

# 플라이애쉬 대체율별 강모래 · 깬자갈을 사용한 고유동콘크리트의 각종 유동특성 및 공학적 특성에 관한 실험적 연구

The Experimental Study on the High Flowing and Engineering  
Properties of High Flowing Concrete using River and Crushed Stone  
according to the Replacement Percentage of Fly-ash

최 희 용\*  
Choi, Hee Yong

조 성 현\*  
Cho, Sung Hyun

최 세 진\*  
Choi, Se Jin

김 규 용\*\*  
Kim, Gyu Yong

김 무 한\*\*\*  
Kim, Moo Han

---

## Abstract

The utilization of high flowing concrete in construction sites is a world wide trend, and it will be increase to need for high flowing concrete in our construction sites. While it is quite easy to make high-flowing concrete in the laboratory, controlling slump in the field long enough to ensure easy placement once the concrete arrives at the job site can be difficult.

This study is the experimental study on the high-flowing and engineering properties of high flowing concrete using river sand and crushed stone according to the replacement percentage of fly-ash.

As a results of this study is the mix proportion of replacement percentage of fly-ash 30% better than the others. And it is confirm to possibility of manufacture of the high flowing concrete.

---

## 1. 서 론

최근 건설시장 개방에 따른 국내 건설분야의 국제 경제력 및 기술력 강화의 필요성, 건설산업의 인력부족 현상 등으로 고품질, 고성능, 기계화 시공 등과 같은 새로운 단계의 콘크리트 품질 및 성능개선이 요구되고 있는 실정이다. 특히, 콘크리트구조물의 신뢰성 향상을 위해서는 콘크리트 타설시에 시공

---

\* 정회원, 충남대 대학원 석사과정

\*\* 정회원, 충남대 대학원 박사과정

\*\*\* 정회원, 충남대 건축공학과 교수, 공학박사

이 좋고 · 나뭇에 영향을 받지않는 즉, 다짐이 필요없는 자기충전콘크리트를 개발할 필요가 있다.

따라서, 본 연구는 단위결합재량이 높은 고유동콘크리트의 수화열 억제 및 온도균열 감소 와 산업부 산물의 재사용에 의한 원가 절감을 위해 플라이애쉬를 사용하고, 세골재로 입형 및 입도가 양호하며 유동성 확보에 우수한 강모래를 사용하여 건설산업용 고성능유동화 콘크리트를 개발을 위해 고유동 특성의 각종 평가시험에 따른 종합적인 비교 · 분석과 더불어 경화콘크리트의 공학적 특성을 규명함으 로써, 국내 건설산업계에 고성능고유동화 콘크리트의 실용화 및 활용화를 하기 위한 기초적 연구이다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획 : 본 실험 계획은 표 1과 같다.

표 1 실험 계획

물 결합재 비	플라 목표슬 고성능 잔골 단 위 이애 럼프 감수제 재물 수 량 쉬대 플로우 의 체율 첨가물 (%) (cm) (·M) (°M) (kg/m <sup>3</sup> )					측정 항목																			
						아직군지않은 콘크리트					경화콘크리트														
	비	공	단위	박스	슬럼프-플로우	V	과일	단위	압축	동탄성계수,	초음파	반	온도	기	용적	총전성	L형	플로우,	로트	배근	용적	강도	정탄성계수	속도	발
	(·W)	(%)	(kg/ℓ)	(cm)	(sec)	(sec)	(cm)	(kg/ℓ)	(cm, sec)	(sec)	(cm)	(kg/ℓ)	(km)	(°C)	(%)	(kg/ℓ)	(sec)	(cm, sec)	(sec)	(cm)	(kg/ℓ)	(cm <sup>2</sup> )	(x10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	(sec)	(R,N)
0.35	15 30 45 60	65±5	·	52	175	○ ○ ○	○	경시에 따른 유동거리 (낙하 높이,낙 하시간)	○	○	○	1, 4, 8 (주) 측정													

