

플라이애시 및 폴리실리콘 슬러지 혼입율에 따른 제지애시 경화체의 경량 특성

Lightweight Properties of Matrix using Paper Ash according to Replacement Ratios of Fly Ash and Polysilicon Sludge

박선규¹ · 김윤미² · 이상수^{2*}Sun-Gyu Park¹ · Yun-Mi Kim² · Sang-Soo Lee^{2*}

(Received June 19, 2014 / Revised June 24, 2014 / Accepted June 28, 2014)

This experimental study considers manufacturing method of the non-portland cement matrix for the light-weight building materials using blast furnace slag, paper ash, fly ash and polysilicon sludge the industrial by-product. For the experiment, we used paper ash by means of the foaming agent and alkali activator to make non-portland cement light-weight matrix. Various specimens were prepared with different types and addition ratios of the alkali activator. Then, the properties of these specimens were investigated by compressive strength test, bulk specific gravity. As a results, it was judged that experiment results of non-portland cement matrix with specific waste resources and alkali activators were useful as basic data for mixtures design and evaluation properties of lightweight non-portland cement building material.

키워드 : 경량 건축재료, 고로슬래그, 제지애시, 플라이애시, 폴리실리콘 슬러지

Keywords : Light-weight building materials, Blast furnace slag, Paper ash, Fly ash, Polysilicon sludge

1. 서론

건설 산업에 있어서, 시멘트는 사회기반시설 구조물 및 건축물 내·외부를 형성하기 위해 가장 많이 사용되는 재료로서, 현대인의 생활에 꼭 필요한 건설재료라 할 수 있다. 그러나 시멘트는 제조 과정에서 다량의 CO₂를 발생시키며, 원료인 석회석(CaCO₃)을 소성하기 위해 약 1450℃ 가열이 필수적이므로 막대한 에너지를 필요로 하는 등 지구온난화 문제를 발생시키는 단점이 있다.

한편, 화력발전소에서 부산물로 발생하는 플라이애시와 제지공정에서 발생하는 슬러지를 소각하여 발생한 폐기물인 제지애시의 연간 발생량은 계속하여 증가하고 있지만 그 처리 방법은 해양배출, 매립 등의 방법으로 처리되고 있어 제지애시를 재활용하기 위한 연구가 필요한 실정이다. 또한 시멘트로 구성되는 기포 콘크리트는 밀도를 감소시키기 위하여 시멘트 페이스트에 별도의 발포제를 사용하여 경화체 내부에 공극을 도입하는 방법을 사용하고 있는데, 발포제는 고가인 반면 강도 및 경량성이 비교적 낮은 단점이 있다.

이에 본 연구에서는 기포 콘크리트에 사용되고 있는 시멘트 및 별도의 발포제를 대체하여 경량 패널의 심재 및 충전재로서 적합한 경량 경화체를 제조하기 위해 고로슬래그를 기반으로 제지애시와 알칼리 자극제, 물의 반응으로 수소기체를 발생시켜 경화체 내에 공극을 형성시키고 이의 강도 및 밀도 특성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 선행 실험을 통해 제지애시의 치환율과 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율을 도출하였으며, 본 실험에서는 경량 경화체의 겉보기 밀도의 감소와 강도 보완의 일환으로 플라이애시와 폴리실리콘 슬러지를 고로슬래그의 일부에 치환하여 실험을 실시하였다.

2. 선행실험 계획 및 분석

2.1 고로슬래그와 제지애시의 사용비율을 선정하기 위한 실험

본 실험에 앞서 고로슬래그와 제지애시의 사용비율을 선정하기 위해 제지애시의 치환율을 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30(%) 등 7가지

* Corresponding author E-mail: sslee111@hanbat.ac.kr

¹목원대학교 공과대학 건축공학과 (Department of Architectural Engineering, Mokwon University, Seo-Gu, Daejeon, 302-729, Korea)

²한밭대학교 건설환경조형대학 건축공학과 (Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-730, Korea)

Table 1. Result of experiment according to mixing ratios of paper ash and blast furnace slag

