

고분말도 시멘트와 플라이애시를 사용한 콘크리트의 물리적 특성

Physical Characteristics of Concrete Using High-Fineness Cement and Fly Ash

이 영 도¹

하 정 수²

김 한 식^{3*}

Lee, Young-Do¹

Ha, Jung-Soo²

Kim, Han-Sic^{3*}

Professor, Department of Architectural Engineering, Kyungdong University, Goseong-gun, Gangwon-do, 24764, Korea ¹

Visiting Professor, Department of Architectural Engineering, Dankook University, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 16890, Korea ²

Manager, Samsung C&T, Gangdong-gu, Seoul, 05288, Korea ³

Abstract

The cement industry is considered a major industry for reducing greenhouse gases, increasing the amount of binding materials that can replace cement in concrete is known as the most effective method for reducing carbon dioxide. Therefore, research is being carried out to utilize large quantities of by-products that can be used as alternatives to cement. However, there are problems with reduced strength at early age and retarded setting for major reasons that do not increase the amount of mixture of binders used to replace cement. Thus, in this study, normal cement and high-fineness cement were used and physical properties were reviewed by placing differences in fly ash usage depending on the type of cement. As a result, the characteristics of strength were similar, and the hydration temperature was the same level. Also, the durability test showed that the length change, carbonation resistance were better than those of normal cement. Therefore, it is confirmed that the use of high-fineness cement is effective to reduce the amount of cement used and using more by-products.

Keywords : high-fineness cement, fly ash, strength development, durability

1. 서 론

최근, 도심지 공사가 증가함에 따라 공기단축은 필수 불가결한 요소이며, 프로젝트의 성패를 좌우하는 중요한 요인으로 작용하고 있다. 공기단축에 중대한 영향을 미치는 요소는 콘크리트의 강도 발현 시점이며, 관련 기술개발에

대한 현장 요구가 급증하고 있다.

2013년 우리나라의 클링커 생산량은 4,438만 톤, 시멘트 생산량은 4,729만 톤이었으며, 시멘트 생산과정에서 약 4,223만 톤의 CO₂가 배출된 것으로 보고됐다[1]. 이는 클링커 1톤 당 약 0.95 톤-CO₂에 해당된다. 2011년의 경우 우리나라 CO₂ 배출량은 697.7백만 톤으로 이 중 약 6%에 해당하는 CO₂가 시멘트 산업에서 발생된 것으로 알려져 있다[2]. 온실가스 배출량 기준으로 시멘트 제조 공정 시 탈탄산 60%, 에너지 35%, 간접배출 5% 정도의 배출 비율을 보이고 있다[3]. 따라서 시멘트를 제조할 때의 CO₂ 배출은 소성 공정에서 석회석의 탈탄산 및 소성용 연료의 연소에 기인하는 것이 약 90%를 차지하고 있다. 석회석의

Received : May 27, 2019

Revision received : July 11, 2019

Accepted : July 15, 2019

* Corresponding author : Kim, Han-Sic

[Tel: 82-31-281-0950, E-mail: hansic.kim1230@gmail.com]

©2019 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

탄산은 석회석의 주성분인 CaCO_3 가 고온에서 분해되어 CaO 가 생성되는 과정이며, 이 때 발생하는 CO_2 가 시멘트를 제조할 때 배출되는 전체 CO_2 배출량의 59%에 해당된다[2]. 따라서 CO_2 감축을 위한 방법 중 가장 효과적인 방법은 시멘트 대체재의 사용량을 증가시키는 것이다. 이에 따라 건설업계의 연구자들은 시멘트를 대체할 수 있는 재료들을 사용하여 온실가스 감축에 대한 세계적인 문제를 해결하기 위하여 노력하고 있다[4-6]. 아시아 국가들도 이러한 문제를 해결하기 위해 노력하고 있으며, 콘크리트 분야에서 시멘트의 감소는 최근 수년간 최우선 과제로 삼고 있다[7].

대표적으로 시멘트를 대체하여 사용하는 재료는 고로슬래그 미분말, 플라이애시 등과 같은 산업 부산물을 들 수 있다. 그러나, 혼합량을 증가시키지 못하는 큰 이유로 초기 강도 저하와 응결지연을 들 수 있다[8,9]. 따라서 이러한 문제를 해결하면서 시멘트 대체재를 다량으로 사용할 수 있는 기술개발이 요구된다.

