



다양한 기후변화 양생조건에 따른 순환골재를 이용한 콘크리트의 동결 융해와 탄산화 저항성 성능검토

이태희¹⁾ · 양달훈¹⁾ · 김태균²⁾ · 최승재¹⁾ · 김장호^{3)*}

¹⁾연세대학교 건설환경공학과 대학원생 ²⁾연세대학교 건설환경공학과 박사후연구원 ³⁾연세대학교 건설환경공학과 교수

Experimental Evaluation of Recycled Aggregate Concrete for Freeze-thaw and Carbonation Resistance Considering Various Curing Conditions from Climate Change

Tae Hee Lee,¹⁾ Dal Hun Yang,¹⁾ Tae Kyun Kim,²⁾ Seung Jai Choi,¹⁾ and Jang Ho Jay Kim^{3)*}

¹⁾Graduate Student, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Rep. of Korea

²⁾Post Doctor, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Rep. of Korea

³⁾Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Rep. of Korea

ABSTRACT Extreme climate conditions due to climate change are currently emerging as a global issue. Those conditions include extreme heat, cloudbursts, heavy snowfall, and super typhoons. These climate conditions directly and indirectly affect construction. Also, with growing awareness in society regarding environmental protection, it is increasingly difficult to procure and dispose of construction materials. Although recycling construction waste is considered the best solution, and promoted by various laws and regulations, recycled construction waste currently has only primary uses, such as filling material. To increase actual recycling, a wider range of studies on safety and durability of recycled materials is needed. Through safety and durability experiments, this study aims to determine the performance of construction waste concrete (referred to hereafter as recycled aggregate concrete) in varying climate conditions (temperature, humidity, wind speed, and sunlight exposure time). In order to study safety, strength was measured using 3, 7, and 28-day measurements of concrete compressive strength and splitting tensile strength. Also, durability experiments were conducted both a freeze-thaw experiment and a carbonation experiment.

Keywords : climate change, recycled aggregate concrete, freeze and thaw resistance, carbonation resistance, durability

1. 서 론

최근 인간 생활이나 생산 소비과정에서 매연, 분진, 오수, 폐기물 등에 의한 환경파괴가 날로 커짐에 따라 폐기물 처리에 대한 사회적 인식 또한 지속해서 높아지고 있다. 사회적 관심을 두는 폐기물 중 하나로 건설폐기물을 꼽을 수 있다. 각종 건설공사현장에서 배출되는 건설자재 등 건설폐기물을 처리하는 과정에 큰 어려움을 겪고 있으며, 2012년 약 6천 8백만 톤에서 2017년 7천 2백만 톤으로 건설폐기물이 증가하여 국내 사업장 폐기물의 절반 이상을 건설폐기물이 차지하고 있다. 이에 따라 정부는 재활용 정책을 통하여 2016년까지 재활용 비율을 98.1%까지 증가시켰으며, 폐기물의 소

각 및 매립률을 감소시켰다. 그러나 건설폐기물의 재활용에 대한 사회의 부정적인 인식과 사용기피 현상으로 인해 대부분 성토나 복토 등 일차적인 용도로 활용되고 있으며, 콘크리트용으로 사용되는 순환골재 등과 같이 부가가치가 높은 용도로의 재활용률은 현저히 낮은 수준이다. 건설폐기물 재활용촉진에 관한 법률을 살펴보면 순환골재는 물리적 또는 화학적 처리과정 등을 거쳐 순환골재 품질기준에 맞게 만든 것을 말하며(ME 2015), 순환골재를 포함한 각종 건설공사 등에서 나온 건설폐기물을 친환경적으로 처리하고 재활용을 촉진하여 공공복리 증진에 이바지하는 것이 목적이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 건설폐기물의 재활용 방법에 관한 연구가 필요하지만, 건설폐기물의 재활용은 내구성 및 안정성 측면에서 요구 강도에 미치지 못하며, 아직 충분한 검증이 이루어지지 못한 상태이다.

최근 환경파괴로 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 엘니뇨, 라니냐, 극심한 가뭄 및 태풍 등과 같이 이상기후 현상이 빈번