\* 고성능감수제의 첨가율은 목표슬럼프-플로우를 얻기위한 적정 첨가량

### 2.2 각 사용재료의 물리 · 화학적 성질 : 각종 재료의 물리 · 화학적 특징은 표 2~5와 같다.

표 2 시멘트의 물리적 성질

시멘트 의 종류	비중	분말도 (m <sup>2</sup> /g)	응결도 (h:m)		화학적조성		강열 감량 (%)	압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )		
			초결	종결	CaO	SiO <sub>2</sub>		3일	7일	28일
1종 시멘트	3.15	3,200	4:50	7:05	64.8	24.2	-	183	250	350

표 5 골재의 물리적 성질

구 분	입경 (mm)	조립율 (F.M)	비 중	흡수 율 (%)	씻기손 실량 (%)	실적 율 (%)	단위용 적중량 (kg/ℓ)	비 고
세골재	2.5	2.64	2.57	1.01	0.9	62.11	1.59	강모래
조골재	20	6.54	2.58	1.96	0.1	58.00	1.50	깨자갈

표 3 고성능AE감수제의 물리적 성질

혼화제의 종류	유형	색 상	주 성분	고형분	독성	pH	비 중
AE감수제	액상	암갈색	Copolymer	41 ±1%	무	8~10	1.20 ± 0.01

〈골재의 체가름 분석결과〉

세골재	0.15	0.3	0.6	1.2	2.5	5.0	10
KS기준	2~10	10~35	25~65	50~90	80~100	90~100	100
통과율(%)	2	10	42	83	99	100	100
조골재 (20mm용)	2.5	5	10	15	20	25	비 고
KS 기준	0~5	0~10	20~55	55~80	90~100	100	-
통과율(%)	0	5	41	92	100	100	-

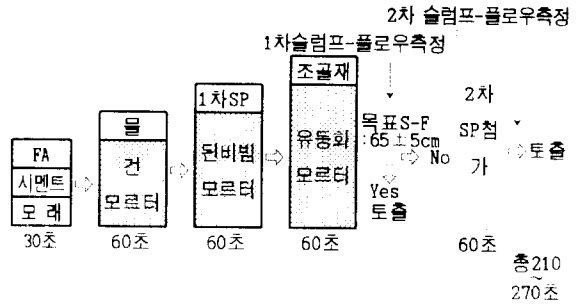
표 4 플라이애쉬의 물리 · 화학적 성질

혼화재 의 종류	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	강열 감량 (%)	습 분 (%)	주 성 분 ( % )					비 중
				SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	
플라이 애쉬	3,228	2.44	0.19	66.1	1.20	23.3	4.20	0.76	2.13

2.3 콘크리트의 조합 및 비빔 방법 : 표 6 및 그림 2와 같다.

표 6 콘크리트의 조합

W/B	FA		단위량		절대용적 (ℓ/m <sup>3</sup> )				단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )			
	(°wt)	(°V)	수	량	C	FA	S	G	C	FA	S	G
0.35	15				135	35	335	310	425	75	864	800
	30	52	175		111	71	329	304	350	150	849	784
	45				87	106	323	299	275	225	833	771
	60				63	141	318	293	200	300	820	756



