



기후변화의 풍속과 일조시간에 따른 콘크리트 재료특성의 성능 중심 평가

김태균¹⁾ · 신재호¹⁾ · 배덕효²⁾ · 김장호^{1)*}

¹⁾연세대학교 사회환경시스템공학부 ²⁾세종대학교 토목환경공학과

Performance Based Evaluation of Concrete Material Properties from Climate Change Effect on Wind Speed and Sunlight Exposure Time Curing Condition

Tae-Kyun Kim,¹⁾ Jae-Ho Shin,¹⁾ Deg-Hyo Bae,²⁾ and Jang-Ho Jay Kim^{1)*}

¹⁾School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, 120-794, South Korea

²⁾Dept of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, 143-747 South Korea

ABSTRACT Currently, due to global warming, occurrences of extreme climate phenomena such as heat wave, heavy snow, heavy rain, super typhoon are continuously increasing all over the world. Due to these extreme climate phenomena, concrete structures and infrastructures are exposed to serious deterioration and damage. However, researches on construction technologies and standards to confront the climate change generated problems are needed presently. In order to better handle these problems, the validity of the present concrete mixture proportions are evaluated considering wind speed and sunlight exposure time based on climate change record in Seoul, Korea. The specimens cured at various wind speed and sunlight exposure time 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 target strength satisfaction percentage of the concrete cured for the curing conditions. From the probabilistic method of performance evaluation of concrete performance, feasibility and usability of current concrete mix design practice for climate change conditions can be evaluated.

Keywords : climate change, bayesian probabilistic method, satisfaction curve, performance based evaluation

1. 서 론

최근 전 세계적으로 발생하는 극심한 기후변화는 단순한 온도상승 현상이 아니라 이상 가뭄 및 빈번한 태풍 발생 등과 같은 다양한 극한 기후현상으로 나타나고 있다. 또한 이러한 기후변화 현상이 지속될 경우, 극한 기후 보편화로 인한 자연재해는 시간이 갈수록 더욱 빈번하게 발생 할 것이라는 연구결과가 발표된 바 있다. 이러한 기후변화 현상은 직·간접적으로 크고 작은 규모로 생태계, 수자원, 식량, 산업 등과 같은 다양한 분야에 심각한 영향을 미치고 있다. 특히 연안과 저지대의 호우 및 태풍의 빈도 강도가 점차 확대되어, 이로 인한 산사태와 침식 등으로 도시지역의 구조물들에 크게 영향을 미치고 있다.¹⁾

국내의 경우 폭염, 폭우, 한파, 폭설, 태풍과 같은 기후

변화가 심각하게 발생하고 있다. 기후변화에 따른 콘크리트 구조물의 공사 진행기간이 연장되어 그로 인한 경제적 손실이 증가하고 있으며, 기후변화를 고려하지 못한 상황에서 무리한 시공을 하여 콘크리트의 품질저하로 인해 부실시공의 원인이 되고 있는 실정이다. 다양한 기후인자들인 온도, 습도, 강우, 풍향, 풍속, 일조시간 등과 같은 다양한 기후조건에 따라 양생조건이 변경되어 콘크리트 품질에 많은 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 기후인자 중 풍속과 일조시간을 선정하여 이러한 양생조건이 콘크리트 배합성능에 미치는 영향을 성능 중심 평가방법(PBE : performance based evaluation)으로 검토하고자 한다. 성능 중심형 평가방법은 기후변화 조건과 같이 예측이 힘든 상황에서 요구성능의 만족도를 통계적으로 손쉽게 분석할 수 있는 평가 방법이며, 실험 결과 및 경험식 등을 바탕으로 선정한 요구성능의 만족도를 평가할 수 있다. 현재 PBE 방법은 다양한 관점에서 많은 연구자들이 활발히 연구하는 첨단 목표만족도 평가 방법의 일종이다.²⁻⁶⁾ 실제 국내외 건설현장에서 극심한 기

*Corresponding author E-mail : jjhkim@yonsei.ac.kr

Received July 29, 2014, Revised September 1, 2014,

Accepted September 3, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

후변화에 대응할 수 있는 건설기준이 부족한 실정으므로 성능 중심 평가를 통하여 이러한 문제점들을 해결하고 대응책을 마련할 수 있을 것이라 사료된다.

2. 성능중심평가(PBE)

본 연구에서 사용하고자 하는 PBE 평가 방법은 만족도 곡선을 이용하여 평가하는 방법으로 내진성능평가에서 사용되는 Bayesian 방법을 활용한 Fragility curve 방법과 유사하다.⁷⁾ Bayesian 확률적 이론을 이용하면 사건과 사건 사이에서 발생 가능한 연결 관계를 파악할 수 있다. Bayesian 방법에서는 과거의 자료를 바탕으로 미래를 예측하는 것이므로 해당 변수의 자료가 많을수록 좀 더 정확한 미래예측이 가능해진다. Shinozuka^{8,10)}와 Singhal⁹⁾ 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 Singhal에 의해 개발된 Fragility방법은 Fragility 곡선을 교량이나 구조물의 취약성을 확률론적으로 평가하는 데 사용되며, 지반 진동 강도에 대해 구조물붕괴와 같은 한계목표에 대한 초과 특성을 정규분포함수곡선으로 조건부 확률을 나타낸다. 평균값과 로그 표준편차 값은 식 (1)에서 나타내는 Maximum Likelihood 식을 통하여 추산한다⁸⁻¹⁰⁾.

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

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 0혹은 1로 결정된다. N은 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, Φ 는 표준화된 정규분포함수를 나타낸다. 식(2)에서 c 와 ζ 는 식 (3)으로 나타낸 $\ln L$ 를 최대화하기 위해 계산된 값이다.

