

미정제 석탄회를 혼합골재의 미립분 보충재로 활용하는 시멘트 모르타르의 공학적 특성 분석

Analyzing the Engineering Properties of Cement Mortar using Raw Coal Ash as a Microfines for the Mixed Aggregate

한 천 구

박 병 문*

Han, Cheon-Goo

Park, Byung-Moon*

Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Naduk-Dong, Cheongju-Si, 28503, Korea

Abstract

The aim of the research is improving the quality of concrete by using the alternative aggregate resources and recycling wastes. To make a combined aggregate fitted in standard particle size distribution curve, crushed sand from blasted rock debris was used as a base aggregate. Additionally, to increase the portion of fine particles, sea sand was mixed. Although these aggregate combination fit the standard particle size distribution curve, in this research, raw coal ash was replaced as a microfine. According to the experiment, by replacing 5% raw coal ash, the most favorable results were achieved in aggregate gradation and cement mortar quality.

Keywords : raw coal ash, microfine, mixed aggregate, cement mortar

1. 서 론

최근 레미콘 생산 공장에서는 양호한 품질의 천연골재가 고갈됨에 따라 골재 수급 문제가 심각하게 대두되고 있다. 이를 해결하기 위해서는 대체자원인 석산의 부순 잔골재, 발파석 부순 잔골재, 해사 등을 주로 사용하고는 있지만, 단독으로 사용하기에는 콘크리트의 품질에 악영향을 미치게 되어 실무에서는 서로 다른 입도의 골재를 혼합하여 사용하고 있다.

그러나 부순 잔골재 및 해사의 생산과정에서는 세척공정을 통해 제조되므로 0.15mm 이하의 미립분이 제거되어, 이들을 혼합하여 골재로 활용하더라도 미립분이 부족한 상

태의 골재가 된다. 이와 같은 미립분은 특히 빈배합에서는 점성을 발휘하는 중요한 요소로써 미립분을 적절히 확보할 수 있는 방안 모색이 필요한 실정이다.

한편, 국내에서는 전력수요가 계속 증가함에 따라 화력발전의 의존도가 높아지는 추세를 보이고 있다. 이러한 화력발전소에서 발생하는 석탄회의 경우는 정제과정을 거쳐 콘크리트용 혼화재인 플라이애시로 제조되어 활용되고 있다. 하지만 겨울철의 경우에는 플라이애시의 특성상 저온에 따른 초기강도발현 저하에 의해 사용량이 감소하므로써 정제를 하지 않은 상태의 석탄회(Raw coal ash, 이하 Ra)를 매립처분 하고 있는 실정으로 화력발전소에서는 매립지 포화상태로 말미암아 대책마련이 시급한 상황이다[1].

그러므로 본 연구에서는 부족한 골재 자원확보 및 저품질 골재의 품질향상 대책으로, 서로 다른 입도 및 품질의 골재를 Figure 1과 같이 현행에서는 허용되고 있지 않은 혼합골재를 골재제조공장에서 혼합하여 제조 및 활용하고자 함에 있어 Ra와 같은 폐기물 재료를 미립분 보충재로 사전혼합하여 고품질 잔골재로 재탄생시키고자 하는 것이 목적이다.

Received : January 17, 2018

Revision received : February 20, 2018

Accepted : March 22, 2018

* Corresponding author : Park, Byung-Moon

[Tel: 82-43-229-8480, E-mail: pbm2001@hanmail.net]

©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

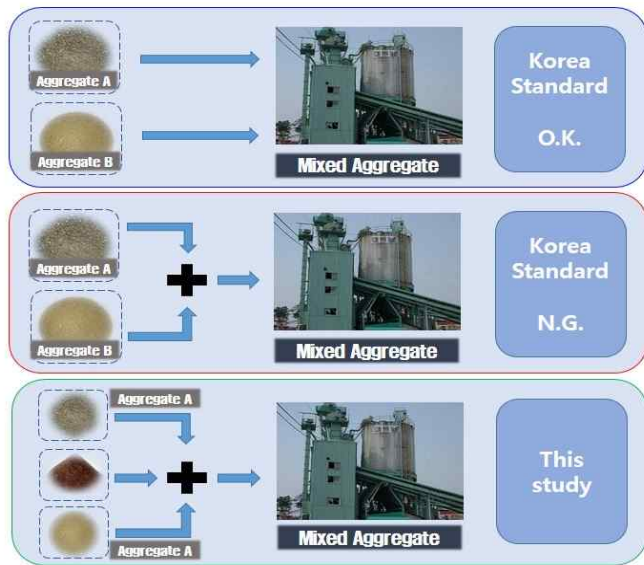


Figure 1. Method of making the mixed aggregate

즉, 저품질 부순골재 혹은 발파석과 해사를 혼합하는 것과 같은 혼합골재에 화력발전소 부산물 중 거울철 폐기처리되는 Ra를 추가적으로 혼합한 3종 혼합골재를 제조하여 단일 골재와 같이 납품하는 방식으로 재활용 할 수 있는지에 대하여 시멘트 모르타르 상태에서의 가능성을 검토하고자 한다.