저자의 선행 연구에서 고분말도 시멘트를 사용함에 따라 물과 접촉하는 면적이 많아지기 때문에 초기에 강도 발현이 빠른 것을 확인하였다. 따라서 이 연구에서는 선행 연구 결과를 바탕으로 보통 시멘트를 사용한 경우와 고분말도 시멘트를 사용한 경우의 플라이애시 치환율에 차이를 두어 설정하고, 강도발현 및 물리적 특성을 확인하였다. 이 연구로부터, 시멘트의 사용량을 줄이고 산업부산물인 플라이애시를 다량으로 사용하기 위한 방안의 일환으로서, 고분말도 시멘트를 활용한 결과에 대한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험 개요 및 방법

2.1 실험 개요

고분말도 시멘트와 플라이애시를 사용한 콘크리트의 강도발현 및 내구특성 검토를 위한 실험 계획을 Table 1에, 콘크리트 배합을 Table 2에 나타내었다. 배합에 사용한 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트(N; Normal portland cement)와 1종 보통 포틀랜드 시멘트보다 분말도가 높은 고분말도 시멘트(HF; High Fineness cement)이다. 배합에 사용한 N의 분말도는 $3,000\text{cm}^2/\text{g}$ 이며, HF의 분말도는 $4,200\text{cm}^2/\text{g}$ 이다. 또한 N을 사용한 배합의 경우 플라이애시(FA; Fly Ash)를 5% 치환하였다. 그리고 HF는 N에 비해 분말도가 높기 때문에, 빠른 수화반응으로, 강도 발현이 빠르고 초기에 수산화칼슘의 생성량이 많아서 FA의 포졸란 반응을 촉진시킬 수 있다.

Table 1. Design of experiment

Factors		Levels
Mixture	Cement	Normal cement [N] High Fineness cement [HF]
	FA	5% (when using N) 25% (when using HF)
		Slump
Experiment	Air content	4.5±1.5 %
	Temperature	0~3 days
	Compressive strength	15h, 18h, 1d, 3d, 7d, 28d
	Length change	0~50 days
	Accelerated carbonation	4, 13, 26 weeks

Table 2. Mix proportion of concrete

Concrete specification	Mixture	Slump (mm)	Air (%)	S/a (%)	W/B (%)	Unit weight (kg/m^3)					Ad (B×%)	
						W	C		FA	S		G
							N	HF				
25-24-150	N300-FA33	150±25	4.5±1.5	51.4	49.9	166	300	-	33	914	894	0.7
	HF250-FA83	150±25	4.5±1.5	51.4	49.9	166	-	250	83	904	884	0.7
25-27-150	N316-FA35	150±25	4.5±1.5	51.4	47.9	168	316	-	35	903	883	0.7
	HF263-FA88	150±25	4.5±1.5	51.4	47.9	168	-	263	88	893	872	0.7
25-30-150	N352-FA39	150±25	4.5±1.5	51.4	42.2	165	352	-	39	890	870	0.7
	HF293-FA98	150±25	4.5±1.5	51.4	42.2	165	-	293	98	878	859	0.7

* N300-FA33; normal portland cement 300 kg/m^3 + fly-ash 33 kg/m^3 , HF250-FA83; high fineness cement 250 kg/m^3 + fly ash 83 kg/m^3

따라서 선행 연구 결과를 바탕으로 FA의 치환율을 25%로 설정하였다[10-12]. 배합 대상으로 한 콘크리트의 규격은 25-24-150, 25-27-150, 25-30-150의 3종류이다.

굳지 않은 콘크리트의 목표 슬럼프 및 공기량은 시멘트 종류 및 플라이애시 치환율에 관계없이 모두 $150 \pm 25\text{mm}$ 및 $4.5 \pm 1.5\%$ 로 설정하였다. 목표 슬럼프를 만족하기 위하여 사용한 혼화제의 경우 혼입률을 고정하고 N의 배합에는 감수율 18%의 폴리카본산계 혼화제를, HF 배합의 경우 분말도가 높아 워커빌리티가 저하될 수 있음을 고려하여 감수율 22%의 폴리카본산계 혼화제를 사용하였다.

측정항목은 수화온도, 압축강도, 길이변화, 축진탄산화 저항성이며, 각 항목에 대해 설정한 수준에 따라 측정하였다.

