결합재와 혼화재 종류에 따른 콘크리트의 수화반응 특성

Hydration Reaction Properties of Concrete With Binders and Admixtures

조일호* · 성찬용**,*

Cho, Il Ho* · Sung, Chan Yong**,*

Abstract

Recently, owing to the development of industry and improvement of building techniques, concrete structures are becoming larger and higher. This study was performed to analyze hydration reaction properties of concrete with binders and admixtures, such as OPC, low heat cement, belite rich cement, slag powder, lime powder and fly ash. To investigate effects of PC type superplasticizer on the hydration, experiments involving FT-IR, XRD, DSC, SEM were analyzed at the curing age 1day, 3days and 28days. The hydration reaction rate of OPC concrete slightly delayed at the curing age 1day, blast furnace slag powder and fly ash were more effective. BRC and LHC concretes can be used for concrete structures in winter season.

Keywords : Hydration reaction, Concrete specimen, Mini slump flow, Air content, FT-IR, XRD, DSC, SEM, PC type superplasticizer

1. 서 론

농업토목 구조물이 다양해짐에 따라 콘크리트 분야도 고강도, 고유동, 저발열 등의 다기능성을 갖춘 고성능 콘크리트 제조에 대한 관심이 높아지고 있다. 고유동화제, 감수제, AE 감수제 등을 포함하는 유기 혼화제는 고성능 콘크리트를 실현하기 위해서는 필수적인 재료로 인식되어 지고 있다. 그러나 콘크리트의 작업성과 내구성 개선을 목적으로 사용되어온 기존의 고유동화제는 감수효과가 그다지 크지 않고 첨가량에 따라서는 시멘트의 경화를 불량하게 하는 등 문제점을 발생시키고 있다. 이들 문제점을 보완하기 위해서

새로운 고분자 계면활성제의 일종인 PC(polycarboxylate)계 고유동화제가 개발되었으며, 이들은 시멘트 입자에 흡착되어 우수한 분산 유지성능을 발휘하므로 콘크리트의 고유동화와 고강도 및 저발열화를 실현시킬 수 있게 되었다.^{2,3)} 또한, 콘크리트 혼화제에 따라서 시멘트 입자 특성이 달라 콘크리트 배합설계에 의한 콘크리트 수화발열량을 최대한 저감시키는 재료적인 접근 방법이 주로 이용되면서,^{5,9)} 플라이 애시, 고로 슬래그 미분말, 석회석 미분말과 같은 혼화재 사용이 일반적으로 사용되고 있다. 이와 같이 시멘트에 대한 분산 유지성능은 PC계 고유동화제가 수화반응에 미치는 영향과 혼화재 사용이 콘크리트 수화반응에 동시에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

따라서 본 연구는 보통 포틀랜드 시멘트, 저발열 시멘트, 저열 시멘트, 5종 시멘트, 부순자갈, 부순모래, 강모래, 플라이 애시, 석회석 미분말, 고로 슬래그 미

* 충남대학교 대학원

** 충남대학교 농업생명과학대학

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

Fax: +82-42-821-8877

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

분말, 고성능 AE 감수제를 사용한 콘크리트에 대하여 미니 슬럼프 플로우 시험, 공기량 시험, 적외선 분광법 시험, 다목적 X선 회절 분석 시험, 시차주사열계량법 분석 시험, 주사전자현미경 분석 시험 등을 실시하고, 이에 따른 수화반응 특성을 비교 분석하여 농업토목 구조물에 콘크리트의 효율적인 이용을 위한 기초적인 자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 사용재료

가. 시멘트

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

Table 1 Physical properties of cement

Kinds of cement	Specific gravity (20℃)	Blaine (cm ² /g)	Setting time (h:min)		Compressive strength (MPa)		
			Initial	Final	3days	7days	28days
OPC	3.15	3,363	3:48	5:18	22	28	39
LHC	2.77	3,929	5:42	7:37	12	20	40
BRC	3.22	3,350	5:50	8:50	13	17	36
Type-5	3.21	3,492	7:48	8:13	23	30	39

Table 2 Chemical composition of cement(Unit : wt,%)