2. 혼합골재의 입도분포

2.1 2종 혼합

본 실험에 사용하는 잔골재는 실제적으로 국내에서 유통되는 서울 근교 A레미콘 사의 것을 이용하였다. 이때 각 골재의 물리적 성질 및 입도곡선은 Table 1 및 Figure 2와 같다. 이때 잔골재의 표준입도범위는 KS F 2527에서 부순 잔골재 이외의 골재로 하였다.

먼저, 양호한 입도 및 품질의 석산A(이하 CSa)를 대조군으로 하여 굵은 입자가 많이 포함되어 입도가 불량한 석산B(이하 CSb) 및 건축물 터파기 공사 중 발생하는 암석을 분쇄한 발파석(BS)에 입도가 가는 입자로 불량한 EEZ에서 채취한 해사(SS)를 혼합하는 것으로 계획하였다. 이때, CSb와 SS, BS와 SS 간의 혼합비율은 10:0에서 SS의 치환율을 1씩 증가시켜 도상에서 혼합비율을 표시하면 Figure 3 및 4와 같다. 표준입도 범위의 그래프 상에서 상하부에 적당히 여유를 갖는 CSb 및 BS에 SS의 혼합비율은 6:4가 최적인 것으로 분석되었다.

Table 1. Physical properties of fine aggregate

Type	Density (g/cm ³)	Water absorption ratio (%)	Passing ratio of 0.08mm sieve (%)	Fineness modulus
CSa ¹⁾	2.66	1.92	4.98	2.96
CSb ²⁾	2.67	1.52	3.82	3.27
BS ³⁾	2.58	2.63	7.06	3.18
SS ⁴⁾	2.60	1.13	2.89	2.06

- 1) CSa = Crushed sand of good quality
- 2) CSb = Crushed sand of low quality
- 3) BS = Blasted sand
- 4) SS = Sea sand of EEZ

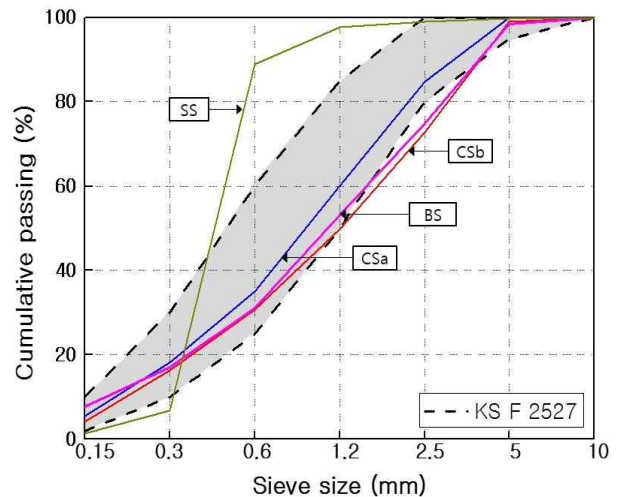


Figure 2. Grading curve depending on different types of fine aggregate

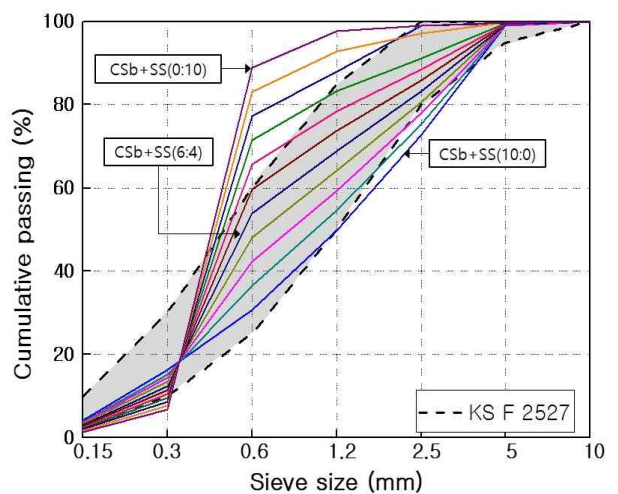


Figure 3. Grading curve depending on different types of fine aggregate(CSb+SS)