2.2 시험 방법

고분말도 시멘트와 플라이애시를 사용한 콘크리트의 강도발현 및 내구특성 시험을 위한 시험 항목과 시험 방법 및 표준에 대하여 Table 3에 나타내었으며, 각 시험 항목별 KS 표준에 따라 시험을 수행하였다. 그리고 수화온도는 Figure 1에 나타낸 것과 같이 가로 260mm, 세로 260mm, 높이 250mm 스티로폼 박스의 내부 중심부에 T-type 열전대를 설치하여 타설 시점부터 10분 간격으로 측정하였다.

Table 3. Test methods and standards of test items

Test item	Test method and standard
Slump	KS F 2402
Air content	KS F 2421
Temperature	simple hydration heat measurement
Compressive strength	KS F 2405
Length change	KS F 2424
Accelerated carbonation	KS F 2584

3. 시험결과

3.1 굳지 않은 콘크리트

시멘트 종류 및 플라이애시 치환에 따른 콘크리트의 슬럼프와 공기량을 Table 4에 나타내었다. 실험 계획에서 언급한 것처럼 HF의 경우 분말도가 높은 것을 고려하여 혼화제 종류에 차이를 두어 혼입하고 시험을 수행하였다. 그 결과

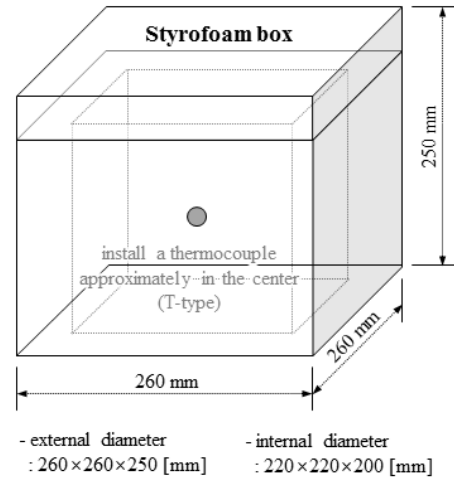


Figure 1. Hydration heat measurement

모든 배합에서 목표 슬럼프 및 공기량으로 설정한 $150 \pm 25\text{mm}$ 와 $4.5 \pm 1.5\%$ 를 만족하는 결과를 나타내었다.

공기량은 콘크리트의 재료 및 배합조건 등에 영향을 받으며, AE제의 사용량이 일정한 경우에 공기량이 감소하는 요인으로 시멘트의 분말도가 증가하는 경우, FA의 치환율이 증가하는 경우를 들 수 있다[13]. 따라서 N을 사용한 배합에 비해, 분말도가 높은 HF를 사용하면서 FA의 치환율을 증가시킨 배합에서 공기량이 약간 감소하는 결과를 나타내었다.

HF의 경우 N에 비해 분말도가 높기 때문에 시멘트 입자간의 응집력이 높아져 점성이 커지며 유동성이 저하될 수 있다[14]. 그러나 FA는 구상의 미립자로, 콘크리트 중에서 볼베어링과 같은 작용을 하므로 작업성을 개선하는 것으로 알려져 있다[15]. 따라서 HF에 의한 시멘트 입자간의 응집력 증가와 더불어 FA 치환율 증가에 의한 작업성 개선 작용이 복합적으로 이루어져 N을 사용한 배합과 HF를 사용한 배합의 슬럼프 결과에 차이를 나타내지 않은 것으로 판단된다.

Table 4. Result of slump and air content

Mixture	Slump (mm)	Air (%)
N300-FA33	175	5.8
HF250-FA83	175	4.9
N316-FA35	175	5.8
HF263-FA88	170	5.2
N352-FA39	175	4.6
HF293-FA98	175	4.1

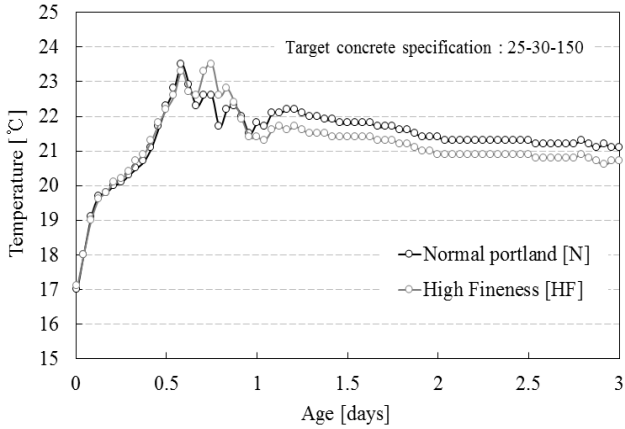


Figure 2. Temperature of concrete

3.2 수화온도

간이 수화열 측정에 사용한 콘크리트의 규격은 물-결합 재비가 가장 낮기 때문에 발열량이 가장 많을 것으로 생각되는 25-30-150이다. 간이 수화열 측정 방법에 의한 온도 측정 결과를 Figure 2에 나타내었다.

