

고분말도 시멘트와 플라이애시를 치환한 콘크리트의 조기강도 발현 특성

하정수¹, 김한식², 이영도^{3*}

Properties of Strength Development of Concrete at Early Age Using High Fineness Cement and Fly Ash

Jung-Soo Ha¹, Han-Sic Kim², Young-Do Lee^{3*}

Abstract: Cement industries are considered key industries for reducing carbon emissions, and efforts are off the ground to reduce the use of cement in the concrete sector. As a part of this effort, research is off the ground to utilize a large amount of industrial by-products that can be used as a substitute for a part of cement. Concrete using industrial by-products has advantages such as durability, environment friendliness and economical efficiency, but there are problems such as retarding and early-age strength deterioration. Therefore, this study aimed to reduce the use of cement and solve the problem of early-age strength deterioration while using fly ash, which is an industrial by-product. Accordingly, it was confirmed that the strength was improved at all ages irrespective of curing temperature by accelerating the hydration reaction by using high fineness cement. Subsequently, high fineness cement was partially replaced with fly ash and the strength development characteristics were examined. As a result, it was possible to exhibit strength equal to or higher than ordinary portland cement even at the early age. Also, it was confirmed that even when the fly ash is replaced by 30%, it is possible to shorten the time for dismantling the forms of vertical and horizontal members.

Keywords: High fineness cement, Fly ash, Early age strength

1. 서 론

최근, 재개발 및 재건축 등의 도심지 공사가 증가하고 있는 시점에서 공기단축은 필수불가결한 요소이다. 구조체 공사에서 콘크리트의 강도발현 시점은 공사기간에 영향을 미치는 중요한 요인으로 자리잡고 있다. 공기단축이 프로젝트의 성패를 좌우하는 핵심 요인으로 작용함에 따라 공사기간을 단축하기 위한 기술개발에 대한 사회적 요구가 증대되고 있는 실정이다.

우리나라는 파리협약 당사국으로 참여하면서 ‘2030년 배출전망치(BAU) 대비 온실가스 배출량 37% 감축’이라는 목표를 국제사회에 천명했다. 또한 우리나라는 전체 온실가스의 90%가 산업과 발전분야에서 발생되고 있어 세계에서 온실가스 감축 비용이 가장 많은 나라로 평가되고 있다(MT, 2017).

온실효과와 주범으로 이산화탄소가 지목되고 있으며, 콘크리트 산업 분야에서도 친환경 저탄소 녹색성장에 대응하기 위하여 탄소배출 최소화 및 폐기물의 재활용 등에 관심이 집중되고 있다.

구조재료의 대부분을 차지하고 있는 콘크리트에 기본적으로 사용되는 시멘트는 1톤을 생산하기 위해 약 0.9톤의 이산화탄소가 배출되는 것으로 알려져 있으며, 국내 연간 시멘트 생산량으로 산출하면 약 5천만톤으로 우리나라 전체 이산화탄소 배출량의 약 10%에 해당되는 것으로 보고되고 있다(Jang et al., 2016; Hong and Hwang, 2016). 이에 따라 시멘트 산업은 탄소배출 감축을 위한 주요 산업분야로 고려되고 있으며, 콘크리트 분야에서 시멘트 사용량 저감을 위한 노력이 진행되고 있다.

위와 같은 노력의 일환으로 시멘트의 일부를 대체하여 사용할 수 있는 재료로 고로슬래그 미분말, 플라이애시 등과 같은 산업부산물을 다량으로 활용하기 위한 연구가 진행 중이지만, 시멘트의 사용량이 감소함에 따라 응결시간 지연, 초기 강도 저하 등의 문제점이 있는 실정이다(Kim and Jung, 2016; Han and Park, 2016).

따라서, 이 연구에서는 시멘트의 사용량을 줄이고 산업부산물인 플라이애시를 치환하여 사용하면서도 조기강도가 저

¹정회원, 경동대학교 산학협력단, 박사후연구원

²정회원, 삼성물산(주) 건설부문 주거성능연구소, 책임

³정회원, 경동대학교 건축공학과, 교수, 교신저자

*Corresponding author: lyd@kduiv.ac.kr

Kyungdong University, 46, Bongpo 4-gil, Toseong-myeon, Goseong-gun, Gangwon-do, 24764, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

하되는 문제점을 해결하는 것을 목표로 하였다. 이에 따라, 먼저 고분말도 시멘트 사용에 의한 수화반응 촉진으로 계절에 관계없이 강도가 증진되는 것을 확인하기 위하여 양생온도별 강도발현 특성을 검토하였다. 그리고 고분말도 시멘트에 플라이애시를 치환하여 물리적 특성과 거꾸집 해체 시기에 대한 분석을 실시하고 보통 포틀랜드 시멘트의 동등 이상 강도 발현이 가능한지 검토하였다.

