

## 기후변화의 온도와 습도 양생조건에 따른 콘크리트 재료특성의 성능중심평가

### Performance Based Evaluation of Concrete Material Properties from Climate Change Effect on Temperature and Humidity Curing Conditions

김 태 균<sup>1)</sup>      신 재 호<sup>2)</sup>      신 등 우<sup>3)</sup>      심 현 보<sup>4)</sup>      김 장 호<sup>5)\*</sup>  
Tae-Kyun Kim      Jae-Ho Shin      Dong-Woo Shin      Hyun-Bo Shim      Jang-Ho Jay Kim

#### Abstract

Currently, global warming has become a serious problem arising from the usage of fossil fuels such as coal and petroleum. Moreover, due to the global warming, heat wave, heavy snow, heavy rain, super typhoon are frequently occurring all over the world. Due to these serious natural disasters, concrete structures and infrastructures are seriously damaged or collapsed. In order to handle these problems, climate change oriented construction technology and codes are necessary at this time. Therefore, in this study, the validity of the present concrete mixture proportions are evaluated considering temperature and humidity change. The specimens cured at various temperature and humidity conditions were tested to obtain their compressive and split tensile strengths at various curing ages. Moreover, performance based evaluation (PBE) method was used to analyze the satisfaction percentage of the concrete cured at various condition. From the probabilistic method of performance evaluation of concrete performance, feasibility and usability can be determined for future concrete mix design.

Keywords : Climate change, Bayesian probabilistic method, Satisfaction curve, Performance based evaluation

#### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 가장 문제가 되는 지구 온난화의 영향은 크게는 국가적으로 작게는 지역적, 도시적으로 나타나고 있다. 지구 온난화를 유발하는 온실 가스는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O), 과불화탄소(PFCs), 메탄(CH<sub>4</sub>) 등으로 구성되어있고, 산업혁명 이래 화석 연료의 사용, 산림파괴와 같은 사람들의 무분별한 행동으로 인하여 온난화 영향이 나타나고 있다. 그러나 전 세계적으로 이러한 문제를 인식하고 있음에도 불구하고, 개선되지 않고 있다. 온난화의 영향의 단적인 예로 CO<sub>2</sub> 온실효과로 지구 온도와 평균 기온이 상승하여 폭설, 폭우 뿐만 아니라, 한파, 폭염, 고온 등 이상 기후가 발생하고 있다. 이러한 극한 기후변화는 건설현장 및 사회기반 구조물들에게도 크게 영향을 미치고 있다.

댐, 교량, 터널, 항만 등과 같은 사회기반시설들의 파괴로 인하여 인적 및 경제적 손실이 발생하였으며 특히 콘크리트 구조물의 경우 다양하고 극심한 기후변화로 인해 노후화가 급속하게 진행되는 것으로 보고된바 있다. 이러한 기후변화의 문제점들을 개선하기 위해서는 국내·외 건설현장에 기후변화에 대응할 수 있는 다양한 시공기술 및 기준이 절실히 필요한 상황이다(Jun et al., 2011). 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점들의 해결하고 기후변화의 대응책을 마련하기 위하여 콘크리트 구조물에 영향을 미치는 다양한 기후인자들 중, 가장 중요한 온도와 습도를 경화조건으로 선정하여 콘크리트 양생에 미치는 영향을 검토해 보았다. 또한 실험결과를 분석하는 방법으로는 만족도 곡선 작성방법을 사용하여 성능중심형 평가(PBE : Performance Based Evaluation)절 차를 제안하고자 한다.

1) 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정  
2) 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 석사과정  
3) 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 석사과정  
4) 정회원, 한국콘크리트학회 공학연구소 선임연구원  
5) 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 교수, 교신저자

\* Corresponding author : jjhkim@yonsei.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2015년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

성능기반형 재료특성 평가방법은 기존의 성능평가방법과 평가결과를 결합해, 요구 재료성능 만족도 성능을 0에서부터 100%로 평가하는 방법으로, 최근 차세대 구조물 성능 평가 방법이나 설계방법으로 전 세계적으로 연구되고 있다. 본 연구에서는 온도와 습도에 대한 기후변화 경화조건을 적용하여 확보한 콘크리트의 재료특성 실험결과를 바탕으로 작성한 만족도 곡선을 활용하여 PBE 방법을 제시하고 요구되는 콘크리트 재료성능의 만족여부를 판단하고자 한다. 이 방법은 재료특성 뿐만 아니라 다양한 평가에도 적용 가능하여 매우 유연한 평가방법이다. 과거에 비해 최근에는 설계 기준이나 규정을 구축하는 과정에서 성능의 관점으로 접근하는 시도들이 늘어나고 있다. 유럽의 CIB 보고서 (Gibson, 1982)에 따르면 성능측면에서 접근한다는 것은 과정이나 방법보다는 결과를 중요시 한다는 것이다. 이것은 곧 재료나 구조물이 설계시공과정 보다는 그 구조물의 최종 성능을 만족하는 것에 초점을 맞추는 것이다.

PBE 개념의 모식도는 Fig. 1에 나타나 있다. PBE로 본 연구를 진행하게 된 이유는 기존의 설계방법의 경우 일반적으로 한계상태설계법 (Limit Stats Design Method), 강도설계법 (Ultimate Strength Design Method), 허용응력설계법 (Working Stress Design Method)과 같은 설계방법과 평가방법으로 콘크리트 시방서와 설계규정에 제시되어 있는 규정에만 치우쳐 결론을 도출하였다. 이러한 이유로 인하여 일반적인 경우를 제외한 특수한 성능이 요구되는 설계에서는 설계자들이 문제 해결을 효율적으로 할 수 없는 상황을 초래한다. 따라서 본 연구에서는 특수한 상황을 고려 할 수 있는 평가방법인 PBE를 사용하여 기후변화로 인해 발생하는 특수 양생 조건을 적용한 콘크리트 배합인자를 검토하고자 한다 (Kim et al., 2010).