2.2 2종 혼합골재의 Ra치환

모르타르 실험에 앞서 CSb+SS와 BS+SS의 6:4비율에 Ra치환율을 0, 2.5, 5, 7.5, 10%로 2.5%씩 치환율을 증가

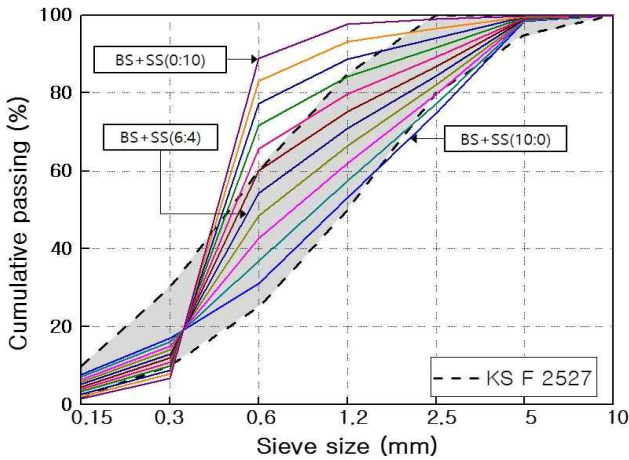


Figure 4. Grading curve depending on different types of fine aggregate(BS+SS)

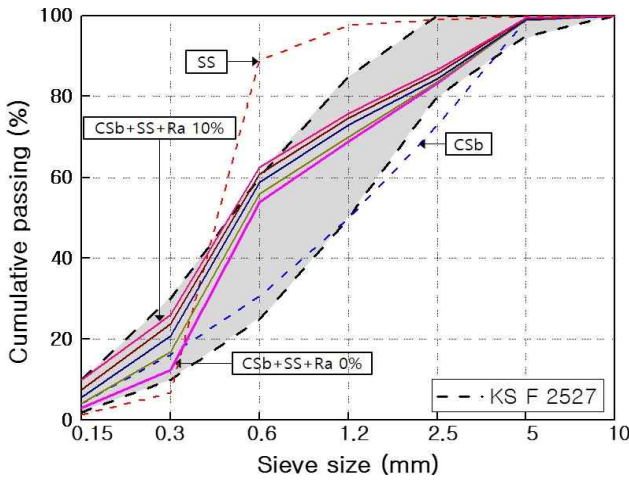


Figure 5. Grading curve depending on different types of mixed aggregate (CSb+SS+Ra)

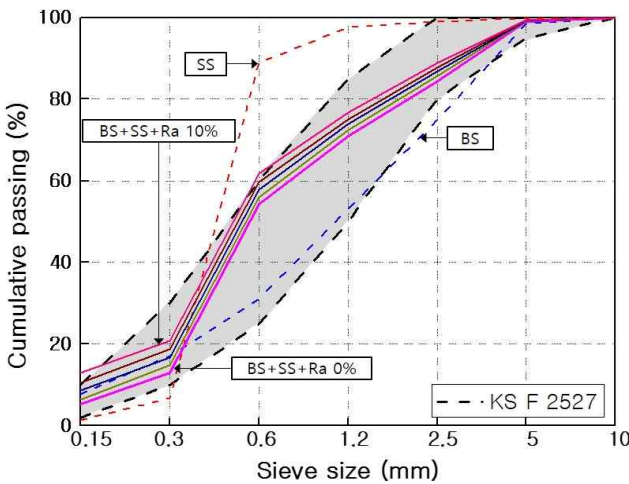


Figure 6. Grading curve depending on different types of mixed aggregate (BS+SS+Ra)

할 때의 입도곡선은 Figure 5 및 6과 같다. Ra치환율이 증가할수록 0.15mm 입도와 0.6mm 입도에서 표준입도 범위를 상부쪽으로 이동시켜 Ra치환율 5%까지는 표준입도 범위에 속하였지만 7.5%이상에서는 벗어나는 결과를 나타내었다.

