

풍속과 일조시간에 따른 콘크리트의 강도 및 동결융해 저항성 성능중심평가

김태균¹, 최승재², 최지훈³, 김장호^{4*}

Performance Based Evaluation of Concrete Strength and Freeze-Thaw Resistance from Wind Speed - Sunlight Exposure Time Effect

Tae-Kyun Kim¹, Seung-Jai Choi², Ji-Hun Choi³, Jang-Ho Jay Kim^{4*}

Abstract: The phenomena that we experience in everyday life such as snow, rain, wind, and temperature are referred to as weather, and the average state of atmospheric phenomena that occur over a long period of time in a specific region is referred to as climate. In addition, significant variation of climate compared to the average state is referred to as climate change. Concrete structures can have various problems when exposed to elements. Among the problems, the freeze-thaw problem due to extreme climatic factors such as heavy rain and snowfall has become a particularly significant issue recently. The concrete that has been subjected to repeated freeze-thaw rather than too high or low temperature shows serious degradation of durability, and the performance of structures with degraded performance is difficult to recover. Therefore, in this study, concrete durability performance with respect to freeze-thaw from curing conditions change due to wind speed and sunshine exposure time. Concrete freeze-thaw experiment are performed. using wind speed and sunlight exposure time. Also, performance based evaluation through the satisfaction curve based on the freeze-thaw test results are performed.

Keywords: Climate change, Concrete freeze-thaw, Satisfaction curve, Performance based evaluation

1. 서 론

일상적으로 우리가 매일 경험하는 눈, 비, 바람, 기온과 같은 현상을 날씨라고 하며, 일정한 지역에서 장기간에 걸쳐 나타나는 대기현상의 평균적인 상태를 기후라고 한다. 또한 기후가 평균적 상태에 비해 유의미하게 변동하는 것을 기후변화라고 한다. 현재 전 세계적으로 기온은 서서히 올라가고 있다. 기후변화는 온도가 올라가는 단순한 현상뿐 아니라 온도가 극심한 저온으로 떨어지는 이상 기상현상까지 총칭하고 자연적인 현상과 인위적인 현상으로 인하여 다른 기후계로 변화는 현상을 의미한다.

1970년대 환경과피에 대한 경각심이 제기되기 시작했다면 80년대는 이상기후변화로 인한 자연재해가 세계각지에서 일어나면서 극한기후변화에 대한 국제적 논쟁이 활발히 진행되

었다. 이로 인하여 범지구적 차원에서 극한기후변화에 대응하기 위한 대응책이 확산되면서 1992년 기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)이 채택되었고, 1997년에는 기후변화협약의 구체적 실시방법을 합의한 교토의정서(Kyoto Protocol)가 채택되었다. 2014년에는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 제 5차 보고서가 발표되었다(Pachauri et al., 2014). 이에 따르면 다양한 오염물질에 의해 환경 문제가 심각해지면서 더 극심한 기후변화를 겪을 수 있음을 예고하고 있다. 또한 21세기는 20세기 보다 기후변화가 더 빠르게 진행될 수 있다고 경고하였다. Fig. 1은 전 세계적으로 극심한 기후변화로 인해 나타나는 이상기후 발생 분포와 피해를 나타낸 그림이다. 이와 같이 급격한 기후변화의 경우 생태계, 농사, 산업과 같은 다양한 인간사회에 영향을 미칠 것이며 매우 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다. 이와 관련하여 건설 현장에서도 콘크리트 구조물의 경우 양생과정에서 상당히 기후변화와 밀접한 관련이 있다.

콘크리트 구조물의 경우 외부 극한기후환경에 노출 될 경우 다양한 문제점들이 발생할 수 있다. 이러한 문제들 중 최근 가장 문제가 되고 있는 폭우, 폭설과 같은 극한기후요소의 작용으로 동결융해 현상이 발생한다. 콘크리트의 경우 온도가

¹정회원, 연세대학교 토목환경공학과 박사

²정회원, 연세대학교 토목환경공학과 석박사통합과정

³정회원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정

⁴정회원, 연세대학교 토목환경공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: jjhkim@yonsei.ac.kr

School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, South Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

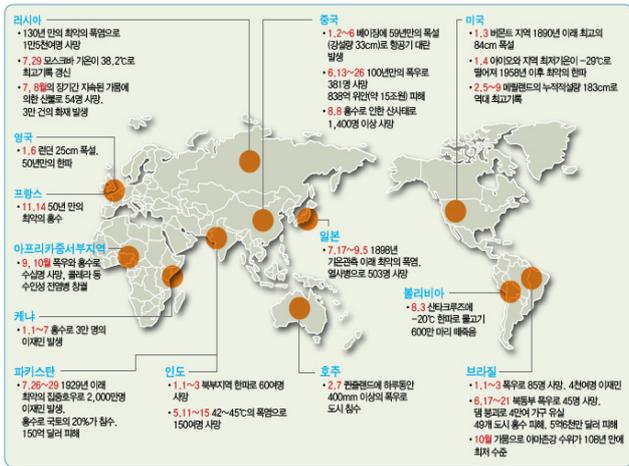


Fig. 1 Damage of Climate Change

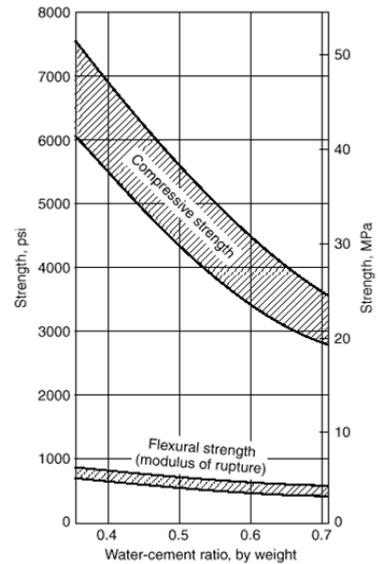


Fig. 2 Effect of w/c on 28-day Strength (Troxell et al., 2010)