비중 시멘트(C) : 3.15, 플라이애쉬(FA) : 2.13, 세골재(S) : 2.57, 조골재(G) : 2.58

그림 2 고유동콘크리트 비빔방법

표 7 아직군지않은 고유동콘크리트의 시험결과

시험항목	플라이애쉬 대체율 15%를 사용한 경우의 시험결과								플라이애쉬 대체율 30%를 사용한 경우의 시험결과							
	항목	직후	15	30	45	60	90	120	항목	직후	15	30	45	60	90	120
일시 및 온도	일시 96. 4. 23. 13시~								실내 온도 16℃							
재료온도(℃)	1. 시멘트 : 14.5 2. 플라이애쉬 : 15 3. 물 : 12 4. 세골재 : 15 5. 조골재 : 14															
시험 측정치	1. AIR : 7.7 x, 2. 비빔온도 : 16.5℃, 3. 단위중량 : 2.03 kg/l, 4. SP제 : 1.8x								1. AIR : 7.8 x, 2. 비빔온도 : 18℃, 3. 단위중량 : 2.02 kg/l, 4. SP제 : 2.0x							
슬럼프, 슬럼프-플로우	SL(cm)	-	-	20	8	-	-	-	SL(cm)	-	-	-	-	-	22	18
	S-F(cm)	65	61	40	21	-	-	-	S-F(cm)	70	67	66	61	51	37	29
	시간(sec)	33	40	14	-	-	-	-	시간(sec)	30	30	33	26	23	17	-
	50cm(sec)	5.7	9.1	-	-	-	-	-	50cm(sec)	4.8	3.7	4.7	6.4	14.1	-	-
V로트	유하(sec)	3.4	6.3	13.6	-	-	-	-	유하(sec)	3.0	3.5	4.3	5.2	8.0	29.2	-
L형 플로우	25cm(sec)	1.1	1.2	2.8	-	-	-	-	25cm(sec)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.6	7.1	-
	50cm(sec)	2.9	5.7	-	-	-	-	-	50cm(sec)	2.6	3.1	3.9	5.3	10.4	-	-
	75cm(sec)	14.1	31.3	-	-	-	-	-	75cm(sec)	8.7	12.0	17.7	26.1	-	-	-
	최종(cm)	92	79	48	-	-	-	-	최종(cm)	100	100	89	85	63	32	-
	시간(sec)	55.7	60	27	-	-	-	-	시간(sec)	32	55	54	63	40	19	-
L형 간극통과성	25cm(sec)	1.2	3.8	-	-	-	-	-	25cm(sec)	0.7	1.0	1.8	3.2	4.8	-	-
	50cm(sec)	4.8	15.0	-	-	-	-	-	50cm(sec)	5.0	5.0	7.9	11.7	18.5	-	-
	S(cm)	31	26	5	-	-	-	-	S(cm)	31.8	31.2	31	29	24.5	5.5	-
박스 충전성	낙하높이(cm)	27.7							28.1							
	높이차 (cm)	4.6							3.8							
	정지시간(sec)	14.3							10.1							

시험항목	플라이애쉬 대체율 45%를 사용한 경우의 시험결과								플라이애쉬 대체율 60%를 사용한 경우의 시험결과							
	항목	직후	15	30	45	60	90	120	항목	직후	15	30	45	60	90	120
시험 측정치	1. AIR : 4.2 x, 2. 비빔온도 : 18℃, 3. 단위중량 : 2.16 kg/l, 4. SP제 : 2.2x								1. AIR : 4.7 x, 2. 비빔온도 : 19℃, 3. 단위중량 : 2.11 kg/l, 4. SP제 : 2.5x							
슬럼프, 슬럼프-플로우	SL(cm)	-	-	-	-	-	-	24	SL(cm)	-	-	-	-	-	-	-
	S-F(cm)	69	68	67	67	65	55	45	S-F(cm)	71	71	71	70	69	66	65
	시간(sec)	38	41	49	50	54	51	46	시간(sec)	45	42	49	47	51	56	60
	50cm(sec)	6.5	6.7	7.8	8.6	10.9	24.2	-	50cm(sec)	5.9	7.5	6.3	6.5	9.7	15.6	22.4
V로트	유하(sec)	5.4	8.4	9.3	13.4	19.7	42.8	91	유하(sec)	5.3	6.6	8.5	9.6	10.8	21.4	40.3
L형 플로우	25cm(sec)	1.5	1.9	2.1	2.2	2.7	9.2	13.6	25cm(sec)	1.0	1.4	1.4	1.7	1.7	4.0	5.9
	50cm(sec)	4.6	7.5	6.5	8.2	12.1	34	-	50cm(sec)	4.2	5.0	5.5	6.3	6.6	14.4	20.8
	75cm(sec)	17.6	23.9	21.1	26.2	41.9	-	-	75cm(sec)	14.9	17.3	19.9	21.0	21.2	45.2	68.2
	최종(cm)	100	95	100	100	88	69.5	45	최종(cm)	100	100	100	100	100	88	80
	시간(sec)	65.1	91.7	70.8	93.1	94.4	100.5	83	시간(sec)	48	57	67	64	69	88	100
L형 간극통과성	25cm(sec)	2.1	3.1	5.0	7.6	15.6	53.7	-	25cm(sec)	1.7	2.7	3.5	4.5	4.9	12.6	40.7
	50cm(sec)	7.2	9.8	17.9	23.6	30.3	95	-	50cm(sec)	6.3	9.2	11.2	14.0	14.3	42.1	-
	S(cm)	32	32	31.5	30	13	7	-	S(cm)	32	32	32	32	32	25	10
박스 충전성	낙하높이(cm)	29.0							29.5							
	높이차 (cm)	2.2							1							
	정지시간(sec)	19.1							14.6							

