

Mechanochemical 표면처리한 Fly Ash 혼화 Concrete의 제조

이형직[†] · 구자훈 · 유인상 · 송두규 · 정해경 · 권혁병 · 윤상옥 · 이형복* · 이홍림**

강릉대학교 세라믹공학과

*명지대학교 세라믹공학과

**연세대학교 세라믹공학과

(2001년 7월 10일 접수; 2002년 1월 9일 승인)

Fabrication of Concrete Containing Mechanochemically Surface Treated(MST) Fly Ash

Hyung-Jik Lee[†], Ja-Hun Koo, In-Sang Yoo, Doo-Gyoo Song, Hae-Kyoung Joung, Hyouk-Byoung Kwon, Sang-Ok Yoon, Hyung-Bock Lee* and Hong-Lim Lee**

Department of Ceramic Engineering, Kangnung National University, Kangnung 210-702, Korea

*Department of Ceramic Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

**Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

(Received July 10, 2001; Accepted January 9, 2002)

초 록

채취 그대로의 fly ash(As Received Fly Ash, ARFA) 90 wt%와 cement 10 wt%의 혼합물을 ball milling 함으로서 mechanochemical processing에 의해 표면 처리한 fly ash(Mechanochemically Surface Treated Fly Ash, MSTFA)를 사용하여 fly ash 혼화 concrete의 강도 증진을 위한 연구를 수행하였다. ARFA에 ball-milling하여 particle size reduction만 발생시킨 fly ash(Ball-mill Processed Fly Ash, BPFA) 혼화시의 공시체와 비교하여 동일한 fly ash의 혼화량, 동일한 재령의 압축강도 및 미세구조의 관점에서 고찰하였다. MSTFA를 혼화한 concrete 공시체의 압축강도는 ARFA를 혼화한 것보다 10-20%, BPFA를 혼화한 것보다는 2-7 wt% 상승한 값을 나타내었다. 이 같은 강도 상승은 MSTFA와 cement의 각 입자의 서로에 대한 친화성이 증대되며 이로 인하여 수화물 생성시 cement와 fly ash 입자간의 결합력이 더욱 증가하게 되어 압축강도가 증가하는 것으로 고려된다.

ABSTRACT

Fabrication of high strength structural concrete was investigated by using a Mechanochemically Surface Treated Fly Ash(MSTFA) induced by mechanochemical processing through ball-milling of (90 wt% As Received Fly Ash(ARFA) + 10 wt% cement) mixture, which was compared to the specimen fabricated by using As Received Fly Ash(ARFA) in terms with compressive strength and microstructures. The compressive strength of concrete specimen fabricated by using MSTFA represented 10-20% and 2-7% higher value than that for the case of using ARFA and BPFA in each cases. Increased compressive strength as above mentioned is considered to be caused by mutually increased affinity generated between cement and fly ash during mechanochemical processing.

Key words : Concrete, Fly ash, Mechanochemically surface processing, Compressive strength

1. 서 론

전력생산의 양상이 수력이나 원자력 발전으로 바뀌어 가고 있지만 아직은 석탄이 풍부한 매장량, 저렴한 가격, 공급의 안정성 등으로 전세계적으로 화력발전의 근간이 되는 연료로 사용되고 있다. 이 석탄의 연소과정에서 부수적으로 생산되는 fly ash는 산업 폐기물로 분류되어 매립되어 왔으나 최근 들어 concrete의 품질개선, 원가 절감과 산업폐기물의

재활용 및 자연보존 등의 환경적인 측면이 고려되어 사용량이 매년 증가하는 추세이다. 외국의 경우 cement 대체재료로서의 fly ash 함량을 획기적으로 높인 고탍량 fly ash cement가 개발되어 실용화 단계에 접어들었지만, 우리나라의 경우 1995년 fly ash 발생량은 원탄의 14.4%인 약 260만 톤 가량으로 추산되는데, 이 중 재활용량은 18.3%에 해당하는 49만 톤에 불과하다. 활용량 가운데 약 92%가 cement 대체재료나 cement 및 concrete 혼화재로 사용되었고 나머지는 골재, 벽돌, 기와 등의 건자재로 이용되었다. 비록 재활용률이 꾸준히 증가하는 추세에 있긴 하지만 여전히

[†]Corresponding author : hjlee@knusun.kangnung.ac.kr

히 선진국에 비해서는 저조한 상태이며 이용분야도 한정되어 있다.¹⁾ 이러한 fly ash를 사용한 concrete는 일반 concrete에 비해 경제적인 뿐만 아니라 물리화학적 성질 또한 크게 향상시키는 것으로 보고되고 있다. 강도 면에서는 fly ash를 함유하지 않은 concrete에 비해서 fly ash를 함유한 concrete의 증장기 강도는 크지만 초기강도가 저하되는 단점이 있으며, 이러한 단점은 fly ash가 cement 또는 골재(모래 또는 작은 자갈)와 초기에 불완전한 접합성을 나타내기 때문으로 알려져 있다.²⁻⁶⁾ 또한 품질관리의 측면에서 원탄의 재료와 연소조건에 따라 fly ash의 품질의 편차가 심하다.⁷⁻¹⁶⁾

한편 본 연구에서 fly ash의 표면처리법으로 도입하고자 하는 mechanochemical processing은 고기능성 재료 합성 등에는 적용된 예가 보고되고 있다.¹⁷⁾ 荳井 등은 BaCO₃와 TiO₂의 혼합 마쇄에 의한 조성의 균일화, 활성화에 의한 반응속도의 증대를 꾀하였고, 桐山 등은 Zn(OH)₂와 FeOOH의 혼합 마쇄에 의한 임의 조성의 Zn 페라이트의 합성과 강자성화 하였으며, 上原 등은 페라이트 메모리코아 제조공정에 있어서 분쇄에 의한 메모리 특성의 향상에 대하여 연구하여 좋은 성과를 얻었다. 이러한 mechanochemical processing의 효과를 fly ash의 표면처리에 적용하면 앞에서 지적한 fly ash의 단점이 보완될 것으로 고려된다. 즉, ball milling을 이용한 mechanochemical processing을 통하여 fly ash 품질의 편차를 극소화할 뿐만 아니라 fly ash의 표면에 cement 수화물과 친화성을 띠게하여 초기강도 강화를 포함한 기존의 fly ash 혼화 concrete보다 우수한 고품질의 concrete의 생산이 가능해질 것으로 고려된다.

