

# 적산온도개념을 이용한 콘크리트 압축강도 예측

고훈범  
인하공업전문대학 건축과 교수

## Predicting the Compressive Strength of Concrete Using a Maturity Concept

Hune-Bum Ko  
Professor, Department of Architecture, Inha Technical College

**요약** 비파괴적으로 콘크리트 강도를 간편하게 구할 수 있는 방법으로 적산온도(Maturity) 개념을 통한 콘크리트 강도 추정방법이 많은 연구자를 통하여 검증되고 있다. 본 연구에서는 적산온도 개념을 도입하여 콘크리트 강도를 평가하고자 하는데, 11편 논문의 실험결과에서 W/B=18~70%의 범위에서 일정한 온도(5, 10, 20, 30, 40, 50℃)와 다양한 재령(0.5~182일)에 따른 843개의 실험값을 가지고 가장 간편한 적산온도 모델을 사용하고, 강도별로 보통강도 콘크리트(40MPa이하), 고강도콘크리트(40~70MPa), 초고강도 콘크리트(70MPa 이상)로 구분하여 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 적산온도와 콘크리트 강도관계를 도출하고, 적산온도에 따른 최저 보증 콘크리트 압축강도 추정식을 제시하였다.

**주제어** : 적산온도, 보통강도 콘크리트, 고강도 콘크리트, 초고강도 콘크리트, 최저 보증 콘크리트 압축강도

**Abstract** The non-destructive method of easily evaluating concrete strength through the concept of maturity has been verified by many researchers. The current work introduced such a concept in concrete strength assessment that involved 843 variables and specific values that 11 papers used in experiments, including constant temperatures (5, 10, 20, 30, 40, 50℃) with a W/B range of 18 to 70% and different curing ages (0.5 to 182 days). The classification of concrete as being of normal-strength concrete (40MPa or less), high-strength concrete (40~70MPa), and Super high-strength concrete (70MPa or more) enabled this study to identify the relationship between maturity and concrete strength using the most convenient and easily applicable maturity model in the construction field. A regression formula of lowest guaranteed concrete strength on the basis of maturity was presented.

**Key Words** : Maturity, Normal-strength concrete, High-strength concrete, Super-high strength concrete, Guaranteed minimum compressive concrete strength

### 1. 서론

콘크리트 구조물의 품질을 결정하는 가장 중요한 요소는 압축강도라고 할 수 있으며 압축강도 관리는 현장에서 매우 중요하게 여기는 품질관리 항목 중 하나이다.

콘크리트 구조체 콘크리트의 압축강도는 일반적으로 현장에서 콘크리트를 타설할 때 압축강도 시험용 공시체를 제작하고 수중양생을 실시하여 28일 후에 압축강도 시험기의 측정을 통해서 알 수 있다. 이 압축강도 값이 구조체 안전유무를 판단할 수 있는 값으로 인정되고

\*This work was supported by INHA TECHNICAL COLLEGE Research Grant.

†Corresponding Author : Hune-Bum Ko(hbko@inhac.ac.kr)

Received October 27, 2021  
Accepted January 20, 2022

Revised November 5, 2021  
Published January 28, 2022

있다. 그런데 일반적인 제품은 구입 당시에 바로 품질 여부를 확인할 수 있는데 콘크리트 제품의 품질은 28일 후이나 확인할 수 있다는 것은 논리적으로 매우 모순된다고 할 수 있다. 그래서 28일 전에 그 강도 값을 알기 위하여 다양한 비파괴 시험장치가 개발되고 관련 연구가 이루어졌으나 현재까지는 공시체와 구조물에 채취한 코어만을 구조체 콘크리트의 강도로 인정하고 있는 실정이다. 그런데 이러한 공시체와 코어를 제작 또는 채취하는데 시간과 비용이 소모되며 부차적으로 폐기물이 발생된다. 그래서 비파괴시험을 공시체와 보완하는 방법으로 보편적으로 사용할 수 있다. 이러한 비파괴적으로 콘크리트 강도를 간편하게 구할 수 있는 방법으로 적산 온도 개념을 통한 콘크리트 강도 추정방법이 많은 연구자를 통하여 검증되고 있다.

본 연구에서는 적산 온도 개념을 도입하여 콘크리트 강도를 평가하고자 하는데 다양한 연구자의 실험결과를 토대로 가장 간편한 적산 온도 모델을 사용하여 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 적산 온도와 콘크리트 강도 관계를 도출하고, 최저 보증 콘크리트 압축강도 추정식을 제시하고자 한다.