### 3. 아직굳지않은 고유동콘크리트의 유동특성 평가시험 및 평가시험결과의 분석 및 검토

#### 3.1 아직굳지않은 고유동콘크리트의 실험결과 분석 및 검토

플라이애쉬 대체율에 따른 아직굳지않은 고유동콘크리트의 시험결과는 표 7과 같다.

㉠ 공기량 및 단위용적중량의 변화 : 그림 3과 같이 플라이애쉬 대체율 15, 30%에서는 7% 이상의 공기량을 나타내고 있지만, 45, 60%에서는 5%이하의 적정공기량을 나타내고 있다. 또한, 단위용적중량의 변화는 플라이애쉬 대체율의 변화보다는 공기량 차이에 의해 플라이애쉬 대체율 15, 30%에서 보다 45, 60%에서 다소 높게 나타나고 있다.

㉡ 슬럼프-플로우 시험(유동성 평가) : 그림 4는 고유동콘크리트의 슬럼프-플로우치와 슬럼프-플로우 50cm면적통과속도를 나타낸 것이다. 슬럼프-플로우 50cm면적통과속도는 다음 식에 의해 산출하였다.

$$\text{식 : } 50\text{cm면적통과속도}(\text{cm}^2/\text{sec}) = (50\text{cm슬럼프} + \text{플로우면적} - \text{슬럼프콘의 면적}) / 50\text{cm통과시간}$$

플라이애쉬 대체율 30%에서 슬럼프-플로우치가 가장 큰 70cm를 나타내고 있으며, 슬럼프-플로우 50cm면적통과속도 340cm<sup>2</sup>/sec로 유동성 및 점성이 가장 양호한 성상을 나타내고 있다.

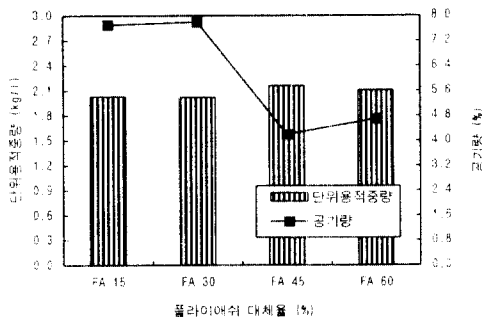


그림 3 단위용적중량과 공기량의 관계

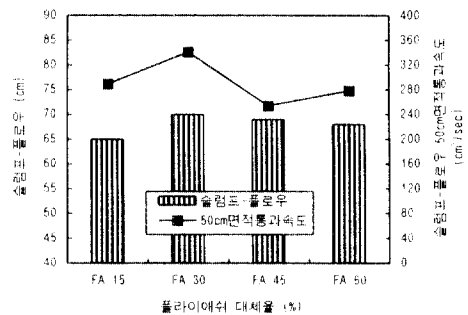


그림 4 슬럼프-플로우치와 슬럼프-플로우 50cm면적통과속도

㉢ V로트 시험 및 L형 간극통과성 시험 (간극통과성 평가) : 그림 5의 V로트 상대유하속도는 다음과 같이 구하였으며, 문헌 보고에서 슬럼프-플로우치 50-70cm에서의 적정속도는 1±0.5로 보고되고 있다.

$$\text{식 : 상대유하속도} = 5/\sqrt{t} \quad * \sqrt{t} \text{는 유하시간}$$

시험결과 플라이애쉬 대체율 15%, 30%에서 대체로 양호한 경향을 보이고 있다.

