바텀애쉬를 결합재로 사용한 알칼리 활성화 시멘트 모르타르의 최적배합에 관한 연구

강수태^{1)*} · 류금성²⁾ · 고경택²⁾ · 이장화²⁾

¹⁾대구대학교 토목공학과 ²⁾한국건설기술연구원

Optimum Mix Design of Alkali-Activated Cement Mortar Using Bottom Ash as Binder

Su-Tae Kang,^{1)*} Gum-Sung Ryu,²⁾ Kyoung-Taek Koh,²⁾ and Jang-Hwa Lee²⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan 712-714, Korea

²⁾Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

ABSTRACT In this research, the possibility of using bottom ash as a binder for the alkali-activated cement mortar is studied. Several experiments were performed to investigate the variation of the material properties according to the mix proportion. In the experimental program, the flowability and compressive strength were evaluated for various values of water/ash ratio, activator/ash ratio, sodium silicate to sodium hydroxide ratio, curing temperature, and the fineness of bottom ash as the main variables. The experimental results showed that high strength of 40 MPa or greater could be achieved in 60°C high temperature curing condition with proper flowability. For 20°C ambient temperature curing, the 28 days compressive strength of approximately 30 MPa could be obtained although the early-age strength development was very slow. Based on the results, the range of optimized mix design of bottom-ash based alkali-activated cement mortar was suggested. In addition, using the artificial neural network analysis, the flowability and compressive strength were predicted with the difference in the mix proportion of the bottom-ash based alkali-activated cement mortar.

Keywords : bottom ash, alkali-activated, compressive strength, optimum mix design, artificial neural network

1. 서 론

포틀랜드 시멘트는 건설 현장에서 가장 널리 사용되는 재료이다. 널리 알려진 바와 같이 시멘트는 석회석, 점토, 석고 등의 원료들을 로터리 킬른에서 약 1,450°C 정도의 고온으로 소성하여 제조된다. 이 과정에서 많은 에너지가 소모되고, 또한 다량의 이산화탄소를 배출하게 된다. 대략적으로 시멘트 1톤을 생산하는데 약 1톤의 이산화탄소가 배출되며, 이렇게 발생한 이산화탄소는 지구 온난화 및 기상 이변 등 자연재앙의 주범으로 인식되고 있다. 따라서 최근에는 환경보전 측면에서 이산화탄소를 줄이고자 하는 노력의 일환으로, 시멘트를 다른 지속가능한 재료로 전부 또는 부분 대체하고자 하는 연구가 많이 이루어지고 있다.^{1,2)}

한편, 화력발전소에서 발생하는 부산물인 석탄회(석탄회)는 최근 활용 비율이 증가하고 있지만, 여전히 많은 양이 해

안 또는 육상에 매립되고 있으며, 매립지 확보 및 침출수 등의 경제적·환경적 문제를 야기하고 있다. 석탄회는 보통 플라이애쉬와 바텀애쉬로 나누어지는데, 재활용되는 석탄회는 대부분 플라이애쉬로 콘크리트 혼화재로 주로 사용된다. 석탄회 발생량 중 약 20%를 차지하는 바텀애쉬는 일부 채움재나 경량골재 등으로 활용될 뿐 대부분 매립되고 있다.

최근 환경문제에 대한 적극적인 대응과 함께 기존 시멘트의 대체 결합재로서 알칼리 활성화 시멘트(alkali-activated cement, AAC)^{3,4)}에 대한 관심이 국내에서도 크게 증대되고 있다.⁵⁻⁷⁾ 알칼리 활성화 시멘트는 Al과 Si 성분이 풍부한 플라이애쉬나 고로슬래그와 같은 원재료에 고알칼리성 용액을 가하여 반응을 이끌어낸다. 일반 시멘트와 비교할 때 높은 강도를 나타내며, 내화성 및 내화학성도 매우 좋은 것으로 알려져 있다.^{8,9)} 이와 같은 알칼리 활성화 시멘트는 산업부산물로 발생하는 슬래그나 석탄회를 사용하기 때문에, 일반적으로 시멘트를 제조할 때 발생하는 이산화탄소를 크게 줄일 수 있으며, 또한 시멘트를 제조하기 위한 소성 과정이 필요 없으므로 에너지를 크게 줄일 수 있다.

*Corresponding author E-mail: alphard93@gmail.com

Received February 22, 2011, Revised April 29, 2011,

Accepted May 18, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

석탄회를 이용한 알칼리 활성화 시멘트에 관한 연구는 대부분 플라이애쉬를 대상으로 하고 있다.^{10,11)} 바텀애쉬는 플라이애쉬와 마찬가지로 Al과 Si 성분이 풍부하기는 하지만, 입자가 훨씬 크고, 입도나 경도가 균일하지 못하기 때문에 결합재로 사용하기에는 어려움이 있다. 하지만 최근 몇몇 연구자들이 바텀애쉬의 반응성을 증대시키기 위하여 미세입자들만 사용하거나 바텀애쉬를 분쇄하여 미분 상태로 가공하여 알칼리 활성화 시멘트에 적용한 바 있다.¹²⁻¹⁶⁾ 대부분 양호한 강도 특성을 얻지는 못했지만, 일부 연구에서는 우수한 강도 결과를 보인 경우도 있다.