따라서 본 연구에서는 fly ash의 표면활성화 특히 cement와의 친화성을 극대화하는 방법으로서 fly ash에 미량의 cement를 혼합하여 ball milling하는 mechanochemical processing을 도입하였다. 이 방법으로 cement 미립자를 매개로 fly ash의 입자에 표면처리하는 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대 되므로 fly ash 입자와 cement 입자간의 친화성을 증가시켜 fly ash의 사용량을 증가시킨 초기 강도 강화 concrete를 개발하고자 하였으며 하중강도와

cement 수화물중에서의 fly ash의 미세구조의 관점에서 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1. 원료특성 및 Fly Ash의 표면처리

본 실험에서 사용한 cement는 국내 S사 제품으로서 그 물리적 성질 및 화학조성은 Table 1과 같다.

또한 본 실험에서 사용한 fly ash는 영동화력발전소에서 생산된 fly ash를 사용하였으며 그 화학조성을 Table 1에 나타냈다. 강열감량이 10.3% 정도로 높다는 것이 특징으로, 색상은 일반 포틀랜드 cement 보다 밝은 회색을 나타낸다. Mechanochemical processing에 의해 표면처리한(Mechanochemically Surface Treated, MST) fly ash는 Table 2 [1]의 (5)에 나타난 바와 같이 fly ash 90 wt%와 cement 10 wt%를 혼합한 후 구형 철제로된 ball을 이용한 milling process를 거쳐서 fly ash의 표면에 cement와 친화성 및 접합성을 나타내도록 하였다. 또한 상기의 mechanochemical surface treating process는 particle size reduction 효과도 있으므로 2가지의 효과를 구별하여 검토가 될 수 있도록 fly ash 만을 같은 시간 ball milling하여 BP(Ball-milling Processed) fly ash를 준비하였다. 이때 fly ash에서 철구의 마모에 의한 철분량의 증가는 관찰되지 않았다(Table 1의 *1, *2). Fig. 1은 AR, MST, BP fly ash에 있어서 입자 크기에 대한 누가 %체하(cumulative percentage undersize) 곡선과 비표면적을 아울러 나타낸 것이다. Ball milling에 의해 MST 및 BP fly ash에 size reduction 효과가 있는 것을 알 수 있으며 MP fly ash가 BP fly ash의 입자크기보다 약간 큰 쪽으로 분포되어 있는 것은 약 10 wt% 혼합되어 있는 cement 분말의 완충역할에 의해 MP fly ash의 size reduction이 BP fly ash 보다 덜 되었기 때문으로 고려된다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 fly ash의 주사전자현미경(SEM) 사진이다. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 채취한 그대로의(As Received, AR) fly ash의 분말의 형태는 거의 구상이며, 한편 Fig. 2(b)에서 보는바와 같이 MST fly ash 분말

Table 1. Physical Properties and Chemical Components of Cement and Fly Ash

Physical properties of cement	Specific gravity	Fineness (cm ² /g)	Compressive strength (kg/cm ²) after each curing time								
			3 days	7 days	28 days						
	3.15	3200	205	288	342						
Chemical compositions	Weight percent (wt%)										
	Compositions	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Mn ₂ O ₃	Ig.Loss
	cement	20.40	4.95	3.02	0.29	62.21	4.05	2.28	1.04	0.2	1.50
	fly ash (BP* ¹ , MST* ²)	48.6	23.8	4.87 (6.60* ¹ , 3.23* ²)	·	1.01	0.87	·	·	·	10.3

*¹ BP : ball-mill processed

*² MST : mechanochemically surface treated

Table 2. Experimental Conditions

- [1] Fabrication specification of concrete containing fly ash.
- (1) Maximum size of large aggregate (mm): 25 (for the fabrication of concrete)
 - (2) Slump (cm): 8
 - (3) Properties of materials
 - ① density of cement (g/cm³): 3.15
 - ② density of large aggregate (g/cm³): 2.70
 - ③ density of small aggregate (g/cm³): 2.63
 - (4) Water - cement ratio(%) = 215/(237 + 210) = 48.8
 - (5) Mechanochemically surface treated (MST) fly ash (90 wt% fly ash + 10 wt% cement) → ball-mill processing after mixing
 - (6) Ball-mill processed (BP) fly ash 100 wt% as received fly ash → ball-mill processing (BP)
 - (7) Adding amount of fly ash (wt%)
 - ① as received (AR) fly ash weight / (cement + fly ash) weight × 100 = 0, 10, 20, 30
 - ② Mechanochemically surface treated (MST) fly ash weight / (cement + MST fly ash) weight × 100 = 0, 10, 20, 30
 - (8) Curing condition
 - ① 7 days curing in a water at 20 ± 3°C
 - ② 28 days curing in a water at 20 ± 3°C
- [2] Preparing process of mechanochemically surface treated (MST) fly ash
- ① Mixture ratio of fly ash and cement : fly ash (90 wt%) + cement (10 wt%)
 - ② Jar size (mm): 90Φ × 190
 - ③ Spherical iron ball size (mm): 10-18
 - ④ Ball -charging ratio (volume %): 30
 - ⑤ Powder -charging ration (volume %): 30
 - ⑥ Milling atmosphere: in air
 - ⑦ Rolling speed (rpm): 105
 - ⑧ Rolling time (hrs): 12
- [3] Observing the affinity behaviour between cement and fly ash
- ① Distilled water (ml): 100
 - ② AR or MP fly ash (g): 1
 - ③ AR cement (g): 2
 - ④ Liquid temperature (°C): 20 ± 3
 - ⑤ Soaking time during stirrin g (minutes): 3

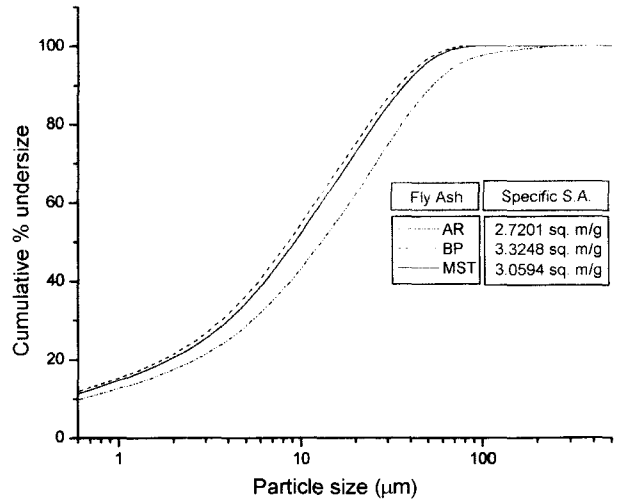


Fig. 1. Cumulative percentage undersize as a function of fly ash particle size.

