

최근 환경부하 저감 및 콘크리트 성능 향상 등의 목적으로 널리 사용되고 있는 전력산업부산물로써, 자체적인 수화반응은 발휘되지 않지만 수산화칼슘과 같은 알칼리 환경에서는 상온에서 C-S-H 수화물을 생성하는 포졸란 반응으로 강도가 발현되는 특징이 있다. 이에 RA 및 RP의 알칼리성을 FA의 포졸란 반응에 활용한다면 상호보완적인 문제 해결이 가능할 것으로 추측된다[5].

따라서, 본 연구에서는 높은 강도를 필요로 하지 않는 성벽토, 뒷채움재 등의 용도를 대상으로 순환 자원만을 활용한 기반매립재 개발을 위한 기초적인 연구로써, RA를 사용한 FA 모르타르에 알칼리 자극 및 공극충전 목적으로 RP를 일정비율 치환하여, 무 시멘트 조건에서의 강도발현성을 검토하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 모르타르 배합사항은 Table 2와 같다.

즉, 모르타르 배합비는 1(FA) : 2(RA) 1수준에 대하여, FA에 대하여 RP 치환율을 0, 25, 50, 75, 100 %의 5수준으로 배합 계획하였다. 각각의 양생온도는 20°C 표준조건과 35°C 서중조건을 고려하는 2수준으로 하였는데, 이때, W/B는 목표 플로우치 150±10 mm에 만족하도록 배합 설계하였다. 실험사항으로는 굳지 않은 모르타르에서 플로우치 및 공기량, 경화 모르타르에서는 압축강도 및 SEM을 측정하는 것으로 하였다.

Table 1. Experiment plan

Factors		Levels
Mix proportion		1 : 2
Target flow (mm)		150±10
Mixture	W/B (%)	Based on target flow
	RP contents (%)	0, 25, 50, 75, 100
Curing temperature (°C)		20, 35 ¹⁾
Experiment	Fresh mortar	· Flow · Air contents
	Hardened mortar	· Compressive strength (7, 28, 42, 91, 180 days) · SEM (7, 28 days)

2.2 사용재료

본 연구의 사용재료로써 FA는 국내 S사산 2종을 사용하였는데, 그 물리·화학적 성질은 Table 3과 같고, RA는 국내 D사산을 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 4와 같으며, 입도분포는 Figure 1과 같다.

한편, FA에 대한 알칼리 자극재 및 공극 충전재로 사용된 RP는 국내 D사산을 사용하였는데, 그 물리·화학적 성질은 Table 5, X선 회절분석 결과는 Figure 2와 같다.

Table 2. Mixing proportions

Mix proportion	Target flow (mm)	RP contents (%)	W/B (%)	W (kg/m ³)	Unit weight (kg/m ³)		
					FA	RP	RA
1 : 2	150±10	0	40	225	561	0	1 123
		25	48	259	404	135	1 077
		50	50	267	267	267	1 068
		75	55	287	130	391	1 043
		100	57	295	0	517	1 034

Table 3. Physical and chemical properties of FA

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	L.O.I (%)	Moisture content (%)	SiO ₂ (%)
2.20	3 404	4.60	0.13	57.6

Table 4. Physical properties of RA

Density (g/cm ³)	FM	Water absorption (%)	Passing amount of 0.08 mm sieve (%)	pH
2.20	2.76	6.20	2.40	11.5

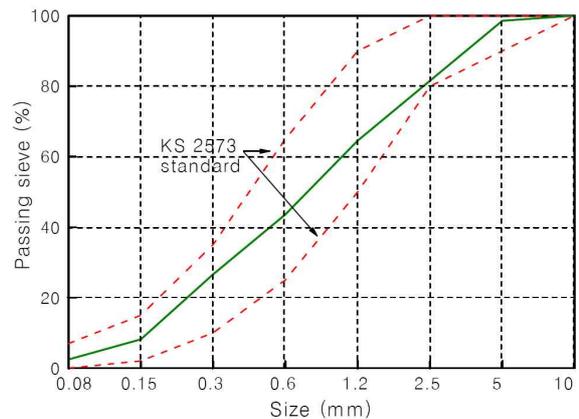


Figure 1. Particle size distribution of RA

Table 5. Physical and chemical properties of RP

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	pH	Chemical composition (%)					L.O.I (%)	
			SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO		K ₂ O
2.30	6 443	12.4	27.35	6.66	5.99	33.87	1.54	2.47	20.26

