

경량기포콘크리트의 압축강도에서 메타카올린의 효과

권기오¹⁾ · 공경록¹⁾ · 이명규¹⁾ · 강현찬^{1)*}

The Effect of Compressive Strength in Lightweight Porous Concrete by Meta-Kaolin

K. O. Kwon, K. R. Kong, M. G. Lee and H. C. Kang*

Abstract : The study measures the effect of domestic kaolin on the compressive strength of cement mortar and light weight porous concrete. The kaolin was thermally treated in an electric furnace at T=800°C for a pozzolan reaction. Cement mortar and light weight porous concrete were used to compare the effect of adding meta-kaolin (0%~30%). As a result, mixture with 10%~15% meta-kaolin obtained the highest compressive strength. The tests were also applied to investigate the effect of a meta-kaolin particle size in light weight porous concrete. The mixtures were made by replacing cement with 15% meta-kaolin while varying the particle size of meta-kaolin. The lightweight porous concrete with 38~48 um meta-kaolin in 15% replacement develops 100% higher compressive strength than no addition of meta-kaolin.

Key words : Meta-kaolin, Pozzolan reaction, Lightweight porous concrete

요약 : 이 연구에서는 국내산 고령토를 활용한 포졸란 반응을 통해 시멘트모르타르 및 경량기포콘크리트의 압축강도에 대한 효과를 확인하였다. 포졸란 반응을 위해 고령토를 800°C에서 열처리한 메타카올린을 시멘트모르타르와 경량기포콘크리트에 첨가한 결과 10~15%를 첨가할 경우 압축강도가 가장 우수하였다. 또한 메타카올린의 입도에 따른 압축강도를 측정해 본 결과 35~44 um 크기의 메타카올린을 15% 첨가할 경우 메타카올린을 첨가하지 않은 경우에 비해 압축강도가 100% 이상 크게 향상되었다.

주요어 : 메타카올린, 포졸란 반응, 경량기포콘크리트

서론

국내에는 약 1억톤 정도의 고령토가 부존되어 있으나(산업자원부, 2007) 고품위 고령토는 거의 고갈되고 현재 저품위 고령토들이 주를 이루고 있다. 그러나 이런 저품위의 고령토를 경제적으로 정제하여 생산하는 기술 및 시설이 미비하여 상당량이 방치되어 있는 실정이다. 따라서 국내 고령토산업의 보호·육성을 위해서는 대량 부존하는 저품위 고령토를 산업분야에 대량으로 사용할 수 있는 새로운 시장의 확보가 시급하다.

한편으로 현대 건축구조물들이 대형화, 고층화가 이루어지면서 더욱 더 우수한 강도와 수밀성을 갖는 콘크리트

에 대한 필요성이 증가되고 있다(이상수 등, 2003a). 이를 위해 과거에 산업 폐기물이었던 플라이애쉬, 고로슬래그 및 실리카흄을 포졸란 혼화제로 이용하는 많은 연구를 통해 콘크리트의 고품질화가 이루어졌으나 고로슬래그의 경우 슬래그의 잠재 수경성에 의하여 콘크리트의 장기강도 상승효과가 알려지면서 가격이 최근에 급상승하고 있는 실정이며(이상호 등, 2005) 실리카흄은 콘크리트의 포졸란 반응성이 높아 강도나 내구성 측면에서 아주 우수하지만 국내에서는 거의 생산이 되고 있지 않아 수입에 의존하고 있어 비싼 가격으로 인해 경제성이 떨어지는 단점을 가지고 있다(이상수 등, 2003b).

따라서 본 연구자들은 국내 대량 부존하는 저품위 고령토들을 산업분야에 대량으로 사용할 수 있는 새로운 시장을 찾는 동시에 기존의 혼화제보다 경제성이 높은 우수한 포졸란 혼화제로 활용하는 방안을 연구하고자 한다.