간이 수화열 측정결과, N을 사용하고 FA를 5% 혼합한 일반 콘크리트와 HF를 사용하고 FA를 25% 혼합한 콘크리트의 수화발열량은 동등한 수준인 것으로 나타났다. 따라서 수화열에 의한 온도균열 등의 악영향은 없을 것으로 판단된다. 배합에 사용한 HF가 N에 비해 분말도가 높기 때문에 빠른 수화반응으로 발열반응이 활발하지만, 전체적인 사용량이 적고 시멘트의 수화생성물인 수산화칼슘과 반응하여 경화성을 발휘하는 FA의 사용량이 증가됨에 따라 동등한 수준의 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 일반적으로 FA의 반응속도는 시멘트와 비교하여 상당히 늦고, 수화 발열량도 적은 것으로 알려져 있다[15].

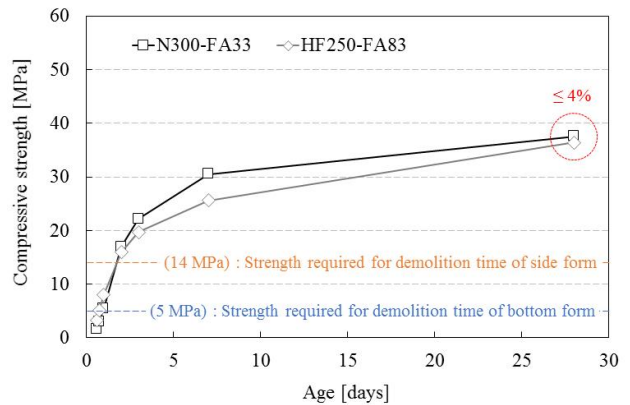
3.3 압축강도

시멘트 종류 및 플라이애시 치환에 따른 콘크리트의 압축강도 시험 결과를 Table 5와 Figure 3에 나타내었다.

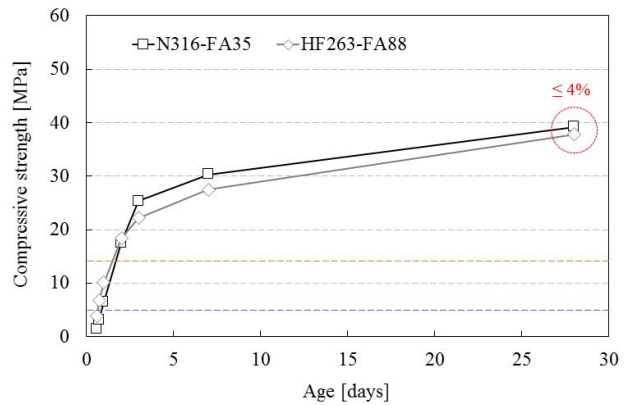
시멘트의 강도는 시멘트겔 간의 결합으로 발현된다. 초기에는 흡착력, 반데르발스력, 수소결합과 같은 약한 결합 작용이나, 경화가 진행되면서 C-S-H(II)와 같은 섬유상 수화물이 Si-O-Si의 강한 결합으로 전환되어 강도가 증진된다. 따라서 시멘트의 분말도가 크면 단기간에 많은 양이 수화되므로 그에 따라 초기재령 강도가 증가하는 것으로 알려져 있다[16]. 그에 따라 콘크리트의 규격에 관계없이 모든 배합에서 HF를 사용한 경우가 N을 사용한 경우보다