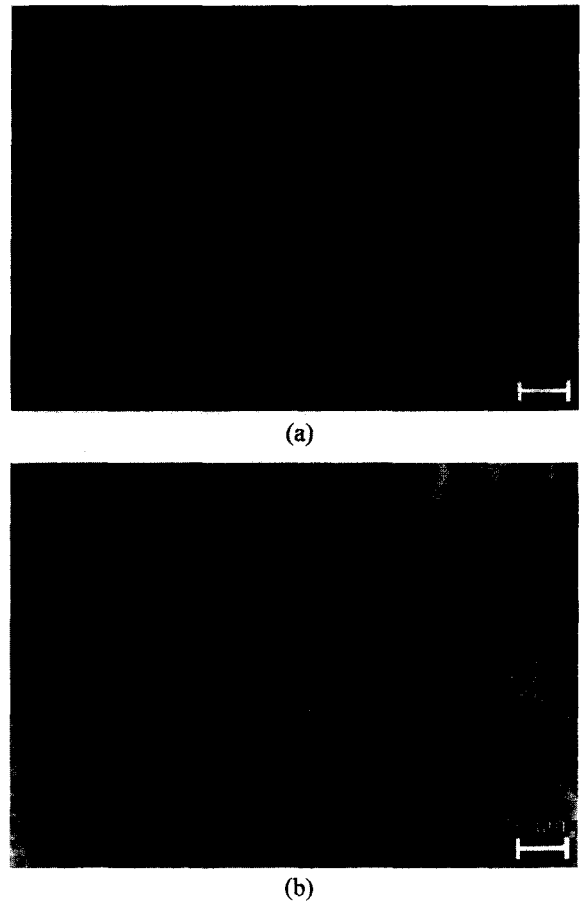


Fig. 2. Scanning electron micrographs of (a) As Received (AR) fly ash and (b) Mechanochemically Surface Treated (MST) fly ash used in this study.

의 미세구조에서는 깨어진 fly ash가 관찰되지 않고 상기 Fig. 1에서와 같이 size reduction 만이 관찰되는 것은 본 mechanochemical 효과를 얻기 위한 ball milling process는 대체적으로 fly ash 표면에만 국한하여 충격력을 가하는 Mechanochemical Surface Treating (MST) process로서 고려된다.

Figs. 3 및 4에서 본 실험에 사용된 cement, 모래, fly ash

의 X-ray diffraction pattern을 나타내었다. Cement는 전형적인 portland cement의 구성 성분인 C₃S, C₂S, C₃A 및

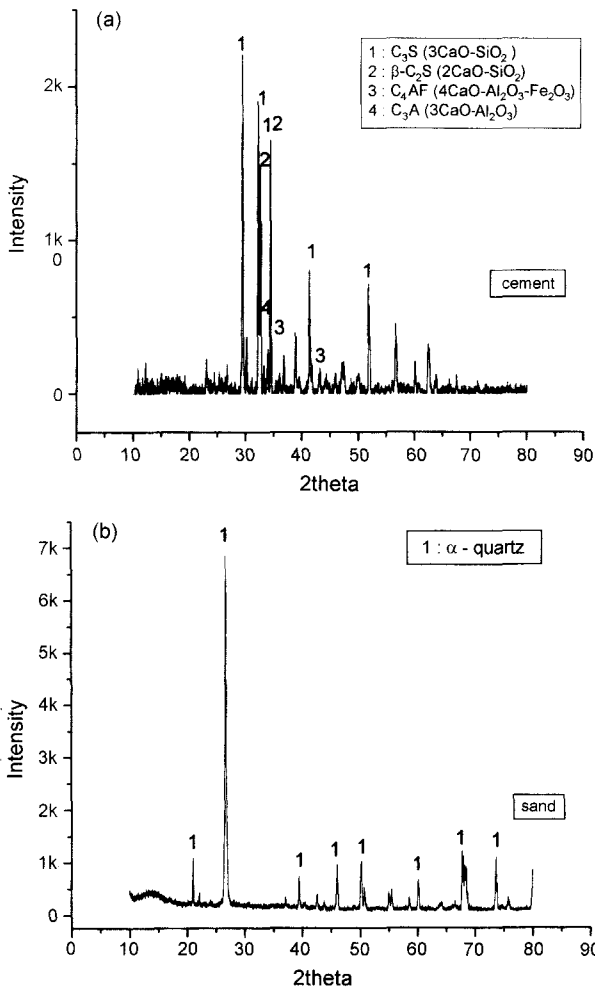


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of cement and sand.

C₄AF로 되어 있었으며 모래(sand)는 거의 α-quartz로 되어 있었다. 또한 AR 및 MP fly ash는 공히 mullite (3Al₂O₃ · 2SiO₂)와 α-quartz(SiO₂)로 구성되어 있었으며 10 wt%의 cement가 혼합되어 있는 MP fly ash에서는 C₃S 및 β-C₂S가 미세하게 관찰되었다.

2.2. Fly Ash 첨가 Concrete 배합 사양¹⁸⁾

Concrete의 혼합방식은 잔 골재(모래)와 굵은 골재(최대 직경 20 mm)를 투입하고 30초간 건비빔을 실시한 후 cement 및 fly ash와 혼합수를 투입하고 2분간 혼합하는 방법을 채택하였다. 제조된 Φ10×20 cm의 원주형 공시체를 20±3°C의 양생 수조에서 수중양생을 하였으며, KS F 2405에 의해 UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 압축강도 시험을 실시하였고 신뢰성을 높이기 위해서 한 조성당 5개의 공시체를 제조하여 최고 최저값을 배제하고 3개의 값에 대해 상한, 하한 및 평균값으로 나타내었다. 미세 구조관찰, 파괴거동, fly ash와의 결합 및 성분분석 등에 대해서 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM,

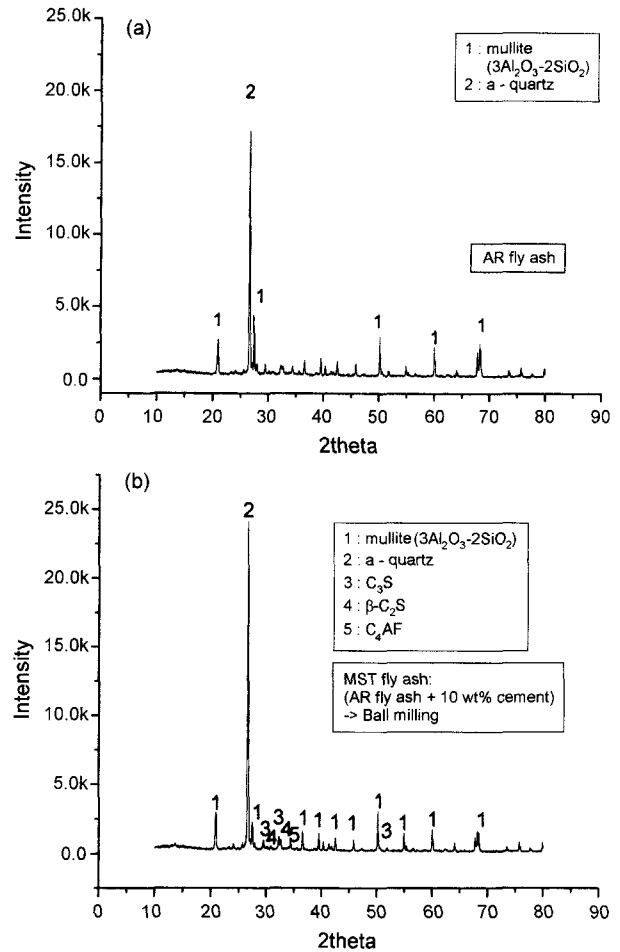


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of (a) As Received(AR) and (b) Mechanlchemically Surface Treated(MST) fly ash.