㉣ 박스충진성 시험 (충진성 및 재료분리 저항성 평가) : 그림 6과 같이 플라이애쉬 대체율이 증가되면서 충전높이차, 중량비차가 감소되고 있으며, 모든 조합에서 충전 높이차 5cm 이하의 양호한 경향을 보이고 있으며, 충전속도는 플라이애쉬 대체율 30%에서 가장 높게 나타나고 있다.

#### 3.2 플라이애쉬 대체율에 따른 고유동콘크리트의 경시변화 분석 및 검토

㉠ 슬럼프-플로우 및 L형 플로우 시험의 경시변화 : 그림 7 및 8과 같이 플라이애쉬 대체율이 증가할수록 유동시간이 길게 나타나고 있으며, 기존의 보고에서 고유동콘크리트가 소정의 유동성을 유지하는 시간이 대략 경시 60-90분 정도인데 이 범위에 드는 본실험의 수준은 플라이애쉬 대체율 30%

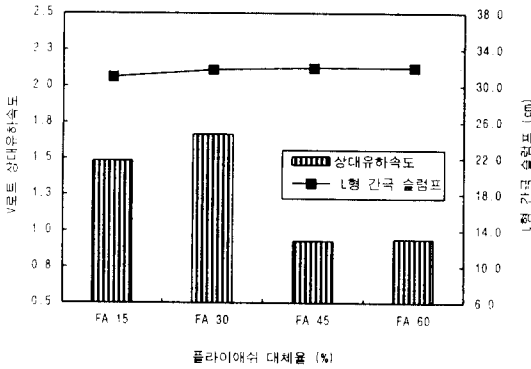


그림 5 V로트 상대유속도와 L형 간극슬럼프치와의 관계

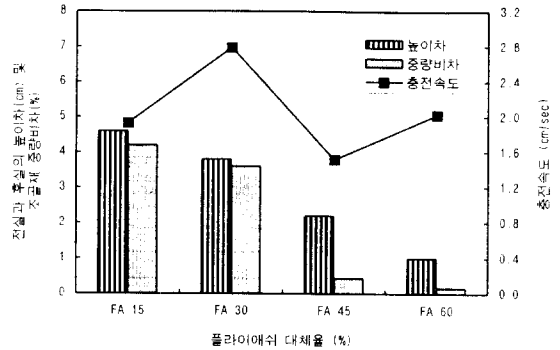


그림 6 박스충전성의 전실험과 후실험의 충전높이차와 충전속도의 관계

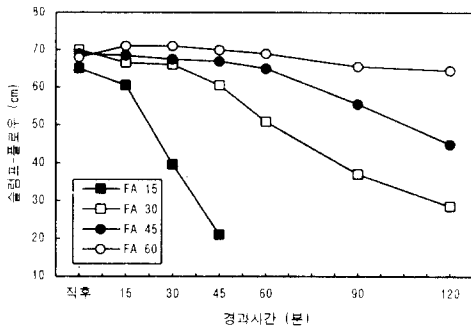


그림 7 슬럼프-플로우치의 경시변화

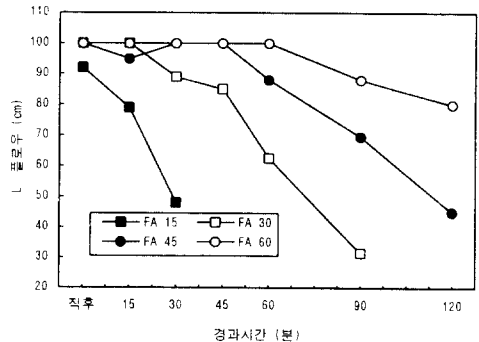


그림 8 L형 플로우치의 경시변화

와 45% 정도로 사료되며, L형 플로우 시험에서 경시에 따른 유동성손실이 슬럼프-플로우시험보다 더 민감하게 변화하는 것으로 나타났다.

