

## 적산온도에 의한 FRC 기층의 강도발현 성능 분석

### Performance Analysis of Strength Development of FRC Base Depending on Maturity

최성용	Choi, Sung-Yong	정회원 · (주)이노블록 기술연구소 선임연구원 · 주저자 (E-mail : kinopio81@inoblock.bizmeko.com)
박영환	Park, Young-Hwan	한국건설기술연구원 구조융합연구소 선임연구위원 (E-mail : yhpark@kict.re.kr)
정우태	Jung, Woo-Tai	한국건설기술연구원 구조융합연구소 수석연구원 · 교신저자 (E-mail : woody@kict.re.kr)

#### ABSTRACT

**PURPOSES :** In this study, we analyzed the compressive strength characteristics of lean base concrete in relation to changes in the outdoor temperature after analyzing the cold and hot weather temperature standards and calculated the minimum and maximum temperatures when pouring concrete. We examined the rate of strength development of lean base concrete in relation to the temperature change and derived an appropriate analysis formula for FRC base structures by assigning the accumulated strength data and existing maturity formula.

**METHODS :** We measured the strength changes at three curing temperatures (5, 20, and 35°C) by curing the concrete in a temperature range that covered the lowest temperature of the cold period, 5°C, to the highest temperature of the hot period, 35°C. We assigned the general lean concrete and FRC as test variables. A strength test was planned to measure the strength after 3, 5, 7, 14, and 28 days.

**RESULTS :** According to the results of compressive strength tests of plain concrete and FRC in relation to curing temperature, the plain concrete had a compressive strength greater than 5 MPa at all curing temperatures on day 5 and satisfied the lean concrete standard. In the case of FRC, because the initial strength was substantially reduced as a result of a 30% substitution of fly ash, it did not satisfy the strength standard of 5 MPa when it was cured at 5°C on day 7. In addition, because the fly ash in the FRC caused a Pozzolanic reaction with the progress into late age, the amount of strength development increased. In the case of a curing temperature of 20°C, the FRC strength was about 66% on day 3 compared with the plain concrete, but it is increased to about 77% on day 28. In the case of a curing temperature of 35°C, the FRC strength development rate was about 63% on day 3 compared with the plain concrete, but it increased to about 88% on day 28.

**CONCLUSIONS :** We derived a strength analysis formula using the maturity temperatures with all the strength data and presented the point in time when it reached the base concrete standard, which was 5 MPa for each air temperature. We believe that our findings could be utilized as a reference in the construction of base concrete for a site during a cold or hot weather period.

#### Keywords

*Fiber Reinforced Concrete, macro-fiber, lean concrete, pavement, equivalent age, maturity*

Corresponding Author : Jung, Woo Tai, Researcher  
Korea Institute of Construction Technology(Daehwa-Dong) 283,  
Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea  
Tel : +82.31.9100.580 Fax : +82.31.9100.120  
E-mail : woody@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ksre.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (print)  
ISSN 2287-3678 (Online)

Received Oct. 20, 2014 Revised Oct. 30, 2014 Accepted Jan. 26, 2016

## 1. 서론

우리나라의 기온특성은 여름과 겨울의 계절에 따른 온도차가 뚜렷하며, 북에서 남으로 갈수록 기온이 높아진다는 것이다. 이러한 계절에 따른 뚜렷한 온도차는 각

종 건설현장에서 사용되는 콘크리트 타설 시 강도발현 속도 및 작업 성능에 많은 영향을 미치게 된다. 도로공사에서도 빈배합 콘크리트 등을 사용하여 포장의 기층이나 보조기층재로 사용하고 있다. 이러한 빈배합 콘크

리트의 기준 강도는 재령 7일에서 5MPa 이상의 압축강도를 만족하도록 규정하고 있으며, 기준 강도를 만족하였을 때 교통개방 및 상부시공을 실시하도록 정하고 있다(도로포장지침, 2005).

그러나 우리나라의 기온특성상 재령 7일에서의 강도 성능은 계절에 따라서 다르게 나타나는데, 서중 시는 고온 양생으로 인한 빠른 수화반응으로 인해 강도발현 속도가 크게 증가하지만, 한랭기 또는 한중시기에 타설할 경우 저온에서의 양생으로 인해 수화속도가 느려져 원하는 기준강도의 발현이 현저히 늦어지게 되며, 5MPa의 발현 시기를 적절히 판단하는 것은 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 우리나라의 한·서중 온도 기준을 분석하여 콘크리트 타설 시의 최소 최대 온도범위를 산정한 후 외기온도 변화에 따른 빈배합 기층 콘크리트의 압축강도 특성을 분석하여, 온도변화에 따른 빈배합 기층 콘크리트의 강도발현 속도를 알아보고, 축적된 강도데이터 및 기존의 적산온도식을 대입하여 FRC 기층 구조체에 적합한 해석식을 도출하고자 한다.

## 2. 외기온도에 따른 콘크리트의 시공구분

### 2.1. 한중 콘크리트

우리나라 건축공사 표준시방서에 따르면 ‘한중 콘크리트란, 콘크리트를 부어 넣은 후의 양생기간에 콘크리트가 동결할 염려가 있는 경우에 시공되는 콘크리트’라고 설명하고 있다. 또한, 한국콘크리트학회에서 규정하고 있는 한중 콘크리트의 적용기간은 ‘하루의 평균기온이 4℃ 이하가 되는 기상조건 하에서는 응결경화반응이 매우 지연되어 콘크리트가 동결할 염려가 있으므로 한중 콘크리트로 시공해야 한다’고 규정되어 있다.

한중시기인 -5℃ 이하의 외기온도에서 콘크리트를 타설할 경우 콘크리트 내부의 수분이 동결하여 콘크리트의 수화를 급격하게 지연시키며 초기 동해가 발생하게 되고 품질에 매우 큰 악영향을 미치게 된다. 때문에 한중시기에는 콘크리트 타설 시 온도를 상승시키기 위해 난방장치 등을 추가로 하여 콘크리트의 동결을 예방하는 것이 일반적이나 시공비용이 크게 증가하게 된다.

