

메타카올린 및 실리카폼의 혼입이 고강도 콘크리트의 압축강도와 염소이온 투과에 미치는 영향에 관한 통계적 가설검증

The Statistical Hypothesis Verification to Influence of Addition of Metakaolin and Silica Fume on Compressive Strength and Chloride Ion Penetration of High Strength Concrete

민 정 옥¹⁾*

Min, Jeong Wook

Abstract

Metakaolin is a dehydroxylated form of the clay mineral kaolinite. Rocks that are rich in kaolinite are known as china clay or kaolin, traditionally used in the manufacture of porcelain. The particle size of metakaolin is smaller than cement particles, but not as fine as silica fume. This paper investigates the effect of the concrete containing metakaolin as a mineral admixture on the compressive strength and resistance properties to chloride ion penetration. In this study, the experiment was carried out to investigate and analyze the influence of replacement ratio of metakaolin and micro silica fume on the compressive strength and chlorine ion penetration resistance of concrete. All levels were water/binder ratio 30%, replacement ratio of metakaolin and silica fume were 0, 5, 10, 15, 20% respectively. The compressive strength of concrete using metakaolin tends to increase, as the replacement ratio increases but the chlorine ion penetration resistance was not so as lager as silica fume concrete. Therefore, the optimum mixing ratio of metakaoline to satisfy a properties of compressive strength and chlorine ion penetration resistance was was approximately 10%.

Keywords : Metakaolin, Silica fume, Hypothesis verification, RCPT, Mineral admixture

1. 서론

콘크리트 구조물의 내구성을 향상시키기 위한 방안 중 하나로 무기계 혼화재를 콘크리트용 혼화재로 사용하는 것은 이제 콘크리트공학 분야에서 보편적인 방법으로 인식되고 있다. 이러한 목적을 달성하기 위해 사용하는 혼화재로는 플라이애시, 실리카폼 및 고로슬래그 미분말, 메타카올린 등이 있으며 광물질 산업부산물에 관해서는 대단히 많은 연구결과가 발표되었으나 다른 혼화재에 비해 메타카올린에 관한 연구성과는 상대적으로 미흡한 실정이다.

시멘트-콘크리트에 적용할 수 있는 메타카올린은 카올린을 특수처리하여 제조하게 되어지므로, 카올린에 Meta- 라는 접두어를 붙인 것으로 고강도 콘크리트에 일반적으로 사용하는 실리카폼과 유사한 특성(박조범 등,

2008)을 나타내는 것으로 알려져 있다.

외국의 경우에도 메타카올린의 콘크리트용 혼화재로서의 가능성에 관해 연구하기 시작한 역사는 상당히 짧다. 메타카올린을 콘크리트 공학에 접목하기 시작한 것은 비교적 최근의 일로 1990년대에 들어 관련 문헌에 등장(Kpstuch et. al., 1993)하기 시작하는데, 고성능 콘크리트에서 포졸란계 마이크로 휠러로서의 가능성을 논하기 시작한 이래, 고반응성 포졸란 재료로서의 특성에 관한 논문이 발표되었으며, 2000년대 이후 여러 학자들(원종필 등, 2002)에 의해 메타카올린과 관련한 연구가 수행되었다. 최근 국내에서도 콘크리트용 혼화재로서의 메타카올린의 가능성에 대한 연구가 진행되고 있는데, 최근의 연구에서는 폐콘크리트 순환골재와 메타카올린을 이용한 콘크리트의 특성에 관한 연구(박승범 등, 2009) (문한영 등, 2005) 결과가 발표되기도 하였다.

1) 정회원, 충남대학교 건설공학교육과 겸임교수

* Corresponding author : jeywmin@naver.com 031-658-0615

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2011년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

메타카올린의 원료는 풍화잔류형 광산에 분포하며, 국내에서는 서부 경남지역에 총 매장량의 40% 정도가 집중되어 분포하고 있다. 국내에 풍부한 카올린 재료를 이용하여 메타카올린의 제조가 가능하므로 재료의 입수나 경제성 측면에서 상당한 장점을 가지고 있을 뿐만 아니라, 공학적 특성 역시 우수하며, 콘크리트의 내구성 개선에 관한 효과나 알칼리 골재반응 억제에 관한 현저한 효과가 있음이 보고되었다.

따라서 메타카올린은 실리카폼의 대응으로서 콘크리트의 내구성을 개선시키고 동시에 경제적인 효과의 개선을 기대할 수 있는 새로운 혼화재로서의 가능성이 크므로 이에 대한 연구의 필요가 절실한 상황이다.

한편 고강도 및 고성능 콘크리트 제조에서 주로 이용되는 실리카폼은 여러 가지로 콘크리트의 성능개선에 기여함은 익히 알려져 있으며, 특히 강도 및 화학적 내구성 등이 우수한 특성을 가지고 있는 재료이다. 그러나 이러한 우수한 공학적 특성에도 불구하고 대부분의 양을 해외에서 수입하며, 그 수입 가격 역시 다른 혼화재에 비해 상대적으로 고가이므로 콘크리트의 제조원가를 상승시키는 혼화재라는 근본적인 단점을 가지고 있으므로, 본 연구에서는 실리카폼의 대체재로서의 메타카올린의 가능성을 검토하였다.

2. 분산분석과 통계적 가설검증

2.1 분산분석

2.1.1 개요

분산분석이란 3개 이상의 집단들의 평균들 간에 통계적으로 유의한 차이가 있는가를 검증할 수 있는 기본적인 통계분석 기법으로, 어떤 인자에 의하여 집단들 간에 서로 다른 특성이 있는가를 밝혀볼 수 있는 분석기법이다. 분산분석은 콘크리트에 사용한 혼화재의 종류에 의해 콘크리트의 내구성이 영향을 받는지를 알아보는 경우 등에 적용할 수 있다.