㉠ V로트 시험의 경시변화 : 그림 9와 같이, 플라이애쉬 대체율 15, 30%에서는 초기에 다소 높은 상대유속도를 보이지만 경시에 따른 유속속도는 급격한 변화를 보이고 있다. 또한, 플라이애쉬 대체율 45, 60%는 경시120분까지 폐색의 현상을 보이지 않고 있지만, 적정 상대유속도  $1 \pm 0.5$ 를 벗어났다.

### 3.3 각종 유동특성 시험치간 상관관계 분석 및 검토

㉠ 슬럼프-플로우치와 L형 플로우치와의 상관관계 : 그림 10과 같이 양호한 상관성을 보인다.

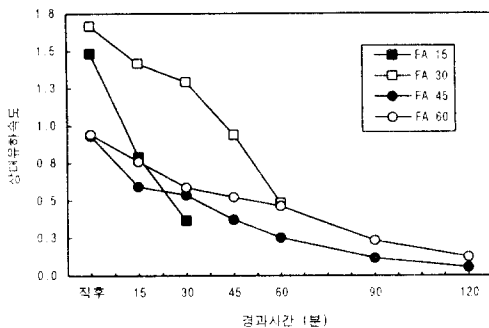


그림 9 V로트 시험의 경시변화

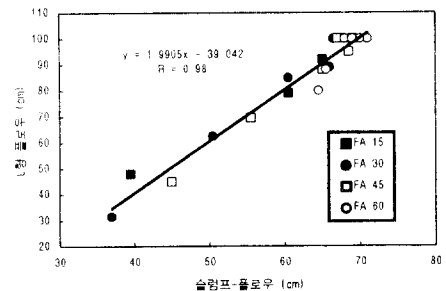


그림 10 슬럼프-플로우치와 L형플로우치의 상관관계

㉠ 슬럼프-플로우치와 L형 간극 슬럼프치와의 상관관계 : 그림 11과 같이 비교적 낮은 상관관계로, 타원 A와 같이 고유동콘크리트 슬럼프-플로우치범위인 50~70cm에서 비교적 양호한 간극통과성을 보이고 있으나, 너무 점성이 강하면 타원 B와 같이 낮은 간극통과성을 보이고 있다.

㉡ 슬럼프-플로우치와 V로트 상대유하속도와의 상관관계 : 그림 12와 같이 플라이애쉬 대체율이 15, 30%은 유동성이 크고, 45, 60%는 점성이 큰 것으로 나타났다.

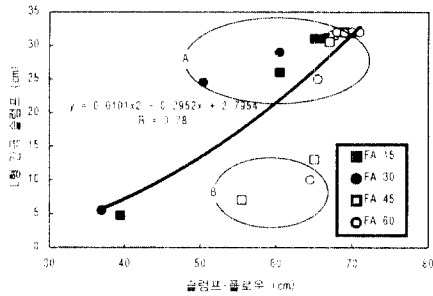


그림 11 슬럼프-플로우치와 L형간극 슬럼프치와의 상관관계

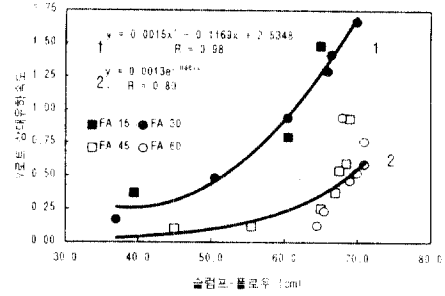


그림 12 슬럼프-플로우치와 V로트 상대유하속도와의 상관관계

#### 4. 경화콘크리트의 제공학적 특성 및 검토

플라이애쉬 대체율에 따른 경화콘크리트의 각종 시험결과는 표 8과 같다.