Mixing ratio of paper ash (%)	Unit volume weight (g/cm ³)	Bulk specific gravity (g/cm ³)	Decreasing ratio (%)	Compressive strength (MPa)		
				3days	7days	28days
Plain	2.00	1.92	4.09	12.6	17.5	24.0
5	1.91	1.16	39.37	6.1	6.6	6.8
10	1.91	1.12	41.66	4.6	6.0	5.8
15	1.91	1.21	36.72	4.6	6.5	6.1
20	1.91	1.23	35.26	4.6	6.5	6.3
25	1.90	1.17	38.31	4.6	5.8	5.3
30	1.90	1.17	38.31	4.6	5.5	5.4

수준으로 설정하여 알칼리 자극제로써 NaOH를 결합재 100g을 기준으로 17.3% 첨가하여 선형실험을 실시하였다. 시험항목은 겉보기 밀도와 단위용적질량(사용재료의 밀도와 사용된 양을 기준으로 도출), 감소율(단위용적질량에서 겉보기 밀도로 감소된 양), 압축 강도를 측정하였다.

그 결과, Table 1에 나타난 것과 같이 Plain의 겉보기 밀도가 1.92g/cm³로 감소율 4.09%를 나타내었고, 제지애시의 치환율이 5%인 경화체는 겉보기 밀도 1.16g/cm³, 감소율 39.37%, 치환율 10%인 경화체는 겉보기 밀도 1.12g/cm³, 감소율 41.66%이며, 이후 치환율이 증가함에 따라 겉보기 밀도가 증가하는 경향을 나타내었고, 10% 치환한 경화체의 겉보기 밀도가 가장 낮은 것으로 나타났다.

압축강도는 Plain의 압축강도가 24.0MPa로 가장 높았으며, 제지애시를 5% 치환한 경화체의 재령 28일 압축강도는 6.8MPa로 재령일에 따라 강도가 증가하는 반면 10~30% 치환한 경화체는 재령 7일보다 28일의 강도가 보다 낮은 압축강도를 나타내었다.

2.2 알칼리 자극제의 종류 및 첨가율을 선정하기 위한 실험

알칼리 자극제의 종류는 제지애시와 반응하여 수소기체를 발생시킬 수 있는 KOH, Ca(OH)₂, NaOH를 선정하였으며, 첨가량은 결합재 증량에 2.5, 7.5, 12.5, 17.5, 22.5, 27.5, 32.5, 37.5 (%) 등 8수준으로 설정하여 실험을 실시하였다.

그 결과는 Table 2에 나타난 것과 같이 KOH를 첨가한 경화체는 첨가율 17.5%인 경우에 겉보기 밀도 1.13g/cm³, 감소율 40.61%로 가장 낮은 겉보기 밀도를 나타내었으며, 첨가율 17.5%까지 경화체의 겉보기 밀도가 감소하는 경향을 나타내었고 이후 증가하는 경향을 나타내었다. Ca(OH)₂를 첨가한 경우는 모든 첨가율의 겉보기 밀도가 1.70g/cm³ 이상으로 KOH와 NaOH를 사용한 경화체 보다

Table 2. Result of experiment according to types of alkali activator

Division (%)	Unit volume weight (g/cm ³)	Bulk specific gravity (g/cm ³)	Decreasing ratio (%)	Compressive strength (MPa)			
				3days	7days	28days	
KOH	2.5	1.88	1.59	15.62	3.0	3.9	4.5
	7.5	1.89	1.25	33.97	2.8	4.1	4.3
	12.5	1.89	1.21	35.84	1.9	3.8	4.0
	17.5	1.90	1.13	40.61	1.9	2.6	3.0
	22.5	1.90	1.13	40.45	1.8	2.5	3.0
	27.5	1.90	1.19	37.47	3.0	3.0	3.4
	32.5	1.91	1.17	38.57	2.4	3.0	3.4
	37.5	1.91	1.26	34.15	2.6	3.6	3.7
	Ca (OH) ₂	2.5	1.88	1.74	7.74	5.2	7.3
7.5		1.89	1.76	6.92	7.1	7.8	18.0
12.5		1.90	1.78	6.38	9.0	11.4	15.6
17.5		1.91	1.80	5.80	12.5	13.2	19.0
22.5		1.92	1.81	5.87	12.6	13.7	20.4
27.5		1.93	1.83	4.95	11.3	12.4	21.2
32.5		1.94	1.87	3.68	16.8	18.3	26.0
37.5		1.95	1.87	3.98	15.2	16.9	26.2
Na OH	2.5	1.88	-	-	5.4	6.9	9.2
	7.5	1.89	1.16	38.64	1.7	2.8	3.2
	12.5	1.90	1.13	40.45	1.7	2.1	2.7
	17.5	1.90	1.22	35.93	2.5	2.7	2.9
	22.5	1.91	-	-	3.0	3.7	4.4
	27.5	1.92	-	-	3.3	4.6	5.6
	32.5	1.92	-	-	3.5	5.2	6.4
	37.5	1.93	-	-	2.8	5.2	6.8