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

Received August 22, 2018, Revised March 29, 2019,

Accepted June 04, 2019

©2020 by Korea Concrete Institute

히 발생한다(Brown 2013; Fang et al. 2011; Kang 2004; Pachauri and Meyer 2014). 우리나라의 경우 폭염, 폭우, 한파와 같은 기후변화가 심각하게 발생하고 있으며, 기후변화에 따른 공사기간 연장과 무리한 시공으로 인한 콘크리트의 품질저하는 각종 부실시공의 원인이 되고, 이로 인하여 인명피해와 경제적으로 손실을 증가시키고 있다. 환경과피해를 줄이는 건설폐기물의 효율적인 처리와 동시에 기후변화와 같이 복합적인 현상에 대응하기 위해 순환골재를 이용한 콘크리트의 평가는 다양한 기후조건에서 콘크리트를 양생하여 내구성을 검토하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 이러한 기후변화와 환경적인 문제에 대응할 수 있는 순환골재를 이용한 콘크리트 개발을 위해 다양한 내구성 실험을 통해 분석하여 이를 평가하고자 한다. 이를 위해 다양한 기후인자 중 풍속과 일조시간을 선정하여 순환골재를 활용한 콘크리트를 배합하고, 기후인자에 따른 양생조건이 순환골재 콘크리트 배합성능에 미치는 영향을 파악하고 순환골재를 활용한 콘크리트의 탄산화, 동결 융해

에 따른 내구성을 검토하고자 한다(Choi et al. 2009; Kwon and Na 2011; Lee et al. 1998; Lee et al. 2008; Sriravindrarajah et al. 2012; Ye et al. 2015; Ylmen and Jaglid 2013).

2. 양생조건 및 배합

기후에 따른 다양한 양생조건을 선정하기 위하여 일조시간과 풍속을 주요 인자로 선정하였다. 일조시간과 풍속은 콘크리트 양생과정 중 수화 반응에 영향을 주어 콘크리트의 품질과 직접적인 관련이 있기 때문이다. 양생조건 선정의 기준이 필요하여 Table 1, Table 2에 각각 나타나 있는 과거 10년 동안의 서울지역 풍속과 일조시간의 월 평균 데이터를 바탕으로 풍속은 0, 2, 4, 6 m/s를 양생조건으로 선정하였고, 일조시간은 2, 4, 6, 8 hr를 양생조건으로 선정하여 총 16가지 Case로 실험을 하였으며 각 Case는 Table 3에 정리되어있다. 각 Case에 맞는 양생조건을 구현하기 위해 밀폐된 실내 시험장에 삼파장 전구와 공업용 대형 선풍기를 설치하여 실험조건

Table 1 Monthly mean wind speed at Seoul, Korea [0.1 m/s] (Korea Meteorological Administration, KMA)

Year	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Avg.
2016	25	28	24	24	24	21	21	21	20	21	22	22	22.75
2015	26	29	31	31	32	25	28	24	23	23	27	23	26.83
2014	24	27	30	28	32	26	28	24	21	24	25	28	26.42
2013	27	29	30	34	29	22	34	28	22	25	27	24	27.58
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
Avg.	24.27	26.64	29.64	29.36	27.36	24.45	25.55	24.55	21.73	21.91	25.09	25.00	25.46

Table 2 Monthly mean sunlight exposure time at Seoul, Korea (Korea Meteorological Administration, KMA)

Year	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Avg.
2016	6.33	6.73	8.18	7.32	9.04	7.66	5.17	7.62	6.39	6.31	5.78	5.37	6.83
2015	6.24	6.43	8.74	7.20	9.37	8.60	5.68	6.68	8.74	7.73	3.63	5.74	7.07
2014	5.95	5.85	6.93	7.11	9.81	6.16	5.57	4.86	7.14	7.72	6.47	6.31	6.66
2013	5.41	6.69	8.27	7.11	7.68	7.47	3.26	7.03	6.37	8.06	6.27	5.95	6.63
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
Avg.	5.98	6.27	6.74	6.62	7.55	6.63	3.65	5.25	6.19	6.88	5.45	5.50	6.06

Table 3 Wind speed and sunlight exposure time curing condition combinations

Case	Winds peed (m/s)	Sunlight exposure time (hr)	Case	Wind speed (m/s)	Sunlight exposure time (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

Table 4 Mix proportion

Coarse aggregate size (mm)	Slump (mm)	W/c (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit (kg/m ³)					f_{ck} (MPa)
					W	C	S	G	R/G*	
25	120	55.0	42.0	5	183	333	677	709.5	303.9	27

*R/G: recycled aggregate

을 구현하고 28일 동안 양생을 하였다. 성능과 내구성의 검증을 위하여 순환골재 제작한 항온항습양생, 수중양생, 기건양생 조건에서 양생을 시킨 비교시편을 제작하여 재료성능 및 내구성능 평가를 수행하였으며 항온항습양생 조건은 온도 20 °C 상대습도 95 % 이상에서 양생하였다. Table 4는 콘크리트 배합조건을 나타낸 표로써 슬럼프는 120 mm, w/c는 55 %, 설계기준 강도는 27 MPa, 굵은 골재 최대치수는 25 mm으로 선정하였으며 시편의 경우 케이스별 3개의 $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 공시체를 제작하였다.