## 2. 기존 연구에 대한 고찰

콘크리트 강도에 미치는 양생온도에 관한 연구는 다양한 연구주제에 의해 실시되고 있으며 양생온도, 시간, 물시멘트 등 콘크리트 강도에 영향을 미칠 수 있는 인자에 대한 연구가 주를 이루고 있다고 할 수 있다. 외국에서는 1950년 전후에 콘크리트 강도를 평가하는 하나의 방법으로서 콘크리트 강도발현과정을 시간과 온도를 조합하여 설명할 수 있는 적산 온도라고 하는 개념이 사용되어 왔으며, 콘크리트 경화와 깊은 관계를 갖는 하나의 물리량으로서 콘크리트의 수화량을 나타내는 일종의 변환이라고 할 수 있다. 식 (1)은 이러한 개념을 구현한 유명한 Nurse-Saul 함수로 콘크리트의 온도이력을 시간 축에 대해 적분한 것으로 표현하며, 가장 간단한 적산 온도 함수라고 할 수 있다[1]. 식 (2)는 화학반응속도식의 일종인 Arrhenius식을 응용한 등가재령 표현식으로 Freiesleben Hansen과 Pedersen이 제안하였는데[2], 이식의 사용으로 콘크리트의 실제 재령을 기준온도에서 콘크리트 강도증가라는 등가재령으로 변환시킬 수 있으며, 초기 강도 발현율과 양생온도사이의 관계를 비선형 관계로 표현할 수 있어 Nurse-Saul 함수의 한계를 극

복하였으며 비교연구에서도 우위를 나타내었으나 비교적 복잡한 적산 온도 함수라고 할 수 있다.

식 (3)~(4)는 적산 온도에 근거한 압축강도 예측 모델을 나타내고 있다. 식 (3)은 가장 널리 알려진 Plowman 의 로그함수 모델로 매우 간단한 형태로 적용하기 편리하나, 낮거나 큰 적산 온도에서 정확도가 떨어지는 문제점을 가지고 있다[3]. 식 (4)는 Carino가 제안한 쌍곡선 함수형태의 모델로 강도증진은  $t_0$ 에서 시작되며 정도가 높은 모델로 평가받고 있으나 장기장도 추정에서 정확도가 떨어지는 단점을 가지고 있다고 보고 되고 있다[4]. 식 (4)는 한계강도를 설정해야 하므로 식 (1)과 비교하여 정확도는 높으나 편리성은 떨어진다 고 할 수 있다.

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (1)$$

$$t_e = \sum_0^t e^{\frac{-E}{R} \left[ \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_r} \right]} \Delta t \quad (2)$$

$$S = a + b \log(M) \quad (3)$$

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

여기에서,  $M$  : 적산 온도지수(온도·일 또는 온도·시간),  $T$  :  $\Delta t$ 기간의 콘크리트 양생온도(°C),  $T_0$  : 기준온도(일반적으로 -10°C),  $\Delta t$  : 재령(일),  $t_e$  : 등가재령,  $E$  : 활성화에너지(J/mol),  $R$  : 기체상수(8,314 J/mol),  $T_s$  : 양생온도(°K),  $T_r$  : 20°C에서의 절대온도 293(273+20:°K),  $S$  : 추정강도(MPa),  $S_u$  : 한계강도(MPa),  $a, b, k$  : 실험상수,  $t$  : 경과시간,  $t_0$  : 강도발현이 시작되는 시점

## 3. 적산 온도 개념의 문제점

적산 온도 개념을 가지고 콘크리트 강도 특성을 평가하는 방법에 대해서는 아직까지 나라(연구)마다 기준이 상이하고 미흡하다고는 할 수 있지만 일정부분 기준을 제시하고 있다고 할 수 있다. 국내에서도 콘크리트 강도와 양생온도에 대한 정량적인 연구가 다양한 주제로 연구되어 왔으며 여러 모델을 제안하여 왔다. 그러나 규정값의 도출이나 기준 제시는 아직까지 미흡하다고 할 수 있다.