바텀애쉬를 알칼리 활성화 시멘트의 결합재로 사용할 수 있다면 현재 매립되고 있는 상당량을 건설 재료로 유용하게 활용하여 경제적·환경적으로 큰 부가가치를 창출할 수 있을 것이다. 따라서 이 연구에서는 바텀애쉬를 결합재로 사용한 알칼리 활성화 시멘트에 관한 연구의 일환으로 배합 구성비 및 양생 방법에 따른 재료 특성 변화를 파악하고, 실험에 근거한 최적 배합을 도출하고자 하였다.

2. 사용 재료 및 실험 방법

2.1 사용 재료

바텀애쉬는 하동화력발전소에서 건식 처리 방식으로 배출된 것을 사용하였다. 하동화력발전소에서는 건식 처리 시스템에 의해, 플라이애쉬와 적정 비율로 섞어서 혼화재로 사용할 수 있을 만큼 어느 정도 작은 입자 크기로 파쇄하여 배출하고 있다. 또한 하동화력발전소에서는 바텀애쉬의 미연탄소 제거에 적합한 정전기 선별법을 적용하고 2차에 걸친 연소 공정을 포함하여 미연탄소 함유량을 최소화하고 있다. 바텀애쉬의 분말도는 다음과 같이 세 가지를 고려하였다. 바텀애쉬의 분말도를 높이기 위해서 볼밀(ball mill)과정을 수행하였으며, 이 과정에는 직경 40 mm 볼 20개와 직경 30 mm 볼 50개를 혼합하여 사용하였으며, 회전속도는 95 rpm을 적용하였다. 저분말 바텀애쉬는 볼밀 처리를 하지 않은 원상태로, 분말도가 약 1,600 cm²/g이고, 중간 분말 바텀애쉬는 체가름 후 1시간 볼밀 처리를 한 것으로 분말도가 2,850 cm²/g 정도를 나타내며, 고분말 바텀애쉬는 체가름 후 3시간동안 볼밀 처리를 한 것으로, 약 4,800 cm²/g의 분말도를 가진다. Table 1은 서로 다른 분말도의 세 가지 바텀애쉬와 동일

한 발전소에서 채취한 플라이애쉬의 물리·화학적 특성을 비교하여 나타낸 것이다. 또한 Fig. 1은 입자 형상을 비교하여 보여준다. 건식 처리에 의해 얻어진 바텀애쉬의 미연탄소량은 매우 적게 나타났고, 플라이애쉬보다도 더 적은 미연탄소량을 나타내었다. KS L 5405에서 제시하고 있는 1종 및 2종 플라이애쉬에 대한 미연탄소량 기준(1종의 경우에는 3.0, 2종의 경우에는 5.0)을 모두 만족하였다. 고분말화하기 위한 볼밀 처리는 바텀애쉬의 화학적 조성에 아무런 영향을 미치지 않고, 다만 밀도, 분말도와 같은 물리적 특성만을 변화시켰다. Fig. 2는 볼밀 처리 정도(시간)에 따른 입자 분포 곡선의 변화를 보여준다.

알칼리 활성화제는 수산화나트륨(sodium hydroxide, NaOH)과 규산나트륨(sodium silicate, Na₂SiO₃)을 사용하였다. 수산화나트륨은 시약용으로 순도 98% 이상인 9M 용액을 사용하였으며 규산나트륨은 SiO₂/Na₂O의 비가 3.2이며, Na₂O = 10%, SiO₂ = 30%, 함유율은 60.4%인 용액을 사용하였다. 잔골재는 6호 규사(SiO₂ = 95%, 밀도 = 2.62 g/cm³)를 사용하였다.

Fig. 1 Particle shape of fly ash and bottom ash

Fig. 2 Particle size distribution according to the degree of ball-mill treatment

Table 1 Chemical and physical properties of fly ash and bottom ash

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI	Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	D ₅₀ (μm)	Mean Dia. (μm)
Fly ash	53.0	25.2	9.21	2.96	1.3	0.63	1.22	0.67	3.18	2.24	3489	12.26	20.87
Bottom	No-mill ⁽¹⁾	56.2	23.4	9.69	4.17	1.55	0.62	1.19	0.43	0.6	2.39	1598	51.70
	1H-mill ⁽²⁾	61.1	20	9.09	3.87	1.47	0.56	1.13	0.42	0.3	2.48	2865	27.88
	3H-mill ⁽³⁾	56.6	22.7	9.97	4.16	1.56	0.64	1.19	0.43	0.5	2.53	4841	8.47