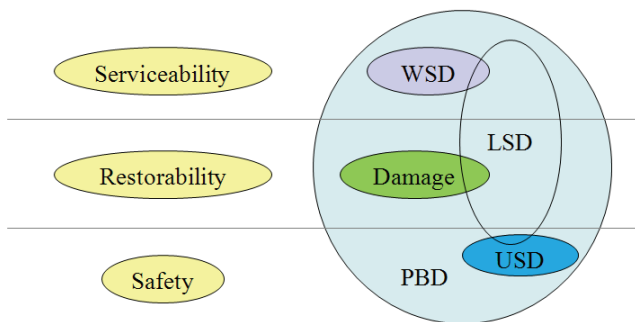


Fig. 1 PBE concept

## 2. 성능중심형평가의 이론적 배경

본 연구에서 사용하고자 하는 (Kim et al., 2010) PBE 평가 방법은 만족도 곡선을 이용하여 평가하는 방법으로 내진성능평가에서 사용되는 Bayesian방법을 활용한 Fragility curve 작성방법과 유사하게 만족도 곡선을 작성한다. Bayesian probabilistic theory를 이용하면 사건과 사건 사이에 발생 가능한 연결 관계를 파악할 수 있으며 과거의 자료를 바탕으로 미래를 예측할 수 있다. 또한, 해당 parameter의 자료가 많을수록 좀더 확실한 미래예측이 가능해진다. Shinozuka와 Singhal 등은 구조성능분석에 이러한 Bayesian 방법을 적용하였으며, Shinozuka는 Bayesian 통계방법을 지진에 대한 구조물의 취약도를 평가하는 데 사용하여 Fragility 곡선이라는 개념을 제안하였다. 즉, Fragility 방법은 Bayesian 방법을 기반으로 유도된 내진성능평가 방법이다. Shinozuka와 Singhal (Shinozuka et al., 2001a; Shinozuka et al., 2000b; Singhal et al., 1996)에 의해 개발된 Fragility방법은 Fragility 곡선을 교량이나 구조물의 취약성을 확률론적으로 평가하는 데 사용되고, 지반 진동강도에 대해 붕괴와 같은 한계를 초과하는 현상을 정규분포 함수 곡선으로 조건부 확률을 나타내며, 평균값과 로그 표준 편차 값을 식 (1)에서 나타내는 Maximum Likelihood 식을 통하여 추산한다.

$$L = \prod_{i=1}^N [F(a_i)]^{x_i} [1 - F(a_i)]^{1 - x_i} \quad (1)$$

여기서, F(.)는 특정 손상단계의 Fragility 곡선을 의미하고,  $a_i$ 는 교량  $i$ 를 대상으로 한 최대 지반 진동 가속도 (Peak Ground Acceleration : PGA)값이며,  $x_i$ 는  $a_i$ 와 같은 PGA값 이하의 교량 손상에 따라 0 혹은 1로 결정된다.  $N$ 은 지진 후 조사된 총 교량의 수로 정한다. 통용되는 로그정규분포의 가정 하에서는 F(a)를 식 (2)와 같은 형태로 취한다.

$$F(a) = \Phi \left[ \frac{\ln \left( \frac{a}{c} \right)}{\zeta} \right] \quad (2)$$

여기서  $a$ 는 PGA를,  $\Phi[.]$ 는 표준화된 정규분포 함수를 나타낸다. 식 (2)에서  $c$ 와  $\zeta$ 는 식 (3)으로 나타낸  $\ln L$ 를 최대화하기 위해 계산된 값이다.