너무 낮거나 높다고 손상이 발생하는 것이 아니라 동결·융해를 반복적으로 받을 경우 심각한 내구성 저하를 나타내게 되며 실제 성능저하가 된 구조물은 회복하기 힘들게 된다(Lee et al., 2008; Lee et al., 1998).

콘크리트 구조물이 동결융해 작용을 받게 되면 콘크리트 외부에서 내부로 수분이 동결과 융해를 반복하면서 부피가 팽창하게 되고 이로 인하여 미세한 공극이 발생하게 된다. 이런 주기가 반복적으로 발생하게 되면 수분이 결국 철근의 위치까지 도달하게 되고 철근의 부식을 초래하게 된다. 동결융해가 심할 경우 표면에 박리현상이 발생되어 구조물로서의 성능을 발휘하기 힘들게 된다. 따라서 본 연구에서는 극심한 기후변화로 발생 되는 다양한 기후인자 요소 중 풍속·일조시간을 적용하여 콘크리트를 양생 시킨 후 동결융해 실험을 수행하여 상대동탄성계수를 측정하고 이를 바탕으로 성능중심 평가(Performance Based Evaluation (PBE))를 실시하고자 한다(Kim et al., 2010; Kim et al., 2010; Kim et al., 2013; KCI, 2005; Jun et al., 2011).

2. 콘크리트 양생의 중요성

경화된 콘크리트의 성질 중에서 가장 중요한 것은 압축강도이다. 압축강도는 콘크리트 품질의 기본 척도이며 일반적으로 콘크리트의 강도라고 하면 압축강도를 말한다. 콘크리트 압축강도는 물-시멘트비에 의해 결정된다. Fig. 2는 물-시멘트비가 콘크리트 압축강도에 결정적인 영향을 미친다는 것을 잘 보여주고 있다. 그러나 콘크리트 활렬인장강도의 경우 물-시멘트비의 영향은 압축강도보다 영향이 훨씬 작다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 활렬인장강도는 굵은 골재와 모

르타르 사이의 부착강도에 의해 크게 좌우되기 때문이다(Jang et al., 1993; Kim et al., 1998).

또한 굵은 골재와 모르타르 사이의 부착강도는 물-시멘트비의 영향을 비교적 적게 받는다는 것이 실험결과로 알려져 있다(Troxell et al., 2010). 콘크리트 강도의 경우 타설 후 단기간에 빠르게 강도가 발현된다. 보통의 구조물의 설계는 일반적으로 재령 28일의 압축강도를 기준으로 하며 1주일 재령 동안에 28일 강도의 70%의 강도 발현이 이루어진다(Koh et al., 2005).

콘크리트의 최종 강도는 초기재령에서의 양생조건, 즉 온도와 습도의 조건에 의해 가장 크게 좌우된다. 콘크리트 초기 양생시 수분 손실이 발생 할 경우 30% 이상의 강도저하 현상을 초래한다. 또한 콘크리트는 타설 후 초기 재령시 저온에 방치 할 경우 강도저하현상이 나타나며 그 이후 아무리 장기간에 걸쳐 습도를 유지시켜 주더라도 저하된 강도는 쉽게 회복되지 않는다(Troxell et al., 2010; Park et al., 2009).

콘크리트는 양생시 이러한 문제점을 막기 위해서 적어도 초기 7일 재령동안은 수분을 잃지 않도록 콘크리트를 유지시켜야 하고, 특히 건설 현장에서의 경우 초기 동해를 입지 않도록 14일 이상 양생을 잘 유지시켜야 한다.

따라서 본 연구에서는 온도-습도 다음으로 콘크리트 양생에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 풍속·일조시간의 양생조건을 선정하여 양생 일조시간-온도변화와 양생 풍속-습도 변화를 통하여 콘크리트 시편의 강도 측정을 실시하고 이를 바탕으로 콘크리트의 다양한 내구성 평가방법중 하나인 동결융해 시험을 실시하였다.

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 Sunlight Exposure Time 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

Table 3 Climate Change Wind Speed and Sunlight Exposure Time Combinations

Case	Wind 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
Control specimens					
Thermo - hydrostatic curing				20°C	95%
Water curing				20°C	100%
Air dry curing				20°C	60%

3. 양생조건 및 배합

Table 1, 2의 경우 대한민국 서울지역의 과거 10년 동안의 풍속-일조시간에 대한 년, 월 평균값을 나타낸 것이며 이를 바탕으로 Table 3의 풍속-일조시간 양생조건을 선정하였다(KMA, Korea Meteorological Administration). Table 3과 같이 풍속, 일조시간을 선정한 방법으로는 풍속의 경우 월평균 약 2.2 m/s 값을 고려하여 0, 2, 4, 6 m/s로 설정하였으며 일조시간의 경우 월평균 약 5.7시간을 나타냄으로써 양생조건을 2, 4, 6, 8 hr을 설정하였다. 그리고 풍속과 일조시간의 양생방법의 경우 공업용 대형 선풍기와 삼과장 전구를 통하여 4방향에서 직접적으로 시험체에 영향을 미치도록 배치하였고 외부적으로 다른 영향을 없애기 위하여 실내 실험을 진행하였다.

