

플라이애시의 정제가 모르타르의 공학적 특성에 미치는 영향

Effect of Refinement of Fly Ash on Engineering Properties of Cement Mortar

한민철¹ · 문병룡^{2*}Min-Cheol Han¹ · Byeong-Yong Moon^{2*}

(Received August 16, 2017 / Revised September 14, 2017 / Accepted September 14, 2017)

This study is to investigate experimentally the effect of refining of fly ash (FA) on the engineering properties of the cement mortar. Five different FAs are used including raw fly ash, refined fly ash, reject ash and their two different combinations. The cement mortars are fabricated with 1:1(binder to fine aggregate), 1:3 and 1:5 respectively, which are replaced 30% of FA by cement. Test results, indicated that, the flow of Ra showed lower flowability than Rf at all mixing ratios. Also in the case of Rj, it was expected to show low fluidity, but it showed flowability equal to or higher than Rf. Air contents are all formulations except Rf and Rj did not satisfy the target range. Using Ra, the refining process shows an air amount about 41% lower than Rf, in the case of Rj, it showed about 19% higher air content than Rf due to porous foreign matters inside the mortar. Compressive strength was in the early days 3 and 7, the strength was lower than that of Plain's OPC, after 28 days Rf exerts higher strength than other FAs, it was confirmed that higher strength than OPC can be secured at a mixing ratio of 1:1 and 1:3. For frost resistance, the use of unrefined FA resulted in decrease of frost resistance sharply due to loss of air content by the use of unrefined FA. Therefore, it is considered that the use of high quality FA through refining process will contribute positively to the economical formulation of concrete and the stability of the structure.

키워드 : 플라이애시, 원분, 정분, 리젝트애시, 모르타르, 공학적 특성**Keywords** : Fly ash, Raw fly ash, Refined fly ash, Reject ash, Mortar, Engineering properties

1. 서론

지구온난화 문제가 심각하게 대두됨에 따라 우리나라도 각종 산업분야에서 CO₂ 발생량 절감을 위해 다각도로 노력하고 있는 상황이다(Sho and Park 2012).

특히, 국내 건설 산업에서는 가장 큰 CO₂ 발생량을 차지하는 시멘트의 사용량을 줄이기 위해 각종 산업부산물을 시멘트 대체재로 사용하는 방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이중 대표적으로 플라이애시(이하 FA)의 경우 워커빌리티 개선 및 장기강도 향상 등의 이점이 있어 국내레미콘 산업에서는 가장 많이 활용되는 혼화재료중 하나로 인식되고 있다(Paik and Jung 2002).

이러한 FA의 국내 발생량은 현재 7개 화력발전소에서 연간 800

만 ton 규모로 발생되고 있는데, 이렇게 발생된 FA는 품질확보를 위해 정제 공정을 거쳐 일정 품질이상이 확보된 후 사용되는 것이 일반적이다. 그런데, 최근 일부 FA 정제공장에서는 원가절감 및 생산시간 단축 등의 이유로 정제공정을 거치지 않은 원분 상태의 FA를 레미콘 공장에 납품시켜 문제가 된 사례가 언론에 보도된 적도 있다(Jung 2014). 이 경우 정제되지 않은 FA의 미연소 탄분을 포함한 각종 불순물들이 콘크리트의 품질에 상당한 악영향을 미칠 것으로 사료되나, 아직까지 이러한 영향을 연구한 결과는 보고된 바 없는 실정이다.

특히, 이러한 미정제된 혹은 정제불량의 FA 사용에 따른 콘크리트의 품질문제 발생 시 원인규명 및 책임소재의 판단이 곤란하여 수요자인 레미콘에 피해가 고스란히 전가될 수밖에 없는 상황이

* Corresponding author E-mail: mby4177@naver.com

¹청주대학교 건축공학과, 부교수 (Department of Architectural Engineering, Cheong-ju University, Associate Professor, Cheongju, 28503, Korea)²청주대학교 건축공학과, 석사과정 (Department of Architectural Engineering, Cheong-ju University, Master's course, Cheongju, 28503, Korea)

예상된다.