2008년 3월 6일 접수, 2008년 11월 3일 채택

1) 동아대학교 에너지·자원공학과

*Corresponding Author(강현찬)

E-mail; hckang@dau.ac.kr

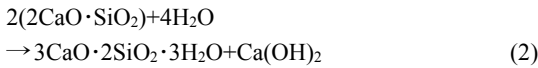
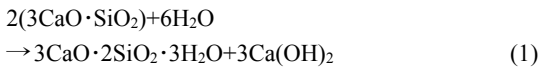
Address; Department of Energy & Resources Engineering,
The University of Dong-A

이론

포졸란 반응

포틀랜드시멘트를 구성하는 주요 화학성분은 CaO, SiO₂, Al₂O₃이며 이러한 화학성분은 상호결합하여 Table 1과 같은 4개의 주요화합물을 구성한다(건축재료, 2000). 아래 Table 1의 시멘트클링커 구성화합물 중 알루미네이트와 페라이트(Ferrite)는 강도에 크게 기여하지 않으며 엘라이트(Alite)와 벨라이트(Belite)가 강도에 영향을 많이 주는 것으로 알려져 있으며(건축재료, 2000) 이 엘라이트(Alite)와 벨라이트(Belite)는 수화반응을 통해 Tobermorite (C₃S₂H₃)와 포틀란다이트(Ca(OH)₂), 즉 수산화칼슘을 생성한다.

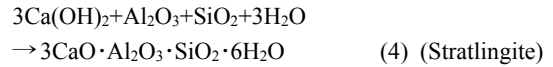
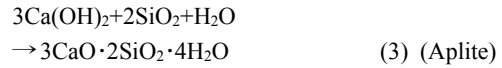
Tobermorite와 함께 생성된 포틀란다이트는 육각형의 결정형을 형성하며 반데르발스 힘으로 결합하여 강도가 낮고 Table 2와 같이 시멘트페이스트 용적의 약 20~25%를 구성하고 있다.



식 (1)과 식 (2) 같이 반응하는 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H)은 시멘트가 완전히 수화하였을 경우 Table 2와 같이 수화생성물의 50%~60%를 차지한다.

여기서 층상으로 이루어진 Ca(OH)₂에 시멘트의 혼화재로 메타카올린(Al₂O₃·2SiO₂)을 사용하여 새로운 활성을 가진 SiO₂를 추가하면 식 (3)과 같은 Aplite 결정이나 새로운 활성 Al₂O₃, SiO₂가 추가되어 식 (4)와 같은 Stratlingite 결정을 형성하여 강도를 향상시키게 되는데 이를 포졸란

반응이라 한다.



고령토의 결정변화

국내의 하동이나 산청지방에서 많이 산출되는 고령토는 대부분 할로사이트로 알려져 있는데(이효민, 2003) 일반적으로 고령토를 열처리하면 Fig. 1과 같이 결정변화를 일으키게 된다. 할로사이트를 120℃ 정도로 소성할 경우 카올리나이트와 같은 결정형태인 메타-할로사이트가 되며 600℃ 이상에서 결정수가 탈수되면서 결정구조가 메타카올린 형태로 변화하고 980℃ 이상에서는 메타카올린이 분해되어 몰라이트(Mullite)와 r-Al₂O₃가 생성된다. 보고에 의하면 메타카올린의 결정형태가 시멘트와 포졸란 반응이 가장 활발한 것으로 보고되어져 있다(C.S.Poon et al., 2006).

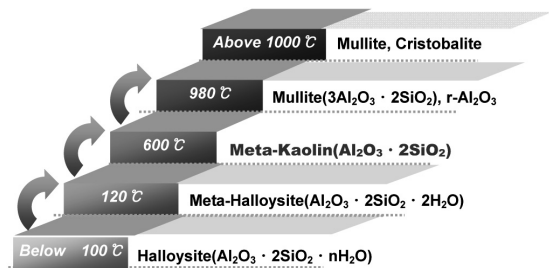


Fig. 1. The change of crystal structure according to temperature of kaolin.