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

본 연구에서는 콘크리트 재료특성에 가장 많은 영향을 미칠 수 있는 기후변화 인자로 풍속과 일조시간의 변화를 양생조건으로 선정하여 반영한 만족도 곡선을 작성한 후 이러한 기후변화로 인한 콘크리트의 재료특성의 변화를 성능 중심 평가 방법으로 파악하고자 한다. Fig. 1은 콘크리트 배합성능을 다양한 단계로 세분화한 그림이다. PBE의 전반적인 절차는 충분한 연관 데이터를 확보하여 각 데이터 값이 제시된 규정 값을 만족하는지 검토한 후 최종적으로 Bayesian방법을 이용하여 만족도 곡선을 작성하게 된다. 따라서 PBE는 사용자가 제시하는 만족규정에 따라 만족도 곡선이 변경되므로 궁극적으로 성능을 중심으로 평가하는 방법이라고 할 수 있다.^{11,12)}

3. 콘크리트의 배합 및 실험

3.1 성능평가조건

재료성능 평가에서 사용되는 데이터의 경우 설계자의 의도에 부합되어야 하며, Fig. 1은 콘크리트의 단계별 변수들을 나타낸 그림이다. 첫 번째 단계로는 구성재료를 나타낸다. 구성재료의 경우 콘크리트 배합에 미칠 수 있는 w/c, w, 공기량, 시멘트 또는 시멘트 양 등의 다양한 배합조건의 세부사항을 나열할 수 있다. 2단계로는 본 연구에서 가장 중요하게 여기는 콘크리트 양생과정에서 가장 영향을 크게 미칠 것으로 판단되는 다양한 기후인자로 구성되어 있으며 온도, 습도, 풍속, 일조시간 등이 포함되어 있다. 3단계의 경우 압축강도, 인장강도, 슬럼프, 건조수축,

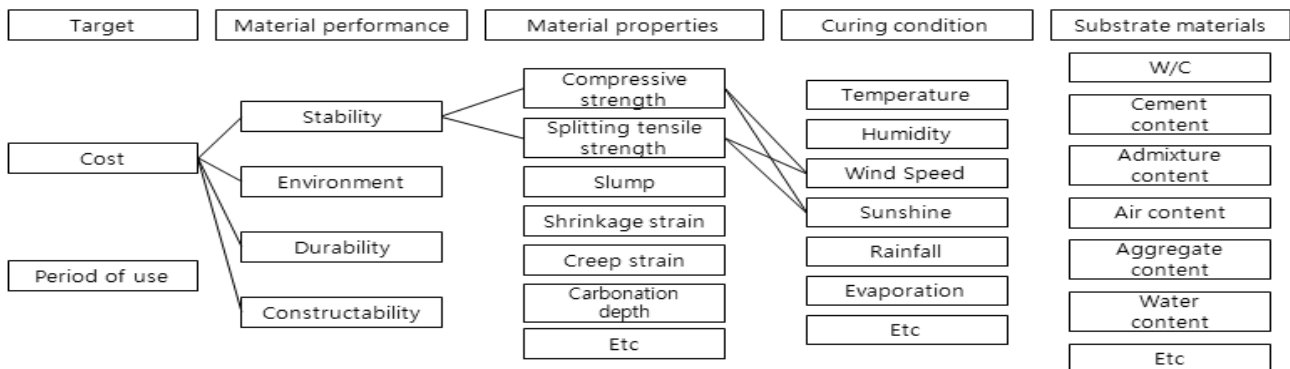


Fig. 1 Parameter levels of concrete mixture properties

Table 1 Monthly mean wind speed (0.1 m/s) over the past 10 years at Seoul, Korea (Korea Meteorological Administration)

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Avg
2012	25	29	35	34	27	28	27	30	23	23	27	27	27.92
2011	28	26	34	32	28	29	24	25	24	21	27	26	27.00
2010	23	24	29	29	26	21	25	24	23	22	28	30	25.33
2009	25	25	31	26	25	25	23	22	18	21	25	25	24.25
2008	23	27	26	27	27	27	24	25	19	20	22	25	24.33
2007	20	23	27	28	26	23	24	26	25	21	22	24	24.08
2006	21	26	29	30	25	22	23	21	21	20	24	21	23.58
2005	24	28	29	30	24	24	22	26	23	17	22	25	24.50
2004	21	29	27	27	26	21	23	24	22	20	20	22	23.50
2003	25	22	23	25	18	20	18	14	11	20	20	24	20.00
2002	23	20	21	23	23	20	21	20	16	20	24	22	21.08
Avg	23.45	25.36	28.27	28.27	25.00	23.64	23.09	23.36	20.45	20.45	23.73	24.64	24.14

Table 2 Monthly mean sunshine over the past 10 years at Seoul, Korea (Korea Meteorological Administration)

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Avg
2012	6.15	7.76	6.19	7.08	8.11	7.73	4.65	5.12	6.36	7.59	6.04	6.25	6.58
2011	7.05	5.95	7.75	6.74	5.82	5.69	2.59	3.03	6.01	6.95	4.32	6.31	5.68
2010	5.42	5.04	4.29	5.54	5.76	6.77	2.90	3.11	4.88	6.28	6.01	5.09	5.09
2009	6.79	4.49	6.54	6.82	7.75	6.03	3.74	4.87	6.72	7.62	4.34	4.71	5.87
2008	5.37	7.73	6.04	6.94	6.90	5.79	2.54	6.34	6.15	5.97	5.66	5.06	5.87
2007	5.87	6.13	4.75	6.39	6.36	5.84	2.95	3.41	2.84	5.51	6.28	4.54	5.07
2006	5.20	6.16	6.51	4.53	6.42	5.19	1.11	5.71	6.52	5.97	5.12	5.14	5.30
2005	6.18	6.35	7.16	6.65	7.59	4.61	2.56	3.33	3.79	6.45	5.75	6.58	5.58
2004	5.69	6.42	7.15	7.01	5.38	5.05	2.75	4.77	5.61	8.15	5.22	6.23	5.79
2003	2.98	3.39	3.36	4.19	5.51	3.39	2.79	2.68	3.35	6.31	3.80	5.81	3.96
2002	3.24	3.71	4.15	5.75	5.65	5.43	2.71	1.69	3.98	4.73	3.15	2.61	3.90
Avg	5.45	5.74	5.81	6.15	6.48	5.59	2.84	4.01	5.11	6.50	5.06	5.30	5.34

크리프 등으로 구성되어 있는 재료성능 단계이다. 4단계는 콘크리트 구조물의 안전성, 사용성, 환경성 등으로 구성된 포괄적 성능을 포함하고 있다. 마지막으로 5단계는 최종목표 단계인 사용수명과 비용으로 구성되어 있다.