Table 5. Result of compressive strength

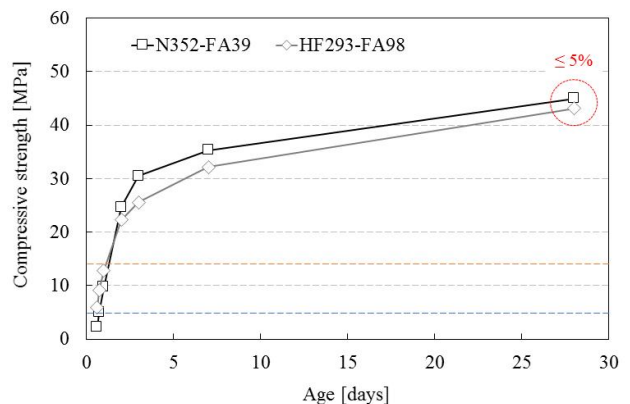
Mixture	Age						
	15h	18h	1d	2d	3d	7d	28d
N300-FA33	1.6	3.0	5.5	17.0	22.2	30.5	37.6
HF250-FA83	3.3	5.1	8.1	16.0	19.7	25.6	36.4
N316-FA35	1.4	3.1	6.5	17.5	25.3	30.3	39.2
N263-FA88	3.8	6.7	10.1	18.4	22.2	27.5	37.8
N352-FA39	2.2	5.0	9.7	24.7	30.5	35.3	45.0
N293-FA98	5.9	9.1	12.9	22.3	25.6	32.2	43.1



1) 25-24-150



2) 25-27-150



3) 25-30-150

Figure 3. Compressive strength of concrete

초기에 강도 발현이 빠르며 재령 2일에 N을 사용한 배합과 유사하거나 약간 낮은 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과는 전체적인 단위 시멘트량에 차이를 나타내고 있으며, 그 자체에 수경성이 없는 FA의 사용량이 증가함에 의한 것으로 판단된다. 또한 수화온도에서 재령 1 일까지는 HF를 사용한 배합이 약간 높고, 이후에 역전되는 현상이 이러한 결과를 뒷받침 한다고 생각된다. 또한 재령 3 일부터 재령 7 일까지는 HF를 사용한 배합이 N을 사용한 배합보다 약 10~15% 수준으로 강도가 낮다가 재령 28 일에서 5% 이내 수준으로 강도가 증진되는 결과를 나타내었다. 플라이애시는 시멘트가 수화 시 생성하는 수산화칼슘과 상온에서 서서히 반응하여 불용성의 안정한 규산칼슘수화물 등을 생성하는 포졸란 활성 재료이다. 그리고 FA를 20~30% 정도 치환하는 경우, 재령 56~91 일에서 보통 시멘트만 사용한 경우와 압축강도가 유사한 수준으로 발현되는 장기강도 발현 특성을 가지는 것으로 알려져 있다 [15]. 그러나 HF는 보통 시멘트에 비해 분말도가 크기 때문에 수화반응 속도가 빠르며, 단기간에 많은 수화물을 생성하게 된다[17]. 따라서 장기 재령 수준보다는 조기 재령이라 할 수 있는 재령 28 일에서 FA의 사용량이 적은 N을 사용한 배합과 유사한 수준까지 강도가 증진된 것으로 판단되며, Figure 3의 모든 규격에서 재령 7 일에서 28일로 경과함에 따라 강도 차이가 감소하는 결과를 나타내고 있다.

그리고 Table 6에 나타난 것과 같이 수직부재 측면 거푸집 해체 소요강도는 5MPa 이며, 수평부재 밑면 거푸집 해체 소요강도는 14MPa이다[18].

Table 6. Demolition time of form

Member	Compressive strength of concrete (f_{cu})	
Side of foundation, beam, column etc.	5 MPa or more	
Bottom of slab and beam, inside arch	Single layer structure	More than 2/3 times the standard compressive strength of design or at least 14 MPa or more
	Multilayer structure	Standard compressive strength or more (In case of using filler support structure, it can be shortened by structural calculation, and the minimum strength is 14 MPa or more)

HF를 사용한 배합의 경우 수직부재 측면 거푸집 해체 소요강도인 5MPa 이상에 도달하는 재령은 25-24-150,

25-27-150, 25-30-150 규격에서 각각 18 h, 18 h, 15 h이며, N을 사용한 배합의 경우 1 d, 1 d, 18 h으로 HF를 사용함에 따라 약간 빨라지는 결과를 나타내었다. 또한 수평부재 밑면 거푸집 해체 소요강도인 14 MPa 이상에 도달하는 재령은 시멘트 종류나 규격에 관계없이 2 일 이내인 것으로 나타났다. 따라서 HF를 사용함에 따라 시멘트의 사용량을 줄이고, FA의 치환율을 높여도 거푸집 탈형 시기에 따른 공사기간 지연의 문제는 없을 것으로 생각된다.