따라서 본 연구에서는 FA의 정제 여부가 콘크리트의 품질에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하고자 정제전의 FA 원분, 정제된 FA 그리고 극단적인 품질의 리젝트애시의 3종류를 선정하여 이들을 고강도부터 빈배합 모르타르까지 활용함으로써 FA의 정제여부가 모르타르의 공학적 특성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획 및 배합사항은 Tables 1 및 2와 같다. 먼저, 배합요인으로 모르타르의 배합비 (B : S)는 1:1, 1:3, 1:5의 3수준에 대해 물결합재비 (W/B)는 각각 40, 60, 80%로 계획하였다. 여기에 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 배합을 Plain으로 하여 목표 공기량이 4.5±1.5%를 만족하도록 배합 설계하였다. 결합재로는 모든 배합에 FA를 30% 치환하는 것으로 계획하였다.

본 연구에서 사용한 FA는 시판품인 정제된 FA(이하 Rf), 정제과

Table 1. Experimental plan

Factors		Levels	
Mixture	B : S ¹⁾	3	1:1, 1:3, 1:5
	W/B (%) ²⁾		40, 60, 80
	Target air content(%)	1	4.5±1.5
	Binder	2	OPC : FA = 10 : 0 ³⁾
			OPC : FA = 7 : 3
FA type	5	Refine FA(Rf)	
		Refine + Raw FA(Rfa)	
		Raw FA(Ra)	
		Raw + Reject ash(Raj)	
Fresh mortar	2	Flow	
		Air content	
Experiment	Hardened mortar	1	Compressive strength (3, 7, 28, 91days)
			Durability ⁵⁾
	Length change (30, 60, ... 300cycle)		
			Mass change (30, 60, ... 300cycle)

1) Binder: Sand 3) Plain
 2) Water/Binder 4) Relative dynamic modulus of elasticity
 5) Applies only to the W/B(1:3).

Table 2. Mixture proportions of mortar

Series		W/B (%)	W (kg/m ³)	Mass for unit volume of mortar(kg/m ³)			AE (B/%)
B : S	Type			OPC	FA	S	
1 : 1	OPC	40	360	901	0	901	0.065
	Rf		347	608	261	869	0.065
	Rfa		347	607	260	867	0.065
	Ra		347	607	260	867	0.065
	Raj		348	608	261	869	0.065
	Rj		348	610	261	871	0.065
1 : 3	OPC	60	288	480	0	1440	0.025
	Rf		283	330	141	1413	0.055
	Rfa		282	329	141	1411	0.055
	Ra		282	329	141	1411	0.055
	Raj		283	330	141	1413	0.055
	Rj		283	330	141	1413	0.055
1 : 5	OPC	80	262	327	0	1636	0.005
	Rf		258	226	97	1614	0.040
	Rfa		258	226	97	1614	0.040
	Ra		258	226	97	1613	0.040
	Raj		258	226	97	1614	0.040
	Rj		259	226	97	1616	0.040

정을 거치지 않은 원분 FA(이하 Ra), 정제과정 중 버려지게 되는 리젝트애시(이하 Rj), 이들 시료를 혼합한 혼합 FA (이하 Rfa, Raj)의 2종류를 포함해 총 5수준으로 선정하여 총 18배치를 실험 계획하였다. 이때, 공기량 확보를 위한 AE제 사용량은 FA 치환 모르타르 중 Rf 사용 모르타르가 목표 공기량에 만족하도록 배합설계한 후 모든 실험변수에 동일하게 적용하는 것으로 계획하였다.

실험사항으로는 굳지 않은 모르타르에서는 플로, 공기량을, 경화 모르타르에서는 재령별 압축강도를 측정하는 것으로 하였다. 또한 플라이애시 종류에 따른 동결융해 저항성 평가를 위해 300Cycle의 동결융해에 반복에 따른 상대 동탄성 계수비, 질량변화 및 길이변화를 모르타르 배합비 1:3인 W/B 60%에서 적용하는 것으로 계획하였다.

