



잔골재 표준입도를 고려하여 조파쇄 바텀애시를 혼입한 일반강도 모르타르의 성능

김형기^{1)*}

¹⁾조선대학교 건축학부

Properties of Normal-Strength Mortar Containing Coarsely-Crushed Bottom Ash Considering Standard Particle Size Distribution of Fine Aggregate

Hyeong-Ki Kim^{1)*}

¹⁾School of Architecture, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

ABSTRACT Properties of normal-strength mortar containing coarsely-crushed coal bottom ash considering standard particle size distribution of fine aggregate were investigated. Mortar containing raw bottom ash was applied as a reference. By crushing the bottom ash with a particle size larger than fine binder but smaller than fine aggregates, i.e., coarse-crushing, water absorption and specific gravity of the particles could be controlled as similar levels to those of natural fine aggregates. Workability and strength of the mortar were not changed and even increased when the coarsely-crushed bottom ash was added considering standard particle size distribution in Standard Specification for Concrete, while those were decreased when raw bottom ash was added without any treatment. When a replacement ratio of coarsely-crushed bottom ash was less than 30 vol.%, there were no significant decrease in dynamic modulus of elasticity and dry shrinkage of the mortar.

Keywords : coal bottom ash, standard particles size distribution, coarse crushing, normal-strength mortar, workability

1. 서 론

최근 원자력발전에 대한 사회적 우려로 인해 국내 여러 곳에서 석탄 화력발전소의 증설계획이 발표되고 있다. 석탄 화력발전소 건설 시 가장 문제가 될 수 있는 요인 중 하나는 플라이애시, 바텀애시 등의 석탄연소부산물(Coal combustion products, CCPs)의 발생과 이에 대한 처리이다.¹⁾ 이 부산물들을 시멘트계 건설재료에 혼입하면, 시멘트의 중금속 고정 및 피복효과로 인해 부산물로부터의 중금속 용출을 최소화 할 수 있다.²⁾ 석탄연소부산물 중 약 80%를 차지하고 있는 플라이애시의 경우 콘크리트의 성능 개선 및 이산화탄소 발생량 감소 측면에서 결합재로 무난히 활용되고 있는 반면, 부산물 발생량의 약 15% 수준인 바텀애시는 여러 가지 기술적 한계로 인해 콘크리트 용 골재로 활발히 활용되지 못하고 있다.²⁾ 이로 인해 해

마다 대량의 바텀애시가 재활용되지 못한 채 화력발전소 인근 매립지(Ash pond)에 매립되고 있다.

바텀애시를 콘크리트에 활용하기 어려운 이유 중 하나는, 바텀애시 입자의 독특한 형상이 콘크리트의 성능을 감소시킬 수 있다는 점이다.^{3,4)} 바텀애시는 다공질일 뿐 아니라 표면 공극의 크기가 크기 때문에, 바텀애시 자체의 흡수율 측정 및 함수율 관리가 어렵다. 또한, 바텀애시의 표면은 매우 거칠기 때문에, 굳지 않은 콘크리트 내에서 입자간 맞물림(Interlocking)이 발생하며 이는 콘크리트의 작업성 및 펌프압송성을 감소시키는 요인이 된다.³⁾ 그리고 바텀애시를 혼입한 콘크리트는 유동성의 경시변화 폭이 크기 때문에 품질관리가 어렵게 된다.⁴⁾

본 연구에서는 이러한 공학적 문제를 해결하기 위해 바텀애시의 입도를 줄이는 방법을 고려하였다. 바텀애시를 파쇄 또는 분쇄하게 되면 골재의 공극량이 줄어들어 흡수율이 감소할 뿐 아니라 상대적으로 시멘트 페이스트 내에서 입자간 맞물림의 발생이 줄어들어 워커빌리티 감소 문제가 해결되는 것으로 알려져 있다.⁵⁾ 기존에도 바텀애시를 분쇄하여 콘크리트 및 모르타르에 사용하는 연구가 일부 진행되었으나, 이들의 대부분은 바텀애시를 최

*Corresponding author E-mail : hyeongki@chosun.ac.kr

Received January 30, 2015, Revised June 11, 2015,

Accepted June 18, 2015

©2015 by Korea Concrete Institute

대입경 150 μm 이하 혹은 비표면적 1500 cm^2/g 이상으로 미분쇄(Fine grinding)하여 결합재로 활용한 것이었다.^{6,7)} 그러나 미분쇄 바텀애시는 플라이에 비해 콘크리트의 성능 측면에서 추가적인 장점이 없으며, 오히려 미분쇄로 인한 에너지 소모가 발생한다는 단점이 있다.^{6,7)}

한편, 최대입경 600 μm 이하 수준으로 조파쇄(Coarse crushing)한 바텀애시를 동일 입도의 잔골재 미분과 치환하여 사용할 경우, 충전재(Filler) 효과와 포졸란 반응성으로 인해 콘크리트와 모르타르의 강도개선 및 내구성 증가 등의 이익이 발생할 수 있다. 뿐만 아니라, 파쇄 자체에 소모되는 에너지를 극소화 할 수 있다는 장점이 있다.

국내의 콘크리트 표준시방서 내 골재 표준규격에 따르면, 최대입경 150 μm 이상 600 μm 이하의 미분은 천연 잔골재의 경우 10% 이상 30% 이하, 부순 잔골재의 경우 10% 이상 35% 이하가 되도록 정해져 있다. 조파쇄 바텀애시는 포졸란 반응성이 있기 때문에 골재보다 굵은 결합재로 분류하는 것이 옳으므로 이 기준을 만족시킬 필요는 없다. 그러나, 일반 잔골재를 단순히 조파쇄 바텀애시로 치환하게 되면 콘크리트 배합 내 미분량이 증가하여 유동성 및 공기량 감소 문제가 발생할 수 있다. 이에 반해, 조파쇄 바텀애시를 일반 잔골재 내 동일입도의 미분과 동일 부피비로 치환하게 되면, 배합 내 미분량이 표준규격을 만족 하므로 미분량 증가에 따른 여러 문제를 피할 수 있다.