Kinds of cement	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Others
OPC	20.16	4.74	63.85	3.75	2.65	3.11	1.74
LHC	35.67	12.38	39.77	4.42	2.41	3.31	2.04
BRC	24.70	3.70	63.00	1.50	2.00	3.70	1.40
Type-5	22.81	3.49	63.04	2.63	1.88	4.79	1.36

※ OPC : ordinary portland cement, LHC : low heat cement, BRC : belite rich cement

Table 3 Physical properties of aggregates

Item	Specific gravity (oven dry)	Fineness modulus	Absorption ratio(%)	Unit weight (kg/m ³)	Percentage of solids (%)	Grain size (mm)
Crushed coarse aggregate	2.63	6.82	1.21	1,500	59.4	5~25
Crushed sand	2.62	3.02	1.28	1,570	56.2	0.6~5
River sand	2.59	2.32	1.97	1,510	58.3	0.6~5

나. 골재

굵은골재는 충남 인근 석산에서 생산된 부순자갈을, 잔골재는 부순모래와 강모래를 사용하였으며,⁴⁾ 그 물리적 성질은 Table 3과 같다.

다. 플라이 애시

보령화력발전소에서 부산되는 입경이 0.15 mm 이하인 유연탄 플라이 애시(KS L 5405)를 사용하였으며,²⁾ 그 물리적 성질과 화학성분은 Table 4와 같다.

Table 4 Physical properties and chemical composition of fly ash

Physical properties		Chemical composition(%)			
Specific gravity (20℃)	Blaine(cm ² /g)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Ig.loss	Others
2.23	3,405	55.70	26.10	4.60	13.60

Table 5 Chemical composition and physical properties of lime powder

Chemical composition(%)				Physical properties	
MgO	CaCO ₃	Al ₂ O ₃	Others	Specific gravity (20℃)	Specific surface area(cm ² /g)
0.92	96.56	0.43	2.09	2.71	3,573

라. 석회석 미분말

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

마. 고로 슬래그 미분말

고로 슬래그 미분말은 용광로에서 선철과 함께 생성되는 용융슬래그를 급냉시켜 얻은 입상의 수쇄슬래그를 건조하여 미분한 것으로 잠재 수경성이 있으며, 자체로는 경화하는 성질이 미약하지만 알칼리 자

Table 6 Chemical composition of blast furnace slag powder

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃	lg.loss	Others
27.06	9.15	3.40	5.34	48.48	2.85	0.18	3.54

Table 7 Physical properties of blast furnace slag powder

Specific gravity (20℃)	Specific surface area(cm ² /g)	Unit weight (kg/m ³)	Grain size(mm)	Color
2.90	4,550	1.077	< 0.15	White

극에 의해 경화가 촉진되므로 KS F 2563에 따라 D 사 제품을 사용하였으며, 그 화학성분과 물리적 성질은 Table 6, 7과 같다.

바. 고성능 AE 감수제

콘크리트의 내구성 향상과 경제성 제고를 목적으로 물-시멘트비를 감소시켜 조기강도 발현을 향상시키고, 작업성을 확보하기 위하여 KS F 2560의 고성능 AE 감수제를 사용하였으며, 그 일반적 성질은 Table 8과 같다.

2. 배합설계

결합재와 혼화제 종류에 따라 실험한 인자중 가장 대표적인 규격(25-24-150)을 선택하여 증류수와 PC 계 고유동화제를 혼합한 다음, 모래와 자갈을 투입하여 15초간 교반한 후, 결합재를 투입하여 90초간 교반해 얻은 콘크리트 시험체를 일정기간(1일, 3일, 28일) 동안 항온항습기(20±2℃, 상대습도 90%)에서 양생하고, 양생이 완료된 시험체를 수 mm 크기로 분쇄한 다음 아세톤을 사용하여 수화정지시켜, 55±2℃로 유지된 건조기에서 24시간 동안 완전 건조하였다. 결합재 종류는 보통 포틀랜드 시멘트(OPC), 5종 시멘트(Type-5), 저발열 시멘트(LHC), 저열 시멘트(BRC)를 사용하였으며, 혼화제는 2성분계(OPC+F15, OPC+

