

Mechanochemical Processing(MP)에 의한 Cement-fly Ash 계 Mortar의 제조

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

강릉대학교 세라믹공학과

*명지대학교 세라믹공학과

**연세대학교 세라믹공학과

(2001년 7월 10일 접수; 2001년 12월 28일 승인)

Fabrication of Cement-fly Ash Mortar by Using Mechanochemical Processing(MP)

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 December 28, 2001)

초 록

Mechanochemical Processing(MP)을 거친 Cement(MPC) 또는 Fly Ash(MPFA)를 사용하여 fly ash 다량 혼화 고강도 mortar의 제조를 위한 연구를 수행하였다. 단순 ball milling processing를 거친 cement(Ball-mill Processed Cement, BPC)와 채취 그대로의 처리하지 않은 fly ash(As Received Fly Ash, ARFA) 혼화시의 공시체와 비교하여 동일한 fly ash의 혼화량(10, 20, 30 wt%), 동일한 재령(7일 및 28일)의 압축강도 및 미세구조의 관점에서 고찰하였다. MPC와 ARFA 및 BPC와 MPFA를 사용한 mortar 공시체가 BPC와 ARFA를 사용한 것보다 각각 5-11% 및 10-20% 상승한 압축강도 값을 나타내었다. 더욱이 MPC와 MPFA의 동시 혼화 mortar 공시체의 압축강도가 fly ash 혼화량 20 wt% 공시체에서 강도 상승률 24%를 나타내었는데 이 값은 MPC 사용에 의한 강도 향상 비율(8%)과 MPFA 혼화에 의한 강도 향상 비율(12%)의 합을 상회하는 synergy 효과를 나타내는 강도 향상율을 나타냈다. 상기의 강도 증진은 MP에 있어서 fly ash와 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.

ABSTRACT

Fabrication of mortar containing fly ash for high strength structural material was investigated by using a Mechanochemically Processed Cement (MPC) and/or Fly Ash (MPFA), which was compared to the specimen (at the same fabrication condition of fly ash adding contents (10, 20 and 30 wt%) and curing time (7 and 28 days)) fabricated by using Ball-mill Processed Cement (BPC) and As Received Fly Ash (ARFA) in terms with compressive strength and microstructures. Mortar specimen fabricated by using MPC and ARFA showed 5-11% higher compressive strength than that in the case of using BPC and ARFA, and mortar specimen by using BPC and MPFA represented 10-20% higher compressive strength than that for the case of using BPC and ARFA. Furthermore, mortar specimen fabricated by simultaneously using MPC and MPFA exhibited about 24% higher value of compressive strength than that for the case of using BPC and ARFA, which was considered to be synergic efficiency in increasing compressive strength. Increased compressive strength as above mentioned is considered to be caused by mutually increased affinity between cement and fly ash induced during Mechanochemical Processing(MP).

Key words : Mortar, Fly ash, Mechanochemical processing, Microstructures

1. 서 론

석탄의 연소 과정에서 부수적으로 생산되는 fly ash는 산업 폐기물로 분류되어 매립되어 왔으나 최근 들어 con-

crete의 품질개선, 원가 절감과 산업폐기물의 재활용 및 자연보존 등의 환경적인 측면이 고려되어 사용량이 매년 증가하는 추세이다. 외국의 경우 cement 대체재료로서의 fly ash 함량을 획기적으로 높인 고품량 fly ash가 개발되어 실용화 단계에 접어들었지만, 우리나라의 경우 1995년 fly ash 발생량은 원탄의 14.4%인 약 260만 톤 가량으로 추산

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

되는데, 이 중 재활용량은 18.3%에 해당하는 49만 톤에 불과하다.¹⁾

Fly ash의 가장 큰 용도는 건축 및 토목구조재료에 사용되고 있다. 이러한 재료를 사용한 고품질이면서도 저가의 mortar 재료의 제조기술 개발은 cement 및 concrete 산업의 경제적 효율성 제고에 크게 기여할 것이다.²⁾ 일반적으로 fly ash를 mortar의 혼합재료로 사용하게 되면 작업성 향상, 수화열의 감소, 장기강도의 증진, 내구성 향상 등 mortar의 품질을 개선하는데 여러 가지 장점을 지니고 있어 근래에 와서 고강도 mortar 제조시의 필수적인 구성재료로 인정되고 있다. Fly ash를 우수한 품질의 건축재료로 사용하기 위해서 가장 중요한 요소가 미연탄소분의 저감, 균일한 입도, 균일한 화학성분이어야 하나 발전소 전기집진기에서 나오는 fly ash는 석탄의 종류와 발전소 출력의 증감정도, 보일러의 조건 등에 따라 달라지며 더구나 유연탄과 무연탄의 종류에 따라서 판이하게 다른 성질의 품질이 생산된다. 이러한 미가공 상태의 품질로 remicon 등에 토건재료 등으로 사용하게 될 경우 혼화량의 한계는 물론 제품의 품질에도 영향을 미치게 된다.³⁻¹³⁾ 강도면에서는 fly ash를 함유하지 않은 mortar에 비해서 fly ash를 함유한 mortar의 증강기 강도는 크지만 초기강도가 저하되는 단점이 있으며, 이러한 단점은 fly ash가 cement 또는 골재(모래 또는 작은 자갈)와 초기에 불완전한 접합성을 나타내기 때문이며, 또한 품질관리의 측면에서 원탄의 재료와 연소조건에 따라 fly ash의 품질의 편차가 심하기 때문으로 알려져 있다. 그러므로 이러한 단점들을 보완하기 위해서 milling process를 통하여 fly ash 또는 cement의 표면 활성화 및 고품위화하면 기존의 mortar보다 우수한 고품질의 mortar의 생산이 가능해질 것으로 고려된다. 그러나 이에 대한 연구는 거의 보고되고 있지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 fly ash 및 cement의 표면활성화 방법으로서 ball milling에 의한 mechanochemical processing의 개념을 도입하여 cement 입자와 fly ash 입자간의 친화성을 증가시켜 fly ash의 사용량을 증가시킨 강도 강화 mortar를 개발하고자 하였으며 하중강도와 수화물중의 fly ash의 미세구조의 관점에서 고찰하였다.