본 연구에서는 최대입경 600 μm 이하 수준으로 조파쇄된 바텀애시를 일반 잔골재 내 동일 입경 미분과 치환한 경우 일반강도 모르타르의 성능이 어떻게 변화하는지 실험적으로 확인하였다. 비교군으로서, 파쇄하지 않은 바텀애시를 일반 잔골재와 단순 치환한 경우의 성능변화도 실험하였다.

2. 사용 재료 및 실험 방법

2.1 사용 재료

바텀애시는 여수에 있는 호남 석탄화력발전소의 석탄재 매립지에서 채취하였다. 본 바텀애시의 원료는 유연탄이다. 채취된 바텀애시 원재료(Original bottom ash, OBA)는 100°C에서 3일간 오븐 건조된 후, 볼밀(Ball-mill) 과정을 수행하였다. 이 과정에서, 20 L 강제 통에 약 10 kg의 OBA와 약 10 kg의 강제 볼을 함께 넣고 150 rpm으로 30분간 회전시켰다. 이렇게 제조된 파쇄 바텀애시(Ground bottom ash, GBA)는 별다른 처리 없이 이후 모르타르에 투입되었다. Fig. 1은 주사형 전자현미경(Scanning electron microscope, SEM)으로 촬영된 GBA의 입형을 나타낸다. 볼밀에 의한 표면 마모로 인해 GBA의 입형(Particle shape)은 구형에 가까운 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 사용된 일반 잔골재(Normal sand)는 나주산 강모래이다.

Fig. 2는 잔골재 원재료 및 혼합재료의 체가름 시험결

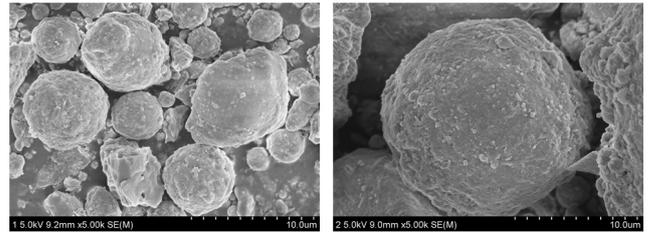


Fig. 1 SEM images of GBA particles

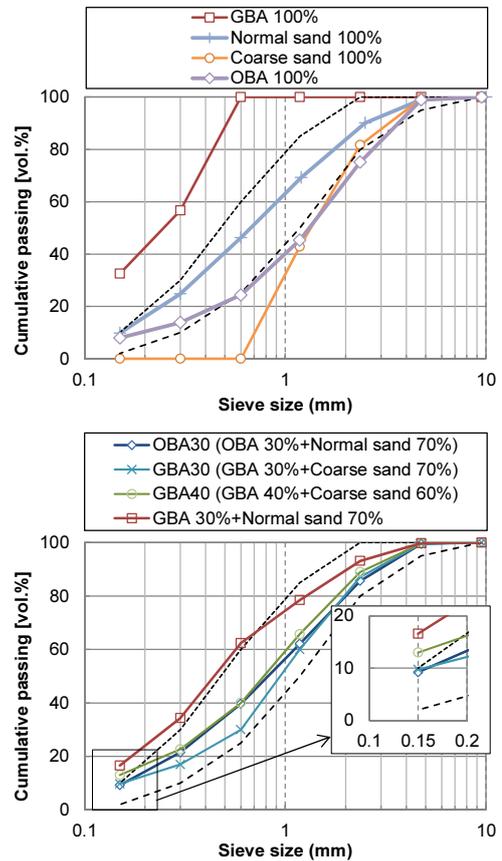


Fig. 2 Particle size distribution of fine aggregates and coarse binder (Dashed lines: Standard particle size distributions of natural sand in Korean Standard Specification for Concrete)

과이다. CBA는 99% 이상 600 μm 체를 통과한다. 그리고 굵은 모래(Coarse sand)와 GBA를 70:30의 부피비로 조합할 경우(GBA30), 콘크리트 표준시방서의 잔골재 입도규격을 만족시킴을 알 수 있었다. 참고로 굵은 모래는 본 연구에서 사용된 일반모래를 체가름을 통해 600 μm 이하의 입자를 제거하여 얻어진 것이다.

하지만, GBA의 비율이 40%로 증가할 경우 150 μm 체 통과량이 입도규격보다 많아지게 된다. 굵은 모래(Coarse sand)가 아닌 일반모래와 GBA를 70:30의 부피비로 조합할 경우 이 역시 150 μm 체 통과량이 입도규격보다 많아지게 된다. 참고로, 파쇄하지 않은 바텀애시(OBA)는 그 자체로 입도규격을 만족하지 못하지만, 일반 모래와 70:30의 부피비로 조합할 경우(OBA30) 입도규격을 만족한다.