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 재료로써, 먼저 OPC는 국내산 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 혼화재로 FA는 국내 S사 FA 정제공장서 제조 중인 것을 각 공정 별로 채취하여 사용하였는데, 그 물리적 성질은 각각 Tables 3과 4와 같다. Figs. 1~3은 본 실험에 사용한 FA 3종류 입자에 대한 FE-SEM(주사현미경)사진으로, FA 종류

Table 3. 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 4. Physical properties of FA

Type	Blaine (cm ² /g)	Density (g/cm ₃)	LOI ¹⁾ (%)	SiO ₂ (%)	CaO (%)	SO ₃ (%)
Rf	3,810	2.20	3.3	48.3	17.8	0.58
Rfa	3,730	2.19	5.5	32.6	16.3	0.54
Ra	3,650	2.18	7.6	36.9	14.8	0.50
Raj	3,325	2.22	6.3	37.2	17.0	0.63
Rj	3,000	2.25	5.0	37.4	19.2	0.75

1) Loss on ignition

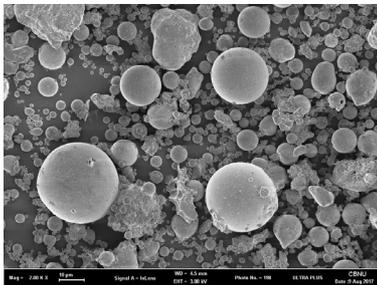


Fig. 1. SEM image of refined FA

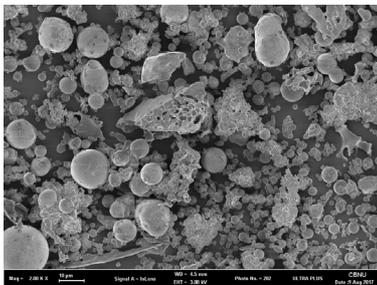


Fig. 2. SEM image of raw FA

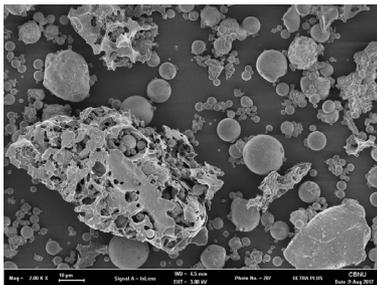


Fig. 3. SEM image of reject ash

Table 5. Physical properties of crushed fine aggregate

Density (g/cm ³)	Solid volume(%)	Passing ratio of 0.08mm sieve(%)	Fineness modulus
2.62	55.0	3.81	2.92

별 입자특성이 상이하며 특히 Rj의 경우 정제과정 중 버려지는 굵은 입자가 존재하는 것을 알 수 있다.

본 실험에 사용한 잔골재는 충청권에서 생산되는 부순 잔골재로, 그 물리적 성질은 Table 5와 같다.

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 먼저 모르타르의 혼합은 모르타르 믹서를 사용하여 진행하였다. 굳지 않은 모르타르의 특성 실험으로 플로는 KS L 5111, 공기량은 KS F 2421에 의거하여 측정하였고, 경화 모르타르의 실험으로 압축강도는 KS F 2326, 휨강도는 KS F 2325에 의거 측정하였다. 또한 내구성 시험으로 급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법은 KS F 2456에 의거하여 A법으로 수중동결, 수중융해에 따른 길이 변화와 무게 변화를 측정하였으며, 상대동탄성 계수는 KS F 2437에 의거하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지않은 모르타르의 특성

굳지않은 모르타르의 특성으로 Fig. 4는 각 FA의 종류 및 모르타르 배합비 별로 플로를 나타낸 것이다. 전반적으로 모든 배합비에서 원분인 Ra를 사용한 배합은 정제과정을 거친 Rf 보다 낮은 유동성을 나타내었다. 먼저, 모르타르 배합비 1:1에서의 경우는 Ra 사용시 Rf 사용배합에 비해 약 21%, 1:3은 약 9%, 1:5는 약 6% 저하는 것을 확인하였는데, 이는 정제과정을 통해 불순물의 제거 및 입도가 개선되어 즉, 구형의 입자 위주로 구성되어 있어 모르타르 내부의 볼베어링 효과에 기인하여 플로가 증가한 것으로 판단된다 (Baek and Han 2017).