Table 2. Experimental Condition

[1] Fabrication of cement mortar										
(1) Properties of materials										
① density of cement (g/cm ³): 3.15										
② density of small aggregate (g/cm ³): 2.63										
(2) Water - cement ratio (%) = 48.8										
(3) Ball-mill processed cement (BPC)										
100 wt% as received cement (ARC) → ball-mill processing										
(4) Mechanochemically processed cement (MPC)										
(90 wt% cement + 10 wt% fly ash) → ball-mill processing after mixing										
(5) Ball-mill processed fly ash (BPFA)										
100 wt% as received (AR) fly ash → ball-mill processing										
(6) Mechanochemically processed fly ash (MPFA)										
(90 wt% fly ash + 10 wt% cement) → ball mill processing after mixing										
(7) Adding amount of fly ash (wt%)										
((AR, BP or MP) fly ash wt / ((AR, BP or MP) cement + (AR, BP or MP) fly ash)wt) × 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] Ball milling condition for mechanochemical processing										
① Mixture ratio of cement and fly ash										
③ MP cement : cement (90 wt%) + fly ash (10 wt%)										
④ BP cement : cement 100 wt%										
⑤ MP fly ash : cement (10 wt%) + fly ash (90 wt%)										
② Jar size (mm): 90Φ × 190										
③ Spherical iron ball size (mm): 10~18										
④ Ball - charging ratio (volume%): 30										
⑤ Powder - charging ratio (volume%): 30										
⑥ Milling atmosphere: in air										
⑦ Rolling speed (rpm): 105										
⑧ Milling 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 BP or MP cement (g): 2										
④ liquid temperature (°C): 20 ± 3										
⑤ Soaking time during stirring (minutes): 3										

Table 1. Chemical Components of Materials

Materials	Components			Weight percent (wt%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Ig.Loss
Portland Cement (BP* ¹ , MP* ²)	22.7	4.7	2.87 (3.39* ¹ , 7.82* ²)	.	63.9	1.2	2.1	0.6	0.2	10.1
Fly Ash (BP* ¹ , MP* ²)	48.6	28.3	6.91 (6.60* ¹ , 3.23* ²)	.	1.01	0.87	.	.	0.2	10.3
Sand	90.6	5.1	0.4

*¹BP : ball-mill processed

*²MP : mechanochemically processed

2. 실험방법

2.1. 원료 특성 및 조제

Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에 쓰인 원료는 portland cement, fly ash 및 모래였으며, 특히 fly ash는 SiO₂와 Al₂O₃가 주성분인 전형적인 fly ash 성분인데 특징으로서는 가열감량(Ig. Loss)은 2차 열처리에 의해 낮추지 않았기 때문에 10.3% 정도이다.

Mechanochemically Processed Cement(MPC) 및 Mechanochemically Processed Fly Ash(MPFA)는 Table 2의 [1]의 (4)와 (6)에 나타낸 바와 같이 원료입수 그대로의 cement(As Received Cement, ARC) 및 fly ash(As Received Fly Ash, ARFA)로써 90 wt% cement와 10 wt% fly ash 및 90 wt% fly ash와 10 wt% cement를 혼합한 후 ball milling processing을 거쳐 fly ash에 cement 친화성을 나타내도록 하였다. 또한 mechanochemical processing은 particle size reduction 효과도 있으므로 mechanochemical 효과와 particle size reduction 효과를 구분하여 검토할 수

있도록 100 wt% cement 또는 100 wt% fly ash를 같은 시간 ball milling하여 Ball-mill Processed Cement 또는 Fly Ash(BPC 또는 BPFA)를 준비하였다.

Fig. 1은 cement 및 fly ash의 입자의 크기에 따른 누가% 체하(cumulative % undersize) 곡선과 비표면적을 아울러 나타낸 것이다. MPC가 BPC 보다 입자크기가 큰쪽으로 분포되어 있는 것은 MPC속에 들어있는 fly ash의 입자 때문으로 고려되며 MPFA가 BPFA 보다 입자 크기가 큰 쪽으로 분포되어 있는 것은 MPFA 속에 들어있는 cement가 ball-mill processing 중에서 particle size reduction 진행에 완충역할을 한 것으로 고려되며 이때 fly ash 표면에 cement 친화성이 mechanochemical적으로 생기는 것으로 고려된다. 이렇게 준비한 BPC, MPC 및 ARFA, BPFA, MPFA를 가지고 mechanochemical processing의 mortar 공시체 강도 증진에의 효과를 검토하기 위해서 (BPC+ARFA), (BPC+BPFA), (MPC+ARFA), (BPC+MPFA) 및 (MPC+MPFA)등의 원료 조합의 공시체를 비교하였다.

Fig. 2의 (a), (b)는 각각 ARFA와 MPFA의 SEM 사진이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 AR fly ash의 분말의