Table 1 Passing ratio of fine aggregates and bottom ash through 80 μ m-sieve

Materials		Mixing ratio (volume)	Passing ratio through 80 μ m-sieve (vol. %)
Single materials	Normal sand	-	2.6
	OBA	-	8.8
	GBA	-	21.1
Mixed materials	OBA30	OBA 30% + Normal sand 70%	4.4
	GBA30	GBA 30% + Coarse sand 70%	8.1

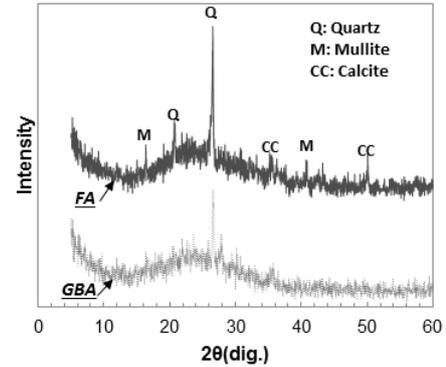
Table 2 Physical characteristics of fine aggregates and bottom ash

Materials		Specific gravity	Water absorption (%)	Fineness modulus
Single materials	Normal sand	2.57(OD) ^a 2.58(SSD) ^b	less than 0.5	2.60
	OBA	2.05(OD) ^a 2.16(SSD) ^b	5.10	3.35
	GBA	2.45(OD) ^a 2.47(SSD) ^b	0.83	1.11
Mixed materials	OBA30	-	-	3.01
	GBA30	-	-	2.96

^aOD: Oven dry condition^bSSD: Saturated-surface dry condition**Table 3** Chemical composition of bottom ash

Component	GBA	Fly ash (Reference)
SiO ₂	54.09	50.15
Al ₂ O ₃	15.75	18.00
Fe ₂ O ₃	8.19	8.29
CaO	8.54	4.58
K ₂ O	7.49	6.15
MgO	2.69	2.18
MnO	0.17	0.07
P ₂ O ₅	0.22	0.53
TiO ₂	0.76	1.53
Loss on ignition (LOI)	2.90	7.57

Table 1에서 나타난 것과 같이 체가름을 통해 측정된 결과 OBA 내에서 80 μ m 이하의 입자는 8.8%를 차지하는 것으로 확인하였으며 그 중의 일부가 플라이애시인 것으로 판단된다. 그러나 파쇄에 의해 80 μ m 이하의 입자가 21.1%으로 증가하였다. 일반잔골재와 조합할 경우, OBA30 및 GBA30 모두 80 μ m체 통과량이 각각 4.4%, 8.1%로 감소하게 된다. 우리나라 콘크리트 표준시방서 상 80 μ m 이하의 미립자의 함유량 한도는 콘크리트가 마모 작용을 받는 경우 3%, 기타의 경우는 5%인데, GBA30은 상대적으로 이 값이 시방서 기준에 비해 높다. 표준시방서에서 80 μ m 이하의 입자 한도 설정의 근거는 골재/시멘트페이스트 간 부착저하, 콘크리트 강도감소 등이다.

**Fig. 3** XRD spectra of bottom ash and fly ash

그러나 GBA는 일반 점토 미립자와 달리 굵은 결합재이므로 이러한 문제와 관계가 없다.

Table 2는 잔골재와 바텀애시를 혼입한 경우의 물리적 특성을 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용된 바텀애시는 유연탄을 원료로 하므로 타 화력발전소에서 발생한 무연탄 연소 바텀애시에 비해 비중이 높고 흡수율이 낮았다.^{8,9)} 또한 파쇄에 의해 흡수율을 일반 잔골재 수준까지 떨어뜨릴 수 있었다.

Table 3은 GBA의 화학적 특성을 나타낸 것이다. 참고로 동일 화력발전소에서 발생한 플라이애시의 화학조성도 또한 나타내었다. GBA는 플라이애시와 모든 화학적 조성이 유사한 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 GBA와 플라이애시의 X-선 회절(X-ray diffraction) 분석결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 GBA와 플라이애시는 유사한 형태의 회절 스펙트럼을 나타내고 있으나, GBA의 경우 Quartz이외에 명확한 형태의 피크가 나타나지 않는다. 이는 GBA의 유리화도가 높으며 이후 플라이애시와 같이 포졸란 반응을 일으킬 수 있다는 것을 의미한다.

모든 모르타르 배합의 결합재로는 S사의 I종 포틀랜드 시멘트가 사용되었다. 화학 혼화제로서, 국내 S사의 공기연행제와 국외 B사의 폴리카르복실산계 초유동화제를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 포틀랜드 시멘트 및 화학혼화제에 대한 특성은 Table 4와 5에 각각 나타나 있다. 참고로, 일반강도 모르타르 배합임에도 불구하고 소량의 화학혼화제를 사용한 이유는, 본 연구가 이후 콘크리트 규모에서의 GBA 혼입효과를 확인하기 위한 기초실험으로 설계되었기 때문이다.

Table 4 Properties of Type I Portland cement

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)	LOI
61.7	19.3	5.16	2.87	4.17	1.13	3.15	3,110	2.49

Table 5 Properties of air entraining (AE) agent and superplasticizer (SP)

Chemical admixture	Form	Color	pH value	Density (at 25°C)	Chloride content
AE agent	Liquid	Yellow	12.6	1.03 g/cm ³	less then 0.1%
SP	Liquid	Dark brown	higher than 6.0	1.15 g/cm ³	less then 0.2%

Table 6 Mix proportions of normal-strength mortars

Aggregate and coarse binder	Weight proportion ^a (weight ratios of cement weight)						
	W	C	S ^b	OBA	GBA	SP	AE
Control	0.45	1	2.17	-	-	0.0030	0.00030
OBA30			1.52	0.55	-		
GBA30			1.52	-	0.63		
Control	0.55		2.83	-	-		
OBA30			1.98	0.72	-		
GBA30			1.98	-	0.82		