그리고 실험실 내부 조건의 경우 온도(20°C), 습도(60%)로

Table 4 Mix Proportion

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

Table 5 Strength Results

Case	Wind speed (m/s)	Sunlight exposure time (hrs)	Compressive strength (MPa)			Splitting tensile strength (MPa)		
			3 days	7 days	28 days	3 days	7 days	28 days
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
Thermo - hydrostatic curing			17.06	23	31.11	1.58	2.18	2.25
Water 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

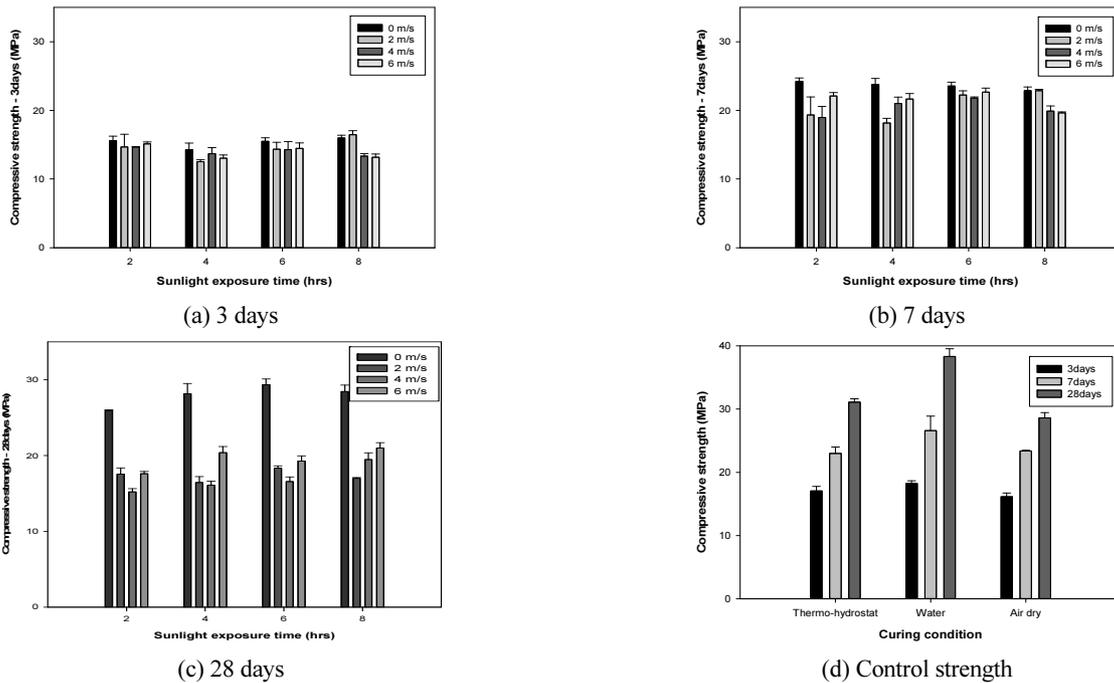


Fig. 3 Compressive strength

설정하였다. 또한 배합의 검증을 위하여 컨트롤 시편으로 항온항습, 수중, 기건 양생조건도 비교 실험을 실시하였다.

Table 4의 경우 콘크리트 배합 표로써 설계기준 강도는 27 MPa, w/c는 55%, 굵은골재는 25 mm, 슬럼프는 12 cm로 선정하였으며 각각의 시편의 경우 각 케이스별 3개의 공시체를 준비하였다.

4. 강도실험결과

Table 5와 Fig. 3은 풍속-일조시간에 대한 결과를 정리한 것이다. 컨트롤 시편의 항온항습양생, 수중양생, 기건양생 모두 28일 강도측정 결과 설계기준 강도 27 MPa 강도를 넘어서는 것을 확인 할 수 있다. 또한 풍속 0 m/s 역시 설계기준 강도 27 MPa를 만족한다. 그러나 이와 반대로 풍속 2, 4, 6 m/s의 경우 초기 7일 강도까지는 강도가 대부분 정상 발현이 되나 28일 강도 모두 설계기준 강도 27 MPa보다 약 40%로 정도 강도 저하 현상이 발생 하는 것을 알 수 있다. 이러한 원인으로는 양생과정에서 풍속-일조시간에 의해 콘크리트 내부의 수분이 빠르게 증발하여 제대로 된 수화반응이 일어나지 못하여 내부 공극이 발생하게 되고 이로 인하여 강도 저하 현상이 발생하게 된다.

5. 콘크리트 동결융해

5.1 동결융해 실험방법

본 연구에서 동결융해 실험의 경우 다음과 같이 진행하였다. 풍속-일조시간 양생을 28일간 실시한 후 Fig. 4의 동결융해 챔버를 이용하여 300 cycle까지의 실험을 진행하였다.