2. 고분말도 시멘트를 사용한 콘크리트의 양생온도별 강도발현 특성

2.1 실험 계획 및 방법

고분말도 시멘트를 사용한 콘크리트의 양생온도별 강도발현 특성 검토를 위한 실험계획을 Table 1에 나타내었다. 사용한 시멘트의 종류는 1종 보통 포틀랜드 시멘트(N; Normal portland cement)와 1종 보통 포틀랜드 시멘트보다 분말도가 높은 고분말도 시멘트(HF; High Fineness cement)를 사용하였다. 그리고 양생온도는 계절별 콘크리트의 양생 환경을 고려하여 10, 15 및 20°C의 3가지 조건으로 설정하여 시험을 수행했다.

굳지 않은 콘크리트의 목표 슬럼프는 시멘트 종류에 관계없이 모두 180±25 mm로 설정하고, 목표 공기량은 4.5±1.5%로 설정하여 화학혼화제의 종류와 사용량을 조절하였다. 그리고 굳은 콘크리트의 압축강도는 시멘트 종류별로 Ø100×200 mm의 시험체를 제작하고 각각의 온도 조건에 따라 1, 2, 3, 7 및 28일간 양생을 실시하여 시험을 수행하였다. 각각의

Table 1 Experimental design of concrete using high fineness cement

Factors		Levels
Mixture	Cement type	N, HF
Curing	Temperature	10, 15, 20°C
Experiment	Fresh concrete	Slump(mm) 180±25 Air content(%) 4.5±1.5
	Hardened concrete	Compressive strength 1, 2, 3, 7, 28 day

* N : Normal portland cement

* HF : High Fineness cement

Table 2 Test Methods and standards of test items

Test item	Test method and standard
Slump	KS F 2402
Air content	KS F 2421
Compressive strength	KS F 2405

실험 항목은 Table 2의 표준에 의거하여 측정하였으며, 슬럼프 시험 및 시험체 제작 전경을 Photo 1에 나타내었다.

2.2 사용 재료 및 배합

이 연구에 사용한 보통 포틀랜드 시멘트의 분말도는 3,000 cm²/g이며, 고분말도 시멘트의 분말도는 4,200 cm²/g이다. 또한 고분말도 시멘트의 경우 시멘트 조성물에 CaSO₄를 포함하고, 시멘트 중 석고 함량을 조절하였다. 실험에 사용한 배합표를 Table 3에 나타내었다. 시멘트 종류에 관계없이 단위수량은 165 kg/m³, 물-시멘트비를 51.6%, 단위 시멘트량을 320 kg/m³로 고정하여 분말도 및 양생온도 차이에 의한 강도발현 특성을 검토하였다.

2.3 실험 결과

2.3.1 굳지 않은 콘크리트 특성

시멘트 종류에 따른 콘크리트의 슬럼프와 공기량을 Fig. 1에 나타내었다. 시멘트의 분말도에 차이를 나타내고 있기 때



Photo 1 Visual of slump and test specimens

Table 3 Mix proportion of concrete using high fineness cement

Mixture	w/c	Unit weight(kg/m ³)					
		W	C		FAs	CAs	AD
			N	HF			
N320	51.6	165	320	-	868	928	2.24
HF320	51.6	165	-	320	868	928	2.24

*w/c : Water-cement ratio, W : Water, C : Cement, FAs : Fine aggregates, CAs : Coarse aggregates, AD : Chemical admixture