수소기체의 발생이 적은 것으로 나타났다. NaOH를 첨가한 경화체는 KOH와 유사한 경향을 나타내었지만 보다 적은 자극제의 사용으로 낮은 겉보기 밀도를 나타내었다. 이 때의 NaOH 첨가율은 12.5%로 겉보기 밀도 1.13g/cm³, 감소율 40.45%이다.

압축강도는 KOH를 첨가한 경우는 첨가율 17.5%까지 강도가 저하되고 이후 강도가 증가하는 경향을 나타내었으며, Ca(OH)₂를 첨가한 경우는 첨가율이 높아질수록 강도가 증가하는 경향을 나타내었다. NaOH를 첨가한 경화체의 압축강도는 첨가율 2.5%인 경화체의 압축강도가 9.2MPa로 가장 큰 강도발현을 하였고, 첨가율 12.5%를 전환점으로 첨가율에 따라 강도가 증가하는 경향을 나타내었다.

이에 본 실험의 제지애시 치환율은 기초실험의 결과를 토대로 겉보기 밀도와 압축강도를 비교하여 낮은 겉보기 밀도와 높은 강도 발현 및 안정적인 강도증진을 나타낸 치환율 5%로 선정하였으며, 알칼리 자극제의 종류는 NaOH이며, 첨가율은 12.5%로 선정하였다.

Table 3. Chemical components of using materials

Using materials	Chemical component (%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Blain(cm ² /g)	Density(g/cm ³)
Blast furnace slag	34.4	14.5	0.6	41.7	6.5	-	0.4	1.2	-	4,464	2,91
Paper ash	13.0	10.1	0.9	65.7	4.4	1.7	-	-	0.4	3,600	2,70
Fly ash	54.3	21.5	5.1	10.8	1.8	1.2	-	-	-	4,125	2,18
Polysilicon sludge	41.1	3.6	1.8	30.1	0.8	-	-	-	-	7,122	1,95

3. 실험계획

3.1 사용재료

본 연구에서 경량 경화체를 제조하기 위해 사용된 산업부산물 은 고로슬래그와 제지애시, 플라이애시, 폴리실리콘 슬러지이며, 고로슬래그는 SiO₂와 CaO, MgO, Al₂O₃가 주요성분이고, 밀도 2.91g/cm³, 분말도 4,464cm²/g인 3종을 사용하였다. 제지애시는 국내의 제지 공장에서 발생하는 제지슬러지를 소각처리한 후 폐기 하는 것을 사용하였으며, 밀도 2.70g/cm³, 분말도는 3,600cm²/g 인 것을 사용하였다. 플라이애시는 SiO₂, Al₂O₃가 주요성분이며, 밀도 2.18g/cm³, 분말도 4,125cm²/g인 것을 사용하였다. 폴리실리 콘 슬러지는 태양광 발전시 사용되는 집열판의 주원료로 사용되는 폴리실리콘의 생산과정에서 발생하는 산업부산물로 밀도 1.95g/cm³, 분말도 7,122cm²/g인 것을 사용하였다. 알칼리 자극제는 순도 98%인 분말형태의 NaOH를 사용하였으며, 밀도는 2.13g/cm³인 것을 사용하였다. 사용재료의 화학적 성질은 Table 3과 같다.

3.2 실험계획

본 실험의 수준 및 요인은 Table 4에 나타난 바와 같이 결합재 조건으로써 고로슬래그와 제지애시만을 사용한 Plain과 고로슬래 그에 플라이애시를 치환한 FA, 폴리실리콘 슬러지를 치환한 PS이 며, 제지애시는 고로슬래그의 중량에 5% 치환하여 사용하였다. 플 라이애시와 폴리실리콘 슬러지는 제지애시를 치환한 고로슬래그 의 중량에 1, 3, 5, 10, 15, 20(%) 등 6수준으로 치환하였다. 알칼리 자극제는 결합재의 중량 100g을 기준으로 12.5% 첨가하였다. W/B 는 40%이며, 항온항습 조건에서 양생을 실시하였다. 측정항목은 경화체의 경량성을 검토하기 위한 밀도(겉보기 밀도와 단위용적질 량)와 압축강도이다.