3.4 길이변화

건조수축은 배합수량, 물-결합재비 등에 영향을 받으며, 일반적으로 물-결합재비의 증가는 건조수축을 증가시키는 것으로 알려져 있다[19]. 배합 종류에 관계없이 단위 수량은 동등한 수준이기 때문에, 길이변화 측정에 사용한 콘크리트의 규격은 물-결합재비가 가장 높아서 건조수축이 클 것으로 생각되는 25-24-150이다. 길이변화 측정 결과를 Figure 4에 나타내었다. 길이변화 측정 결과, 재령 50일에서 HF를 사용하고 FA를 25% 혼합한 콘크리트가 N을 사용하고 FA를 5% 혼합한 콘크리트에 비해 약 19.3% 저감되는 결과를 나타내었다. 일반적으로 포졸란 재료의 사용은 콘크리트의 단위수량을 증가시킴으로써 건조수축의 증가를 가져올 수 있다고 알려져 있다[19]. 그러나 대상으로 한 배합에서는 사용 재료에 관계없이 동일한 단위 수량으로 고정하였기 때문에 이러한 영향은 없었던 것으로 생각된다.

또한 초기 재령에서 N을 사용한 배합이 HF를 사용한 배합보다 수축이 크고, 이후에 유사한 비율로 유지되는 현상을 나타내었다. 이러한 결과는 수화반응의 정도가 영향

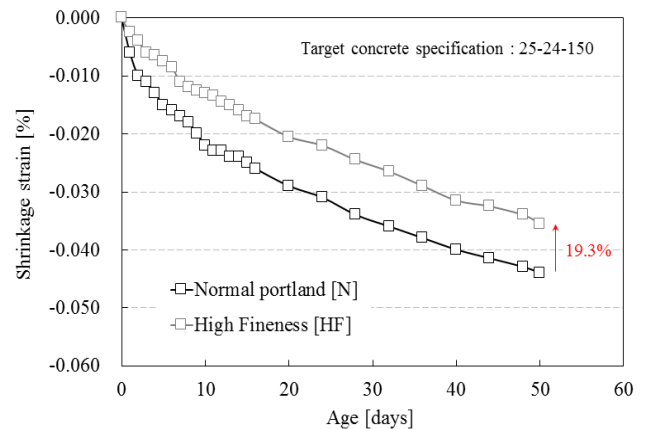


Figure 4. Length change of concrete

을 준 것으로 생각되며, 압축강도 시험 결과에서도 나타났듯이 초기에 HF의 수화반응 속도가 빨라서 수분이 많이 수화반응에 사용되었고, 그만큼 건조될 수분의 양이 적기 때문인 것으로 판단된다[20]. 따라서 균열 발생의 주된 원인이라 할 수 있는 건조수축 균열 저감이 일부 가능할 것으로 생각된다.

3.5 탄산화 저항성

축진 탄산화에 의한 탄산화 깊이 측정에 사용한 콘크리트의 규격은 물-결합재비가 가장 높기 때문에 탄산화 저항성에 가장 불리할 것으로 생각되는 25-24-150이다. 축진 탄산화에 의한 탄산화 깊이 측정 결과를 Figure 5와 Table 7에 나타내었다. 탄산화 깊이 측정 결과, 재령 26 주에서 HF를 사용하고 FA를 25% 혼합한 콘크리트가 N을 사용하고 FA를 5% 혼합한 콘크리트에 비해 약 4.3% 작아지는 결과를 나타내었다. 시멘트의 수화 반응에서 생성되는 수산화칼슘은 강알칼리성을 나타내며 수화물 전체의 pH를 결정한다[21]. 따라서 HF 배합의 경우 FA의 사용량을 증가시켰기 때문에 전체적인 수산화칼슘의 양은 감소하고, 그에 따라 탄산화 저항성에 불리하게 작용할 수도 있다. 일반적으로 탄산가스는 시멘트 경화체 내부에 존재하는 여러 가지 공극, 미세균열 등의 경로를 통하여 침투된다. 그러나 FA의 사용량이 증가함에 따라 콘크리트의 수밀성이 향

상되고, 길이변화 시험 결과에서 건조수축이 저감된 결과를 고려해 본다면 건조수축 균열 저감과 더불어 콘크리트 내부에 더 많은 수분이 존재할 수 있다. 이러한 콘크리트 내부의 공극에 존재하는 수분은 탄산가스의 확산을 저지하여 탄산화가 늦어진다는 보고가 있다[22]. 이러한 점들을 감안하여 HF를 사용한 배합과 N을 사용한 배합의 탄산화 깊이가 큰 차이를 나타내지 않은 것으로 판단된다.