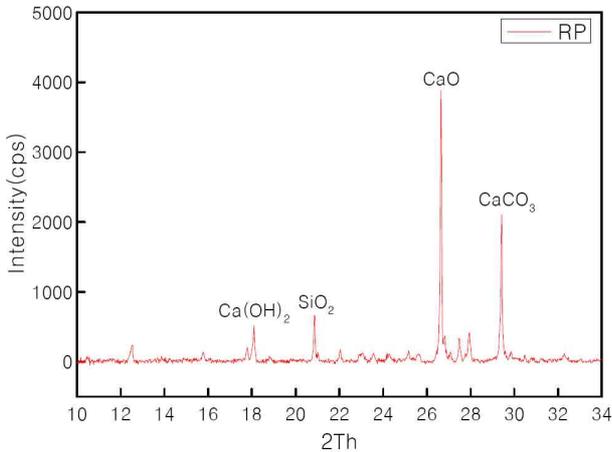


Figure 2. XRD result of RP

특히, Figure 2는 상온에서 보관한 RP 시료의 XRD 분석결과를 나타낸 그래프로써, RP 조성물질에 있어 기본적인 물질은 Ca(OH)_2 , SiO_2 , CaO , CaCO_3 등의 수화물질이 존재하는데, 이 중 알칼리성을 띠는 Ca(OH)_2 의 경우, 약 18° 에서 회절 피크가 높게 관찰되는 것으로 나타났으며, CaCO_3 의 경우는 Ca(OH)_2 가 공기 중의 CO_2 에 의해 탄산화(중성화)되면서 생성되어 약 29° 에서 관측되었다. 또한, RP 조성물질 중에 가장 큰 비중을 차지하는 물질은 약 26° 에서 관찰된 CaO 로 나타났는데, 이는 약 21° 에서 관측된 SiO_2 와 함께 시멘트의 주성분 중에 하나로서 순환골재 생산 시 발생하는 분진인 RP에도 일정량의 미수화 시멘트 성분이 존재하고 있는 것을 알 수 있었으며, FA에 대한 자극제 역할로 CaO 및 Ca(OH)_2 가 RP의 pH를 높임으로써 FA의 수화반응을 촉진시킬 수 있을 것으로 사료된다[6].

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 모르타르의 혼합은 KS L 5109에 의거, 전동식 혼합 믹서를 사용하여 Figure 3과 같이 혼합하였다.

굳지 않은 모르타르의 실험으로 플로우치는 KS L 5111, 공기량은 KS F 2421에 의거하여 실시하였고, 양생 방법은 양생온도 수준에 따라 각 수조 온도를 조절하여 실시하였다. 경화 모르타르 실험으로 압축강도는 KS L 5405 규정에 의거하여 실시하였으며, SEM 사진은 계획된 재령의 경화 모르타르를 이용하여 주사식 전자현미경으로 10 000배율로 촬영하였는데, 각 실험방법의 모습은 Figure 4와 같다.

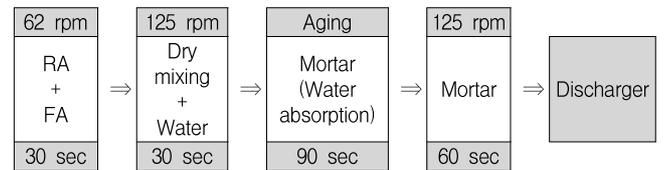


Figure 3. Mixing sequence

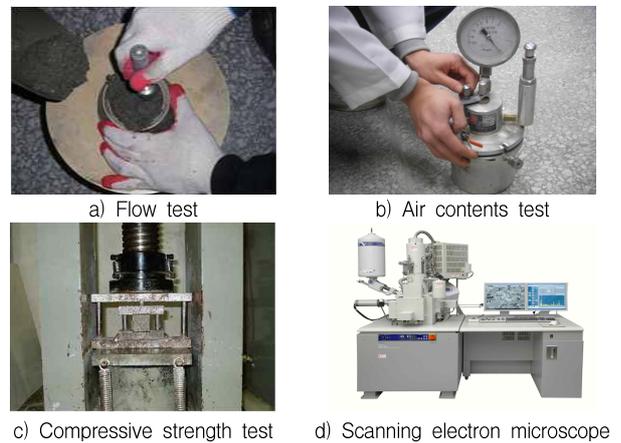


Figure 4. Experiment equipment set up

Table 6. Test result

RP contents (%)	Experiment result								
	W/B (%)	Flow (mm)	Air contents (%)	Curing temperature (°C)	Compressive strength (MPa)				
					1~14 days	28 days	42 days	91 days	180 days
0	40	146.0	3.0	20	0	1.64	1.66	1.70	1.78
				35	0	2.44	2.50	2.85	3.00
25	48	155.5	3.0	20	0	1.84	1.90	1.92	2.20
				35	0	2.64	2.70	3.07	3.32
50	50	144.5	3.2	20	0	1.82	1.85	1.86	2.00
				35	0	1.98	2.00	2.10	2.28
75	55	154.5	3.5	20	0	1.70	1.76	1.78	1.82
				35	0	1.68	1.73	1.80	1.95
100	57	141.0	4.0	20	0	1.58	1.60	1.65	1.70
				35	0	1.56	1.60	1.66	1.73