3.3 실험방법

본 실험의 비빔방법은 고로슬래그와 제지애시를 용량 18ℓ 모르

Table 4. Experimental plan

Experimental factor	Experimental level	
Binder conditions	· Plain: BFS+PA · FA: (BFS+FA)+PA · PS: (BFS+FS)+PA	3
Replacement ratio of paper ash	· 5%	1
Replacement ratio of fly ash and polysilicon sludge	· 1, 3, 5, 10, 15, 20(%)	6
Alkali activator	· NaOH	1
Addition ratio of alkali activator	· 12.5%	1
W/B	· 40%	1
Curing conditions	· Relative humidity (80±5)%, Temperature (20±2)°C	1
Test items	· Density, Compressive strength,	2

BFS=blast furnace slag, PA=paper ash, FA=fly ash, and PS=polysilicon sludge

타르 믹서에 투입한 후 20rpm의 속도로 60초간 건비빔을 실시한 후 알칼리 자극제와 배합수를 혼합하여 하루 동안 안정시킨 용액을 투입하고 30rpm의 속도로 90초간 비빔을 실시한 뒤 토출하였다.

경화체의 밀도 측정은 기포코크리트의 겉보기 비중, 함수율, 흡수율 및 압축강도 시험방법(KS F 2459)에 의거하여 시험체를 제작하여 재령 28일에서 측정하였으며, 압축강도 시험방법은 시멘트 의 강도 시험 방법(KS L ISO 679)에 의거하여 시험체를 제작하여, 항온항습의 조건에서 양생을 한 후 재령 3, 7, 28일의 강도를 측정 하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 플라이애시를 사용한 경량 경화체

4.1.1 밀도특성

Fig. 1은 플라이애시의 치환율에 따른 겉보기 밀도와 단위용적

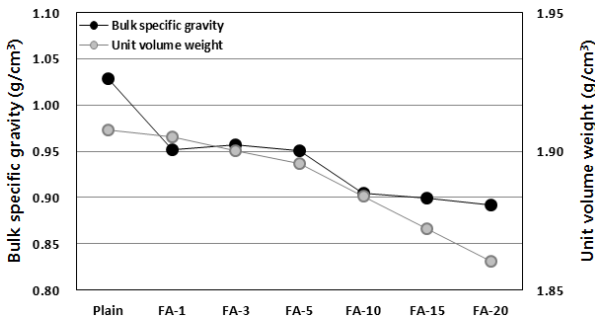


Fig. 1. Density of fly ash according to replacement ratio

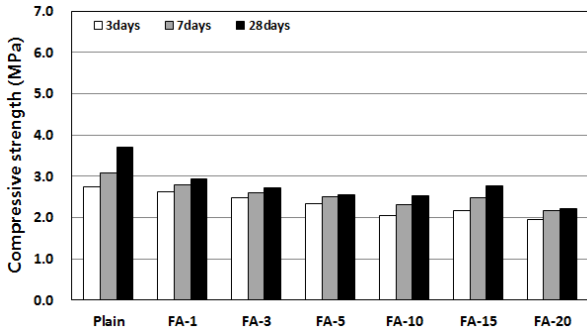


Fig. 2. Compressive strength of fly ash according to replacement ratio

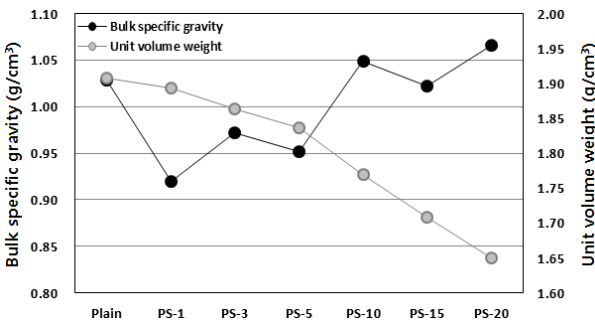


Fig. 3. Density of polysilicon sludge according to replacement ratio

질량을 나타낸 것으로 플라이애시의 사용량이 증가함에 따라 겔보기 밀도는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 단위용적질량이 치환율에 따라 감소하는 경향을 나타낸 것으로 보아 플라이애시의 사용으로 경화체의 결합재 자체의 중량이 감소되어 나타난 것으로 판단된다. 또한, 플라이애시의 사용량이 증가하면서 부피가 커지고 배합수와 접촉하는 면이 넓어져 페이스트의 점도가 높아지는 결과를 나타내어 제지애시와 NaOH의 반응으로 발생하는 수소기체를 페이스트 내에 구속하여 겔보기 밀도가 단위용적질량에서 감소한 차이보다 감소 폭이 큰 것으로 나타났으며, Fig. 5 (a)~(g)의 경화체 단면형상을 살펴보았을 때 (a) Plain과 (b)~(d)의 단면은