또한 특이한 점으로서 Rj를 사용한 배합은 정제과정 중 버려지는 미연탄소와 기타 이물질들을 많이 포함 있어 Ra를 사용한 배합보다 유동성이 감소할 것으로 예상하였으나, Rf와 동등하거나 그 이상의 유동성을 나타내었다. 특히, 배합비 1:1에서 Rf에 비해 약 13% 증가하여 그 정도가 가장 컸다. 이는 Fig. 3과 같이 굵은 입자의 Rj가 OPC와 연속입도를 이루어 유동성이 증가된 것으로 사료된다.

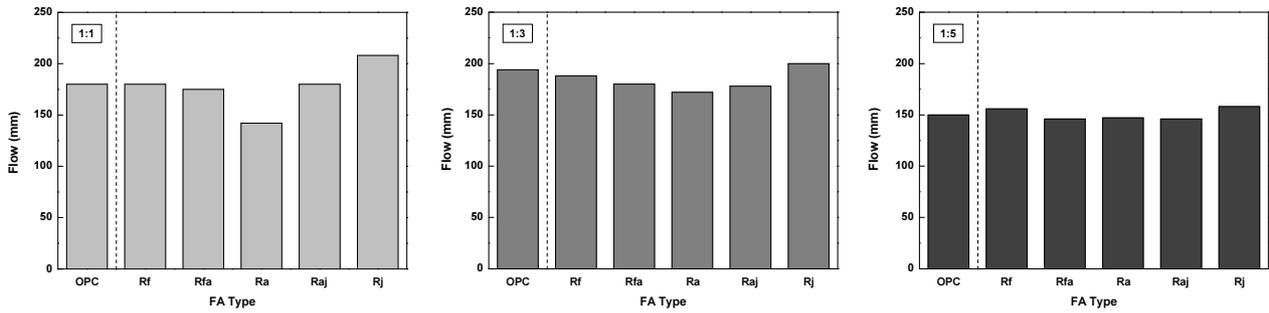


Fig. 4. Flow due to change quality of FA

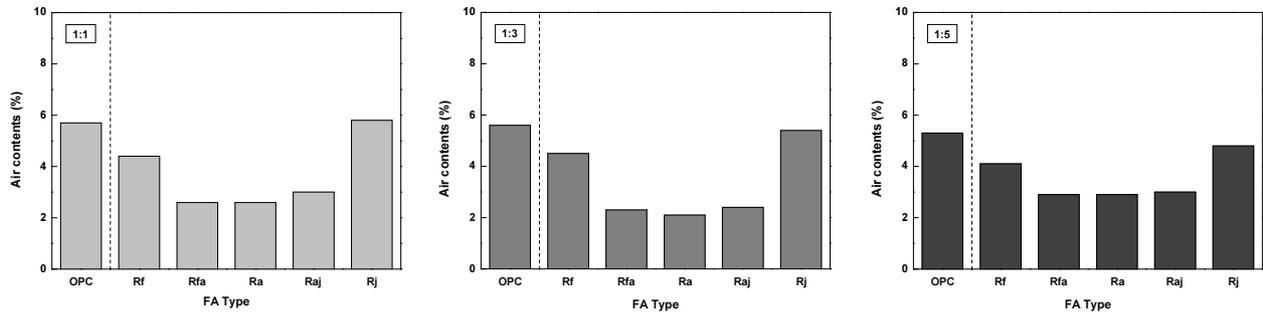


Fig. 5. Air contents due to change quality of FA

Fig. 5는 FA의 종류 및 모르타르 배합비 별로 공기량을 나타낸 그래프이다. 먼저 모든 배합비에서 Rf와 Rj를 사용한 배합의 경우만 높은 공기량을 보이는 경향을 나타내었으며, 이에 따라 R, Rj를 제외한 여타의 FA는 목표 범위에 만족하지 못하는 것을 확인하였다. Ra의 경우는 Rf에 비해 전반적으로 약 41% 공기량이 감소하였는데, 이는 정제과정을 거치며 AE제 흡착작용을 일으키는 미연소 탄분이 적절히 제거됨에 기인한 것으로 분석된다. 또한 Rj의 경우는 정제과정을 거친 Rf 보다 약 19% 높은 공기량을 보이는데, 이는 SEM사진에서도 알 수 있는바와 같이 Rj에는 다공질 형태를 나타냄에 FA 내부의 갇힌 공기가 존재하여 공기량을 크게 발휘하는데 기여한 것 등으로 분석된다.

3.2 경화 모르타르의 특성