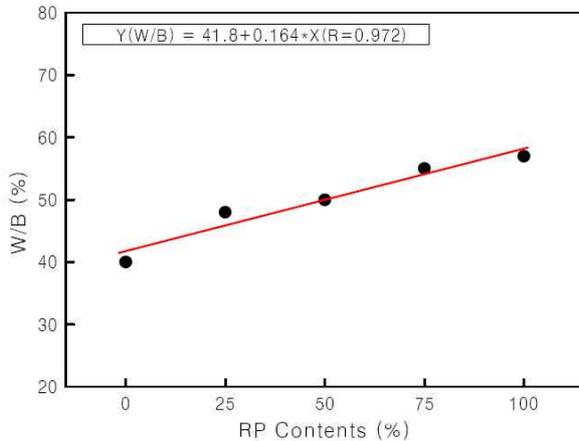


Figure 5. W/B with RP contents

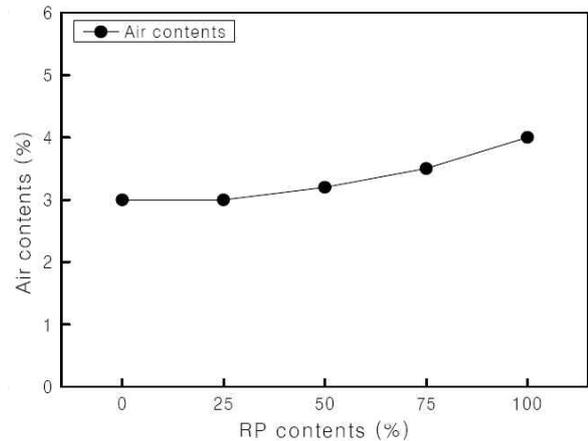


Figure 6. Air contents with RP contents

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험결과

Table 6은 본 연구의 실험결과를 나타낸 것이다.

3.2 굳지 않은 모르타르의 특성

3.2.1 W/B 선정

Figure 5는 RP 치환율 변화에 따른 W/B 선정 결과를 나타낸 그래프이다. 모든 W/B는 목표 플로우치 범위를 만족하도록 배합설계 하였으므로, 전반적으로 RP 치환율이 증가할수록 W/B는 증가하는 경향을 보였다.

이는 RP의 높은 흡수율로 인한 배합수의 소실현상과 Blain 6 000 cm^2/g 이상의 높은 분말도가 혼합수와 접촉하기 위한 비표면적의 증가를 야기시켜[7], 이로 인해 플로우치가 저하된 것으로 분석된다.

3.2.2 공기량

Figure 6은 RP 치환율 변화에 따른 공기량을 나타낸 그래프이다. 전반적으로 RP 치환율이 증가할수록 공기량은 증가하는 경향을 나타내었다.

이는 FA의 경우, 미연소 탄분에 의한 공기량 흡착 성질을 가지고 있는 반면, RP의 경우는 입자가 다소 거칠고 다공질 구조로 형성되어, RP 치환율이 증가하면 FA 함유량이 감소하여 공기량이 점차 증가하는 것으로 분석된다[7][8].

3.3 압축강도 특성

Figure 7은 양생온도 20°C에서의 RP 치환율별 재령 경과에 따른 압축강도를 log scale로 나타낸 그래프이고, Figure 8 및 9는 재령별 RP 치환율 변화에 따른 압축강도 및 강도발현율을 나타낸 그래프이다.

전반적으로 RP 치환율과 관계없이 재령 14일 이전까지는 강도가 발휘되지 않다가, 재령 14일 이후 28일 이전을 기점으로 약 1.5 ~ 2 MPa 정도의 강도값을 보였고, 재령 180일에 이르러서는 RP 25%에서 약 2 MPa를 상회하는 최고 강도값을 나타내었다.

이는 재령 14일 이전까지는 RA와 RP에서 용출되는 알칼리 이온이 FA의 포졸란 반응을 적절히 자극시키지 않아 강도값을 나타내지 못한 것으로 사료되고, 재령 14일 이후에는 FA의 포졸란 반응이 진행됨에 따라 강도가 어느 정도 발현되었으나, 일반적인 모르타르와 달리 다소 낮은 강도값을 나타내었다.

