CSA를 사용한 플라이애시 콘크리트의 초기강도 개선을 위한 실험연구

박지선[†] · 전찬수
한국건설기술연구원

Experiment Study on the Improvement of the Early-Age Strength of Fly Ash Concrete Using CSA

Ji-Sun Park[†] and Chan-Soo Jeon

Department of Building Research, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-Do 411-712, Korea

(2013년 11월 8일 접수: 2013년 11월 14일 최종수정 : 2013년 11월 18일 채택)

Abstract This study was performed with an aim to improve the early-age strength of concrete containing fly ash, which is known to increase the long-age strength of concrete, reduce drying shrinkage, and enhance water tightness. The composition was partially substituted with calcium sulfoaluminate (CSA), from which ettringite is actively produced, in the early stages of hydration to verify its effect on improving the early-age strength and to determine the optimal mixing ratio. For this purpose, up to 30 % of the cement weight was substituted with fly ash, and the amount of CSA substitution was 8 % of the fly ash weight. The mixtures were then fabricated into concrete specimens for compressive strength measurement and analysis of the correlation between the hydration products and the compressive strength.

Key words CSA, fly ash, early-age strength.

1. 서 론

1.1 연구의 목적

플라이애시는 콘크리트의 내구성 및 수밀성을 향상시키고 수화열을 낮추는 데는 효과적이지만 초기화성도가 낮아 콘크리트의 초기강도(재령 3일, 7일 기준강도)가 낮게 발현되는 사용성의 문제점이 있다. 따라서 건축 구조물의 경우, 주로 시멘트 질량의 10 % 정도만을 대체하여 사용하고 있으며, 댐과 같은 매스콘크리트와 콘크리트 도로포장 공사의 경우 30 %에서 50 %까지 사용하고 있다.¹⁾

따라서 이와 같은 단점을 극복하고자 국내외에서 플라이애시 콘크리트의 초기강도 개선을 위한 많은 연구가 진행되었다.²⁻⁴⁾ 주로 플라이애시의 분말도를 향상시켜 초기 화성도를 높이거나 자극제 및 감수제를 사용하여 강도개선을 하였다. 그러나 플라이애시의 분말도를 향상시

키거나 과도한 감수제 및 자극제의 사용은 현장 생산품인 콘크리트의 경제성을 확보하기 어려우며, 장기 품질의 불안정성으로 사용성에 제약이 따를 수 있다.

따라서 본 연구에서는 플라이애시 콘크리트의 경제성 확보 및 장기 강도의 안정성을 위하여 플라이애시를 시멘트 질량의 30 %까지 대체하고 이때 칼슘설포알루미네이트(Calcium Sulfoaluminate 이하, CSA)를 사용하였을 경우 초기강도 개선에 관한 효과를 검증하고, 적정량의 배합비율을 제시하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

플라이애시를 시멘트 질량의 30 %까지 대체하고 초기 강도 개선을 위하여 CSA를 사용한 콘크리트를 대상으로 경화 전후의 콘크리트를 대상으로 특성실험을 수행하였다.

굳지않은 콘크리트는 콘크리트의 공기량, 슬럼프, 응결

[†]Corresponding author

E-Mail : batsun@kict.re.kr (J.-S. Park, KICT)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

시간을 측정하여 배합비율에 따른 특성을 비교하였다. 굳은 콘크리트는 재령 3일, 7일, 28일, 91일의 압축강도를 측정하여 강도 변화를 분석하였다. 압축강도 측정값과 공극, 그리고 수화초기 발생하여 강도개선에 효과적으로 작용하는 에트링가이트 발생량과의 상관성을 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험변수

콘크리트 배합 기준은 단위시멘트량 300 kg/m^3 , 400 kg/m^3 을 기준으로 하였으며, 페이스트 및 모르타르와 동일하게 플라이애시와 CSA를 혼입하였으며, 기준배합의 슬럼프는 150 mm, 공기량은 $4.5 \pm 5 \%$ 로 설계하여 시험체를 제작하였다. 잔골재, 굵은 골재, 물의 모든 배합이 동일하다(Table 1).

2.2 사용재료

2.2.1 골재

실험에 사용한 굵은 골재는 최대치수 25 mm의 쇄석 골재로서, 표면의 미분을 세척하고 표면건조 내부포화상태로 조정하여 사용하였다. 잔골재는 밀도가 2.46 g/m^3 인 인천산 세척해사를 사용하였다.