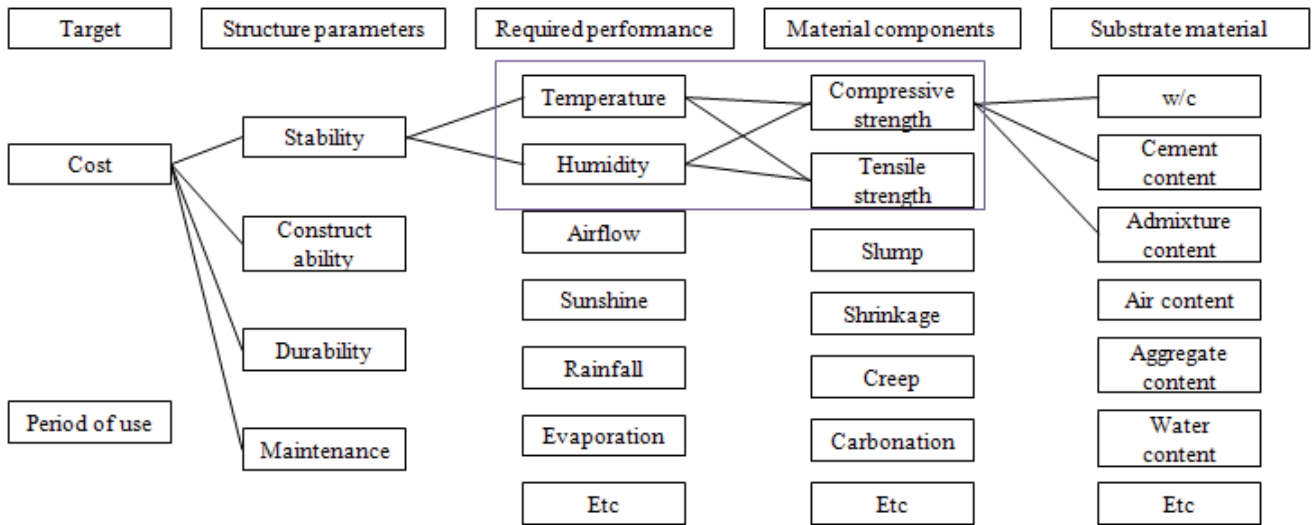


Fig. 2 Parameter levels of concrete mixture properties

$$\frac{d \ln L}{dc} = \frac{d \ln L}{d\zeta} = 0 \quad (3)$$

본 연구에서는 콘크리트 재료특성에 가장 많은 영향을 미칠 수 있는 기후변화 인자로 온도와 습도의 변화를 반영한 만족도 곡선을 작성하여 기후변화로 인한 콘크리트의 재료 특성의 변화를 성능중심평가방법으로 파악하고자 한다 (Kim et al., 2013). Fig. 2는 콘크리트 배합성능을 다양한 단계로 세분화한 그림이다. PBE의 전반적인 절차는 충분한 연관 데이터를 확보한 후 각 데이터 값이 제시된 규정 값을 만족하는지 검토하여 최종적으로 Bayesian방법 (Ang et al., 2006; Box et al., 1992)을 이용하여 만족도 곡선을 작성한다. 이러한 일련의 과정에서 사용자가 제시하는 만족규정에 따라 평가결정이 변경되어서 최종적으로 성능을 중심으로 하는 평가라고 할 수 있다.

### 3. 콘크리트 배합설계

#### 3.1 실험조건

콘크리트는 양생과정에서 콘크리트를 타설한 직후부터 수화작용이 지속적으로 진행되어서 충분한 강도발현 경화조건을 제공해야 한다. 콘크리트 양생조건으로는 온도와 습도가 가장 중요한 양상환경 조건이며 편차에 따라 수화작용의 진행이 틀려져서 콘크리트의 강도나 균열과 같은 재료특성에 많은 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 기후변화로 인한 온도와 습도의 편차를 Table 1과 같이 설정 하게 된 이유는

Table 1 Climate change temperature and humidity combinations

CASE	Temperature (°C)	Humidity (%)
Con	20	95
1	8	40
2	8	65
3	8	95
4	12	40
5	12	65
6	12	95
7	35	40
8	35	65
9	35	95
10	40	40
11	40	65
12	40	95
13	45	40
14	45	65
15	45	95

일반 표준양생 온도와 습도는 각각 20°C±2와 95% 이상인 양생 조건에서 시방배합이 이루어지고 있으나 실질적으로 기후변화로 인한 양생 온도와 습도변화에 대한 콘크리트 성능 검토는 현재 미흡하다고 판단된다. 그러므로 본 연구에서는 양생온도 8°C, 12°C, 35°C, 40°C, 45°C와 양생 습도 40%, 65%, 95%를 기후변화 양상환경 인자로 보고 연구를 진행하였다. 선정된 온도와 습도는 기상청이 제공하는 서울시 서대문구의 과거 10년간의 평균 월간 온도와 습도를 검토, 분석하여 설정한 값들이다.

Table 2 Concrete mix proportion

Coarse Aggregate (mm)	Slump (cm)	Air (%)	w/c	S/a	Unit (kg/m <sup>3</sup> )				f <sub>ck</sub>
					w	c	s	g	MPa
25	12	5	55	42	183.4	333.45	677.26	1013.58	27

Table 3 Experimental results

Case	Temperature (°C)	Humidity (%)	W/C (%)	Compressive strength (MPa)			Splitting tensile strength (MPa)		
				3days	7days	28days	3days	7days	28days
Control	20	95	55	17.06	22.99	31.11	1.58	2.18	3.24
1	8	40	55	8.32	13.57	18.51	1.09	1.37	1.78
2	8	65	55	13.21	15.42	22.83	1.09	1.37	2.25
3	8	95	55	16.74	22.70	31.37	1.75	2.19	2.1
4	12	40	55	8.72	14.30	19.4	1.04	1.55	1.85
5	12	65	55	15.43	18.06	22.88	1.43	1.68	2.02
6	12	95	55	18.32	23.70	30.73	1.57	2.20	2.79
7	35	40	55	15.12	17.74	24.08	1.74	1.87	2.27
8	35	65	55	19.9	23.18	27.65	2.33	2.57	2.84
9	35	95	55	20.19	24.47	33.63	2.10	2.40	2.6
10	40	40	55	17.11	18.16	23.33	1.99	1.97	2.22
11	40	65	55	17.97	20.34	23.76	2.82	2.21	2.78
12	40	95	55	19.1	22.83	24.16	1.90	2.57	2.52
13	45	40	55	18.81	21.73	19.62	2.02	2.03	1.95
14	45	65	55	18.94	23.21	24.88	2.06	2.08	2.13
15	45	95	55	19.08	23.3	27.29	2.06	2.13	2.21

### 3.2 실험방법 및 배합조건

본 연구에서 사용된 콘크리트 배합표는 Table 2와 같으며, 굵은 골재의 최대치수 25mm, 물-시멘트 비 55%, 잔골재율 42%, 슬럼프 120±2mm, 28일 목표 설계강도를 27MPa로 한 배합설계이다. 압축강도실험과 슬럼프실험을 위한 콘크리트 공시체 제작은 KS F 2403에 따라 100×200mm의 원형 공시체를 제작하였다. 콘크리트 타설이 완료된 시점에서부터 공시체들은 항온항습기에서 주어진 온도와 습도조건에서 양생시켰다. 각각의 온도와 습도 조합으로 양생된 공시체들은 압축강도 (3,7,28일)와 할렬인장강도 (3,7,28일) 실험을 실시하였고 각각의 온도, 습도 조합에 따라 공시체는 3개씩 시험하였다. 압축강도 실험은 KS F 2405와 할렬인장강도 실험은 KS F 2423에 의해 실시하였다.

### 4. 실험결과

Table 3은 양생온도 8°C, 12°C, 35°C, 40°C, 45°C와 양생 습도 40%, 65%, 95% 조합으로 다양하게 양생시킨 공시체

의 압축강도와 인장강도를 나타낸 것이다. 표준양생조건에서 양생을 시킨 시편의 경우 목표 설계기준강도가 27MPa이며 3일과 7일강도는 각각 50%와 80% 이상 발현되는 것을 알 수 있으며, 28일 설계기준강도를 만족하는 31.1MPa까지 나오는 것을 확인하였다.