^aW: Water, C: Cement, SP: Superplasticizer, AE: Air entraining agent

^bS: Normal sand for Control and OBA30; Coarse sand for GBA30

2.2 배합비

일반강도 모르타르의 배합표는 Table 6에 나타나 있다. 이 표는 각 배합에서 시멘트의 무게를 1로 하여 각 재료의 상대적 무게를 나타낸 것이다. Control은 일반모래만을, OBA30은 일반모래 부피의 30%를 OBA로 치환하여 골재로 사용하였다. GBA30은 체가름한 일반모래에 GBA를 부피비로 30% 치환하였다. 물시멘트비(w/c)는 0.45, 0.55의 두 단계로 설정하였다. 초유동화제(SP)와 공기연행제(AE agent)는 각각 시멘트 무게비로 0.3%와 0.03% 혼입하였다. 골재 치환 비율을 단일조건으로 설정한 이유는, 기존 연구결과 바텀에서 배합 시 일반적인 모르타르 및 콘크리트의 성능이 일반적으로 혼입량에 선형적으로 비례하는 특징이 있기 때문이다.^{2,4,5,8,9)}

2.3 실험 방법

일반 잔골재 및 OBA는 1주일 이상 물에 침지한 후 꺼내어 실내에서 자연건조 하였으며, KS F 2504에 기준에 따라 표건 상태임이 확인된 직후 비닐 백에 담아 보관하였다. 그리고 모르타르 제조 전일 백에서 채취한 골재는 동 규격에 따라 함수율을 측정하였으며, 기준에 측정된 함수율과 비교하여 모르타르 배합 직전에 배합비를 미세 조정하였다. GBA는 굵은 결합재이므로 건조상태로 사용되었다.

모르타르 제조를 위해 모든 재료를 10 L 크기 전동믹서에 넣고 1분 30초간 배합하였다. 모르타르의 유동성 및

그 경시변화를 확인하기 위해 배합 직후 및 배합 후 1시간 후 KS L 5105 규격에 따른 모르타르 흐름실험을 실시하였다. 그 후 굵은 모르타르의 여러 성능을 실험하기 위한 시편이 제작되었다.

모르타르의 압축강도는 각 변이 5 cm인 정육면체 시편을 이용해 KS 5105 규격에 따라 재령 3, 28, 150일에 측정하였다. 압축강도 측정을 위한 시편은 23±3°C의 항온실에서 1일 밀봉양생 후 탈형과 함께 수중양생 하였다. 동일 시편을 이용해 KS F 2437 규격에 따라 재령 28, 150일의 동탄성계수를 측정하였다. 시편의 공극률과 모세관 흡수율은 각각 ASTM C 642 및 C 1585 기준의 실험순서에 준하여 측정하였다. 참고로, ASTM C 642 및 C 1585 기준은 모두 콘크리트를 위한 것으로, 시편의 형상을 각각 부피 350 cm³ 이상 시편, 10×5 cm 실린더 시편으로 규정하고 있다. 그러나 본 연구에서 사용된 배합은 모르타라이므로 각 변이 5 cm인 정육면체 시편을 이용하였다. 시편을 건조할 때, 고온으로 인한 추가수화를 막기 위해 50°C에서 진공건조를 3일간 수행하였다. 또한, 시편의 완벽한 포화를 위해 상온 진공함침을 사용하였다. 시편의 포화 및 건조에 대한 구체적인 실험방법은 Kim et al. (2014)에 나타나 있다.¹⁰⁾

건조수축 시편은 ASTM C 596 규격에 준하여 측정하였으며, 시편의 형상은 2.5×2.5×25 cm의 프리즘이었다. 25 ± 0.1°C의 항온챔버에서 5일간 밀봉 양생 후, 동일 온도의 RH 50 ± 3% 환경에서 150일간 건조시켰다. 수축변형률 측정을 위해 Mayer Instruments사의 고정식 다이얼게이지를 사용하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 모르타르의 유동성

배합 직후 및 1시간 후의 모르타르 흐름 실험결과는 Fig. 4에 나타나 있다. 일반 잔골재만을 사용한 모르타르(Control)에 비해, OBA를 사용한 모르타르(OBA30)는 유동성이 약간 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 w/c 값이 더 큰 경우(0.55)에 이 현상이 명확해 지는 것을 알 수 있었다. 이는 기존 연구에서도 동일하게 나타나는 현상으로서, 표면이 매우 거친 바텀애시 원재료(OBA)의 맞물림에 의해 굳지 않은 모르타르의 유동성이 감소하게 되는 것이다.⁹⁾ 특히 w/c 값이 높은 경우, 시멘트 페이스트의 점성이 낮기 때문에 OBA 입자간 맞물림이 더 두드러지게 된다.⁹⁾

그러나 GBA를 사용한 모르타르(GBA30)은 Control에 비해 유사하거나 오히려 약간 더 우수한 유동성을 나타낸다. Fig. 1과 같이 불밀 파쇄에 의해 입형이 완만해졌을 뿐 아니라, 입경 600 μm 이하 입자의 입도분포가 최적화되었기 때문으로 판단된다.^{11,12)} 비록 Table 1에서 나타난 것 같이 비록 GBA30이 Control에 비해 80 μm 이하의 미분량은 더 많지만, 이 미분으로 인한 유동성 저하는 발생하지 않는다는 것이 실험결과를 통해 확인되었다. 또한 GBA30의 시간에 따른 유동성 저하 역시 Control과 유사한 수준임이 확인되었다.