Table 8 General properties of superplasticizer

Main ingredient	Specific gravity(20℃)	Solid content(%)	pH	Appearance
Polycarboxirate	1.06	20.4	5.7	Light yellow liquid

Table 9 Mix design of concrete with binders and admixtures

Mix type	W/B (%)	S/a (%)	Unit (kg/m ³)								
			W	C	S1	S2	G	FA	SP	LP	PC(Bx%)
OPC	47.0	50.0	165	353	365	546	895	0	0	0	3.53
BRC	47.0	50.0	165	353	366	548	899	0	0	0	3.53
LHC	47.0	50.0	165	170	361	540	886	53	88	42	3.53
Type-5	47.0	50.0	165	353	366	548	898	0	0	0	3.53
F15	47.0	50.0	165	300	362	542	889	53	0	0	3.53
B25	47.0	50.0	165	265	364	544	893	0	88	0	3.53
B25·F15	47.0	50.0	165	212	361	540	886	53	88	0	3.53

※ W : water, B : binder, S/a : sand percentage, C : cement, S1 : river sand, S2 : crushed sand G : gravel, FA : fly ash, SP : slag powder, LP : lime powder, PC : superplasticizer

B25)와 3성분계(OPC+ B25+ F15)등 총 7종류로 하여 Table 9와 같이 배합설계를 하였다. 또한, 목표 플로우치는 110±5%, 목표 공기량은 4.5±1.5%로 하였으며, 목표 플로우치와 목표 공기량을 만족시키기 위하여 고성능 AE 감수제는 중량비로 결합재량의 1%를 사용하였다.⁴⁾

3. 시험방법

가. 미니 슬럼프 플로우와 공기량 시험

미니 슬럼프 플로우(110±5%) 시험은 결합재와 표준사를 중량비로 1:2.45 배합으로 KS F 2402(콘크리트의 슬럼프 시험방법)에 준하여 실시하였으며, 시료를 슬럼프 콘의 상단까지 채운 후 수직으로 들어 올려 시료의 변형이 완전히 종료된 시점에 직각방향으로 측정하였고, 공기량 시험은 KS F 2421(굳지않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기 함유량 시험방법)에 준하여 측정하였다.

나. 표면반사 적외선 분광법(FT-IR) 분석 시험

재령 3일 경과한 콘크리트 시험체를 잘게 연마한 다음 0.08mm체에 통과된 시료를 사용하였으며, 물이 제거된 왁스 또는 필름상의 재료 및 PC계 고유동화제 합성시료를 주파수 4,000 cm⁻¹~400 cm⁻¹ 범위에서 8 cm⁻¹의 resolution조건으로 Fig. 1과 같은 Bio-Rad Digital FTS-165 FT-IR Spectrometer를 사용하여 수화진행 피크를 측정하였다.

Fig. 1 FT-IR Spectrometer test

다. 다목적 X선(XRD)회절 분석 시험

건조가 완료된 시험체를 200 mesh체를 모두 통과 할 크기로 분쇄한 다음, SHIMADZU사의 X-ray회절 분석기(XD-R1)을 사용하여 45 kv와 40 mA에서 Cu radiation으로 스캔속도는 5°/min, 범위는 5~60°로 시료의 단결정 상태를 분석하였다.

라. 시차주사열계량법(DSC) 분석 시험

XRD 분석과 동일한 시험체를 활용해 Fig. 2와 같은 S사의 열분석기(DSC-50)를 사용하여 10°C/min의 승온속도로 상온에서 700°C 까지 초당 1회 기록 간격으로 시료의 분산성능을 측정하였다.

마. 주사전자현미경(SEM) 분석 시험

재령 1일과 28일에서 시험체의 수화를 정지시킨 다음, 페이스트 경화체의 미세구조를 Fig. 3과 같은 배

Fig. 2 DSC test

Fig. 3 SEM test

율 3,500배의 전자주사현미경(SEM, JEOL 5200)으로 수 mm크기 시험체의 미세구조와 수화생성물을 관찰하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 미니 슬럼프 플로우와 공기량

미니 슬럼프 플로우 시험 결과는 Fig. 4에서 보는 바와 같이, OPC와 비교하여 동일 물-결합재비(W/B = 48.5%)인 경우, B25(슬래그 미분말 25%), F15(플라이 애시 15%)와 BRC, LHC는 각각 76%와 79%로 비슷한 수준의 값을 나타내었다.