한편, RP 치환율이 증가할수록 RP 100%를 제외한 모든 수준에서 순수 FA에 비해 강도가 증가하였고, RP 25%에서는 최고 강도값을 나타내었는데, 이는 모르타르 내부에 RP가 치환됨에 따라 포졸란 반응의 추가 자극재 효과 및 모르타르 내부의 공극 충전 효과에 기인한 것으로 사료되고, RP 25% 사용 시에는 RP가 치환됨에 따라 감소되는 FA양을 RP의 포졸란 반응 자극 및 공극충전 효과로 적절히 상승 시킴으로써 최고 강도값을 나타낸 것으로 분석된다.

Figure 10 ~ 12는 양생온도 35°C 조건에서 전술한 바와 같이 재령 경과 및 RP 치환율 변화에 따른 압축강도를 나타낸 그래프이다.

전반적으로 양생온도 35°C의 압축강도는 20°C와 유사한

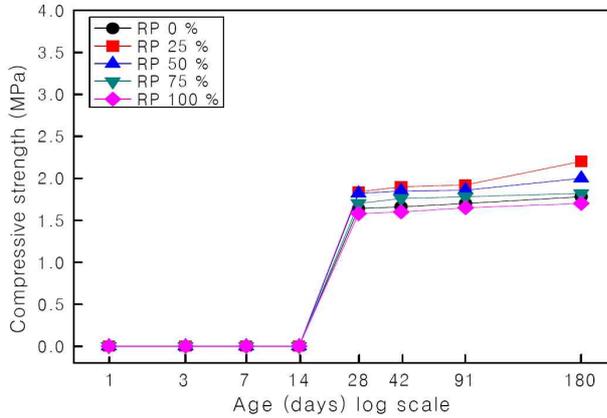


Figure 7. Compressive strength with RP contents and age (20°C)

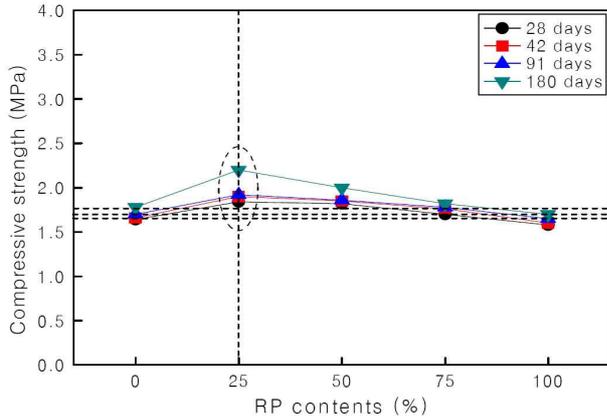


Figure 8. Compressive strength with RP contents and age (20°C)

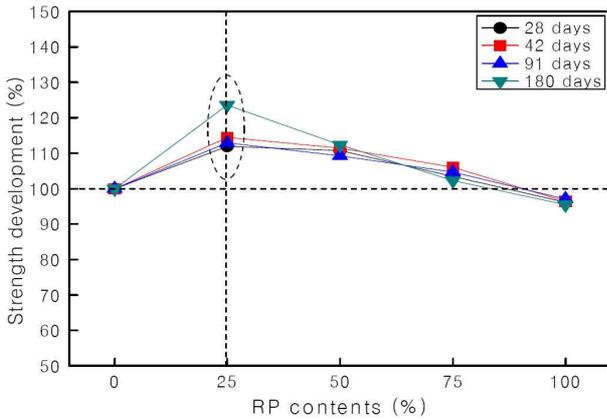


Figure 9. Compressive strength with RP contents and age (20°C)

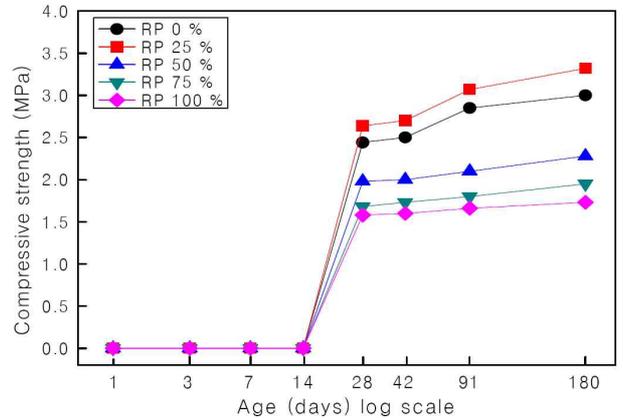


Figure 10. Compressive strength with RP contents and age (35°C)