3.2 실험조건

본 연구에서는 콘크리트 양생과정에서 큰 영향을 많이 미칠 것으로 판단되는 다양한 기후인자 중 풍속과 일조시간을 선정하여 다양한 조합으로 실험을 실시하였다. Table 1과 Table 2는 과거 10년 동안의 서울지역 풍속과 일조시간의 월 평균값들을 각각 나타낸 것이다.¹³⁾ 풍속의 경우 대부분 년, 월 평균값들이 2~3 m/s 사이에 있는 것을 알 수 있으며 일조시간의 경우 풍속과 마찬가지로 년, 월 평균값들이 대부분 비슷하다는 것을 알 수 있다. 하지만 7~8월의 경우 다른 월평균보다 현저하게 일조시간이 떨어지는 것을 확인 할 수 있으며, 그 이유는 일조시간이라는 것

Table 3 Climate change wind speed and sunshine combinations

Case	Wnd speed (m/s)	Sunshine (hr)	Case	Wind speed (m/s)	Sunshine (hr)
1	0	2	9	4	2
2	0	4	10	4	4
3	0	6	11	4	6
4	0	8	12	4	8
5	2	2	13	6	2
6	2	4	14	6	4
7	2	6	15	6	6
8	2	8	16	6	8

은 해가 떠서 지구표면에 비추어지는 시간을 말하는 것으로써 7~8월의 경우, 장마나 태풍의 영향으로 햇빛이 지표면을 비추는 실제 시간이 축소되는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이런 사항들을 고려하여 Table 3

Table 4 Mix proportion

Coarse Aggregate (mm)	Slump (mm)	Air (%)	w/c (%)	S/a (%)	Unit(kg/m ³)				f _{ck}
					w	c	s	g	MPa
25	120	5	55.0	42.0	183	333	677	1014	27

과 같이 풍속 값을 0, 2, 4, 6 m/s로 설정하였고, 일조시간 값은 2, 4, 6, 8 hrs로 설정하여 다양한 조합 조건으로 실험을 실시하였다.

3.3 배합조건 및 실험방법

본 연구에서 사용된 콘크리트 배합표는 Table 4와 같고 굵은 골재의 최대치수 25 mm, 잔골재율 42%, 물-시멘트 비 55%, 슬럼프 120±2 mm, 28일 목표설계강도를 27 MPa로 한 배합설계이다. 압축강도실험과 슬럼프실험을 위한 콘크리트 공시체 제작은 KS F 2403에 따라 100×200 mm의 원형 공시체로 제작하였다. 콘크리트 타설이 완료되면 Fig. 2와 같이 선풍기와 전등을 이용하여 양생을 실시하였다. 선풍기는 공업용 선풍기를 사용하였고, 장소는 밀폐된 실험실을 사용하였으며, 자연환경과 최대한 유사하게 조성하기 위하여 4방향 모두 선풍기를 설치하였다. 또한 풍속을 정확히 측정하기 위하여 양생과정에서 풍속 측정기를 이용하여 정확한 풍속 값을 측정하였다. 일조시간의 경우 전구 이외의 빛과 열에너지의 영향을 없애기 위해 밀폐된 암실을 사용하였으며, 삼파장 전구를 설치한 후 자동조절 타이머를 사용하여 2, 4, 6, 8 hrs으로 정확히 일조시간을 조절하였다.

다양한 풍속과 일조시간의 조합으로 양생된 공시체들은 배합후 3, 7, 28일에 할렬인장강도실험과 압축강도실험을 실시하였고 모든 풍속과 일조시간 양생 조합마다 3개의 공시체를 시험하였다. 압축강도실험과 할렬인장강도실험은 각각 KS F 2405와 KS F 2423에 의해 실시하였다.

또한, 본 연구의 풍속, 일조시간의 양생 결과값을 비교 분석하기 위하여 기건양생, 수중양생, 항온항습기를 이용한 표준양생 온도와 상대습도 조건(20°C-95%)으로 양생한 컨트롤 시편을 준비하여 압축·인장강도 실험을 실시하였다.



Fig. 2 Experimental method

4. 실험결과

Table 5는 풍속, 일조시간 그리고 수중, 기건, 표준양생 조건으로 양생한 시편들의 압축강도와 할렬인장강도 실험 결과 값을 정리한 표이며, Fig. 4는 Table 5의 결과값들을 그래프로 나타낸 것이다. Table 5의 압축강도의 변화량을 살펴보면 풍속 0 m/s를 제외한 나머지 풍속조건인 2, 4, 6 m/s에서 3일 강도의 경우 설계목표강도 27 MPa의 약 50%까지 발휘되는 것을 확인할 수 있다. 또한 7일 강도의 경우 설계기준강도의 70~80%까지 강도가 발휘되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 28일 강도의 경우 전체적으로 강도가 저하되는 것을 확인할 수 있다. 이와 반대로 풍속 0 m/s의 경우 3일, 7일 강도는 다른 풍속조건 보다 약 10%의 강도 향상이 있다는 것을 확인할 수 있고 28일 강도의 경우 다른 풍속조건과는 달리 대부분의 시편이 설계기준강도인 27 MPa를 만족하는 것을 확인할 수 있다. 또한 인장강도도 압축강도와 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

이러한 강도 저하 현상이 나타나는 이유는 콘크리트의 경우 수화반응이 일어나는 양생과정에서 지속된 풍속조건이 가해질 경우 Fig. 3과 같이 콘크리트 내부의 수분이 바람이 부는 방향으로 이동 및 증발하여 충분한 수화반응이 일어나지 못하여 시간이 지남에 따라 강도 저하가 발생하는 것으로 추정할 수 있다. 실제 건설 현장에도 이와 같은 양생조건이 가해질 경우 균열이 발생되어 품질 저하로 이어질 가능성이 높다. 이와 반대로 풍속 0 m/s에서 양생한 콘크리트 강도는 저하되지 않는 것을 확인할 수 있으며, 일조시간이 길어질수록 28일 강도가 높게 나오는 것을 알 수 있다.