⁽¹⁾ No-mill: without milling treatment

⁽²⁾ 1H-mill: after milling for 1 hour

⁽³⁾ 2H-mill: after milling for 3 hours

2.2 실험 계획

볼밀 처리를 하지 않은 저분말도의 바텀애쉬에 대해 예비 실험의 성격으로 사용가능성을 검토하였으나, 굵은 입자 크기로 인해 결합재로서 역할을 거의 못하고 재료 분리 현상이 나타났으며, 경화도 원활하게 진행되지 않았다. 따라서 이 실험 계획에서는 대부분 고분말도의 바텀애쉬를 대상으로 하였으며, 일부 중간 분말도의 바텀애쉬를 사용하였다. 바텀애쉬를 사용한 알칼리 활성화 시멘트의 양생 방법 및 적정 배합 구성 범위를 도출하기 위하여, 강도 및 유동성에 큰 영향을 미치는 네 가지의 실험 변수를 설정하였으며, 각각 배합 수량, 양생 온도, 바텀애쉬(bottom ash, BA)에 대한 알칼리 활성화제(alkali activator)의 비(activator/BA ratio), 규산나트륨(sodium silicate, SS)에 대한 수산화나트륨(sodium hydroxide, SH)의 중량 비(SH/SS ratio)이다. 총 4시리즈에 대해 실험을 수행하였으며, 시리즈의 순서는 알칼리 활성화 시멘트 모르타르의 강도에 미치는 영향을 고려하여, 영향이 가장 큰 것부터 순서를 정하였다. 각 배합에 대한 배합 구성은 Table 2와 같다. 배합표는 각 시리즈의 실험 결과를 토대로 순차적으로 수정하며 결정하였다.

양생 온도에 관한 시리즈를 제외한 나머지 시리즈에서 양생은 60°C에서 48시간 고온 양생을 실시하였으며, 양생 온도를 검토하기 위한 조건으로는 20°C 및 60°C, 90°C에 대해 48시간 양생을 고려하였다. 48시간 양생 이후에는 23 ± 2°C 상온에서 기건 양생을 실시하였다.

유동성 평가 실험으로는 KS L 5105 규격에 따른 플로우 실험을 실시하였으며, 강도는 재령 3일, 7일, 14일 및 28일에서 각각 시험체 3개의 압축강도로 평가하였다.

3. 실험 결과

3.1 배합 수량의 영향

플라이애쉬 또는 바텀애쉬를 사용한 알칼리 활성화 시멘트에 관한 기존의 연구 결과들¹⁰⁻¹⁶⁾을 분석한 결과, 알칼리 활성화 시멘트의 유동성과 강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 배합수인 것으로 판단하였다. 이는 일반적으로 콘크리트의 강도가 물결합재비의 함수로 나타낼 수 있는 것과 같은 것으로 볼 수 있으며, 소요의 작업성을 확보할 수 있는 범위 내에서는 배합 수량을 적게 사용하는 것이 강도에 유리할 것이다. 배합 수량을 변수로 하여 네 가지 경우에 대해 실험을 실시하였다.

Table 2에서는 각각의 시리즈의 배합 구성에 대해 총 배합 수량, 물/바텀애쉬 비, 활성화제/바텀애쉬 비 및 SS/SH 비의 계산 결과를 함께 나타내었다. 총 배합 수량은 수산화나트륨과 규산나트륨 용액에 포함되어 있는 물을 모두 포함한 것을 의미하며, 활성화제는 수산화나트륨과 규산나트륨을 함께 의미한다. 시리즈 1의 각 배합 구성에 대해 물/바텀애쉬 비로 나타내면 그 범위가 0.411에서 0.336에 해당한다.

Fig. 3은 배합 수량의 변화에 따른 유동성 및 강도의 변화를 나타낸 것이다. 실험 결과를 살펴보면 플로우 값으로 측정한 유동성은 추가된 배합 수량이 증가함에 따라 크게 향상되는 것을 알 수 있으며, 실제 시공의 용이함을 위해서는 추가 배합 수량이 80 g 정도 이상은 되어야 할 것으로 보인다. 한편, 강도 측정 결과를 살펴보면, 일반 시멘트 모르타르에서와 같이 배합 수량이 적어질수록 강도가 증가하는 것을 알 수 있으며, 다만 40 g의 추가 배합수량에 대해서는 오히려 강도가 떨어지는 것을 볼 수