LEO 420), Energy Dispersive Spectroscopy(EDS, LEO Co.) 및 X선 회절분석기(X-Ray Diffractometer, XRD, MO3XHF)를 사용하여 검토하였다.

실험의 변수로는 fly ash의 치환율을 cement 양의 0%, 10%, 20%, 30%로 하였고, 물/시멘트 비는 48.8% 하였으며 배합 사양은 Table 2의 [1] 및 Table 3과 같다. Fig. 5는 실험방법을 나타낸 개략도이다. 또한 시멘트와 fly ash 사이의 친화성 거동을 고찰하기 위해서는 Table 2의 [3]에 나타낸 바와 같이 증류수 100 ml에 AR 또는 MST fly ash 1 g과 AR cement 2 g을 넣고 20±3°C를 유지하면서 stirring 상태에서 3분간 시멘트와 fly ash가 접촉할 수 있도록 한 뒤 sampling하여 건조시켰다.

3. 결 과

3.1. 7일 재령 공시체의 Mechanochemically Surface Treated(MST) Fly Ash 혼화 효과

Fig. 6는 MST fly ash 혼화가 7일 재령 concrete 공시

Table 3. Mixing Contents of Concrete Containing AR, MST or BP Fly Ash

Fabrication series No.	Fly ash content (wt%)* ¹		Used fly ash (AR or MST)	Cement* ² (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Aggregate (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)
	wt%	wt (kg/m ³)					
Series 1							
ARC + 0wt.% FA(standard)	0	0	0	324	167	999	828
Series 2							
ARC* ³ + ARFA* ⁴	10	32	AR	292	167	999	828
	20	65	AR	259	167	999	828
	30	97	AR	227	167	999	828
Series 3							
ARC + MSTFA* ⁵	10	32	MST	292	167	999	828
	20	65	MST	259	167	999	828
	30	97	MST	227	167	999	828
Series 4							
ARC + BPFA* ⁶	10	32	BP	292	167	999	828
	20	65	BP	259	167	999	828
	30	97	BP	227	167	999	828

- *¹ True fly ash content : Fly ash wt/(Cement wt + Fly ash wt) × 100(wt%)
- *² True cement content.
- *³ ARC : As received cement
- *⁴ ARFA : As received fly ash
- *⁵ MSTFA : Mechanochemically surface treated fly ash
- *⁶ BPFA : Ball-mill processed fly ash

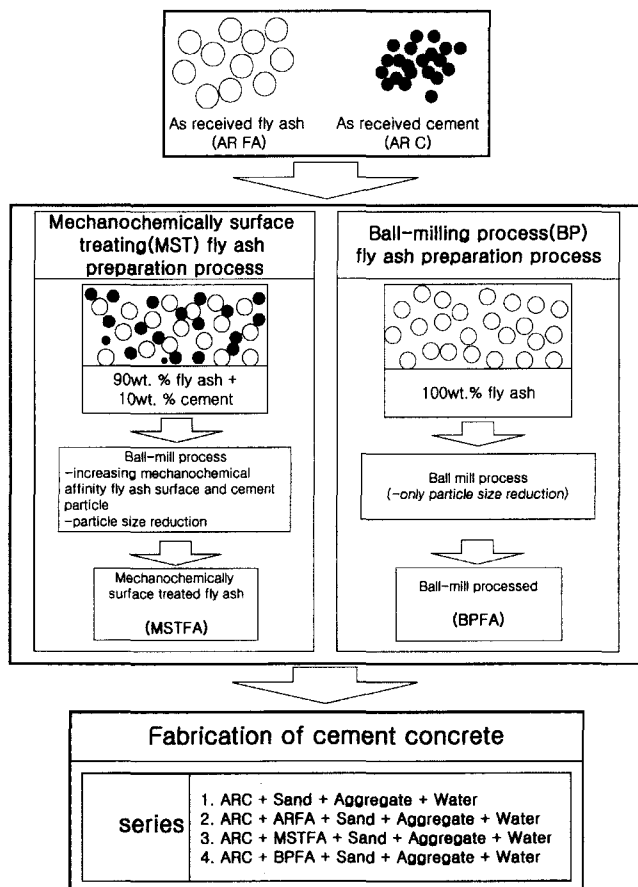


Fig. 5. Scheme of cement concrete fabrication by using Mechanochemically Surface Treating(MST) process.

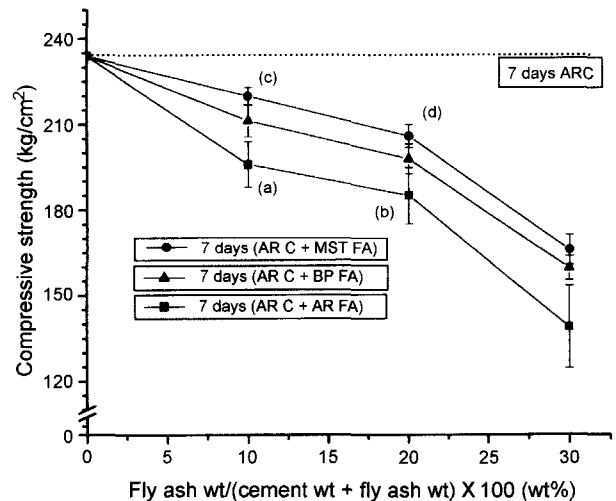


Fig. 6. Compressive strength of concrete samples containing different fly ash contents after 7 days curing in a 20 ± 3°C water for each cases of using AR and MST fly ash.