### 2.2. 한랭기 콘크리트

한랭기란 콘크리트를 부어넣은 후 4주까지의 평균기온이 4~17℃ 정도에 해당되는 기간을 말한다. 한랭기 기간에 타설되는 콘크리트는 28일간 평균기온에 따라

표준양생된 콘크리트와 비교 시 강도발현이 상당 부분 저조하게 된다. 이러한 것에 대한 보정방법은 소요강도를 배합설계 시 증가시키거나 관리재령을 연장해줌으로써 콘크리트의 강도저하를 해결하는 것이 가능하다.

## 2.3. 서중 콘크리트

서중 콘크리트란 고온으로 콘크리트의 슬럼프 저하나 수분의 급격한 증발 등의 염려가 있을 경우에 시공되는 콘크리트를 말한다. 한국콘크리트학회에서는 ‘서중 콘크리트로서 시공해야 할 시기를 일률적으로 정하기는 곤란하나, 하루 평균 기온이 25℃ 또는 최고온도가 30℃를 초과하는 시기의 콘크리트’라고 규정하고 있다. 서중 시에는 빠른 수분 증발로 인해 작업성이 떨어지며 배합간의 콜드조인트가 발생하기 쉬우므로 이에 대한 보정은 W/C, 함수율 등을 조절하여 해결 가능하며, 서중 시의 콘크리트는 응결 촉진 및 강도발현속도의 증가 등의 특징이 있다.

## 3. 한랭기 및 서중 콘크리트의 강도발현 성능 검토

### 3.1. 실험계획

우리나라 열악조건에서의 콘크리트 타설은 한중, 한랭기, 서중 콘크리트가 있으나 한중시기의 콘크리트 타설은 시공관리비용이 크게 증가하여 저비용의 기층 린 콘크리트 타설이 이루어지기에는 적합한 시기가 아닐 것으로 판단된다. 그러므로 본 장에서는 한중시기를 제외한 한랭기 및 서중 콘크리트의 온도변화에 따른 강도 성능을 검토하기 위해, 한랭기 기준의 최저온도인 양생

Table 1. Experimental Plan

Factors		Levels	
Mixture	W/C(%)	1	42
	Slump(mm)	1	25×10
	Fiber mix ratio	1	Micro nylon : 50% Macro polypropylene : 50%
	Fiber dosage(%)	2	0, 0.2
	Fly-ash dosage(%)	2	0, 30
Experiments	Fresh concrete	2	· Air content · Curing Temperature(5, 20, 35℃)
	Hardened concrete	1	· Compressive strength(3, 5, 7, 14, 28days)

P5, P20, P35 : Plain배합의 각각 5℃, 20℃, 35℃로 양생된 시험체  
F5, F20, F35 : FRC배합의 각각 5℃, 20℃, 35℃로 양생된 시험체

온도 5°C에서의 강도변화와 서중 콘크리트의 최고온도인 양생온도 35°C에서의 강도변화를 측정하였다.

양생온도별 압축강도 분석은 일반적인 기층 린 콘크리트 배합인 Plain과 섬유혼입물 0.4%+플라이애쉬 치환율 30%의 FRC 배합을 제작하여 비교하였다. 본 실험에 사용된 콘크리트의 배합은 Table 1과 같으며, 압축강도 시험은 양생온도 5, 20, 35°C에 대해서 재령 3, 5, 7, 14, 28일에서의 강도값을 측정하는 것으로 계획하였다.

Table 2. Mixture Proportions of Concrete

Specimen	W/C	S/a	Fiber dosage(%)		Unit content(kg/m <sup>3</sup> )				
			NY		W	C	F.A.	C.A.	FA
			micro	macro					
Plain	0.795	40	-	-	119	150	824	1349	-
FRC			0.2	0.2		105	817	1338	45

### 3.2. 사용재료

본 실험에 사용한 재료의 물리적 성질은 Table 3~6과 같다. 즉, 시멘트는 국내 A사산 OPC를 사용하였고, 굵은골재는 국내 대전 대덕산의 골재를 사용하였으며, 잔골재는 충북옥산산을 사용하였다. 섬유는 국내산 마이크로 나일론 섬유(이하 NY) 및 연구를 통해 개발한 2중 Crimped PP 섬유(이하 PP)를 사용하였다.

Table 3. Physical Properties of Ordinary Portland Cement

Type	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Sound-ness (%)	Setting time(Min)		Compressive strength (MPa)		
				Ini.	Fin.	3 Days	7 Days	28 Days

Table 4. Chemical Properties of Ordinary Portland Cement

Type	Chemical composition(%)								LSF	SM	IM
	LOI	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O			
OPC	0.35	21.88	5.02	3.66	64.18	2.01	1.83	0.92	90.44	2.52	1.37

Table 5. Physical Properties of Aggregates

Type	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Finess modules	Absorption ratio(%)
River sand	2.65	2.86	2.63
Crushed sand	2.50	2.62	1.42
Coarse agg. 20mm	2.71	7.01	1.18
Coarse agg. 32mm	2.70	6.88	0.58

Table 6. Physical Properties of Fibers

Fiber type	Density (g/m <sup>3</sup> )	Modulus of elasticity(GPa)	Tensile strength(MPa)	Melting point(°C)
NY	1.16	-	500	210
PP	0.91	8.5	562	230

### 3.3. 외기온도별 강도 성능 결과

본 연구의 실험방법으로 콘크리트의 혼합은 트윈샤프트 믹서를 사용하여 잔골재, 시멘트, 섬유 및 굵은골재를 투입하고, 30초간 건비빔을 저속(20rpm)으로 실시하였다. 건비빔 후 물을 넣고 60초간 중속(30rpm)으로 비빔 후, 다시 고속(40rpm)으로 90초간 비빔하여 콘크리트를 제조하였다.