3. 강도실험 결과

순환골재 콘크리트의 풍속-일조시간 양생조건에 따른 결과는 Table 5에 나와 있다. 풍속 0 m/s 양생조건인 경우 28일 강도가 설계기준강도 27 MPa의 76 % 정도로 풍속 2, 4, 6 m/s의 양생조건인 경우 각각 설계기준강도 27 MPa의 65, 67, 66 % 보다 높은 강도를 보였다. 풍속 2, 4, 6 m/s 양생조건에서는 풍속 6 m/s의 일조시간 4, 6, 8 hr의 양생조건을 제외하고 모든 일조시간에서 28일 강도가 평균적으로 설계기준강도 27 MPa의 59 %로 7일 강도에서 평균적으로 나타난 설계기준강도 27 MPa의 68 %보다 강도가 저하되는 현상을 보였다. 인장강도 결과, 풍속 6 m/s의 시편에서 가장 낮은 강도가 발생되었고 0, 2, 4 m/s의 시편에서 28일 인장강도는 평균 1.86 MPa로 설계강도 27 MPa의 6.8 %이다. 일반 콘크리트의 인장강도가 압축강도의 7.7~11 %인 것을 고려하였을 때 순환골재의 인장강도가 기준치에 미달이지만 압축강도보다 기준치에 더 근접한 결과를 나타냈다. 이러한 원인으로서는 지속된 풍속조건이 가해질 경우 콘크리트의 경우 수화반응이 일어나는 양생과정에서 콘크리트 내부의 수분이 바람의 영향으로 시멘트와 수화반응을 하지 못하고 이동하거나 증발하여 시간이 지날수록 강도 저하가 발생하는 것으로 판단된다.

실제 건설 현장에서도 양생조건이 이와 같이 가해질 경우 균열이 발생되어 콘크리트 품질저하로 이어질 가능성이 높다. 일조시간에 따른 강도 경향성은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 풍속에 따른 수분이동 및 증발의 효과가 주요하게 나타나기 때문인 것으로 판단되며, 이는 추가적인 연구가 필요한 부분이다.

순환골재로 제작한 컨트롤 시편의 경우 기건양생을 제외한 나머지 두 개의 수중양생과 항온항습양생 시편에서 각각 28일 강도가 33.38, 27.64 MPa로 설계기준강도 27 MPa를 만족하는 것을 알 수 있다. 앞선 연구에서도 낮은 등급의 순환골재일수록 28일 강도에서 일반골재와 차이가 벌어지지만, 설계기준 강도는 만족하는 것으로 나타났다(Chung et al. 2006). 수중양생의 경우에 3, 7, 28일 강도가 가장 높게 나오는 것을 알 수 있으며, 기건양생의 경우 3, 7, 28일 강도가 각각 13.19, 17.63, 21.92 MPa로 풍속 0 m/s 양생조건에서의 양생결과 값과 유사하게 나오는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 콘크리트의 양생과정에서 수화반응이 일정하게 발생될 수 있는 양생조건인 시편에서 28일 강도를 충족한다는 것을 알 수 있다.

4. 콘크리트 탄산화

4.1 탄산화 실험방법

Table 3의 풍속-일조시간으로 선정하여 양생을 28일간 실시하였으며 28일 양생을 마친 시편을 탄산화 시험 장비로 옮겨 추가 양생을 28일 진행한 후 탄산화 깊이를 측정하였다. 탄산화 시험은 온도는 20 ± 2 °C, 상대습도는 95 % 이상, 이산화탄소는 5 ± 0.2 %의 조건으로 진행하였으며 탄산화 시험 공시체는 사각몰드 공시체와 실린더 공시체를 사용하였다. 사각 몰드 공시체의 경우 단면 정방향으로 그 한쪽의 길이는