Table 2 Test variables and mix design

Series	No.	Mix proportion (kg/m ³)					Total water (kg/m ³)	Amount for the batch (g)					Total water (g)	Water /BA	Activator /BA	SS/SH	Curing condition (°C, hrs)	Remark
		Sand	BA	SS	SH	W		Sand	BA	SS	SH	W						
1	1	1,047	698	174	174	70	287	2,400	1,600	400	400	160	657.6	0.411	0.5	1.0	60°C, 48hrs	The effect of additional water content
	2	1,065	710	178	178	53	274	2,400	1,600	400	400	120	617.6	0.386	0.5	1.0		
	3	1,085	723	181	181	36	261	2,400	1,600	400	400	80	577.6	0.361	0.5	1.0		
	4	1,105	736	184	184	18	247	2,400	1,600	400	400	40	537.6	0.336	0.5	1.0		
2	5																20°C, 48hrs	The effect of curing temperature
	6	1,085	723	181	181	36	261	2,400	1,600	400	400	80	577.6	0.361	0.5	1.0	60°C, 48hrs	
	7																90°C, 48hrs	
3	8	1,054	703	140	140	114	289	2,400	1,600	320	320	259	657.1	0.411	0.4	1.0	60°C, 48hrs	The effect of alkali activator/ bottom ash ratio
	9	1,047	698	174	174	70	287	2,400	1,600	400	400	160	657.6	0.411	0.5	1.0		
	10	1,040	694	208	208	26	285	2,400	1,600	480	480	60	657.1	0.411	0.6	1.0		
	11	1,035	690	229	229	0	284	2,400	1,600	530	530	0	659.3	0.411	0.66	1.0		
4	12	1,039	693	225	225	3	283	2,400	1,600	520	520	6.3	653.1	0.408	0.65	1.0	60°C, 48hrs	The effect of SH/SS ratio
	13	1,041	694	150	300	0	283	2,400	1,600	347	693	0	653.1	0.408	0.65	0.5		
	14	1,037	691	300	150	5	282	2,400	1,600	693	347	12.5	653.1	0.408	0.65	2.0		
	15	1,036	691	337	113	7	282	2,400	1,600	780	260	15.6	653.1	0.408	0.65	3.0

Fig. 3 Influence of water content on the flowability and compressive strength

있다. 이와 같은 결과는 과부족한 배합 수량으로 인해 작업성이 저하되고 충분한 다짐이 이루어지지 못했기 때문으로 판단된다. 시리즈 1 실험 결과로 볼 때, 추가적인 배합 수량은 80 g 전후로 줄여서 사용하는 것이 유동성의 큰 손실 없이 강도 측면에서 훨씬 유리할 것으로 판단된다.

3.2 양생 온도의 영향

석탄회를 기반으로 하는 알칼리 활성화 시멘트 모르타르 또는 콘크리트는 반응을 활성화시키기 위하여 대체적으로 높은 온도를 제공한다.¹⁰⁾ 일반적으로 상온에서는 반응성이 미약하여 강도가 크게 발현되지 않는 문제점을 가지고 있다. 하지만 구조물 적용성이나 경제성을 고려할 때, 상온 또는 되도록 상온에 가까운 고온에서 양생을 하는 것이 유리할 것으로 생각된다. 따라서 이에 대한 검토가 반드시 필요하다. 이와 함께 온도가 증가함에 따른 강도 증진 효과에 대해서도 검토가 요구된다. 실험은 상온으로 20°C, 그리고 60°C와 90°C에 대해 수행하였다.

실험 결과는 Fig. 4와 같다. 20°C에서는 7일, 14일 재령에서 강도가 거의 발현되지 않았으며, 28일이 되었을 때는 강도가 약 21 MPa 정도로 발현이 되었다. 일반적으로 사용되는 콘크리트의 최소 설계기준강도를 감안할 때 강도에 대한 요건을 충족시키지 못하며, 특히 초기재령에서의 강도 발현이 느려서 공기가 늘어나는 문제점을 일으킬 것으로 보인다. 따라서 상온 양생이 가능하기 위해서는 강도의 향상과 함께 초기 강도 발현을 촉진시키는 방안이 요구된다.

반면, 60°C와 90°C에 대해서는 초기 7일 재령에서 대부분의 강도 발현(75% 이상)이 이루어지고 있으며, 강도가 약 30 MPa 이상을 나타내는 것을 볼 수 있다. 그리고 60°C와 90°C의 결과를 비교해 보면, 60°C에 비해 더 고온인 90°C로 고온 양생을 했을 때 반응활성화에 따른 강도 증진은 전혀 없으며, 오히려 강도가 약간 저하되는

Fig. 4 Influence of curing temperature on the compressive strength

현상을 확인할 수 있다. 따라서 실험 결과만을 근거하여 판단해 볼 때, 양생 온도 60°C 근처에서 양생했을 때 강도 발현이 가장 양호할 것으로 예상된다.

3.3 활성화제/바텀애쉬 비의 영향

알칼리 활성화 시멘트의 반응 메커니즘은 석탄회(바텀애쉬 또는 플라이애쉬) 및 고로슬래그 등 결합재의 Al과 Si 성분을 고농도의 알칼리 활성화제에 의해 용해시켜 경화되는 것을 기본으로 하고 있다. 알칼리 활성화는 고알칼리 환경 하에서 Si-O-Al-O 합성체를 만드는 다양한 알루미늄-규산 산화물들 사이의 화학적 반응으로,^{3,4)} 비록 알칼리 활성화에 대한 화학 반응 기구는 아직 명확하게 밝혀지지는 않았지만 석탄회 내에 포함되어 있는 Al과 Si 성분과 알칼리 활성화제 내에 존재하는 Si, OH⁻, H₂O가 주된 메커니즘의 화학 성분으로 작용하며, 화학적 반응을 최대화하는 적절한 성분비가 분명히 존재할 것이다. 따라서 이에 대한 검토가 필요하며, 먼저 규산나트륨과 수산화나트륨 용액이 동일한 비로 구성될 때, 이들 알칼리 활성화제의 배합비(바텀애쉬에 대한 중량비)가 미치는 영향을 파악해 보았다.