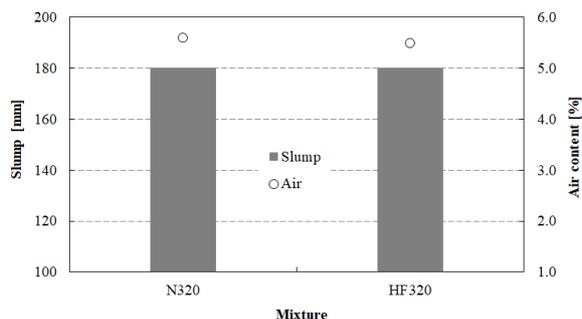


Fig. 1 Slump and air content

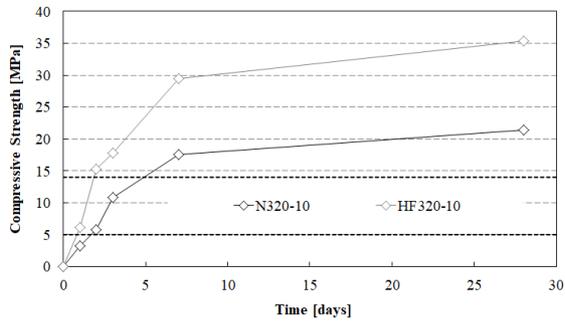
문에 동일한 종류와 양의 혼화제를 사용하면, 슬럼프에 차이를 나타낼 수 있다. 따라서 고분말도 시멘트를 사용한 배합의 경우 초기 응결이 큰 것을 고려하여 중PC를 사용하였고, 1종 보통 포틀랜드 시멘트에는 준PC를 사용하였다. 그 결과 모든 배합에서 목표 슬럼프 및 공기량으로 설정한 180±25 mm와 4.5±1.5%를 만족하는 결과를 나타내었다.

2.3.2 경화 콘크리트의 양생온도별 압축강도 특성

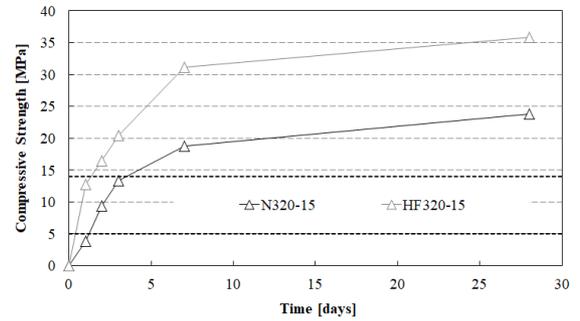
시멘트 종류 및 양생온도에 따른 압축강도 시험결과를 Fig. 2와 Table 4에 나타내었다. Fig. 2 (a)의 양생온도 10°C의 경우, 고분말도 시멘트를 사용한 경우에 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우보다 압축강도 값이 재령 1일에서 90% 상승하는 결과를 나타내었으며, 재령 2일에서는 160%, 재령 3, 7 및 28

Table 4 Compressive strength by cement type and curing temperature

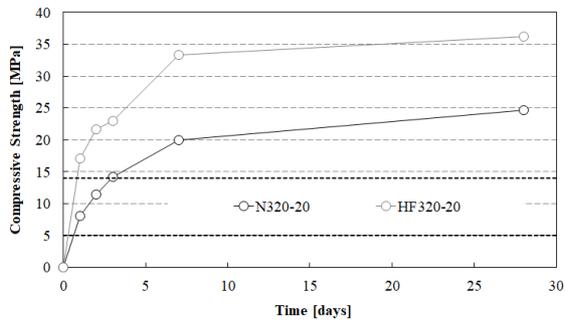
Mixture	Temperature (°C)	Age(days)				
		1	2	3	7	28
N320	10	3.2 MPa	5.8 MPa	10.8 MPa	17.5 MPa	21.4 MPa
	15	3.8 MPa	9.4 MPa	13.4 MPa	18.7 MPa	23.8 MPa
	20	8.1 MPa	11.4 MPa	14.2 MPa	20.0 MPa	24.7 MPa
HF320	10	6.1 MPa	15.3 MPa	17.8 MPa	29.5 MPa	35.3 MPa
	15	12.7 MPa	16.5 MPa	20.4 MPa	31.1 MPa	35.8 MPa
	20	17.1 MPa	21.7 MPa	23.0 MPa	33.3 MPa	36.2 MPa



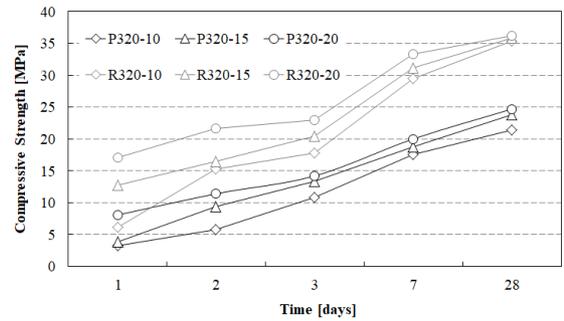
(a) Curing temperature 10°C



(b) Curing temperature 15°C



(c) Curing temperature 20°C



(d) Total

Fig. 2 Properties of compressive strength by cement type and curing temperature

Table 5 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	More than 2/3 times the standard compressive strength of design or at least 14 MPa or more
Single layer 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)
Multilayer structure	