2.1.2 분산분석의 원리(F-분포)

비교하려 하는 집단들의 평균이 같다고 할 수 있는가를 알아보기 위해서는 각 집단들로부터 표본을 얻고 그 표본들의 표본평균 값들이 얼마나 큰 차이가 나는지를 구해보면 될 것이다. 얻어진 표본평균의 값들이 비슷하면 모집

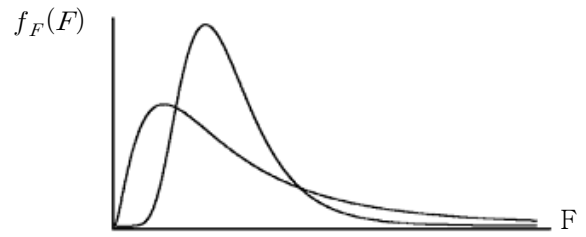


Fig. 1 Some Types of F-Distributions

단들의 평균들은 같다고 할 것이고, 크게 차이가 나면 모 집단들의 평균들이 모두 같다고 할 수는 없을 것이다. 이러한 분산분석의 문제를 해결하기 위한 전제조건은, 집단들이 서로 독립이고 각 집단에서 자료들은 정규분포하며, 일정한 분산을 갖는다는 것이다.

F분포는 두 가지 추정치들의 단위가 상쇄되어 단위를 갖지 않는다. 또한, 모집단의 분산들이 같다는 가정 하에서 얻어진 분산의 추정치(그룹내 분산)에 비해 표본평균들의 값들이 얼마나 떨어져 있는가로부터 얻어진 그룹간 분산이 크면 클수록 모집단의 평균들이 같지 않다는 것을 의미하는 것이므로(기각) F는 분산분석을 수행하기 위한 적절한 검증 통계량이다. F분포는 χ^2 (카이제곱)분포하는 변수들로서 얻어지는데 다음의 식 (1)과 같다.

$$F = \frac{\chi_1^2/d_1}{\chi_2^2/d_2} \sim F(d_1, d_2) \quad (1)$$

즉, 카이제곱분포하는 변수(χ_1^2)를 그의 자유도(d_1)로 나눈 것과 χ_2^2 과 독립이면서 카이제곱분포하는 다른 변수(χ_2^2)를 그의 자유도(d_2)로 나눈 것의 비율을 F라고 할 때, 이 F는 F-분포하는 변수가 된다. 그리고 F-분포는 자유도를 두 개 갖는데, 두 개의 순서는 분자의 자유도(d_1)와 분모의 자유도(d_2) 순서이다. 몇 개의 F-분포 형태는 다음의 Fig. 1과 같다.

2.1.3 일원 분산분석(ANOVA)의 적용 예

본 연구에서 1개의 기준에 대한 3개 이상의 변수 간의 동질성을 파악하기 위해 ANOVA를 이용한다. 다음의 Table 1은 T 검증과 F 검증의 적용에 관한 내용으로, 독립변인이 1개이고 집단의 수가 2개일 경우 T 검증을 적용하며, 이를 쌍체 비교라고 한다. 변량분석은 F 검증이라고 하며 독립변인이 1개 혹은 그 이상이며 집단의 수가

Table 1 Comparison to T-test and Variation Analysis

		Variable	Groups	Formula
T-test		1	2	t-value
Variation Analysis	One-way	1	more than 2	F-value
	ANOVA	more than 2		

2 이상인 경우에 적용한다.

2.1.4 T검증

t검증은 두 표본평균간의 차이를 기초로 하여 두 집단 평균 간의 차이를 검증하는 데 사용되는 방법으로, 독립적 t-test와 paired t-test가 있다.

2.2 통계적 가설검증

2.2.1 가설검증 요령

가설검증은 표본통계량을 이용한 모집단 설명형식의 한 방법으로 가설이란 실증적인 증명단계 이전의 잠정적인 언명 또는 진술이다. 따라서 가설 설정은 확신에 근거를 두고 이루어지는 것이 아니며, 논리적으로 검증될 수 있는 명제(preposition)를 제시하는 것이다.

2.2.2 귀무가설과 대립가설의 설정

연구과정에서 검증대상이 되는 귀무가설과 이 귀무가설을 받아들일 수 없을 때야 비로소 받아들이는 대립가설이 있다. 즉, 대립가설은 검증대상이 아니고, 다만 귀무가설을 기각할 때에 한하여 받아들여지는 가설일 뿐 흔히 귀무가설을 기각($p < 0.05$)해야만 연구자가 주장하려는 연구가설을 내세울 수 있다.

2.2.3 유의 수준(α)

가설 검증에서는 유의수준을 통상 α 로 표시하는데 일반적으로, 유의수준이란 귀무가설을 기각할 확률의 크기를 의미하며 흔히 $\alpha = 0.05$, 또는 $\alpha = 0.01$ 로 정하여 사용하는 경우가 많다. 다음의 Fig. 2는 가설검증을 하기 위한 유의수준의 설정시 연구자가 고려해야 할 개념이다.

Fig. 2에서 나타낸 것처럼 유의수준을 너무 크게($\alpha > 0.05$) 하면 귀무가설을 기각할 확률이 너무 커져, 결국 대립(연구)가설을 너무 쉽게 인정하게 되는 false-positive(1종오차)를 범할 수 있다. 반대로 너무 작게 하면($\alpha < 0.01$) 귀무가설을 선택할 확률이 커져 연구가설이 옳은 데도 불구하고 부정해 버리는 false-negative(2종

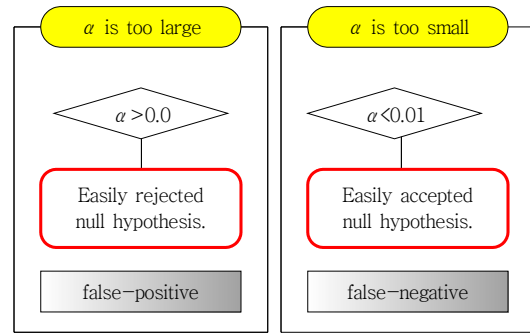


Fig. 2 Application of Significance Level in Test of Hypothesis

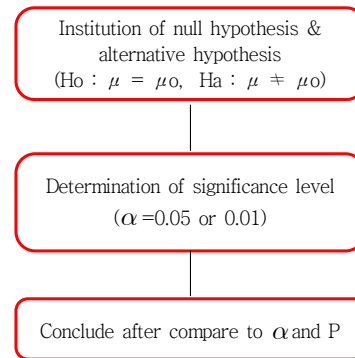


Fig. 3 Procedure of Testing of Statistical Hypothesis

오차)를 범할 수 있다. 또한 유의수준은 임의로 정할수 있는 수준이지, 반드시 0.05나 0.01로 정해야 하는 것은 아니며, 제1종 오차나 제2종 오차를 줄이는 수준으로 정하여 사용하는 것이다.