Table 5 Strength test results of wind speed-sunlight exposure time

Case	Wind speed (m/s)	Sunlight exposure time (hr)	Compressive strength (MPa)			Splitting tensile strength (MPa)		
			3 days	7 days	28 days	3 days	7 days	28 days
1	0	2	13.34	16.86	19.59	1.46	1.74	1.79
2	0	4	13.08	16.89	20.21	1.45	1.74	1.88
3	0	6	13.25	17.97	21.09	1.47	1.77	1.99
4	0	8	12.17	17.49	21.61	1.42	1.78	1.77
5	2	2	13.57	17.59	16.92	1.35	1.55	1.92
6	2	4	14.14	18.30	17.79	1.45	1.89	1.94
7	2	6	14.15	18.23	18.26	1.60	1.71	1.69
8	2	8	14.19	18.37	17.26	1.61	1.60	1.95
9	4	2	14.06	17.90	17.57	1.48	1.70	1.73
10	4	4	13.11	19.29	17.59	1.50	1.81	1.94
11	4	6	15.66	19.57	18.37	1.51	1.57	1.76
12	4	8	15.03	19.56	19.45	1.55	1.87	1.91
13	6	2	12.67	17.17	15.55	1.38	1.64	1.60
14	6	4	13.90	17.85	20.14	1.58	1.81	1.76
15	6	6	11.73	16.83	17.33	1.32	1.36	1.61
16	6	8	12.21	16.12	18.56	1.32	1.63	1.67
Control specimens								
17	Thermo-hydrostat curing		16.85	22.69	27.64	1.59	1.72	2.1
18	Water curing		17.77	23.92	33.38	1.68	1.83	2.26
19	Air dry curing		13.19	17.63	21.92	1.56	1.58	1.86

100 mm로 하고 공시체의 길이는 400 mm로 한다.

1회 측정을 목적으로 할 경우 실린더 공시체를 사용하고 규격은 $\phi 100 \times 200$ mm 또는 $\phi 150 \times 300$ mm을 사용한다. 본 연구에서는 1회 측정을 목적이므로 $\phi 100 \times 200$ mm의 실린더 공시체를 사용하였고, 동일한 조건의 시험에 대해 각각 공시체를 3개씩 제작하였다. 탄산화 깊이 측정은 공시체의 갈라진 면을 쪼개서 측정하였고 탄산화 시험에 사용되는 시약은 KS M 8238(KATS 2015)에 나온 과정을 통해 용액을 제조하였다.

탄산화 깊이의 측정 시기는 1, 4, 8, 13, 26주에서 주로 측정을 하지만 본 연구에서는 28일 양생 기간을 고려하여 4주째에 탄산화 깊이를 측정하였다. 탄산화 깊이의 측정은 1개의 공시체에 대하여 각 공시체의 2면에 10점의 평균값을 합계하여 계산하였고 3개의 공시체에 대해 평균값을 계산하여 0.5 mm 단위로 반올림하였다. 탄산화가 진행된 시편은 단면을 절단하여 절단 부분에 페놀프탈레인용액을 분사할 경우 탄산화가 진행되지 않는 부분에서 보라색을 띠게 된다. 탄산화는 이산화탄소의 침투가 외부로부터 내부로 진행되므로 콘크리트 표면부터 비탄산화로 나타난 경계면까지의 길이를 탄산화 깊이라 일컫는다. 또한, 최종적으로 구하고자 하는 탄산화 속도 계수(상수) A 를 구하는 경우 식 (1)을 통하여 나타내며 실험을 통해 구해진 탄산화 깊이 C_t 를 이용하여 계산할 수 있다.

$$C_t = A\sqrt{t} \tag{1}$$

$$A = \frac{C_t}{\sqrt{t}}$$

여기서, A : 탄산화 속도 계수
 C_t : 탄산화 깊이(mm)
 t : 탄산화 기간(week)

4.2 콘크리트 탄산화 깊이

순환골재 콘크리트 탄산화 깊이는 Table 6과 Fig. 1에 나타내었다. 실험결과를 종합적으로 분석하면 풍속-일조시간이 클수록 탄산화의 축진이 많이 일어나는 것을 알 수 있다. Table 6과 Fig. 1에 나온 결과값 중 풍속 6 m/s, 일조시간 8 hr 양생조건인 경우 풍속 0 m/s, 일조시간 2 hr 양생조건보다 1.98배 더 높은 탄산화 침투가 발생하였다.

또한, 컨트롤 시편들과 비교 분석한 결과 수중양생과 혼화습기 양생을 한 시편의 경우 4.5, 4.8 mm의 탄산화 깊이를 나타내며 일반 콘크리트 기건양생과 유사한 탄산화 깊이를 나타냈다(Kim et al. 2015). 이와 반대로 기건양생의 경우 탄산화 깊이가 6.89 mm로 나타나고 있다. 이것은 풍속 0 m/s, 일조시간 2 hr보다 약 0.5 mm 작지만, 상대적으로 유사한 침투 깊이를 나타낸다. 이러한 결과를 통해 양생과정에서 상대