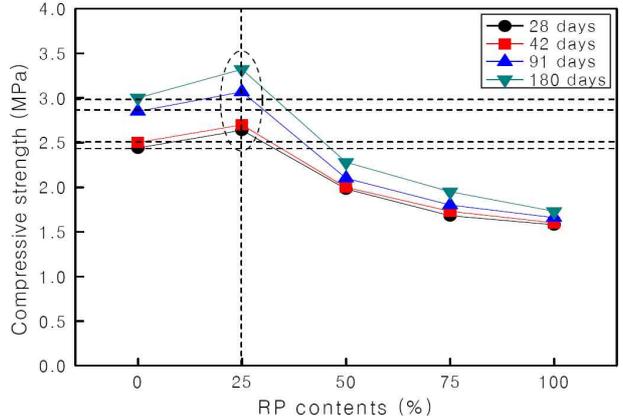


Figure 11. Compressive strength with RP contents and age (35°C)

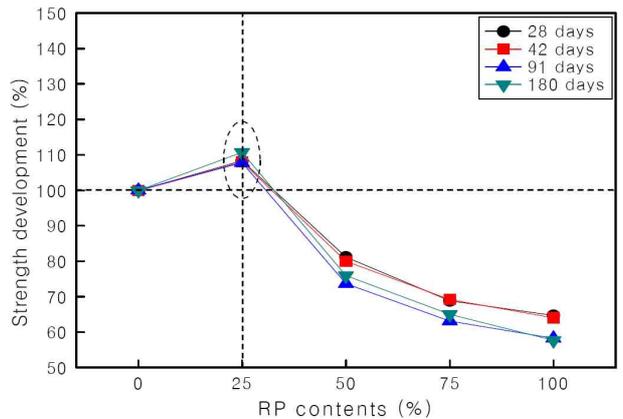


Figure 12. Compressive strength with RP contents and age (35°C)

강도증진 경향을 보였으나, 단, RP 치환율 25 %에서는 10 % 전후의 강도증진 현상이 나타나 제일 큰 값을 보였지만, 그 이상의 치환율은 0 %보다 저하하였다.

이는 고온 조건에서 FA의 온도의존성에 기인한 것으로 써, 양생온도 20°C에서 RP 치환율 100 %는 제외하고 RP 치환율이 증가할수록 순수 FA가 사용된 경우보다 높은 강

도값을 보였지만, 양생온도 35°C의 경우는 FA 함유량이 어느 정도 확보되어야지만 강도발현에 있어 유효한 영향을 미칠 수 있어 RP 25 %를 제외하고는 순수 FA보다 강도값이 저하된 것으로 분석된다.

Figure 13은 재령 및 양생온도별 RP 치환율 변화에 따른 압축강도를 나타낸 것이다.

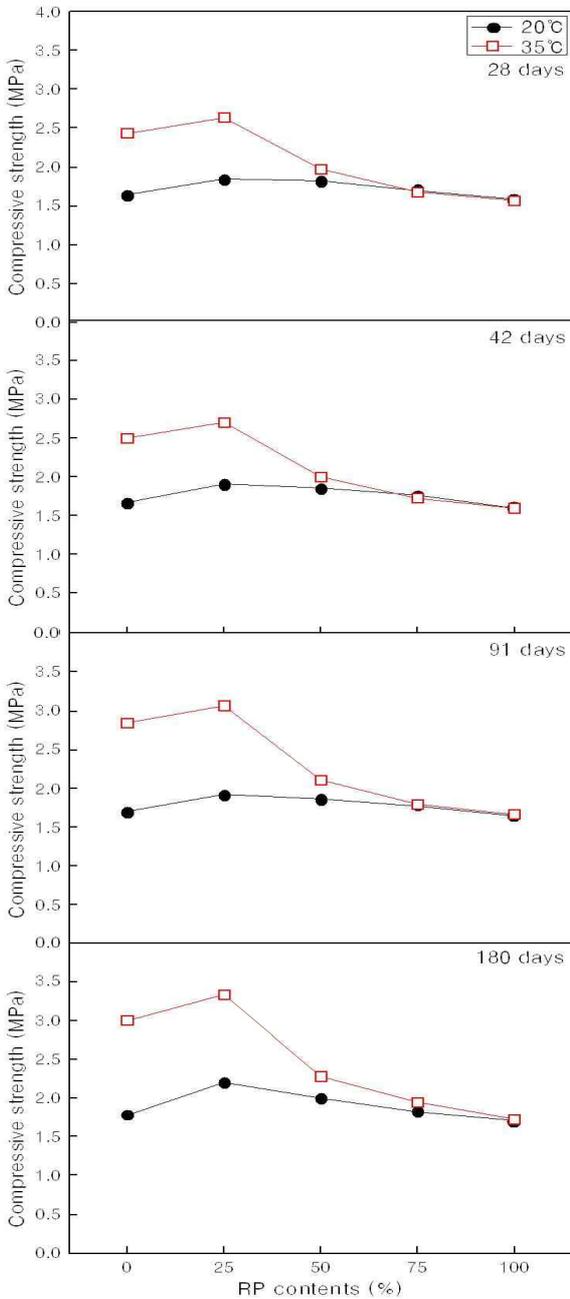


Figure 13. Compressive strength depending on RP contents with curing temperature and age

