

# 고유동콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구

## A Study of the Characteristics of the High-Flowable Concrete

전 현 규\*   김 대 회\*\*   이 종 찬\*\*\*   지 석 원\*\*\*\*   유 택 동\*\*\*\*\*   서 치 호\*\*\*\*\*  
 Jeon, Hyun-Kyu,   Kim, Dae-Hoi,   Lee, Jong-Chan,   Ji, Suk-Won,   Yoo, Taek, Dong,   Seo, Chee-Ho

### Abstract

In this research, we used fly-ash and blast-furnace slag as substitute material of cement and fine aggregate, and we, through experiments, researched and analyzed the features of high-flowable concrete added high efficiency AE water reduction agent. The results are below.

1. Liquefaction generally presented high-slump flow value; on the other hand, partial segregation was observed in case of mixing proportion with 65 cm slump flow and above. This segregation was partially improved in accordance with mixing admixture.
2. Compressive strength according to mixing admixture and increasing mixing ratio of fly-ash were subject to be declined when it was initially cast-in, but its gap was improved when time was fully passed.
3. After mixing blast-furnace slag and fly-ash as substitute material, the result showed that the modulus of elasticity against freezing & melting was improved according to mixing blast-furnace slag and also increased in accordance with increasing pulverulent-body volume.
4. According to increasing the mixing volume of fly-ash, the durability factor was deteriorated because compressive strength became lower as well as air content was decreased when it was initially case-in.
5. The minimum air content to secure durability was 3.7%, for that reason, we had better secure admixture such as air entraining agent when cast-in high-flowable concrete.

키워드 : 유동화제, 고유동콘크리트, 동결융해저항성  
 superplasticizer, high-flowable concrete, freezing and thawing resistance

## 1. 서 론

콘크리트의 성능개선을 통하여 콘크리트 구조물의 신뢰성 향상, 시공의 합리화, 시공환경 등에 대처하기 위한 방안으로 작업성을 향상시킨 고유동콘크리트에 대한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다.

또한 구조물의 성능저하 현상은 내·외부적인 영향과 물리·화학적 요인 등에 의하여 재료의 품질, 기능 등 구조물의 성능이 시간이 경과함에 따라 저하되는 현상을 의미하며, 일반적으로 내구성이란 성능저하에 대하여 저항하며, 요구되는 역학적, 기능적 성능을 보유할 수 있는 능력을 의미한다.

실제 콘크리트의 성능저하현상은 여러 요인들의 복합적인 작용으로 발생하며, 내구성 성능저하 원인 중 건조수축, 염해, 황산염 침식 및 알칼리 골재반응은 단기적이고 환경조건에 따라 검토되어야 할 항목이다.

따라서 본 연구에서는 현재 일반 콘크리트 제조공장에서

일반적으로 사용되고 있는 혼화제인 플라이애쉬와 제철소에서 부산물로 생산되는 고로슬래그를 각각 시멘트 및 잔골재의 대체재료로 사용하고, 고성능AE감수제를 첨가하여 재료분리를 일으키지 않고 목표 슬럼프플로우 65±5cm의 유동성을 확보한 고유동 콘크리트의 제반특성과 동결융해에 미치는 영향에 대하여 실험을 통하여 연구·분석하였다.

## 2. 실 험

### 2.1 사용재료

#### 1) 시멘트

본 실험에서는 KS L 5201에 규정된 S사 제품인 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다.

표 1. 시멘트의 물리적 성질

비 중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	응 결		안정도 (%)	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )		
		초결 (분)	종결 (분)		3일	7일	28일
3.15	3,235	293	384	0.09	202	273	361

\* 우석대학교 건축공학과 겸임교수, 공학박사  
 \*\* 관동대학교 건축학부 겸임교수, 공학박사  
 \*\*\* 수원과학대학 건축설비학과 겸임교수, 박사수료  
 \*\*\*\* 건국대학교 건축대학 강사, 공학박사  
 \*\*\*\*\* 건국대학교 건축대학 강의교수, 공학박사  
 \*\*\*\*\* 건국대학교 건축대학 교수, 공학박사

표 2. 시멘트의 화학적 성분

성분	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Free CaO	강열 감량
함량 (%)	61.3	21.1	5.2	2.8	4.00	2.40	0.60	2.00

2) 골재

본 실험에 사용한 잔골재는 강모래와 세척사를 1:1로 혼합하여 입도조정한 시료를 사용하였으며, 굵은 골재로는 콘크리트 생산공장에서 가장 일반적으로 사용하고 있는 25mm 이하의 쇄석을 사용하였다. 실험에 사용한 굵은골재와 잔골재의 물리적 성질은 표 3과 같다.

표 3. 골재의 물리적 성질

골재	골재 최대치수	비중	흡수율 (%)	조립율 (FM)
잔골재	5mm이하	2.53	1.59	2.68
굵은골재	25mm이하	2.61	1.23	6.79

3) 플라이애쉬

본 실험에 사용한 플라이애쉬는 미연소탄소의 함유량이 적고 입형이 구형에 가까운 보령산 플라이애쉬를 사용하였다.

표 4. 유연탄계 플라이애쉬의 특성

화 학 성 분 ( unit : wt% )							물리적 성질	
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	SO <sub>3</sub>	CaO	분말도	비중
67.8	24.5	5.10	0.45	1.23	0.3	2.15	3,172	2.19

4) 고로슬래그

본 실험에 사용한 고로슬래그는 제철용 고로에서 발생된 포항산 서냉슬래그 파쇄 잔토분으로 No 16번 체로 체가름하여 사용하였다.

5) 고성능 AE 감수제

본 실험에 사용한 고성능 AE 감수제는 나프탈렌계로서 비중이 1.20±0.02이며, 암갈색의 액상혼화제로 그 특성은 다음 표 5와 같다.