Table 1. Compound of cement clinker

Name	Alite	Belite	Aluminate	Ferrite (Celite)
Molecular formula	3CaO·SiO ₂	2CaO·SiO ₂	3CaO·Al ₂ O ₃	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃
Abbreviation	C ₃ S	C ₂ S	C3A	C ₄ AF

Table 2. Hydration of cement

Hydrate	Solid volume fraction of Cement Paste	Crystal Structure
C-S-H	50~60%	Layered and Fibrous
Ca(OH) ₂	20~25%	6-angle prism
C-A-Š-H	15~20% (Ettringite, Monosulfate)	Mattress prism, 6-angle sheeting
Unhydrate clinker	1 μm~50 μm (Particle size)	

(C=CaO S=SiO₂ A=Al₂O₃ Š=CaSO₄ H=H₂O)

실험방법

저품위 고령토를 포졸란 혼화제로 사용 가능성을 확인하기 위하여 국내산 고령토를 800℃에서 소성하여 사용하였으며 1종 보통 포틀랜드 시멘트(D사)와 표준사를 사용하여 Table 3의 배합비로 메타카올린의 함량에 따른 압축강도를 측정하였다.

또한 경량기포콘크리트에 있어서는 흡음률과 단열성능을 높이기 위하여 질석을 경량골재로 사용하였고 강도

보완을 위하여 종이화이버를 첨가하였다. 그리고 경량기포콘크리트에 독립된 무수히 많은 미세한 공기포를 연행시켜 경량화와 워커빌리티를 향상시키기 위해 3종류의 혼화제를 사용하여 Table 4의 배합비로 경량기포콘크리트에서 메타카올린의 첨가량에 따른 압축강도의 변화를 측정하였다. 그리고 포졸란 반응이 가장 활발하여 압축강도가 가장 우수한 메타카올린의 첨가량에 대해 메타카올린의 입도에 따른 압축강도의 변화를 알아보하고자 Table 5와 같이 메타카올린의 입도를 변화시켜 각각의 입도에 따른 압축강도를 측정하였다.

Table 3. Mortar mix proportion with meta-kaolin admixture

Unit weight (g)			
Water	Cement	Sand	Meta-kaolin
1200	600	1470	0
1200	570	1470	30 (5% of cement)
1200	540	1470	60 (10%)
1200	510	1470	90 (15%)
1200	480	1470	120 (20%)
1200	450	1470	150 (25%)
1200	420	1470	180 (30%)

결과 및 고찰

국내산 저품위 고령토의 관찰

본 연구에 사용한 고령토의 화학성분을 분석한 결과 Table 6과 같이 SiO₂가 45.87%, Al₂O₃가 37.45% 그 외 소량의 Fe₂O₃, CaO등으로 구성되어 있다.

그리고 Fig. 2와 같이 800℃에서 소성한 고령토와 65℃에서 건조시킨 고령토 원광의 XRD분석결과를 보면 국내의 산청과 하동지역에서 산출되는 저품위 고령토는 할로이사이트의 결정구조로 이루어져 있으며 고령토를 800℃에서 소성하였을 경우는 비정질의 메타카올린과 SiO₂ 결

Table 4. Lightweight porous concrete mix proportion with meta-kaolin admixture

Unit Weight (g)				
Meta-kaolin	Cement	Expanded vermiculite	Wastepaper	Surfactants
0	664	250	80	6
30 (5% of cement)	614	250	80	6
60 (10%)	564	250	80	6
90 (15%)	514	250	80	6

(water: 1375 g)

Table 5. Light weight porous concrete mix proportion by change the particle size of meta-kaolin