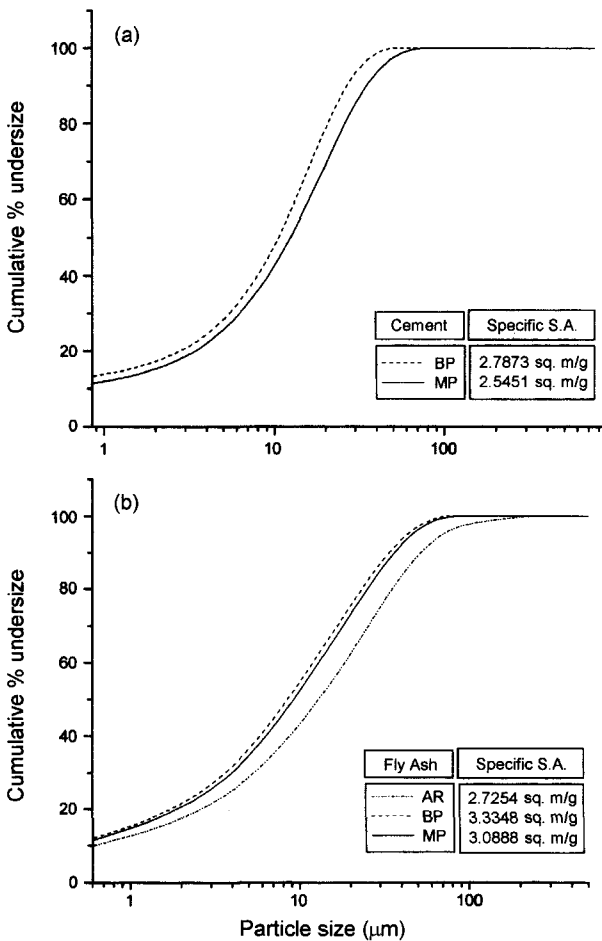


Fig. 1. Cumulative percentage undersize as a function of particle size for (a) cement and (b) fly ash.

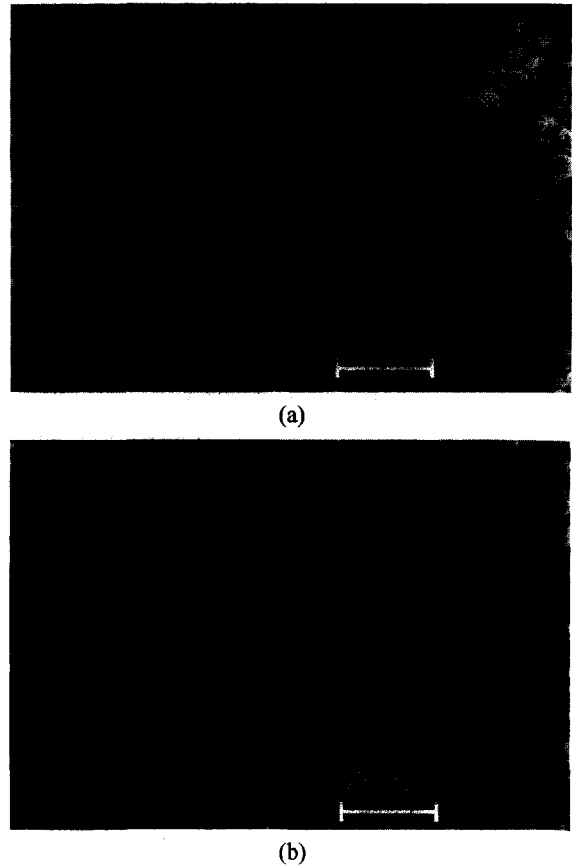


Fig. 2. Scanning electron micrographs of (a) As Received (AR) and (b) Mechanochemically Processed (MP) fly ash used in this study.

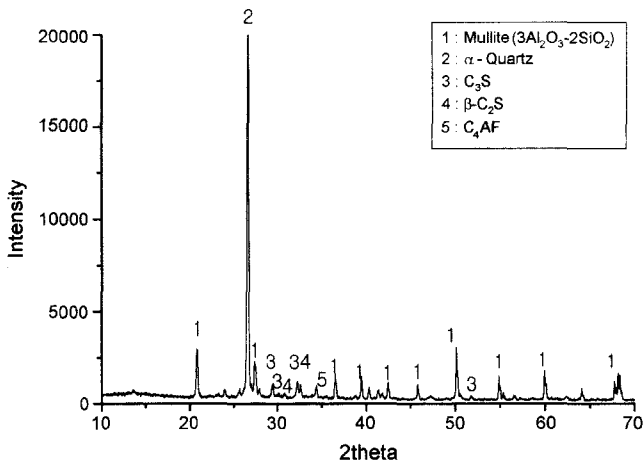


Fig. 3. Typical X-ray diffraction pattern of Mechanochemically Processed(MP) fly ash used in this study.

형태는 거의 상흔이 없는 구상이다. 따라서 ball milling은 대체적으로 fly ash의 표면에만 국한하여 mechanochemical 효과를 부여하며, 이러한 점은 fly ash가 cement에 친화성을 나타내는데에 도움을 줄 것으로 예상된다.

Fig. 3은 MP fly ash의 X선 회절분석 결과인데 전형적인 AR fly ash와 같이 주요 광물은 mullite와 quartz 및 유리

질로 존재하며 mullite 내에 존재하는 Al_2O_3 를 제외한 기타 Al_2O_3 는 유리질로 존재하는 것으로 고려된다. 또한 미세하게 cement의 성분인 C_3S , $\beta-C_2S$ 등의 peak가 관찰된다.

2.2. Fly Ash 첨가 Mortar 배합 사양¹⁴⁻¹⁷⁾

Mortar의 혼합방식은 cement와 잔골재(모래) 또는 fly ash를 투입하고 2분간 혼합하는 방법을 채택하였다. $\Phi 5 \times 10$ cm로 제작된 원주형 공시체는 $20 \pm 3^\circ C$ 의 양생 수조에서 수중 양생을 하였으며 각각 7일과 28일 재령후의 공시체를 KS F 2405에 따라 만능시험기(UTM, universal testing machine)로 압축강도 시험을 실시하였고 파단면의 미세구조 관찰, 파괴 거동, fly ash와의 결합 및 성분분석 등에 대해서 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM, LEO 420) 및 X-선 회절분석기(X-Ray Diffractometer, XRD, MO3XHF)를 사용하여 검토하였다.