공시체의 양생방법은 Ø100×200 공시체를 양생온도 5°C, 20°C 및 35°C가 유지되도록 공시체 성형 후 1일간 해당온도가 유지되는 챔버에서 기중봉함 양생을 실시하였다.

경화 콘크리트의 압축 시험은 해당 규격에 맞는 공시체를 제작하여 KS F 2405 규정에 의거하여 실시하였다.

### 3.4. 외기온도별 강도 성능 결과

Fig. 1은 양생온도 및 배합변수의 재령결과에 따른 압축강도를 나타낸 그래프로써, 양생온도가 낮을수록 압축강도값 또한 낮은 경향을 나타냈고, 전반적으로 Plain 배합에 비해 FRC의 경우가 낮은 초기 강도값을 나타냈다.

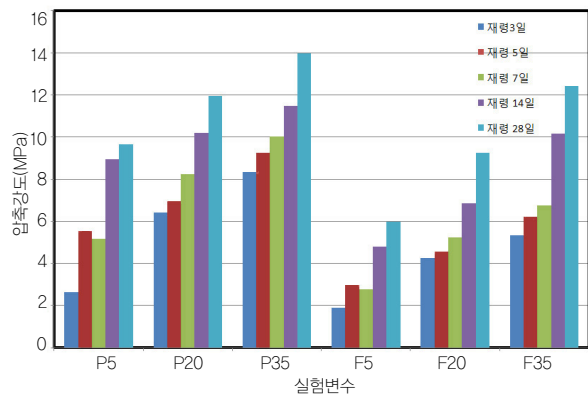


Fig. 1 Comparison of Compressive Strength

Plain의 경우는 재령 5일의 모든 양생온도에서 압축강도 5MPa를 상회하며 린 콘크리트의 기준값을 만족하였다.

FRC 배합의 경우는 플라이애쉬 30% 치환으로 인해 초기강도가 많이 저하되는 경향을 나타냈으며, 재령 7

일, 5°C 양생 시험체는 5MPa의 강도기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 또한, 후기 재령으로 진행됨에 따라서 FRC 배합 내부의 플라이애쉬가 포졸란반응을 일으켜 강도발현량이 상승하였는데, 양생온도 20°C의 경우 재령 3일에서 Plain 대비 FRC 강도발현율은 약 66%였으나, 재령 28일에서는 약 77%까지 상승하였고, 양생온도 35°C의 Plain 대비 FRC 강도발현율은 재령 3일 63%에서 재령 28일 경과 후 88%까지 상승하였다.

Fig. 2는 Plain의 재령별 양생온도 변화에 따른 압축 강도를 나타낸 그래프로서, P5 변수의 강도값이 재령 5일보다 재령 7일에서 소폭 낮아지는 경향을 나타냈는데, 이는 실험적 오차로 판단되나, Fig. 3의 FRC의 경우도 재령 7일보다 재령 5일에서 높은 강도값을 보이는 동일한 경향을 나타내므로 이에 대한 추가적인 고려가 필요하다. 또한, 린 콘크리트 기준강도의 경우 재령 5일에서 이미 기준값을 만족하였다.

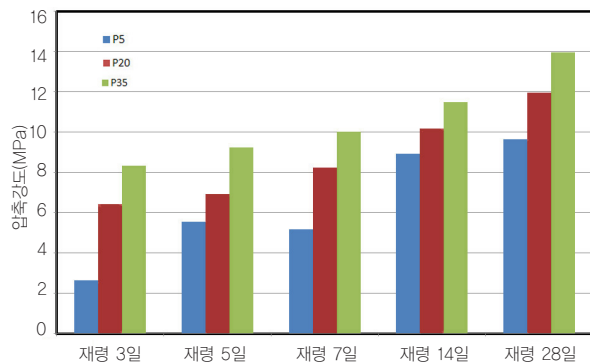


Fig. 2 Comparison of Compressive Strength (Plain)

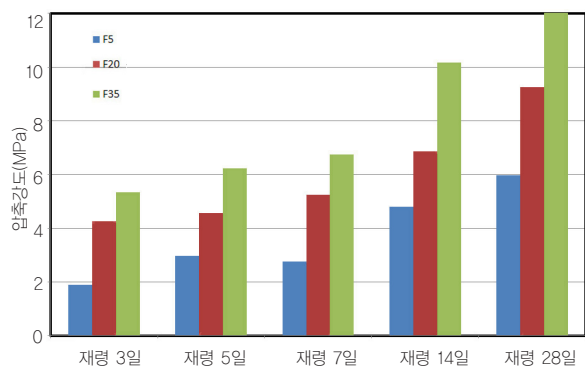


Fig. 3 Comparison of Compressive Strength (FRC)

재령 3일에서의 양생온도별 강도값은 큰 편차를 나타내지만 재령이 경과함에 따라 차이는 감소하는 경향을 나타내므로 한랭기의 콘크리트 타설 시 초기 양생관리가 중요한 것으로 판단된다.

Fig. 3은 FRC의 재령별 양생온도 변화에 따른 압축 강도로서 Plain 배합과 동일하게 초기의 양생온도변화

에 따른 강도편차가 크게 나타났다. 또한 혼합 치환된 플라이애쉬의 늦은 수화작용으로 인해 Plain에 비해 초기 강도값이 더욱 낮으므로 초기에서의 양생관리가 매우 중요한 것으로 판단된다.