2.2.2 공기연행제

플라이애시를 사용한 콘크리트의 내구성과 품질을 향상시키기 위하여 본 실험에서는 계면활성제를 주재료로 한 AE제를 사용하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 공기량

공기량 측정은 KS F 2421(굳지않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기함유량 시험방법)에 따라 워싱턴형 공기량 측정기를 사용하여 측정하였다.

2.3.2 슬럼프 및 플로우

KS F 2402의 방법에 따라 슬럼프 콘(밑면내경 200 mm, 윗면내경 100 mm, 높이 300 mm)에 KS F 2401(아직 굳지않은 콘크리트의 시료채취 방법)에 따라 채취한 시료의 콘크리트 슬럼프를 측정하였으며, 모르타르의 유동성은 KS L 5111(시멘트 시험용 플로 테이블)을 사용하여 15 초간 25회의 낙하시 흐름치를 측정하였다.

2.2.3 응결·경화 특성

플라이애시를 사용한 콘크리트의 응결·경화성능을 판단하기 위하여 KS F 2436(관입저항침에 의한 콘크리트 응결시간 시험방법)에 의하여 콘크리트 응결·경화 실험을 실시하였다.

2.2.4 콘크리트 블리딩 및 소성침하

콘크리트 비빔직후의 시간 경과에 따른 블리딩양 변화를 관찰하기 위하여 내경 200 mm, 높이 600 mm의 PVC 원형통에 콘크리트 침하깊이를 지속적으로 관찰할 수 있는 정밀도 0.01 mm, 측정 깊이 50 mm의 다이얼 게이지를 부착하여 비빔 직후부터 비빔 후 20시간까지의 침하깊이를 측정하여 블리딩양을 계산하였다(Fig. 1).

Table 1. Concrete mix design.

Unit cement amount (kg/m^3)	Fly ash replacement ratio (%)	CSA replacement ratio (%)	Aggregate content (%)	Water-binder ratio (%)	Mixing ratio by weight (kg/m^3)					
					Cement	Fly ash	CSA	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water
300	0				300	0		802	995	165
	10				270	27		800	990	165
	20				240	54		798	985	165
	30		44	55	210	81		796	980	165
	10	0.8			270	25	2	800	990	165
	20	1.6			240	50	4	798	985	165
	30	2.4			210	75	6	796	980	165
400	0				400	0		748	929	180
	10				360	40		740	920	180
	20				320	80		732	911	180
	30		44	45	280	120		724	903	180
	10	0.8			360	37	3	740	920	180
	20	1.6			320	74	6	732	912	180
	30	2.4			280	111	9	724	904	180

Fig. 1. Bleeding test.

2.2.5 압축강도

콘크리트 시험체는 $\varnothing 100 \times 200$ mm 시험체를 제작, $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 수중양생한 후, 소정의 재령에서 실험을 실시하였다. 시험체의 수는 배합요인별로 각기 5개씩 제작하고 평균값을 기록하였다. 압축강도 측정은 KS F 2405 (콘크리트의 압축강도 시험방법)에 따라 만능재료시험기를 사용, 매초 0.15~0.35 MPa의 재하속도로 3일, 7일, 28일, 91일 재령에서 실시하였다.

모르타르의 압축강도는 KS L 5105(수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법)에 따라 시험체를 제작하고 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 수중양생한 후, 재령 3일, 7일, 28일에서 압축강도 시험을 실시하였다.

3. 결 과

3.1 공기량 측정 결과

본 실험에서는 시멘트만을 사용한 배합의 공기량을 $4.5 \pm 2.0\%$ 으로 설정하고 플라이애시 및 CSA의 대체에 따른 공기량 차이를 관찰하기 위하여 동일한 양의 AE제를 첨가하고 이때의 공기량 변동을 관찰하였다.

Table 2에 나타난 바와 같이 시멘트만을 사용한 배합의 공기량은 4.1~4.2%를 갖는 것으로 측정되어 공기량 범위 한계인 $4.5 \pm 0.5\%$ 를 만족하였다.

일반적으로 콘크리트에 플라이애시를 첨가할 경우 미

연탄소분이 공기에 흡착하여 콘크리트내의 기포를 소멸시키는 역할을 한다. 그러나 본 실험 결과 단위시멘트량 300 kg/m^3 의 배합에서는 플라이애시의 첨가량에 따른 공기량의 하락은 없는 것으로 나타났다.

