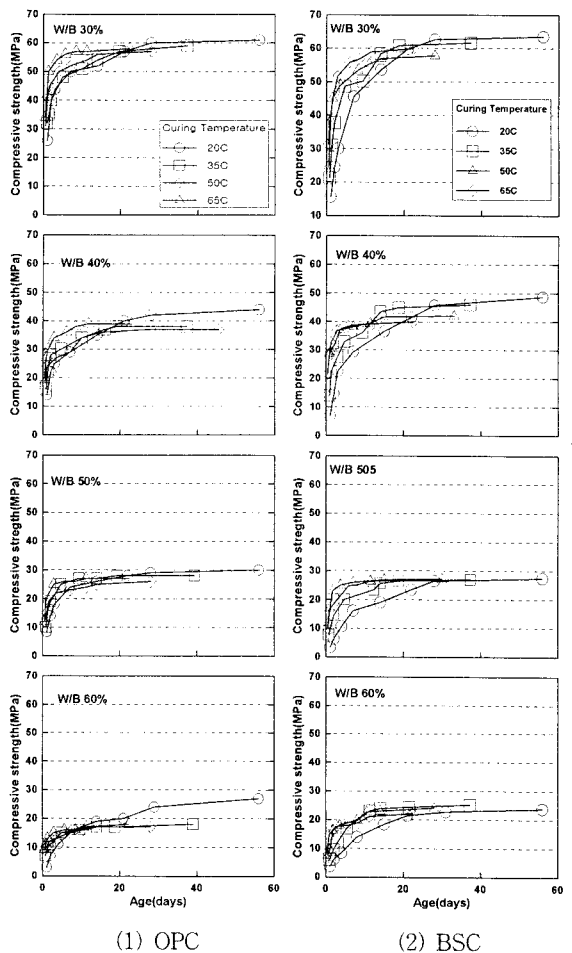


Fig. 1. Strength development of concrete in response to age.

Table 7. Regression coefficients of Logistic model

Coefficient	OPC				BSC			
	W/B(%)				W/B(%)			
	30	40	50	60	30	40	50	60
$S_u$	60.4	42.5	28.1	21.9	63.62	46.3	29.0	26.6
$k$	0.79	0.74	1.12	0.70	0.89	0.85	0.90	0.86
$m$	2.68	2.86	4.34	3.09	3.58	3.54	4.00	4.15
$R^2$	0.929	0.920	0.938	0.777	0.908	0.830	0.834	0.890

었는데, 양생온도별로는 온도가 높을수록 초기재령에서 높은 강도를 나타내고 있었다.

시멘트 종류별로는 OPC를 사용한 경우 양생온도가 높을수록 초기재령에서는 높은 강도증진 경향을 보이고 있으나, 재령이 경과할수록 강도증진이 둔화되는 것으로 나타나고 있는데, 대략 7일전후로 이러한 경향이 역전되어 20℃의 경우보다 강도가 저하하는 것을 알 수 있었다. 이는 초기에 고온을 받은 경우 콘크리트 내부의 전체 공극량을 증가시키고 이로 인하여 시멘트 매트릭스가 상대적으로 포러스한 구조가 되며 구성재료간의 열팽창계수 차이에 의한 미세한 균열의 형성으로 재령이 경과할수록 강도가 저하하는 원인으로 판단된다<sup>7,8)</sup>.

한편, BSC를 사용한 경우에는 OPC에 비하여 전반적으로 양생온도가 높을수록 초기에 높은 강도증진을 나타내고 있으며 재령이 경과하여도 지속적으로 높은 강도증진 경향을 보이고 있다. 이는 고온에 의하여 촉진된 잠재수경성 반응에 기인한 것으로 판단된다.

#### 4.2. 적산온도에 의한 강도증진해석

##### 4.2.1 로지스틱 모델에 의한 강도증진해석

Table 7은 회귀분석에 의한 로지스틱 모델식의 실험상수 값을 나타낸 것이다.

전반적으로 W/B가 증가할수록 최종도달강도( $S_u$ )값은 작아지는 것으로 나타났고, 결정계수의 경우 0.77~0.93의 범위로 나타났는데, 이는 기존의 문헌에서 연구된 결과에 따르면 20℃이하의 온도 영역에서의 결정계수 값인 0.95이상의 값보다 적게 나타난 것으로 특히 W/B 60%의 경우 0.78이하의 값으로 상관성이 높지 않음을 알 수 있어 저온조건 및 표준양생 온도 조건에서의 결과보다 강도해석의 결과치가 양호하지 않음을 보여주는 것이다. 따라서 고온조건에서 적산온도기법에 의한 강도증진해석을 수행할 경우 추정 정밀도를 향상시키기 위한 별도의 고려가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 2는 시멘트 종류 및 W/B별 적산온도 경과에 따른 로지스틱모델에 의한 강도증진해석 결과를 나타낸 것이다.