실험의 변수로는 fly ash의 치환율을 cement 양에 대해 0%, 10%, 20%, 30%로 하였고 물/cement 비는 48.8%로 하였으며 배합설계는 Table 2 및 Table 3과 같다. 또한 cement와 fly ash 사이의 친화성 거동을 고찰하기 위해서는 Table 2의 [3]에 나타낸 바와 같이 증류수 100 ml에 AR 또는 MP fly ash 1g과 BP 또는 MP cement 2g을 넣고 $20 \pm 3^\circ C$ 를 유지하면서 stirring 상태에서 3분간 cement와

Table 3. Mixing Contents of Mortar Containing Fly Ash

Fabrication Series No	Fly ash content* ¹		Used fly ash (AR, BP or MP)	Cement* ² (kg/m ³)	Used cement (BP or MP)	Sand (kg/m ³)	Water (kg/m ³)
	wt%	wt (kg/m ³)					
Series 1 BPC* ³ + ARFA	10	32	AR	292	BP	828	167
	20	65	AR	259	BP	828	167
	30	97	AR	227	BP	828	167
Series 2 MPC* ⁴ + ARFA* ⁵	10	32	AR	292	MP	828	167
	20	65	AR	259	MP	828	167
	30	97	AR	227	MP	828	167
Series 3 BPC + BPFA* ⁶	10	32	BP	292	BP	828	167
	20	65	BP	259	BP	828	167
	30	97	BP	227	BP	828	167
Series 4 BPC + MPFA	10	32	MP	292	BP	828	167
	20	65	MP	259	BP	828	167
	30	97	MP	227	BP	828	167
Series 5 MPC + MPFA* ⁷	10	32	MP	292	MP	828	167
	20	65	MP	259	MP	828	167
	30	97	MP	227	MP	828	167

*¹True fly ash content
 *²True cement content
 *³BPC : Ball milling processed(BP) cement
 *⁴MPC : Mechanochemically processed(MP) cement
 *⁵ARFA : As received(AR) fly ash
 *⁶BPFA : Ball milling processed(BP) fly ash
 *⁷MPFA : Mechanochemically processed(MP) fly ash

3. 결 과

3.1. Mechanochemically Processed(MP) Cement 혼화에 의한 Mortar의 강도 증대 효과

Fig. 5는 cement에 대한 mechanochemical processing 처리가 mortar의 초기강도에 미치는 영향을 검토하기 위해 Table 3의 series 1과 2의 실험 조건에 의해 BP 및 MP cement에 AR fly ash를 10%, 20%, 30% 혼화한 mortar의 7일과 28일 재령후의 압축강도 결과이다. 여기에서 알 수 있는 바와 같이 7일과 28일 재령 공히 fly ash의 혼화량이 증가하면 압축강도 값이 감소하는 일반적인 경향을 나타내지만 MP cement 혼화 mortar 공시체가 BP cement mortar 공시체에 비해 같은 재령시간과 같은 fly ash 함량 조건에서 7일 재령 기간에는 5-7%, 28일 재령기간에서는 8-11% 상승한 우수한 압축강도 값을 나타내고 있다. 동일한 ball-mill processing에 따라 BP 및 MP cement가 조제되었으며 MP cement의 입자크기가 BP cement의 입자크기 보다 큰쪽으로 분포되어 있음(Fig. 1(a))에도 BP cement를 혼화한 mortar 공시체보다 높은 강도를 보이는 것은 mechanochemical processing에서 cement의 fly ash에 대한 친화성이 향상되어 강도가 증진하는 것으로 고려된다.

Fig. 6의 (a)-(d)는 Fig. 5의 각각 (a)-(d)에 해당하는 공시체 파단면에 대한 SEM 사진이다. 7일 재령후의 미세구조인 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)를 비교해보면 BP cement를 혼화한 Fig. 6(a)에서는 경화 cement paste 조직에서 전형적으로 관찰되는 조충전 I-CSH가 관찰되고, MPC를 혼화한 Fig. 6(b)에서는 대부분 밀충진 III-CSH가 관찰된다. 또한 28일 재령후의 공시체 미세구조에서도 수화의 진행으로 인해 fly ash가 수화물에 밀하게 둘러싸여 있는 것을 관찰할 수 있으나, Fig. 6(c)와 Fig. 6(d)를 비교해 보면 MP cement를 혼화한 Fig. 6(d)에서 fly ash 주변에 더욱더 많은 부분이 밀충진된 수화조직을 관찰할 수 있다. III-CSH 모양의 미세한 구형의 입자를 관찰할 수 있는데 이것은 수화초기에 주상 형태의 조충전된 I-CSH가 수화가 진행됨에 따라 둥근 형태로 바뀐 것으로 고려된다.

3.2. Mechanochemically Processed(MP) Fly Ash 혼화에 의한 Mortar의 강도 증대 효과

Fig. 7은 MP fly ash 혼화가 7일 및 28일 재령의 mortar 공시체의 강도향상에 미치는 영향을 검토하기 위해 Table 3의 series 3, 4 및 5의 실험조건에 의해 BP cement 및 MP cement에 BP fly ash 및 MP fly ash를 10%, 20%, 30% 혼화한 mortar의 7일 및 28일 재령후의 압축강도 결과이다. 여기에서도 알 수 있는 바와 같이 fly ash의 함량에 따라 압축강도가 떨어지는 경향을 나타낸다. 그러나 먼저 BP cement에 MP fly ash를 혼화한 mortar 공시체에 대한 압축강도 결과(■ 및 ▲ symbol)에서 알 수 있는 바