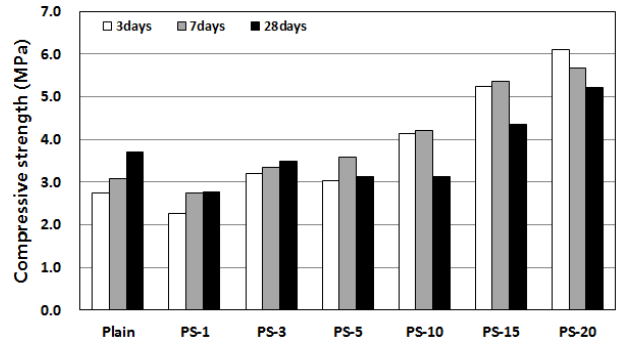


Fig. 4. Compressive strength of polysilicon sludge according to replacement ratio

발생된 공극이 독립적인 형상으로 보여 지지만, 이후 플라이애시의 사용량이 많아지면서 기포끼리 결합되어 타원형상의 공극이 불규칙한 형상으로 나타났다.

4.1.2 강도특성

Fig. 2는 플라이애시의 치환율에 따른 경량 경화체의 압축강도를 나타낸 것으로 Plain의 압축강도가 가장 높은 것으로 나타났으며, 플라이애시의 치환율에 따라 강도가 저하되는 경향을 나타내었다. 이는 밀도특성과 같이 플라이애시의 사용량이 많아지면서 경화체 내에 가둬진 수소기체의 양이 증가한 것 뿐만 아니라 플라이애시의 경화특성상 고온과 Ca(OH)₂를 필요하기 때문에 이를 충족하지 못한 본 연구에서는 강도발현에 큰 영향을 주지 못한 것으로 판단된다.

4.2 폴리실리콘 슬러지를 사용한 경량 경화체

4.2.1 밀도특성

폴리실리콘 슬러지를 사용한 경화체의 밀도는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 플라이애시보다 단위용적질량이 급격히 감소하는 것에 비하여 겔보기 밀도는 증가하는 경향을 나타내었고, PS-1과 PS-3, PS-5 경화체의 경우만 Plain보다 낮은 겔보기 밀도를 나타내었다. 이는 비표면적이 넓은 폴리실리콘 슬러지의 높은 흡수율에 의해 결합재가 흡수하는 배합수의 양이 증가하면서 페이스트의 점도는 커지나 기포발생에 필요한 수분이 감소하여 Fig. 5의 (h)~(m)에서 보여지는 경화체의 단면형상을 관찰되는 것과 같이 치환율에 따라 공극이 점차 감소하여 나타난 결과인 것으로 판단된다.