체의 강도에 미치는 영향을 검토하기 위해 Table 3의 series 1과 2의 실험조건에 의해 cement에 AR 및 MST fly ash를 10%, 20%, 30% 혼화한 concrete의 7일 재령 후의 압축강도 결과이다. 또한, Fig. 6에 MST fly ash 조제 공정중 particle size reduction도 동반하므로 mechanochemical 효과만의 영향을 검토하기 위하여 Table 3의 series 3의 실험조건에 의해 단지 particle size reduction된 BP fly ash를 혼화한 7일 재령 concrete 공시체의 압축강도

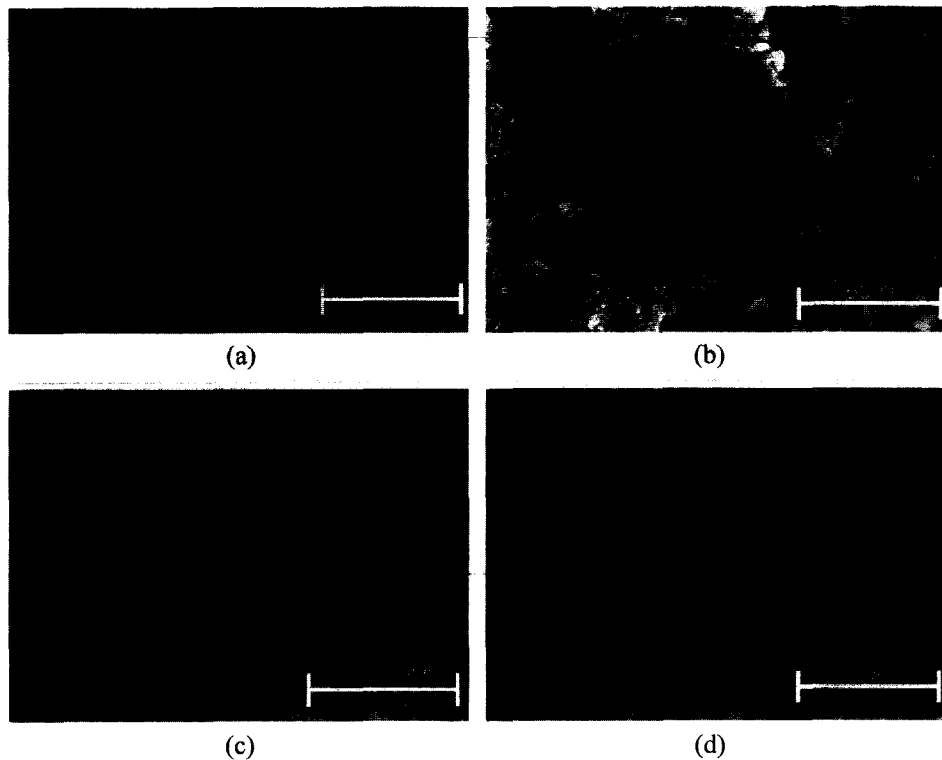


Fig. 7. Scanning electron micrographs of concrete samples after 7 days curing in a $20 \pm 3^\circ\text{C}$ water. Micrographs (a), (b), (c) and (d) correspond to (a), (b), (c) and (d) in Fig. 6 respectively.

결과도 같이 나타내었다. 여기에서 알 수 있는 바와 같이 fly ash의 함량이 증가함에 따라 7일 재령 강도에서는 압축 강도가 떨어지는 경향을 나타낸다. 이러한 경향이 일반적인 경우이지만 동일한 함량, 동일한 재령기간에서는 MST fly ash를 혼화한 concrete 공시체가 AR fly ash를 혼화한 것 보다 14-20%, BP fly ash를 혼화한 것 보다는 2-7% 상승하는 우수한 압축강도 값을 나타내었다.

Fig. 7(a)-(d)는 Fig. 6의 각각 (a)-(d)에 대응되는 7일 재령후의 concrete 공시체 파단면의 SEM 사진이다. Fig. 7 (a), (b)를 각각 (c), (d)와 비교하면 알 수 있는 바와 같이 AR fly ash를 혼화한 concrete 공시체는 수화물과 견고하지 않은 결합을 나타내고, 특히 20 wt% AR fly ash 혼화 concrete 공시체에서는 Fig. 7(b)에서 관찰되는 바와 같이 fly ash와 수화물의 계면에서 균열이 쉽게 생겨 이로 인해서 파단면에서 쉽게 수화물로부터 떨어져 나간 모양이 관찰된다. 그러나 Fig. 7(c), (d)에서 관찰되는 바와 같이 MST fly ash를 혼화한 concrete 공시체에서 수화물과 견고하게 결합되어 파단된 경우에도 견고한 접촉상태가 유지되는 것이 관찰된다. 이와 같은 mechanochemical processing에 의해 표면처리된 fly ash 혼화 concrete의 집착력 증대에 의한 강도의 증대는 mechanochemical 효과에 따른 fly ash 입자와 수화물간의 친화성의 증대에 기인함을 나타낸다. 한편 공시체속의 fly ash의 형태를 보면 모두 구형을 유지하고 있으

며 AR fly ash를 혼입한 공시체의 fly ash는 매끄러운 표면(Fig. 7(a))을 나타내는 것에 비해 MST fly ash를 혼입한 공시체의 fly ash는 입자의 표면이 매우 거칠어져 있는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 7(c)). 이러한 거칠은 표면은 MST fly ash가 concrete 양생시 수화물과 반응이 보다 활발 했음을 반증하는 것으로 볼수 있다.

3.1.1. 28일 재령 공시체의 MST Fly Ash 혼화 효과

Fig. 8은 MST fly ash 혼화가 28일 재령 concrete 공시체의 강도에 미치는 영향을 검토하기 위해 Table 3의 series 1과 2의 실험조건에 의해 cement에 AR 및 MST fly ash를 10%, 20%, 30% 혼화한 concrete 공시체에 대한 28일 재령후의 압축강도 결과이다. 여기에서는 MST fly ash 조제과정중 mechanochemical 효과의 영향만을 검토하기 위해서 Table 3의 series 3의 조건에 의해 BP fly ash를 혼화한 28일 재령 concrete 공시체의 압축강도 결과도 같이 나타내었다. 여기에서도 알 수 있는 바와 같이 동일한 함량, 동일한 재령기간에서는 MST fly ash를 혼화한 concrete 공시체가 AR fly ash를 혼화한 것보다 10-17%, BP fly ash를 혼화한 것 보다는 2-3% 상승하는 우수한 압축강도 값을 나타낸다. 특히 MST fly ash 10 wt%를 혼화한 공시체의 압축강도는 fly ash를 전혀 혼화하지 않은 경우의 압축강도 97%에 이르는 아주 우수한 값을 나타내고 있다(Fig. 8의 * symbol).

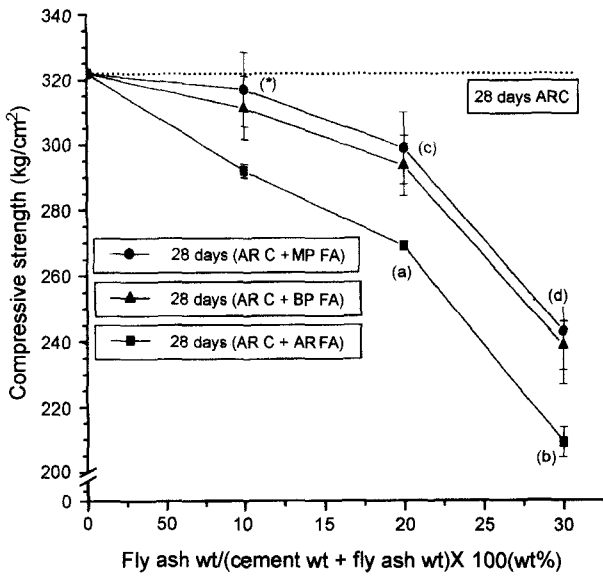


Fig. 8. Compressive strength of concrete samples containing different fly ash content after 28 days curing in a $20 \pm 3^\circ\text{C}$ water for the each cases of using AR and MP fly ash.