4. 결 론

콘크리트에 시멘트를 대체할 수 있는 재료의 사용량을 증가시키는 것은 이산화탄소 감축을 위한 방법 중 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다. 그러나 플라이애시와 고로슬래그와 같은 시멘트 대체재 사용량의 증가에 따르는 문제점은 초기강도 저하와 응결지연이 있으며, 이러한 문제점은 공사기간에 중대한 영향을 미치는 요소이다. 따라서 이 연구에서는 보통 시멘트보다 비표면적이 큰 고분말도 시멘트를 사용하고 플라이애시의 사용량을 증가시켜 물리적 특성을 검토하였다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수화열 측정결과, N을 사용하고 FA를 5% 혼합한 일반 콘크리트와 HF를 사용하고 FA를 25% 혼합한 콘크리트의 수화발열량은 동등한 수준인 것으로 나타났다.
- 2) HF를 사용한 경우 재령 1일 이전에서 강도발현이 빠르다가 이후에 느려지고, 재령 28 일에서 FA의 사용량이 적은 N을 사용한 배합과 유사한 수준까지 강도가 증진되었다.
- 3) HF를 사용함에 따라 시멘트의 사용량을 줄이고, FA의 치환율을 높여도 거푸집 탈형 시기에 따른 공사기간 지연의 문제는 없는 것으로 나타났다.
- 4) 길이변화 측정 결과, 재령 50 일에서 HF를 사용하고 FA를 25% 혼합한 콘크리트가 N을 사용하고 FA를 5% 혼합한 콘크리트에 비해 약 19.3% 저감되는 결과를 나타내었다.
- 5) 시멘트의 사용량이 감소함에 따라 알칼리성의 저하로 탄산화 저항성이 낮아질 수 있으나, 복합적인 요인들에 의해 HF를 사용한 배합과 N을 사용한 배합의 탄산화 깊이가 큰 차이를 나타내지 않았다.

따라서 고분말도 시멘트를 사용하는 것이 시멘트의 사용

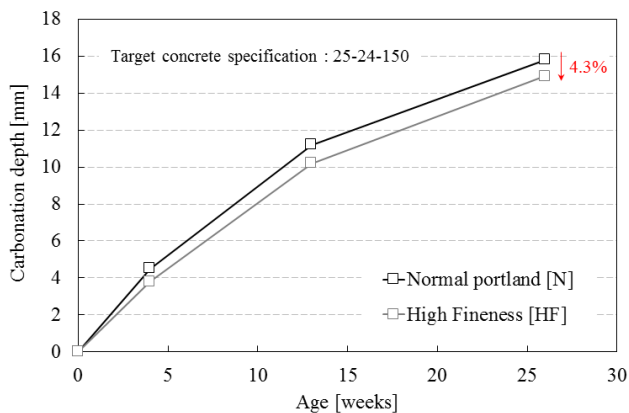


Figure 5. Carbonation depth of concrete

Table 7. Result of carbonation depth

Concrete specification	Mixture	Age (weeks)		
		4	13	26
25-24-150	N300-FA33	4.5 mm	11.2 mm	15.8 mm
	HF250-FA83	3.8 mm	10.2 mm	14.9 mm

량을 줄이고 산업부산물을 다량으로 사용하기 위한 방안의 일환으로서 유효한 것을 확인하였다.

요 약

시멘트 산업은 온실가스 감축을 위한 주요 산업분야로 고려되고 있으며, 콘크리트에 시멘트를 대체할 수 있는 재료의 사용량을 증가시키는 것은 이산화탄소 감축을 위해 효과적인 방법으로 알려져 있다. 따라서 시멘트의 일부를 대체하여 사용할 수 있는 산업부산물을 다량으로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 그러나 산업부산물의 혼합량을 증가시키지 못하는 큰 이유로 초기강도 저하와 응결 지연에 대한 문제점이 있다. 따라서 이 연구에서는 보통 시멘트를 사용한 경우와 고분말도 시멘트를 사용한 경우에 대해 플라이애시의 사용량에 차이를 두고 물리적 특성을 검토하여, 시멘트의 사용량을 줄이고 산업부산물을 다량으로 사용하기 위한 방안으로서, 고분말도 시멘트를 활용한 결과에 대한 기초 자료를 제시하였다.