4.2.2 강도특성

Fig. 4는 폴리실리콘 슬러지의 치환율에 따른 경량 경화체의

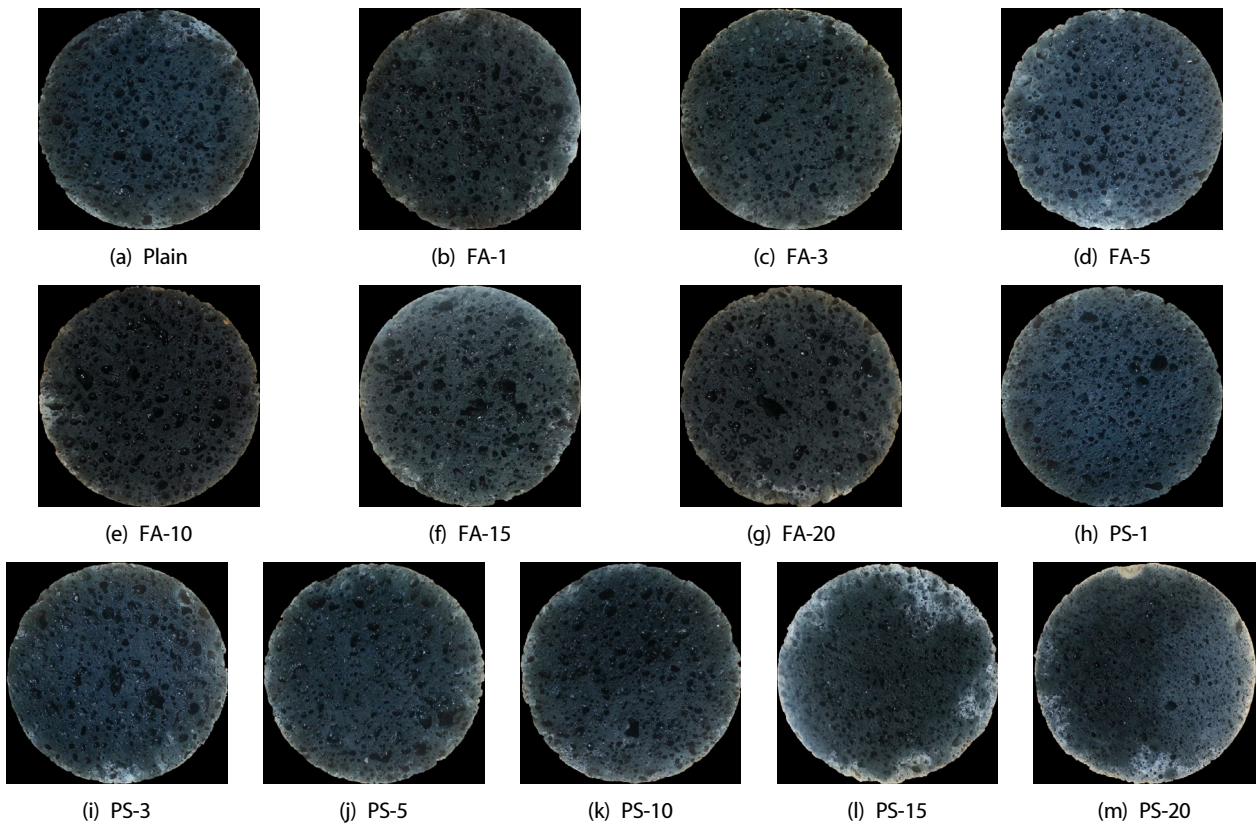


Fig. 5. Cross-sectional shape

압축강도를 나타낸 것으로 Plain의 재령 28일 강도는 3.7MPa이며, 겉보기 밀도와 마찬가지로 폴리실리콘 슬러지의 치환율에 따라 압축강도는 증가하는 경향을 나타내었으나 재령 28일의 강도는 재령 7일보다 낮은 강도를 발현하였다. 또한, PS-20은 재령일에 따라 강도가 저하되는 경향을 나타내었다. 이는 Plain과 PS-1, PS-3의 경우 온도에 의한 팽창율이 큰 수소기체의 영향을 크게 받지 않았으나, 폴리실리콘 슬러지를 5% 이상 치환하여 사용하였을 경우 경화체 내에 존재하는 수소기체의 발생과 팽창압의 증가로 고로슬래그의 사용량이 감소한 결합체의 결합력이 부족하여 나타난 결과인 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 시멘트와 발포제를 대체하여 고로슬래그와 제지애시를 사용한 경량 경화체를 제조한 실험으로 강도 및 경량성을 보완하기 위해 플라이애시와 폴리실리콘 슬러지를 고로슬래그에 치환하여 실험을 실시하였다. 그 결과, 본 연구의 범위 내에서는 다음과 같은 결론은 얻었다.

1. 경량 경화체를 제조하기 위한 제지애시의 치환율은 안정적인 강도발현과 보다 낮은 겉보기 밀도를 나타낸 5%이며, 제지애시의 치환율이 증가함에 따라 강도발현이 불안정하여 5%를 초과한 양은 사용할 수 없을 것으로 판단된다.
2. 고로슬래그와 제지애시를 사용한 경량 경화체에 적합한 알칼리 자극제의 종류는 적은 양의 사용으로 수소기체를 발생시킨 NaOH이며, 그 첨가율은 12.5%이다.
3. 경량 경화체의 강도 및 경량성을 보완하기 위해 사용한 플라이애시는 치환율에 따라 겉보기 밀도는 감소하였지만, 강도보완에는 큰 영향을 주지 못하였다.
4. 폴리실리콘 슬러지를 사용한 경화체의 겉보기 밀도는 치환율에 따라 증가하는 경향을 나타내었지만 PS-1, PS-3, PS-10은 Plain보다 낮은 밀도를 나타내었으며, PS-3의 경우 안정적인 강도발현을 나타내었다.