Fig. 3은 실험결과 값을 그래프로 나타낸 것으로 3일강도의 경우 8°C, 12°C의 저온 보다 35°C, 40°C, 45°C의 고온에서 강도가 조금 더 높게 나오는 것을 확인 할 수 있다. 특히 8°C의 경우 습도가 낮을수록 3일과 7일강도는 설계기준강도의 40%와 70%에 못 미치는 강도를 나타내었다. 이와 반대로 고온에서는 습도가 높을수록 강도가 크게 나오는 것을 알 수 있었다. 높은 온도와 습도 조건에서는 3일과 7일 강도 모두 높은 결과를 보였다.

28일 강도의 경우 35°C에서 양생된 시편을 제외한 나머지 온도와 습도 40%, 65%로 양생한 시편의 강도가 비슷하게 나오는 것을 알 수 있다. 그러나 습도 95%에서 양생한 시편의 강도를 비교 분석한 결과 양생온도 8°C, 12°C, 35°C의 시편들의 강도가 가장 크게 나오는 것을 알 수 있다. 양생온도 40°C, 45°C 시편들의 28일 강도를 분석한 결과 3, 7일

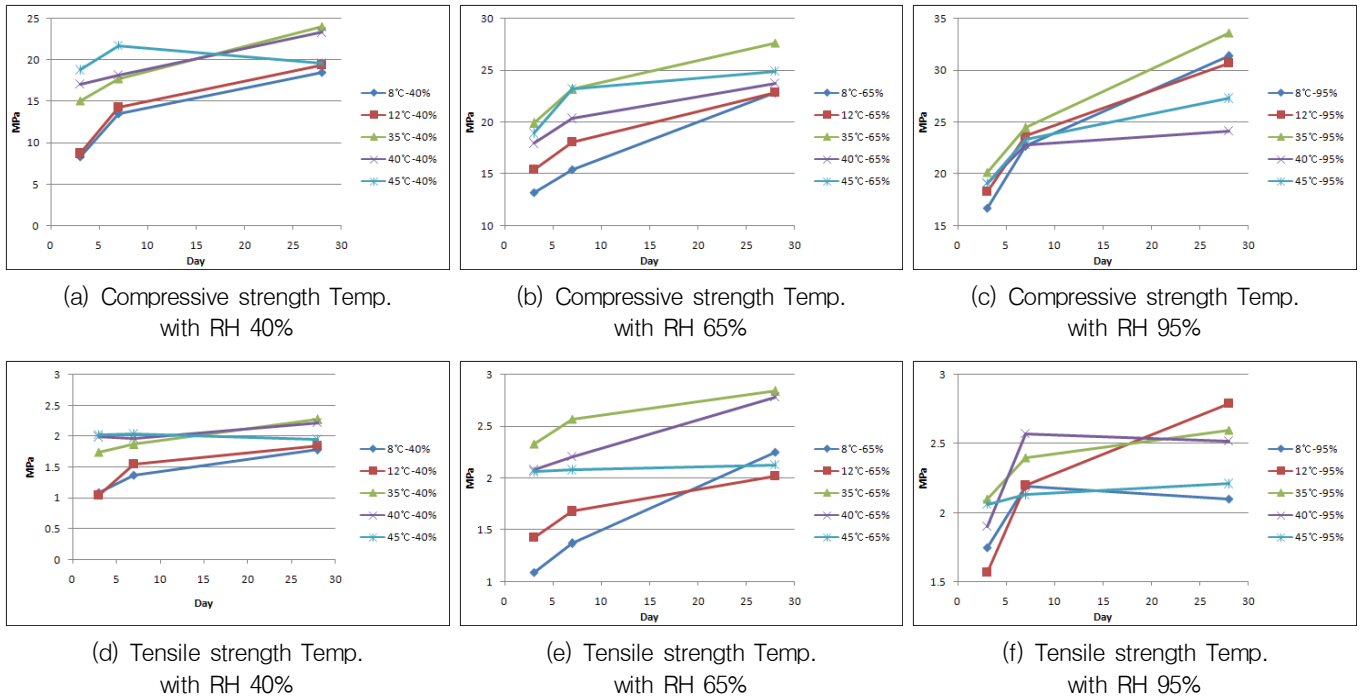


Fig. 3 Compressive and tensile strengths versus temperature and humidity

초기 강도는 다른 온도에서 양생한 시편들보다 크나 28일 강도 결과에서는 강도의 변화폭이 낮은 온도에서 양생한 시편들의 강도 변화폭보다 작다는 것을 알 수 있다. 이러한 강도 변화의 현상은 증기양생 시편들과 비슷한 경향을 보인다. 증기양생 시편의 경우 일반적으로 초기강도가 높다. 그러나 증기양생을 오래 시키게 되면 오히려 강도저하현상이 발생하게 되는데 이것은 수화반응과정에서 콘크리트에 온도 균열 및 다양한 손상을 일으켜 강도저하를 발생시키는 현상과 비슷하다고 판단된다.

할렬인장강도는 일반적으로 압축강도의 1/9~1/13 정도 되며, 본 연구에서 확보한 압축과 인장강도를 검토해본 결과 이 조건을 만족하는 것을 알 수 있다. 또한 압축강도와 인장강도 결과 값들이 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 고온에서 양생을 한 시편의 경우 초기 강도는 높으나 28일 강도는 크게 변화지 않는 것을 볼 수 있으며, 표준 양생온도에 가까울수록 장기강도가 높다는 것을 알 수 있다.