배합성능의 검증 및 실험결과 값을 비교분석하기 위하여 항온항습기양생(표준양생), 수중양생, 기건양생 한 콘크리트의 경우에는 모든 시편에서 설계기준강도 27 MPa를 만족하는 것을 알 수 있다. 또한 다양한 양생조건 중 수중양생의 경우에 3, 7, 28일 강도가 가장 크게 나오는 것을 알 수 있으며, 기건양생의 경우 풍속 0 m/s에서의 양생 결과 값과 비슷하게 나오는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 콘크리트의 양생과정에서 수화반응이 일정하게 발

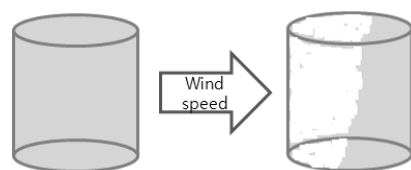
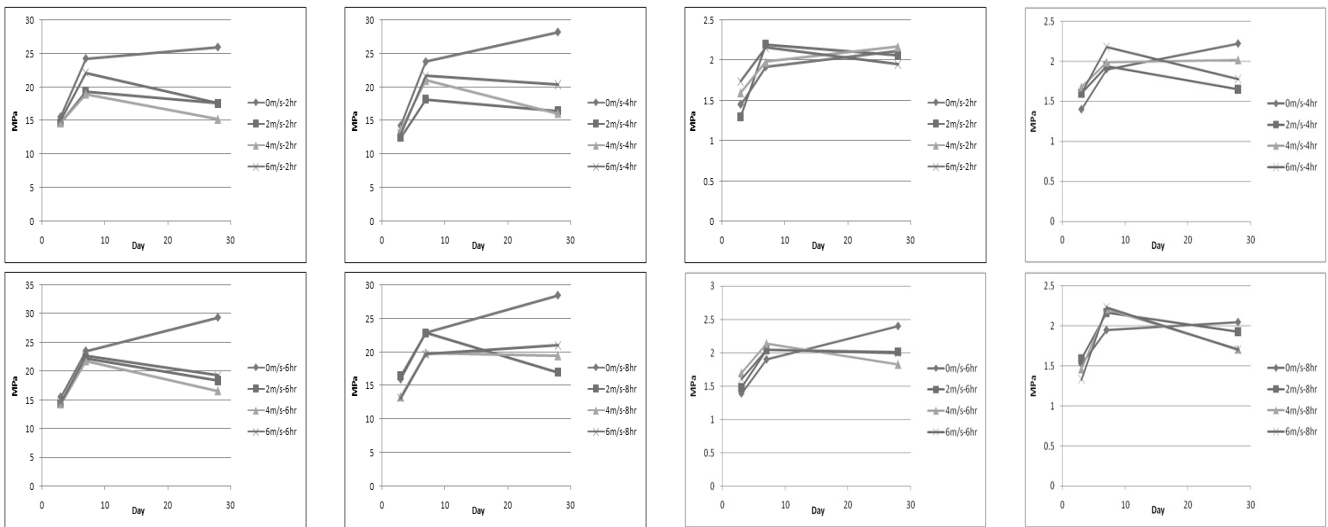


Fig. 3 Water movement in concrete specimen

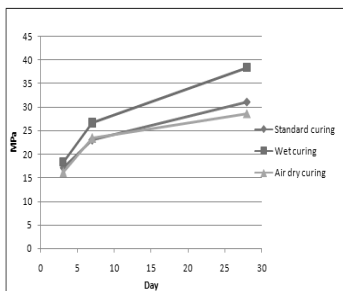
Table 5 Experimental results

Case	Wind Speed (m/s)	Sunshine (hrs)	Compressive strength (MPa)			Splitting tensile strength (MPa)		
			3days	7days	28days	3days	7days	28days
1	0	2	15.57	24.24	25.94	1.45	1.92	2.12
2	0	4	14.28	23.78	28.18	1.4	1.9	2.22
3	0	6	15.49	23.55	29.36	1.39	1.9	2.4
4	0	8	15.99	22.87	28.46	1.52	1.95	2.05
5	2	2	14.66	19.34	17.55	1.3	2.2	2.07
6	2	4	12.51	18.17	16.44	1.6	1.94	1.65
7	2	6	14.34	22.25	18.36	1.48	2.05	2.02
8	2	8	16.45	22.87	17	1.59	2.17	1.93
9	4	2	14.66	18.97	15.21	1.6	1.98	2.17
10	4	4	13.7	21.01	16.08	1.68	1.99	2.02
11	4	6	14.27	21.8	16.57	1.7	2.14	1.83
12	4	8	13.33	19.91	19.48	1.46	2.21	1.71
13	6	2	15.11	22.1	17.62	1.74	2.16	1.95
14	6	4	13.03	21.65	20.4	1.6	2.18	1.78
15	6	6	14.46	22.66	19.29	1.61	2.05	2
16	6	8	13.18	19.65	21	1.33	2.23	1.7
Standard curing(20°C-95%)			17.06	23	31.11	1.58	2.18	2.25
Wet curing			18.24	26.6	38.32	1.72	2.29	2.7
Air dry curing			16.13	23.36	28.61	1.36	1.84	2.2

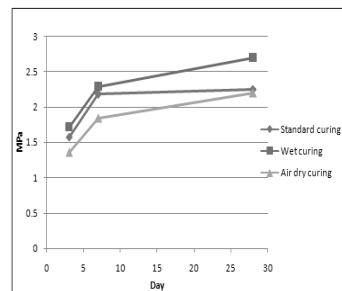


(a) Compressive strength sunshine with 2, 4, 6, 8 hrs

(b) Tensile strength sunshine with 2, 4, 6, 8 hrs



(c) Compressive strength of air dry, wet, standard curing



(d) Tensile strength of dry, wet, standard curing

Fig. 4 Compressive and tensile strengths versus wind speed and sunshine time

현될 수 있는 양생조건이 제공된 시편들에서 강도가 가장 크게 나온다는 것을 알 수 있다.