2.2.4 가설검증의 순서

가설검증은 일반적으로 Fig. 3과 같은 절차에 의해 이루어진다.

3. 실험계획 및 실험방법

3.1 실험계획

본 연구에서 시뮬레이션 하려는 대상은 콘크리트 표준시방서 규정상 고강도 영역의 콘크리트에 해당하는 설계 기준강도 40MPa 이상의 압축강도를 가진 콘크리트로, 이러한 고강도 콘크리트의 제조 및 시공에는 무기계 혼화재로 실리카폼의 사용이 거의 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 전술한 메타카올린이 고가의 실리카폼의 대체재로서의 가능성이 있는지를 평가하기 위해, 실리카폼과 메타카올린을 각각 혼입한 배합변수를 상호 비교하였다.

Table 2 Experimental Programs

Items	Program
W/B (%)	30%
S/a (%)	37%
Mineral Admixtures	Micro silica fume Metakaolin
Replacement (%)	0, 5, 10, 15, 20
Age(days)	3, 7, 14, 28, 56
Test	Compressive strength Chloride ion penetration
Data Analysis	Statistical hypothesis T verification

Table 3 Chemical compositions and physical properties

Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	
1.72	20.82	4.87	3.26	63.32	3.71	2.16	
Density (g/cm ³)	Surface area (cm ² /g)	Sound. (%)	Setting Time		Compressive Strength (MPa)		
			initial (min)	final (hour)	3day	7day	28day
3.15	3360	0.1	196	05:26	20	29	37

메타카올린 및 실리카폼을 혼입한 콘크리트의 강도특성 및 염소이온 투과저항성에 관한 기초 특성을 파악하기 위한 본 연구의 실험계획은 Table 2와 같다.

물-결합재비는 모든 배합수준에서 30%로 고정하였고, 잔골재율은 37%로 고정하였다. 배합수준은 플레인 콘크리트, 메타카올린 치환율 0, 5, 10, 15, 20%인 배합수준, 실리카폼 치환율 0, 5, 10, 15, 20%인 배합수준으로 구성하였다.

3.2 사용 재료

3.2.1 시멘트

본 연구에 사용한 시멘트는 국내 S사 제품의 제 1종 보통포틀랜드 시멘트로 KS L 5201을 만족하며 KS L 5120에 의해 분석한 시멘트의 화학조성 및 물리적 성분은 Table 3과 같다.

3.2.2 골재

본 연구에 사용한 잔골재는 천연 잔골재로 KS F 2502에 의한 체가름 시험 결과, 모두 표준규격을 벗어나지 않음을 확인할 수 있어 조립률의 범위 및 입도분포 곡선의 입도범위를 각각 만족함을 확인하였다. 사용한 굵은골재는 최대치수 19mm인 쇄석으로, 사용 재료의 물리적 성

Table 4 Physical properties of fine aggregate

Density (g/cm ³)	Absor. (%)	F.M.	Sound. (%)	Organic Impurities (%)
2.60	1.2	2.83	3.8	below Standards

Table 5 Physical properties of coarse aggregate

F.M.	Density (g/cm ³)	Absor. (%)	Unit. mass (kg/m ³)	Sound. (%)	Abras. (%)
6.80	2.65	1.50	1.74	4.61	19.1

Table 6 Physical properties and chemical compositions of silica fume

Physical properties					
density (g/cm ³)	Surface area BET (cm ² /g)	Ig. loss (%)	moisture content (%)		
2.30	220,000	1.3	0.19		
Chemical compositions					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
92.6	0.7	1.7	0.3	1.0	0.15

Table 7 Chemical compositions and physical properties

Density (g/cm ³)	Surface Area (cm ² /g)	Chemical Composition					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂
2.61	12,000	57.2	38.6	2.7	2.5	0.6	0.2

질은 다음의 Table 4 및 5와 같다.

3.2.3 실리카폼

콘크리트용 혼화제로 사용하는 실리카폼은 밀도가 작아 질량에 비해 부피가 커서 슬러리(slurry)상으로 공급되기도 하는데, 본 연구에서는 파우더상으로 공급되는 노르웨이 E사의 실리카폼을 사용하였고, 사용 재료의 화학적 성질 및 물리적 성질은 Table 6과 같다.

3.2.4 메타카올린

메타카올린의 원료인 카올린 광물은 과거 세라믹 시장에서 주로 사용하였으나 최근에는 각종 산업분야에서 우수한 기능이 입증됨에 따라 사용범위가 점차 확대되고 있는 추세로, 본 실험에서 사용한 메타카올린의 물성은 다음의 Table 7과 같다.

3.2.5 고유동화제

본 실험에서 사용한 혼화제는 고성능 유동화제로서 국내 K사 제품으로 ASTM C494의 규정에 따른 것으로,

Table 8 Fundamental mixing-proportions

Levels	W/B (%)	Unit Weight (kg/m ³)					
		C	MK	SF	W	S	G
OPC	30%	540	0	0	162	641	1113
MK5	30%	513	27	0	162	640	1110
MK10	30%	486	54	0	162	638	1107
MK15	30%	459	81	0	162	636	1104
MK20	30%	432	108	0	162	634	1101
SF5	30%	513	0	27	162	638	1108
SF10	30%	486	0	54	162	635	1102
SF15	30%	459	0	81	162	632	1097
SF20	30%	432	0	108	162	629	1092

암갈색 색상의 액상으로 밀도가 1.20 ± 0.05 (20°C), pH의 범위는 9.0 ± 3.0 이며 주성분은 나프탈렌 축합물 및 특수 계면활성제이다.