Table 6 Test results of concrete carbonation

Case	Wind speed (m/s)	Sunlight exposure time (hr)	Carbonation depth (mm)	Carbonation rate modulus (mm/\sqrt{weeks})
1	0	2	7.36	3.68
2	0	4	9.91	4.95
3	0	6	10.35	5.67
4	0	8	11.79	8.39
5	2	2	8.11	4.05
6	2	4	10.72	5.36
7	2	6	12.13	6.06
8	2	8	13.74	6.87
9	4	2	12.48	6.24
10	4	4	13.41	6.70
11	4	6	14.35	7.17
12	4	8	14.32	7.16
13	6	2	13.44	6.72
14	6	4	14.43	7.21
15	6	6	14.46	7.23
16	6	8	14.60	7.30
17	Thermo-hydrostat curing		4.82	2.41
18	Water curing		4.56	2.28
19	Air dry curing		6.87	3.43

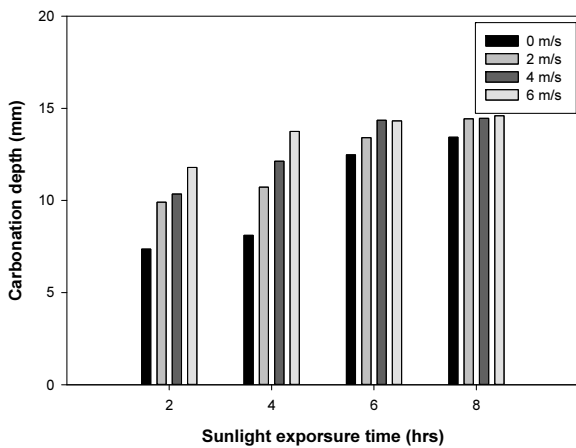


Fig. 1 Carbonation depth versus wind speed and sunlight exposure time

습도가 높은 양생 조건일수록 상대적으로 탄산화 진행 속도가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 순환골재 콘크리트의 탄산화 깊이는 일반 콘크리트와 비교하였을 때 수중양생조건에서 최대로 660 % 증가하였고 풍속 2 m/s, 일조시간 2 hr 조건에서 최소로 27 % 증가하였다(Kim et al. 2015). 이 결과로 탄산화 저항성에 대해서 순환골재 콘크리트는 수중양생조건의 효율성이 현저히 떨어지는 것을 알 수 있다.

따라서, 풍속과 일조시간이 크게 발생하는 환경일수록 양생이 제대로 이루어지지 않으며 시편 내부에 공극률이 높아지면서 이산화탄소의 침투가 쉬워져 깊게 침투할 수 있다는

것을 확인하였고, 골재 내부에 있는 이물질로 인한 시멘트 페이스트와 부착력이 낮아 이산화탄소 침투가 쉬워 순환골재는 일반 골재보다 탄산화의 영향을 더 크게 받을 것을 판단된다.

4.3 탄산화 속도 계수

식 (1)에서 A 는 탄산화 속도 계수이며 콘크리트 내부로 탄산화가 얼마만큼 빠른 속도로 침투하는지 판단할 수 있다.

풍속 6 m/s, 일조시간 8 hr에서 탄산화 속도 계수가 가장 크게 나타났으며, 이것은 풍속 0 m/s, 일조시간 2 hr보다 1.98배 정도 크게 나오는 것을 확인할 수 있다.

또한, 컨트롤 시편의 경우 기건양생을 제외한 수중양생과 항온항습기양생의 경우 탄산화 속도 계수가 다른 경우보다 현저히 낮은 수치로 나오는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 탄산화 깊이가 증가할수록 속도계수도 증가하는 경향을 나타낸다.

5. 콘크리트 동결 용해

5.1 동결 용해 실험방법

본 연구에서 Table 3에 나온 풍속-일조시간 양생을 28일간 실시하였으며 양생 후 동결 용해 챔버를 이용하여 실험을 진행하였다.

동결 용해 시험은 KS F 2456(KATS 2018b)의 급속 동결 용해에 대한 콘크리트 저항 시험방법에서 B 방법을 통해 실험하였다. 동결 용해 시험에서 공시체 중심부 온도가 4 °C에서 -18 °C로 하강한 후 -18 °C에서 4 °C에 도달하는 것을 1 사이클이라고 하며 본 연구에서는 300 사이클까지 실험을 진행하였다. 각 사이클에서 공시체 중심부의 최고 및 최저 온도는 각각 4±2 °C 및 -18±2 °C의 범위에 있어야 하고, 공시체의 온도가 -20 °C 이하 또는 6 °C 이상이 되어서는 안되며 동결 용해 1 사이클의 소요 시간은 2시간 이상 4시간 이하로 한다.

5.2 상대 동탄성 계수 측정방법

상대 동탄성 계수 측정장치는 KS F 2437(KATS 2018a)의 규정에 따른다. 일반적으로 동결 용해 시험의 종료는 300 사이클로 하며 그때까지 상대 동탄성 계수가 60 % 이하가 되는 사이클이 있으면 시험을 종료한다. 본 연구에서는 0, 100, 200, 300 사이클의 동탄성 계수를 측정하였다. 또한, 시험체 측정 시 주의하여야 할 사항으로는 동결 용해 시험 시 저온에 있을 때 시험체를 외부로 노출할 경우 극심한 온도 차에 의해 시편에 균열이 발생하는 것을 유의하여야 한다.