다양한 양생 온도, 습도조건의 실험결과를 표준양생 온도, 습도조건의 실험결과와 비교해 보면 온도 8~12°C와 습도 95% 이하의 경우 강도 발현이 되지 않는 것을 알 수 있으며, 온도가 40°C를 넘어 갈 경우 습도에 관계없이 7일 초기 강도는 높게 나오나 28일 강도의 경우 목적강도를 만족하지 못하는 것을 확인 할 수 있다. 온도 35°C의 경우 양생습도

40%를 제외한 다른 습도에서는 충분한 강도가 발현되는 것을 확인 할 수 있다.

## 5. 만족도 곡선 작성 방법

### 5.1 가상데이터 생성

만족도 곡선은 선택한 변수의 성공/실패 여부를 0.0~1.0 사이의 만족비로 결정하는 통계적인 방법이므로 유효한 데이터베이스를 구축하기 위해서는 풍부한 데이터양이 필요하다. 그러나 일반적으로 만족도 곡선을 작성하는데 필요한 실험 데이터가 불충분하므로 이 한계를 극복하기 위해 실제 실험 데이터를 이용해 정규분포곡선을 그리고 이 곡선으로부터 가상데이터를 도출해야한다.

가상데이터를 구하는 방법은 다음과 같다. 본 연구에서 사용한 습도 변수는 40, 60, 95%이며 이 값들의 평균과 표준편차는 각각 66.67와 22.48%이다. 이 두 가지 값을 이용해 정규분포곡선으로 습도곡선을 Fig. 4와 같이 그릴 수 있고 이 곡선에서 별개의 가상 데이터를 얻어낼 수 있다.

정규분포 곡선의 별개의 데이터 점이 일반 개라고 가정할 경우 습도에 대한 x축의 길이를 균일하게 1로 잡아주면 곡선의 높이는 곧 넓이가 된다. 예를 들어 습도 66.5에 대한 가상데이터의 수를 알기 위해서 습도의 66부터 67까지의 곡선이

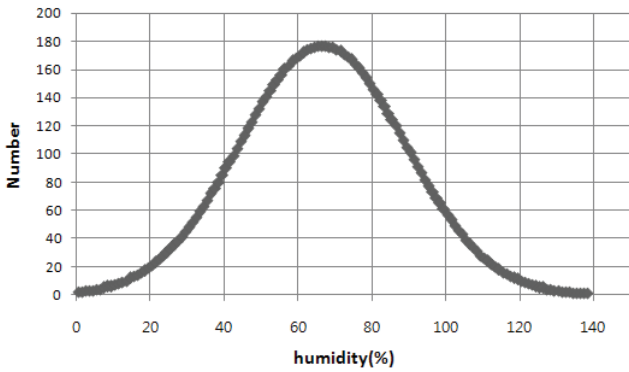


Fig. 4 Standard normal distribution of humidity

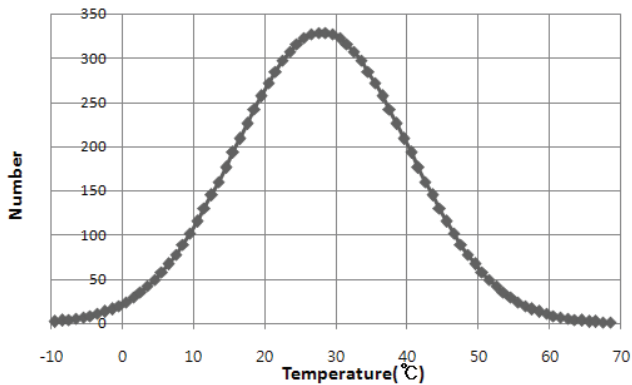


Fig. 5 Standard normal distribution of temperature

Table 4 Virtual data points for temperature and humidity parameter

Humidity (%)	Number	Temperature (°C)	Number
0.5	2	-9.5	12
1.5	2	-8.5	14
2.5	3	-7.5	16
...	...	...	...
66.5	177	27.5	264
66.6	177	28.5	329
...	...	...	...
132.5	2	76.5	1
133.5	2	77.5	1

x축과 이루는 넓이 (정규분포곡선을 x가 66부터 67일 때까지 적분)를 계산한 값이 177이라면 x축의 길이가 1이므로 그 넓이는 결국 177이 되고 이는 곧 가상 데이터의 수가 177임을 의미한다. Fig. 5는 평균 28%, 표준편차 15.08%를 이용하여 도출한 온도 가상데이터 곡선이며, Table 4는 Figs. 4와 5의 정규분포 습도와 온도 곡선에서 확보한 가상데이터 값 별로 데이터 개수를 적어 놓은 것이다 (Kim et al., 2010).

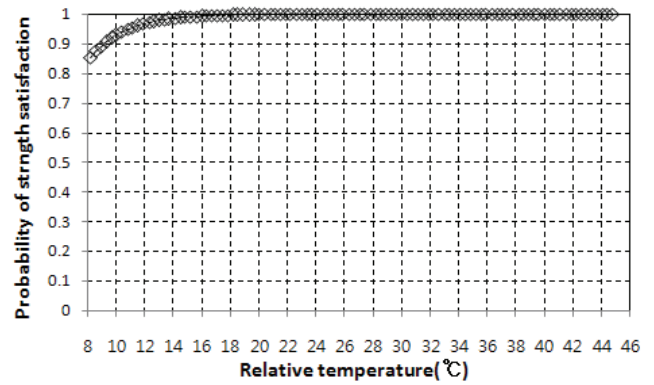


Fig. 6 Satisfaction curve of temperature parameter for 3 day compressive strength (strength-3days)