미국인 경우 ASTM C1074-19e1(Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method)에 적산온도개념을 명시하고 있으며 현장에서의 적용방법에 대해서도 구체적으로 기술되어 있다[5]. 일본인 경우도 한중콘크리트 공사항목에 적산온도에 대한 내용이 포함되어 있으며 시멘트 종류(조강포틀랜드 시멘트, 보통 포틀랜드시멘트, 플라이애쉬시멘트 B종, 고로시멘트 B종)에 따라 구조체 콘크리트 강도를 보증하는 재령까지의 적산온도의 하한값을 제시하고 있다 [6]. 국내의 경우 건축공사표준시방서(KCS 14 20 40 : 2021) 한중콘크리트 3.5 현장 품질관리에 제시되어 있는데, “양생을 끝낼시기, 거푸집 및 동바리를 해체할 시기에 대하여 콘크리트의 온도기록에 의한 적산온도로부터 추정된 강도에 의하여 정하여 한다”고 되어 있으며 “물-결합재비를 적산온도 방식에 의하여 정한 경우, 사용한 콘크리트의 품질관리 또는 품질 검사를 위한 압축 강도 시험의 재령은 식 3.5-1(압축강도시험을 할 재령(일)=배합을 정하기 위하여 사용한 적산온도의 값(D℃)/30)로부터 정하여야 한다.”고만 되어 있어[7] 적산온도에 대한 구체적인 내용이 결여되어 있는 실정이며, 현장에서 적산온도개념을 적용하기가 쉽지 않다. 그러므로 적산온도에 따른 콘크리트 구조물 강도를 정확하게 평가하기 위해 정량적인 기준 제시는 현장에서 매우 필요하다고 할 수 있다.

Fig. 1은 콘크리트 강도별(물결합재비별) 적산온도와 콘크리트 강도를 보여주고 있는데 적산온도가 동일하더라도 콘크리트 강도 수준별로 강도가 다르며, 적산온도가 높은 경우(재령이 긴 경우)에서 강도저하 현상이 나타나는데 적산온도방식이 가진 문제점이라고 할 수 있으며, 현장에 적용하기 어려운 부분이라 할 수 있다 [8].

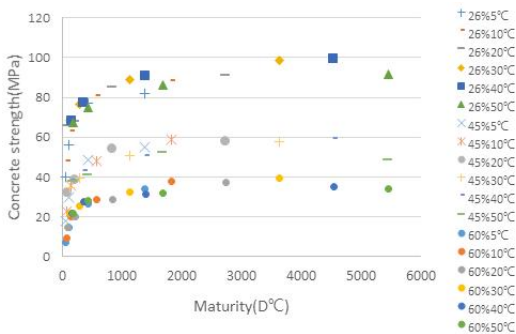


Fig. 1. Compressive strength of concrete versus maturity relationships [8]

#### 4. 적산온도개념에 대한 새로운 대안

많은 연구자에 의해 제안된 다양한 적산온도와 강도 모델이 대부분 한정된 실험결과 값에 근거하다 보니 현장에서 쉽게 사용하는 데는 한계가 있는 것도 사실이다. 일반적으로 변수를 많이 쓴 복잡한 모델일수록 모델개발시 사용된 실험값과 상당히 높은 연관성을 보여줄 수 있으나 현장에서는 가능한 변수가 적고 간단한 모델일수록 편리하게 이용할 수 있다. 본 장에서는 적산온도개념과 콘크리트 강도를 연구한 기존의 실험자료에 근거하여 새로운 대안을 제시하고자 한다.

대안 제시를 위하여 Table 1에서 보는 바와 같이 11편 논문의 실험결과에서 W/B=18~70%의 범위에서 일정한 온도(5, 10, 20, 30, 40, 50℃)와 다양한 재령(0.5~182일)에 따른 843개의 콘크리트 강도값을 인용하였다. 실험결과 값을 전부 인용하기에는 양이 너무 많아 요약된 값만을 제시하였다. 첫 번째 제안은 콘크리트 강도별로 적산온도와 콘크리트 강도 관계를 설정하는 것이다.

적산온도를 구하는데 가장 간단한 식(1)을 적용하고 콘크리트 강도는 식(3)을 이용하는 방식이다. 그래서 다양한 실험결과를 Fig. 2~4에 나타내었다. 콘크리트 강도 수준은 3단계로 나누어서 20℃로 양생한 재령 28일의 콘크리트 강도가 40MPa 이하인 경우는 보통 콘크리트 강도로, 40~70MPa인 경우 고강도 콘크리트로, 70MPa이상인 경우 초고강도 콘크리트로 구분하였다.

각각의 강도별로 다음과 같은 관계 식이 도출되었으며 R<sup>2</sup>값은 0.74~0.77을 보여 주고 있다.