일에서 60% 이상 상승하는 결과를 나타내었다. 그리고 Table 5에 나타낸 것과 같이 수직부재 측면 거푸집 해체 소요강도는 5 MPa이며, 수평부재 밀면 거푸집 해체 소요강도는 14 MPa이다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016). 따라서 재령에 대한 강도발현 속도를 직선 보간에 의해 산정해 보았을 때 5 MPa를 상회하는 강도가 발현되는 시점이 고분말도 시멘트는 20시간, 보통 포틀랜드 시멘트는 41시간으로 산출되어 소요강도 발현시간이 21시간 단축되는 것으로 나타났다. 또한 14 MPa를 상회하는 강도는 고분말도 시멘트의 경우 45시간, 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우는 118시간으로 산출되어 소요강도 발현시간이 73시간 단축되는 것으로 나타났다.

Fig. 2(b)의 양생온도 15°C의 경우, 고분말도 시멘트를 사용한 경우에 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우보다 압축강도 값이 재령 1일에서 230% 상승하는 결과를 나타내었으며, 재령 2일에서는 75%, 재령 3, 7 및 28일에서 50% 이상 상승하는 결과를 나타내었다. 또한 앞서와 동일한 방법으로 산정해 보았을 때, 수직부재 측면 거푸집 해체 소요강도인 5 MPa를 상회하는 강도는 고분말도 시멘트를 사용한 경우에 재령 10시간, 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우에 재령 27시간으로 산출되어 소요강도 발현시간이 17시간 단축되는 것으로 나타났다. 또한 수평부재 밀면 거푸집 해체 소요강도인 14 MPa를 상회하는 강도는 고분말도 시멘트를 사용한 경우에 재령 32시간, 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우에 재령 83시간으로 산출되어 소요강도 발현시간이 51시간 단축되는 것으로 나타났다.

Fig. 2(c)의 양생온도 20°C의 경우, 고분말도 시멘트를 사용한 경우가 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우보다 압축강도 값이 재령 1일에서 110%, 재령 2일에서 90%, 재령 3, 7 및 28일에서 50% 이상 상승하는 결과를 나타내었다. 그리고 앞서와 동일한 방법으로 산정해 보았을 때 수직부재 측면 거푸집 해체 소요강도인 5 MPa를 상회하는 강도를 고분말도 시멘트를 사용한 경우는 재령 7시간, 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우는 재령 15시간으로 산출되어 소요강도 발현시간이 8시간 단축되는 것으로 나타났다. 또한 수평부재 밀면 거푸집 해체 소요강도인 14 MPa를 상회하는 강도는 고분말도 시멘트를 사용한 경우에 재령 32시간, 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우에 재령 70시간으로 산출되어 소요강도 발현시간이 38시간 단축되는 것으로 나타났다.

시멘트의 강도는 시멘트겔 간의 결합으로 발현된다. 초기에는 흡착력, 반데르발스력, 수소결합과 같은 약한 결합작용이나, 경화가 진행되면서 C-S-H(II)와 같은 섬유상 수화물이 Si-O-Si의 강한 결합으로 전환되어 강도가 증진된다. 시멘트의 분말도가 크면 단기간에 많은 양이 수화되므로 그에 따라 초기재령 강도가 증가한다(Korea Concrete Institute, 2011).

그에 따라 Fig. 2(d)의 종합 그래프에 나타낸 것과 같이 고분말도 시멘트를 사용한 경우가 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우보다 초기에 강도발현이 빠르며, 재령 7일까지 급격한 강도발현을 나타내고 있다. 또한 고분말도 시멘트를 사용한 경우 초기의 빠른 강도발현으로 인해 재령 7일 이후에서 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우보다 강도발현 속도가 저하하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우에는 재령 28일에서 양생온도에 따라 강도발현에 차이를 나타내고 있으나, 고분말도 시멘트를 사용한 경우에는 양생온도에 의한 차이를 크게 나타내고 있지 않다. 이러한 결과를 통해 빠른 수화 반응으로 보통 포틀랜드를 사용한 경우에 비해 미수화 시멘트가 적어졌음을 시사하고 있다.