동결융해 시험 방법으로 KS F 2456 급속 동결 융해에 대한 콘크리트 저항 시험방법에 따라 실험을 진행 하였다. 동결 융해의 경우 1사이클은 공시체 중심부의 온도를 원칙으로 하며 원칙적으로는 4°C에서 -18°C로 떨어지고, 다음에 -18°C에서 4°C로 상승되는 것으로 한다.

각 사이클에서 공시체 중심부의 최고 및 최저온도는 $4 \pm 2^\circ\text{C}$ 와 $-18 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 범위 내에 있어야 하고, 공시체의 온도가 -20°C 이하 또는 6°C 이상이 되어서는 안 되며 동결 융해 1사이클의 소요 시간은 2시간 이상 4시간 이하로 한다.

상대동탄성 계수 측정장치는 KS F 2437의 규정에 따른다. 일반적으로 동결융해 시험의 종료는 300사이클로 하며 시험 종료전까지 상대 동 탄성 계수가 60% 이하가 되는 사이클이 있으면 시험을 종료한다. 본 연구에서는 0, 100, 200, 300사이클의 상대동탄성계수를 측정하였다. 또한 시험체 측정시 주의하여야 할 사항으로는 동결융해 시험시 저온에 있을 때 시

Table 6 Relative Dynamic Elastic Modulus Results

CASE	Wind speed (m/s)	Sunlight exposure time (hr)	Relative dynamic elastic modulus (%)			
			0 cycle (%)	100 cycle (%)	200 cycle (%)	300 cycle (%)
1	0	2	100	95.75	94.75	94.74
2	0	4	100	95.23	93.65	93.50
3	0	6	100	94.49	93.59	92.93
4	0	8	100	90.25	89.98	84.86
5	2	2	100	90.74	88.88	80.67
6	2	4	100	89.06	85.51	76.28
7	2	6	100	90.60	86.79	75.19
8	2	8	100	91.64	83.24	72.47
9	4	2	100	90.48	87.76	74.62
10	4	4	100	88.59	81.99	72.01
11	4	6	100	89.32	76.99	71.99
12	4	8	100	87.91	76.52	70.44
13	6	2	100	89.10	79.36	71.16
14	6	4	100	86.63	76.12	71.39
15	6	6	100	88.00	74.47	69.99
16	6	8	100	85.13	75.02	69.63
17	Thermo-hydrostatic curing		100	99.82	99.02	98.13
18	Water curing		100	98.39	97.64	97.63
19	Air dry curing		100	97.97	97.28	95.72



Fig. 4 Freeze-Thaw Chamber

협체를 외부로 노출 시킬 경우 극심한 온도차에 의해 시편에 균열이 가는 것을 조심하여야 한다.

5.2 상대동탄성계수 측정방법

동결융해 상대 동 탄성 계수의 경우 KS F 2456을 바탕으로 도출하였으며 상대동탄성계수 도출 식의 경우 식 (1)을 통하여 나타낸다(KS : Korea Standards Association).

$$P_c = \left(\frac{n_c}{n_o}\right)^2 \times 100y \quad (1)$$

여기서, P_c 는 동결 융해 C사이클 후의 상대 동 탄성 계수(%), n_o 는 동결 융해 0사이클에서의 변형 진동의 1차 공명 진동수(Hz), n_c 는 동결 융해 C사이클 후의 변형 진동의 1차 공명 진동수(Hz)를 나타낸다.

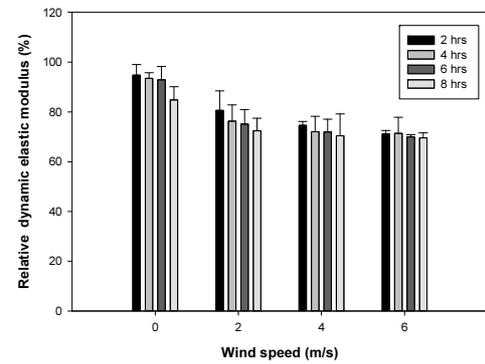
또한, 내구성 지수를 구하는 방법은 다음 식 (2)와 같다.

$$DF = \frac{PN}{M} \quad (2)$$

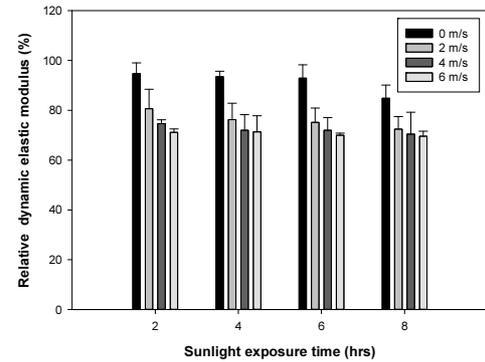
여기서, DF 는 시험용 공시체의 내구성 지수, P 는 N 사이클에서의 상대 동 탄성계수(%), N 은 상대 동 탄성 계수가 60%가 되는 사이클 수 또는 동결 융해의 노출이 끝나게 되는 순간의 사이클 수, 마지막으로 M 은 동결 융해에의 노출이 끝날 때의 사이클 수를 나타낸다.