전반적으로 순수 FA 및 RP 25%까지는 양생온도 20°C에 비해 35°C에서 약 1 MPa 전후의 압축강도 증가 경향이 나타났으나, RP 50% 이상으로 치환율이 증가할수록 양생온도에 따른 강도 편차는 크지 않고 유사한 강도값을 보이는 것으로 나타났다.

이는 RP 치환율이 증가할수록 상대적으로 온도의존성이 큰 FA 함유량이 저하됨에 따른 것으로써[7], FA 대신 RP

가 75% 이상 치환되었을 경우는 강도 발현에 있어 양생온도에 의한 영향을 거의 받지 않고, 유사한 강도값을 보이는 것으로 나타났다.

Figure 14는 양생온도에 따른 압축강도의 상관관계를 나타낸 그래프이다. 전반적으로 양생온도 20°C보다 35°C에서 크게 발휘되었는데, 강도가 증가할수록 양생온도에 따른 강도편차가 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

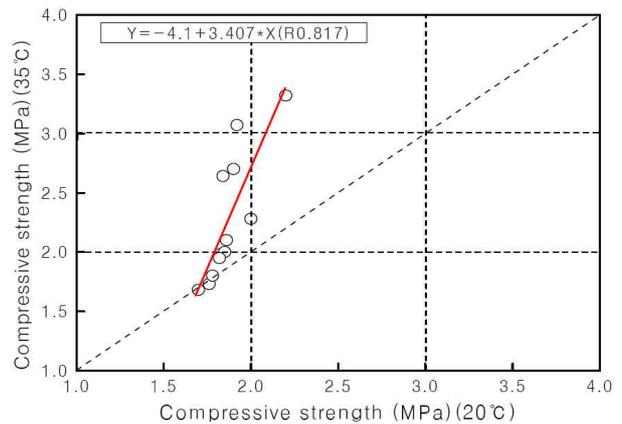


Figure 14. Relationship between compressive strength at 20°C and compressive strength at 35°C

3.4 SEM

Figure 15는 재령 7일 및 28일에서 RA 사용 FA 모르타르 경화체의 RP 치환율 변화에 따른 SEM 화상을 10,000배로 확대하여 미세구조를 나타낸 것이다.

먼저, RP 치환율 0%로 순수 FA만을 사용한 경우, 재령 7일에서는 구형의 FA 입자가 다량 관측되었지만, 수화반응이 크게 진행되지 않아 강도를 발현시키지 못한 것으로 사료되고, 재령 28일에서는 구형의 FA 입자 주변으로 RA에서 용출된 알칼리 이온에 의해 포졸란 반응이 진행되어 생성된 수화물이 FA 입자 표면 및 주변 공극을 어느 정도 채워주고 있는 것으로 나타나, 미소하지만 강도가 발현되고 있음을 확인할 수 있었다.

또한, RP가 치환되어진 모든 수준에서 재령 7일의 경우, 구형의 FA 입자 주변으로 RP의 미수화 시멘트 입자가 위치하고 있는 것으로 관측되었고, 재령 28일의 경우는 FA 입자의 포졸란 반응과 더불어 RP의 알칼리 자극 및 미수화 시멘트 입자의 재수화 반응으로 인하여 수화물이 상당량 생성되므로 공극 구조가 밀실하게 나타내[9], 순수 FA만 사용된 경우에 비해 강도값이 다소 향상되게 된 것으로 분석된다.