전반적으로 초기적산온도 및 장기적산온도에서 양생온도별로 강도증진경향의 차이가 크기 때문에 데이터 값들이 큰 편차를 보이고 있으며, 특히 840 ℃·D 이후의 장기적산온도로 갈수록 이러한 경향은 더욱 증가됨을 볼 수 있다. 이는 저온에서의 강도증진해석을 실시한 기존의 연구결과와 비교할 경우 그 차이가 극명하게 나타나 고온조건에서 적산온도에 의한 강도증진해석의 경우 온도의 영향

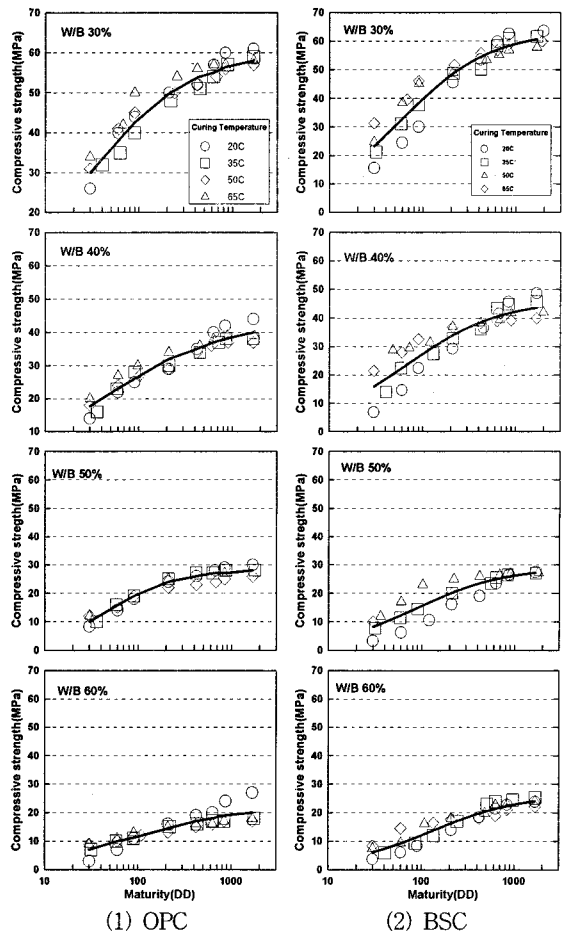


Fig. 2. Estimation of strength development by Logistic model.

을 충분히 고려하지 못해 정확성이 그다지 크지 않다는 기존의 연구결과와 유사한 경향을 보였다<sup>9)</sup>.

4.2.2. Carino model에 의한 강도증진 해석

일반적으로 강도증진해석의 또 다른 접근방법으로는 저온조건 및 표준온도 조건에서 전술한 적산온도기법보다 양호한 추정결과를 얻을 수 있는 것으로 알려진 등가재령에 의한 강도증진해석방법이 활용되

고 있는데, 본 연구에서 등가재령을 이용한 강도증진 해석은 Carino 모델을(식 9) 이용하였고, 이를 적용하기 위하여는 등가재령 산정시 결보기 활성화 에너지( $E_a$ )값을 우선 산정해야 함에 본 연구에서는 OPC를 사용한 경우 아래 식 (10)과 같이 Freisleben Hansen Pederson의 제안식을 이용하였으며, BSC의 경우는 RILEM에서 제시한 48.8 KJ/mol 값을 적용하였다<sup>11)</sup>.

- 1)  $T < 20^\circ\text{C}$  일 경우  $E = 33.5 + 1.47(20 - T)$  KJ/mol (10)
- 2)  $T \geq 20^\circ\text{C}$  일 경우  $E = 33.5$  KJ/mol

Table 8 및 Fig. 3은 등가재령을 이용한 Carino 모델의 실험상수값의 회귀분석결과와 이를 그래프로 나타낸 것이다. 전반적으로 W/B가 증가할수록 최종도달강도 ( $S_u$ )값은 감소하는 것으로 나타났고, 결정계수의 경우는 전반적으로 0.91 이상의 양호한 값을 갖는 것으로 나타났으나, OPC를 사용한 경우 W/B 60%에서는 0.743으로 작게 나타났다. 또한, 초기 등가재령에서는 해석치가 측정치를 양호하게 추정함을 확인할 수 있었으나, 후기 등가재령에서는 양생온도별 강도의 편차에 의해 추정정밀도가 저하되는 경향을 볼 수 있었다.