5.3 동결융해 상대동탄성계수 결과

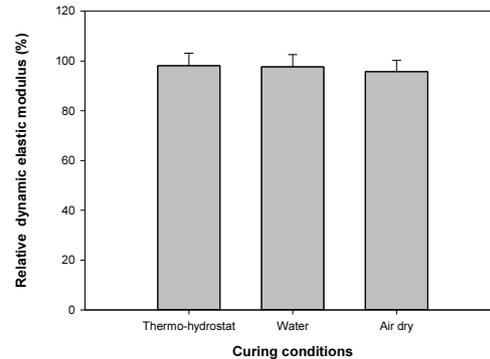
본 연구에서는 상대동탄성계수가 60%이하가 되는 조건은 없으므로 300 cycle일 때의 상대동탄성계수가 곧 내구성 지수가 된다. 내구성 지수가 높을수록 구조물 성능이 우수하다. Table 6과 Fig. 5를 보면 300 cycle의 경우 풍속이 0 m/s, 2 m/s 일 때 일조시간이 작을수록 내구성 지수가 상당히 우수하다는 것을 알 수 있으며 0 m/s 일 때 10%, 2 m/s 일 때 약 20~25% 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 풍속이 4 m/s를 넘어



(a) Wind speed with 2, 4, 6, 8 m/s



(b) Sunlight exposure time with 2, 4, 6, 8 hrs



(c) Relative dynamic elastic modulus of thermo-hydrostatic, water, air dry curing

Fig. 5 Relative dynamic elastic modulus

가면 내구성 지수가 약 30% 급격하게 낮아지는 것을 알 수 있다. 내구성 지수가 낮다는 것은 상대동탄성계수가 낮아졌다는 것이다. 실제 이런 경우를 살펴보면 동결융해 후 콘크리트 공시체의 결면이 미세균열이 가는 것을 확인 할 수 있다. 실제 동해를 받은 콘크리트의 표면은 스케일링, 균열, 팝아웃과 같은 다양한 형태의 열화 현상이 일어나는 것을 알 수 있다. 초기 상대동탄성계수의 경우 풍속 4 m/s를 초과할 시 풍속 0 m/s 보다 약 15%정도 급격히 저하되는 것을 확인 할 수 있다. 또한 컨트롤 시편 수중, 항온항습챔버, 기건양생과 비교한 결과 기건양생조건(95%)이 항온항습챔버(98%)와 수중양생(97%)조

건 보다 미세하게 상대동탄성계수가 낮게 나오는 것을 알 수 있다. 이와 같이 양생과정에서 수분이 꾸준히 공급된 양생 조건일수록 내구성 지수가 높게 나오는 것을 알 수 있다. 그러나 풍속 - 일조시간 양생과정에서 수분의 증발과 이동현상으로 잘못된 수화반응에 의해 내부 공극과 미세균열이 발생하고 이로 인한 강도 저하 현상이 발생한다. 또한 동결융해시 이러한 공극과 미세균열로 수분 침투가 용이하고 응결과 팽창작용에 의해 콘크리트 내구성 저하현상이 발생 할 수 있다.

6. 성능중심평가(PBE)

성능중심평가(Performance Based Evaluation : PBE)의 경우 기존 과거의 평가방법, 신규 해석법, 실험 결과 및 경험 등을 결합해, 구조물에 요구되는 재료 성능을 만족하는 성능 기반형 평가방법이다. 그리고 PBE의 경우 다양한 해결책을 제시할 수 있을 뿐만 아니라 경제성과 기능성면에서도 최대한의 효과를 이끌어 낼 수 있는 방법이며 평가과정에서 발주자의 요구사항을 우선적으로 고려하기 때문에 발주자와 사용자의 만족도가 높은 평가 방법이라 할 수 있다. 또한 사용기간 동안 재료와 구조물의 요구조건을 만족시키는 것을 목적으로 하고 있으므로 구조물의 중요성과 요구 성능에 맞추어 평가, 시공, 유지할 수 있는 방법이라고 할 수 있다.

또한 PBE의 경우 만족도 곡선을 바탕으로 평가하는 방법으로써 다양한 변수에 대하여 실패/성공의 여부를 Bayesian 확률론적 통계 방법을 이용하여 결정한다(Kim et al., 2010; Shinozuka et al., 2001(a); Singhal et al., 1996; Shinozuka et al., 2001(b); Ang et al., 2006; Box et al., 1992). 또한 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 생성하고 만족도 곡선을 작성하는 방법은 다음과 같은 식을 이용하여 작성할 수 있다(Kim et al., 2011; Kim et al., 2015; Phan et al., 1996).