3. 시멘트 모르타르 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

혼합골재의 입도를 고려한 본 연구의 실험계획은 Table 2와 같고, 배합표는 Table 3과 같다. 즉, 실험요인으로 모르타르 배합비는 1:3, 물시멘트비(W/C)는 50%에 대하여 Plain의 목표 플로를 $180 \pm 15\text{mm}$, 목표 공기량을 $4.5 \pm 1.5\%$ 로 배합설계 하였으며, 이를 모든 실험변수에 동일하게 적용하였다. 이때 결합재는 OPC만을 사용하는 것으로 계획하였다. 골재 변수로는 단일골재로 양호한 품질의 석산 A(CSa), 불량 입도의 석산B(CSb), 발파석(BS), 해사(SS)의 4수준, 혼합골재로는 CSb+SS, BS+SS의 2수준에 Ra의 치환율을 0, 2.5, 5, 7.5, 10%의 5수준씩으로 총 14배치를 실험계획하였다.

실험사항으로는 굳지않은 모르타르에서는 플로, 공기량, 경화 모르타르에서는 3, 7, 28일의 압축강도를 측정하는 것으로 하였다.

Table 2. Experimental plan

Factors		Levels
C:S (W/C)		· 1:3 (50%)
Flow (mm)		· 180 ± 15
Air content (%)		1 · 4.5 ± 1.5
Binder (%)		· OPC 100
FA type		· Raw fly ash (Ra)
Mixture	Aggregate type	· Crushed sand A (CSa) ¹⁾
		· Crushed sand B (CSb)
		· Blast sand (BS)
		· Sea sand (SS)
	Mixed	2 · CSb + SS (6:4)
		· BS + SS (6:4)
Ra replacement rate of mixed aggregate (%)		5 · 0, 2.5, 5, 7.5, 10
Experiment	Fresh mortar	2 · Flow
		· Air content
	Hardened mortar	1 · Compressive strength (3, 7, 28 days)

1) Plain

Table 3. Mixture properties of mortar

Series	W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	Mass for unit volume of fine aggregate (kg/m ³)				AE (C/%)	
				CS	BS	SS	Ra		
Single	CSa	254	509	1527	0	0	0	0.02	
	CSb	255	510	1530	0	0	0		
	BS	250	500	0	1500	0	0		
	SS	251	502	0	0	1506	0		
	0	254	507	913	0	608	0		
Mixed	CSb	2.5	253	506	891	0	594		32
	+	5	252	505	870	0	580		64
	SS	7.5	252	503	848	0	565		95
		10	251	502	827	0	551		128
		0	251	501	0	902	601		0
	BS	2.5	250	500	0	880	587	32	
+	5	249	499	0	859	573	64		
SS	7.5	249	498	0	838	559	96		
	10	248	497	0	817	545	129		

3.2 사용재료

본 실험에 사용한 재료로서, 먼저 OPC는 국내산 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, Ra는 국내 A 화력발전소에서 발생하는 석탄회를 사용하였다. 각각의 물리·화학적 성질은 Table 4, 5와 같다.

본 실험에 사용한 잔골재 중 단일사용과 혼합사용 시 골재의 물리적 성질은 Table 1, 6과 같고 입도곡선은 Figure 2, 5, 6과 같다. 혼화제로 AE제는 국내산 C사의 음이온계를 사용하였으며, 물은 상수도를 사용하였다.

Table 4. Physical properties of cement

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Soundness (%)	Setting time (min.)		Compressive strength(MPa)		
			Initial	Final	3 days	7 days	28 days
3.15	3 390	0.05	230	345	24.8	39.3	56.9

Table 5. Physical properties of raw coal ash(Ra)

Blaine (cm ² /g)	Density (g/cm ³)	L.O.I ¹⁾ (%)
3 300	2.17	3.7

1) Loss on ignition

Table 6. Physical properties of fine aggregate

Type	Density (g/cm ³)	Water absorption ratio (%)	Passing ratio of 0.08mm sieve (%)	Fineness modulus
CSb + SS (6:4)	2.64	1.90	3.44	2.71
BS + SS (6:4)	2.61	2.15	5.44	2.73

3.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 먼저 모르타르의 혼합은 KS L 5109에 의거하여 진행하였다. 굳지 않은 모르타르의 특성 실험으로 플로는 KS L 5111, 공기량은 KS F 2421에 의거하였고, 경화 모르타르의 실험으로 각 재령별 압축강도는 KS F 2326에 의거하여 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험결과

Table 7은 본 연구의 실험결과를 나타낸 것이다. 즉, 굳지 않은 모르타르에서는 플로, 공기량을, 경화 모르타르에서는 재령 3, 7, 28일의 압축강도를 나타낸 것이다.