그 결과를 살펴보면 Fig. 5와 같다. 바텀애쉬에 대한 활성화제의 중량비를 0.4에서 0.7까지 변화시켰을 때, 플로우는 0.4일 때 약 190 mm 정도이고, 중량비가 커짐에 따라 증가하여 0.7에서는 약 220 mm를 나타내었으며, 이러한 결과는 일반적인 알칼리 활성화 모르타르의 경향과는 다소 상반되는 결과이다. 유동성 측면에서는 고려한 배합 범위 내에서 큰 문제가 없는 것으로 나타났다. 압축강도 결과를 살펴보면 재령에 따른 강도 발현 특성은 비슷한 경향을 나타내었으며, 바텀애쉬에 대한 활성화제의 비가 증가함에 따라 재령별 압축강도가 대부분 증가하는 것으로 나타났고, 재령 28일 압축강도는 0.6일 때가 가장 높은 것으로 나타났다.

Fig. 5 Influence of activator/ash ratio on the flowability and compressive strength

3.4 규산나트륨/수산화나트륨 비의 영향

알칼리 활성화 시멘트의 반응성 및 강도 발현은 규산나트륨(sodium silicate, SS)에 대한 수산화나트륨(sodium hydroxide, SH)의 중량비(SH/SS ratio)에 따라서도 크게 영향을 받는다. 따라서 SS/SH의 비를 다르게 하여 유동성 및 강도를 평가하였다. Table 2에서 이와 관련한 시리즈의 배합은 앞에서의 시리즈 1~3의 결과를 종합적으로 반영하였으며, 다만 SS/SH 비의 영향만을 평가하기 위해 총 배합 수량은 다소 많이 적용되었다. 네 가지 SS/SH 비에 대해 총 배합 수량, 물/바탕애쉬의 비, 활성화제/바탕애쉬의 비는 일정하게 하였다. 실험에는 분말도 약 3,000 cm²/g 및 4,800 cm²/g의 바탕애쉬를 사용하였다.

Fig. 6은 분말도 3,000 cm²/g의 바탕애쉬에 대해 고온양생을 적용하여 제조한 알칼리 활성화 시멘트 모르타르

Fig. 6 Influence of SS/SH ratio on the flowability and compressive strength (with the fineness of 3,000 cm²/g and high temperature curing)

의 유동성과 재령에 따른 강도 변화를 나타낸 것이다. 실험 결과를 살펴보면 SS/SH의 비가 1.0일 때 강도가 가장 크게 나타났으며, 유동성은 SS/SH의 비가 2.0일 때가 가장 좋은 것으로 나타났다. 강도의 발현은 초기 3일 재령에서 28일 강도의 약 70에서 80%가 발현되었으며, 분말도 3,000 cm²/g의 바탕애쉬를 사용하여도 재령 28일에서 약 40 MPa 이상의 강도를 발현하는 데는 문제가 없는 것으로 나타났다. 따라서 고분말을 얻기 위한 장시간의 불밀 처리 등의 입도 개선 공정으로 인한 경제성 저하의 문제를 어느 정도는 해소할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 분말도 4,800 cm²/g의 바탕애쉬에 대해 고온양생을 적용하여 제조한 알칼리 활성화 시멘트 모르타르의 유동성과 재령에 따른 강도 변화를 나타낸 것이다. 분말도 3,000 cm²/g에 대한 결과와 마찬가지로 SS/SH의 비가 1.0일 때 강도에 가장 유리하게 작용하였으며, 유동성은 SS/SH의 비가 작을수록 좋게 나타났다. SS/SH의 비가 0.5인 경우를 제외하고는 28일 재령 압축강도가 40 MPa를 상회하는 것을 알 수 있으며, SS/SH의 비가 1.0인 경우에는 압축강도가 약 65 MPa까지 이른다. 재령에 따른 강도 발현 특성은 SS/SH가 3.0일 때를 제외하고는 초기 재령에서 강도 발현 정도가 분말도 3,000 cm²/g일 때에 비해 훨씬 큰 것으로 나타났다. 분말도 4,800 cm²/g의 경우에는 SS/SH가 1.0일 때 유동성 및 강도 측면에서 가장 좋은 것으로 나타났다.