Fig. 6은 FA 종류 및 모르타르 배합비 변화에 따른 재령별 압축 강도를 나타낸 그래프이다. 전반적으로 FA 치환 모르타르는 OPC 보다 강도 증진이 낮게 나타나고 있으며, 그 정도는 모르타르 배합비 1:1에서 가장 큰 것을 확인할 수 있었다. 재령 3일에 FA 치환 모르타르 중에서는 정제과정을 거치지 않은 Ra 배합이 높은 강도를 나타내었으며, Rf 보다 약 % 높은 강도를 발휘하였다. Rj 배합의

경우는 여타의 FA 보다 강도가 저하하는 것으로 나타났다.

재령 7일에서도 재령 3일과 같은 경향을 보였으나, 재령 28일의 경우 모르타르 배합비 1:1에서 Rf사용 배합이 Plain인 OPC보다 약 % 높은 압축강도를 나타내었으며, 1:3, 1:5에서는 Rf 사용배합이 FA 치환 모르타르 배합 중에서 가장 높은 압축강도를 발휘하였다. 이는 정제과정을 거친 양호한 품질의 FA의 포졸란 반응에 기인하여 강도가 증가된 것으로 사료되며, 후기 재령에서의 포졸란 반응의 효율성을 확인할 수 있었다.

재령 91일에서는 역시 28일과 동일하게 1:1 및 1:3에서 강도가 증가하여 Rf뿐만 아니라 원료인 Ra까지도 Plain과 동등이상의 강도를 발휘하였다.

3.3 동결융해 특성

모르타르의 내구적 특성으로 Figs. 7~9는 모르타르 배합비 1:3에서 FA 품질 변화에 따른 상대동탄성계수, 길이 및 질량 변화율을 나타낸 것이다. 먼저 상대 동탄성 계수비는 OPC 100%의 플레인 배합에서는 300Cycle까지도 100% 이상을 유지하는 것으로 나타났고, 정제된 FA인 Rf를 사용한 경우도 Plain과 동일하게 300Cycle까지도 상대동탄성계수비가 100%를 상회하는 것으로