3.3 배 합

물-결합재비와 잔골재율(S/a)을 각각 30%와 37%로 고정하여 콘크리트를 배합하였다. 물-결합재비가 낮은 고강도 배합이므로 유동성을 확보하기 위해 고유동화제를 후첨가하여 배합을 실시하였다. 콘크리트는 실험실에서 강제식 믹서를 사용하여 배합을 실시하였으며, 공시체는 상대습도 50%의 양생실에서 1일 양생후 항온조건으로 수중양생을 실시하였다.

여기서, C : 단위 시멘트량 (kg/m³), MK : 단위 메타카올린량(kg/m³), SF : 단위 실리카폼량(kg/m³), W : 단위 수량(kg/m³), S : 단위 잔골재량(kg/m³), G : 단위 굵은 골재량(kg/m³)

3.4 실험방법

3.4.1 압축강도 시험

콘크리트 압축강도는 직경 $\phi 100 \times 200$ mm 공시체를 제작하여 1일 후 탈형하였으며, KS 규정에 적합한 항온양생수조에서 표준양생을 실시하여 재령 3일, 7일, 14일, 28일 및 56일에서 KS F 2405에 의하여 측정하였다. 제작한 공시체는 실험 전까지 규정 온도의 범위를 만족하는 항온수조에 수중양생을 시킨 후 최대용량 200t의 강도시험기로 시험재령에서 동일 시편 9개씩에 대해 강도시험을 실시하였다. 시험시 압축강도 시험기의 가력 속도는 응력도의 증가율이 매초 0.6 ± 0.4 MPa이 되도록 하였다.

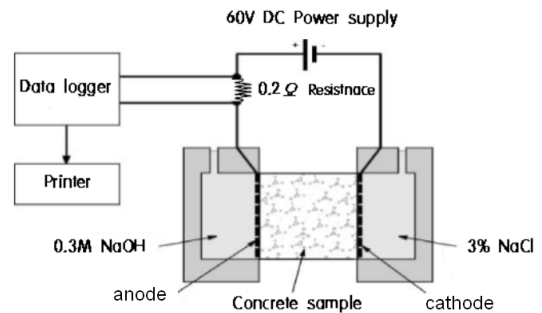


Fig. 4 Electrical block diagram for chloride permeability test

3.4.2 염소이온 투과시험

콘크리트에 대한 염소이온 투과시험의 종류는 약 10여 가지 방법이나 되며 각각의 장단점이 있지만 본 연구에서는 촉진시험의 대표적인 방법인 ASTM C 1202에 의한 염소이온 투과시험을 이용하였다. 염소이온 투과시험은 재령 56일에서 동일 배합수준별로 5개의 공시체에 대해 실시한 평균값을 이용하였다. Fig. 4는 투수실험 전의 공시체 준비 장치를 모식도로 나타낸 것이다.

실험 중 30분마다 0.2Ω에 걸리는 전압을 일본 T사의 Data logger로 측정하여 기록하였으며, 사용한 데이터로거는 전압측정이 0.1mV까지 가능한 성능을 가졌고, ± 0.1%의 정도를 가진 장치이다. 측정된 전압값은 다음 식에 의하여 전류치로 환산한다.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{0.2} \quad (2)$$

I : 전류(암페어, A), V : 전압(volts, V), R : 저항(ohms, Ω)

염소이온 침투저항성은 30분 간격으로 6시간 동안 측정한 전류를 전하량으로 환산하여 다음의 식 (3)으로 총 통과전하량을 산출하였다.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3)$$

Q : 총통과전하량(Coulombs), I_n : n분 경과 후의 전류(ampere)

본 연구에서 사용한 공시체는 압축강도 시험용 공시체와 단면이 같은 직경이 100mm로 표준 직경 95mm가 아니므로 계산된 통과 전하량은 다음의 식 (4)에 의해 수정

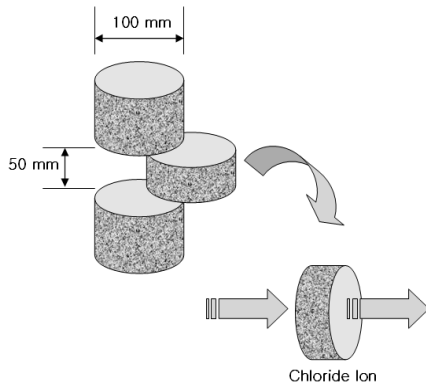


Fig. 5 Diagram of RCPT Specimen

Table 9 Chloride permeability based on charge passed

Charge passed (Coulombs)	Permeability Rating	Typical of
> 4000	High	High W/C ratio(>0.60) conventional PCC
2000-4000	Moderate	Moderate W/C ratio (0.4-0.5) conventional PCC
1000-2000	Low	Low W/C ratio(<0.40) conventional PCC
100-1000	Very Low	Latex-modified concrete or internally-sealed concrete
< 100	Negligible	Polymer-impregnated or Polymer concrete

하였고, 공시체의 구성은 Fig. 5와 같다.

$$Q'_s = Q_s \times \left(\frac{95}{x}\right)^2 \quad (4)$$

Q'_s : 직경 95mm 시험편에 대한 통과 전하량, Q_s : 직경 x mm 시험편에 대한 통과 전하량, x 는 비표준 시험편의 직경(mm)

실험결과는 다음 ASTM의 기준처럼 다음의 Table 9와 같이 등급별로 구분하여 투수정도를 추정한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 압축강도

물-결합재비를 30%로 고정하고 메타카올린의 혼입률을 0, 5, 10, 15, 20%로 변화시킨 재령별 압축강도 시험 결과는 Fig. 6과 같고, 실리카폼의 혼입률을 0, 5, 10, 15, 20%로 변화시킨 배합수준별 재령별 압축강도 시험