전술한 로지스틱 모델식에 의한 경우와 비교를 해보면 전반적으로 OPC를 사용한 경우는 거의 유사한 수준의 결정계수 값을 갖고 있었고, BSC를 사용한 경우 역시 약간 높거나 커다란 차이가 없는 것을 알 수 있는데, 이는 등가재령에 의한 강도증진해석결과가 기존의 적산온도 개념에 의한 해석보다 넓은 온도조건에서 양호하게 적용될 수 있다고 알려진 기존의 연구결과와는 약간 다른 경향으로서 궁극적으로 고온조건에서도 초기 고온의 영향을 고려하기 위한 별도의 보정방법이 제시되어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 4는 시멘트 종류에 관계없이 적산온도에 의한 로지스틱모델식과 등가재령에 의한 Carino모델식의 측정치와 해석치를 비교한 것이다. 먼저, 로지스틱 모델식에 의한 경우는 해석치와 측정치간에 비교적 차이를 보이고 있음을 알 수 있는 반면에 Carino모델에 의한 경우는 저강도 영역에서는

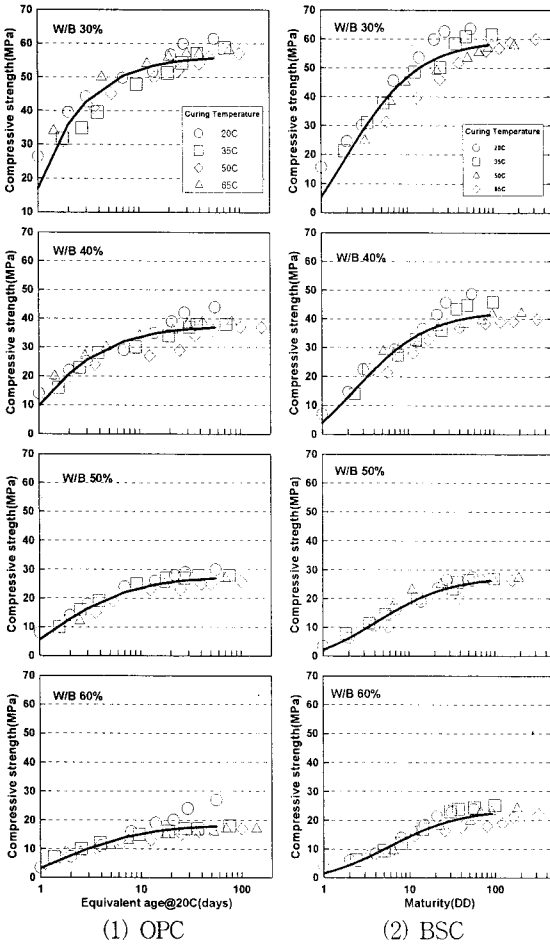


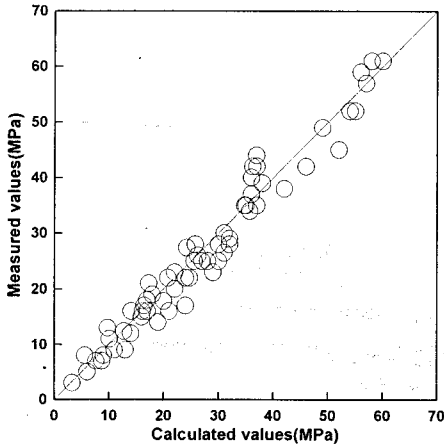
Fig 3. Estimation of strength development by Carino model.

Table 8. Regression coefficient of Carino model

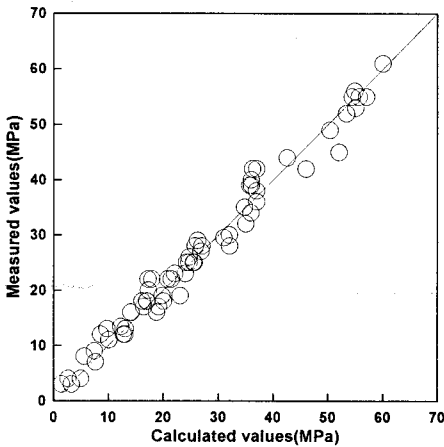
Coefficient	OPC				BSC			
	W/B(%)				W/B(%)			
	30	40	50	60	30	40	50	60
$S_u$	56.4	37.7	27.8	18.6	59.6	42.8	27.6	23.88
$k_r$	1.32	0.88	0.59	0.48	0.39	0.33	0.21	0.16
$t_0$	0.667	0.604	0.583	0.563	0.74	0.69	0.62	0.60
$R^2$	0.917	0.923	0.914	0.743	0.897	0.880	0.910	0.880

해석치와 측정치간의 유사한 강도를 나타내는 것을 알 수 있다.