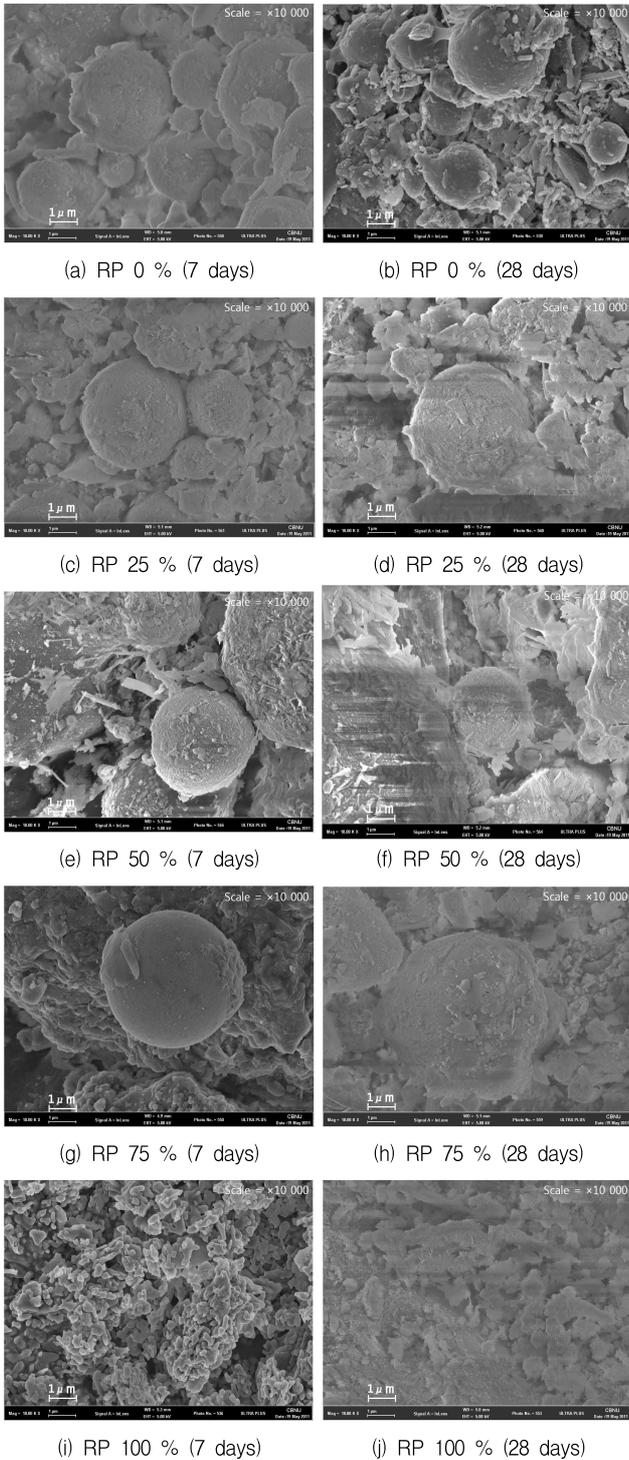


Figure 15. SEM result with RP contents and age

한편, RP가 100 % 사용된 경우에도 RP는 미수화 시멘트 입자가 어느 정도 함유되어 있는 것으로서, 이후 재령이 경과됨에 따라 이의 수화반응으로 인해 수화생성물이 공극을 충전시켜 어느 정도 강도가 발현된 것으로 사료된다[10].

이상을 종합하면, FA와 RA를 혼합 사용하였을 경우 시멘트를 전혀 사용하지 않은 무 시멘트 상태에서도 강도가 발현되었는데, 이에 대한 활용방안으로는 강도가 크게 중요치 않은 지반대체 용도, 성·복토 및 지반매립재 등의 용도에 사용하면 강알칼리성 침출수에 의한 환경파괴 방지, 지반안정화 등 보다 유효한 활용이 가능할 것으로 판단된다. 특히, 순환골재 생산 시 발생하는 먼지를 집진한 RP를 FA에 대하여 약 25 % 정도를 치환하여 사용하면 알칼리 자극 및 미세립자의 공극충전 효과로 말미암아 강도가 약 10 % 정도 향상되어 RP의 환경파괴 방지 및 경제성적인 향상 측면도 존재하여 효과적인 자원 재활용대책인 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구는 시멘트를 전혀 사용하지 않은 상태에서, RA 사용 FA 모르타르의 특성에 미치는 RP 치환율의 영향을 검토하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 굳지 않은 모르타르의 특성으로 W/B는 RP 치환율이 증가할수록 플로우치가 저하됨에 따라 상대적으로 증가시켜 주어야 하였고, 공기량은 RP 치환율이 증가함에 따라 동반하여 상승되는 경향을 나타내었다.
- 2) 압축강도 특성으로 재령 14일 이내인 초기재령에서는 강도가 거의 발휘되지 못하였으나, 재령 14일을 기점으로 28일에 이르러서는 약 1.5 ~ 2.0 MPa 정도의 강도값을 나타내었고, 이후 재령이 경과함에 따라 다소 증가하는 경향이였다.
- 3) 양생온도 20℃인 경우, RP 100 %를 제외한 모든 치환율에서 순수 FA에 비해 RP의 알칼리 자극 및 공극충전 효과로 인해 강도는 증진되었는데, 특히 RP 25 %치환율일 때 최고 강도값을 나타내었다. 한편, 양생온도 35℃에 따른 압축강도는 20℃와 유사한 경향을 보였지만, 단, RP 치환율 25 %보다 치환율이 증가할수록 고온의 영향은 적게 받는 것으로 나타났다.
- 4) SEM 분석결과, 시멘트를 사용하지 않은 순수 FA에서도 일정 재령이 경과하면 RA의 알칼리 자극으로 FA의 포졸란 반응에 의해 조직이 치밀화됨을 확인할 수 있었고, RP 치환율이 증가함에 따라 RP 중의 미수화 시멘트 입자와의 수화반응으로 조직이 더욱 밀실하게 생성됨을 확인할 수 있었다.