Shinozuka와 Singhal에 의해 개발된 Fragility 방법은 만족도 곡선과 유사한 형태를 나타낸다. Fragility 곡선을 교량이나 구조물의 취약성을 확률론적으로 평가하는 데 사용되며, 지반 진동 강도에 대해 구조물붕괴와 같은 한계목표에 대한 초과 특성을 정규분포함수곡선으로 조건부 확률을 나타내며, 평균값과 로그 표준편차 값을 식 (3)에서 나타내는 Maximum Likelihood 식을 통하여 추산한다(Shinozuka et al., 2001(a);

Singhal et al., 1996; Shinozuka et al., 2001(b)).

$$L = \prod_{i=1}^N [F(a_i)]^{x_i} [1 - F(a_i)]^{1-x_i} \quad (3)$$

여기서, F(.)는 특정 손상단계의 Fragility 곡선을 의미하고, ai는 교량 i를 대상으로 한 최대 지반 진동 가속도(Peak Ground Acceleration : PGA)값이며, xi 는 ai 와 같은 PGA값 이하의 교량 손상에 따라 0 혹은 1로 결정된다. N은 지진 후 조사된 총 교량의 수로 정한다. 통용되는 로그정규분포의 가정 하에서는 F(a)를 식 (4)와 같은 형태로 취한다.

$$F(a) = \Phi \left[\frac{\ln \left(\frac{a}{c} \right)}{\zeta} \right] \quad (4)$$

여기서, a는 PGA를, $\Phi[.]$ 는 표준화된 정규분포함수를 나타낸다. 식 (4)에서 c와 ζ 는 식 (5)으로 나타낸 lnL를 최대화하기 위해 계산된 값이다.

$$\frac{d \ln L}{dc} = \frac{d \ln L}{d\zeta} = 0 \quad (5)$$

6.1 동결융해 상대동탄성계수의 만족도 곡선

Fig. 6-7의 경우 풍속과 일조시간에 따른 동결융해 상대동탄성계수를 만족도 곡선으로 나타낸 그림이며, 콘크리트 동해의 내구성 평가를 위해서는 식 (6)을 이용하여 실시한다.

콘크리트 구조물의 내동해성은 콘크리트 품질 외에 구조물이 위치하고 있는 지역의 최소온도, 동결융해 횟수, 수분의 포화정도 등 다양한 인자의 영향을 받는다. 상대동탄성계수의 경우 요구되어지는 조건은 미관이나, 구조물의 내구성능 등 다양한 환경과 조건에 따라 달라진다. 동해의 내구성 평가식 식 (6)의 경우

$$\gamma_p F_d \leq \varnothing_k F_{lim} \quad (6)$$

γ_p 는 동해에 대한 환경계수로서 일반적으로 1.0, \varnothing_k 는 동해에 대한 내구성감소계수, 구조물의 종류와 위치에 따라 계수를 정할 수 있다. 본 연구에서는 일반 구조물 보통부위로 설정하여 1.0으로 설정하였으며, F_d 는 상대동탄성계수의 예측값의 역수 식 (7)를 나타내며

$$F_d = \frac{1}{E_d} \quad (7)$$

E_d 는 상대동탄성계수의 예측값(%), F_{lim} 은 상대동탄성계수의 최소값의 역수 식 (8)를 나타내며

$$F_{lim} = \frac{1}{E_{min}} \quad (8)$$

E_{min} 는 동결융해작용에 대하여 소요 성능을 만족하기 위한 상대동탄성계수의 최소 한계값(%)으로서 본 연구에서는 기상작용이 심하고 동결융해가 자주 반복되는 단면의 보통의 경우로써 70%를 선택하였다.

따라서 본 연구에서는 내구성 평가를 위한 상대동탄성계수의 예측값으로 70%가 나오는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 요구 만족규정을 70%로 설정하였고 다양한 만족확률을 비교 분석하기 위하여 상대동탄성계수를 75, 80%을 추가하였다. 그리고 추후 연구에서는 콘크리트 성능중심평가식에 사용되는 다양한 인자들의 가중치 검증이 요구될 것으로 사료되어진다.

Fig. 6~7의 그래프는 상대동탄성계수를 나타낸 만족도 곡

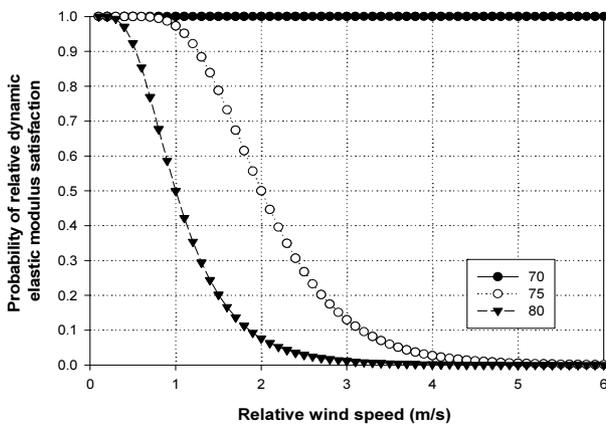


Fig. 6 Wind speed Satisfaction Curve of combine relative dynamic elastic modulus (70, 75, 80)

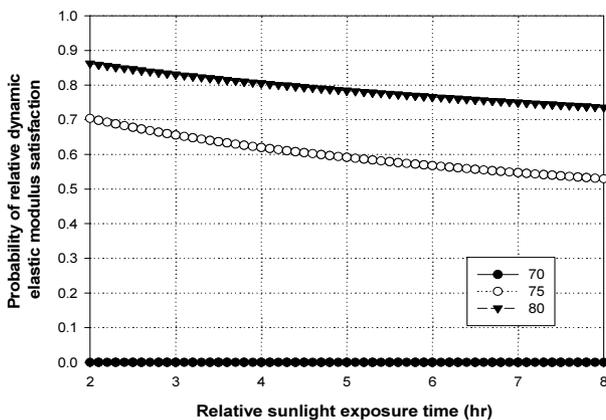


Fig. 7 Sunlight exposure time Satisfaction Curve of combine relative dynamic elastic modulus (70, 75, 80)