금후의 과제로는 겔보기 활성화 에너지 값의 적절한 결정을 통한 등가재령의 평가와 아울러 표준 양생온도 및 저온영역에서의 얻어진 정밀도 수준을 확보하기 위한 고온영역에서의 등가재령 및 강도증진 해석모델의 수정이 필요할 것으로 판단된다.



(1) Comparison of measured values and calculated values by Logistic model



(2) Comparison of measured values and calculated values by Carino model

Fig. 4. Comparison of measured strength and calculated one.

### 5. 결론

본 연구는 고온영역에서 고로슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트의 강도증진을 적산온도 및 등가재령 방식으로 해석하므로써 양생온도가 콘크리트의 강도증진에 미치는 영향에 대하여 정량적으로

평가하고자 하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 재령경과에 따른 콘크리트의 강도증진성상으로 BSC혼입 콘크리트는 OPC사용 콘크리트에 비하여 양생온도가 높아질수록 초기에 높은 강도발현을 보이고 있으며, 촉진된 잠재수경성 반응에 기인하여 재령이 경과하여도 높은 강도증진을 보이는 것으로 나타났다.

2) 양생온도가 높아질수록 OPC사용 콘크리트의 경우 초기에는 높은 강도증진을 보이나, 재령이 경과할수록 강도증진이 둔화하여 20℃양생조건보다 낮은 강도를 나타내는데, 이는 고온으로 될 수록 구성재료간의 열팽창계수의 차이에 의한 미세균열의 증가에 기인된 것으로 분석된다.

3) 적산온도에 따른 로지스틱모델을 이용한 강도증진해석결과 고온 양생조건에서의 해석결과는 표준양생온도조건에 비하여 결정계수가 저하하고 동일적산온도에서 양생온도별 강도편차가 크게 발생하는 등 전반적으로 해석의 정밀도는 높지 않은 것으로 나타났다.

4) 고온영역에서 등가재령에 의한 Carino모델을 이용하여 강도증진해석을 수행한 결과 로지스틱모델에 의한 해석결과보다는 양호한 상관성을 갖기는 하지만 큰 차이는 아닌 것으로 사료되고, 고온영역에서의 정밀도를 향상시키기 위한 별도의 수정방향이 필요할 것으로 사료된다.

### 참고 문헌

- 1) Carino N. J., 1984, Maturity method; theory and application., J. Cement Concrete and Aggregate, ASTM, 1-12.
- 2) Naik T. R., 1992, Maturity of concrete ; Its application and limitations, CANMET, 329-359.
- 3) Plowman J. M., 1956, Maturity and strength of concrete. Magazine of Concrete Research (London), 8(22), 13-22.
- 4) Freisleben H. P., Pederson J., 1977, Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete Strength, Nordisk Betong, 19-34.
- 5) Chengju G., 1989, Maturity of concrete, method for predicting early-stage strength, ACI Materials Journal, 86(4), 341-353.
- 6) Kada-Benameur E., Wirquin B. D., 2003, Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry, Cement and Concrete Research, 30, 301-305.



- 7) Kjellsen K. O., 1999, Heat curing and post-heat curing regimes of high performance concrete ; Influence of microstructure and C-S-H composition, *Cem. Concr. Res.*, 26(2), 295-307.
- 8) Escalente-Garcia J. I., Sharp J. H., 2004, The micro-structure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures, *Cem. Concr. Res.*, 31, 695-702.
- 9)鎌田英治, 洪悅郎, 林直樹, 1990, 寒中콘크리트를對象とした콘크리트強度増進曲線の検討, *セメント技術年報*, 1-25.
- 10) Bernhardt, 1956, Hardening of concrete at Different Temperatures, *RILEM Symposium on Winter Concreting*, Institute for Building Research.
- 11) Carino N. J., Tank R. C., 1992, Maturity functions for concretes made with various cements and admixtures, *ACI Materials Journal*, 188-196.
- 12) 한천구, 한민철, 1999, 적산온도방식의 콘크리트 강도증진해석에 의한 기온보정강도의 검토, *대한건축학회 논문집 구조계*, 15(11), 71-78.
- 13) 寺田米男, 1986, 各種セメントを用いたモルタルコンクリートの強度推定方法について, *セメント技術年報*, 35, 1-35.
- 14) 笠井芳夫, 콘크리트의初期強度初期養生に關する研究, 博士學位論文, 建築工學科, 東京大學, 日本.
- 15) 友澤史紀, 1998, 콘크리트의促進養生とその建築生産工業化への利用-第Ⅲ編콘크리트의強度發現關する速度論的研究, *콘크리트工學*, 11-23.
- 16) 한천구, 한민철, 2002, 기온과 콘크리트, 1판, 기문당, 1-100pp.