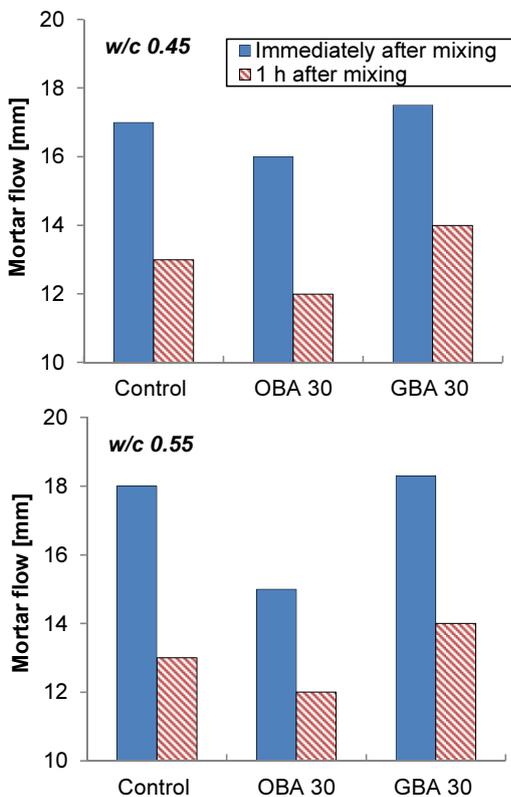


Fig. 4 Flow of mortar containing OBA and GBA

3.2 모르타르의 압축강도 및 동탄성계수

Fig. 5는 모르타르의 3, 28, 150일 압축강도를 나타내고 있다. 참고로 Fig. 4 이후의 모든 그림에서 Error bar는 표준편차를 나타낸다. OBA30의 경우, w/c 0.45일 때 Control에 비해 모든 재령에서 10% 미만으로 강도가 증가하였으나 w/c 0.55일 때는 강도가 동일하거나 약간 감소하였다. 그에 반해, w/c 값에 관계없이 GBA30의 강도는 Control에 비해 높은 것을 알 수 있다.

바텀애시는 모르타르의 강도에 다음의 영향을 미치게 된다. 첫 번째는, GBA의 미립분에 의한 충전효과이다. Table 1에 나타난 것 같이, GBA30은 다른 배합에 비해 미분의 함량이 높다. 이 미분들은 포졸란 반응성 여부에 상관없이 충전재로서 역할을 하여, 모르타르의 강도증가에 어느 정도 기여할 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 미분이 적은 OBA30에서는 발생하지 않는다.

두 번째는 포졸란 반응에 의한 강도 증가이다. 바텀애시는 플라이애시와 같이 시멘트와 포졸란 반응을 활발히 일으킨다.¹⁰⁾ Kim (2015)에서는 바텀애시 모르타르의 수화도 및 강도와 상관계 분석을 통해, 비표면적이 큰 조파쇄 바텀애시도 포졸란 반응을 통해 모르타르의 강도를 증진시킬 수 있다는 것을 확인하였다.¹¹⁾ 이 현상은 바텀애시의 비표면적이 상대적으로 큰 GBA30에서 주로 발생할 것으로 판단된다.

바텀애시의 세 번째 영향은 골재 내 공극에 의한 강도

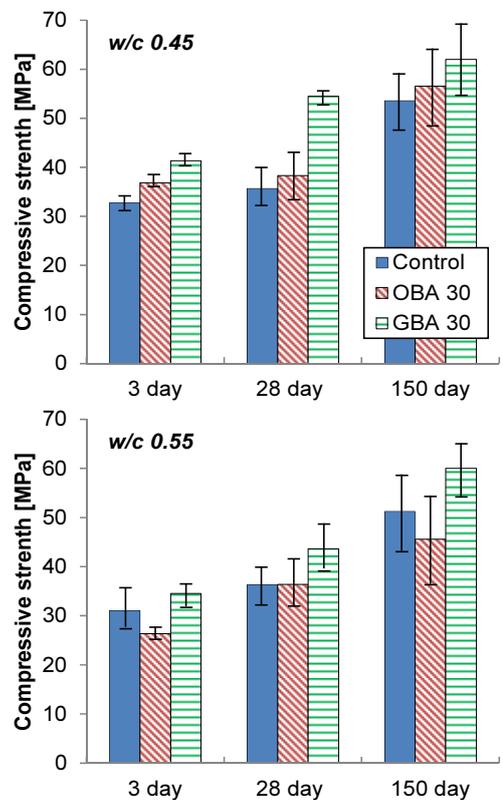


Fig. 5 Compressive strength of mortar containing OBA and GBA

저하다. 미가공된 바텀애시의 입자 내 공극은 크기와 분포가 매우 불규칙하고, 그 크기도 경량골재에 비해 큰 편이기 때문에, 콘크리트에 혼입 시 강도저하 뿐 아니라 강도의 표준편차를 증가시키는 효과도 있다.^{9,11)} 이와 같은 영향이 나타나는 것이 OBA30이라고 할 수 있다. 그러나 Table 2에 나타난 것 같이 바텀애시의 입자를 파쇄할 경우, 입자의 공극률(흡수율)이 감소하게 되므로 이로 인한 콘크리트의 강도저하가 발생하지 않는다.