Table 7. Result of experiment

Aggregate	Type	Ra (%)	Flow (mm)	Air contents (%)	Compressive strength (MPa)		
					3 days	7 days	28 days
CSa	0	190	5.5	23.7	30.0	32.3	
	0	210	8.0	13.4	19.8	21.6	
	0	192	6.8	14.0	17.0	18.4	
	0	168	10.0	12.3	13.3	15.5	
CSb+SS	0	208	9.7	15.0	21.0	23.0	
	2.5	207	8.3	18.0	24.0	25.8	
	5	206	5.1	24.0	34.5	35.8	
	7.5	204	4.2	30.2	36.5	46.1	
	10	203	3.9	32.5	34.3	47.1	
	0	208	9.6	14.5	20.0	22.5	
BS+SS	2.5	210	7.8	16.7	21.0	24.9	
	5	212	6.3	22.6	30.1	35.2	
	7.5	210	5.5	29.8	33.3	39.3	
	10	212	4.3	32.0	35.8	41.7	

4.2 굳지않은 모르타르의 특성

4.2.1 플로

Figure 7은 잔골재의 종류 및 Ra치환율 변화에 따른 플로를 나타낸 그래프이다. 먼저 단일골재 배합에서 Plain인 CSa의 경우는 목표 범위를 만족하였고, CSb는 가장 크게 나타났으며, BS, SS 순으로 감소하는 경향을 나타내었다. 혼합골재의 경우 CSb+SS, BS+SS 모두는 각각의 단일로 사용한 경우의 평균값보다 큰 값을 나타내었다. 여기에 Ra 치환율이 증가함에 따라서는 BS+SS는 크게 변동이 없는 것으로 나타났고, CSb+SS는 BS+SS에 비해 다소 감소하는 경향으로 나타났다. 이는 Ra가 플라이애시와 비슷한 형태로

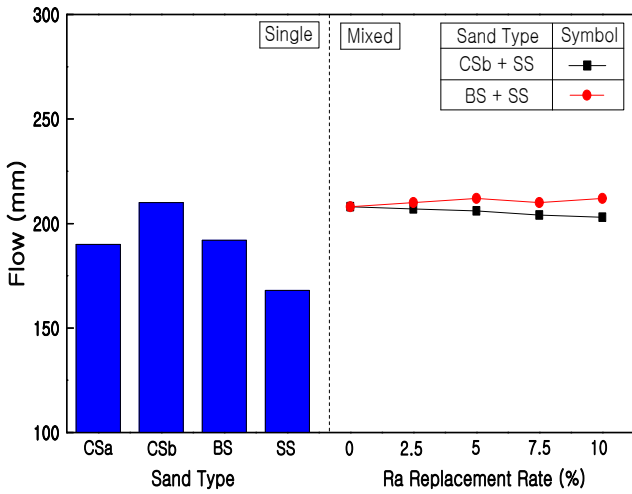


Figure 7. Flow with fine aggregate type and Ra replacement

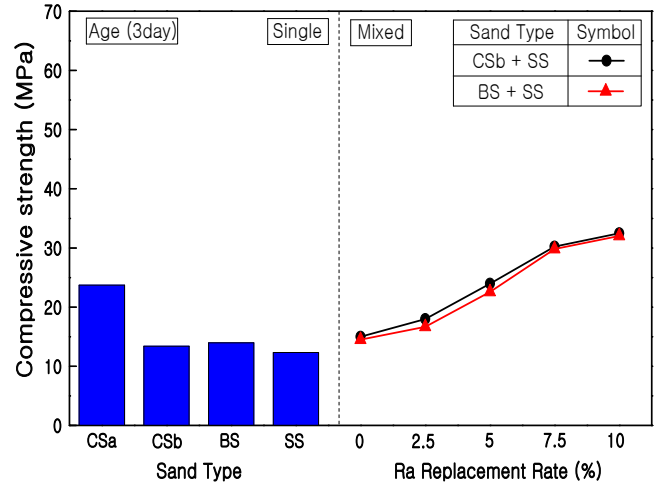


Figure 9. Compressive strength fine aggregate type and Ra replacement (3 days)