키워드 : 고분말도 시멘트, 플라이애시, 강도발현, 내구성

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(NRF- 2017R1D1A3B03029426)

ORCID

Young-Do Lee, <https://orcid.org/0000-0003-1439-2693>

Jung-Soo Ha, <https://orcid.org/0000-0003-2924-8977>

Han-Sic Kim, <https://orcid.org/0000-0002-9789-2302>

References

1. Online Archive of Statement emission statistics in Korea, Seoul: Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea, 2011 - [cited 2019 Aug 7]. Available from: <http://www.gir.go.kr/home/index.do?menuId=37/>.
2. Korea Concrete Institute, Concrete and environment, Seoul(Korea): Kimoondang; 2016. p. 45-60.
3. Lee SH, Consideration of the significance of admixture and binder in cement and concrete, 38th Cement Symposium; 2011 Jul, 7-8; Chung-Ju, Korea, Seoul (Korea): Korea Cement Association; 2011. p. 38-46.
4. Berry EE, Hemmings RT, Zhang MH, Cornelius BJ, Golden DM, Hydration in high-volume fly ash concrete binders, American Concrete Institute Materials Journal, 1994 Jul;91(4):382-9.
5. Chen W, Brouwers HJH, The hydration of slag, part 1: reaction models for alkali-activated slag, Journal of Materials Science, 2007 Jan;42(2):428-43. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0873-2>
6. Bentz DP, Peltz MA, Durán-Herrera A, Valdez P, Juárez CA, Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concrete, Journal of building Physics, 2010 Jul;34(3):263-75. <https://doi.org/10.1177/1744259110376613>
7. Noriko F. The asia-pacific partnership on clean development and climate: what is is and what it is not. Brussels (BE): Centre for European Policy Studies (BE); 2007 Nov. 12 p. Report No.:144.
8. Han CG, Park SG, Eco-friendly ready mixed concrete using waste materials and by-products, Magazine of the Korea Concrete Institute, 2016 Jul;28(4):20-5.
9. Kim JS, Jung SH, Specification and certification of eco-friendly concrete, Spring Conference of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection; 2016 Apr, 12-14; Seogwipo, Korea, Seoul (Korea): Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2016. p. 649-50.
10. Ha JS, Kim HS, Lee YD, Properties of strength development of concrete at early age using high fineness cement and fly ash, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2018 Mar;22(2):154-60. <https://doi.org/10.11112/jksmi.2018.22.2.154>
11. Kim HS, Ha JS, Lee YD, Properties of strength development of concrete using high fineness cement and blast furnace slag, Spring Conference of Korea Institute of Building Construction; 2018 May 16-18; Seogwipo, Korea, Seoul (Korea): Korea Institute of Building Construction, 2018. p. 197-8.
12. Lee YD, Lee DH, Properties of strength development concrete using high fineness cement and fly ash, Fall Conference of Architectural Institute of Korea; 2018 Oct, 26-27; Pyeongchang, Korea, Seoul (Korea): Architectural Institute of Korea, 2018. p. 508-8.
13. Korea Concrete Institute, Engineering of concrete, Seoul(Korea): Kimoondang; 2011. p. 108-10.

14. Korea Concrete Institute, Engineering of concrete, Seoul(Korea): Kimoon dang; 2011. p. 112–7.
15. Korea Concrete Institute, Engineering of concrete, Seoul(Korea): Kimoon dang; 2011. p. 144–7.
16. Korea Concrete Institute, Engineering of concrete, Seoul(Korea): Kimoon dang; 2011. p. 40–5.
17. Kumar Mehta P, Monteiro PJM, Concrete; Microstructure, Properties, and Materials, New York (NY); McGraw–Hill; 2005, p. 213.
18. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Standard specification of concrete, Sejong(Korea): Ministry of Land, Infrastructure and Transport; 2016. p. 93–5.
19. Korea Concrete Institute, Engineering of concrete, Seoul(Korea): Kimoon dang; 2011. p. 556–64.
20. Kim JH, Park BS, Jung SH, Choi YC, Effect of properties of fly–ashes on the characteristics of fly–ash mortars, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 2016 Dec;4(4):439–45.
<https://doi.org/10.14190/JRCR.2016.4.4.439>
21. Korea Concrete Institute, Engineering of concrete, Seoul(Korea): Kimoon dang; 2011. p. 420–56.
22. Choi WC, Concrete : crack, deterioration and measures, Paju(Korea): Donghwa Technology Publishing Co., Ltd; 2010, p. 114–8.