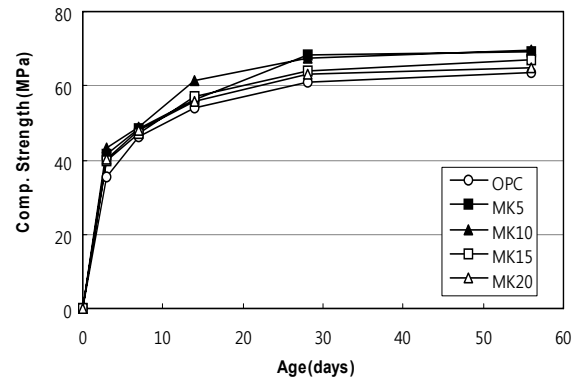


Fig. 6 Test results of compressive strength using metakaolin as admixture

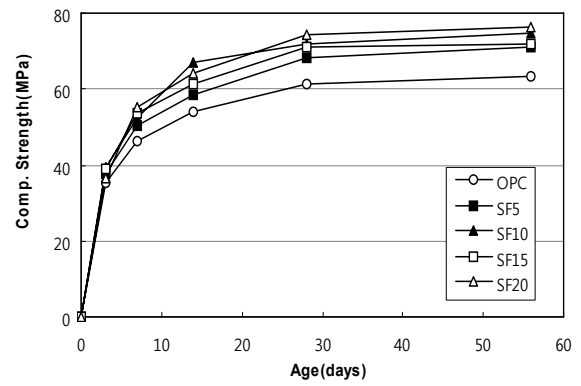


Fig. 7 Test results of compressive strength using silica fume as admixture

결과는 Fig. 7과 같다.

본 실험에서는 메타카올린 혼입률 10%까지는 압축강도가 증가하는 경향이 관찰되었으나 혼입률 15% 이상에서는 강도증가율이 다소 저하하는 것으로 나타났다. 또한 20%에서는 오히려 기준 콘크리트와 비슷한 강도특성을 보였다. 이는 메타카올린을 혼입한 콘크리트의 재령이 증가함에 따라 시멘트 수화물과의 포졸란 반응에 기인한 결과로 판단된다.

다음의 Fig. 8 내지 Fig. 11은 메타카올린과 실리카폼을 각각 5, 10, 15, 20% 혼입한 배합수준별 비교 그래프이다. 상기의 Fig. 5는 배합수준 OPC와 MK5, SF5의 재령별 강도발현 그래프이다. 그림에서 처럼 MK5와 SF5는 매우 유사한 강도발현 거동을 보이고 있다. Fig. 6은 혼화재 혼입률이 각각 10%인 배합변수 MK10과 SF10의 비교 그래프이다.

Fig. 9에서 그래프를 단순 비교하면 SF10이 MK10보다 강도증진에 크게 기여하는 것처럼 보이지만, 후술한 분산을 고려한 통계처리 결과에 의하면 “두 변수간의 압

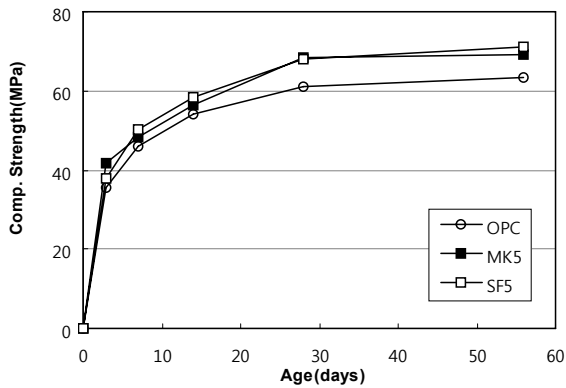


Fig. 8 Compressive strength in replacement 5%

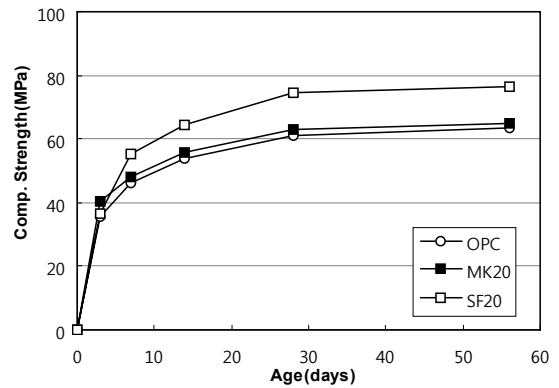


Fig. 11 Compressive strength in replacement 20%

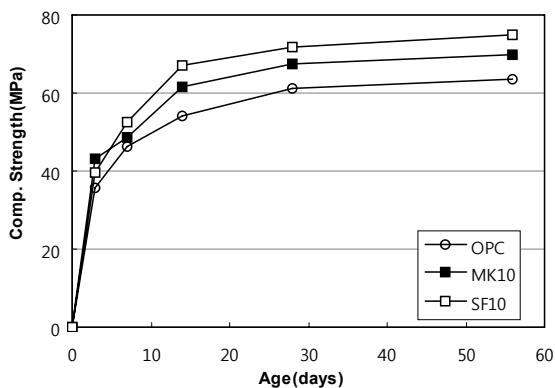


Fig. 9 Compressive strength in replacement 10%

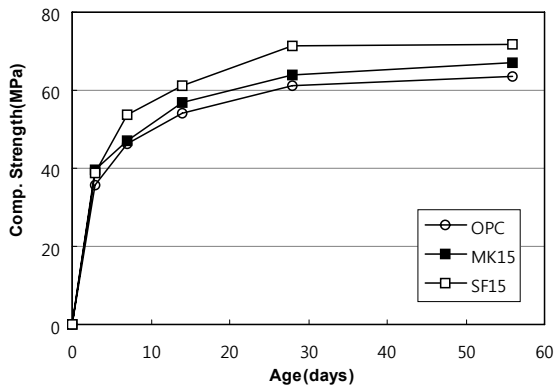


Fig. 10 Compressive strength in replacement 15%

축강도 발현특성이 같다”는 귀무가설이 채택되어, 유의수준 하에서는 거의 동일한 결과를 나타내고 있음을 확인하였다.