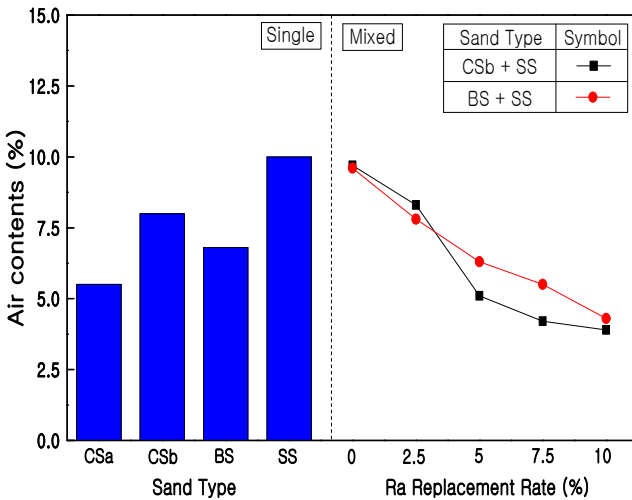


Figure 8. Air contents with fine aggregate type and Ra replacement

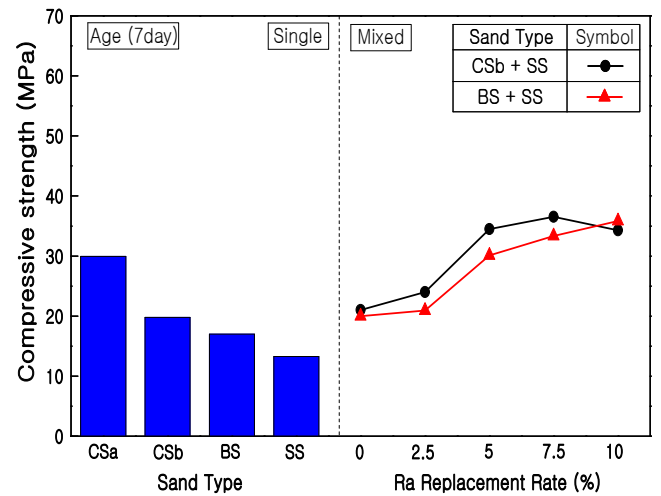


Figure 10. Compressive strength fine aggregate type and Ra replacement (7 days)

써, 볼베어링에 기인하여 유동성이 증가하나, 공기량 감소에 의한 유동성 감소 및 미정제 석탄회의 불량한 입형 등이 복합적으로 작용하여 유동성에 큰 변화가 없는 것으로 분석된다.

4.2.2 공기량

Figure 8은 잔골재의 종류 및 Ra치환율 변화에 따른 공기량을 나타낸 그래프이다. Plain인 CSa의 경우에는 목표 범위에 만족하였고, BS, CSb, SS순으로 증가하는 경향을 나타내었다. CSb+SS, BS+SS와 같은 혼합골재인 경우에는 각각 단일로 사용한 경우의 평균값에 비해 증가하는 것으로 나타났다. 여기에 Ra치환율이 증가함에 따라서는 CSb+SS와 BS+SS 모두 감소하는 경향으로 나타냈는데, 이는 Ra에

포함되어 있는 미연소탄분에 의한 AE제 흡착작용에 기인하여 공기량이 감소한 것으로 판단된다. 하지만 Ra치환율 5%에서는 Plain인 CSa와 비슷한 수준의 공기량이 확보되는 것을 확인하였다. 또한, 전반적으로 BS+SS가 CSb+SS보다 높은 공기량을 나타냈는데, 이는 BS+SS의 경우 미립분이 CSb+SS보다 많이 함유됨에 따른 점성증가로 갇힌 공기를 많이 형성함에 기인한 것으로 판단된다.

4.3 경화 모르타르의 특성

4.3.1 재령 3일 압축강도

Figure 9는 골재 종류별 및 Ra치환율 변화에 따른 재령

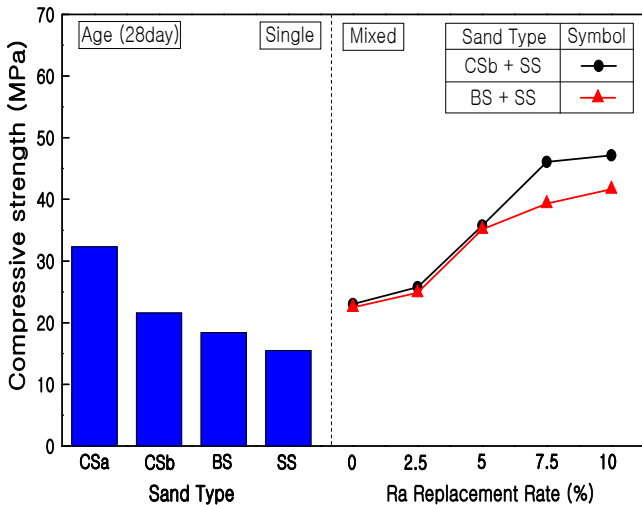


Figure 11. Compressive strength fine aggregate type and Ra replacement (28 days)

