

플라이 애시와 석회석 미분말을 혼용한 고유동 콘크리트의 유동 특성

Flowability of High Flowable Concrete with Fly Ash and Lime Powder

조 일 호* · 성 찬 용**

Cho, Il Ho · Sung, Chan Yong

Abstract

This study is performed to evaluate flowability of high flowable concrete using ordinary portland cement, crushed coarse aggregate, crushed sand, sea sand, fly ash, lime powder and superplasticizer.

The slump flow and air content are increased with increasing the content of lime powder. But, the O-type funneling time and Box-type passing are decreased with increasing the content of lime powder.

The slump flow, air content, O-type funneling time, Box-type passing and L-type filling of target compressive strength 21~27 MPa and 35~42 MPa at curing age 28 days are 47~50 cm and 56~60 cm, 4.2~5.5% and 4.0~5.7%, 8~12s and 5~10s, 4.3~5.0 cm and 3.4~5.0 cm, and excellent, respectively.

These concrete can be used for high flowable concrete.

Keywords : High flowable concrete, Slump flow, Air content, O-type funneling time, Box-type passing, L-type filling.

I. 서 론

최근 초고층 주상복합 건축물, 지하공간 구조물, 대규모 해양 구조물, 항만 구조물 등 초대형 구조물의 건설이 증가하고 있는 추세이다. 이러한 초대형 구조물을 건설하기 위해서는 단면이 큰 콘크리트 구조물의 건설이 수반되며 대량의 매스 콘크리트

시공이 필연적으로 따르게 된다. 또한, 산업 전 분야에서 환경오염, 에너지 절약, 자원재활용 등에 대한 사회적 관심이 고조되고 있어 환경친화성을 만족시킬 수 있는 콘크리트에 대한 사회적 요구가 증대되고 있다. 이에 대한 해결방법으로 플라이 애시나 석회석 미분말의 활용을 들 수 있는데, 국내의 풍부한 부존자원을 이용하여 콘크리트 공사시 건설 초기 비용을 절감하고 각종 성능향상 효과를 얻을 수 있어 향후 사용범위가 크게 증가될 것으로 생각된다. 그러나 국내외에서 플라이 애시나 석회석 미분말을 별도로 각각 사용한 콘크리트에 대한 시공사례나 관련연구는 있으나, 플라이 애시와 석

* 충남대학교 대학원

** 충남대학교 농업생명과학대학

** Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5798

Fax: +82-42-821-8877

E-mail address: cysung@cnu.ac.kr

회석 미분말을 함께 사용한 삼성분계 콘크리트에 대한 연구는 많지 않다. 한편, 플라이 애시와 석회석 미분말을 함께 사용한 삼성분계 콘크리트는 혼화재의 충전효과와 상호 보완효과로 일정량의 치환에 따라 유동성이 개선되기도 하며, 각각 포졸란 반응과 충전재로서 콘크리트의 장기강도 증진과 내구성 향상에 기여하는 것으로 알려져 있다.⁹⁾ 또한, 시멘트 페이스트나 콘크리트의 유동성을 측정하기 위해 기존의 경험에 근거한 정량적인 평가방법인 슬럼프 플로우 시험이나 슬럼프 시험 이외에 유동성을 근본적으로 정량화 하기 위한 시험방법이 개발되고 있으며, 유동성 정량화를 위해 대부분 소성점도와 항복응력이라는 레올로지 정수가 이용되기도 한다. 최근의 연구결과 시멘트 페이스트나 콘크리트의 항복응력은 슬럼프와 관련되며, 소성점도는 점착성, 성형성, 분출성, 마감성과 재료분리와 같은 특성들과 관련되어 있다.²⁾

한편, 고유동 콘크리트는 다짐작업을 하지 않거나 거의 하지 않고도 철근이 배근된 거푸집속을 자기 스스로 흘러들어 밀실하게 충전되어 지는 높은 유동성과 간극 통과성을 가지며, 유동중에 과도한 재료분리를 일으키지 않고 필요로 하는 균질성을 확보하고, 혼화재 및 고성능 AE 감수제를 첨가하여 단위수량을 줄여, 슬럼프 플로우가 500~700 mm 정도인 콘크리트를 말한다. 또한, 고유동 콘크리트의 장점은 진동을 할 필요가 없고 콘크리트를 부어넣는 것만으로 작업이 간단히 완료되며, 콘크리트 공사의 대폭적인 저에너지화와 공기단축이 가능하여 대규모 구조물의 콘크리트 부어넣기에도 용이하고, 콘크리트 공사의 기계화에도 대응할 수 있어 활용성이 크게 기대되고 있다.