CSA를 혼합할 경우 플라이애시를 혼입하지 않은 배합에 비하여 공기량이 높게 나타났다. 또한 단위시멘트량 400 kg/m^3 배합의 경우 공기량의 저하가 크지 않았는데 이와 같이 플라이애시 혼입에도 불구하고 공기량의 저하가 없는 것은 사용된 플라이애시의 강열감량이 0.3%로서 매우 낮아 미연탄소분에 의한 공기량 저감 요소가 없기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 일반적인 플라이애시의 강열감량은 4~5%대로 미연탄소분의 함량이 높아 이들이 기포에 흡착하여 공기량을 저하시키는 요인으로 작용하나 본 실험에 사용된 플라이애시는 미연탄소분이 매우 작아 이러한 공기량 감소 원인이 없기 때문으로 판단된다.⁵⁾

CSA를 8% 배합한 시험체의 경우도 공기량의 변동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. CSA의 강열감량은 0.1% 정도로서 불순물의 함유량이 매우 낮기 때문에 공기량에 영향을 미치는 요소가 매우 적고, 결합재중 CSA가 차지하는 비율이 최대 2.4%로 매우 적기 때문에 플라이애시만을 사용한 배합과 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.

3.2 슬럼프 및 플로우

슬럼프 측정 결과는 Table 3과 같다. 단위시멘트량 300 kg/m^3 에서는 플라이애시의 혼입률이 증가할수록 슬럼프는 높아지며, CSA 8%를 첨가할 경우 플라이애시만을 사용한 배합보다 10~20 mm 정도 더 슬럼프가 개선되는 것으로 나타났다. 그러나 단위시멘트량 400 kg/m^3 에서는 플라이애시 증가량에 따른 슬럼프 개선 효과는 있으나 CSA의 첨가량에 따른 슬럼프의 변동은 크지 않은 것으로 나타났다. 단위시멘트량 400 kg/m^3 은 기준배합의 슬럼프가 160 mm로 높게 나타나 플라이애시 및 CSA 첨가량에 따른 영향이 크게 작용하지 않은 것으로 판단된다.

Table 2. Results of measuring the air content of concrete.

Specimen	Air content (%)	
	300 kg/m ³	400 kg/m ³
FA 0	4.2	4.1
FA 10	4.7	3.9
FA 20	4.3	3.9
FA 30	4.0	3.8
FA 10 C8	4.6	3.9
FA 20 C8	4.3	3.8
FA 30 C8	4.5	3.7

Table 3. Slump and flow of concrete.

Specimen	300 kg/m ³		400 kg/m ³	
	Slump (mm)	Flow (mm)	Slump (mm)	Flow (mm)
FA 0	130	230	160	270
FA 10	145	260	175	280
FA 20	160	280	190	300
FA 30	170	295	195	325
FA 10 C8	160	275	170	280
FA 20 C8	180	310	185	305
FA 30 C8	175	245	190	295

슬럼프 플로우를 측정한 결과, 단위시멘트량에 관계없이 플라이애시의 대체량이 증가할수록 플로우값은 증가하였으며, CSA를 대체할 경우에는 상대적으로 증가폭은 낮게 나타났다. 특히 플라이애시를 30 % 대체하고 CSA를 8 % 첨가하였을 경우 단위시멘트량 300 kg/m^3 에서는 245 mm, 단위시멘트량 400 kg/m^3 에서는 290 mm로 시멘트만을 사용한 배합과 거의 유사하게 나타났다. 이와 같이 CSA를 사용할 경우 플라이애시 배합보다 플로우가 낮은 것은 CSA에 포함되어 있는 석고의 점착력에 의하여 입자간 결합력이 다소 강하기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 응결시간

플록터 관입시험은 굳지않은 모르타르를 용기에 담아 일정시간이 경과할 때마다 관입침을 50 mm 깊이까지 밀어 넣었을 때 관입저항값이 3.5 MPa일 때 초결로 하고 28 MPa일 때를 종결로 하였다.

실험결과, Table 4와 같이 플라이애시의 함유량이 증가할수록 응결시간은 길어지고 초결과 종결 시간의 차도 길어진다. CSA를 첨가할 경우 응결시간은 플라이애시만을 사용할 때보다 단축되는 것으로 나타났다.

초결 후 종결까지의 시간차를 비교한 결과 시멘트를 사용한 배합이 약 2.3시간이 소요되었으며, 플라이애시를 30 % 대체할 경우 3시간이 소요되나, CSA의 배합은 2.7시간으로 응결이 빠르게 진행되었다.