3일의 압축강도를 나타낸 그래프이다. 단일골재 배합에서는 Plain인 CSa가 가장 높은 압축강도를 나타내었고, BS, CSb, SS의 순이었다. 혼합골재인 CSb+SS와 BS+SS의 경우에는 연속입도분포에 기인하여 각각 단일로 사용한 경우의 평균값에 비해 높은 압축강도를 나타내었으나 양호한 품질의 CSa보다는 낮은 강도를 발휘하였다. 또한, 혼합골재에 Ra치환율이 증가함에 따른 압축강도는 S커브 모양으로 증가하게 나타났는데, 전반적으로 CSb+SS가 BS+SS보다 높은 압축강도를 발휘하는 것이 확인되었다. 이는 CSb+SS가 BS+SS보다 갇힌 공기를 적게 함유함에 기인하여 CSb+SS가 더 높은 압축강도를 발휘하는 것으로 판단된다.

4.3.2 재령 7일 압축강도

Figure 10은 재령 3일과 동일하게 7일의 압축강도를 나타낸 그래프이다. 단일골재의 경우 재령 3일과 유사하게 양호한 골재인 CSa가 가장 높은 압축강도를 발휘하였고 CSb, BS, SS의 순이었다. 혼합골재의 경우도 재령 3일과 비슷한 경향으로 나타났으며, Ra치환율이 증가함에 따라 S커브 모양으로 증가하는 경향이 나타났다. 또한, CSb+SS의 경우가 전반적으로 BS+SS의 경우에 비해 높은 압축강도를 발휘하였다. 이의 원인은 재령 3일과 동일한 것으로 사료된다.

4.3.3 재령 28일 압축강도

Figure 11은 재령 28일의 압축강도를 나타낸 그래프이다. 단일골재의 경우 재령 3, 7일과 유사하게 양호한 골재인

CSa가 가장 높은 압축강도를 발휘하였고, CSb, BS, SS의 순이었으며, 혼합골재의 경우도 재령 3, 7일과 비슷한 경향으로 단일골재의 평균보다 증가하는 것으로 나타났다. 또한 Ra치환율이 증가함에 따라 압축강도는 증가하는 경향으로 나타났는데, CSb+SS의 경우가 BS+SS인 경우에 비해 높은 압축강도를 발휘하는 것이 확인되었다. 특히 CSb+SS에 Ra를 7.5%, 10%정도 치환할 경우 압축강도가 가장 크게 증가하는 것을 확인하였다. 이는 Ra가 치환됨에 따라 골재의 입도개선에 의한 공극충전, 공기량 감소 및 Ra의 포졸란반응에 기인하여 압축강도가 증진된 것으로 판단된다.

4.4 종합분석

Table 8은 CSa를 사용하는 경우를 100%로 하여 혼합골재의 종류별 Ra치환율 변화에 따른 품질 변화율을 종합적으로 분석하여 나타낸 것이다. CSb+SS와 BS+SS는 비슷한 경향으로 2종 혼합골재의 경우는 약간의 품질 저하가 확인되었으나, Ra치환율이 증가할수록 품질이 향상되는 것으로 분석되었다. 단, Ra 7.5% 이상에서는 품질상으로는 문제가 없을지라도 골재의 입도분포가 표준입도 범위에 포함되지 않는 것으로 나타났다.

Table 8. Analysis of quality change rate

Type	CSa ¹⁾ (%)	Ra replacement (%)									
		CSb+SS					BS+SS				
		0	2.5	5	7.5	10	0	2.5	5	7.5	10
Grading curve	OK	OK	OK	OK	NG	NG	OK	OK	OK	NG	NG
Flow	100	109	109	108	107	107	109	111	112	111	112
Air contents	100	176	151	93	76	71	175	142	115	100	78
Compressive strength (3 days)	100	63	76	101	127	137	61	70	95	126	135
Compressive strength (7 days)	100	70	80	115	122	114	67	70	100	111	119
Compressive strength (28 days)	100	71	80	111	143	146	70	77	109	122	129

1) Compressive strength with CSa
 * □ less than 100, ■ 100 ~ 120, ▨ higher than 120