상대 동탄성 계수는 식 (2)와 같이 계산한다.

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

여기서, P_c : 동결 용해 C 사이클 후의 상대 동탄성 계수(%)
 n_o : 동결 용해 0 사이클에서의 변형 진동의 1차 공명 진동수(Hz)
 n_c : 동결 용해 C 사이클 후의 변형 진동의 1차 공명 진동수(Hz)

또한, 내구성 지수는 식 (3)과 같이 계산한다.

$$DF = \frac{PN}{M} \quad (3)$$

여기서, DF : 시험용 공시체의 내구성 지수
 P : N 사이클에서의 상대 동탄성 계수(%)
 N : 상대 동탄성 계수가 60 %가 되는 사이클 수 또는 동결 용해의 노출이 끝나게 되는 순간의 사이클 수
 M : 동결 용해 실험을 끝냈을 때의 사이클 수

5.3 동결 용해 상대 동탄성 계수 결과

본 연구에서는 상대 동탄성 계수가 60 % 이하가 되는 사이클이 없으므로 300 사이클에서 상대 동탄성 계수를 내구성 지수로 칭할 수 있고 내구성 지수는 콘크리트의 동결 용해에 대한 저항성을 나타낸다고 할 수 있다. Table 7와 Fig. 2를 보면 300 사이클일 때 모든 풍속조건에서 일조시간이 적을수록 내구성 지수가 우수해지는 것을 알 수 있다. 6 m/s의

Table 7 Test results of relative dynamic elastic modulus

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	95.70	91.85	87.26
2	0	4	100	94.76	91.49	86.70
3	0	6	100	93.37	91.29	83.48
4	0	8	100	92.95	89.86	83.19
5	2	2	100	93.30	89.13	83.36
6	2	4	100	91.40	87.28	81.24
7	2	6	100	89.17	83.04	79.62
8	2	8	100	88.76	82.42	78.31
9	4	2	100	89.12	82.07	78.59
10	4	4	100	87.39	81.57	76.87
11	4	6	100	86.98	81.39	75.49
12	4	8	100	84.33	79.59	74.28
13	6	2	100	86.04	78.98	72.15
14	6	4	100	83.19	73.72	64.21
15	6	6	100	82.17	72.18	63.88
16	6	8	100	80.09	71.65	62.04
17	Thermo-hydrostat curing		100	97.63	95.83	90.49
18	Water curing		100	96.38	95.10	90.23
19	Air dry curing		100	95.95	92.10	88.59

6. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 양생에 가장 영향을 많이 미칠 것으로 판단되는 다양한 기후인자 요소 중 풍속-일조시간을 선택하여 다양한 양생조건을 통하여 순환골재 콘크리트의 압축강도와 쪼갬인장강도를 통한 안전성 평가를 하였다. 안전성 평가 후 순환골재 콘크리트의 탄산화, 동결 용해에 대한 내구성 평가를 하여 다음과 같이 연구결과를 요약하였다.

- 1) 풍속-일조시간에 대한 안전성 평가 결과 초기 강도는 정상 발현이 되나 시편 내부의 수분 이동과 수분 증발로 인하여 풍속 0 m/s 양생조건을 제외한 나머지 조건인 경우 장기강도 저하 현상이 나타남으로써 콘크리트 양생에 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다.
- 2) 콘크리트 내구성 실험의 경우 탄산화 저항성, 동결 용해 모두 풍속 0 m/s 양생조건을 제외한 나머지 조건에서 내구성 저하 현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 가장 큰 원인은 콘크리트 내부에서 수분 이동과 수분 증발로 인하여 공극이 증가하였기 때문이라고 판단된다.
- 3) 탄산화 실험에서, 자연 상태에서 상대습도 95 %의 경우는 발생하기 힘들나 극한기후 환경에서의 탄산화 정도를 검토하고 일반적인 상황과 비교분석을 위하여 상대습도 95 % 이상을 선택하였다. 순환골재 콘크리트에서 상대습도가 95 %에서 탄산화가 덜 발생할 수 있지만 다양한 일조시간과 풍속의 양생조건과 탄산화 상대습도 95 %에 관한 연구는 부족한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 다양한 연구결과 확보를 위하여 기존의 탄산화 상대습도인 60±5 %와 달리 95 % 조건으로 데이터를 확보하였으며 이후 다양한 조건의 상대습도의 데이터도 확보할 필요가 있다.
- 4) 순환골재 콘크리트의 경우 골재의 재활용 및 골재 내부에 있는 이물질로 인하여 시멘트 페이스트와 부착력이 낮아 이산화탄소 침투가 쉽다. 또한, 골재의 흡수율 증가와 수밀성 부족으로 시편 내부가 동결 용해에 쉽게 노출되며, 일반 골재만을 활용한 콘크리트에 비해 흡수율이 높고 강도가 낮아 동결 용해 현상을 크게 받는 것을 알 수 있다. 이 같은 현상으로 구조물 성능저하 현상이 나타나는 것을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 19CTAP-C151929-01).