3. 고분말도 시멘트와 플라이애시를 치환한 콘크리트의 강도발현 특성

3.1 실험 계획

고분말도 시멘트와 플라이애시를 치환한 콘크리트의 강도발현 특성 검토를 위한 실험계획을 Table 6에 나타내었다. 사용한 시멘트의 종류는 앞서 기술한 보통 포틀랜드 시멘트와 고분말도 시멘트이며, 고분말도 시멘트를 사용한 배합은 플라이애시를 10, 20 및 30% 치환하여 사용하였다. 그리고 양생온도는 앞서 실험의 중간 온도인 15°C의 1조건으로 고정하여 시험을 수행했다.

굳지 않은 콘크리트의 목표 슬럼프와 목표 공기량은 앞서와 같이 각각 180±25 mm 및 4.5±1.5%로 동일하게 설정하고, 화학혼화제의 종류와 사용량을 조절하였다. 굳은 콘크리트의 압축강도의 경우 각 배합별로 15, 18시간, 1, 2, 3, 7 및 28일에 측정하였다.

3.2 사용 재료 및 배합

배합에 사용한 시멘트의 분말도는 앞서 실험에 사용한 재료와 동일하며, 실험에 사용한 배합표를 Table 7에 나타내었다.

Table 6 Experimental design of concrete substituted with fly ash

Factors		Levels	
Mixture	Binder	Cement type	N, HF
		FA	0, 10, 20, 30%
Experiment	Fresh concrete	Slump(mm)	180±25
		Air content(%)	4.5±1.5
	Hardened concrete	Compressive strength	1, 2, 3, 7, 28 day

*FA : Fly ash

Table 7 Mix proportion of concrete substituted with fly ash

Mixture	w/c	Unit weight(kg/m ³)						
		W	C		FA	FAs	CAs	AD
			N	HF				
N320-F00	51.6	165	320	-	-	868	928	2.24
HF288-F32	50.6	162	-	288	32	868	928	2.24
HF256-F64	49.4	158	-	256	64	868	928	2.24
HF224-F96	49.4	158	-	224	96	868	928	2.24

*N320-F00 : normal portland cement 320 kg/m³ + fly ash 0 kg/m³

*HF288-F32 : high fineness cement 288 kg/m³ + fly ash 32 kg/m³

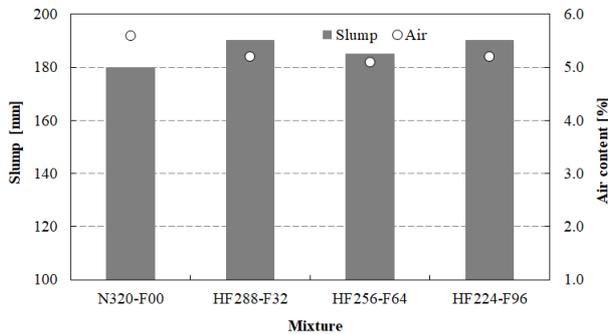


Fig. 3 Slump and air content

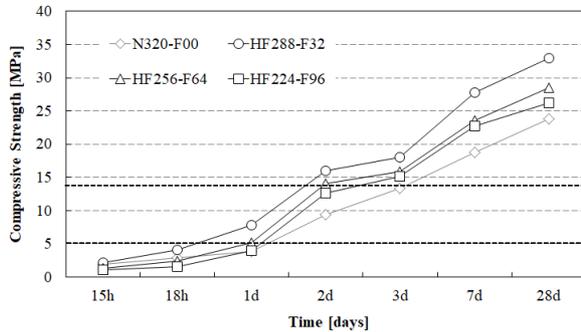


Fig. 4 Properties of compressive strength by substituted with fly ash

Table 8 Compressive strength and compressive strength ratio of concrete substituted with fly ash

Mixture	Age													
	15hours		18hours		1days		2days		3days		7days		28days	
	C.S (MPa)	Ratio (%)												
N320-F00	1.9	100.0	2.9	100.0	3.8	100.0	9.4	100.0	13.4	100.0	18.7	100.0	23.8	100.0
HF288-F32	2.2	116.8	4.1	141.4	7.8	205.3	16.0	170.1	18.0	134.3	27.8	148.8	33.0	138.7
HF256-F64	1.4	71.1	2.5	84.8	5.2	136.8	14.0	149.3	15.9	118.7	23.6	126.1	28.5	119.7
HF224-F96	1.1	57.4	1.6	55.5	3.9	103.4	12.6	133.8	15.2	113.4	22.8	121.7	26.2	110.1

*C.S : Compressive strength

다. 배합은 국내 A레미콘사에서 사용하고 있는 배합을 기반으로 하였으며, 단위 결합재량을 320 kg/m³로 고정하여 강도 발현 특성을 검토하였다.