린 콘크리트는 본래 컨시스턴시가 매우 낮은 배합으로서, 슬럼프 값이 거의 0에 가깝게 나타나므로 서중 시기의 기층 콘크리트 타설 시 고온에서의 수분 증발로 인한 작업성의 피해는 거의 없으며, 다만 표면 수분 증발로 인해 발생하는 함수율 저하는 외기의 온습도 및 풍속에 의한 수분증발량을 계산하여 보정하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

## 4. 적산온도에 의한 FRC 기층 강도발현 성능 분석

### 4.1. 적산온도

#### 4.1.1. 적산온도

적산온도는 콘크리트의 강도증진에 있어서 양생온도 및 양생시간이 미치는 영향을 정량적으로 표시한 함수로서, 일정 기준의 온도 이상에서 콘크리트의 양생온도와 시간의 관계에 대한 함수라 할 수 있다. 이러한 적산온도 식은 Saul에 의한 온도와 재령에 의한 선형 관계식과 Freisleben-Hansen에 의한 Arrhenius 화학반응속도식을 이용한 등가재령식으로 표현되는데, 등가재령은 실제 콘크리트의 양생에서 동일한 적산온도가 되는 표준온도(20°C)에서의 양생시간을 의미한다. 등가재령식은 Eq. (1)에 제시되어 있다.

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

여기서,  $t_e$  : 등가재령(일)

$Ea$  : 겔보기 활성화 에너지(KJ/mol)

$R$  : 가스 상수(8.314J/mol·K)

$T_r$  : 20°C에서의 절대온도(293° K)

$T$  : 양생온도 T0에서의 절대온도(° K, 273+°C)

#### 4.1.2. 겔보기 활성화 에너지(Ea)

활성화 에너지란 반응에 필요한 최소한의 에너지를 의미한다. 그런데, 시멘트의 수화반응은 여러 광물이 동시에 여러 반응의 복합으로 진행되기 때문에 엄밀한 의미에서는 활성화 에너지라고 표현할 수 없고, 겔보기

(apparent) 활성화 에너지라 칭한다.

이러한 활성화 에너지는 화학반응에 의한 열을 측정하는 Calorimeter를 이용하거나 콘크리트의 양생온도와 강도의 관계를 이용한 ASTM C1074법이 활용되고 있는데, 이 방법의 유효성에 대하여는 연구자들마다 각기 다른 결과를 보고하고 있으며, Calorimeter에 의한 결과치와 ASTM 방법에 의한 결과치가 차이가 있고, ASTM의 방법은 시멘트 자체의 수화반응 과정을 고려하지 않고 강도라는 역학적인 특성에 의한 통계적 절차로 구해져서 엄밀한 의미에서의 Ea값을 결정하는 데에는 한계가 있다고 보고 있어 아직까지 연구자들간의 뚜렷한 일치점을 찾기는 어려운 실정이다.

Freisleben-Hansen과 Pederson(FHP)은 양생온도의 함수형태로 활성화 에너지를 산정하는 Eq. (2)를 제시한 바 있다.

$$\begin{aligned} \text{양생온도 } T < 20^{\circ}\text{C}, E &= 33.5 + 1.47(20 - T) \text{KJ/mol} \\ \text{양생온도 } T \geq 20^{\circ}\text{C}, E &= 33.5 \text{KJ/mol} \end{aligned} \quad (2)$$

#### 4.1.3. 적산온도 및 등가재령에 의한 강도발현 분석

본 연구에서 적용한 적산온도는 일반적인 적산온도식과 등가재령으로서 Eq. (1)과 같고, 강도증진 해석모델의 경우 鎌田英治의 로지스틱(Logistic)곡선(Eq. (3))과 Carino의 쌍곡선 해석모델(Eq. (4))를 이용하여 해석을 수행하였다(鎌田英治 등, 1986), (Carino. N. J., 1984).

$$F_c = \frac{F_{\infty}}{1 + \exp(-k \log M + m)} \quad (3)$$

여기서,  $F_{\infty}$  : 최종강도 (kgf/cm<sup>2</sup> 또는 MPa)

$k, m$  : 실험상수

$M$  : 적산온도 (°D·D 또는 °C·h)

$$S = \frac{S_u k_r (t - t_0)}{1 + k_r (t - t_0)} \quad (4)$$

여기서,

$S$  : 재령  $t$ 에서의 강도(MPa)

$k_r$  : 반응률 상수(rate constant)

$S_u$  : 한계강도(MPa)

$t_0$  : 강도증진이 시작되는 재령(중결시간 (일))

## 4.2. 적산온도에 의한 압축강도

본 절에서는 기층 콘크리트의 강도 발현을 분석하고 강도식을 제시하기 위해 Saul(1951)의 온도와 재령에 의한 선형 적산온도식을 토대로 압축강도를 분석하였다.

Table 7과 Fig. 4, Fig. 5는 양생온도 별 적산온도에 따른 Plain 및 FRC의 압축강도 발현 경향을 분석한 것으로서, 동일 적산온도(210° D·D)에서의 양생온도별 강도차를 알 수 있다.

Table 7. Variation of Compressive Strength of Maturity 210° D·D by Curing Temperature

		Curing temperature(°C)			Standard deviation
		5	20	35	
Compressive strength	Plain (MPa)	8.93	8.23	9.23	0.51
	FRC (MPa)	4.80	5.24	6.22	0.73

\*35°C의 경우 210° D·D에서의 강도값이 아닌 적산온도 225° D·D의 강도값을 활용

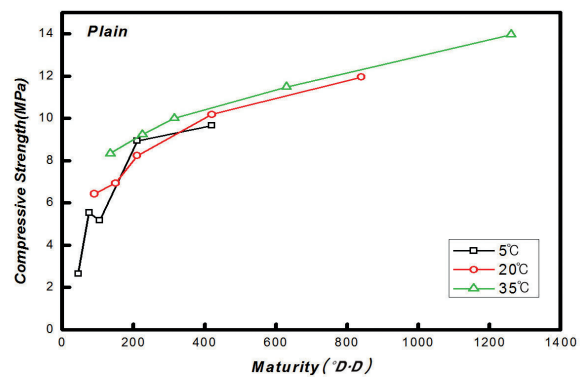


Fig. 4 Comparison of Compressive Strength by Maturity (Plain)