Unit Weight (g)					
Particle size of Meta-kaolin	Meta-kaolin (15%)	Cement	Expanded Vermiculite	Waste-paper	Surfactants
200-100 mesh	90	514	250	80	6
230-200 mesh	90	514	250	80	6
270-230 mesh	90	514	250	80	6
325-270 mesh	90	514	250	80	6
400-325 mesh	90	514	250	80	6
-400 mesh	90	514	250	80	6

(water: 1375 g)

Table 6. Chemical composition of kaolin

Comp.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Loss
Content (%)	45.87	37.45	2.93	0.33	0.68	0.15	0.43	0.22	11.92

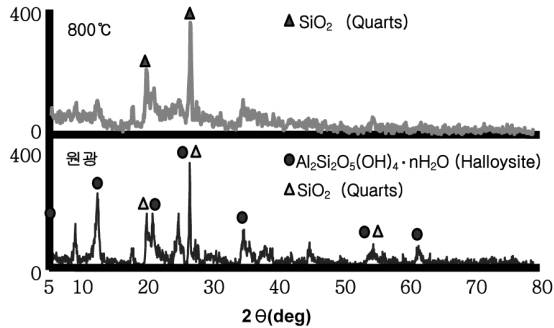


Fig. 2. X-ray pattern of kaolin structure.

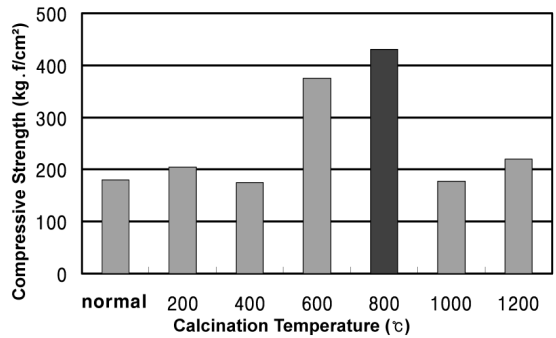


Fig. 3. Compressive strength of cement mortar by kaolin calcination temperature.

정구조가 나타났다.

**시멘트 모르타르에서 메타카올린의 효과
고령도의 소성온도에 따른 압축강도 변화**

고령도의 온도상승에 따른 고령도의 결정변화가 강도의 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 상온에서부터 1200°C까지 200°C 간격으로 고령토를 소성한 후 시멘트에 5% 치환첨가하여 모르타르 제조 후 28일 양생 후 압축강도를 측정할 결과 Fig. 3과 같이 600°C와 800°C에서 소성한 것에서 압축강도가 향상되는 것을 알 수 있었다.

일반적으로 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 600°C 이상에서부터 고령토가 메타카올린으로 변화되는 것으로 알려져 있으나 본 연구에서 고령토의 소성은 실험실용 전기로에서 실시한 관계로 충분한 열전달이 이루어 지지 못한 것으로 사료되며 800°C에서 소성한 고령토를 첨가한 시멘트 모르타르의 압축강도가 가장 크게 향상된 것으로 보아 본 연구에서는 800°C에서 소성한 고령토가 포졸란 반응이 가장 활발한 것으로 사료된다.

메타카올린 함량에 따른 압축강도 변화

시멘트모르타르에 Table 3의 배합비로 메타카올린 0~30%를 치환첨가하여 압축강도를 측정할 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 메타카올린의 첨가로 대체적으로 강도를 향상되는 것을 알 수 있으며 전체적으로 볼 때 메타카올린의 첨가량이 10~15%정도가 적당한 양으로 사료된다. 가장 널리 사용되는 포졸란 혼화재인 플라이애쉬나 실리카흙의 경우 초기강도는 저하되나 3

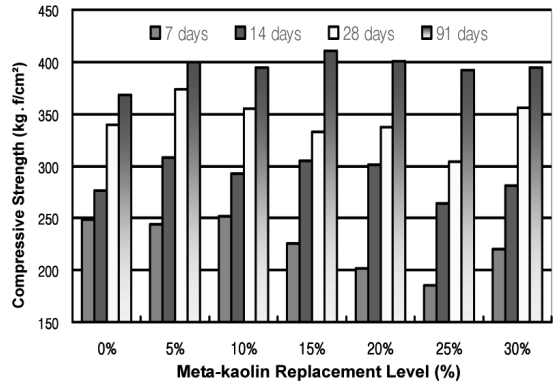


Fig. 4. Compressive strength of cement mortar with meta-kaolin.