표 8 경화콘크리트의 각종 시험결과

물결합재비	FA 대체율 (%)	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )			단위 용적중량 (kg/l)			동탄성계수 (x10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup> )			초음파속도 (km/sec)			정탄성계수 (x10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	포화 송비	반발도 (RN)		
		1주	4주	8주	1주	4주	8주	1주	4주	8주	1주	4주	8주			1주	4주	8주
0.35	15	221	342	350	2.12	2.12	2.13	2.67	2.93	3.15	4.12	4.15	4.20	3.43	0.12	17	23	24
	30	113	231	252	2.06	2.08	2.09	2.27	2.72	2.78	4.10	4.11	4.18	2.57	0.14	12	15	16
	45	97	206	245	2.10	2.11	2.12	2.24	2.73	4.03	3.86	4.03	4.08	2.36	0.15	10	12	15
	60	-	157	237	-	2.07	2.08	-	2.36	3.80	-	3.78	3.86	2.28	0.17	-	11	14

\* 응집이 충분이 되지않아 측정을 못하였음

##### 4.1 각 재령별 압축강도와 발현비율의 변화 및 검토

그림 13과 같이 각 조합의 압축강도 발현치는 낮은 발현치를 보이고 있다. 즉, 물결합재비 0.35에서 일반 고강도콘크리트의 압축강도 수준이 500kgf/cm<sup>2</sup>내외이고, 고유동콘크리트의 경우는 기존의 문헌에 의하면 300~400kgf/cm<sup>2</sup>이지만, 본 실험의 수준에서는 8주 압축강도가 플라이애쉬 대체율 15%가 350kgf/cm<sup>2</sup>, 플라이애쉬 대체율 60%가 237kgf/cm<sup>2</sup>로 낮은 수준의 압축강도를 보이고 있다. 이는 불안정한 고성능AF감수제에 따른 과다한 공기량의 연행 때문으로 사료되고, 플라이애쉬 대체율 45%, 60%는 플라이애쉬의 과다 사용으로 초기 재령

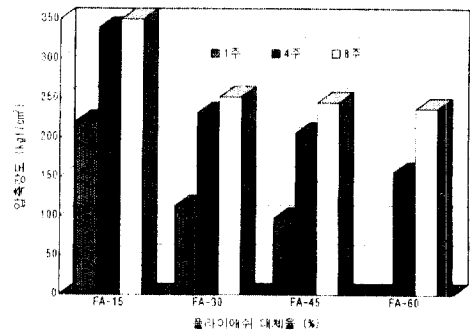


그림 13 재령별 압축강도의 발현변화

에서 경화지연 현상이 발생했기 때문으로 사료된다. 특히, 플라이애쉬 대체율 60%의 경우 응결지연현상이 두드러지게 나타나고 있다.

#### 4.2 정탄성계수 및 포와송비의 변화

그림 14는 플라이애쉬 대체율에 따른 정탄성계수와 포와송비를 나타낸 것이다. 정탄성계수는 플라이애쉬 대체율이 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 플라이애쉬 대체율이 증가하므로써 골재량이 점차적으로 감소하여기 때문으로 사료된다.

포와송비는 플라이애쉬 대체율이 증가할수록 정탄성계수와 반대로 약간 증가하는 경향을 보이고 있지만 전반적으로 0.13~0.16의 낮은 범위를 보이고 있다.

#### 4.3 플라이애쉬 대체율에 따른 압축강도와 각종 비파괴검사와의 상관관계

그림 15와 같이 동탄성계수와 반발도는 압축강도와 상관성  $R=0.93$ 이상의 대체로 양호한 상관성을 보이고 있다. 향후 고유동콘크리트의 경화특성을 알아보기 위해서는 압축강도와 더불어 동탄성계수와 반발도를 사용하는 것이 유리할 것으로 사료된다.