보통강도콘크리트인 경우,

$$S = -17.22 + 6.95 \ln(M) \quad (5)$$

고강도콘크리트인 경우,

$$S = -20.13 + 10.75 \ln(M) \quad (6)$$

초고강도콘크리트인 경우,

$$S = -18.57 + 14.79 \ln(M) \quad (7)$$

상기 식은 정확도의 관점에서 약간 미흡하지만, 현장에서 콘크리트 강도별로 적산온도에 근거하여 매우 간단하게 콘크리트 강도값을 추정할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

Table 1. Details of experimental data collected in the references

Name	No.	T (°C)	Δt (day)	W/B (%)	f <sub>c, min</sub> (MPa)	f <sub>c, max</sub> (MPa)
Ko et al.[8]	72	5, 10, 20, 30, 40, 50	3, 7, 28, 91	26	40.2	99.2
				45	17.8	59.3
				60	7.2	39.3
Kwan[9]	160	5, 10, 20, 30, 40	0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 14, 18, 20, 26, 28, 34, 41, 56, 59, 70, 86, 91, 117, 136, 181	28	19	101
				32	13	85
				37	7.7	68
				45	4.5	59
				40	9.5	40.1
Kim et al.[10]	96	5, 10, 20, 30	1, 2, 3, 7, 14, 28, 60, 90	50	6.4	34.4
				60	3.2	28.0
				70	2.8	19.3
				30	19	75.4
Kil et al.[11]	42	10, 20, 30	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 12, 14, 16, 21, 24, 28, 42	35	12.1	71.1
				30	18.1	79.5
Nam et al.[12]	64	5, 10, 20, 30	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 12, 14, 16, 20, 21, 24, 28, 33, 38, 42, 50, 56, 75, 100	35	10.4	75.2
				45	3.72	52.9
Kim et al.[13]	144	5, 10, 20, 30	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 12, 14, 16, 20, 21, 24, 28, 33, 38, 42, 50, 56, 68, 75, 91, 100, 137, 182	50	2.74	44.8
				55	1.86	36.1
				60	1.86	30.9
				28	0.5	66.9
Yang et al.[14]	47	5, 20, 40	1, 3, 7, 13, 22, 28, 56, 91	40	5.3	59.1
				25	4.8	98.0
Hasuo et al.[15]	70	10, 20, 30	0.75, 1, 2, 3, 7, 28	30	1.7	89.5
				35	1.5	78.5
				40	1	59
				45	0.5	46.2
				50	0.3	38.4
				40	1.35	69.5
Sumitomo Osaka Cement[16]	72	5, 20, 30, 35	1, 3, 7, 28, 56, 91	50	1.14	54.7
				60	0.99	41.4
				30	60.6	98.6
Minagawa et al.[17]	22	20, 20(sealed)	3, 7, 28, 91	40	31.3	57.7
				60	21.7	37.2
				18	53.2	113.9
Sisikura[18]	54	10, 20, 40	1, 3, 7, 14, 21, 28	22	11.5	104.1
				26	22.4	93.0

두 번째 제안은 콘크리트 강도별로 적산온도에 따른 최저값을 추정하여 양생을 끝낼시기, 거푸집 및 동바리를 해체할 시기를 결정하는 방법이다. Fig. 5~7은 Fig. 2~4에서 적산온도 840(D°C)(20°C로 양생한 재령 28일)까지의 자료만을 추출하였으며, 적산온도에 따른 최저보증 강도 추정식은 R<sup>2</sup>값이 0.95이상 되도록 나타내었다.

이 추정식으로 적산온도가 결정되면 최저 보증 콘크리트 강도를 알 수 있다. 예를 들면 건축공사 표준시방서에서 보통콘크리트인 경우, 거푸집널의 해체시기를 5MPa이상으로 정하고 있으며, 압축강도 시험을 하지 않을 경우, 20°C 이상 4일, 10~20°C 6일로 권장하고 있는데 이 추정식을 사용하면, 5MPa에 도달하는 적산온도는 64(D°C)가 필요하여 20°C인 경우 2.13일, 10°C인 경우 3.23일이 소요되어 현 표준시방서가 매우 안전측

으로 거푸집 해체시기를 정하고 있다고 판단할 수 있다.