참고문헌

- Brown, P. T. (2013) Climate Change Blues: Sustaining Village Life In Tonga. *Te Kaharoa - The e-Journal on Indigenous Pacific Issues* 6(1), 260-305.

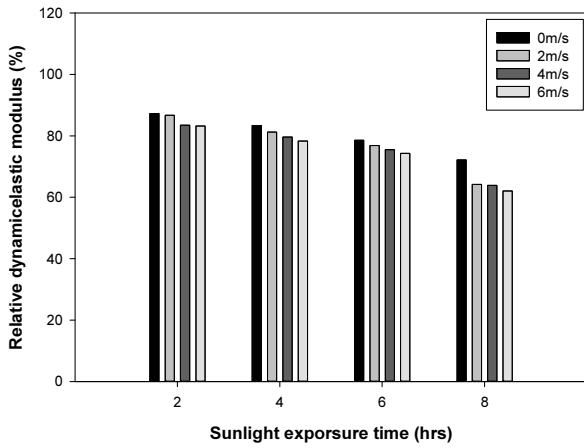


Fig. 2 Relative dynamic elastic modulus versus wind speed and sunlight exposure time

풍속조건에서 일조시간 0 hr와 8 hr의 내구성 지수 차이는 10.09이고 일조시간 8 hr에서 풍속조건 0 m/s와 6 m/s의 내구성 지수 차이는 21.15이다. 본 연구의 조건에서 시험체의 내구성 지수는 풍속에 더 큰 영향을 받은 것을 알 수 있다.

일반 콘크리트의 내구성 지수와 비교한 결과, 풍속 2 m/s와 4 m/s의 조건에서 순환골재 콘크리트가 일반 콘크리트보다 더 높은 내구성 지수를 나타내었으며 풍속 2 m/s, 일조시간 8 hr 조건에서 8% 더 높게 나왔으며 그 외의 조건에서는 3~6% 더 높은 결과가 나왔다(Kim et al. 2017). 풍속 0 m/s와 6 m/s 조건에서는 풍속 6 m/s, 일조시간 2 hr의 조건을 제외하고 평균 8% 낮은 결과를 나타내었다. 컨트롤 시편의 경우 모든 조건에서 약 7.6% 낮은 결과가 나타났다. 위의 결과를 통해 풍속 2 m/s와 4 m/s의 조건이 순환골재 콘크리트의 동결 용해 저항성능을 상승시킬 수 있다는 영향은 명백히 말할 수 없으며 이는 300 사이클이라는 긴 사이클 동안 실험을 하는 동안 나타날 수 있는 실험적 오차로 사료된다.

본 연구에서 컨트롤 시편인 수중, 항온항습챔버, 기건양생 시편과 비교한 결과 양생과정에서 수중양생과 같이 수분이 꾸준히 공급된 양생 조건일수록 내구성 지수가 높게 나오는 것을 알 수 있다. 그러나 풍속-일조시간 양생의 경우 초기 수분 증발로 인하여 콘크리트 표면에 균열이 발생하고 내부에 공극이 발생하여 동결 용해 실험 시 용해과정에서 물이 들어오게 되고 시편이 건조하여 흡수율이 높아져 동결 용해 현상의 영향을 크게 받는다. 이로 인하여 콘크리트 시편 내에서 수축과 팽창이 크게 발생하며 균열이 생겨 성능저하 현상이 일어난다고 판단된다. 또한, 순환골재 콘크리트의 경우 컨트롤 시편으로 제작된 일반골재 콘크리트보다 수분에 대한 흡수율이 커 동결 용해현상에 대한 저항이 더욱 약하다. 이로 인하여 순환골재 콘크리트의 경우 시편 내에 응결과 팽창이 크게 일어나며 균열이 발생하여 콘크리트의 성능저하 현상이 일어난다고 판단된다.