5. 만족도 곡선을 이용한 PBE

5.1 가상데이터 생성

만족도 곡선은 선택한 변수를 적용한 콘크리트의 성능이 목표성능을 만족하는 수준을 0.0%에서 100% (0~1의 만족비)로 표현하는 성능 만족 곡선이다. Bayesian 통계방

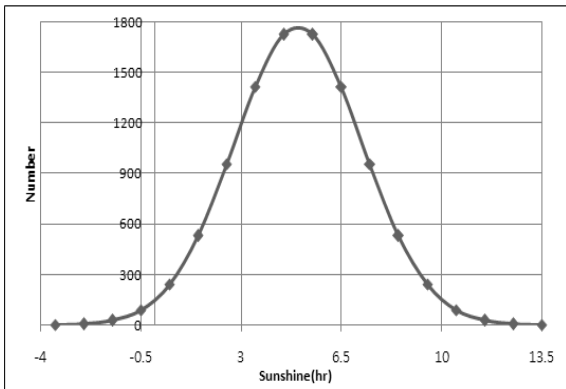


Fig. 5 Standard normal distribution of sunshine time

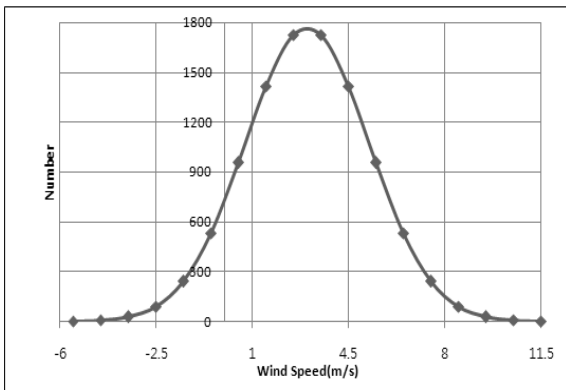


Fig. 6 Standard normal distribution of wind speed

Table 6 Virtual data points for Sunshine and wind speed parameter

Sunshine exposure time (hrs)	Data no.	Wind speed (m/s)	Data no.
-3.5	1	-5.5	1
-2.5	6	-4.5	6
-1.5	27	-3.5	27
...
4.5	1726	2.5	1726
...
...
12.5	6	10.5	6
13.5	1	11.5	1

법으로 만족도 곡선을 작성하기 위해서는 분석 가능한 데이터 량이 충분해야 한다. 그러나 일반적으로 만족도 곡선 작성하기 위한 데이터가 불충분하므로 이러한 한계를 극복하기 위하여 확보한 데이터를 바탕으로 정규분포곡선을 그리고 이 곡선으로부터 가상데이터를 도출해야 한다.

가상데이터를 도출하는 방법은 다음과 같다. 본 연구에서 사용한 일조시간 변수는 2, 4, 6, 8 (hrs)이며 이 값들의 평균과 표준편차는 각각 5와 2.236이다. 이 두 값을 이용해 정규분포곡선으로 일조시간곡선을 Fig. 5와 같이 그릴 수 있고 이 곡선에서 별개의 가상 데이터를 도출해 낼 수 있다.

정규분포곡선의 별개의 데이터 점이 일만 개라고 가정할 경우 일조시간에 대한 x축의 길이를 균일하게 1로 잡아주면 곡선의 높이는 곧 넓이가 된다. 예를 들어 일조시간 4.5에 대한 가상 데이터의 수를 알기 위해서 일조시간의 4부터 5까지의 곡선이 x축과 이루는 넓이(정규분포곡선의 x값이 4부터 5일 경우)를 계산한 값이 1418이라면 x축의 길이가 1이므로 그 높이는 결국 1418이 되고 이는 곧 가상 데이터의 수가 1418임을 의미한다. Fig. 6은 평균값 3과 표준편차 2.236을 이용하여 도출한 풍속 가상데이터 곡선이며, Table 6은 Figs. 5와 6의 정규분포 풍속과 일조시간 곡선에서 확보한 가상데이터 값 별로 데이터 개수를 적어 놓은 것이다.⁷⁾

5.2 압축강도 만족도 곡선 평가

풍속과 일조시간의 실험결과를 바탕으로 도출한 가상데이터의 성공과 실패 여부를 강도 만족 규정과 비교하여 각각 0과 1로 결정한 후 Bayesian 확률 프로그램에 입력하면 평균과 표준편차 값을 계산할 수 있고, 이를 사용하여 Figs. 7~18에 나타난 만족도 곡선을 작성 할 수 있다. 만족도 곡선은 로그 정규분포법을 사용하여 그려지는데 이에 필요한 값들은 표준편차, 평균값, 재료변수가 사용된다. Fig. 7~12는 설계기준강도 27 MPa의 3, 7, 28일 압축강도의 만족도 곡선이며 만족 규정으로는 각각 목표 강도의(40%, 70%, 100%), (50%, 80%, 100%), (55%, 85%,

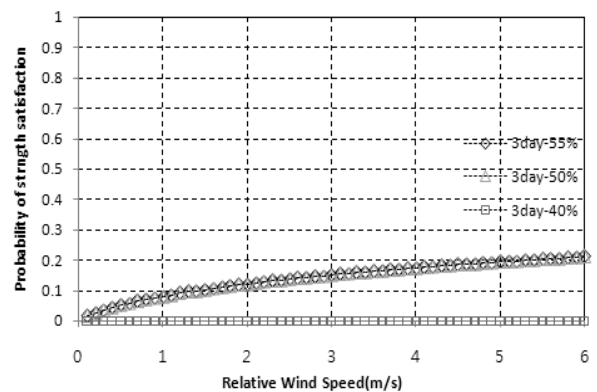


Fig. 7 Satisfaction curve of wind speed parameter for 3day compressive strength

105%)를 기준으로 적용하였다.