3.4 콘크리트 블리딩 소성침하

Fig. 2는 단위시멘트량 300 kg/m^3 의 소성침하 깊이를 나타낸 것이다. 시멘트를 사용한 배합의 20시간 후 소성침하 깊이는 2.91 mm로 나타났으며, 플라이애시를 30 % 대체한 FA 30 배합의 소성 침하 깊이가 4.50 mm로 가장 높은 침하를 보였다. 플라이애시 대체량이 증가할수록 소성 침하량은 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 플라이애시의 양이 증가할수록 시멘트 배합에 비하여 18~54 %의 침하량이 증가한 것으로 나타났다.

Fig. 3은 단위시멘트량 400 kg/m^3 의 소성 침하 깊이를

Table 4. Results of measuring the setting time affected by the penetration resistance (Unit cement amount: 300 kg/m^3).

Specimen	Setting time (hour)		Difference (hour)
	Initial set	Final set	
FA 0	5.4	7.7	2.3
FA 10	6.0	8.3	2.3
FA 20	6.2	9.0	2.8
FA 30	7.7	10.7	3.0
FA 10 C8	5.6	7.9	2.3
FA 20 C8	5.9	8.2	2.3
FA 30 C8	7.0	9.7	2.7

Fig. 2. Results of measuring concrete bleeding (unit cement amount: 300 kg/m^3).

Fig. 3. Results of measuring concrete bleeding (unit cement amount: 400 kg/m^3).

나타낸 것으로 타설후 60분에서 시멘트 배합의 침하깊이는 1.03 mm를 보였으며, 플라이애시 대체량이 증가할수록 침하깊이는 깊어진다. 그러나 플라이애시 치환량 10 %에 CSA를 혼합할 경우 0.79 mm로 오히려 시멘트 배합에 비하여 낮은 침하량을 보였으며 120분까지 계속적인 유지를 하다가 이후에 시멘트 배합에 비하여 침하량이 깊어지는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 플라이애시 치환량이 증가할수록 블리딩량이 증가하는 것은 동일한 물결합재비를 유지할 경우 입자의 형상이 구형을 형태를 가진 플라이애시가 불-베어링 효과에 콘크리트내에서 유동성이 증가하였기 때문인 것으로판단한다. 또한 CSA를 첨가할 경우 미세한 블리딩 감소 효과가 있는 것은 수화특성에서 분석한 바와 같이 에트링가이트 생성에 따른 초기경화가 다소 빠르게 진행되었기 때문으로 판단된다. Table 5는 응결시간 측정결과를 정리한 것이다.

4. 압축강도와 수화특성과의 상관성 분석

4.1 콘크리트의 압축강도와 배합비

플라이애시 및 CSA를 혼합한 콘크리트의 압축강도 실험

Table 5. Results of measuring concrete bleeding (plastic settlement).

Duration (min)		0	10	20	30	60	90	120	180	300	600	1200
Specimen												
300	FA 0	0	-0.25	-0.46	-0.62	-1.16	-1.65	-2.18	-2.75	-2.84	-2.89	-2.91
	FA10	0	-0.34	-0.55	-0.77	-1.35	-1.91	-2.36	-3.20	-3.57	-3.62	-3.62
	FA20	0	-0.41	-0.87	-1.13	-1.85	-2.49	-2.97	-3.68	-3.92	-4.01	-4.01
	FA30	0	-0.46	-0.76	-1.02	-2.28	-3.01	-3.55	-4.10	-4.23	-4.39	-4.50
	FA10 C8	0	-0.27	-0.48	-0.70	-1.31	-1.79	-2.28	-3.04	-3.39	-3.43	-3.44
	FA20 C8	0	-0.22	-0.58	-0.96	-1.82	-2.47	-2.97	-3.56	-3.63	-3.64	-3.66
	FA30 C8	0	-0.29	-0.76	-1.22	-2.13	-2.93	-3.50	-4.01	-4.20	-4.22	-4.23
400	FA 0	0	-0.27	-0.50	-0.67	-1.03	-1.33	-1.54	-1.66	-1.68	-1.70	-1.70
	FA10	0	-0.31	-0.52	-0.91	-1.40	-1.84	-2.05	-2.16	-2.18	-2.21	-2.22
	FA20	0	-0.29	-0.58	-0.83	-1.31	-1.79	-2.17	-2.60	-2.65	-2.68	-2.70
	FA30	0	-0.40	-0.70	-0.87	-1.66	-2.29	-2.82	-3.51	-3.64	-3.67	-3.68
	FA10 C8	0	-0.14	-0.27	-0.43	-0.79	-1.10	-1.36	-1.68	-1.73	-1.75	-1.76
	FA20 C8	0	-0.32	-0.53	-0.76	-1.21	-1.57	-1.92	-2.43	-2.56	-2.59	-2.61
	FA30 C8	0	-1.23	-1.50	-1.71	-2.22	-2.61	-2.90	-3.29	-3.35	-3.40	-3.42