3.3 실험 결과

3.3.1 굳지 않은 콘크리트 특성

시멘트 종류 및 플라이애시 치환율에 따른 콘크리트의 슬럼프와 공기량을 Fig. 3에 나타내었다. 앞서와 마찬가지로 시멘트의 분말도에 차이를 나타내고 있기 때문에 고분말도 시멘트를 사용한 배합의 경우 중PC를 사용하였고, 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 배합에는 준PC를 사용하였으며, 모든 배합에서 목표 슬럼프 및 공기량으로 설정한 180±25 mm와 4.5±1.5%를 만족하는 결과를 나타내었다.

3.3.2 경화 콘크리트의 압축강도 특성

시멘트 종류 및 플라이애시 치환율에 따른 압축강도 시험 결과를 Fig. 4와 Table 8에 나타냈다. 재령 1일 이전에서는 플라이애시를 20% 이상 치환한 배합의 경우, 보통 포틀랜드 시멘트만 사용한 경우보다 강도 값이 낮게 측정되었으며, 치환율 20%에서 70~85%의 강도 값, 치환율 30%에서 55%의 강도 값이 측정되었다. 그러나, 재령 1일이 경과한 시점에서는 플라이애시 30%를 치환한 배합을 포함한 모든 배합에서 강도 값이 역전되어 꾸준히 높은 강도를 나타내었다. 또한 재령 1일~2일 사이에서 빠른 강도 발현을 나타내다가 2~3일 시점에서 강도발현이 느려지는 현상을 나타내었으며, 이후 지속적인 강도발현이 이루어지는 것을 나타내고 있다. 이것은 포졸란 반응을 하는 물질인 플라이애시의 영향으로 강도발현이 느려졌다가 이후 수화반응 속도가 빠른 고분말도 시멘트에 의해 포졸란 반응이 활성화됨에 의한 것으로 판단된다.

앞서와 같이 재령에 대한 강도발현 속도를 직선 보간에 의해 산정해 보았을 때, 보통 포틀랜드 시멘트만 사용한 N320-F00의 경우 수직부재 측면 거푸집 해체 소요강도인 5 MPa, 수

평부재 밀면 거푸집 해체 소요강도인 14 MPa에 도달하는 재령이 각각 27시간, 83시간으로 산출되었다. 그리고 고분말도 시멘트에 플라이애시를 10% 치환한 HF288-F32의 경우 5 MPa, 14 MPa에 도달하는 시간이 각각 20시간, 43시간이며, HF256-F64는 각각 24시간, 48시간이고, 마지막으로 플라이애시를 30% 치환한 HF244-F96의 경우 각각 27시간, 61시간으로 산출되었다. 산출된 결과를 통해 고분말도 시멘트에 플라이애시를 10% 치환한 경우는 수직, 수평부재의 거푸집 해체 시기가 각각 7시간, 40시간 단축 가능하고, 플라이애시를 20% 치환한 경우는 거푸집 해체 시기가 수직부재 3시간, 수평부재 35시간 단축 가능한 것으로 나타났다. 마지막으로 플라이애시를 30%까지 치환하여 사용해도 수직부재 거푸집 해체 시기에 지연이 발생되지 않으며, 수평부재 거푸집 해체 시기는 22시간 단축 가능한 것으로 나타났다.