Fig. 9(a)-(d)는 Fig. 8의 각각 (a)-(d)에 대응되는 28일 재령후의 concrete 공시체 파단면의 미세구조이다. Fig. 7의 7일 재령 공시체의 미세구조와 비교해보면 재령이 진행됨에 따라 fly ash와 cement와의 수화반응이 더욱 진행되는 것

이 관찰된다. 즉, 28일 재령 concrete 공시체의 미세구조에서는 7일 재령 공시체에서 관찰되었던 I-CSH로 고려되어지는 침상의 미세구조가 사라지고 fly ash 주변에 잘 발달된 구형의 입상을 관찰할 수 있는데 이것은 수화물의 전형적인 미세구조로서 조충전된(coarsely compacted) I-CSH가 구형의 밀충전된(densely compacted) III-CSH으로 바뀐 것으로 고려된다.¹⁴⁾ 또한 Fig. 9(c), (d)를 (a), (b)와 비교해 보면 알 수 있는 바와 같이 MST fly ash 혼화 concrete의 공시체에서는 수화물이 fly ash의 표면을 완전히 덮어 구형의 형태로만 fly ash를 구분할 수 있을 정도로 수화반응이 진행되어 fly ash와 수화물과의 결합이 강화된 것을 알 수 있다.

4. 고 찰

4.1. Cement와 Fly Ash의 친화성

Fig. 10은 cement와 fly ash의 각각의 응집성 및 상호간의 친화성을 검토하기 위해서 Table 2의 [3]의 실험 조건에 의해 준비한 시료의 SEM 사진이다. Fig. 10(a)와 (b)에서 알 수 있는 바와 같이 표면처리하지 않은 AR(As Received) cement는 자기 응집(self-agglomeration)하며(Fig. 10(a)), AR fly ash는 자기 응집하지 않는다(Fig. 10(b)). 따라서 AR cement와 AR fly ash를 단순 혼합하면 Fig. 10(c)에서 관찰되는 바와 같이 cement와 fly ash는 친화성을 나타내지 않는다. 그러나 Fig. 10(d)에서 알 수 있는 바와 같이 MST

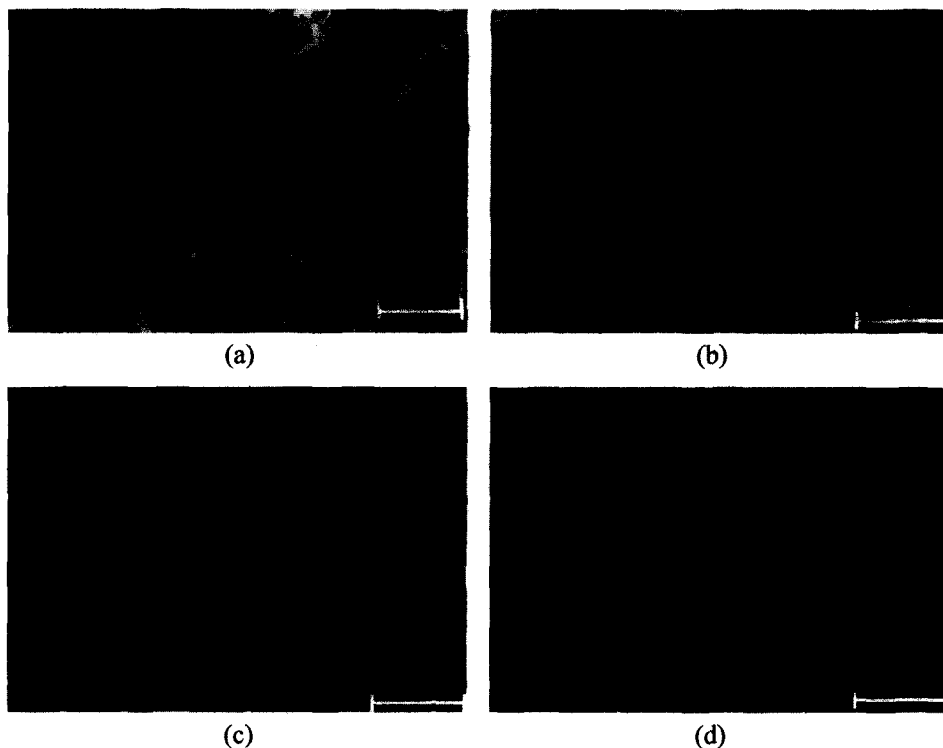


Fig. 9. Scanning electron micrographs for the concrete samples after 28 days curing in a $20 \pm 3^\circ\text{C}$ water. Micrographs (a), (b), (c) and (d) correspond to (a), (b), (c) and (d) in Fig. 8 respectively.