Table 6. Results of compressive strength.

Specimen	Unit cement amount (kg/m ³)	Fly ash mixing ratio (%)	CSA mixing ratio (%)	Compressive strength (MPa)			
				3 days	7 days	28 days	91 days
FA0	300	0	-	14.2	19.5	21.9	26.5
FA10		10	-	12.4	16.3	19.6	25.7
FA20		20	-	10.9	13.9	18.3	27.1
FA30		30	-	7.7	11.6	17.9	23.2
FA10 C8		10	0.7	14.4	18.3	23.9	29.4
FA20 C8		20	1.4	13.7	18.3	23.7	30.9
FA30 C8		30	2.2	12.1	17.2	23.3	32.7
FA0	400	0	-	19.5	23.1	30.0	37.3
FA10		10	-	17.3	22.6	27.9	29.5
FA20		20	-	15.4	19.0	26.9	32.0
FA30		30	-	14.2	18.3	25.3	35.7
FA10 C8		10	0.8	20.1	25.4	31.5	40.1
FA20 C8		20	1.6	18.9	25.2	32.2	42.5
FA30 C8		30	2.4	18.4	23.3	30.3	45.7

험결과 Table 6과 같다. 표에서와 같이 플라이애시만을 사용할 경우 압축강도는 28일까지 모든 배합이 기준 배합에 비하여 낮게 나타났으며, 재령 91일에서는 플라이애시 대체율 20%까지 시멘트 배합보다 높은 강도를 발현하였다.

4.4.1 플라이애시만을 사용한 실험체

Fig. 4에서와 같이 단위시멘트량 300 kg/m³ 배합의 3일 강도는 플라이애시 대체율 10%, 20%, 30% 일 때 시멘트 배합에 비하여 각각 87%, 76%, 54%의 강도를 발현하였으며, 재령 7일에서는 84%, 71%, 59%로 오히려 재령 3일보다 강도발현율이 낮은 경향으로 나타났다. 재령 28일에서는 89%, 84%, 82%로 재령 3일,

7일에 비하여 플라이애시 첨가량이 증가할수록 강도발현이 증가한 것으로 나타났다. 플라이애시 대체율이 10% 이상일 경우 3일, 7일 강도 하락률이 높아 구조안정성 및 콘크리트 품질에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

단위시멘트량에 따른 강도변화를 비교한 결과 단위시멘트량 400 kg/m³ 배합은 300 kg/m³ 배합에 비하여 플라이애시 첨가에 따른 강도 증진 효과가 높은 것으로 나타났다.

Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 단위시멘트량 400 kg/m³ 배합의 재령 3일 강도의 경우, 플라이애시 대체율이 10, 20, 30% 일 때 89%, 79%, 73%로 대체량 10%에서는 큰 차이점이 없으나 20, 30%로 증가할수록 강도의 하

Fig. 4. Compressive strength ratio of cement mixes (Unit cement weight: 300 kg/m³).

Fig. 6. Compressive strength ratio of cement mixes (Unit cement weight: 300 kg/m³).

Fig. 5. Compressive strength ratio of cement mixes (Unit cement weight: 400 kg/m³).

Fig. 7. Compressive strength ratio of cement mixes (Unit cement weight: 400 kg/m³).

락이 큰 것으로 나타났다. 재령 7일의 경우는 차이가 더욱 커져, 10 % 배합할 경우 단위시멘트량 400kg/m³에서는 시멘트 배합과 동일한 강도를 나타내고, 플라이애시 대체율 20 %, 30 %에서도 압축강도비가 80 % 이상을 가지고 있어 단위시멘트량 300 kg/m³에 비하여 20 % 이상 압축강도비가 상승된다.