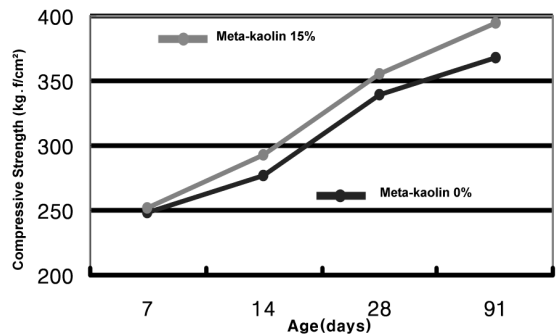


Fig. 5. Comparison of compressive strength of meta-kaolin added cement mortar and meta-kaolin not added cement mortar.

개월 이후의 장기강도부터 향상되는 것으로 보고되고 있으나 메타카올린을 10% 첨가하였을 경우에는 3개월 이후의 장기강도는 물론 7일부터의 초기강도도 크게 향상되는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 메타카올린을 첨가하지 않은 경우와 메타카올린을 시멘트에 10% 치환첨가한 경우를 비교해 보면 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 메타카올린 10%를 치환첨가한 경우 초기강도가 메타카올린을 첨가하지 않은 경우보다 20~25 kg·f/cm² 정도 압축강도가 향상되는 것을 확인 할 수 있었다.

경량기포콘크리트에서 메타카올린의 효과

메타카올린 함량에 따른 압축강도 변화

Table 4의 배합비로 메타카올린을 0~15% 치환첨가한 경량기포콘크리트의 압축강도 측정결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 메타카올린의 치환첨가량이 증가할수록 14일의 초기강도부터 3개월 이후의 장기강도까지 향상되는 것을 확인할 수 있

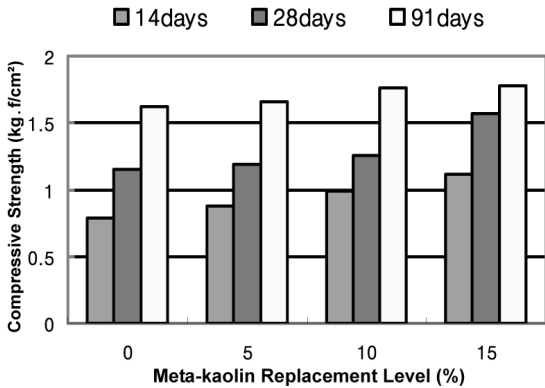


Fig. 6. Compressive strength in lightweight porous concrete with meta-kaolin.

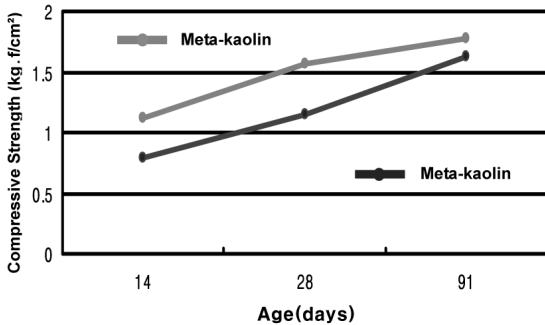


Fig. 7. Comparison of compressive strength in meta-kaolin added lightweight porous concrete and non-added lightweight porous concrete.

었다.

특히 압축강도가 가장 우수한 메타카올린을 15% 치환 첨가한 경우는 메타카올린을 첨가하지 않은 경우와 비교한 Fig. 7을 보면 28일 이내의 초기재령에서 압축강도가 약 40 kg·f/cm² 정도 크게 향상됨을 확인 할 수 있었다.