Fig. 6은 모르타르의 동탄성계수를 나타낸다. 비록 경량콘크리트와 일반골재 콘크리트의 동탄성계수와 정탄성계수 간의 관계가 다를 수 있지만, 본 연구에서는 모르타르의 탄성계수를 간이로 확인하기 위해 동탄성계수를 측

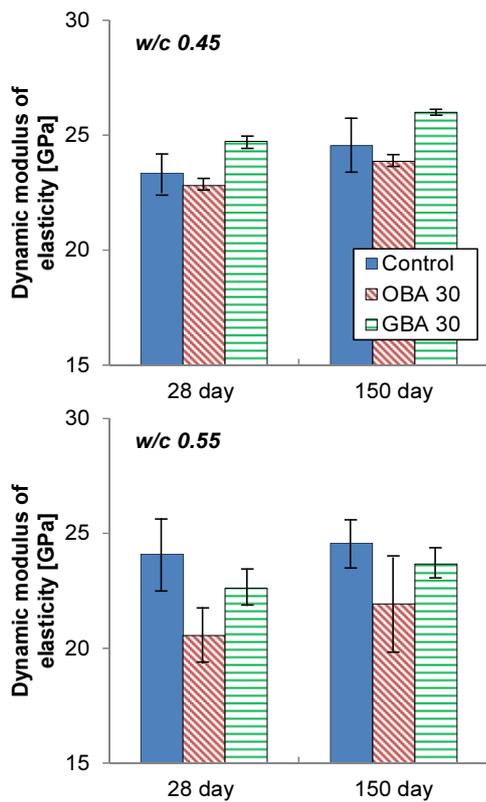


Fig. 6 Dynamic moduli of mortar containing OBA and GBA

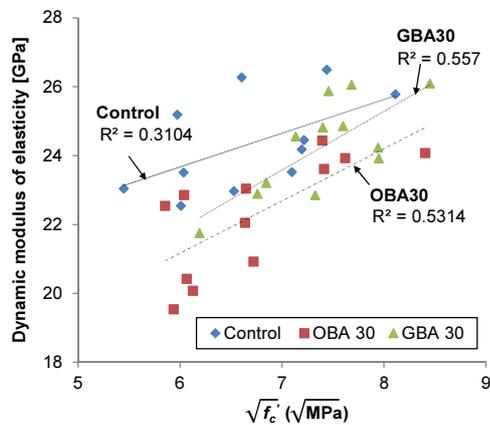


Fig. 7 Relationship between compressive strength and dynamic moduli of mortar containing OBA and GBA

정하게 되었다.

실험 결과 w/c 0.45일 때, Control에 비해 OBA30은 동탄성계수가 감소, GBA30은 증가하였으나 그 변화폭은 미약하였다. w/c 0.55일 때, Control에 비해 OBA30 및 GBA30 모두 낮은 동탄성계수 값을 나타내었다. 바텀애시와 같은 경량골재 사용 시 압축강도가 동일한 경우에도 탄성계수는 낮다는 것이 일반적인 사실이다.

Fig. 7은 동탄성계수와 압축강도간의 관계를 나타낸 것이다. 참고로 ACI Building Code 318에서 제시한 압축강도와 탄성계수를 고려하여, Fig. 6의 x축은 압축강도의 Root승으로 표시하였다. 동일 압축강도를 고려하였을 때, 상대적으로 OBA30과 GBA30이 Control에 비해 동탄성계수가 낮다는 것을 확인하였다. 그러나 시편 수의 부족으로 Fig. 6의 상관계수가 너무 낮으며, 본 실험을 통해 동탄성계수와 압축강도 간의 상관성 고려하기에는 미흡한 점이 있다고 판단된다.

3.3 모르타르의 공극률 및 모세관 흡수율

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 바텀애시를 혼입한 모르타르의 공극률과 모세관 흡수율을 나타낸다. 참고로 모르타르의 공극률과 흡수율은 모르타르 내부의 공극구조를 나타내는 값으로서, 모르타르의 내구성에 큰 영향을 미친다.

공극률 및 모세관 흡수율 모두 w/c 값에 관계없이 Control에 비해 OBA30은 높은 값을, GBA30은 낮은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. OBA30의 경우, OBA 입자 자체가