Type-5는 동일 물-결합재비에서 플로우 값이 87%로 나타났고, 플로우를 만족하는 물-결합재비에서는 52.6%로 가장 작게 나타나 일정 반죽질기를 얻기 위해 필요한 물-결합재비는 상대적으로 작게 나타났고, 동일 물-결합재비에서는 가장 큰 플로우값을 나타내었다. 따라서 Type-5의 시멘트는 다른 종류의 시멘트 및 결합재와 비교하여 동일한 반죽질기를 얻기 위해 소요되는 수량은 줄어들 것으로 판단된다.³⁾

한편, 공기량의 경우, OPC와 Type-5는 동일 물-결합재비에서 9.8~10%, 동일 플로우에서는 7.7~8.0%로 나타났으며, B25, F15와 BRC, LHC는 6.4~8.1%와 4.3~5.7%로 나타났다. 또한, 고로 슬래그 미분말과 석회석 미분말을 혼용한 것과 혼합형 저발열 결합재의 경우, 모르타르에 유입된 공기량이 상대

Fig. 4 Mini slump flow and air content of concretes

적으로 적게 나타나 소요 공기량을 얻기 위해 투입되는 공기연행제의 양이 다소 증가할 것으로 생각된다.

따라서, 동절기 농업토목구조물 축조에 BRC나 LHC 콘크리트를 사용하는 것이 시공성과 경제성 및 성능면에서 효과적일 것으로 판단된다.

2. FT-IR 분석

표면반사 적외선 분광법에 의한 분석 결과는 Fig. 5에서 보는 바와 같이, 모두 $3,643 \sim 3,647 \text{ cm}^{-1}$ 로 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 O-H신축 진동이 관찰되었으며, $1,640 \sim 1,651 \text{ cm}^{-1}$ 에서 H-O-H의 굽힘진동이 관찰되어 C_3S 의 수화가 활발히 일어났다는 것을 알 수 있다. 또한, $3,645 \text{ m}^{-1}$ 부근의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 피크강도로 부터 결합재 종류에 따라 수화반응이 지연되는 경향을 나타내었으며, F15와 비교시 재령에 관계없이 BRC,

LHC와 B25 · F15가 F15와 유사한 경향을 나타내었다. BRC, LHC의 경우 약 968 cm^{-1} 에서 Si-O 신축 진동이 높은 주파수 쪽으로 피크이동을 보였는데, 이는 다른 시험체와 비교하였을때, 실리케이트(SiO_4^{4-})의 중합이 상대적으로 더 잘 일어났음을 의미한다고 생각된다.

3. XRD 분석

Fig. 6은 XRD 시험 결과로서, OPC의 경우 시멘트 수화생성물인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 피크가 크게 나타나는 반면, BRC, LHC 콘크리트 시험체에서는 상대적으로 적게 나타났는데, 이와같은 결과는 해수중 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 Cl^- 이온의 반응에 의해 생성된 가용성의 CaCl_2 의 용출에 따른 다공화 현상으로 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 적은 BRC, LHC가 내해수성이 좋을 것으로 판단된다.⁵⁾

한편, 수화반응으로 OPC의 주요 광물인 칼슘실리케이트(C_3S , C_2S), 칼슘알루미네이트(C_3A), 이수석고는 C-S-H겔로, 수산화칼슘, 에트링자이트, 모노셀페이트는 C-A-H 고형체로 상전이 되는 것을 알 수 있는데,¹⁾ 이는 C-S-H겔은 시멘트 수화생성물중 가장 많은 함량을 차지하고, 강도 등 주요 물성에 큰 영향을 미치지만, 결정도가 낮고 불규칙한 구조적 특성 때문이라 생각된다.¹⁾ 결합재 종류에 따른 미수화 광물인 C_3S , C_2S 의 상대강도 역시 OPC에 비해 높은 점으로 미루어 초기에 수화가 지연되며, 지연정도는 분자 구조내에 카복실기 함량이 높을수록 커지는 것으로 나타났다.