메타카올린 입도변화에 따른 압축강도 변화

앞의 메타카올린 함량에 따른 실험에서 압축강도가 가장 우수하였던 15%의 메타카올린 첨가량에 대해 메타카올린의 입도크기에 따른 압축강도의 변화를 관찰하고자 Table 5의 배합비로 메타카올린의 입도에 따른 압축강도를 측정하였다.

그 결과 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 (-325+400) mesh 입도의 메타카올린을 첨가한 경우 압축강도가 가장 우수하였다. (100-200) mesh와 (-400) mesh 범위를 제외하고

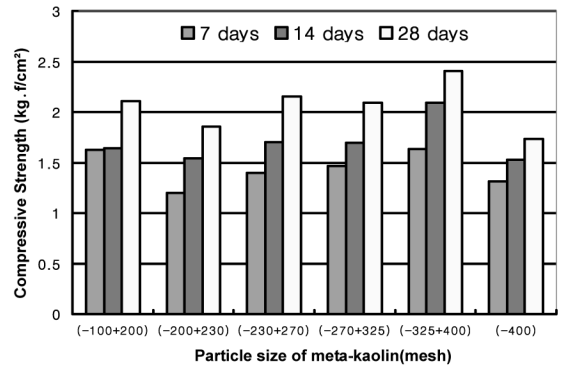


Fig. 8. Compressive strength according to particle size of meta-kaolin in lightweight porous concrete.

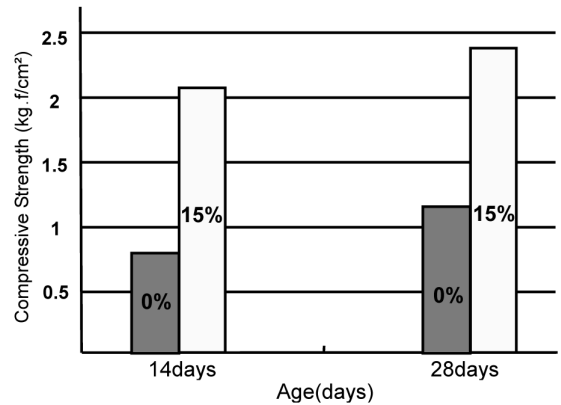


Fig. 9. Change of compressive strength according to Meta-kaolin (-325+400 mesh) 15% addition in lightweight porous concrete.

는 메타카올린의 입도가 작아짐에 따라 압축강도가 상승하는 경향이 있음을 확인 할 수가 있었으나 메타카올린의 입도가 (-400) mesh 범위로 작아졌을 때 양생 7일, 14일, 28일의 압축강도가 모두 떨어지는 것을 관찰할 수 있었는데 이 원인에 대해서는 좀 더 연구를 해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 9와 같이 압축강도가 가장 우수한 (-325+400) mesh 입도의 메타카올린을 첨가한 경우 메타카올린을 첨가하지 않은 경우와 비교하여 보면 압축강도가 거의 두 배 이상 크게 향상된 것을 확인할 수 있었다.

결 론

국내의 저품위 고령토의 새로운 시장의 개척과 부가가치향상을 위해 경제성이 높고 우수한 포졸란 혼화재로 사용하기 위한 연구결과는 다음과 같다.