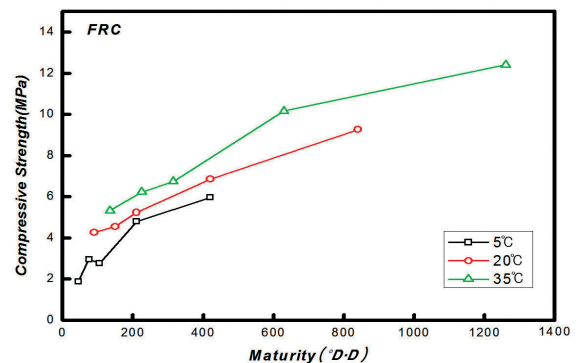


Fig. 5 Comparison of Compressive Strength by Maturity (FRC)

먼저, Plain의 경우 동일 적산온도에서 양생온도가 증가함에 따라서 소폭 증가하는 경향을 나타냈고, 표준편차는 0.51을 나타냈다. FRC의 경우 동일 적산온도에

서의 강도값의 편차는 0.73으로 Plain에 비해 큰 차이를 나타냈는데, 이는 플라이애쉬 치환에 따른 초기 수화발현계수(콘크리트의 활성화에너지)가 일반적인 적산온도식(Eq. (1))에서는 고려되지 못하기 때문으로 판단된다. 또한, Saul의 적산온도식은 양생온도 저온(5°C~20°C) 및 표준온도(20°C)에서의 사용이 주를 이루었으며 적절한 해석모델식을 이용하였을 때 양호한 강도값을 나타내는 것으로 보고되었으나(Guo, C, 1989)(Carino, 1984), Alexander 및 Taplin(1962) 등은 42°C에서 양생한 고온양생 콘크리트와 저온양생 콘크리트의 적산온도 함수를 비교하였을 때 고온양생에서의 적산온도가 저온양생에서의 적산온도보다 온도의 영향을 초기에는 낮게, 후기에는 높게 평가하는 경향을 보인다고 지적하였다. 그러므로 보다 정밀한 재령식을 작성하기 위해 양생온도와 재령으로 이루어진 적산온도식이 아닌 양생온도와 재령 및 콘크리트의 겔보기 활성화에너지를 고려할 수 있는 적산온도식인 등가재령을 활용하고자 한다.

Fig. 6은 적산온도로만 각 변수의 강도변화의 타점을 나타낸 그래프이다. 적산온도가 증가함에 따라서 비교적 적은 분포로 증가하고 있음을 알 수 있다.

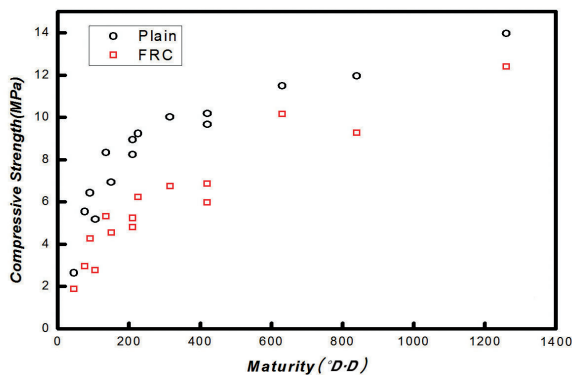


Fig. 6 Comparison of Compressive Strength by Maturity

### 4.3. 등가재령에 의한 압축강도 및 FRC 기층용 강도발현식 개발

#### 4.3.1. 적산온도 및 등가재령의 적용성능 비교

양생온도와 재령의 함수인 적산온도를 활용하여 강도값의 편차를 분석하였지만 보다 정밀한 강도발현식을 제시하기 위해 적산온도에서 고려하지 못하는 콘크리트의 겔보기활성화에너지 값을 더한 등가재령식을 적용하여 양생온도별 콘크리트의 압축강도값을 표기하였다.

Fig. 7, Fig. 8은 양생온도별 등가재령에 따른 압축강도 발현 경향을 나타낸 그래프이다. 재령별 데이터가

충분하지 못해 동일 등가재령에서의 강도값의 편차를 파악하는데 어려움이 있다. 따라서 적산온도와 비교를 위해서 적산온도 적용 시 편차가 비교적 큰 것으로 나타난 FRC 변수의 2차 다항식 회귀분석을 통해 제시된 결정계수값의 차이를 비교하였다(Fig. 9, Fig. 10). 그 결과 적산온도로 표현된 강도값의 2차 회귀분석 곡선의 결정계수는 약 0.909를 나타냈으며, 등가재령으로 표현된 강도값의 결정계수는 약 0.957을 나타내 재령에 따른 강도값이 적산온도식보다 등가재령식이 강도발현함수로서 보다 적절함을 알 수 있었다.

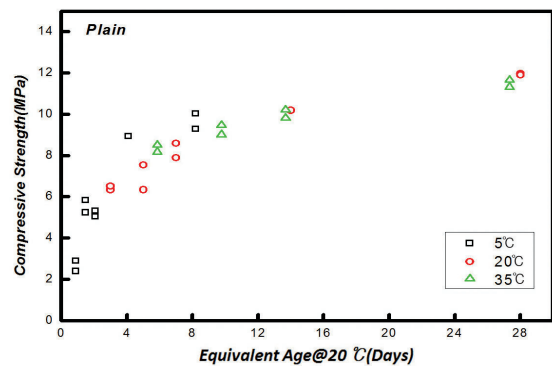


Fig. 7 Comparison of Compressive Strength by Equivalent Age (Plain)

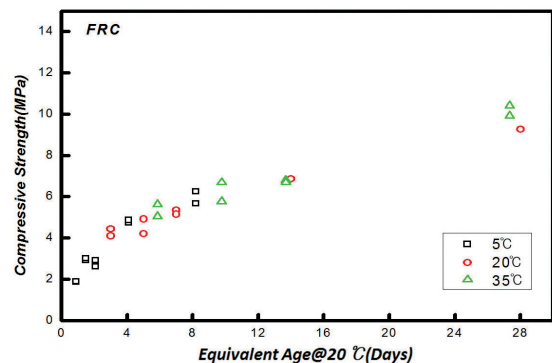


Fig. 8 Comparison of Compressive Strength by Equivalent Age (FRC)