따라서, 본 연구는 보통 포틀랜드 시멘트, 부순 자갈, 부순 모래, 바다 모래, 플라이 애시, 석회석 미분말, 고성능 감수제를 사용한 고유동 콘크리트의 유동 특성을 구명하기 위하여 슬럼프 플로우 시험, 공기량 시험, O형 깔때기 통과성 시험, Box형 간극 통과성 시험, L형 과밀 배근 충전성 시험을

실시하고, 이에 따른 유동 특성을 비교 분석하여 플라이 애시와 석회석 미분말을 혼용한 고유동 콘크리트의 활용에 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 사용재료

가. 시멘트

KS F 5201에 규정된 국내 H사 제품의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 그 물리적 성질과 화학성분은 Table 1, 2와 같다.

Table 1 Physical properties of ordinary portland cement

Specific gravity (20℃)	Specific surface area (cm ² /g)	Setting time (h-min)		Compressive strength (MPa)		
		Initial	Final	3 days	7days	28days
3.15	3,303	4-10	5-22	25	31	39

Table 2 Chemical composition of ordinary portland cement (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Others
20.87	5.01	61.90	3.50	2.21	3.18	3.33

나. 골재

굵은골재는 충남 인근 석산에서 생산되는 부순 골재를 사용하였고, 잔골재는 부순모래와 바다 모래를 세척한 것을 사용하였으며, 그 물리적 성질은 Table 3과 같다.

다. 플라이 애시

보령화력발전소에서 부산되는 입경이 0.15 mm 이하인 유연탄 플라이 애시 (KS L 5405)를 사용하였으며,⁴⁾ 그 물리적 성질과 화학성분은 Table 4와 같다.

Table 3 Physical properties of aggregates

Classification		Specific gravity (20°C)	Finess modulus	Absorption ratio (%)	Unit weight (kgf/m ³)	Size (mm)
Coarse aggregate	Crushed aggregate	2.63	6.85	0.67	1,520	5~25
Fine aggregate	Crushed sand	2.58	3.03	1.28	1,630	0.6~5
	Sea sand	2.59	2.82	1.12	1,500	0.6~5

Table 4 Physical properties and chemical composition of fly ash

Physical properties		Chemical composition (%)			
Specific gravity (20°C)	Specific surface area (cm ² /g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	lg. loss	Other
2.19	3,767	49.40	25.20	3.90	21.50

라. 석회석 미분말

콘크리트 및 강재에 해로운 영향을 주지 않는 석회석 미분말을 사용하였으며,⁶⁾ 그 화학성분과 물리적 성질은 Table 5와 같다.

Table 5 Chemical composition and physical properties of lime powder

Chemical composition (%)				Physical properties	
CaCO ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Other	Specific gravity (20°C)	Specific surface area (cm ² /g)
95.64	0.92	0.17	3.27	2.70	4,630

마. 고성능 감수제

콘크리트의 내구성 향상과 유동성 증진을 위하여 고성능 AE 감수제를 사용하였으며, 그 일반적 성질은 Table 6과 같다.

Table 6 General properties of superplasticizer

Main ingredient	Specific gravity (20°C)	pH	Color
Polycarboxirate	1.05	5.0	Light yellow liquid

2. 콘크리트 배합

가. 배합설계

고유동 콘크리트의 배합은 현재 사용되고 있는 재령 28일 압축강도 21, 24, 27, 35, 42 MPa 등 5종류로 하여 Table 7과 같이 배합설계를 하였다. 플라이 애시와 석회석 미분말의 치환률은 예비실험을 통해 슬럼프 플로우가 목표 압축강도 21~27 MPa에서는 45±5 cm와 35~42 MPa에서는 55±5 cm, 간극통과성 Box 시험 충전높이 차가 4±1 cm와 L형 충전성 시험을 만족한 배합 중에서 유동성과 강도를 고려하여 적정수준인 결합재 중량의 20%로 하였으며, 잔골재는 중량비로 해사 70%와 부순 모래 30%를 사용하였고, 물-결합재비는 모든 배합에서 45±5%로 하였다.