재령 28일에서의 메타카올린 및 실리카폼 혼입 콘크리트의 압축강도 시험결과를 분산을 고려하여 프로그래밍한 쌍체검증(김희갑, 2007)(T 검증) 결과는 Table 10 및 Table 11과 같다.

메타카올린과 실리카폼의 혼입률이 각각 5, 10, 15,

Table 10 Results of T-test at 28days(5%, 10%) ($\alpha=0.05$)

Statistics	Level	MK5	SF5	MK10	SF10
Average		68.379	68.1005	67.3239	71.8948
Variation		44.2448	9.65616	28.6909	20.091
Measured Data		9	9	9	9
Correlation Coefficient		0.38668		-0.3001	
Difference Average of Hypotheses		0		0	
Degree of Freedom		8		8	
t Statistics		0.1357		-1.725	
P(T<=t) one-tailed test		0.4477		0.0614	
t Reject one-tailed test		1.85955		1.85955	
P(T<=t) two-tailed test		0.89541		0.12281	
t Reject two-tailed test		2.30601		2.30601	

Table 11 Results of T-test at 28days(15%, 20%) ($\alpha=0.05$)

Statistics	Level	MK15	SF15	MK20	SF20
Average		70.075	71.242	69.357	74.489
Variation		23.244	73.534	25.236	58.661
Measured Data		9	9	9	9
Correlation Coefficient		-0.3595		-0.505	
Difference Average of Hypotheses		0		0	
Degree of Freedom		8		8	
t Statistics		-0.3111		-1.3895	
P(T<=t) one-tailed test		0.38184		0.10106	
t Reject one-tailed test		1.85955		1.85955	
P(T<=t) two-tailed test		0.76369		0.20212	
t Reject two-tailed test		2.30601		2.30601	

20%인 배합수준에서 상호비교한 결과 귀무가설이 모두 채택되어 동일한 혼입률에서 변수를 고려할 경우 통계적으로 유사한 압축강도 발현이 나타나고 있다고 판단된다.

재령 56일 압축강도에 대한 T검증 분석결과는 다음의

Table 12 Results of T-test at 56days(5%, 10%) ($\alpha=0.05$)

Statistics \ Level	MK5	SF5	MK10	SF10
Average	69.0988	71.1429	69.8137	74.8375
Variation	22.6269	32.154	41.0301	62.4357
Measured Data	9	9	9	9
Correlation Coefficient	-0.227		-0.6905	
Difference Average of Hypotheses	0		0	
Degree of Freedom	8		8	
t Statistics	-0.749		-1.1447	
P(T<t) one-tailed test	0.23764		0.14272	
t Reject one-tailed test	1.85955		1.85955	
P(T<t) two-tailed test	0.47529		0.28544	
t Reject two-tailed test	2.30601		2.30601	

Table 13 Results of T-test at 56days(15%, 20%) ($\alpha=0.05$)

Statistics \ Level	MK15	SF15	MK20	SF20
Average	70.2841	71.953	72.447	76.265
Variation	30.791	96.340	87.691	63.281
Measured Data	9	9	9	9
Correlation Coefficient	-0.1462		-0.1564	
Difference Average of Hypotheses	0		0	
Degree of Freedom	8		8	
t Statistics	-0.4188		-0.8677	
P(T<t) one-tailed test	0.3432		0.20542	
t Reject one-tailed test	1.85955		1.85955	
P(T<t) two-tailed test	0.6864		0.41083	
t Reject two-tailed test	2.30601		2.30601	

Table 12 및 13에 나타내었다. 채령 56에서도 모든 배합 수준에 있어 귀무가설이 채택되어 메타카올린이 실리카폼과 유사한 압축강도 발현 특성을 가지고 있음을 확인하였다.

본 실험결과, 메타카올린을 혼화제로 사용한 경우 혼입률 5% 이상에서 통계적으로 기준 콘크리트에 비하여 강도증진이 매우 우수하다는 것을 알 수 있었고, 실리카폼과 매우 유사한 강도발현 특성을 보이고 있으므로 압축강도 측면만 놓고 본다면 향후 고강도 및 초고강도 콘크리트용 결합재로서의 활용성이 증대될 것으로 기대된다.

그러나 여러 종류의 광물질 혼화재를 병용하여 사용하는 경우에 있어서는 추가적인 연구가 요망되며, 각 혼화재의 압축강도 발현 특성을 면밀하게 고려하여 최적배합을 선정하는 것이 바람직 할 것이다.

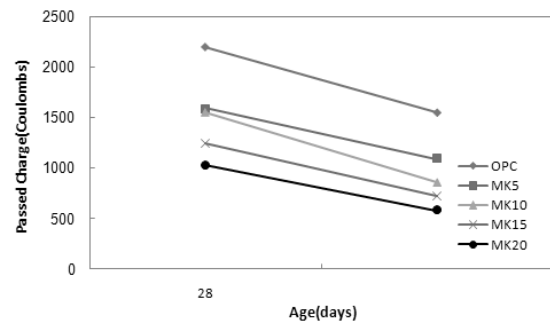


Fig. 12 Total passed charge containing metakaolin

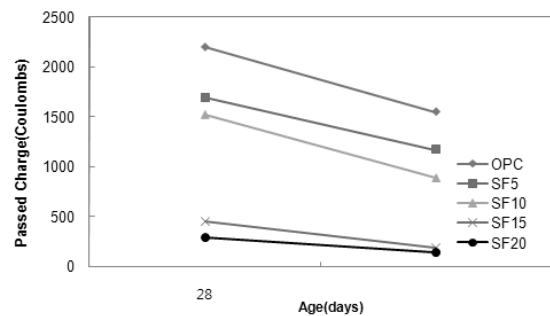


Fig. 13 Total passed charge containing silica fume

Table 14 Test Results of RCPT at 56days

Levels \ Items	Total Passed Charge (Coulombs)	Standard Deviation (Coulombs)	Coefficient of Variation
OPC	1550	406.5587	0.262296
MK5	1090	198.5661	0.182171
MK10	860	205.7972	0.239299
MK15	720	265.9652	0.369396
MK20	580	216.8029	0.373798
SF5	1170	314.6172	0.268904
SF10	890	326.6022	0.366969
SF15	190	66.54698	0.350247
SF20	140	46.48118	0.332008

4.2 염소이온투과 시험

메타카올린 혼입 콘크리트와 실리카폼 혼입 콘크리트의 염소이온 투과저항성을 비교 평가하기 위한 실험결과 다음의 Fig. 12, 13 및 Table 14와 같은 결과를 얻었다.