Fig. 5 FT-IR patterns of concretes

Fig. 6 X-ray diffraction analysis of concretes

또한, BRC, LHC의 수산화칼슘 결정피크(2θ deg. = 18°) 세기는 OPC와 유사한 경향을 나타내고 있지만, 이후 생성되는 수산화칼슘 결정피크(2θ deg. = 34°) 세기는 OPC에 비해 매우 약하게 나타났다.

한편, $17^\circ, 18^\circ, 34^\circ$ (2θ deg.) 부근에서 미수화 광물인 C_3S , C_2S 의 상대강도 역시 OPC에 비해 높은 점으로 미루어 초기에 다소 수화가 지연되며, 지연 정도는 카복실기 함량이 높을수록 커지는 경향을 보였는데, 이는 시멘트 페이스트상에 존재하는 Ca^{2+} 이온이 물속에 분산되어 있는 고성능 AE 감수제의 카복실레이트와 결합하는 비누화반응 때문이라 판단된

다.⁸⁾ 또한, 재령이 경과됨에 따라 B25, F15는 미수화 광물이 생성된 수산화칼슘 결정피크 세기는 OPC와 유사하고 수화반응에 크게 영향을 미치지 않았으며, FT-IR분석에서도 같은 결과를 나타내었다.

4. DSC 분석

Fig. 7은 OPC 콘크리트의 DSC 분석 결과로 재령 1일, 3일, 28일 시험체의 약 100°C 까지 온도상승에 의한 흡열피크는 결합재 페이스트 구조중 증발성 수분인 모세관수와 젤수, 초기 C-S-H젤에 의해 기인

Fig. 7 DSC curves of OPC concrete

(a) Curing age 1day of OPC concrete

(b) Curing age 28days of OPC concrete

(c) Curing age 1day of B25 · F15 concrete

(d) Curing age 28days of B25 · F15 concrete

Fig. 8 SEM morphologies of concretes

된 것이라 생각된다. 또한, 약 410~496℃의 흡열 피크는 수산화칼슘 생성에 의한 피크로, 역시 재령증가에 따라 피크치가 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 수산화칼슘에 의한 흡열피크가 재령이 증가함에 따라 고온쪽으로 이동되는 결정성과 관련이 있다고 판단된다.⁶⁾

5. SEM 분석

주사전자현미경 분석 결과는 Fig. 8에서 보는 바와 같이, 고성능 AE 감수제를 사용한 OPC와 결합재 종류별 콘크리트 시험체인 (a)와 (c)에서 재령 1일 시험체에서는 침상의 에트링자이트가 발달되어 초기 C-S-H 겔과 판상의 수산화칼슘이 관찰되었으며, 재령 28일 시험체인 (b)와 (d)에서는 아직 수화되지 않은 생성물과 주상형태의 수산화칼슘이 관찰되었다.

또한, 재령 1일 시험체의 경우 수화생성물의 크기가 감소하고 OPC의 에트링자이트 결정과 균일한 분포를 나타내고 있으며, 재령 28일 시험체에서는 전체적으로 수화생성물에 큰 차이가 없었으나 조직의 치밀성에서는 차이를 발견할 수 있었다. 이러한 결과는 고성능 AE 감수제를 사용하더라도 시멘트 수화 반응에는 커다란 영향을 미치지 않는 것으로 판단되며, 단지 PC계 고성능 AE 감수제를 사용할 경우, 시멘트 입자의 분산성이 향상되기 때문에 재령 1일에

서는 수화생성물의 크기가 감소하고 고른 분포를 나타내지만, 재령 28일에서는 보다 치밀한 구조를 형성하는 것으로 보아 콘크리트 강도 및 내구성 증진에 유리할 것으로 생각된다. 또한, 시멘트 입자의 분포가 보다 균일해지기 때문에 수화물이 생성될 수 있는 물과의 접촉면이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.^{7,8)}

IV. 결 론

농업토목 구조물에 콘크리트의 효율적인 이용을 위한 기초적인 자료를 제공하기 위하여 보통 포틀랜드 시멘트, 저발열 시멘트, 저열 시멘트, 5종 시멘트, 부순자갈, 부순모래, 강모래, 플라이 애시, 석회석 미분말, 고로 슬래그 미분말, 고성능 AE 감수제를 사용한 콘크리트에 대하여 미니 슬럼프 플로우 시험, 공기량 시험, 적외선 분광법 시험, 다목적 X선 회절 분석 시험, 시차주사열계량법 분석 시험, 주사전자현미경 분석 시험 등을 실시하고, 이에 따른 수화반응 특성을 비교 분석하였다.