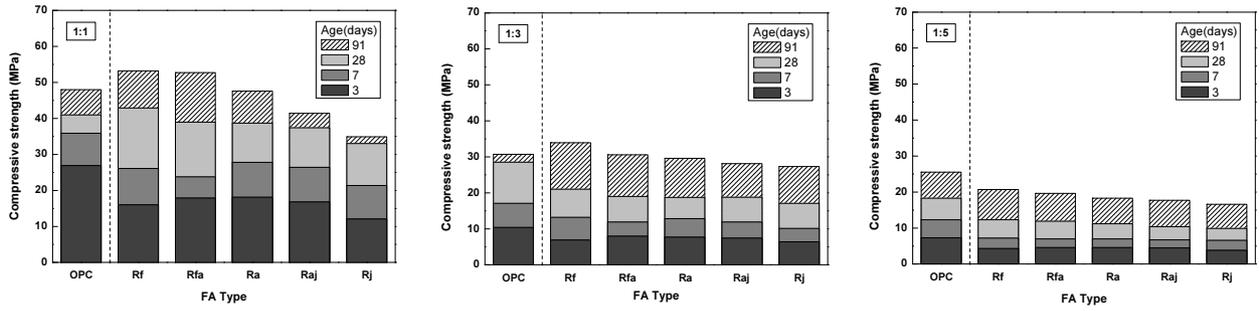


Fig. 6. Compressive strength due to change quality of FA

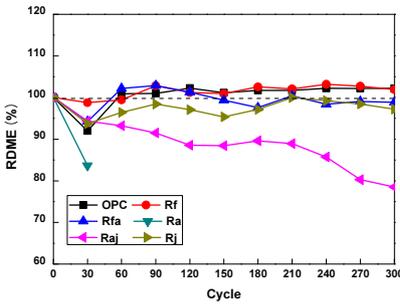


Fig. 7. RDME due to change quality of FA

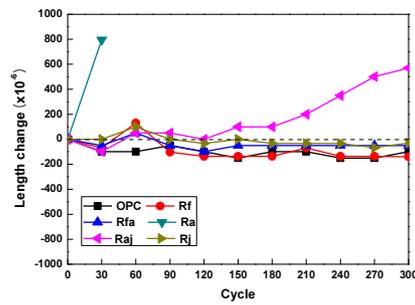


Fig. 8. Length change due to change quality of FA

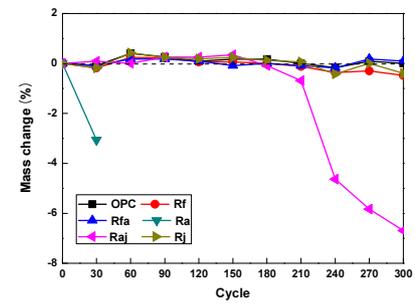


Fig. 9. Mass change due to change quality of FA

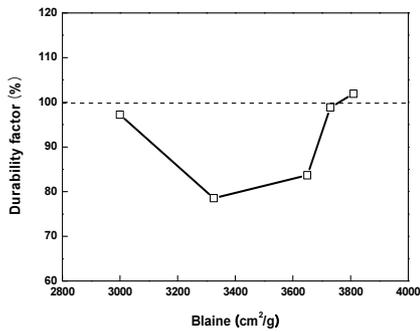


Fig. 10. Durability factor due to change blaine of FA

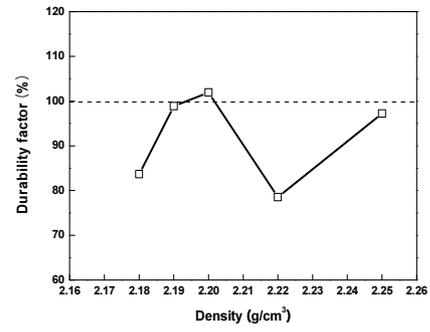


Fig. 11. Durability factor due to change density of FA

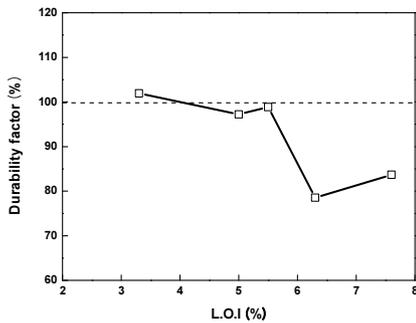


Fig. 12. Durability factor due to change LOI of FA

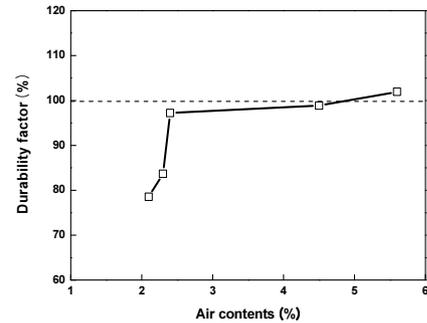


Fig. 13. Durability factor due to change air content of mortar

나타났다. 이는 Rf 사용시 4%이상의 적절한 공기량을 확보할 수 있어 내동해성이 확보된 결과로 판단된다.