여기서, Table 14는 분산분석을 하기 위해 채령 56일에서의 총투과 전하량과 표준편차 및 변동계수에 관한 계측 데이터이다. 염소이온 투과시험 결과 Table 14에서 처럼 배합수준별 염소이온 투과시험의 변동계수는 18~37%에 달하는 큰 편차를 보이고 있어 시험방법의 낮은 신뢰성을 보여준다고 하겠다. 그러나 이 정도의 편차는

Table 15 Classification by ASTM C 1202

Passed charge (Coulombs)	Classification	Levels	
		28days	56days
> 4000	High	-	-
2000 ~ 4000	Moderate	OPC	-
1000 ~ 2000	Low	MK5, MK10, MK20, SF5, SF10	OPC, MK5, SF5
100 ~ 1000	Very Low	SF15, SF20	MK10, MK15, SF10, SF15, SF20
< 100	Negligible	-	-

Table 16 Results of T-test at 56days(5%, 10%) ($\alpha=0.05$)

Statistics	Level	MK5	SF5	MK10	SF10
		Average	1090	1170	860
Variation		39428.5	98984	42352.5	106669
Measured Data		5	5	5	5
Correlation Coefficient		-0.3038		-0.6818	
Difference Average of Hypotheses		0		0	
Degree of Freedom		4		4	
t Statistics		-0.4259		-0.1367	
P(T<t) one-tailed test		0.34603		0.44892	
t Reject one-tailed test		2.131846		2.13185	
P(T<t) two-tailed test		0.69206		0.89784	
t Reject two-tailed test		2.77645		2.77645	

동일한 실험조건에서 정밀하게 시험을 실시할 경우에도 거의 필연적으로 나타나는 것으로 기존의 선행 연구(민정옥 등, 2008)에서도 염소이온 투과시험의 낮은 신뢰성에 관해 논하고 있다.

다음의 Table 15는 ASTM C 1202에 의해 각 배합수준별로 투수등급을 분류한 것이다. 재령 56일에 이르러 MK10, MK15, SF10, SF15, SF20은 투수등급이 “very low”에 해당하고 있다.

Table 16 및 17은 메타카올린과 실리카폼의 혼입률이 동일한 경우 염소이온 투과저항성의 차이를 비교하기 위해 재령 56일에서 T검증에 의해 분산분석한 결과표이다. 혼입률이 5%인 경우 통계량의 기각치는 2.77645인데 쌍체비교에 의한 t 통계량은 절대값으로 0.4259가 되어 귀무가설이 채택되었고, 혼입률 10%에서도 동일한 방법으로 귀무가설이 채택되어 메타카올린 혼입률 5, 10%인 배합수준에서는 염소이온 투과저항이 실리카폼과 거의 대등한 효과를 보임을 통계적으로 확인하였다.

그러나 혼입률이 15, 20%인 배합수준에서는 Table

Table 17 Results of T-test at 56days(15%, 20%) ($\alpha=0.05$)

Statistics	Level	MK15	SF15	MK20	SF20
		Average	720	190	580
Variation		70737.5	4428.5	47003.5	2160.5
Measured Data		5	5	5	5
Correlation Coefficient		0.26257		-0.65876	
Difference Average of Hypotheses		0		0	
Degree of Freedom		4		4	
t Statistics		4.61756		3.93733	
P(T<t) one-tailed test		0.00495		0.00849	
t Reject one-tailed test		2.13185		2.131846	
P(T<t) two-tailed test		0.0099		0.01699	
t Reject two-tailed test		2.77645		2.776451	

17에서 처럼 모두 귀무가설이 기각되어 메타카올린의 염소이온 투과저항성이 실리카폼에 비해 떨어진다는 결론을 얻을 수 있었다.

5. 결론

콘크리트용 혼화제로서 메타카올린의 혼입이 콘크리트의 압축강도 및 염소이온 투과 저항성에 미치는 영향을 실리카폼 혼입 콘크리트와 비교 연구하였다. 연구 결과 메타카올린은 실리카폼을 대체할 혼화제로서의 가능성이 크지만, 굳지 않은 콘크리트의 성상 중 유동성 저하가 단점이 되어 혼화제의 사용이 필수적임을 확인하였으며, 압축강도와 염소이온 투과저항성에 미치는 영향을 통계적 가설검증 방법에 의해 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 메타카올린을 혼입한 콘크리트의 압축강도는 혼입률 10%까지는 증가하였고, 15% 부터는 증가율이 둔화하는 것으로 나타났다. 따라서, 적정량의 메타카올린을 사용할 경우 실리카폼의 압축강도와 유사하게 발현됨을 확인하였다.
- 2) 메타카올린을 콘크리트용 혼화제로 사용할 경우 콘크리트의 초기강도가 크므로 초기강도가 낮은 고로슬래그 미분말이나 플라이애시와 병용하여 사용할 경우 초기강도의 상쇄를 가능하게 할 것으로 판단된다.
- 3) 염소이온 투과저항성에 대한 비교평가 결과, 혼입률 5%, 10%까지는 메타카올린이나 실리카폼이 유의

수준 5%에서는 동일한 저항성을 보이는 것으로 나타났으나, 혼입률 15%, 20%에 이르러서는 메타카올린 혼입 콘크리트의 염소이온 투과저항성이 불리한 것으로 나타났다. 그러나 이 경우에도 기준 콘크리트보다는 염소이온 투과저항성이 우수한 것으로 나타났다.

- 4) 메타카올린 혼입률 10% 정도까지는 실리카폼의 성능을 대체할 수 있는 공학적 성능을 가지는 것으로 나타났다.