만족도 곡선을 평가하는 방법으로는 Fig. 9를 대상으로 할 경우 설계기준강도 50%의 강도 발현을 내기 위해서는 양생조건이 풍속이 1m/s 이상이 되어야 한다는 것을 알 수 있으며, Fig. 11에서는 7일(70%)조건에서 90% 이상의 강도 발현을 위해서는 일조시간이 3시간 이상이어야 한다는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 7~12의 결과를 살펴보면 풍속의 경우 28일 강도에 가장 영향을 많이 미치는 것을 확인 할 수 있으며, 일조시간은 7일 강도에 가장

크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

5.3 인장강도 만족도 곡선 평가

Fig. 13~18은 인장강도에 대한 만족도 곡선이며 압축강도와 동일한 로그정규분포법을 이용하여 작성하였다. 활렬 인장강도에서도 압축강도에서 사용한 목표 강도와 동일하게 3, 7, 28일 인장강도 만족도 곡선의 만족 규정으로는 각각 목표 강도의(40%, 70%, 100%), (50%, 80%, 100%),

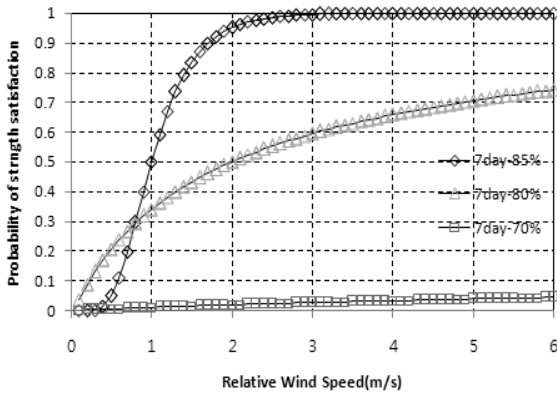


Fig. 8 Satisfaction curve of wind speed parameter for 7day compressive strength

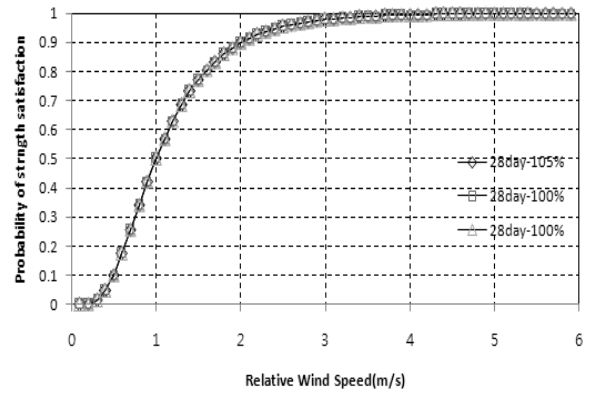


Fig. 9 Satisfaction curve of wind speed parameter for 28day compressive strength

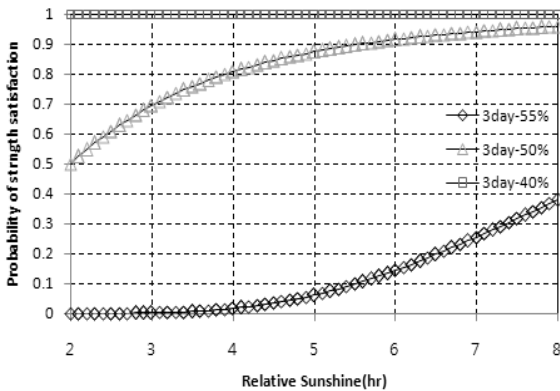


Fig. 10 Satisfaction curve of sunshine parameter for 3day compressive strength

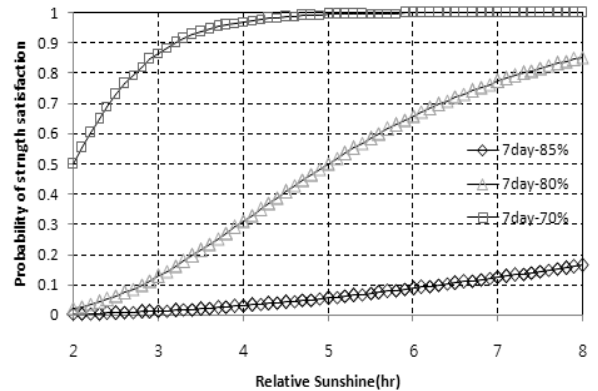


Fig. 11 Satisfaction curve of sunshine parameter for 7day compressive strength

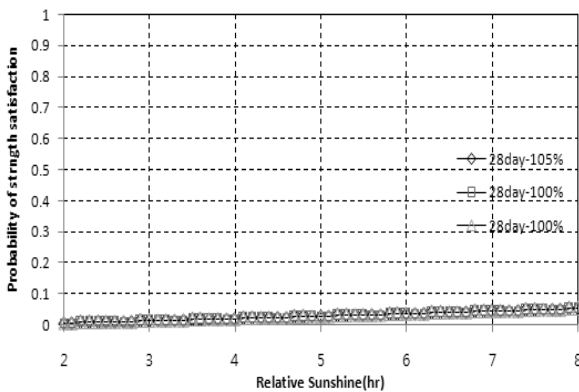


Fig. 12 Satisfaction curve of sunshine parameter for 28day compressive strength

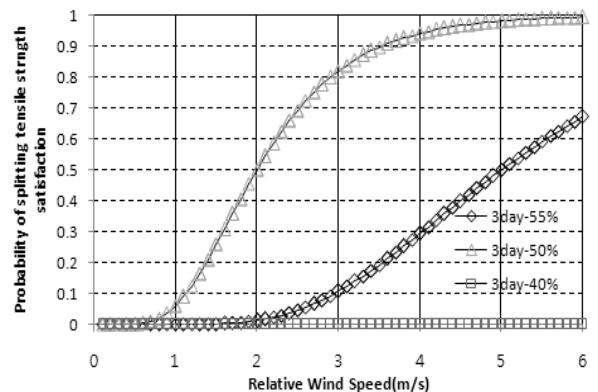


Fig. 13 Satisfaction curve of wind speed parameter for 3day splitting tensile strength