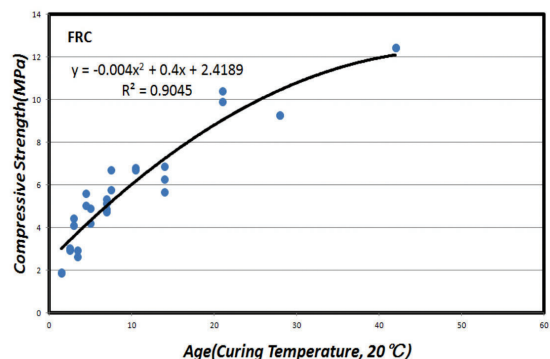


Fig. 9 Quadratic Regression Analysis Curve of Compressive Strength by Maturity (FRC)

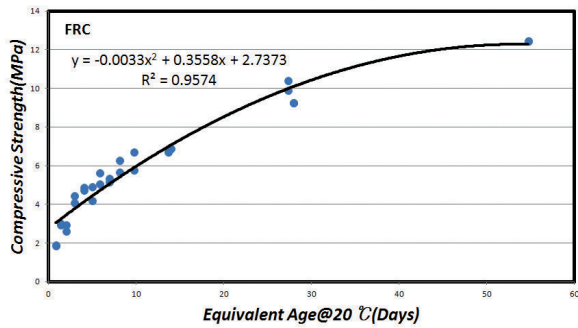


Fig. 10 Quadratic Regression Analysis Curve of Compressive Strength by Equivalent Age (FRC)

#### 4.3.2. 등가재령 및 Carino 쌍곡선 해석식을 활용한 FRC 기층의 강도발현식 제시

등가재령으로 나타난 재령과 각 재령에 따른 강도값을 이용하면 Plain 및 FRC 배합의 강도발현 예측식을 제시할 수 있다. 4.3.1에서 활용한 Fig. 9~10과 같은 2차 곡선 등의 회귀식을 통해 이를 적용시킬 수 있으나, 위의 식은 후기 재령으로 갈수록 강도값이 저하하여 초·중기 재령에서는 유사한 강도예측을 진행할 수 있으나 후기 재령으로 진행될수록 큰 오류를 나타내게 된다. 그러므로 콘크리트의 강도발현과 관련하여 각 연구자들은 각종 로그 및 쌍곡선 강도발현식 등을 제시하여 최적의 강도발현 예측에 도달하고자 하였다.

본 절에서는 이 중의 국내 연구자들의 적용사례를 통해 우수한 강도 예측식으로 알려진 Carino의 쌍곡선 해석식을 활용하여 기층 콘크리트에 적합한 강도발현식을 제시하고자 하였다. 강도발현식 제시에 활용하는 재령별 압축강도값은 앞 절에서의 결과값을 이용하였으며 Eq. (3), Eq. (4)를 활용하여 Table 8과 같이 양생온도와 활성화 에너지를 구하였고, 연구자에 의해 개발된 해석모델식 적용 전에 기본적인 로그함수를 활용하여 콘크리트 강도의 회귀분석을 실시하였다. 로그함수를 활용하여 콘크리트의 강도발현을 예측하는 것은 시멘트의 수화반응을 일차의 단분자 자촉반응으로 판정하고 반응 속도를 고려하는 방법이다. 이때 단분자 자촉반응이란, 생성물 자체가 반응을 촉진하여 생성물의 양이 시간과 함께 증가하는 것을 말하는데, 이를 활용한 강도 예측식으로는 Plowman의 로그식과 鎌田英治의 로지스틱 곡선 등이 있다. 로그함수를 활용한 콘크리트의 회귀분석을 실시한 결과 등가재령식을 적용시켰을 때 Plain의  $R^2$ (결정계수) 값이 약 0.953 정도로 매우 높은 값을 나타냈으며, FRC의 경우도 약 0.932 정도로 높은 결정계수값을 나타냈다. 결론적으로 재령경과에 따른 강도식의 회귀분석에 로그함수를 활용한 경우가 적절한 회귀식에 도달할 수

있는 것으로 나타났다. 그러나 로그함수는 재령경과에 따라서 지속적으로 생성물이 생성되는 곡선식으로서, 초기 시멘트의 수화반응 잠재기(dormant period)를 나타낼 수 없다(Guo, C, 1989). 따라서 Carino는 변곡점을 이용하여 변곡점까지는 상향으로 증가하고 변곡점 통과 후의 증가는 하향으로 되는 쌍곡선 함수를 적용시켜 콘크리트의 강도식을 해석하고자 하였다.

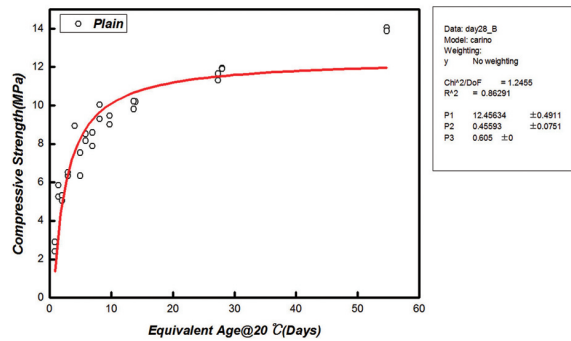


Fig. 11 Regression Analysis Curve Using Carino Model of Compressive Strength by Equivalent Age (Plain)

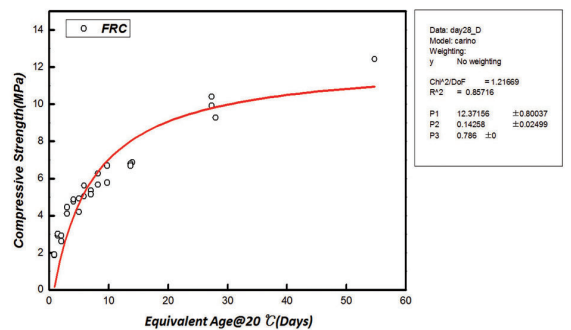


Fig. 12 Regression Analysis Curve Using Carino Model of Compressive Strength by Equivalent Age (FRC)