1. 상온에서부터 1200℃까지 200℃ 간격으로 소성한 고령토를 시멘트모르타르에 5% 첨가하여 28일 양생의 압축강도를 측정할 결과 800℃에서 가장 우수하였다.
2. 시멘트모르타르에 800℃로 소성한 메타카올린을 첨가함에 따라 압축강도가 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 전반적으로 고려할 때 첨가량이 10~15% 정도가 적당한 것으로 사료된다. 특히 10% 첨가하였을 경우 3개월 이후의 장기강도는 물론 7일부터의 초기강도도 크게 향상되는 것을 확인할 수 있었다.
3. 경량기포콘크리트에 800℃로 소성한 메타카올린을 15%첨가하였을 때 압축강도가 가장 우수하였으며 메타카올린을 첨가하지 않은 경우와 비교하면 압축강도가 약 36% 정도 크게 향상되는 것을 확인할 수 있었다.
4. 15%의 메타카올린을 첨가하여 메타카올린의 입도에 따른 압축강도를 측정할 결과 (-325+400) mesh 입도의 메타카올린을 첨가한 경우 압축강도가 가장 우수하였으며 메타카올린을 첨가하지 않은 경우와 비교하면 두 배 이상 크게 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 김상배, 2000, *고령토의 건식 정제기술 개발 연구*, 박사학위 논문, 전북대학교, 전주.
대한건축학회, 2000, *건축재료*, 기문당, 서울, pp. 50-52.

- 산업자원부, 2007, “에너지자원 주요통계.”
이상수, 2003, “메타카올린을 사용한 콘크리트의 활용방안에 관한 연구,” *한국레미콘공업협회지*, 제 76호.
이상수, 2006, “메타카올린을 사용한 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구,” *대한건축 학회지*, 제 22권 5호.
이상호, 문한영, 2005, “metakaolin 혼합 고강도 콘크리트의 내구특성 예측,” *한국구조물학회지*, 제 9권 2호, pp. 173-180.
이효민, 2003, “콘크리트 성능 향상을 위한 광물 혼화제로서 메타카올린의 특성,” *한국광물학회지*, 제16권 1호, pp. 41-50.
C.S. Poon and S. Azhar, 2003, “Performance of metakaolin concrete at elevated temperatures,” *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25, pp. 83-89.
C.S. Poon and S.C. Kou, 2006, “Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete,” *Construction and Building Materials*, Vol. 20, pp. 858-865.
D.M. Roy and P. Arjunan, 2001, “Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1809-1813.
E. Badogiannis and V.G. Papadakis, 2004, “Exploitation of poor Greek kaolins: strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k-value,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 1035-1041.
E. Moulin and P. Blance, 2001, “Influence of key cement chemical parameters on the properties of metakaolin blended cements,” *Cement & Concrete Composites*, Vol. 23, pp. 463-469.
G. Batis and P. Pantazopoulou, 2005, “The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars,” *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 125-130.
Kim H.S. and Lee S.H., 2007, “Strength properties and durability aspects of high strength concrete using korean metakaolin,” *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 1229-1237.
H.S. Wong and H.A. Razak, 2006, “Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 696-702.
M. Singh and M. Garg, 2006, “Reactive pozzolana from Indian clay-their use in cement mortar,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1903-1907.



권 기 오

2006년 대학생 및 대학원생 에너지·자원
논문경진대회 우수상 수상
2007년 동아대학교 에너지·자원공학과
학사수료

현재 동아대학교 에너지·자원공학과 석사과정
(E-mail; kio7171@naver.com)



공 경 록

2004년 동아대학교 에너지·자원공학과
학사수료
2006년 동아대학교 에너지·자원공학과
석사수료

현재 동아대학교 에너지·자원공학과 박사과정, 서봉리사이클링
(주) 부설 환경시스템연구소 연구소장
(E-mail; moonrader@paran.com)



이 명 규

2006년 부산미래과학자상(국제신문) 장
려상 수상
2007년 동아대학교 에너지·자원공학과
학사수료

현재 동아대학교 에너지·자원공학과 석사과정
(E-mail; ccomsseil@nate.com)



강 현 찬

1999년 동아대학교 산학협력센터 소장
1999년 동아대학교 창업보육센터 소장
2000년 동아대학교 연구처장
2003년 동아대학교 환경문제연구소 소장

현재 동아대학교 에너지·자원공학과 교수
(E-mail; hckang@dau.ac.kr)