선으로써 만족규정의 경우 콘크리트 내구성 평가식에 의해 기준값(70, 75, 80)으로 적용하였다. 만족도 곡선의 경우 y 축은 성공과 실패의 확률을 0~1로 표현하였으며, x축의 경우 콘크리트 양생범위로 나타내었다. 본 연구에서 수행되어진 콘크리트 동결융해 시험의 경우 최종 300cycle 일 때 내구성 지수(상대동탄성계수)는 양생조건에 따라 최대 94.74%~최저 69.63%까지 나누어진다. 또한 실험결과에 따라 만족규정기준에 의해 성공과 실패로 분류되며 만족도 곡선을 평가하는 방법으로는 다음과 같다. Fig. 6의 경우 설계자의 요구만족 확률인 75, 80의 상대동탄성계수에 대해 50%의 풍속조건을 만족시키기 위해서는 각각 최소 2 m/s, 1 m/s의 양생조건이 충족 되어야 내구성 지수를 만족할 수 있다.

Fig. 7의 경우 설계자의 요구만족 기준 75, 80에 대하여 60%, 80%를 만족시키기 위해서는 5시간의 양생조건이 필요하다. 그리고 풍속과 일조시간의 그래프 폭을 비교한 결과 풍속의 만족도 곡선이 더욱 기울기가 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 풍속이 일조시간보다 콘크리트 양생에 더 많은 영향을 미쳤다는 것을 판단 할 수 있다.

실험결과와 유사하게 만족도 곡선의 경우 풍속과 일조시간 양생이 적을수록 만족확률이 크고 풍속과 일조시간이 클수록 그래프의 기울기가 감소하는 것을 확인 할 수 있으며 그래프가 감소하는 것은 만족확률이 실패에 가깝다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로 풍속과 일조시간이 클수록 콘크리트 내구성 능 저하 현상이 크게 발생 할 수 있다는 것을 확인 할 수 있다.

특히, 풍속의 경우 2 m/s 이상인 경우 급격하게 만족확률이 감소하는 것을 확인 할 수 있으나 일조시간은 풍속과 달리 완만한 감소율을 나타내는 것을 알 수 있다.

이와 같이 성능중심평가의 경우 설계자의 요구 만족기준에 따라 만족도 곡선의 평가가 가능하다. 이러한 원리를 이용하여 추후 다양한 지역 환경의 건설현장에 적용하여 재산피해 및 인명피해방지를 예방 할 수 있을 것이다.

7. 결론

본 연구에서는 다양한 기후인자 요소 중 풍속과 일조시간을 콘크리트 양생조건으로 사용하여 콘크리트 강도 평가 후 동결 융해 내구성 평가 실험을 통하여 성능 중심 평가(Performance Based Evaluation : PBE)를 수행하였으며 다음과 같은 연구 결과를 도출하였다.

- 1) 풍속-일조시간 압축강도 경우 풍속이 0 m/s인 경우 설계기 준강도를 만족하는 강도결과 값이 나오는 것을 확인 할 수 있으나 풍속이 2 m/s 이상일 경우 초기 7일 강도까지는 정

상적인 강도 발현이 이루어지는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 28일 장기 강도의 경우 콘크리트 내부의 잘 못 된 수화 반응 현상으로 인하여 강도 저하 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

- 2) 풍속-일조시간 인장강도의 경우 압축강도의 1/9~1/13사이의 강도를 나타내며, 압축강도와 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.
- 3) 동결융해 초기 상대동탄성계수의 경우 풍속이 2 m/s보다 큰 경우 급격하게 내구성지수가 감소하는 경향이 있으며 300 cycle의 상대동탄성계수의 경우 풍속이 8 m/s인 경우 풍속 0 m/s인 경우 보다 약 25%정도 내구성 지수가 감소하는 것을 확인할 수 있다.
- 4) 콘크리트 내구성 성능중심평가(Performance Based Evaluation : PBE)를 통하여 설계자의 요구 만족 기준에 따라 콘크리트 성능평가가 가능하며 다양한 기후환경의 건설현장에 적용 가능 할 것이며 재산피해와 인명피해를 사전에 방지할 것을 기대 할 수 있다.
- 5) 본 연구에서는 한 가지의 콘크리트 배합과 제한적인 기후 관련 양생조건에 대하여 성능을 검토하였으므로 정확한 데이터베이스를 구축하기 위해서는 더 많은 배합과 기후와 관련된 많은 양생조건을 통하여 추가 연구를 수행할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 국토교통부 국토교통기술 지역특성화 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다(13RDRP-B066470).

References

Ang, A. H. S.-S. and Tang, W. H. (2006), Probability Concepts in Engineering Wiley, & Hoboken. 409.

Box, G. E. P. and Tiao, G. C. (1992), Bayesian Inference in Statistical Analysis, Addison Wesley, Reading, Mass. 608.

Jang, J. S., Kim, Y. I., Kim, J. S., and Cho, S. C. (1993), A Study on the Analysis of the Fracture and Strength of Concrete Based on Cement Mortar-Aggregate Bond Strength, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 9(3), 159-172.