4. 결 론

이 연구에서는 시멘트의 사용량을 줄이고 산업부산물을 사용하면서도 초기강도 저하의 문제점을 해결하기 위하여, 먼저 고분말도 시멘트를 사용한 경우의 양생온도별 강도발현 특성을 검토하였다. 이후 고분말도 시멘트에 플라이애시를 30%까지 치환하면서 보통 포틀랜드 시멘트 동등 이상의 강도 발현 성능을 가지는 것을 확인하기 위하여 콘크리트의 물리적 특성과 거푸집 해체 시기에 대한 분석을 실시하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 양생온도 조건에 관계없이 고분말도 시멘트를 사용한 경우에 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우보다 재령 1일에서 90% 이상, 재령 2일에서 75% 이상, 재령 3일 이후 50% 이상 상승하는 결과를 나타내었다.
- 2) 고분말도 시멘트를 사용한 경우 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우보다 수직 및 수평부재 거푸집 해체 시기가 양생온도 10°C에서 각각 21시간, 73시간 단축되며 양생온도 15°C에서 10시간, 51시간, 그리고 양생온도 20°C에서 7시간, 38시간 단축되는 결과가 산출되었다.
- 3) 재령 1일 이전에는 플라이애시를 20% 이상 치환한 배합의 경우 보통포틀랜드 시멘트만 사용한 경우보다 강도 값이 낮게 측정되었으나, 1일이 경과한 시점에서는 역전되어 고분말도 시멘트에 플라이애시를 치환한 모든 배합이 높은 강도를 나타내었다.
- 4) 고분말도 시멘트에 플라이애시를 20% 이내로 치환한 경우 보통 포틀랜드 시멘트만 사용한 경우보다 수직 및 수평

부재 거푸집 해체 시기가 단축되는 결과를 나타내었으며, 플라이애시를 30%까지 치환하여도 수직부재 거푸집 해체 시기에 지연이 발생되지 않으며, 수평부재 거푸집 해체 시기는 단축되는 것으로 나타났다.

- 5) 따라서, 이 연구를 통해 보통 포틀랜드 시멘트를 고분말도 시멘트로 대체함으로써 초기강도 발현 문제로 인해 거푸집 해체 시기가 지연되는 플라이애시에 대한 활용성을 확보할 수 있으며, 나아가 플라이애시 활용을 통한 경제성과 친환경성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2017R1D1A3B03029426)

References

Han, C. G., and Park, S. G. (2016), Eco-Friendly Ready Mixed Concrete using Waste Materials and by-Products, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, KCI, 28(4), 20-25.

Hong, G. H., and Hwang, S. K. (2016), Development of Green Concrete Specification, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 20(2), 447-448.

Jang, J. G., Kim, G. M., Park, S. M., and Lee H. K. (2016), Carbon Dioxide Utilization and Sequestration by Carbonation Curing of Cement-based Materials, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, KCI, 28(4), 40-45.

Kim, J. S. and Jung, S. H. (2016), Specification and Certification of Eco-Friendly Concrete, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 20(1), 649-650.

Korea Concrete Institute (2011), *Engineering of Concrete*, 40-43.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), *Concrete Standard Specification*, 93-95.

MT (2017), *The Paris Agreement is a wave that is hard to resist... We keep it even if United States is quit*. Seoul : Money Today. Available at : http://news.mt.co.kr/mtview.php?no=20170202082_85769735&outlink=1&ref=%3A%2F%2F.

Received : 01/15/2018

Revised : 02/21/2018

Accepted : 02/28/2018

요 지 : 시멘트 산업은 탄소배출 감축을 위한 주요 산업분야로 고려되고 있으며, 콘크리트 분야에서 시멘트 사용량 저감을 위한 노력이 진행되고 있다. 이에 대한 노력의 일환으로 시멘트의 일부를 대체하여 사용할 수 있는 산업부산물을 다량으로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 산업부산물을 사용한 콘크리트는 내구성, 친환경성 및 경제성 등의 장점을 가지고 있으나, 응결시간 지연, 초기강도 저하 등의 문제점이 있다. 따라서 이 연구에서는 시멘트의 사용량을 줄이고 산업부산물인 플라이애시를 치환하여 사용하면서도 초기강도가 저하되는 문제점을 해결하는 것을 목표로 하였다. 이에 따라, 먼저 고분말도 시멘트 사용에 의한 수화반응 촉진으로 양생온도에 관계없이 모든 재령에서 강도가 증진되는 것을 확인하였다. 이어서 고분말도 시멘트에 플라이애시를 치환하여 강도발현 특성을 검토한 결과, 초기 재령에서도 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 동등 이상의 강도 발현이 가능하였다. 또한, 플라이애시를 30%까지 치환하여도 수작·수평부재 거푸집 해체 시기를 단축할 수 있는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 고분말도 시멘트, 플라이애시, 조기강도