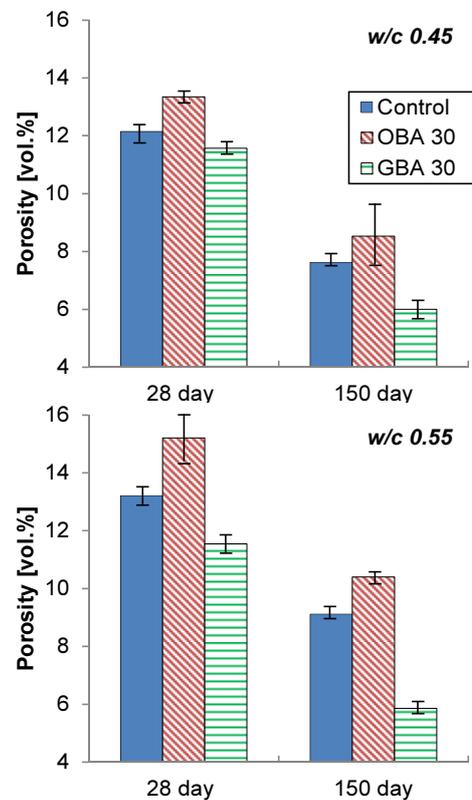


Fig. 8 Porosity of mortar containing OBA and GBA

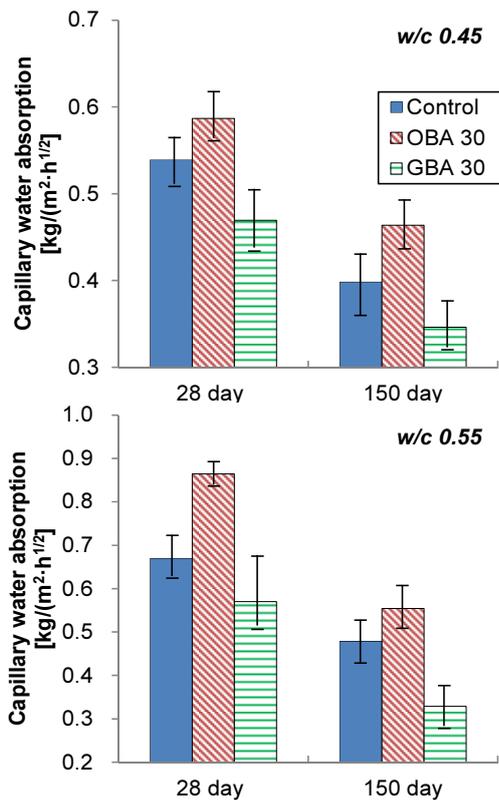


Fig. 9 Capillary water absorption of mortar containing OBA and GBA

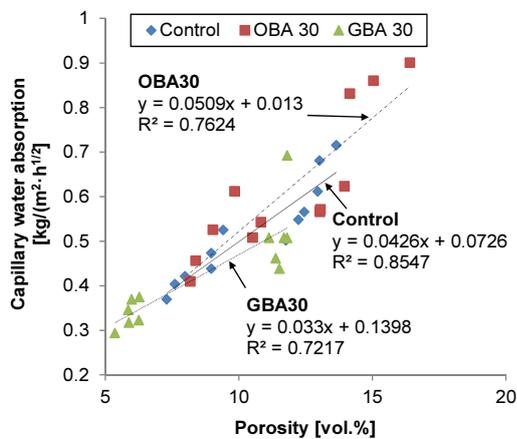


Fig. 10 Relationship between porosity and capillary water absorption of mortar containing OBA and GBA

가지고 있는 공극으로 인해 모르타르 전체의 공극률이 증가한 것이며 이로 인해 공극간의 연결도(Connectivity)가 증가하였음을 의미한다.⁹⁾ 이에 반해 GBA30의 낮은 공극률 및 모세관 흡수율은 포졸란 반응이 GBA 계면에서 일어났음을 의미하는 것이다. 또한, Table 1에 나타난 것 같이 GBA 사용에 따른 배합 내 미분량 증가로 인해 굳지 않은 모르타르 내 공기량이 감소했기 때문일 수도 있다.

Fig. 10은 모르타르의 공극률과 모세관 흡수율의 관계를 나타낸 것이다. 모르타르의 공극률이 10% 이상일 때, GBA30는 Control과 OBA30에 비해 동일 공극률에서 상

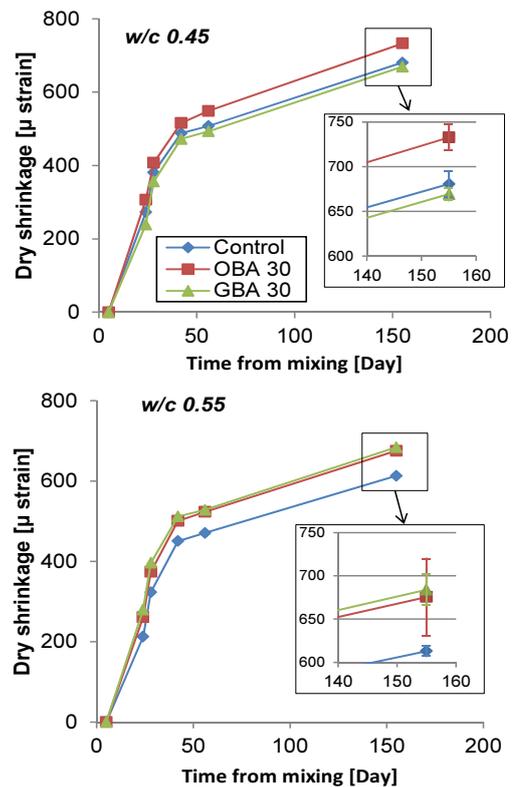


Fig. 11 Dry shrinkage of mortar containing OBA and GBA

대적으로 낮은 모세관 흡수율을 보인다는 것을 알 수 있다. 즉, GBA 모르타르 내 공극의 부피는 동일할 경우에도 그 공극 간의 연결도는 낮아진다는 것을 의미한다¹²⁾. 이는, GBA 사용에 의해 이산화탄소나 염소이온의 침투가 어려워 질 수 있다는 것을 암시하는 결과이며, 따라서 GBA 혼입 콘크리트는 동일강도의 일반강재 콘크리트에 비해 높은 내구성을 나타낼 것으로 기대된다.¹²⁾

3.4 모르타르의 건조수축

Fig. 11은 바텀애시를 혼입한 모르타르의 건조수축량을 나타낸다. 참고로, Fig. 11에 나타난 건조수축량은 각각의 배합 당 두 개의 시편에서 측정된 값의 평균이며, 모든 배합에서 두 시편의 수축량 차이는 150일 기준으로 최대 $\pm 50\mu\text{strain}$ 이었다. w/c 0.45의 경우, OBA30은 Control에 비해 높은 수축량을, GBA30은 거의 동일한 수축량을 나타내었다. OBA30의 낮은 탄성계수와 높은 공극연결도, 그리고 GBA30의 높은 탄성계수와 낮은 공극연결도에 의해 기인하는 것으로 판단된다. 탄성계수가 낮으면 건조에 의해 쉽게 수축이 발생하고, 동시에 공극 연결도가 높으면 건조되는 수분량이 증가하기 때문이다.¹³⁾ w/c 0.55의 경우, 바텀애시 혼입 모르타르는 모두 Control에 비해 높은 수축량을 나타냈는데, 이 역시 Control에 비해 OBA30과 GBA30의 탄성계수가 낮기 때문인 것으로 판단된다.