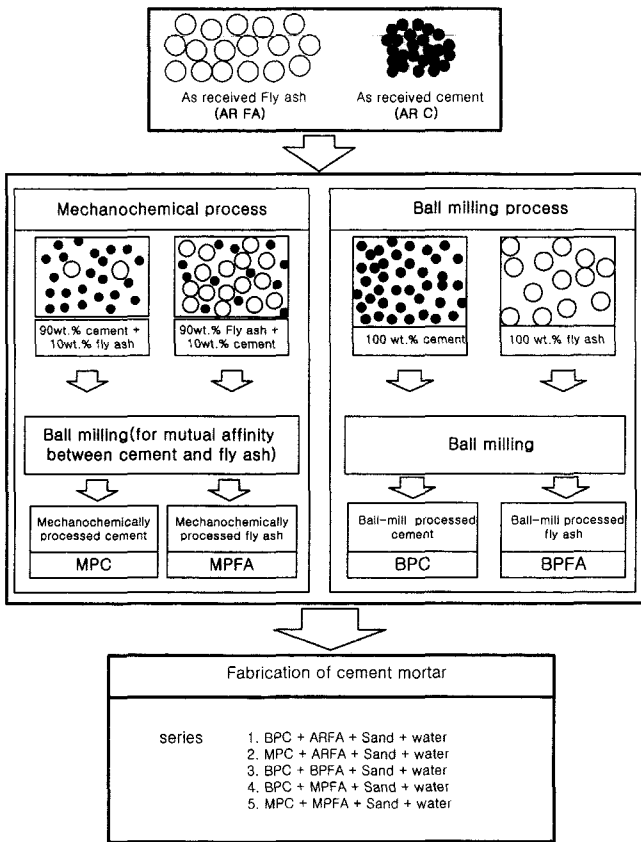


Fig. 4. Scheme of cement mortar fabrication by using Mechanochemical Processing(MP).

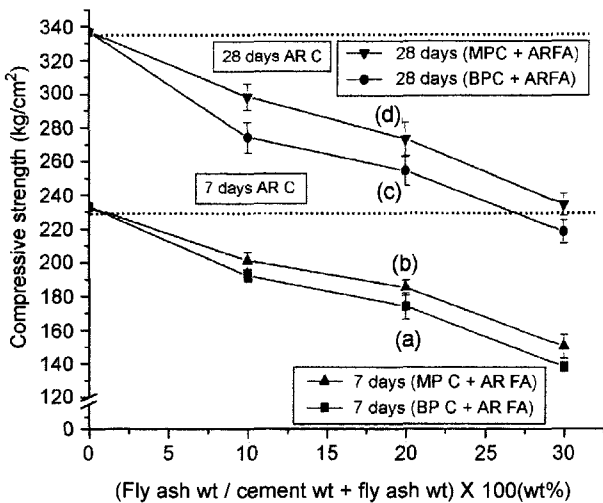


Fig. 5. Compressive strength of mortar specimen containing different fly ash contents after 7 and 28 days curing in a 20 ± 3°C water for each cases of using (MP cement + AR fly ash), which is compared to the case of using (BP cement + AR fly ash).

fly ash가 접촉할 수 있도록 한 뒤 sampling하여 건조시켰다. Fig. 4는 실험방법을 나타낸 개략도이다.

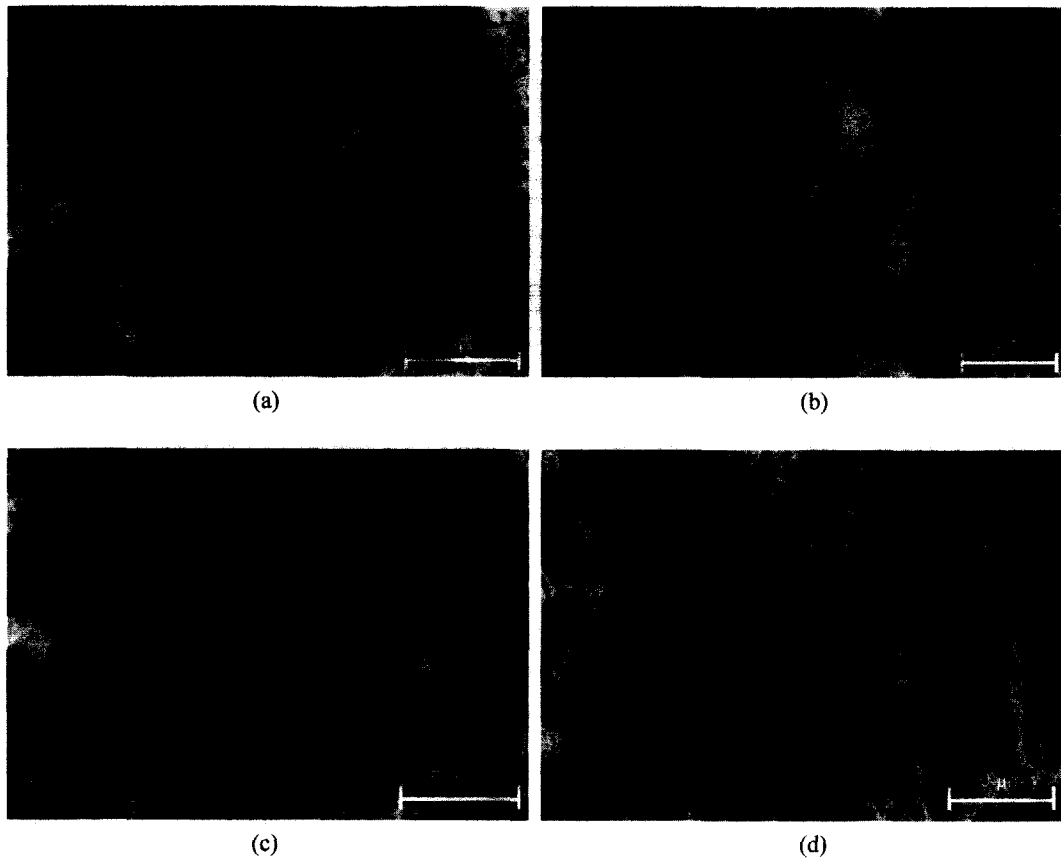


Fig. 6. Scanning electron micrographs for the mortar specimens after 7 and 28 days curing in a $20 \pm 3^\circ\text{C}$ water. Micrographs (a), (b), (c) and (d) correspond to (a), (b), (c) and (d) in Fig. 5 respectively.