아직은 국내에서 메타카올린을 활용한 콘크리트의 공학적 특성에 관한 연구가 많이 진행되지 않았으나, 메타카올린은 플라이애시, 고로슬래그 미분말과 같은 산업부산물에 비해 상대적으로 균질한 상태로 입수가 가능하므로 이를 적극적으로 활용할 필요성이 크다. 향후 메타카올린에 관한 심층적인 연구를 통해 고강도 콘크리트, 고성능 콘크리트, 프리캐스트 구조체, 특수 시멘트 및 보수보강 모르타르 등의 영역에서도 적극적인 활용이 기대된다. 다만, 메타카올린은 실리카폼과 구성성분 및 반응이 다르며, 필러효과 역시 다르므로 전혀 다른 혼화제로 분류할 수 있으므로, 본 연구에서는 압축강도 특성과 염소이온 투과저항성의 상호 비교로 연구 범위를 국한하였음을 다시 한 번 밝힌다.

참고문헌

1. 김희갑, 김영주, "환경통계학", 동화기술, 2007, pp.108.
2. 문한영, 김양배, 문대중, "메타카올린을 혼합한 재생골재 콘크리트의 역학적 특성 및 동결융해 저항성", 한국구조물진단학회지, Vol.9 No.4, 2005, pp. 270-278.
3. 민정욱, 박승범, 김윤용, "광물질 산업부산물을 혼입한 콘크리트의 염소이온 투과저항성 개선에 관한 실험적 연구", 한국폐기물학회지, 제24권 제 8호, 2007, pp.677-688.
4. 민정욱, 박승범, 윤의식, "국내산 고로슬래그 미분말의 품질이 콘크리트의 압축강도와 중성화에 미치는 영향에 관한 연구", 한국폐기물학회지, 제25권, 제2호, 2008, pp.91-99.
5. 민정욱, 박승범, 이준, 이병재, "단일 집단의 모평균 검정에 의한 콘크리트의 염소이온 투과시험의 신뢰성 평가", 한국폐기물학회 2008년도 봄 학술발표회 논문집, 2008, pp.553-556.

6. 박승범, 장영일, 이병재, "폐콘크리트 순환골재와 메타카올린을 이용한 콘크리트의 역학적 특성 및 내동해성에 관한 실험적 연구", 한국폐기물학회지 제26권 제3호, 2009, pp.191-198.
7. 박조범, 김호수, 전준영, 김은겸, 류득현, "실리카폼과 메타카올린을 사용한 다성분계 고강도콘크리트의 특성", 한국콘크리트학회지, Vol. 20, No. 3, 2008, pp.307-315.
8. 안태호, 김용태, 김병기, "시멘트-콘크리트 혼화재료로서의 메타카올린 응용 가능성", 한국콘크리트학회지 제 14권 4호, 2002, pp.118-127.
9. 원종필, 권영성, 이준자 : 고반응성 메타카올린을 사용한 고성능 콘크리트의 특성, 한국콘크리트학회지, Vol.14, No.3, 2002, pp.349-356.
10. 이효민, 전쌍순, 황진연, 진치섭, 윤지혜, 옥수석, "메타카올린의 포조란 효과에 의한 콘크리트 내 알칼리-실리카 반응 억제 효과", 한국광물학회지, Vol.17 No.3, 2004, pp.277-288.
11. 정영해, 김광수, 조지현, 류재복, "EXCEL 통계자료분석", 한국사회조사연구소, 2008, pp.159.
12. KS F 2405, "콘크리트의 압축강도 시험방법", 산업자원부 기술표준원, 2005.
13. ASTM C1202-97, "Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", ASTM, Philadelphia, PA.
14. Caldarone, M. A., Gruber, K. A. : High-reactivity Metakaolin : A New Generation Mineral Admixture", Concrete International Formwork, Vol. 16., No.11. 19994, pp.37-40.
15. Curcio, F., Deangelis, B. A. and Pagliolico, S., "Metakaolin as A Pozzolan Microfiller for High performance Mortars" Cement and Concrete Research, No. 28, 1998, pp.803-804.
16. Kpstuch, J.A., Walters, V. and Jones, T.R., "High Performance Concrete Incorporating Metakaolin, A Review"; Proceeding of Concrete 2000, Dundee, UK, 1993, pp.1799-1811.
17. Ryle, R. : Metakaolin - A highly reactive pozzolan for concrete, Quarry Management, Vol.26 No.12, 1999, pp. 27-32.
18. Wong, H. S. and Razak, H. Abdul, "Efficiency of Calcined Kaolin and Silica Fume as Cement Replacement Material for Strength Performance," Cement and Concrete Research, Vol. 35, Iss. 4, 2005, pp.696-702.

(접수일자 : 2010년 8월 3일)
(심사완료일자 : 2010년 10월 6일)

요 지

메타카올린은 고령토나 카올린으로 알려진 카올린 광물의 풍화물로, 도자기 산업에 주로 사용되는 원료로, 일반적으로 메타카올린의 입자 크기는 시멘트보다는 작지만, 마이크로 실리카폼보다는 크다. 본 연구에서는 콘크리트용 혼화재로 메타카올린을 사용한 콘크리트의 압축강도와 염소이온 투과저항 특성에 관한 영향에 관해 조사하였다. 메타카올린과 실리카폼의 혼입률이 압축강도와 염소이온 투과저항에 주는 영향을 비교하기 위해 물-결합재비를 30%로 고정하고 각각 0, 5, 10, 15, 20%인 배합수준을 설정하여 비교하였다. 연구결과 메타카올린을 혼입한 콘크리트는 실리카폼을 혼입한 콘크리트와 유사한 강도특성을 보였지만, 염소이온 투과저항성은 다소 불리한 것으로 나타났다. 따라서, 강도와 염소이온 투과저항 성능을 동시에 만족하기 위한 메타카올린의 혼입률은 10% 정도인 것으로 나타났다.

핵심 용어 : 메타카올린, 실리카폼, 가설검증, 분산분석, 염소이온 투과저항성, 혼화재