Table. 8 Experimental Constants of Analysis of Strength Development

Type	Experimental constant			
	$S_u$	$K_r$	$T_0$	$R^2$
Plain	12.456	0.455	0.605	0.862
FRC	12.371	0.142	0.786	0.857

Table 8의 Carino 모델식 실험상수는 비선형 회귀분석을 통하여 구하였다. Carino 해석모델을 활용한 강도 증진해석 결과 Plain 및 FRC의 결정계수는 각각 0.862, 0.857 정도 양호한 추정값을 나타냈으나, 로그함수를 활용한 해석결과보다는 낮은 추정값을 나타냈는데, 이는 기층 콘크리트의 초기 저강도에 따른 초기 데이터 분석 미흡이 원인으로 판단된다. 쌍곡선 모델식의

정확한 적용을 위해서는 초기 수화반응 잠재시기의 강도성능을 확인하여 초기 데이터값이 필요하지만, 기층 콘크리트는 타설 후, 약 3일 이내에 시험체의 탈형강도가 발현되지 않아 초기 강도 데이터가 확보되지 못하고 쌍곡선 모델식의 회귀분석에 사용할 초기강도 데이터가 부족하기 때문이다.

Plain 및 FRC 배합 모두 등가재령이 증가함에 따라 서 강도는 지속적으로 상승하는 것으로 나타났으며, 등가재령 10일을 기준으로 선형의 기울기가 크게 변화하여 강도발현율이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 일반적인 콘크리트에서 나타나는 강도발현 기울기와 유사한 것으로써 기층 콘크리트 배합에서도 일반 콘크리트와 유사한 강도발현곡선을 이루고 있음을 알 수 있었다.

결과를 토대로 로그함수식 또는 Carino 해석식을 이용하여 기층 콘크리트의 기준인 5MPa의 도달시점을 각 외기온도별로 제시할 경우 현장에서 한중·서중 시기에 따른 기층 콘크리트의 시공에 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

추후 Plain 및 FRC 배합의 Carino 쌍곡선 해석식의 보다 정확한 적용을 위해서는 초기데이터의 축적이 필요한데 이를 보완하기 위해서 초기강도 실험이 아닌 콘크리트의 응결분석을 통해 콘크리트의 경화성능을 추가하는 것이 바람직하다고 판단되며, 추정값의 정밀도를 더욱 높일 수 있는 방안으로는 등가재령식에서 활용한 FHP의 외기온도에 따른 활성화에너지(Ea) 산정방법이 아닌 내부 수화물질의 분말도를 활용하여 활성화에너지를 산정하는 방법, 콘크리트 내부 결합재료의 수화반응 속도를 고려하여 산정하는 방법 등을 고려해 볼 필요가 있다.

### 5. 기층 기준 강도 5MPa 도달시기 예측

빈배합 콘크리트 기층의 품질검사는 재령 7일에서의 압축강도만을 요구하는데 이때의 압축강도는 5MPa 이상이 발현되어야 한다. 그러나 현장에서의 외기온도에 따라서 빈배합 콘크리트 기층의 수화발현속도는 변화하며, 일정 강도를 얻는데 소요되는 시간은 각각 다르게 나타난다. 한랭기인 외기온도 5℃에서 현장타설을 진행할 경우 기준강도인 5MPa 이상이 도출되는 시점은 재령 7일보다 긴 시간이 소요될 수 있으며, 서중 시기에는 매우 빠른 시간 내에 기준강도에 도달할 수 있다. 그러므로 본 절에서는 앞 절의 등가재령에 의한 기층 콘크리트의 강도증진식을 변형하여 도로공사 표준시방서에서 제시하고 있는 빈배합 콘크리트 기층의 기준강도인

5MPa 도달 시점을 예측할 수 있는 기준표를 제시하여 현장시공 시의 기초자료로 활용하고자 한다.

기준강도 5MPa 도달시기를 예측하기 위한 추정식을 구하기 위해 Eq. (1)의 등가재령식을 변형하여 Eq. (5)를 도출하였다.

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

여기서,  $t_e$  : 5MPa 도달 등가재령(일@20℃)

$t$  : 5MPa 도달 재령(hr.)

Eq. (5)를 활용하여 각 배합별, 양생온도변화에 따른 기준 강도 5MPa의 도달시기를 구한 후 양생온도 간격을 5℃ 구간별로 구분지어 각 양생온도별 기준 강도 도달시기 기준표(Table 9) 및 그래프(Fig. 13)을 제시하였다.

본 절에서는 린 콘크리트 및 FRC 기층 콘크리트의 기준강도 도달 시기를 양생온도별로 제안하였으며, 이를 현장 기층 콘크리트의 관리자료로 활용하고자 하였다. 그러나 실무 현장에서 본 제시값을 적용하기 위해서는 많은 양의 실험을 추가적으로 진행하여 표의 재령범위 오차를 줄이고, 신뢰성을 높이는 작업이 필요할 것으로 판단된다.