또한, 잔골재율이 감소할수록 점성이 증대되어 유동성이 저하되고, 잔골재율이 증가할수록 점성이 저하되어 골재 입자간의 마찰 및 맞물림 저항의 증대로 충전성 및 간극 통과성에 나쁜 영향을 미치므로 고유동 콘크리트의 요구 성능을 확보하기 위해 잔골재율을 47±1%로 하였으며, 목표 공기량은 5±1%로 하였고, 고성능 감수제의 첨가율은 재료분리가 발생하지 않고 적정 유동성을 확보할 수 있도록 배합별로 결합재 중량의 0.75~1.34%를 사용하였다.

3. 시험방법

가. 슬럼프-플로우 시험은 KS F 2402(콘크리

Table 7 Mix design of high flowable concrete with fly ash and lime powder

Mix type	Target compressive strength(MPa)	S/a (%)	W/B (%)	Water (kgf/m ³)	Binder (kgf/m ³)			Aggregate (kgf/m ³)		Super plasticizer (%)
					Cement	Fly-ash	Lime powder	Fine	Coarse	
HFC-1	21	47.9	49.4	163	264	40	26	870	945	0.75
HFC-2	21	47.9	49.4	163	264	66	-	867	943	0.77
HFC-3	24	47.4	46.9	164	280	42	28	851	944	0.80
HFC-4	24	47.4	46.9	164	280	70	-	848	941	0.83
HFC-5	27	47.4	44.6	165	296	44	30	841	933	0.90
HFC-6	27	47.4	44.6	165	296	74	-	839	930	0.93
HFC-7	35	47.2	42.6	166	312	48	32	829	926	1.10
HFC-8	35	47.2	42.6	166	312	80	-	825	923	1.13
HFC-9	42	46.9	40.7	167	328	49	33	814	921	1.30
HFC-10	42	46.9	40.7	167	328	82	-	811	917	1.34

*HFC: High flowable concrete

트의 슬럼프 시험방법)에 준하여 실시하였으며, 시료를 슬럼프 콘의 상단까지 채운 후 수직으로 들어 올려 시료의 변형이 완전히 종료된 시점에 시료 밑면의 지름을 측정하였다.

나. 공기량 시험은 KS F 2421(굳지 않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기 함유량 시험방법)에 준하여 측정하였다.

다. O형 깔때기 통과성 시험은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 용량 10 l의 O형 깔때기 시험장치에 시

료를 넣으면서 다지거나 두들김을 행하지 않고, 한번에 가득 채워 하부의 토출구를 개방하여 시료가 깔때기에서 빠져 나가는데 걸리는 시간을 측정하였으며, 이 유하시간은 토출구의 개방으로부터 깔때기의 사면에서 관찰하여 하부가 보일 때 까지를 의미한다.

라. Box형 간극 통과성 시험은 Fig. 2와 같은 시험장치에서 왼쪽의 Box에 시료를 채우고 왼쪽과 오른쪽 Box를 연결하는 판을 들어 올리면 왼쪽 Box에서 오른쪽 Box로 시료가 이동한다. 시료가