보통강도콘크리트인 경우,

$$S = -12.76 + 4.26 \ln(M) \quad (8)$$

고강도콘크리트인 경우,

$$S = -29.58 + 10.29 \ln(M) \quad (9)$$

초고강도콘크리트인 경우,

$$S = -43.34 + 16.32 \ln(M) \quad (10)$$

#### 4. 결론

본 연구에서는 적산온도 개념을 도입하여 11편의 논문의 실험결과에서 W/B=18~70%의 범위에서 일정한 온도(5, 10, 20, 30, 40, 50°C)와 다양한 재령(0.5~182일)에 따른 843개의 실험값을 이용하여 다음과 같은 결

과를 얻었다.

1. 보통강도 콘크리트(40MPa이하), 고강도콘크리트(40~70MPa), 초고강도 콘크리트(70MPa 이상)로 강도 별로 구분하여 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 적산온도와 콘크리트 강도관계를 도출하였다.
2. 강도별로 구분하여 적산온도에 따른 최저 보증 콘크리트 압축강도 추정식을 제시하였다.
3. 최저 보증 콘크리트 압축강도 추정식은 수식이 간단하여 사용하기 편리하고, 현장에서 적용하면 양생을 끝낼시기, 거푸집 및 동바리를 해체할 시기를 높은 정도를 가지고 예측할 수 있다고 판단된다.

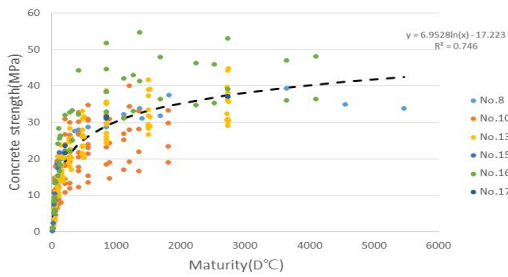


Fig. 2. Comparisons of strength-maturity relationships (normal-strength concrete)

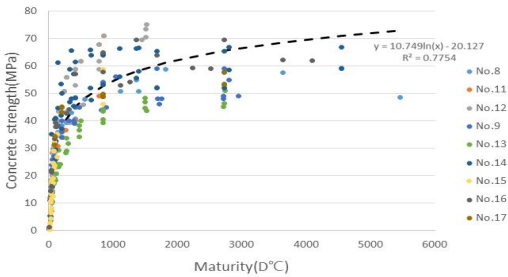


Fig. 3. Comparisons of strength-maturity relationships (high-strength concrete)

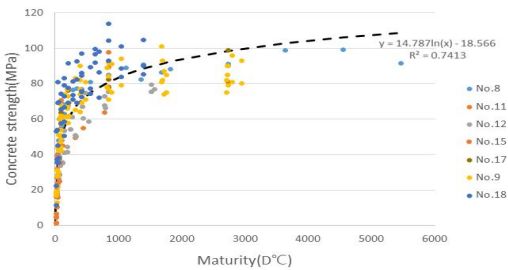


Fig. 4. Comparisons of strength-maturity relationships (super high-strength concrete)

추후, 추정식은 다양한 온도이력을 가진 실험자료로 보완이 필요하며, 좀 더 강도 수준도 세밀하게 구분되어야 한다고 판단된다.

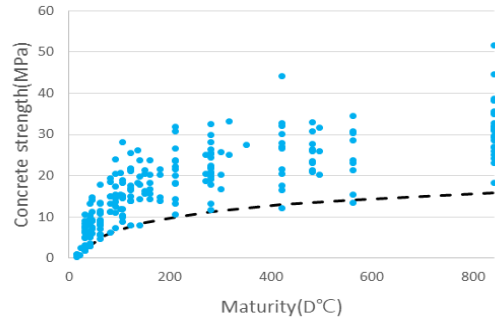


Fig. 5. Comparisons of strength-maturity relationships (normal-strength concrete-840D°C)

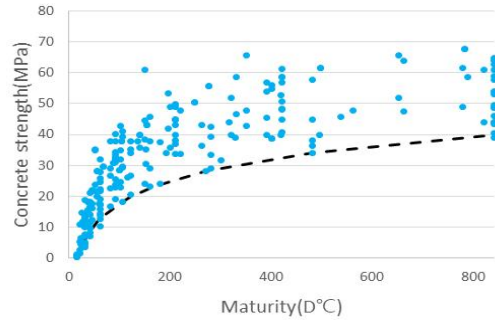


Fig. 6. Comparisons of strength-maturity relationships (high-strength concrete-840D°C)