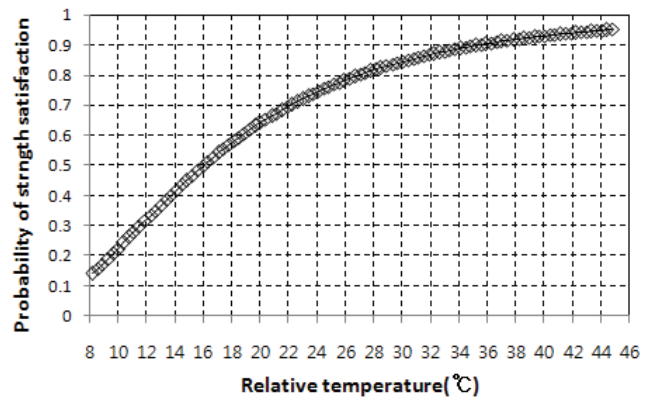


Fig. 7 Satisfaction curve of temperature parameter for 7 day compressive strength (strength-7days)

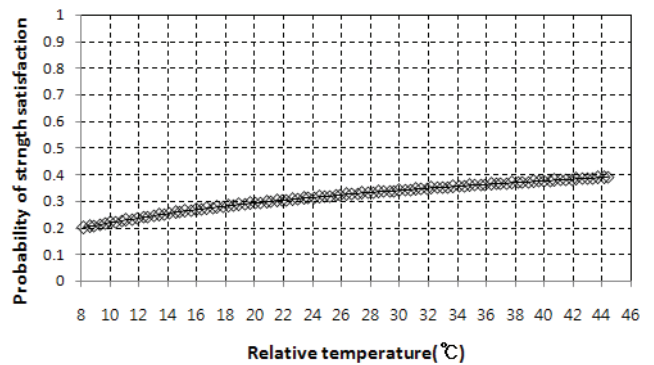


Fig. 8 Satisfaction curve of temperature parameter for 28 day compressive strength (strength-28days)

## 5.2 압축강도 만족도 곡선 작성

확보한 온도, 습도 가상 데이터를 활용하여 Figs. 6~17의 만족도 곡선을 그렸다. 만족도 곡선은 만족 확률을 계산하기 위해서는 재료변수, 평균값, 표준편차가 필요한 로그 정규분

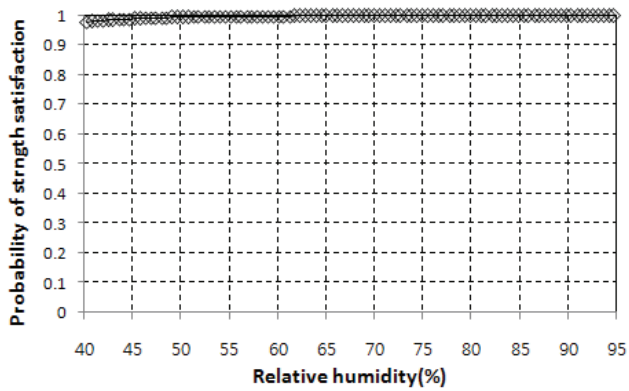


Fig. 9 Satisfaction curve of humidity parameter for 3day compressive strength (strength-3days)

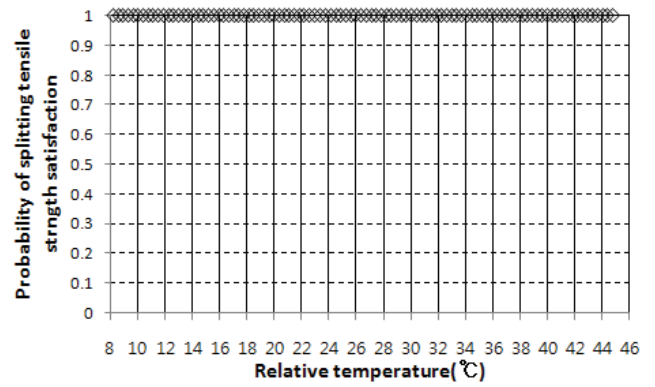


Fig. 12 Satisfaction curve of temperature parameter (splitting tensile strength-3days)

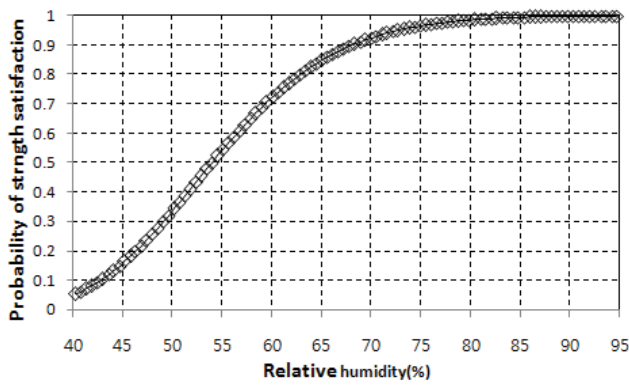


Fig. 10 Satisfaction curve of humidity parameter for 7day compressive strength (strength-7days)

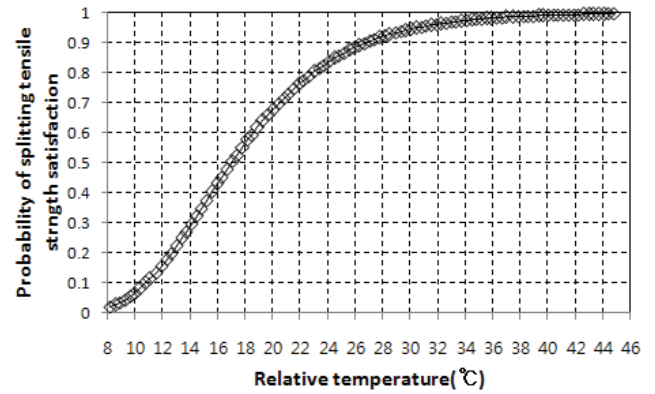


Fig. 13 Satisfaction curve of temperature parameter (splitting tensile strength-7days)