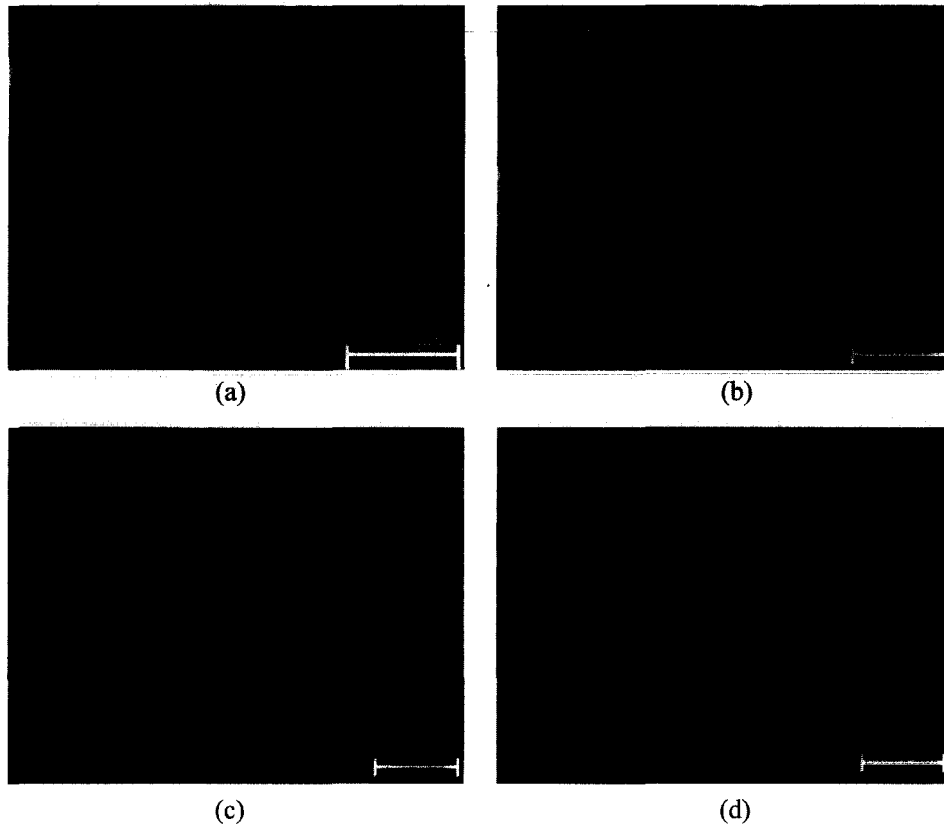


Fig. 10. Scanning Electron Micrographs(SEM) representing the effects of the Mechanochemically Surface Treating(MST) on mutual affinities between cement and/or fly ash particles. Micrographs (a), (b), (c) and (d) correspond to those of the dried particles for the cases of using (a) AR cement, (b) AR fly ash, (c) AR cement and AR fly ash and (d) AR cement and MST fly ash.

(Mechanochemically Surface Treated) fly ash의 표면에는 다수의 AR cement의 입자가 강고하게 부착된 것을 관찰할 수가 있어서 MST fly ash와 AR cement의 친화성은 아주 큰 것으로 고려된다.

Fig. 11(a), (b)는 Fig. 10의 (a), (b) 영역의 에너지 분산형 원소분석기(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)에 의한 분석 결과이다. ARFA의 표면에는 AR cement의 구성성분인 Ca 성분의 검출 양이 아주 적지만 MSTFA의 표면에서는 Ca가 상당량 검출되고 있다. 따라서 상기의 MSTFA 표면의 친화성에 의한 cement 입자의 부착은 확실한 것으로 고려된다.

4.2. 강도증진 모델

MST(Mechanochemically Surface Treated) fly ash를 혼화하여 AR 및 BP(Ball-mill Processed) fly ash 혼화 공시체보다 강도가 증진되었는데 이에 대한 모델을 4.1에서 논의한 cement와 fly ash의 친화성에 대한 고찰에 기초하여 Fig. 12에 나타내었다. 일반적인 AR fly ash와 cement를 혼합한 경우에는 cement와 fly ash 입자는 서로 친화성을 나타내지 못한다(Fig. 10(c)). 이러한 cement와 AR fly ash로 concrete를 제조하게 되면 fly ash와 cement의 친화성이

떨어지므로 concrete의 강도가 저하하게 된다(Fig. 12(a), conventional process model). 그러나 MST fly ash(90 wt% fly ash와 10 wt% cement를 혼합후 ball milling process를 거침)를 사용하게 되면 fly ash와 cement 입자간의 접합성이 증진되어(Fig. 10(d)) 수화물 생성시 cement와 fly ash 입자간의 결합력이 증가하게되어 결과적으로 concrete의 강도가 향상되게 된다(Fig. 12(b) Mechanochemically Surface Treating(MST) process).¹⁷⁾

5. 결 론

Mechanochemically Surface Treated(MST) fly ash를 사용하여 fly ash 혼화 concrete 초기강도 증진을 위한 연구를 수행하였다. 표면처리하지 않은(As Received, AR) fly ash와 단지 particle size reduction한 Ball-milling Processed(BP) fly ash 혼화시의 공시체와 비교하여 동일한 fly ash의 혼화량, 동일한 재령의 압축강도 및 미세구조의 관점에서 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. MST fly ash를 혼화한 concrete 공시체가 AR fly ash를 혼화한 것보다 10-20%, particle size가 작은 쪽으로

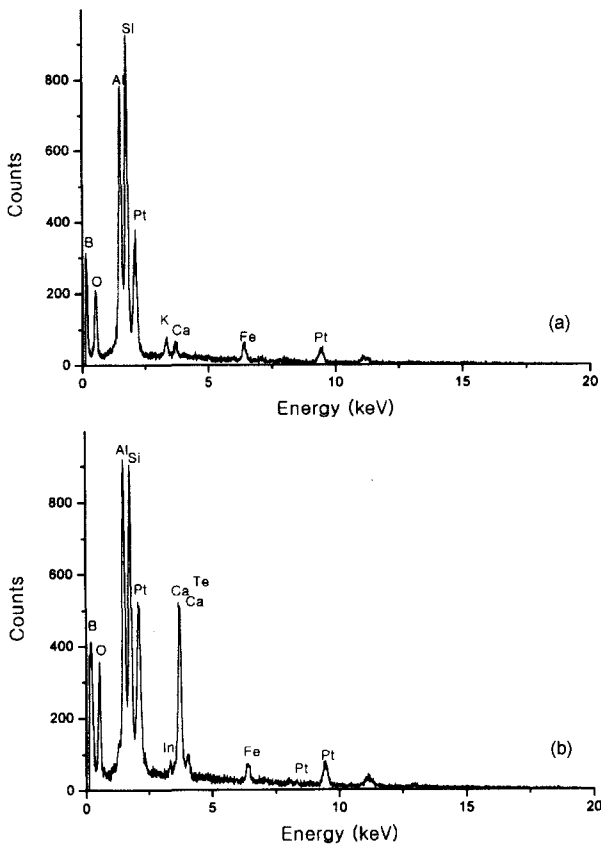


Fig. 11. Energy Dispersive Spectroscopy(EDS) patterns, (a) and (b) correspond to a and b in Fig. 10 (c) and (d).

분포된 BP fly ash를 혼화한 것 보다는 2-7% 상승한 압축 강도 값을 나타내었으며, 특히 MST fly ash 10 wt% 혼화한 28일 재령 concrete 공시체는 fly ash를 전혀 혼화하지 않은 공시체의 하중강도의 97%에 가까운 매우 우수한 값을 나타내었다.

2. 상기의 강도 증진은 본 mechanochemical processing에 의한 MST fly ash 조제시에 fly ash와 10wt% 첨가된 cement 입자가 혼합되면서 기계적 에너지가 공급되므로 각 입자의 서로에 대한 친화성이 증대되며, 이로 인하여 수화물 생성시 cement와 fly ash 입자간의 결합력이 더욱 증가하게 되어 압축강도가 증가하는 것으로 고려된다.

REFERENCES

1. Y. D. Park *et al.*, "Fabrication of Lowely Exothermic Remicon with High Strength and Statistical Quality Control," *Proc. of J. Kor. Conc. Sec.*, **8**(1), 376-381 (1995).
2. K. Ukita, M. Ishii, K. Yamamoto, K. Azuma and K. Kohno, "Properties of High Strength Concrete Using Classified Fly Ash," *Proceedings Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 37-52, Istanbul, Turkey (1992).