- Choi, S., Lee, K. M., Jung, S. H., and Kim, J. H. (2009) A Study on the Carbonation Characteristics of Fly Ash Concrete by Accelerated Carbonation Test. *Journal of the Korea Concrete Institute* 21(4), 449-455. (In Korean)
- Chung, H. S., Yang, K. H., and Kim, H. H. (2006) The Influence of the Quality and the Replacement Level of Recycled Aggregate on the Mechanical Properties of Concrete. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction* 22(6), 77-78. (In Korean)
- Fang, J. Y., Jiang, L. Z., ShaoPeng, W., Chao, Y., and HaiHua, S. (2011) Global Warming, Human-induced Carbon Emissions, and Their Uncertainties. *Science China Earth Sciences* 54(10), 1458-1468.
- Kang, W. S. (2004) *The Impacts and Measures of Climate Change on Construction Industry*. Research Report of Construction Economy Research Institute of Korea. (In Korean)
- Kim, T. K., Choi, S. J., Choi, J. H., and Kim, J. H. J. (2017) Performance Based Evaluation of Concrete Strength and Freeze-thaw Resistance from Wind Speed - Sunlight Exposure Time Effect. *Journal of the Korea Concrete Institute for Structural Maintenance and Inspection* 21(1), 49-58. (In Korean)
- Kim, T. K., Shin, J. H., Choi, S. J., and Kim, J. H. J. (2015) Performance Based Evaluation of Concrete Carbonation from Climate Change Effect on Curing Conditions of Wind Speed and Sunlight Exposure Time. *Journal of the Korea Concrete Institute for Structural Maintenance and Inspection* 19(5), 45-55. (In Korean)
- KMA, Korea Meteorological Administration (<https://www.kma.go.kr>).
- Korea Agency for Technology and Standards (KATS) (2015) *Phenolphthalein (KS M 8238)*. Seoul, Korea: Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- Korea Agency for Technology and Standards (KATS) (2018a) *Standard Test Method for Dynamic Modulus of Elasticity, Rigidity and Dynamic Poisson's Ratio of Concrete Specimens by Resonance Vibration (KS F 2437)*. Seoul, Korea: Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- Korea Agency for Technology and Standards (KATS) (2018b) *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing (KS F 2456)*. Seoul, Korea: Korea Standard Association (KSA). (In Korean)
- Kwon, S. J., and Na, U. J. (2011) Prediction of Durability for RC Columns with Crack and Joint under Carbonation Based on Probabilistic Approach. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 5(1), 11-18.
- Lee, B. D., Kim, H. J., and Kang, H. J. (2008) Affecting Analysis of Air Content on the Freeze-thaw Durability of Concrete. *KCI 2008 Spring Conference*. 24-25 April 2014. Pyeongchang, Korea; Korea Concrete Institute (KCI). 565-568. (In Korean)
- 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. (In Korean)
- Ministry of Environment (ME) (2015) *Construction Waste Recycling Promotion Act (Act No. 13527)*. Sejong, Korea; ME. (In Korean)
- Pachauri, P. K., and Meyer, L. A. (2014) *Climate Change 2014-Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Sriravindrarajah, R., Wang, N. D. H., and Wen Ervin, L. J. (2012) Mix Design for Pervious Recycled Aggregate Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 6(4), 239-246.
- Ye, H., Fu, C., Jin, N., and Jin, X. (2015) Influence of Flexural Loading on Chloride Ingress in Concrete Subjected to Cyclic Drying-Wetting Condition. *Computers & Concrete* 15(2), 183-198.
- Ylmen, R., and Jaglid, U. (2013) Carbonation of Portland Cement Studied by Diffuse Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 7(2), 119-125.

요약 세계적인 이슈로 극심한 기후변화가 부각되고 있으며 기후변화에 따른 폭염, 폭우, 한파, 폭설, 슈퍼 태풍과 같은 극한 기후 현상을 고려하지 못한 무리한 시공이 콘크리트 품질저하를 일으켜 인명피해와 재산피해를 발생시킨다. 더불어 환경보호에 대한 사회적인 관심이 높아지면서 건설폐기물 재활용을 장려하는 여러 법규가 생겨나고 있지만, 실질적인 재활용률을 높이기 위해서는 건설폐기물 재활용에 대한 안정성 및 내구성 확보를 위한 연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 순환골재 콘크리트와 기후변화의 관계를 알아보기 위해 구조물 양생에 미치는 기후인자 요소인 풍속-일조시간을 조정하여 양생시키며, 압축강도실험과 쪼갬인장강도 실험을 통해 안정성을 검토하고 탄산화 실험과 동결-융해실험을 통해 내구성을 검토하였으며 순환골재 콘크리트의 성능을 알아보았다.

핵심용어 : 기후변화, 순환골재 콘크리트, 동결-융해 저항성, 탄산화 저항성, 내구성