### 5. 결 론

아직군지않은 고성능유동화콘크리트의 고유동특성 및 각종 성능평가와 경화콘크리트의 제공학적 특성을 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 플라이애쉬 대체율에 따라 가장 양호한 조합은 플라이애쉬 대체율 30%에서 가장 양호한 경향을 보이는 것으로 판단된다. 플라이애쉬 대체율 30%의 압축강도가 비록 낮게 나타났지만 경시 60분까지 소요의 유동성 및 점성, 간극통과성, 충전성 등을 만족하고 있고, 약간 낮은 압축강도는 적절한 공기량으로 제어하면 충분한 소요강도를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 플라이애쉬 대체율 45, 60%도 소요의 유동성 및 간극통과성, 충전성을 보유하고 있지만 점성이 상대적으로 강하며, 응결지연현상이 클 것으로 사료되며, 플라이애쉬 15%는 경시에 따라 유동성 저하가 크므로 고성능AE감수제의 재첨가 방법 등을 통하여 품질관리를 해야할 것으로 사료된다.
- 2) 향후 고유동콘크리트의 품질관리 평가시에는 슬럼프-플로우치나 L형 플로우치로만 평가하기보다는 유동속도 즉, 슬럼프-플로우의 경우에는 50cm면적통과속도와 L형 플로우에서는 50cm구간 통과속도를 레오로지측면의 소성점도와 항복치와의 관계처럼 함께 평가하는 것이 바람직할 것

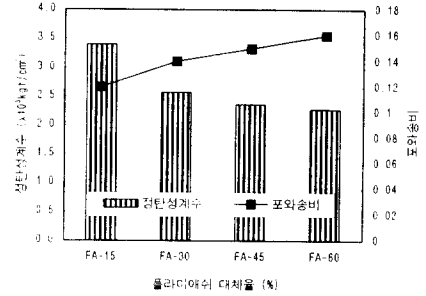


그림 14 재령 4주 정탄성계수 및 포와송비

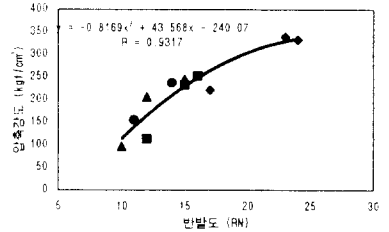
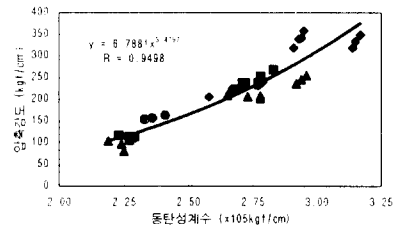
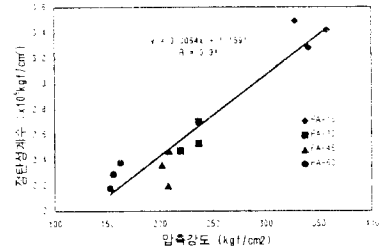


그림 15 압축강도와 각종 비파괴검사와의 상관관계

이다. 또한 V로트, L형 간극통과성, 박스충전성 등을 이용하여 고유동콘크리트의 간극통과성, 재료분리저항성 및 충전성도 함께 평가하는 하여 고유동콘크리트의 종합적인 품질관리를 하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

● 참고문헌 ●

1. High-performance Concrete, Network of centres of excellence on High-performance Concrete, Funded by The natural sciences and Engineering research council of Canada, February 1993.
2. 松田 敦夫, ほか2 : L型フロー試験フロー値の時間による高流動コンクリートの品質評価, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 17, No.1, 1995, pp. 11~16.
3. 浅井 洋, ほか3 : 高流動コンクリートのフレッシュ性狀に関する基礎的研究, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 16, No.1, 1995, pp.119~124.
5. 岡村 甫 ほか1, 締固の不要への挑戦, セメントコンクリート No.539, Jan.1992, pp. 2~9.
6. 岡村 甫 ほか1, 締固の不要コンクリートの施工, セメントコンクリート No.558, 1993.8, pp. 1~7