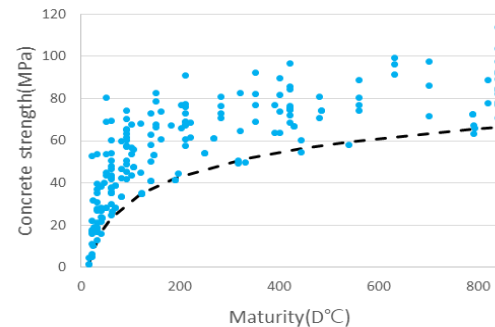


Fig. 7. Comparisons of strength-maturity relationships (super-high strength concrete-840D°C)

## REFERENCES

- [1] A. G. A. Saul. (1951), Principles Underlying The Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure, *Magazine of Concrete Research*, 2(6), 127-140.  
DOI : 10.1680/mac.1951.2.6.127
- [2] P. F. Hansen & J. Pederson. (1977), Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete Strength, *Nordiska Betongfoerbundet*, 21-25.  
<http://worldcat.org/issn/0029130700291307>
- [3] J. M. Plowman. (1956), Maturity and The Strength of Concrete, *Magazine of Concrete Research*, 13-22.
- [4] N. J. Cario. (1984), Maturity Method : Theory and Application, *Journal of Cement, and Aggregates, ASTM*, 6(2), 61-73.  
DOI : 10.1520/CCA10358J
- [5] ASTM. (2021), Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, *ASTM C 1074-19<sup>F1</sup>*
- [6] Architectural Institute of Japan. (2018), Cold Weather Concreting, *JASS5*, 411-426.
- [7] Korea construction standards center. (2021), *Cold Weather Concreting in Standard Specification of Construction Work*, KCS [online].  
<https://www.kcsc.re.kr/StandardCode/Viewer/31196#title-148>
- [8] H. B. Ko, E. I. Eun & S. W. Eum. (1998), The Effects of Curing Temperature History on Concrete Strength Development, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 10(5), 89-100.
- [9] Y. J. Kwon. (2004), A Study on the Strength Prediction of High Strength Concrete using Maturity Function, *Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 20(6), 67-74.
- [10] M. H. Kim & M. H. Kim. (1988), A Study on the Strength Inference and Application by the Maturity and Strength Development of Concrete, *Journal of The Architectural Institute of Korea*, 4(1), 263-269.
- [11] B. S. Kil, M. H. Cho, J. H. Jeon & J. H. Nam. (1996), An Experimental Study on the Compressive Strength Prediction of High-Strength Concrete by Maturity, *Proc. of the Korea Concrete Institute*, 225-231.
- [12] J. H. Nam & B. S. Khil. (1997), Application of the prediction Model of Concrete Strength by Maturity Method to High-Strength concrete, *Journal of The Architectural Institute of Korea*, 13(7), 197-206.
- [13] M. H. Kim, J. H. Nam, B. S. Khil, S. P. Kang & J. H. Jang. (2003), A Study on the Development of Strength Prediction Model and Strength Control for Construction Field by maturity Method, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 15(1), 87-94.
- [14] K. H. Yang, J. S. Mun, & M. S. Cho. (2015), Effect of Curing Temperature Histories on the Compressive Strength Development of High-Strength Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, Article ID 965471, 1-12.  
DOI : 10.1155/2015/965471
- [15] K. Hasuo, Y. Nishimoto, T. Matsuda & H. Kawakami.. Estimate of Concrete Strength in Early Age using the Maturity Method-Study on Concrete using Ordinary Portland Cement-, *Reserch report of Sumitomo Mitsui Construction co. LTD., No.2, 145-150*(in Japanese).
- [16] Sumitomo Osaka Cement, *Technical report*, 1-78(in Japanese).
- [17] J. Minagawa, Y. Satou, Y. Matuda & K. Kawakami. (2002). Basic experiments on fluctuations in concrete strength development in structures, *Proc. of Japan Concrete Institute*, 24(1), 945-950(in Japanese).
- [18] D. Sisikura. (2001), Basic experiments on fluctuations in concrete strength development in structures, *Report of Japan Testing Center for Construction Materials*, 13(6), 6-11(in Japanese).

고 훈 범(Hunebum Ko)

[정회원]



- 1989년 3월 : 성균관대학교 건축공학과 (공학석사)
- 1992년 3월 : Kyoto Univ. 대학원 건축학과 (공학석사)
- 2007년 3월 : Kyoto Univ. 대학원 도시환경공학과 (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 인하공업전문대학 건축과 교수
- 관심분야 : 건축사공, 건축재료
- E-Mail : hbko@inhatc.ac.kr