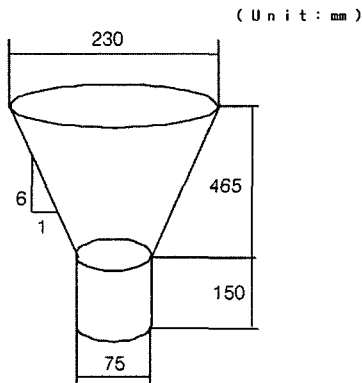


Fig. 1 O-type funneling test apparatus

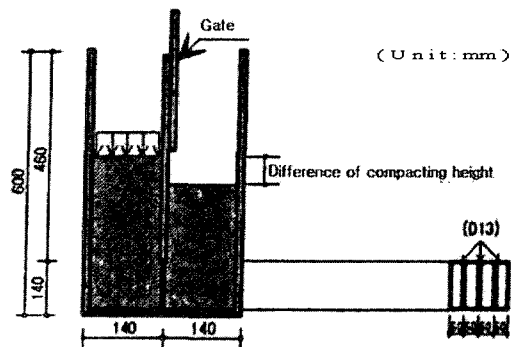


Fig. 2 Box-type passing test apparatus

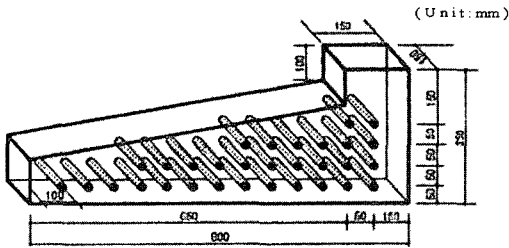


Fig. 3 L-type filling test apparatus

왼쪽 Box에서 오른쪽 Box로 이동하기 위해서는 5 cm 간격으로 D13철근이 배치되어 있는 중앙부분을 통과해야 하며, 충전성은 왼쪽 Box와 오른쪽 Box의 높이 차이를 측정하여 평가하였다.

마. L형 과밀 배근 충전성 시험은 Fig. 3과 같은 시험장치의 시료 투입구에 시료를 넣고 충전속도 및 최종충전 상태를 기준으로 충전성능을 육안으로 판단하여, 시료가 하단에 도달하여 상단을 가득 채우면 우수(excellent), 시료가 하단에 도달하였으나 상단의 중앙부분까지 채우면 양호(good), 시료가 하단에 도달하지 못하고 상단의 중앙부분을 채우면 보통(average), 시료가 하단의 절반에 도달하지 못하면 불량(bad) 등 4가지로 평가하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 슬럼프 플로우

콘크리트의 슬럼프 플로우 시험결과는 Table 8에서 보는 바와 같이 재령 28일 목표 압축강도 21~27 MPa에서는 47~50 cm와 목표 압축강도 35~42 MPa에서는 56~60 cm로 나타났다.

이와같은 결과는 고성능 감수제를 혼입하여 목표 슬럼프 플로우를 각각 목표 압축강도 21~27 MPa에서는 45±5 cm와 목표 압축강도 35~42 MPa에서는 55±5 cm을 만족하였다.

또한, 모든 배합에서 플라이 애시와 석회석 미분말을 함께 사용한 콘크리트의 슬럼프 플로우가 석회석 미분말을 혼입하지 않은 콘크리트보다 고성능

Table 8 Test results of high flowable concrete with fly ash and lime powder

Item Mix type	Slump flow (cm)	Air content (%)	O-type funneling time(s)	Box-type passing (height: cm)	L-type filling
HFC-1	49	5.5	8	4.5	Excellent
HFC-2	47	4.5	12	5.0	Excellent
HFC-3	49	5.3	9	4.3	Excellent
HFC-4	47	4.6	11	5.0	Excellent
HFC-5	50	5.3	8	4.3	Excellent
HFC-6	48	4.2	12	5.0	Excellent
HFC-7	58	5.4	6	3.4	Excellent
HFC-8	56	4.0	10	5.0	Excellent
HFC-9	60	5.7	5	3.7	Excellent
HFC-10	58	4.2	9	5.0	Excellent

감수제를 0.02~0.04% 적게 혼입하였음에도 불구하고 2 cm 정도 크게 나타났는데, 이는 석회석 미분말의 분말도가 플라이 애시보다 커 슬럼프 플로우에 미치는 영향이 더 크게 나타난 것으로 판단된다.¹⁰⁾

한편, 플라이 애시는 입자의 표면이 매끄러운 구형이고 볼베어링 작용에 의해 시멘트 페이스트와 골재 사이의 마찰저항을 감소시켜 소요의 유동성을 확보하는데 단위수량을 저감시키는 효과가 있고, 석회석 미분말의 혼입율이 증가할수록 단위수량의 저감효과가 커진다는 연구와 유사한 결과라 할 수 있다.⁷⁾

따라서, 플라이 애시를 단독 사용하는 것보다 석회석 미분말을 함께 사용하는 것이 유동성 증진에 더 효과적인 방법이라 판단된다.