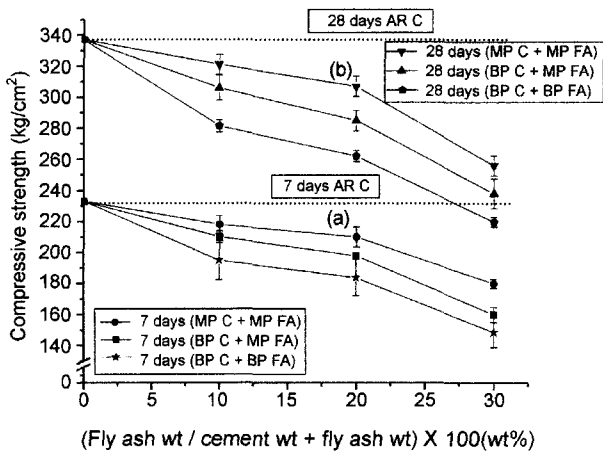


Fig. 7. Compressive strength of mortar samples containing different fly ash content after 7 and 28 days curing in a $20 \pm 3^\circ\text{C}$ water for the each cases of using (MP cement + MP fly ash), which is compared to the case of using (BP cement + MP fly ash) and (BP cement + BP fly ash).

와 같이 동일한 함량, 동일한 재령기간에서는 BP cement에 MP fly ash를 혼화한 공시체가 BP cement에 BP fly ash

를 혼화한 것보다 7일 재령한 공시체의 경우 10-20%, 28일 재령 공시체의 경우 14-18% 상승하는 우수한 압축강도 값을 나타낸다.

더욱이 ● 및 ▼ symbol에서 알 수 있는 바와 같이 MP cement에 MP fly ash를 혼화 했을 경우는 다른 어떠한 조건에서 보다 우수한 압축강도 값을 나타내는데, MP fly ash 혼화에 의한 강도 향상 비율과 MP cement 혼화에 의한 강도 향상 비율의 합에 가까운 강도 향상을 나타내고 있다. 특히 fly ash 혼화량 20 wt% 공시체에서는 강도 상승률 24%를 나타내었는데, 이 값은 MP cement 사용에 의한 강도 향상비율(8%)과 MP fly ash 혼화에 의한 강도 향상비율(12%)의 합을 상회하므로 synergy 효과를 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 8(a), (b)는 Fig. 7(a), (b)에 대응하는 공시체의 파단면에 대한 SEM 사진이다. 7일 재령의 미세구조 (a)에 비해서 28일 재령의 미세구조 (b)에서는 구형의 fly ash 주위로 밀충진된 구형 수화물이 강하게 고착되어 있는 것이 관찰되는데 여기에서도 재령이 진행됨에 따라 I-CSH의 수화가 진행되면서 전형적인 III-CSH의 밀충진 구조로 바뀌면서 MP fly ash와의 강력한 결합을 형성하여 강도를 증진시킨 것으로 고려된다.¹⁸⁾

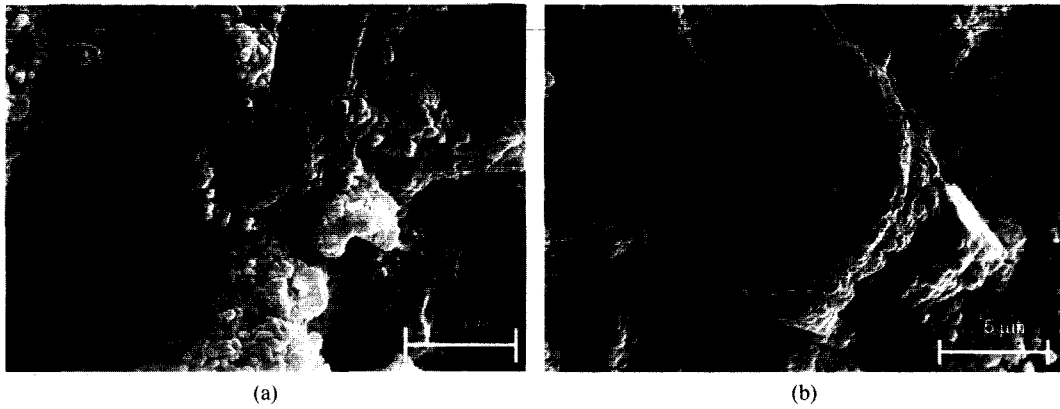


Fig. 8. Scanning electron micrographs of mortar samples of 7 and 28 days curing for MP cement + MP fly ash. Micrographs (a) and (b) correspond to (a) and (b) in Fig. 7 respectively.