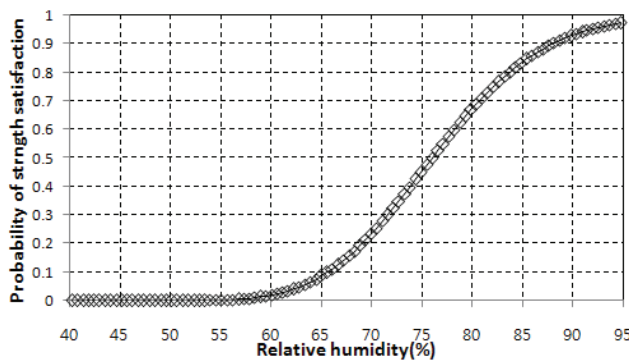


Fig. 11 Satisfaction curve of humidity parameter for 28day compressive strength (strength-28days)

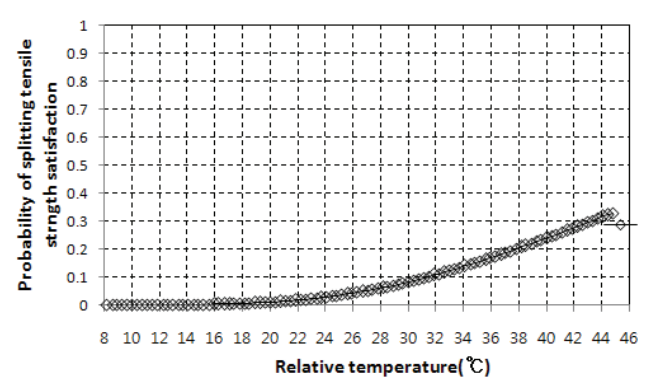


Fig. 14 Satisfaction curve of temperature parameter (splitting tensile strength-28days)

포법을 사용하여야한다. Fig. 6~11의 설계기준강도 3, 7, 28 일 압축강도 만족도곡선의 만족 규정으로는 각각 목표 강도의 40% (10.8MPa), 70% (18.9MPa), 100% (27MPa)을 기준으로 한다. 실험결과를 바탕으로 도출한 가상 데이터의 성공과 실패 여부를 강도 만족 규정과 비교해서 각각 0과 1로

결정한 후 Bayesian 확률 프로그램에 입력하면 평균과 표준편차 값을 계산할 수 있고, 이를 바탕으로 만족도 곡선을 작성한다.

작성한 만족도 곡선은 PBE에 활용된다. 하나의 예로 Fig. 10의 7일강도와 습도관계 살펴보면 7일 규정강도인 18.9MPa

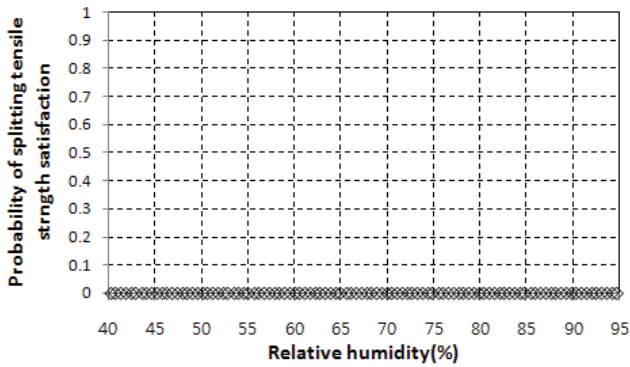


Fig. 15 Satisfaction curve of humidity parameter (splitting tensile strength-3days)

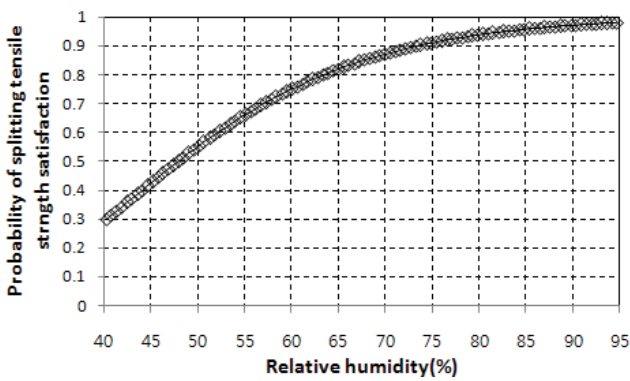


Fig. 16 Satisfaction curve of humidity parameter (splitting tensile strength-7days)

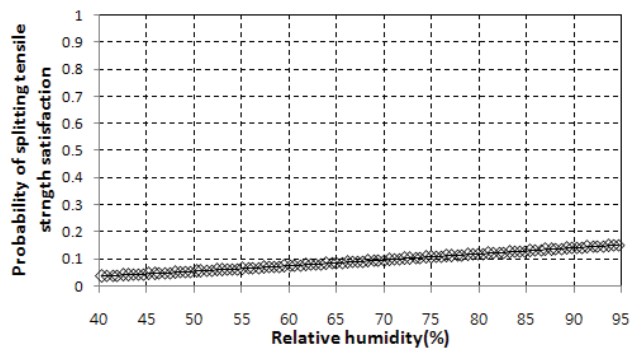


Fig. 17 Satisfaction curve of humidity parameter (splitting tensile strength-28days)

를 50% 이상 만족하기 위해서는 양생습도가 약 54% 이상이어야 한다는 것을 알 수 있다. 또한 Figs. 6~8의 온도와 습도 양생조건에 따른 강도 만족도 곡선에서 3일 보다 7일과 28일의 만족도 곡선 범위가 넓게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 초기 3일 보다 양생 날짜가 늘어나면서 양생 온도와 습도가 콘크리트 강도에 미치는 영향이 증가한다는 것을 보여

주고 있다.