2. 공기량

굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험결과는 Table 8에서 보는 바와 같이 모든 배합에서 4.0~5.7%로 나타났으며, 이와 같은 결과는 목표 공기량을 모든

배합에서 $5\pm 1\%$ 로 하기 위하여 적절한 배합설계를 하였기 때문에 적정 공기량을 확보할 수 있었다고 생각된다.

또한, 플라이 애시와 석회석 미분말을 함께 사용한 경우가 플라이 애시만 사용한 경우에 비하여 목표 압축강도 21~27 MPa에서는 0.7~1% 크게 나타났고, 목표 압축강도 35~42 MPa에서는 1.4~1.5% 크게 나타났으며, 고강도일수록 공기량 차이가 크게 나타나는 경향을 보였다.

한편, 플라이 애시와 석회석 미분말을 혼용하여 사용하면 점성이 증가되고 공기량의 안정성도 확보할 수 있는 것으로 나타났으며,^{3),6)} 이는 플라이 애시에 함유된 미연탄소 성분이 고성능 감수제를 흡착하는 성질을 갖고 있기 때문인 것으로 판단된다.^{1),4)}

따라서, 높은 슬럼프 플로우의 영역에서 굳지 않은 콘크리트의 작업성 등을 평가할 경우, 슬럼프 플로우와 공기량을 병행하여 사용하는 것이 유용할 것으로 판단되며, 타설 거리가 멀거나 타설 시간이 많이 걸리는 현장에서도 고유동, 고강도 콘크리트를 제조할 수 있고, 적절한 슬럼프 플로우와 공기량을 필요로 하는 특수한 현장에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

3. O형 깔때기 통과성

굳지 않은 콘크리트의 O형 깔때기 통과성 시험 결과는 Table 8과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 플라이 애시와 석회석 미분말을 함께 사용한 경우가 플라이 애시만 사용한 경우에 비하여 목표 압축강도 21~27 MPa에서는 3~4초 빠르게 통과 하였으며, 목표 압축강도 35~42 MPa에서는 4초 정도 빠르게 통과하였다. 이와 같은 결과는 플라이 애시가 석회석 미분말보다 분말도가 낮아 골재 상호간의 마찰 및 맞물림 작용에 의하여 점성이 증가되어 유하속도가 느리게 나타난 결과라 판단된다.⁸⁾

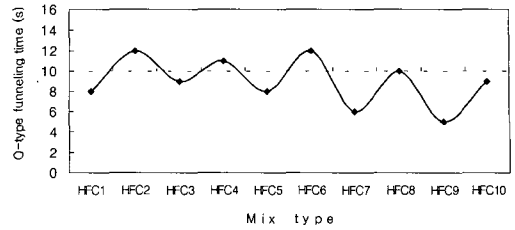


Fig. 4 O-type funneling time versus mix type

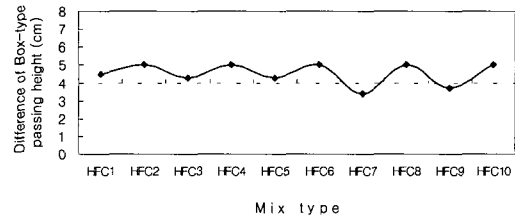


Fig. 5 Difference of Box-type passing height versus mix type

4. Box형 간극 통과성

굳지 않은 콘크리트의 Box형 간극 통과성 시험 결과는 Table 8과 Fig. 5에서 보는 바와 같이 Box 높이는 3.4~5.0 cm로 나타났으며, 플라이 애시와 석회석 미분말을 함께 사용한 경우가 플라이 애시만 사용한 경우에 비하여 높이가 작게 나타났다.