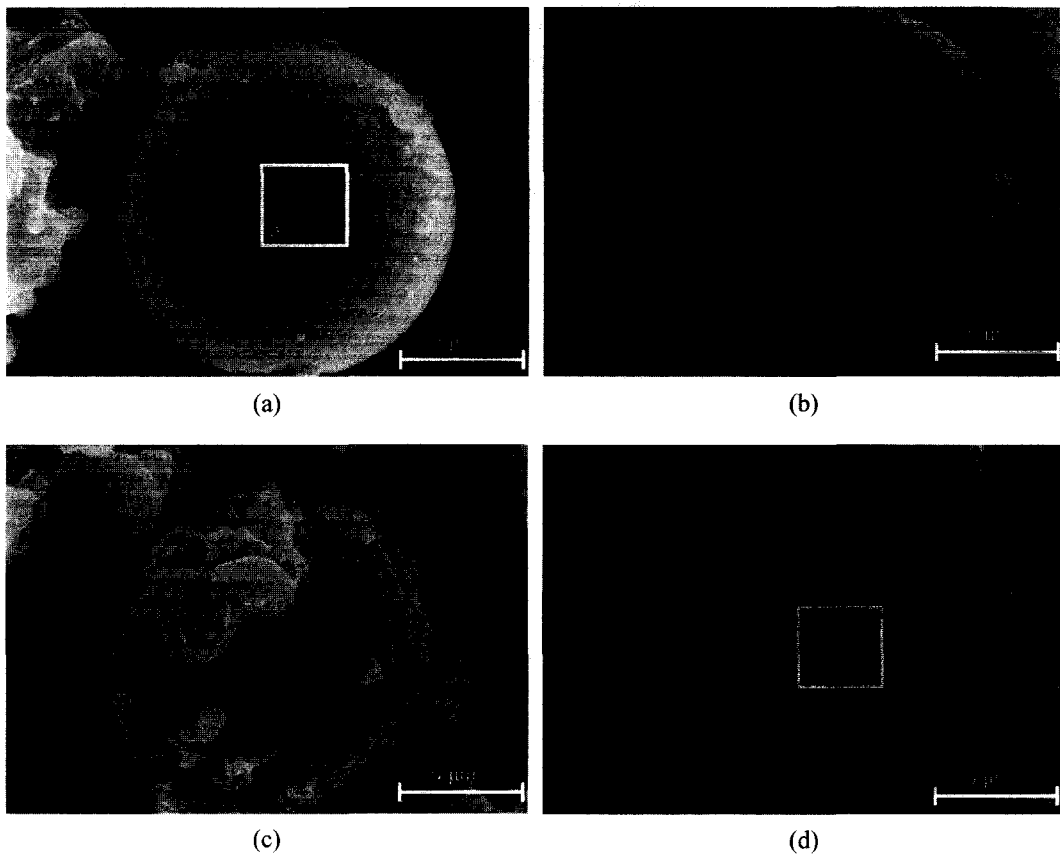


Fig. 9. Scanning electron micrographs representing the affiliative behaviours between cement and fly ash. (a) BP cement and AR fly ash. (b) MP cement and AR fly ash. (c) BP cement and MP fly ash. (d) MP cement and MP fly ash.

4. 고 찰

4.1. BP 및 MP Cement와 AR 및 MP Fly Ash의 친화성

Fig. 9는 BP 및 MP cement와 AR 및 MP fly ash의 각각의 응집성 및 상호간의 친화성을 검토하기 위해서 Table 2의 [3]의 실험조건에 의해 준비한 시료의 SEM 사진이다.

Fig. 9(a)에서 관찰되는 바와 같이 AR fly ash 표면에는 BP cement 입자가 부착되지 않고 있다. 이것은 cement는 자기 응집성(self agglomeration)이 강하지만 AR fly ash와는 친화성을 나타내지 않기 때문으로 고려된다. 또한 Fig. 9(b)에서 관찰되는 바와 같이 MP cement는 AR fly ash의 표면에 조금 더 많은 cement의 부착량이 관찰된다. 이것은

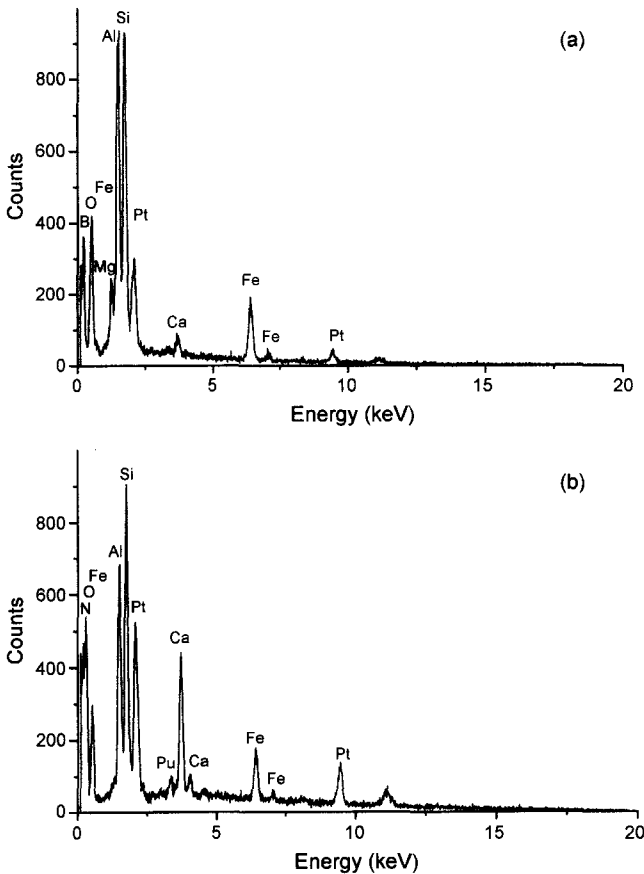


Fig. 10. Energy Dispersive Spectroscopy(EDS) patterns (a) and (b) correspond to a and b in Fig. 9 (a) and (b).

MP cement가 AR fly ash에 약간의 친화성을 나타내기 때문으로 고려된다.

한편, Fig. 9(c)에서는 MP fly ash 표면에 부착된 BP cement의 양이 AR fly ash 표면에 부착된 BP cement의 양보다 더욱 많고 또한 강고한 결합거동이 관찰되는데 이것은 MP fly ash가 BP cement에 높은 친화성을 나타내기 때문으로 고려된다. 더욱이 Fig. 9(d)에서는 MP fly ash의 표면에 부착된 MP cement의 양이 상기 Fig. 9(a)-(c)의 어느 경우보다도 많으므로 이 경우 가장 높은 친화성을 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 10(a),(b)는 Fig. 9(a),(b) 영역의 에너지 분산형 원소 분석기(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)의 분석 결과이다.

Fig. 10(a)에서 알 수 있는 바와 같이 BP cement와 AR fly ash를 혼합한 경우에는 AR fly ash의 표면에는 cement의 구성 성분인 Ca 성분이 극미량 검출되지만, Fig. 10(b)에서 알 수 있는 바와 같이 MP cement와 MP fly ash를 혼합한 경우에는 Ca 성분의 검출량이 크게 증가하고 있으므로 상기의 MP fly ash 표면에 MP cement 친화성에 대한 synergy 효과는 확실하다.