Table. 9 Period of Each Curing Temperature and Equivalent Age to Obtain Strength of 5MPa

Type	Age (Days)							
	Compressive strength by curing temperature(℃)							
	0≤t<5	5≤t<10	10≤t<15	15≤t<20	20≤t<25	25≤t<30	30≤t<35	t≤35
Plain	11.1	7.2	4.7	3.1	2.1	1.7	1.4	1.1
FRC	29.6	19.1	12.5	8.3	5.6	4.5	3.6	2.9

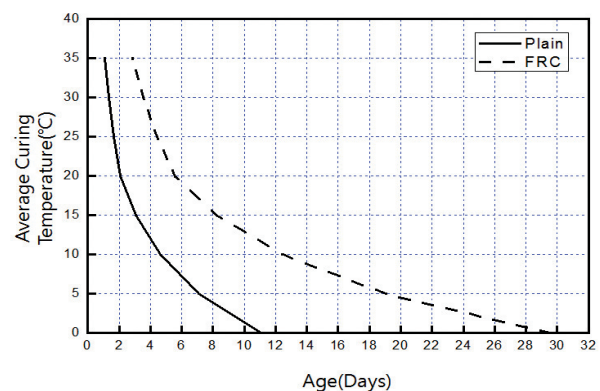


Fig. 13 Compressive Strength Prediction of Subbase Concrete by Curing Temperature



## 6. 결론

본 연구에서는 우리나라의 한랭기·서중 온도 기준을 분석하여 기층 콘크리트 타설 시 최소 최대 온도범위를 산정한 후 외기온도 변화에 따른 기층 콘크리트의 압축 강도 특성을 분석하고, 각 외기온도에 따른 기층 콘크리트의 강도변화를 예측할 수 있는 식을 제시하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. FRC 배합의 경우는 플라이애쉬 30% 치환으로 인해 초기강도가 많이 저하되는 경향을 나타냈으며, 재령 7일, 5℃ 양생 시험체는 5MPa의 강도기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 또한, 후기재령으로 진행됨에 따라서 FRC 배합 내부의 플라이애쉬가 포졸란 반응을 일으켜 강도발현량이 상승하였는데, 양생온도 20℃의 경우 재령 3일에서 Plain 대비 FRC 강도발현율은 약 66%(약 4.26MPa)였으나, 재령 28일에서는 약 77%(약 9.26MPa)까지 상승하였고, 양생온도 35℃의 Plain 대비 FRC 강도발현율은 재령 3일 63%(약 5.33MPa)에서 재령 28일 경과 후 88%(약 12.40MPa)까지 상승하였다.
2. Carino 해석모델을 활용한 강도증진해석 결과 Plain 및 FRC의 결정계수는 각각 0.862, 0.857 정도 양호한 추정값을 나타냈으나, 로그함수를 활용한 해석결과보다는 낮은 값을 나타냈는데, 이는 기층 콘크리트의 초기 저강도에 따른 초기 데이터 분석 미흡이 원인으로 판단된다. 쌍곡선 모델식의 정확한 적용을 위해서는 초기 수화반응 잠재시기의 강도성능을 확인하여 초기 데이터값이 필요하지만, 기층 콘크리트는 타설 후 약 3일 이내에 시험체의 탈형강도가 발현되지 않아 초기 강도 데이터가 확보되지 못하고, 쌍곡선 모델식의 회귀분석에 사용할 초기강도 데이터가 부족하기 때문이다.
3. 로그함수식을 적용한 강도증진 해석값과 실험값의 비교 및 Carino식을 적용한 강도증진 해석값과 실험값의 비교 결과, Carino식을 적용하였을 때보다 로그함수식을 적용하였을 때 더욱 높은 상관계수값을 나타냈으나, 2개의 해석식 모두 Plain과 FRC의 상관계수는 모두 0.930 이상으로 일정 이상의 우수한 추정값을 나타냈다. 결과를 토대로 로그함수식 또는 Carino 해석식을 이용하여 기층 콘크리트의 기준인 5MPa의 도달 시점을 각 외기온도별로 제시함으로써 현장에서 한중 서중 시기에 따른 기층 콘크리트의 시공에 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. Plain 및 FRC 배합의 Carino 쌍곡선 해석식의 보다 정확한 적용을 위해서는 초기데이터의 축적이 필요한데 이를 보완하기 위해서 초기강도실험이 아닌 콘크리트의 응결분석을 통해 콘크리트의 경화성능을 추가하는 것이 바람직하다고 판단되며, 추정값의 정밀도를 더욱 높일 수 있는 방안으로는 등가재령식에서 활용한 FHP의 외기온도에 따른 활성화에너지(Ea) 산정방법이 아닌 내부 수화물질의 분말도를 활용하여 활성화에너지를 산정하는 방법, 콘크리트 내부 결합재료의 수화반응 속도를 고려하여 산정하는 방법 등을 고려해 볼 필요가 있다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(FRC 복합포장 혼합물 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Alexander, K. M. and Taplin, J. H., 1962. Concrete Strength, Paste Strength, Cement Hydration and Maturity Rule, Australian Journal of Applied Science, Australia, Vol.13, pp.277~284.
- Architectural Institute of Korea, Standard Specification for Construction, 2013.
- Carino, N. J., 1984. Maturity Method; Theory and Application, Journal of Cement and Concrete, ASTM, USA.
- Guo, C., 1989. Maturity of Concrete Method for Predicting Early-Stage Strength, ACI Material Journal, USA, Vol.86, No.4, pp.341~353.
- Hansen, P. F. and Pedersen, E. J., 1997. Maturity Computer for Controlled Curion and Hardening of Concrete, Nordisk Betong, Sweden, Stockholm, Vol.1, pp.19~34.
- Korea Concrete Institute, Standard specification for Concrete, 2009.
- Korea Institute of Construction Technology, Development of Fiber Reinforced Concrete Base for Composite Pavement System, Research Paper, 2012.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Paving Guidelines, 2005.
- Plowman, J. M., 1956. Maturity and Strength of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.8, No.2, pp.13~22.
- Saul, A. G. A., 1951. Principle Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure, Magazine of Concrete Research, Vol.2, No.6, pp.127~140.
- 鎌田英治, 洪悦郎, 鎌田英治, 雅幸田畑, 幸雄浜, 1986. Propose concrete strength estimation using a logistic curve(幸雄ロジスティック曲線を応用したコンクリート強度推定式の提案): Architectural Institute of Japan(日本建築學會構造系論文報告集), Japan, No.367, pp.1~7.