따라서, 본 논문의 실험결과를 토대로, 플라이애시의 사용은 겉보기 밀도를 감소시켜 경량성을 부여할 수 있는 재료이지만, 밀도 감소와 함께 강도의 감소도 있어 본 연구의 경량 경화체에 적합하

지 않지만, 폴리실리콘 슬러지를 사용한 PS-3은 경화체의 겉보기 밀도의 감소에 강도 저하가 크지 않아 경량 경화체의 제조에 있어서 폴리실리콘 슬러지를 적정량 치환한다면, 경량 경화체 제조에 적합한 재료인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 국토교통부 건설교통기술촉진연구사업[과제번호 : 12첨단도시 D01]의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Hwang, J.P., Jin, S.H., and Ann, K.Y. (2011). Estimation of CO₂ emission with raw materials and energy sources. Conference paper on Korea Concrete Institute, 785–786.
- Kim, H.D., Jin, S.J., and Kim, D.H. (2013). Generation and Recycling of Blast Furnace Slag. Conference paper on Korea Recycled Construction Resource Institute, 219–221.
- Kim, Y.M., Kim, W.J., Park, S.G., and Lee, S.S. (2014). Strength and density properties of non-cement lightweight matrix with replacement of fly ash. Conference paper on Korea Concrete Institute, 275–276.
- Lee, K.P., Lee, Y.S., Lee, S.S., and Song, H.Y. (2010). A study on the strength and flowing properties of the eco-friendly inorganic composites by using alkali accelerator and paper ash. Conference paper on Korea Concrete Institute, 41–42.
- Lim, J.G., Kim, Y.M., Park, S.G., and Lee, S.S. (2014). Strength properties of non-cement lightweight matrix with replacement ratios of polysilicon sludge. Conference paper on Korea Concrete Institute, 459–460.
- Lim, M.H., Lee, J.G., Nam, S.Y., and Ann, J.H. (2013). Paper sludge recycling technology for process sustainable of paper industry. *Ceramist*, **16(3)**, 7–14.
- Park, S.G., Kim, Y.M., and Lee, S.S. (2014). Density properties of non-cement matrix using by-product. Conference paper on Korea Recycled Construction Resource Institute, 22–23.
- Park, S.G., Kwon, S.J., Kim, Y.M., and Lee, S.S. (2013). Reaction properties of non-cement mortar using ground granulated blast furnace slag. *Journal of the Korea Contents Association*, **13(9)**, 392–399.
- Yans, K.H., Yoo, S.W., Lee, H.H., and Kim, S.C. (2013). Quality Characteristics and Environmental Impact Assessment of Alkali-Activated Foamed Concrete. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **1(2)**, 114–119.

플라이애시 및 폴리실리콘 슬러지 혼입율에 따른 제지애시 경화체의 경량 특성

기포콘크리트의 재료 중 시멘트는 제조과정 중에 CO₂를 다량 발생시키기 때문에 지구 환경적인 측면에서 커다란 문제가 되고 있지만, 아직까지 시멘트를 대체할 수 있는 대체재에 대한 연구 개발이 미흡한 실정이다. 또한, 발포제는 압축강도가 낮고 고가인 단점이 있다. 이 때문에 강도와 경량 등의 성능 개선과 친환경적인 재료의 사용이 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 시멘트와 발포제를 대체하기 위해 고로슬래그와 제지애시를 사용하여 경량 경화체를 제조하고자 하였으며, 강도 및 경량성을 보완하기 위해 플라이애시와 폴리실리콘 슬러지를 사용하여 실험을 실시하였다. 그 결과, 플라이애시를 사용한 경화체는 Plain 보다 낮은 밀도를 나타내었으나 강도보완에는 취약하였으며, 폴리실리콘 슬러지를 사용한 경우는 3%치환한 경화체가 압축강도는 Plain보다 다소 낮지만 겉보기 밀도의 감소가 큰 것으로 나타났다.