Figs. 6과 7에서 볼 때, SS/SH의 비가 1.0보다 작아질 경우에는 강도가 급격히 저하됨을 예상할 수 있으며, 약 1.0에서 2.0 사이의 값을 사용하는 경우에 대체로 만족하는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

분말도 3,000 cm²/g 및 4,800 cm²/g의 바탕애쉬에 대해 고온양생을 실시한 경우의 압축강도 결과가 60 MPa 이상을 나타냄을 고려하여, 상온(20°C)에서의 강도 발현 가

Fig. 7 Influence of SS/SH ratio on the flowability and compressive strength (with the fineness of 4,800 cm²/g and high temperature curing)

4. 분 석

4.1 바텀애쉬를 사용한 알칼리 활성화 시멘트 모르타르의 최적 배합

실험 결과로부터 이 연구에서 고려한 9 M의 NaOH 용액과 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 의 비가 3.2이며 함수율이 60.4%인 규산나트륨 용액을 사용할 경우에 대해 다음과 같은 대략적인 적정 배합을 제시할 수 있을 것이다. 분말도 $3,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이상의 바텀애쉬를 사용할 경우, 물/바텀애쉬의 비가 0.4 전후이고, 활성화제/바텀애쉬의 비는 0.6에서 0.7정도이며, SS/SH의 비로 약 1.0를 적용했을 때, 180 mm 이상의 플로우 값을 가지는 유동성과 40 MPa 이상의 압축강도를 동시에 만족시킬 수 있는 알칼리 활성화 시멘트 모르타르를 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 NaOH와 규산나트륨의 특성 변화를 고려하여 보다 일반화한 배합 구성을 제시할 필요가 있다. 이를 위해서 SS/SH의 비를 $\text{Na}^+/\text{Si}^{4-}$ 비로 다시 나타내면 그 값이 약 4.6(엄밀하게는 4.58)일 때와 동일한 개념을 가진다. 따라서 이 값을 적용하면, NaOH의 몰농도 및 규산나트륨의 다양한 화학적 구성에 상관없이 일반화된 배합 구성과 보다 신뢰성 있는 알칼리 활성화 시멘트 모르타르의 재료 특성을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 인공신경망 분석법을 이용한 유동성 및 강도 예측

이와 함께 실험 결과를 바탕으로 인공신경망 분석법을 적용하여 바텀애쉬를 이용한 알칼리 활성화 시멘트의 배합 구성에 따른 유동성 및 압축강도의 변화를 예측해 보고자 시도해 보았다. 최근 인공신경망 분석법은 콘크리트의 재료 특성 예측 및 최적 배합 도출 등의 연구에 많이 이용되고 있다.^{17,18)}

인공신경망의 입력층 변수는 실험에 사용한 배합 구성을 근거로 설정하였다. 양생 조건은 60°C , 48시간을 적용한 실험 결과만을 고려하여, 양생 조건은 변수로 고려하지 않았으며, 실험에서 사용한 변수 중 잔골재량과 바텀애쉬의 배합량이 일정했기 때문에 수산화나트륨, 규산나트륨 및 추가 배합 수량을 입력층 변수값으로 사용하였다. 출력층 목표 변수로는 플로우와 28일 압축강도를 사용하였다. 활성화 함수로는 은닉층에 대해서는 쌍곡선 탄젠트 함수를 사용하였으며, 출력층에 대해서는 선형 함수를 적용하였다. Hechet-Nielsen,¹⁹⁾ Barron²⁰⁾ 등의 연구에 따르면, 은닉층 활성화 함수로 쌍곡선 탄젠트 함수를 사용할 경우 하나의 은닉층만으로도 충분히 정확한 예측 결과를 얻을 수 있기 때문에, 이 연구에서도 한 개의 은닉층만을 고려하였다. 최적화는 은닉층 노드 수를 변화시켜가면서 수행하였으며, 노드 수 변화에 따른 출력층 값의 오차 비교를 통해 은닉층 노드 수와 최적의 결과값을 결정하였다. 한편 은닉층의 노드 수 결정은 이를 위해서는 실험을 통해 제공되는 데이터베이스가 충분해야

Fig. 8 Influence of SS/SH ratio on the flowability and compressive strength (with the fineness of $3,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ and ambient temperature curing)

능성에 대해 추가적인 실험을 수행하였다. 실험 조건은 Table 2와 동일하게 적용하였다. 그 결과는 Figs. 8과 9와 같다. 실험 결과를 살펴보면, 두 경우 모두 재령 3일 및 7일에서 강도 측정이 불가능하였으며, 재령 14일에서야 비로소 유효한 강도값을 얻을 수 있었다. 고온 양생에서와 같이 분말도 $3,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 바텀애쉬를 사용할 때보다 $4,800 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 바텀애쉬 사용할 경우에 강도가 더 크게 나타났다. 강도가 최대가 되는 SS/SH 비는 분말도 $3,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 경우에는 2.0일 때, 분말도 $4,800 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 경우에는 1.0일 때로 나타났다. 분말도 $4,800 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 경우에는 재령 28일에 압축강도 30 MPa를 얻을 수 있었으며, 따라서 초기 강도 발현에 대한 개선이 이루어진다면, 상온에서도 충분히 제조가 가능할 것으로 기대된다.