이상과 같이 시멘트 혼화재료로써 플라이애시만을 사용할 경우 초기강도 하락 등의 원인으로 인하여 10 % 이상을 사용하기에는 어려울 것으로 판단된다. 특히 단위시멘트량이 낮은 배합일수록 플라이애시 첨가에 따른 강도 하락률이 큰 것으로 나타나 배합설계시 이를 유념하여야 할 것으로 판단된다. 또한 플라이애시 사용량이 10 % 정도일지라도 시멘트만을 사용한 배합에 비하여 3 일, 7일 강도하락 비율이 상대적으로 높게 나타났다.

4.4.2 CSA를 사용한 실험체

단위시멘트량 300 kg/m³ 배합에서는 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 CSA를 플라이애시 사용량의 8 % 혼합한

경우, 재령 3일에서는 94 %, 78 %, 71 %의 압축강도비를 나타내었으며, 재령 7일에서는 86 %, 74 %, 65 %의 강도비를 나타내었다. 이와 같이 재령 3일이 재령 7일 보다 압축강도비가 높게 나오는 것은 일반 시멘트만을 사용한 배합의 초기강도 증진율이 더욱 크기 때문인 것으로 판단된다. 재령 28일에서는 98 %, 86 %, 84 %의 강도비를 나타내어 7일 이후 압축강도의 증진이 빠르게 나타난 것을 알 수 있다. 재령 91일에서는 시멘트만을 사용한 배합과 동일한 강도를 발현하는 것으로 나타났다. 플라이애시만을 사용한 배합과 비교하였을 경우 재령 3일에서는 압축강도 증진율이 7~17 % 이상 증가한 것으로 나타났으며, 특히 플라이애시의 사용량이 많은 30 % 배합에서 17 %의 강도 증진율이 있는 것으로 나타나 CSA 첨가에 따른 강도 개선 효과가 있는 것으로 나타났다.

단위시멘트량 400 kg/m³ 배합은 Fig. 7에서 나타난 바와 같이 플라이애시 대체율이 10 %, 20 %, 30 % 일 때 재령 3일의 압축강도비가 93 %, 86 %, 78 %로 단위시멘

트량 300 kg/m^3 에 비하여 높은 강도 증진 효과가 있었으며, 특히 재령 7일의 경우 플라이애시 사용량 10% 배합은 시멘트만을 사용한 배합과 유사한 101%의 압축강도비를 가지는 것으로 나타났다. 전반적으로 단위시멘트량이 증가할수록 CSA 및 플라이애시 함유량에 따른 압축강도 증진 효과가 큰 것으로 나타났으며, CSA를 첨가할 경우 플라이애시를 사용한 배합보다 4~5%의 강도 증진 효과를 발휘하였다.

이상과 같이 CSA를 8% 첨가할 경우 플라이애시만을 대체한 배합에 비하여 재령 3일까지의 강도가 증진되는 것은 초기 에트링가이트 생성량이 플라이애시만을 사용한 배합보다 활발하여 초기에 강도 저하의 주요 원인으로 작용하는 모세관 공극의 감소와, 에트링가이트 섬유상이 강도보강에 효과적으로 작용하였기 때문으로 판단한다.

4.2 공극과 압축강도

본 실험에서는 경화체의 공극 특성을 분석함에 있어 골재에 의한 계면의 크랙이나 공극의 분포 때문에 발생할 수 있는 측정의 불균일을 최소화하기 위하여 분체에 의한 시료를 제작하였고 동일배합의 모르타르 및 콘크리트 공시체와 강도를 비교하였다.

Fig. 8과 9는 시멘트 경화체에 생성된 유효공극량을 측정 한 것으로서 콘크리트 강도에 영향을 미칠 수 있는 $3 \text{ nm} \sim 30 \mu\text{m}$ 범위의 공극량과 동일 배합의 압축강도와의 상관성을 분석한 것이다.

Fig. 8의 공극량과 압축강도를 비교한 그래프를 보면, 단위시멘트량 300 kg/m^3 의 경우 공극량이 $0.2 \sim 0.4 \text{ mL/g}$ 의 범위에 분포하고 있을 때 $9 \sim 13 \text{ MPa}$ 범위의 압축강도를 나타내고 있으며, 공극이 증가할수록 압축강도는 정비례로 낮아지는 경향으로 나타났다. 단위시멘트량 400 kg/m^3 배합은 300 kg/m^3 배합보다 상관성은 낮지만 유효공극량인 $0.2 \sim 0.4 \text{ mL/g}$ 의 범위에 일정한 경향으로 $14 \sim 19$

Fig. 8. Correlation between the compressive strength and effective porosity of concrete specimens.