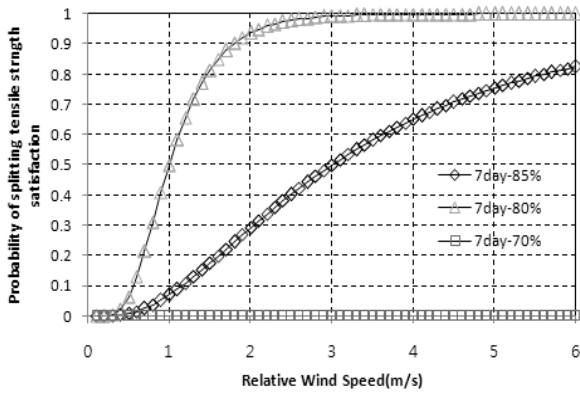


Fig. 14 Satisfaction curve of wind speed parameter for 7day splitting tensile strength

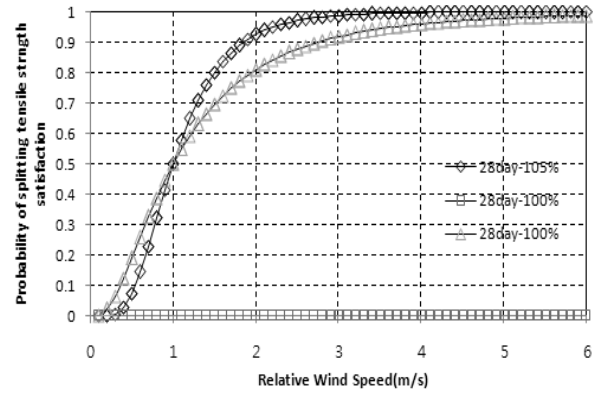


Fig. 15 Satisfaction curve of wind speed parameter for 28day splitting tensile strength

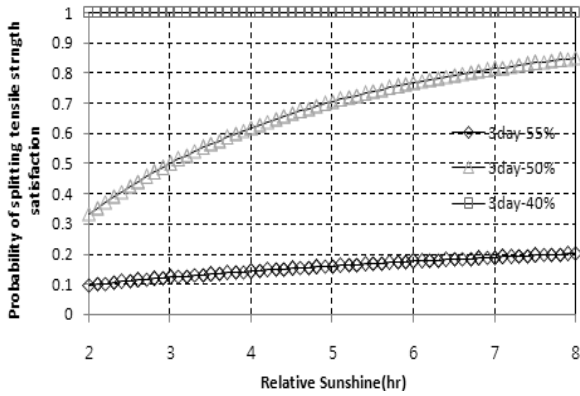


Fig. 16 Satisfaction curve of sunshine parameter for 3day splitting tensile strength

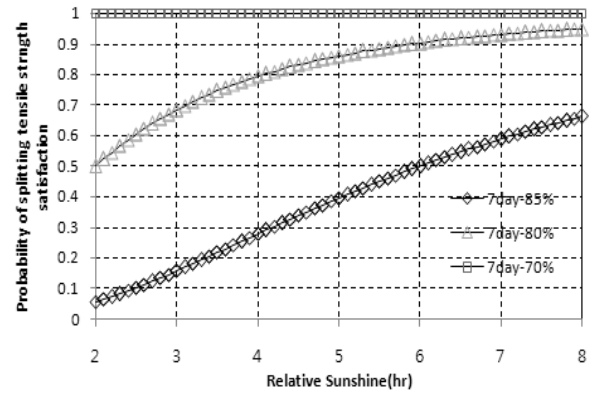


Fig. 17 Satisfaction curve of sunshine parameter for 7day splitting tensile strength

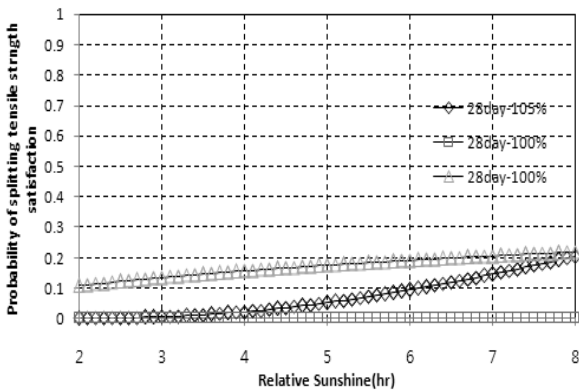


Fig. 18 Satisfaction curve of sunshine parameter for 28day splitting tensile strength

(55%, 85%, 105%)를 기준으로 사용하였다. 그 결과(40%, 70%, 100%)에 대한 만족도 곡선이 곡선 형태가 아닌 일직선 형태가 나오는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 실험결과값이 목표강도로 정한 값을 모두 만족하기 때문이다. 이와 반대로 설계자가 강도 목표를 조정하여(50%, 80%, 100%)와 (55%, 85%, 105%)로 만족도 곡선을 작성할 경우 곡선의 폭이 다양하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 만족도 곡선의 변경 현상은 성능 중심 위주의 특성을 나타내며, 지역과 국가에 따라 다르게 발생하는 극한 기후변화에 적합한 목표 값을 설정하여 콘크

리트 성능을 검토 할 수 있다. 그러므로 설계자가 다양한 요구목표를 설정 할 수 있으며 설정한 목표에 대한 성능 중심평가를 실시하여 건설현장에 적용 가능하다.