또한, Box 높이 차이는 플라이 애시와 석회석 미분말을 혼용한 경우가 플라이 애시만 사용한 경우보다 목표 압축강도 21~27 MPa에서는 0.5~0.7 cm 정도 작게 나타났고, 목표 압축강도 35~42 MPa에서는 1.3~1.6 cm 정도 작게 나타났으며, 고강도일수록 높이 차이가 크게 나타나는 경향을 보였는데, 이는 플라이 애시보다 석회석 미분말의 분말도가 작아 유동성이 향상된 결과라 판단된다.⁵⁾

5. L형 과밀 배근 충전성

Table 8에서 보는 바와 같이 L형 과밀 배근 충전성 시험결과는 모든 배합에서 Excellent(우수)로 평가되었다. 이는 고유동 콘크리트를 제조되기 위

하여 Slump flow를 재령 28일 목표 압축강도 21~27 MPa에서는 45±5 cm, 35~42 MPa에서는 55±5 cm로 배합설계를 하였기 때문이라 생각되며, 이러한 콘크리트는 적절한 강도와 유동성이 요구되는 구조물에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.⁹⁾

IV. 결 론

이 연구는 산업부산물인 플라이 애시와 석회석 미분말을 혼용한 고유동 콘크리트의 유동 특성을 구명한 것으로서, 이 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 슬럼프 플로우는 플라이 애시와 석회석 미분말을 혼용한 콘크리트가 플라이 애시만 사용한 콘크리트보다 더 크게 나타났으며, 재령 28일 목표 압축강도 21~27 MPa에서는 47~50 cm, 목표 압축강도 35~42 MPa에서는 56~60 cm로 나타나 목표 슬럼프 플로우 45±5 cm와 55±5 cm를 만족하였다.

2. 공기량은 플라이 애시와 석회석 미분말을 혼용한 경우가 플라이 애시만 사용한 경우보다 모든 배합에서 0.7~1.5% 크게 나타났으며, 고강도일수록 공기량 차이가 크게 나타나는 경향을 보였다.

3. O형 깔때기 통과성은 플라이 애시와 석회석 미분말을 혼용한 경우가 플라이 애시만 사용한 경우보다 모든 배합에서 3~4초 정도 빠르게 통과하는 경향을 나타내었다.

4. Box형 간극 통과성은 플라이 애시와 석회석 미분말을 혼용한 경우가 플라이 애시만 사용한 경우보다 높이가 작게 나타났으며, 그 높이 차이는 모든 배합에서 0.5~1.6 cm로 나타났고, 고강도일수록 높이 차이가 크게 나타나는 경향을 보였다.

5. L형 과밀 배근 충전성은 플라이 애시와 석회석 미분말을 혼용한 경우 뿐만 아니라 플라이 애시만 사용한 경우 등 모든 배합에서 우수(excellent)로 평가되었다.

6. 따라서, 이러한 고유동 콘크리트는 적절한 강도와 유동성이 요구되는 구조물에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. ACI committee 207, 1970, Mass concrete for dams and other massive structures, *Journal of the ACI*, 4(67): 8-11.
2. Hindy, E. E., B. Miao, O. Chaalal and P. C. Aitcin, 1994, Drying shrinkage of ready-mixed high performance concrete, *ACI Materials Journal*, 91(3): 300-305.
3. Jones, M. R., R. K. Dhir and B. J. Magee, 1997, Concrete ternary blended binders: resistance to chloride ingress and carbonation, *Cement and Concrete Research*, 27(6): 825-831.
4. Kenji, O and U. Kaketo, 1993, Effect of blending ratio of OPC, BFS and fly ash properties of cement paste, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 15(1): 23-24.
5. Okamura, H., 1995, Self-compacting high performance concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 7(5): 33-41.
6. Sawicz, z and S. S. Heng, 1996, Durability of concrete with addition of lime stone powder, *Magazine of Concrete Research*, 175: 131-137.
7. Shen, D. S and Z. E. Mao, 1992, High quality fly ash concrete, *Shanghai Science and Technology Press*: 54-57.
8. Soroka, I and N. Stern, 1976, Calcareous fillers and compressive strength of portland cement, *Cement and Concrete Research*, 6(1): 367-376.
9. Sung, C. Y and K. H. Noh, 2004, Flow properties of polypropylene fiber reinforced high flow concrete, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 48(2): 59-

66. (in Korean)
10. Zain, M. F. M and K. M. Y. Safiuddin, 1999, A study on the properties of freshly mixed high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, 29(9): 1,427-1,432.