Fig. 9 Influence of SS/SH ratio on the flowability and compressive strength (with the fineness of $4,800 \text{ cm}^2/\text{g}$ and ambient temperature curing)

하지만, 이 연구에서 수행한 실험 결과가 많이 부족한 문제가 있었다. 따라서 실험 결과를 임의적으로 16배로 늘려서 총 176개의 실험 결과로 반영하는 방법을 선택했다. 확장된 실험 결과를 10회에 걸쳐 학습 데이터 154개와 검증 데이터 22개로 랜덤하게 분류하여, 학습 데이터에 대해 최적화를 수행한 후 그 결과로부터 검증 데이터에 대해 예측 오차를 구하였다. 은닉층의 노드 수를 1개에서 7개까지 변화시켰을 때, 노드 수가 4개일 때가 예측 오차가 가장 적은 것으로 나타났으며, 은닉층 노드 수 4개에 대한 분석 결과로부터 배합 구성에 따른 플로우와 압축강도의 변화 예측 결과를 얻었다.

Figs. 10과 11은 알칼리 활성화제 용액 외에 추가적인 배합 수량이 더해지지 않을 경우에 대해, 수산화나트륨과 규산나트륨 용액의 사용량 변화에 따른 플로우와 압축강도의 변화를 나타내고 있다. 물론 학습에 사용된 데이터베이스가 매우 제한적이고, 입력층 변수값의 영역 외, 즉 수산화나트륨 용액 사용량 260~693 g 범위와 규산나트륨 용액 사용량 320~780 g까지의 범위 외에서 예측의 정확성을 신뢰할 수 없음을 고려하더라도 바텀애쉬를 사

용한 알칼리 활성화제 시멘트 모르타르의 배합 구성에 따른 유동성과 압축강도를 예측하고, 요구되는 두 가지 물성을 고려한 배합을 도출하는데 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 향후 이와 관련된 충분한 양의 데이터베이스가 확보된다면 보다 신뢰성 있는 해석 결과를 얻을 수 있을 것이며, 따라서 최적 배합이나 유동성 및 강도를 예측하는데 훨씬 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 알칼리 활성화제 시멘트 모르타르에 대한 바텀애쉬의 적용성을 평가하였으며, 배합 구성에 따른 재료 특성 변화를 파악하기 위한 실험을 수행하였으며, 실험 결과로부터 최적화된 배합을 도출하였다. 알칼리 활성화제 시멘트 모르타르 제조에 사용하기 위해서는 우선 바텀애쉬의 적절한 가공, 정제 및 미분 과정을 필요로 한다. 건식처리방식으로 가공된 바텀애쉬는 플라이애쉬와 같은 분말도로 미분 과정을 거친 후에는 플라이애쉬와 똑같이 시멘트 대체재로서 재활용될 수 있을 뿐만 아니라, 알칼리 활성화 콘크리트의 결합재로도 충분히 활용이 가능함을 물리적·화학적 특성 분석과 알칼리 활성화 시멘트 모르타르의 재료 특성 평가를 통해 확인하였다.

이 연구를 통해 강도 및 유동성 측면에서, 시멘트를 결합재로 사용한 모르타르를 대체할 수 있을 만큼의 소요성능을 확보하는 배합 구성을 제시하였다. 분말도 $3,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 이상의 바텀애쉬를 사용할 경우, 물/바텀애쉬의 비가 0.4 전후이고, 활성화제/바텀애쉬의 비는 0.6에서 0.7정도이며, 알칼리 활성화제의 $\text{Na}^+/\text{Si}^{4+}$ 의 비로 약 4.6을 적용했을 때, 180 mm 이상의 플로우 값을 가지는 유동성과 고온양생 시 40 MPa 이상의 압축강도를 동시에 만족시킬 수 있는 알칼리 활성화 시멘트 모르타르를 제조할 수 있음을 확인하였다. 고분말도의 바텀애쉬 사용은 강도 향상에 도움이 되며, 분말도 $4,800 \text{ cm}^2/\text{g}$ 의 바텀애쉬를 사용할 경우에는 초기 강도 발현에는 다소 문제점을 안고 있지만 상온 양생으로도 재령 28일 압축강도가 30 MPa를 상회하는 결과를 얻을 수 있었다.

마지막으로 실험 결과를 토대로 인공신경망 분석법을 이용하여, 제한적이지만 수산화나트륨과 규산나트륨 용액 사용량을 변수로 하여 바텀애쉬를 사용한 알칼리 활성화 시멘트 모르타르의 배합 구성 변화에 따른 유동성 및 압축강도의 변화를 예측해 보았다.