반면에, Ra 사용의 경우는 여타의 배합보다 동결융해 Cycle 변화에 따라 상대동탄성계수비가 현저히 감소하여 30Cycle에서 파괴되었는데, 이는 Figs. 12 및 13에서 보는바와 같이 강열감량이 높아 FA 내부의 미연소 탄분이 AE제를 흡착해 공기량이 감소하게 되면서 내동해성에 취약해져 이와 같은 결과가 나타난 것으로 사료된다.

한편, 길이변화율과 질량변화율의 경우 역시 정제되지 않은 Ra와 Raj를 제외한 모든 배합이 큰 변화가 없었으며, Ra는 30Cycle 이후에 파괴되어 더 이상 측정이 불가하였고, Raj는 Cycle이 경과될수록 팽창하고, 질량이 감소하는 것으로 나타났다.

한편, Figs. 10~13은 각각 FA의 물리적 성질 변화 및 공기량 변화에 따른 동결융해 내구성 지수를 나타낸 것이다. 먼저, 분말도의 경우 Rj 같이 상대적으로 분말도는 작지만 모르타르 내부 간헐공기의 영향으로 인해 높은 내구성 지수를 나타내었으며, 정제과정을 통해 미연소 탄분이 제거된 Rf가 가장 높은 내구성 지수를 보였으나, 밀도변화에 따라서는 뚜렷한 경향이 보이지는 않았다. 그러나 강열감량에 따라서는 실무에서 가장 많이 사용되는 2종 FA의 품질규정(KS L 5405)에 5% 이하로 제시된 것과 같은 맥락으로 강열감량이 약 5%를 초과한 시점부터 내구성지수가 감소하는 것을 알 수 있었다.

공기량에 따른 특성으로 공기량이 2.5%를 초과한 시점부터는 내구성 지수가 안정적인 반면 그 이하는 급격하게 감소하였는데, 이에 따라 FA 정제 처리를 통한 불순물제거 및 강열감량관리는 모르타르 공기량 확보에 중요한 역할을 하고, 적절한 공기량 확보는 동결융해 저항성에 큰 기여를 하는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구는 FA 종류를 정제된 FA부터 극단적인 품질의 Reject ash까지 폭 넓게 변화시켜, 이에 따른 모르타르의 물성 및 동결융해 특성을 분석함으로써 FA 품질 변화가 시멘트 모르타르에 어떠한 영향을 미치는지를 고찰하고자 하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. FA 종류별 품질에 따른 플로는 모든 배합비에서 원본인 Ra 사용시 Rf보다 낮은 유동성을 나타내었는데, 이는 FA의 정제에 따른 제반 품질의 향상에 기인하여 얻어진 결과로 판단된다.
2. 공기량은 Rf, Rj 사용 배합만 목표 범위에 만족하였는데, 먼저 Rf는 정제과정을 거치며 AE제 흡착작용으로 공기량을 저하시

키는 미연소 탄분이 제거됨에 기인한 결과이며, Rj의 경우는 FA 내부 다공질 형태의 기타 이물질 등에 의해 간헐공기포에 의해 높은 공기량을 나타내었다.

3. 압축강도는 FA 치환 모르타르가 초기 3, 7일에는 Plain인 OPC에 비해 낮은 압축강도를 나타내었으나, 재령 28일 이후에는 정제된 FA인 Rf의 활성화된 포졸란 반응으로 인해 여타 FA에 비해 강도가 증가하며 배합비 1:1 및 1:3에서는 OPC보다 높은 강도를 확보할 수 있음을 확인하였다.
4. 동결융해 특성으로 정제 FA를 사용한 경우 적정공기량 확보로 내동해능이 OPC수준을 보였으나, FA 원분의 경우 모르타르 내부 미연소 탄분의 AE제 흡착으로 공기량이 감소하여, 내동해성에 취약한 것을 확인할 수 있었다.