종합적으로 혼합골재인 CSb+SS, BS+SS에 Ra를 5% 치환할 경우는 양호한 골재를 사용한 경우의 시멘트 모르타르 품질과 동등 이상이 되는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구는 서로 다른 입도의 골재를 혼합한 혼합골재에 Ra의 치환율을 변화시켜 골재의 입도 및 시멘트 모르타르의 기초적 특성을 분석함으로써 3성분계 혼합골재의 가능성을 분석하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구범위 내에서 굵은 입자가 많아 표준입도를 벗어난 CSb 및 BS와 가는 입자가 많아 표준입도를 벗어난 SS를 6:4의 비율로 혼합하면 양호하게 표준입도범위를 만족하는 것을 알 수 있었고, Ra 치환율 5%까지는 표준입도범위에 속하였지만 그 이상에서는 벗어난 결과이었다.
- 2) 모르타르 실험에서 플로치는 입도가 불량한 CSb, BS 및 SS를 단일로 사용하였을 경우에 비해 CSb+SS, BS+SS와 같이 혼합하여 사용할 경우 증가하는 것으로 나타났다. 또한 CSb+SS, BS+SS 혼합골재에 Ra를 치환할 경우에는 모두 플로치에 큰 변동이 없는 것으로 나타났다.
- 3) 공기량은 CSb 및 BS에 SS 골재를 혼합하여 사용할 경우 단일로 사용할 경우에 비해 증가하는 것으로 나타났다. 단, 혼합골재에 Ra를 치환할 경우는 그 치환율이 증가할수록 급격히 감소하는 것으로 나타났다.
- 4) 압축강도는 CSb, BS 및 SS를 단일로 사용할 경우에 비해 CSb+SS와 BS+SS와 같이 혼합하여 사용할 경우가 높은 압축강도를 보였다. 더욱이 2종 혼합골재에 Ra치환율이 증가함에 따라서는 S커브 모양으로 증가하는 것으로 나타났는데, 특히 Ra치환율 5% 이상부터는 양호한 골재인 CSa보다 높은 압축강도를 발휘하는 것으로 나타났다.

이상을 종합하면 입도가 불량한 골재를 혼합하여 사용하면 유동성 확보 및 강도증진에 긍정적이며, 추가적으로 Ra를 5%정도 치환할 경우에는 유동성, 적정 공기량 확보 및 강도증진에 효과적으로 기여하게 됨을 확인할 수 있다. 또한, 미립분이 적은 CSb+SS의 경우가 미립분이 다소 많은 BS+SS의 경우보다 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

요 약

본 연구는 국내의 부족한 골재자원확보, 폐기물 재활용 및 콘크리트의 품질향상을 목적으로 시도되었다. 즉, 잔골재

의 혼합은 굵은 입자를 많이 포함하여 표준입도범위를 벗어나는 석산B(CSb) 및 건설현장의 터파기한 발파석을 분쇄한 발파석(BS)과 미세한 입자를 많이 포함하여 표준입도범위를 벗어나는 해사(SS)를 혼합하는 것으로 한다. 또한, CSb+SS, BS+SS를 혼합골재로 제조할 경우, 전반적으로는 표준입도범위에 포함될지라도 0.15mm이상의 미립자가 부족하므로써 모르타르 및 콘크리트 품질에 결함으로 나타날 수 있다. 따라서 여기에 겨울철 초기강도에 기여하지 못하므로써 버려지는 화력발전소의 미정제 석탄회(Ra)를 0~10% 범위에서 치환하는 것을 검토하였다. 연구결과, CSb 혹은 BS와 SS를 6:4의 비율로 혼합하여 혼합골재로 제조하고, 여기에 Ra를 5% 치환할 경우 골재의 입도측면 및 시멘트 모르타르의 품질 측면에서 가장 양호한 결과가 얻어짐을 확인할 수 있었다.

키워드 : 미정제 석탄회, 미립분 보충재, 혼합골재, 시멘트 모르타르

References

1. Kim SW, Jang YJ, Park YH, Park CW. Strength development of fiber reinforced lean concrete using fly ash and reject ash under different compaction methods including small scale roller vibrator. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2012 Oct;24(5):543-51.
2. Moon BY, Lee JH, Kim MS, Song HH, Han MC, Han CG. Effect of a change in the quality of fly ash on the engineering characteristics of mortar. *Proceedings of Architectural Institute of Korea*; 2016 Apr; Architectural Institute of Korea, Seoul, Korea, Seoul(Korea): Architectural Institute of Korea; 2016. p. 359-60.
3. Oh SH, Seo CH. An experimental study on the properties of concrete with replacement of fine aggregate by reject-ash. *Proceedings of Architectural Institute of Korea*; 2016 Apr; Architectural Institute of Korea, Ulsan, Korea, Seoul(Korea): Architectural Institute of Korea; 1997. p. 1311-5.
4. Han CG, Park BM. Analyzing the engineering properties of cement mortar using mixed aggregate with reject ash. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*. 2017 Sept;5(3):247-52.