감사의 글

이 연구는 한국에너지기술평가원 전력산업원천기술개발사업(과제번호: 20101020100180) 및 한국전선기술연구원의 주요사업(과제번호: 2011-0083-1-1)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Fig. 10 The variation of flowability with various SS and SH contents

Fig. 11 The variation of compressive strength with various SS and SH contents

참고문헌

1. 이상수, 송하영, 이승민, “콘크리트 특성에 미치는 고분말도 플라이애쉬의 치환율 및 물-결합재비 영향에 관한 실험적 연구,” 콘크리트학회 논문집, 21권, 1호, 2009, pp. 29~35.
2. 이광명, 권기현, 이회근, 이승훈, 김규용, “고로슬래그를 함유한 콘크리트의 자기수축 특성,” 콘크리트학회 논문집, 16권, 5호, 2004, pp. 621~626.
3. Shi, C., Krivenko, P. V., and Roy, D., *Alkali-Activated Cements and Concretes*, New York, Taylor & Francis, 2006.
4. Davidovits, J., *Geopolymer Chemistry & Applications*, Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France, 2008.
5. 양근혁, 송진규, “알칼리 활성화에 의한 무시멘트 콘크리트의 구조 성능 및 적용,” 콘크리트학회지, 19권, 2호, 2007, pp. 42~48.
6. 조병완, 박민석, 박승국, “알칼리 활성화에 의한 플라이애쉬 모르타르의 강도 발현 및 경화 메커니즘,” 콘크리트학회 논문집, 18권, 4호, 2006, pp. 449~458.
7. 강현진, 류금성, 고경택, 강수태, 박정준, 김성욱, 이장화, “시멘트를 사용하지 않은 플라이애쉬 알칼리 활성화 모르타르의 압축강도에 미치는 알칼리 활성화제 및 양생조건 영향,” 자원리싸이클링, 18권, 2호, 2009, pp. 39~50.
8. Roy, D. M., “Alkali-Activated Cements, Opportunities and Challenges,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 2, 1999, pp. 249~254.
9. Palomo, A., Macias, A., Blanco, M. T., and Puertas, F., “Physical, Chemical and Mechanical Characterisation of Geopolymers,” In *Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement*, 1992, pp. 505~511.
10. Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., and Rangan, B. V., “On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 101, No. 6, 2004, pp. 467~472.
11. Rees, C. A., Provis, J. L., Lukey, G. C., van Deventer, J. S. J., “The Mechanism of Geopolymer Gel Formation Investigated through Seeded Nucleation,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 318, 2008, pp. 97~105.
12. 조병완, 구자갑, 박승국, “알칼리 활성화에 의한 Fly ash와 Bottom ash의 경화 특성,” 대한토목학회논문집, 제 25권, 2A호, 2005, pp. 289~294.
13. 오동욱, 김백중, 이종구, 강경인, “알칼리 활성화에 의한 Bottom Ash의 경화 특성에 관한 실험적 연구,” 한국건축시공학회 2008년 추계학술발표대회 논문집, 8권, 2호, 2008, pp. 103~106.
14. Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., and Ratanasak, U., “Comparative Study on the Characteristics of Fly ash and Bottom ash Geopolymers,” *Waste Management*, Vol. 29, 2009, pp. 539~543.
15. Sathonsaowaphak, A., Chindaprasirt, P., and Pimraksa, K., “Workability and Strength of Lignite Bottom ash Geopolymer Mortar,” *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 168, No. 1, 2009, pp. 44~50.
16. Slavik, R., Bednarik, V., Vondruska, M., and Nemec, A., “Preparation of Geopolymer from Fluidized Bed Combustion Bottom ash,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 200, 2008, pp. 265~270.
17. Lee, S. C., “Prediction of Concrete Strength Using Artificial Neural Networks,” *Engineering Structures*, Vol. 5, 2003, pp. 849~857.
18. 이방연, 김재홍, 김진근, “최소 볼록 집합을 이용한 데이터베이스 기반 콘크리트 최적 배합,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 5호, 2008, pp. 627~634.
19. Hecht-Nielsen, R., “Theory of the Backpropagation Neural Network,” *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks*, USA, Vol. 1, 1989, pp. 593~605.
20. Barron, A. R., “Universal Approximation Bounds for Superposition of a Sigmoidal Function,” *IEEE Transactions of Information Theory*, Vol. 39, No. 3, 1993, pp. 930~945.

요 약 이 연구에서는 알칼리 활성화 시멘트 모르타르에 대한 결합재로서 바텀애쉬의 적용성을 평가하였으며, 배합 구성에 따른 재료 특성 변화를 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 바텀애쉬를 사용한 알칼리 활성화 시멘트 모르타르 실험에서는 물/바텀애쉬 비, 활성화제/바텀애쉬의 비, 수산화나트륨에 대한 규산나트륨의 비, 양생 온도, 바텀애쉬의 분말도를 주된 실험 변수로 하여 유동성과 강도 실험을 수행하였다. 그 결과, 60°C 고온 양생을 할 경우에는 적절한 유동성과 함께 40 MPa 이상의 압축강도를 얻을 수 있음을 확인하였으며, 20°C 상온 양생 시에도 초기 강도 발현은 매우 느리지만 재령 28일 강도 30 MPa 정도가 발현되었다. 또한 실험 결과로부터 바텀애쉬를 사용한 알칼리 활성화 시멘트 모르타르의 적정 최적 배합 범위를 도출하였으며, 이와 함께 실험 결과를 바탕으로 인공신경망 분석법을 적용하여 배합 구성 변화에 따른 유동성 및 압축강도의 변화를 예측하였다.

핵심용어 : 바텀애쉬, 알칼리 활성화, 압축강도, 최적 배합, 인공신경망