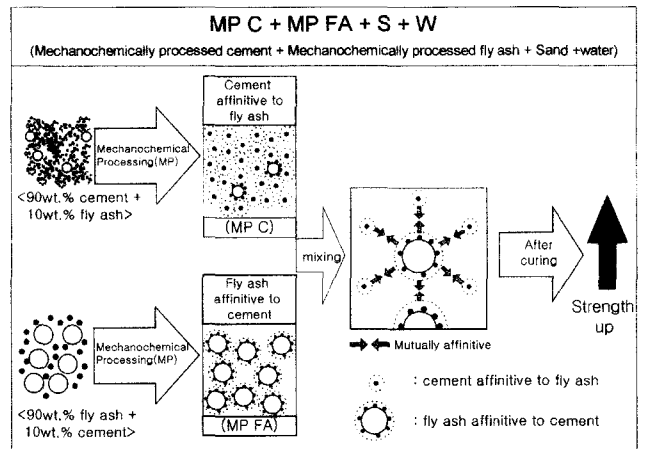


Fig. 11. Strengthening model for the mortar of simultaneously using MP cement affinitive to fly ash and MP fly ash affinitive to cement obtained by Mechanochemical Processing(MP).

4.2. 강도 증진 Model

MP cement와 MP fly ash를 사용하여 강도가 증진되었는데(Fig. 7(●, ▼ symbol)) 이에 대한 model을 Fig. 11에 나타내었다. 4.1항에서 고찰된 바와 같이 일반적인 AR fly ash와 BP cement를 혼합할 경우에는 cement와 fly ash 입자는 서로 친화성을 나타내지 않는다. 이러한 BP cement와 AR fly ash로 mortar를 제조하게 되면 재료가 불균질하게 혼합하게 되며 또한 수화물중에서 서로에 대한 접촉성이 나빠지게 되는데 이러한 이유로 mortar의 강도가 저하하게 된다. 그러나 MP 처리(예를 들면, 90 wt% fly ash와 10 wt% cement 또는 90 wt% cement와 10 wt% fly ash를 혼합한 후 ball milling process를 거침)를 하게 되면 fly ash와 cement 입자가 혼합되면서 기계적 에너지가 공급되며 이로 인하여 cement와 fly ash 입자간의 서로에 대한 친화성이 증대되어 수화물 생성시 cement와 fly ash 입자간의 결합력이 증가하게 된다.¹⁹⁾

5. 결 론

Mechanochemical Processing(MP)을 거친 Cement(MPC) 또는 Fly Ash(MPFA)를 사용하여 fly ash 다량 혼화 mortar의 강도 증진을 위한 연구를 수행하였다. MP 처리하지 않은(as received) cement(ARC) 또는 단지 Ball-mill Processing(BP)를 거친 Cement(BPC)와 Fly Ash(BPFA) 혼화시의 공시체와 비교하여 동일한 fly ash의 혼화량, 동일한 재령의 압축강도 및 미세구조의 관점에서 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. MPC와 ARFA를 사용한 mortar 공시체가 ARC와 ARFA를 혼화한 것보다 10-20% 상승한 압축강도 값을 나타내었으며 BPC와 MPFA를 사용한 mortar 공시체가 BPC

와 ARFA를 사용한 것보다 5-11% 상승한 압축강도 값을 나타내었다.

2. 더욱이 MPC와 MPFA의 동시 혼화 mortar 공시체의 압축강도가 fly ash 혼화량 20 wt% 공시체에서 강도 상승률 24%를 나타내었는데 이 값은 MPC 사용에 의한 강도 향상 비율(8%)과 MPFA 혼화에 의한 강도 향상 비율(12%)의 합을 상회하는 synergy 효과를 나타내는 강도 향상율을 나타냈다.

3. 상기의 강도 증진은 MP에 의한 fly ash와 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 Lowly Exothermic Remic with High Strength and Statistical Quality Control," *Proc. of J. Kor. Conc. Soc.*, **8**(1), 376-381 (1995).
2. Kor. Elec. Co., "Fly Ash" (1994).
3. T. H. Ahn, K. B. Shim, Y. T. Kim and S. H. Choi, "Characteristics and Hydration of The Moohified Belite Cement Blended Fly Ash," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **37**(10), 949-954 (2000).
4. S-H. Lee, E. Sakai and M. Daimon, "Hydrothermal Reactivity of Various Classified Fly Ashes by Electrostatic Precipitator," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **37**(8), 811-816 (2000).
5. 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).
6. 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).
7. K. Kobayash, Y. Seno, K. Kawai and Y. Uno, "Pore Solution Composition of Mortars with Reactiv Aggregate (II)-Change of Old Concentration, with Alkali Content and Trace Ion Concentration-" (*In Jpn.*), *Seisan-Kenkyu*, **40**(7), 346-349 (1988).
8. 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).
9. 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).
10. W. S. Langley and G. G. Carette, "Incorporating High Volumes of ASTM Class F Fly Ash," Report MSL 88-43 (op & J) Draqt, Mineral sciences Laboratories, Canada Center for Mining and Engineering Technology, Jan (1988).
11. 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**, March-April, 109-116 (1988).
12. W. S. Langley, G. G. Carette and V. M. Malhotra, "Structural Concrete Incorporating High-Volume of ASTM Class F Fly Ash," *ACI Mateials Journal*, **86**(5), 507-514 (1989).
13. R. O. Lane and J. F. Best, *Concrete International*, **14**(7), 81 (1992).
14. H. Y. Moon and C. W. Seo, "Experimental Study on Domestic Fly Ash Quality as a Concrete Mixture," *J. Kor. Civil. Soc.*, **7**(3), 213-220 (1987).
15. 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).
16. JIS A 6201, "Fly Ash" (1991).
17. KS L 5405, "Fly Ash" (1992).
18. B. K. Chang, C. J. Chung, J. H. Lee and Y. M. Lim, "Cement Material Chemistry," 212-216, Chonnam National University (1998).
19. C. E. Kim, H. L. Lee, H. J. Lee and H. B. Lee, "Ceramic Powder Material Science," 87-98, Bando Publication Co. (1994).