MPa의 압축강도를 발현하여 공극량이 증가할수록 강도는 하락하는 경향을 보인다. 이와 같은 압축강도에 영향을 주는 유효공극량의 증가는 반대로 강도의 저하를 초래할 수 있는 요인으로 작용하는 것으로 판단되며, CSA 대체로 인한 수화생성물의 축진작용으로 공극을 감소하여 강도 개선을 할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 공극률과 압축강도와의 상관성을 나타낸 것으로 유효공극량과 마찬가지로 공극의 비율이 증가할수록 콘크리트 및 모르타르의 압축강도는 낮아지는 경향으로 나타났다.

이와 같이 공극의 대소에 따른 압축강도의 차이는 공극 내에 존재하는 모세관공극 등은 역학적으로 매우 취약한 성질을 가지고 있기 때문이다. 즉, 콘크리트 경화체에 압축력이 가해질 경우 상대적으로 취약한 공극과 골재와 경계면의 크랙 부분에서부터 파괴가 시작하기 때문으로 판단된다.

4.3 에트링가이트 생성량과 압축강도

Fig. 10은 에트링가이트 생성량과 재령 3일 압축강도와의 상관성을 분석한 것으로 에트링가이트 생성량이 증

Fig. 9. Correlation between the compressive strength and total porosity.

Fig. 10. Correlation between the compressive strength and ettringite production.

가할수록 모르타르 및 콘크리트의 압축강도가 일정하게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 재령 3일에서 에트링가이트 생성량은 압축강도와 일정한 상관성을 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 에트링가이트 수화물은 재령이 경과함에 따라 다른 수화물로 전이되기 때문에 재령 3일 이후의 에트링가이트 생성량과 압축강도를 직접적으로 비교하기는 곤란하다.

5. 결 론

1) 플라이애시 및 CSA 대체에 따른 공기량의 변동은 없으며 슬럼프는 구형의입자로 인하여 약간 높아지는 것으로 나타났다. 또한 플라이애시만을 사용할 경우 초결 및 종결 시간이 시멘트만을 사용한 배합보다 지연되지만 CSA를 첨가할수록 응결시간은 단축되는 현상이 나타났다.

2) 콘크리트 압축강도 측정결과 단위시멘트량 300 kg/m³에서 플라이애시를 30 % 대체하고 CSA를 8 % 대체할 경우 재령 3일 압축강도는 12.3 MPa로 플라이애시만을 사용한 배합에 비하여 약 30 %의 강도 증진 효과가 있는 것으로 나타났으며, 플라이애시 10 %만을 사용한 배합의 92 %까지 강도가 접근하는 것으로 나타났다. 단위시멘트량 400 kg/m³배합은 16 %의 동일 대체량에서 약 16 %의 강도 증진 효과가 있었으며, 플라이애시 10 % 배합과 비교하였을 경우 95 % 수준까지 압축강도가 접근하는 것으로 나타났다.

3) 압축강도에 영향을 주는 유효공극량과 압축강도의 상관성을 분석한 결과 공극량이 증가할수록 압축강도는

낮아지는 것으로 나타났다. 이는 CSA를 첨가함으로써 초기에 에트링가이트의 생성량이 증가하고 강도에 영향을 주는 모세관공극을 채움으로 인하여 강도가 개선된 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by KICT and funded by the Ministry of Science, ICT, and Future Planning. Project No. 2013-0142. 2013 Basic Research: Development of the high durable RC for the artificial land.

References

1. Y. K. Cho, J. H. Kim, T. Y. Hyun, Concrete & Slag, Green Solution, p. 125-154, D. B. Si, Korea Iron and Steel Association, Seoul (2012).
2. W. K. Bang, Ph. D. Thesis (in Korea), p. 72-90, Yonsei University, Seoul (1998).
3. K. R. Hwang, Ph. D. Thesis (in Japan), p. 123-157, Tokyo University, Tokyo (1999).
4. Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Canadian Electrical Association. Research and Development, High-volume flyash concrete using Canadian fly Ashes, p.78, V. Sivasundaram, Canadian Electrical Association. Research and Development, Ottawa (1994).
5. J. W. Moon, S. W. Ji and C. H. Seo, Kor. J. Arch., **17**(5), 8 (2001).