6. 결 론

본 연구에서는 다양한 기후인자 중 풍속과 일조시간을 콘크리트 양생조건으로 사용할 경우 재료특성에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 실험적으로 검토한 후 Bayesian 통계방법을 이용하여 성능 중심 평가(performance based evaluation : PBE)를 수행하여 다음과 같은 연구 결과를 도출하였다.

- 1) 압축강도의 경우 풍속 2, 4, 6 m/s의 양생조건에서 7일 강도까지는 강도 발현이 정상적으로 이루어지는 것을 확인 할 수 있으나 28일 강도는 저하되었다. 하지만 0 m/s의 조건에서는 28일 강도가 정상적으로 나오는 것을 확인 할 수 있다. 풍속 양생조건인 강도 발현의 경향은 풍속으로 인해 콘크리트가 양생과정에서 수분의 이동 및 증발로 강도 저하를 초래 한 것으로 판단된다.
- 2) 인장강도의 경우 압축강도의 1/9~1/13사이의 강도를 나타내며, 압축강도와 유사한 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있다.

- 3) 풍속, 일조시간 조건을 항온항습기양생(표준양생). 기건양생, 수중양생과 비교 한 결과 수화반응이 잘 일어난 표준양생과, 수중양생조건의 콘크리트 시편이 비교적 높은 강도를 보였다.
- 4) 강도 실험의 데이터를 바탕으로 만족도 곡선을 작성하기 위해서 다량의 가상 데이터를 도출하였으며, 가상데이터로 작성한 만족도 곡선을 살펴보면 풍속 및 일조시간의 변화에 대한 콘크리트의 양생조건은 콘크리트 압축강도와 인장강도에 큰 영향을 미쳤다.
- 5) 성능 중심 평가(PBE)의 경우 설계자의 목표와 기후 조건에 따라 다양한 상황에 적용 가능하다.
- 6) 본 연구에서는 한 가지의 콘크리트 배합으로만 성능을 검토하였으므로 정확한 데이터를 구축하기 위해서는 다양한 배합을 사용하여 추가 연구를 수행할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비 지원(11기술혁신F04)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사의 뜻을 전합니다.

References

1. Korea Environment Institute, "Concrete Specimen Subjected to Climate Change", KEI, 2009.
2. Kim, J.H.J., Yi, N.H., Phan, D.H., Kim, S.B., and Lee, K.W., "Development of Performance Based Resistance Capacity Evaluation Method for RC Compression Member under Vehicle Impact Load", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 4, 2010, pp. 535-546.
3. Kim, J.H.J., Phan, D.H., Lee, K.S., Yi, N.H., and Kim, S.B., "Development of PBD Method for Concrete Mix Proportion Design Using Bayesian Probabilistic Method", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 2, 2010, pp. 171-177.
4. Kim, T.K., Choi, S.J., Shim, H.B., Ahn, T.S., and Kim, J.H.J., "Satisfaction Curve Performance Based Design Method Evaluation of Concrete Specimen Subjected to Climate Change", *Proceedings Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 1, 2013, pp. 131-132.
5. Korean Concrete Institute (KCI), "Performance Based Design", *KCI Report*, 2005.
6. Jun, H.Y., Kim, T.K., Lee, S.W., and Kim, J.H.J., "Application of Performance Based Mixture Design (PBMD) for Self Compacting Concrete", *Proceedings Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 1, 2011, pp. 571-572.
7. Kim, J.H., Phan, D.H., Oh, I.S., and Lee, K.S., "Development of Performance Based Mix Design Method Using Single Parameter Bayesian Method", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 4, 2010, pp. 499-510.
8. Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H., Uzawa, T., and Ueda, T., "Statistical Analysis of Fragility Curves, Department of Civil and Environmental Engineering University of Southern California", Los Angeles, California, 2001, pp. 143.
9. Singhal, A. and Kiremidjian, A.S., "A Method for Earthquake Motion Damage Relationships with Application to Reinforced Concrete Frame", Report No. 119, 1996, pp. 186.
10. Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J.H., and Naganuma, T., "Statistical Analysis of Fragility Curves", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, No. 12, 2000, pp. 1224-1231.
11. Ang, A.H. S-S. and Tang, W.H., "Probability Concepts in Engineering Wiley & Hoboken", 2006, pp. 409.
12. Box, G.E.P. and Tiao, G.C., "Bayesian Inference in Statistical Analysis, Addison Wesley, Reading, Mass", 1992, pp. 608.
13. Korea Meteorological Administration. "Annual Climatological Report". 2002~2012.

요 약 현재 전 세계적으로 지구온난화로 인하여 폭염, 폭설, 폭우 및 슈퍼태풍 등과 같은 이상 기후 및 극한 기후현상이 지속적으로 증가 하고 있다. 또한 심각한 자연재해로 콘크리트 구조물 및 사회기반시설의 심각한 손상과 노후화가 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 현재 국내외적으로 다양한 기후변화에 적합한 시공기술 및 기준에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 콘크리트 배합에 다양한 풍속과 일조시간의 양생조건에 대한 강도 발현 효과를 평가하고자 한다. 다양한 풍속과 일조시간 조건에서 양생한 실험체에 압축강도와 할렬인장강도 실험을 하였고, 성능 중심 평가(performance based evaluation (PBE))를 수행하여 콘크리트의 다양한 양생조건에 대한 만족도 확률을 평가하였다. 또한 콘크리트의 성능 중심 평가로부터 얻는 결과 값을 바탕으로 콘크리트 배합과 양생조건에 대한 문제점들을 파악·해결하고 대응책을 마련하고자 한다.

핵심용어 : 기후변화, 베이지안 확률방법, 만족도 곡선, 성능 중심 평가