이 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 미니 슬럼프 플로우를 만족하는 물-결합재비는 B25, F15와 BRC, LHC는 비슷한 수준의 값을 나타내었으나, Type-5는 일정 반죽질기를 얻기 위해 필

요한 물-결합재비가 상대적으로 작게 나타났고, 동일 물-결합재비에서는 가장 큰 플로우값을 나타내었다. 공기량은 동일 물-결합재비에서 OPC와 Type-5는 9.8~10%, 동일 플로우에서는 7.7~8.0%로 나타났다으며, B25, F15와 BRC, LHC는 6.4~8.1%와 4.3~5.7%로 나타났다.

2. 표면반사 적외선 분광법에 의한 분석 결과, OPC를 제외한 모든 시험체의 3,643~3,647 cm^{-1} 에서 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 O-H 신축진동이 관찰되었으며, 1,640~1,651 cm^{-1} 에서는 H-O-H 굽힘진동이 관찰되어 C_3S 의 수화가 활발히 일어나는 것으로 나타났다.

3. 다목적 X선 회절 분석 결과, 수화반응으로 시멘트의 주요 광물인 칼슘실리케이트(C_3S , C_2S), 칼슘알루미네이트(C_3A), 이수석고는 C-S-H겔로, 수산화칼슘, 에트링자이트, 모노셀페이트, C-A-H는 고형체로 상전이 되는 것으로 나타났다.

4. 시차주사열계량법 분석 결과, 약 100℃까지 온도상승에 의한 흡열피크는 결합재 페이스트 구조중 증발성 수분인 모세관수와 겔수, 초기 C-S-H겔에 의해 기인된 것이며, 약 410~496℃의 흡열피크는 수산화칼슘 생성에 의한 피크로 역시 재령증가에 따라 피크치가 증가하는 경향을 나타내었다.

5. 주사전자현미경 분석 결과, 재령 1일 시험체에서는 침상의 에트링자이트가 잘 발달되어 초기 C-S-H 겔과 판상의 수산화칼슘이 관찰되었고, 재령 28일 시험체에서는 수화생성물에 큰 차이는 없었으나 조직의 치밀성에서는 차이를 발견할 수 있었다.

6. 동결기 농업토목구조물 축조에 BRC나 LHC 콘크리트를 사용하는 것이 시공성과 경제성 및 성능면에서 효과적인 것으로 판단된다.

References

1. Grierson, L.H and J.C.R. Maharj., 2005, The role of calcium ions and lignosulphonate pla-

- sticiser in the hydration of cement, Cement and Concrete Research, 35, 631-636.
2. Hindy, E. E., B. Miao., O. Chaallal and P. C. Aitcin., 1994, Drying shrinkage of ready-mixed high-performance concrete, ACI Materials Journal, 91(3), 300-305.
3. 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.
4. Korean Standards Association., 2004, Ready-mixed concrete, KS F 4009, 38-41.
5. 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, 46(4), 57-63. (in Korean)
6. Taylor, H. F. W., 1990, Cement chemistry, ACADEMIC Press, London, 500-543.
7. Temkhajomkit, P and T. Nawa., 2004, The fluidity of fly ash cement paste containing naphthalene sulfonate superplasticizer, Cement and Concrete Research, 23, 1017-1024.
8. Uchikawa, H., S. Hanehara., T. Shirasaka and D. Sawaki., 1992, Effect of admixture in hydration of cement, adsorptive behavior of admixture and fluidity and setting of fresh cement paste, Cement and Concrete Research, 22, 1115-1129.
9. Zhuguo L.I., Y. Tanigawa and H. Mori., 2002, Theoretical analysis on time-dependence of fluidity and thixotropy of high fluidity concrete, Journal of the Structure Constructure Engineers, 558, 15-22.