이상의 결과를 종합하면, 성·복토 등 지반매립재 등의 용도를 대상으로 RA와 FA를 혼합하여 사용한다면 지반 고형화에 필요한 강도는 만족시킬수 있을 것이라 사료되고, FA에 대하여 RP를 25 % 정도 치환하여 활용하게 된다면 품질이 더욱 향상됨과 더불어 폐기물 처리 및 경제성적인 측면에서도 유익해 질 것으로 판단된다.

요 약

본 연구는 지반매립재 용도를 대상으로 무 시멘트 상태에서, RA 사용 FA 모르타르의 특성에 미치는 RP 치환율의 영향을 검토하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저, W/B 및 공기량은 RP 치환율이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 압축강도는 재령 14일 이전 초기 재령에서는 강도가 거의 발휘되지 못하였으나, 재령 14일을 기점으로 28일에 이르러서는 약 1.5 ~2.0 MPa 정도의 강도값을 나타내었다. 양생온도 20℃의 경우 RP 치환율 100 %를 제외한 모든 수준에서 순수 FA에 비해 RP 치환율이 증가할수록 강도는 증가하였는데, RP 25 %에서 최고 강도값을 나타내었다. 양생온도 35℃에서는 20℃보다 RP 치환율이 작을수록 온도의존성이 큰 것으로 나타났다. 한편, SEM 분석결과, 순수 FA에서도 일정 재령이 경과하면 RA의 알칼리 자극으로 포졸란 반응이 생성되어 조직이 치밀화됨을 확인할 수 있었고, RP 치환율 25 %일 때 RP의 미수화 시멘트 입자의 수화 및 FA의 포졸란 반응으로 수화물이 가장 밀실하게 생성되었다.

키워드 : 순환잔골재, 플라이애시, 순환골재 미분말, 무 시멘트, 지반매립재

References

1. Policy of Green Growth [Internet]. Korea: Presidential committee on green growth, 2009 - [cited 2011 March 1]. Available from: <http://www.greengrowth.go.kr/>
2. Ministry of Land (KR). [Recycled aggregates quality standard]. Gwacheon (Korea): Ministry of Land; 2009. p. 82. Korean.
3. Lee DH. Problem and countermeasure of recycled aggregates for concrete. Korean national housing corporation, Housing and Urban, 2004 August;83:29-35.
4. Han CG, Son SH, Park KT. Effect of recycled aggregates powder on the properties of zero cement mortar using the blast furnace slag powder and recycled fine aggregates. Journal of Architectural Institute of Korea, 2011 June;27(6):99-106.
5. Han CG, Son SH, Park KT. Quality Properties of Mortar Using the Recycled Fine Aggregates and Fly Ash Depending on Mixing Factors. Journal of Korea Recycled Construction Resource Institute, 2010 December;5(4):99-105.
6. Yamamoto Y. Municipal waste from ash "Echo-cement". Monthly Chemical Technology, 1998 April;4: 36-8.
7. Jun MH, Bae WT, Kim SH, Soung JK. Development of Soil Stabilizer for Sludge Produced in Recycled Aggregate Process of Manufacturing. Journal of Korea Society of Waste Management Institute, 2006 August;23(5):384-91.
8. Song HY, Lee SS, Lee SY. An Experimental Study on the Influence of High Fineness Fly Ash and Water-Binder Ratio on Properties of Concrete. Journal of Korea Concrete Institute, 2009 February;21(1):29-35.
9. Ahn JC, Oh SG, Kang BH. Hydraulic Properties of the Recycled Cement made of By-Product Cementitious Powder from Concrete Waste. Journal of Architectural Institute of Korea, 2005 September;21(9):121-28.
10. Han CG, Son SH, Park KT. Quality properties of zero cement blast furnace slag mortar using the recycled fine aggregates depending on mixing factors. Journal of Korea Recycled Construction Resource Institute, 2010 September;5(3):69-76.