Jun, H. Y., Kim, T. K., Lee, S. W., and Kim, J. H. J. (2011), Application of Performance Based Mixture Design (PBMD) for Self Compacting Concrete, *Proceedings Journal of the Korea Concrete Institute*, 23(1), 571-572.

Kim, J. H. J., Phan, D. H., Kim, B. Y., Choi, J. W., and Han, D. S. (2015),

Development of Satisfaction Curves to Evaluate Concrete Mix Design Performance using a Bayesian Probabilistic Method, *Construction and Building Materials*, 27(1), 578-584.

Kim, J. H. J., Phan, D. H., Lee, K. S., Yi, N. H., and Kim, S. B. (2010), Development of PBD Method for Concrete Mix Proportion Design Using Bayesian Probabilistic Method, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(2), 171-177.

Kim, J. H. J., Phan, H. D., Yi, N. H., Kim, S. B., and Jeong, H. S. (2011), Application of the One Parameter Bayesian Method as the PBMD for Concrete Mix Proportion Design, *Magazine of Concrete Research*, 63(1), 31-47.

Kim, J. H. J., Yi, N. H., Phan, D. H., Kim, S. B., and Lee, K. W. (2010), Development of Performance Based Resistance Capacity Evaluation Method for RC Compression Member under Vehicle Impact Load, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(4), 535-546.

Kim, J. H., Phan, D. H., Oh, I. S., and Lee, K. S. (2010). Development of Performance Based Mix Design Method Using Single Parameter Bayesian Method, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(4), 499-510.

Kim, J. K., Moon, Y. H., and Eo, S. H. (1998), Compressive Strength Development of Concrete with Different Curing Time and Temperature, *Cement and Concrete Research*, 28(12), 1761-1773.

Kim, T. K., Choi, S. J., Shim, H. B., Ahn, T. S., and Kim, J. H. J. (2013), Satisfaction Curve Performance Based Design Method Evaluation of Concrete Specimen Subjected to Climate Change, *Proceedings Journal of the Korea Concrete Institute*, 25(1), 131-132.

Koh, K. T., Cheong, H. M., Yoon, G. W., and Lee, J. H. (2005), Properties of Concrete to Curing Temperature, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 17(1), 22-27.

Korea Meteorological Administration.

Korea Standard (KS) (2013), KS F 2456 Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, *Korea Standards Association*.

Korean Concrete Institute (KCI). (2005). Performance Based Design, *KCI Report*.

Lee, B. D., Kim, H. J., and Kang, H. J. (2008), Affecting Analysis of Air Content on the Freeze-Thaw Durability of Concrete, *Proceedings Journal of the Korea Concrete Institute*, 20(1), 565-568.

Lee, C. Y., Lee, I. D., Kim, K. W., and Bae, S. Y. (1998), Resistance of Freeze-Thaw and Strength Development of Recycled Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 10(4), 163-169.

Pachauri, P. K., and Meyer, L. A. (eds). (2014), Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *IPCC*, Synthesis Report.

Park, H. L., Kim, S. J., Paik, M. S., Lee, H. K., Park, B. K., and Jung, S. J. (2009), Study on Strength Characteristics of Precast Concrete Alters Cement Types and Curing Conditions of High-Strength Concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 25(8), 111-118.

Phan, H. D., Kim, J. H. J., Yi, N. H., You, Y. J., and Kim, J. W. (2012), Strength Targeted PBMD of HSC based on One-Parameter Bayesian Probabilistic Method, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(4), 137-150.

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.

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.

Singhal, A., and Kiremidjian, A. S. (1996), A Method for Earthquake Motion Damage Relationships with Application to Reinforced Concrete Frame, *Report 119*, 186.

Troxell, G. E., Dabis, H. E., and Kelly, J. W. (1968), Composition and Properties of Concrete. 2nd edition, *McGraw-Hill*.

Received : 09/02/2016

Revised : 10/24/2016

Accepted : 11/17/2016

요 지 : 일상적으로 우리가 매일 경험하는 눈, 비, 바람, 기온과 같은 현상을 날씨라고 하며, 일정한 지역에서 장기간에 걸쳐 나타나는 대기 현상의 평균적인 상태를 기후라고 한다. 또한 기후가 평균적 상태에 비해 유의미하게 변동하는 것을 기후변화라고 한다. 콘크리트 구조물의 경우 외부 극한기후환경에 노출 될 경우 다양한 문제점들이 발생할 수 있다. 이러한 문제점들 중 최근 가장 문제가 되고 있는 폭우, 폭설과 같은 극한기후인자요소의 작용을 받아 발생 할 수 있는 동결융해에 대한 현상이다. 콘크리트의 경우 온도가 너무 낮거나 높다고 손상이 발생하는 것은 아니라 동결-융해를 반복적으로 받을 경우 심각한 내구성 저하를 나타나게 되며 실제 성능저하가 된 구조물의 경우 회복하기 힘들게 된다. 따라서 본 연구에서는 극심한 기후변화로 발생 되는 다양한 기후인자 요소 중 풍속-일조시간의 기후변화 양생조건에 대하여 양생 후 콘크리트 동결융해 실험을 접목시켜 상대동탄성계수를 측정하고 이를 바탕으로 성능중심평가(Performance Based Evaluation (PBE))를 실시하고 대응책을 마련하고자 한다.

핵심용어 : 기후변화, 콘크리트 동결융해, 만족도 곡선, 성능 중심 평가