### 5.3 인장강도 만족도 곡선 작성

Fig. 12~17 인장강도에 대한 만족도 곡선을 나타낸 것이며, 인장강도도 압축강도와 동일하게 로그 정규분포법을 이용하여 만족도 곡선을 작성하였으며, 설계기준강도 3, 7, 28일 인장강도 만족도곡선의 만족 규정으로는 각각 목표 강도의 40% (1.08MPa), 70% (1.89MPa), 100% (2.7MPa)을 기준으로 한다. 인장강도의 경우 7일 강도에서 온도와 습도의 영향을 가장 크게 미치는 것을 알 수 있다. 이러한 만족도곡선 작성법은 PBE 평가절차를 사용할 경우 기후변화의 환경조건 변화와 특별하게 나타나지 않는 경향을 통계적으로 수치화하여 콘크리트 재료 및 시공에 활용할 수 있을 것이라고 사료된다.

### 6. 결론

본 연구에서는 기후변화로 인한 환경적인 양생조건이 콘크리트 재료특성에 미치는 영향을 다양한 양생 온도와 습도에서 경화된 콘크리트 성능을 실험적으로 검토한 후 Bayesian 통계법을 이용한 만족도곡선 및 성능중심형 평가방법 (Performance Based Evaluation : PBE)에 적용해 보았다. 연구 결론은 다음과 같다.

- (1) 압축강도의 경우 온도가 높을수록 3, 7일 초기강도가 높게 나타났다. 이것은 증기양생을 한 콘크리트 특성과 비슷하다고 볼 수 있다. 그러나 28일 강도를 확인 해본 결과 양생 온도 8℃, 12℃, 35℃와 습도 95%의 시편이 압축강도가 가장 높게 나왔다. 최적의 콘크리트 양생 온도와 습도는 온도의 경우 표준 양생온도에 근접한 경우와 습도는 최대한 높은 습도의 경우에 28일 강도가 제일 컸다.
- (2) 인장강도의 경우 압축강도의 1/9~1/13사이의 강도를 만족하며, 양생 온도와 습도에 따른 압축강도와 인장강도 결과의 경향은 비슷하였다. 양생온도 12℃, 35℃에서 28일 강도가 가장 컸으며, 초기 인장강도는 양생 온도가 고온일 때 가장 크게 나왔다.
- (3) 고온의 양생에서 초기 강도가 높게 나오나 실질적으로 장기강도는 낮게 나오는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 열에 의한 온도균열 및 다른 이유로 이러한 현상이 나



타난 것을 알 수 있다.

- (4) 재료시험의 데이터를 바탕으로 만족도 곡선을 작성한 후 PBE에 적용시켰으며 PBE 위하여 다량의 가상 데이터를 도출하여 기후변화로 인한 양생 온도와 습도 변화가 콘크리트 압축강도 인장강도에 미치는 영향을 검토, 평가 하였다.
- (5) 본 연구에서는 한 가지 콘크리트 배합으로만 성능을 검토하였으므로 정확한 데이터를 구축하기 위해서는 다양한 배합을 사용하여 추가 연구를 수행할 필요가 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 2013년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0030040).

#### References

1. Ang, A. H. S-S., and Tang, W. H. (2006), Probability Concepts in Engineering Wiley & Hoboken, 409.
2. Box, G. E. P., and Tiao, G. C. (1992), Bayesian Inference in Statistical Analysis, Addison Wesley, Reading, Mass, 608.
3. Gibson, E. J. (1982), Working with the performance Approach

- in building, CIB state of the Art report, 64.
4. Jun, H. Y., Kim, T. K., Lee, S. W., Kim, J. H. J. (2011), Application of Performance Based Mixture Design (PBMD) for Self Compacting Concrete, *Journal of Korea concrete institute conference*, KCI (in Korean).
5. Kim, J. H. J., Phan, D. H., Lee, K. S., Yi, N. H., Kim, S. B. (2010), Development of PBD Method for Concrete Mix Proportion Design Using Bayesian Probabilistic Method, *Korea concrete institute, KCI*, 20(2), 171-177 (in Korean).
6. Kim, T. K., Shin, D. W., Choi, J. W., Kim, J. H. J. (2013), Performance Based Design Evaluation for Concrete Mix Design of Various Curing Condition, *Journal of Korea concrete institute conference*, KCI (in Korean).
7. Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J. H., and Naganuma, T. (2000), Statistical Analysis of Fragility Curves, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 126(12), 1224-1231.
8. Shinozuka, M., Feng, M. Q., Kim, H., Uzawa, T., and Ueda, T. (2001), Statistical Analysis of Fragility Curves, Department of Civil and Environmental Engineering University of Southern California, Los Angeles, California, 143.
9. Singhal, A., and Kiremidjian, A. S. (1996), A Method for Earthquake Motion Damage Relationships with Application to Reinforced Concrete Frame, Report No, 119, 186.

Received : 04/04/2014

Revised : 07/01/2014

Accepted : 07/16/2014

## 요 지

현재 전 세계적으로 석탄, 석유 등 화석연료의 사용으로 지구 온난화가 진행되고 있다. 이러한 원인으로 폭염, 폭설, 폭우 및 슈퍼태풍 등과 같은 이상기후, 극한기후 현상이 지속적으로 증가 하고 있다. 또한 심각한 자연재해로 콘크리트 구조물 및 사회기반시설의 심각한 손상과 붕괴가 발생한다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 기후변화에 적합한 기준 및 시공 기술 등이 필요한 실정으므로 본 연구에서는 다양한 온도와 습도 양생조건이 콘크리트 배합에 미치는 영향을 검토해 보았다. 다양한 온도와 습도 조건에서 양생된 콘크리트의 압축강도와 할렬인장강도 실험을 수행하였다. 또한 성능중심평가 (performance based evaluation (PBE))방법을 사용하여 다양한 양생조건에서 경화된 콘크리트 강도의 만족도확률을 평가하였다. 또한 콘크리트의 성능중심평가로부터 얻는 결과 값을 바탕으로 기후변화가 배합에 미치는 영향을 고려하여 배합설계에 적용할 수 있다.

**핵심 용어** : 기후변화, 베이시안 확률방법, 만족도 곡선, 성능중심평가