그러나 각 시편 별 155일 건조수축량의 차이가 최대 $50\mu\text{strain}$ 이며 이는 Control의 수축량의 약 8% 이내인 점

을 감안할 때, 30% 범위 내 치환 시 콘크리트의 건조수축량은 바텀애시 파쇄 여부에 크게 영향 받지 않는다는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는, 잔골재 표준입도를 고려한 조파쇄 바텀애시 혼입에 따른 일반강도 모르타르의 성능변화를 실험적으로 분석하였다. 비교군으로서, 파쇄하지 않은 일반 바텀애시를 천연잔골재와 단순 치환하여 사용하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 흡수율 5% 이상의 다공질 바텀애시를 결합재와 일반 잔골재 사이의 입도를 갖도록 파쇄할 경우, 입자의 흡수율 및 표건상태 비중이 일반 잔골재 수준으로 조절됨을 확인하였다.
- 2) 잔골재 표준입도를 고려해 조파쇄 바텀애시를 혼입하는 방법은, 바텀애시 원재료를 일반 잔골재와 단순 치환하던 기존의 배합방법에서 발생하던 모르타르의 유동성 감소 및 강도 감소를 동시에 막을 수 있는 해법이 될 수 있음을 확인하였다. 조파쇄 바텀애시 사용 시 80 μm 체 통과분이 잔골재 표준입도 기준치에 비해 약간 높았음에도 불구하고 유동성감소는 나타나지 않았을 뿐 아니라, 오히려 압축강도가 증가하고 미세구조는 치밀해 졌다.
- 3) 조파쇄 바텀애시 혼입률 30% 이내에서, 모르타르의 동탄성계수 및 건조수축은 일반골재 모르타르에 비해 크게 변화하지 않는다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(창의도전연구) 및 국토교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(14CTAP-C078770-01 및 15RDRP-B076564-02)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다. 또한 실험 수행에 협조해 주신 전남대학교 건축학부 송진규 교수님과 연구원들께 감사드립니다.

References

1. Park, S. B., Jang, Y. I., Lee, J., and Lee, B. J., "An experimental study on the hazard assessment and mechanical properties of porous concrete utilizing coal bottom ash coarse aggregate in Korea", *Journal of Hazardous Materials*, Vol.166, No.1, 2009, pp.348-355.
2. Kim, H. K. and Lee, H. K. "Coal bottom ash in field of civil engineering: A review of advanced applications and environ-

- mental considerations", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2015, pp.1-17.
3. Kim, H. K. and Lee, H. K., "Effects of high volumes of fly ash, blast furnace slag, and bottom ash on flow characteristics, density, and compressive strength of high-strength mortar", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.25, No.5, 2012, pp.662-665.
4. Andrade, L. B., Rocha, J. C., and Cheriaf, M., "Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.23, No.2, 2009, pp.609-614.
5. Yüksel, İ., Bilir, T., and Özkan, Ö., "Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate", *Building and Environment*, Vol.42, No.7, 2007, pp.2651-2659.
6. Kula, I., Olgun, A., Sevinc, V., and Erdogan, Y., "An investigation on the use of tincal ore waste, fly ash, and coal bottom ash as Portland cement replacement materials", *Cement and Concrete Research*, Vol.32, No.2, 2002, pp.227-232.
7. Kang, S. T., Ryu, G. S., Koh, K. T., and Lee, J. H., "Optimum Mix Design of Alkali-Activated Cement Mortar Using Bottom Ash as Binder", *J. Korea Concr. Inst.*, Vol.23, No.4, 2011, pp.487-494.
8. Kim, H. K. and Lee, H. K., "Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.25, No.2, 2011, pp.1115-1122.
9. Kim, H. K., Jeon, J. H., and Lee, H. K., "Flow, water absorption, and mechanical characteristics of normal-and high-strength mortar incorporating fine bottom ash aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol.26, No.1, 2012, pp.249-256.
10. Kim, H. K., Jang, J. G., Choi, Y. C., and Lee, H. K. "Improved chloride resistance of high-strength concrete amended with coal bottom ash for internal curing", *Construction and Building Materials*, Vol.71, 2014, pp.334-343.
11. Cheriaf, M., Rocha, J. C., and Pera, J., "Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash", *Cement and Concrete Research*, Vol.29, No.9, 1999, pp.1387-1391.
12. Kim, H. K., "Utilization of sieved and ground coal bottom ash powders as a coarse binder in high-strength mortar to improve workability", *Construction and Building Materials*, Vol.91, 2015, pp.57-64.
13. Gesoğlu, M., Özturan, T., and Güneyisi, E., "Shrinkage cracking of lightweight concrete made with cold-bonded fly ash aggregates", *Cement and Concrete Research*, Vol.34, No.7, 2004, pp.1121-1130.

요약 잔골재 표준입도를 고려하여 조파쇄 바텀애시를 혼입한 일반강도 모르타르의 성능을 실험적으로 분석하였다. 비교군으로서, 파쇄하지 않은 일반 바텀애시를 천연잔골재와 단순 치환하여 사용하였다. 바텀애시를 결합재와 일반 잔골재 사이의 입도를 갖도록 굵게 파쇄할 경우, 입자의 흡수율 및 표건상태 비중이 일반 잔골재 수준으로 조절되었다. 잔골재 표준입도를 고려해 조파쇄 바텀애시를 혼입하는 방법은, 바텀애시 원재료를 일반 잔골재와 단순 치환하던 기존의 배합방법에서 발생하던 모르타르의 유동성 감소 및 강도 감소를 동시에 막을 수 있는 해법이 될 수 있음을 확인하였다. 조파쇄 바텀애시를 30% 이내로 모르타르에 혼입할 경우, 모르타르의 동탄성계수 및 건조수축은 일반골재 모르타르에 비해 크게 변화하지 않았다.

핵심용어 : 바텀애시, 표준입도, 조파쇄, 일반강도 모르타르, 유동성