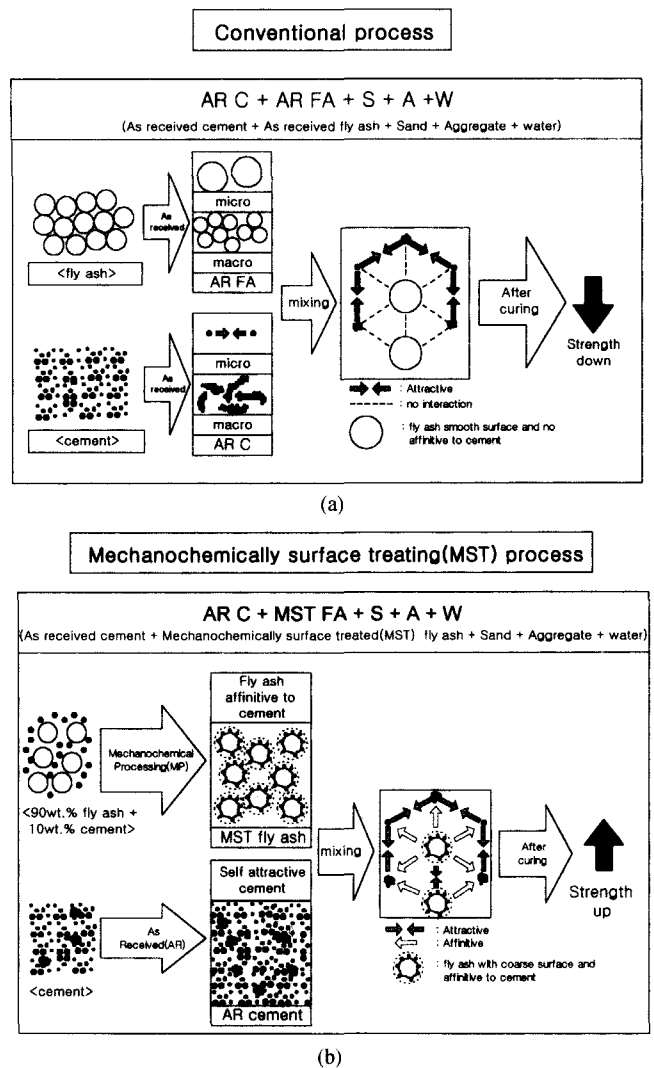


Fig. 12. Strengthening model for (a) conventional process and (b) Mechanochemical Surface Treating(MST) process.

3. E. Tazawa, A. Yonekura, K. Kawai, H. Kohata and H. Teramoto, "Properties of Mortar Containing Ultra-fine Fly Ash Particles," *Proceedings Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 79-95, Istanbul, Turkey (1992).
4. K. Kanazawa, K. Yamada and S. Sogo, "Properties of Low-heating Generating Concrete Containing Large Volumes of Blast-furnace Slag and Fly Ash," *Proceedings Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete*, 97-117, Istanbul, Turkey (1992).
5. Y. S. Kim and C. H. Kim, "Influences of Fly Ash Particle Sizes on High Strengthening for Cement Mortar Hardening Agents," *J. Kor. Conc. Soc.*, **7**(5), 10 (1995).
6. C. Won, S. S. Lee, Y. H. Kwon, J. H. Ahn and C. L. Park, "Study on Characteristics of High Calcium Fly Ash and Application," *J. Kor. Conc. Soc.*, **7**(5), (1995).
7. W. S. Langley, G. G. Carrette and V. M. Malhotra, "Structural Concrete Incorporating High-volume of ASTM Class F

- Fly Ash," *ACI Materials Journal*, **86**(5), 507-514 (1989).
8. W. S. Langley, G. G. Carette and V. M. Malhotra, "Structural Concrete Incorporating High Volumes of ASTM Class F Fly Ash," Report MSL 88-43(op & j) Dragt, Mineral Sciences Laboratories, Canada Center for Mining and Engineering Technology, Jan (1988).
 9. A. A. Al-Manaseer, M. D. Haug and K. W. Nasser, "Compressive Strength of Concrete Containing Fly Ash, Brine and Admixtures," *ACI Materials Journal*, **85**, 109-116 (1988).
 10. M. R. H. Dunstan, "Fly ash as a 'fourth ingredient' in concrete mixes," CANMET/ACI 2nd International Conference Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete; SP 91-7, American Concrete Institute, Madrid, Spain, April (1986).
 11. M. Abe, F. Tomosawa, K. Tamura and K. Mano, "Influence of the Kind of Added Alkali on the Properties of Mortar or Concrete in the Test of Alkali Aggregate Reaction," *proceedings of the Japan Concrete Institute*, **10**(2), 739-744 (1988).
 12. M. D. A. Thomas, "Survey of PFA Concretes," Building Research Establishment Information paper, Her Majesty's Stationary Office, London (1991).
 13. C. C. Chen. "The Effects of Curing and High Volumes of Fly Ash on the Strength Development of PFA Mortars," Dissertation K.U. Leuven, Leuren (1990).
 14. M. N. Haque, M. K. Copalan, R. C. Joshi and M. A. Ward, "Strength Development of Inadequately Cured High Fly Ash Content and Structural Concrete," *Cement and Concrete Research*, **16**(3), 363-370 (1986).
 15. P. K. Mehta, "Durability of Concrete in Sea Water a Review," Int. Conf. on performance of concrete in marine environment St Andrews. Canada. ACI (1980).
 16. K. Kobayash, Y. Seno, K. Kawai and Y. Uno, "Pore Solution Composition of Mortars with Reactive Aggregate(II) - Change of old Concentration - (*in Jpn.*)," *Seisan - Kenkyu*, **40**(7), 346-349 (1988).
 17. C. E. Kim, H. L. Lee, H. J. Lee and H. B. Lee, "Ceramic Powder Material Science," 87-98, Bando Publication Co. (1994).
 18. KS L 5405, "Fly Ash" (1992) .
 19. ASTM C. 618, "Standard specification for Fly Ash and Raw or Calcined Nature Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete" (1987).
 20. JIS A 6201, "Fly Ash" (1991).
 21. S. Kuniwake, "Fly Ash and Fly Ash Cement," *Cement Concrete*, 2-18, No. 267 (1969).
 22. N. Kataoka, W. Kobayashi *et al.*, "Charateristics of Fly Ash Cement," *Cement Technique Annual Report*, 86-89 (1985).
 23. B. K. Chang, C. J. Chung, J. H. Lee and Y. M. Lim, "Cement Material Chemistry," 212-216, Chonnam National University (1998).