이상을 종합하면 정제과정을 거치지 않은 적정 품질 이하의 FA 사용시 불순물, 불량입도 및 높은 강열감량 등에 의해 유동성, 공기량 및 압축강도 등이 현저히 감소하고 내동해성에 문제가 되는 것을 알 수 있고, 또한 고강도에서 품질의 영향이 더 크게 작용하므로, 정제과정을 거친 양질의 FA 사용은 콘크리트의 경제적인 배합과 구조물의 안정성에도 긍정적인 기여를 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2016~2017년도 청주대학교 연구 장학 지원에 의한 것임.

References

- Hamood, A., Khatib, J.M., Williams, C. (2017). The effectiveness of using raw sewage sludge (RSS) as a water replacement in cement mortar mixes containing unprocessed fly ash (u-FA), *Construction and Building Materials*, **147**, 27–34.
- Baek, B.H., Han, D.Y. (2017). Influence of fly ash quality on rheological properties of cement paste, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, **17(2)**, 183–189 [in Korean].
- Jung, D.H. (2014). Thermal Power Plant of Cinders ‘Car Replacement’ with Random Distribution [Internet]. Korea: MBC NEWS; 2014 Oct 14 [cited 2017 Mar 31]. Available from: http://imnews.imbc.com/replay/2014/nwdesk/article/3541649_18451.html
- Moon, G.D., Oh, S.W., Choi, Y.C. (2016). Effects of the phy-

- sicochemical properties of fly ash on the compressive strength of high-volume fly ash mortar, *Construction and Building Materials*, **124**, 1072–1080.
- Paik, M.S., Jung, S.J. (2002). The experimental study on the early properties of high volume fly-ash concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, **18(11)**, 91–98 [in Korean].
- Poon, C.S., Qiao, X.C., Lin, Z.S. (2003). Pozzolanic properties of reject fly ash in blended cement pastes, *Cement and Concrete Research*, **33(11)**, 1857–1865.
- Sho, K.H., Park, S.J. (2012). Engineering properties of finishing mortar containing fly ash produced in combined heat power plant, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, **28(11)**, 141–148 [in Korean].

플라이애시의 정제가 모르타르의 공학적 특성에 미치는 영향

본 연구에서는 플라이애시(FA)의 정제가 시멘트 모르타르의 제반 품질에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다. 본 연구에서 사용된 플라이애시는 원분플라이애시, 정제플라이애시, 리젝트애시 및 이들의 조합으로 5수준으로 선정하였고, 모르타르 배합비는 1:1, 1:3 및 1:5의 3수준으로 계획하였다. 본 연구의 실험결과로 먼저 플로는 모든 배합비에서 원분인 Ra 사용시 Rf 보다 낮은 유동성을 나타내었다. 또한 Rj의 경우는 낮은 유동성을 보일 것으로 예상하였으나, Rf와 동등하거나 그 이상의 유동성을 나타내었다. 공기량의 경우 Rf와 Rj를 제외한 모든 배합이 목표 범위에 만족하지 못하였다. Ra를 사용한 배합의 경우 정제과정을 거친 Rf보다 약 41% 낮은 공기량을 나타내었으며, Rj의 경우 모르타르 내부 다공질의 이물질 등으로 인해 Rf 보다 약 19% 높은 공기량을 나타내었다. 압축강도의 경우 초기 3, 7일에서는 Plain인 OPC에 비해 낮은 압축강도를 나타내었으나, 28일 이후에는 양호한 품질인 Rf의 포졸란 반응으로 인해 여타의 FA 보다 높은 강도를 발휘하였으며, 배합비 1:1 및 1:3에서는 OPC보다 높은 강도를 확보할 수 있음을 확인하였다. 내동해성으로 정제되지 않은 FA를 사용한 경우 공기량 감소로 인해 내동해성에 취약한 것으로 분석되었다. 따라서 정제과정을 거친 양질의 FA 사용은 콘크리트의 경제적인 배합과 구조물의 안정성에도 긍정적인 기여를 할 것으로 판단되었다.