표 5. 고성능 AE 감수제의 특성

유형	색	주성분	독성	빙점	비중
액상	암갈색	Naphthalene sulphonate	없음	-2℃	1.20±0.02

2.2 배합계획

본 실험의 배합조건은 플라이애쉬를 시멘트 대체 혼화재료로, 고로슬래그를 잔골재 대체 혼화재료로 혼입율을 변화시켰으며, 단위결합재량은 400, 440, 480, 520kg/m<sup>3</sup>으로 변화시켰

다. 또한 유동성을 확보하기 위하여 고성능AE감수제를 적정량을 첨가하였다. 이에 따른 실험수준 및 인자는 표 6과 같다.

표 6. 실험인자 및 수준

요인	단위결합재량 (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>3</sup> )	S/a (%)	혼입율(%)	
				플라이애쉬	고로 슬래그
인자	400, 440 480, 520	175	50	0, 10, 20, 30	0, 10
수준	4	1	1	4	2

2.3 실험방법

혼화제를 혼입한 고유동콘크리트의 특성을 파악하기 위한 본 실험은 다음과 같은 방법으로 실험을 실시하였다.

1) 슬럼프플로우 측정 시험

슬럼프플로우 값 측정은 KS F 2402의 규정에 따른 시험기를 사용하였고 단, 슬럼프 판은 유동화 콘크리트의 특성상 수밀성을 가지고 평면이 평활한 90×90cm의 강판을 제작하여 사용하였다.

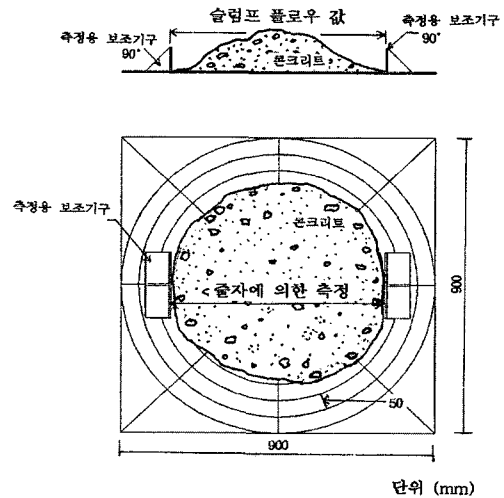


그림 1. 슬럼프플로우 시험장치

2) 압축강도 시험

정확한 유동화콘크리트의 압축강도 시험은 KS F 2403에 의거하여 φ10×20cm 압축강도 시험용 공시체를 각 재령별로 3개씩 제작하여 23±2℃의 수중에서 수중양생을 한 후 28일이 경과한 후에 KS F 2405의 규정에 따라 압축강도 시험을 실시하였다.

3) 동결융해 시험

동결융해 시험은 KS F 2456(급속동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험법)의 규정에 따라 8×10×40cm의 시험체를 제작하여 2주간 수중양생을 실시한 후, 동결융해시험장치를 사용하여 기중동결, 수중융해의 조건으로 시험체에 대하여 간

극수의 빙점 이하의 온도와 빙점 이상의 온도를 주기적으로 가하여 시험을 실시하였다.

동결융해 시험 이후의 손상은 초음파속도법에 의하여 일정한 주기로 동탄성계수를 측정하여 판단하였으며, 다음 식에 의해 동탄성계수 Ed와 내구성지수를 측정하여 평가하였다.

$$Ed = (Vp2 \times \rho \times 107)/g \text{ ---- (식 1)}$$

여기서

- Ed = 동탄성계수(kg/cm2)
- Vp2 = 초음파 전파속도(km/sec)
- $\rho$  = 콘크리트 밀도(kg/cm3)
- g = 중력가속도(kg/sec2)

$$\text{내구성 지수 } DF = (C \times N)/M \text{ -- (식 2)}$$

여기서 DF : 내구성 지수

- C : N사이클 수의 동탄성계수
- N : 사이클 수
- M : 시험 종료 때의 사이클 수

### 3. 실험결과 및 고찰

고유동콘크리트의 내구특성 중 동결융해 특성을 파악하기 위하여 본 실험에서는 국내에서 생산되는 혼화재인 플라이애쉬와 고로슬래그를 사용하고 고성능AE감수제를 사용하여 실험을 실시한 결과는 표 7과 같다.

#### 3.1 유동성 평가

본 실험에서 배합직후의 슬럼프플로우값을 65±5cm의 범위로 확보하기 위하여 고성능AE감수제의 첨가량을 변화시켰으며, 그 결과 59~66cm로 나타나 목표하는 슬럼프플로우값을 확보하였다.

유동화 형상은 대체적으로 높은 슬럼프플로우값을 나타낸 반면 슬럼프 플로우 65cm 이상의 배합에서 부분적으로 재료 분리현상이 관찰되었으며, 이러한 재료분리현상은 혼화제 혼입에 따라 부분적으로 개선되는 모습을 나타내었다.

#### 3.2 압축강도

본 실험에서 나타난 혼화제를 혼입한 고유동콘크리트의 강도 특성을 살펴보면 다음과 같다.

##### 1) 플라이애쉬 혼입에 따른 압축강도

플라이애쉬의 혼입율을 10%씩 단계별로 증가시킴에 따라 압축강도는 무혼입에 비하여 2%, 7%, 10%의 강도감소를 나타냈으며, 단위결합재량별 플라이애쉬 혼입에 따른 영향은 전반적으로 유사한 결과를 나타냈다.

이러한 강도감소현상은 초기재령에는 두드러지게 나타났으나, 장기재령으로 갈수록 강도감소의 폭은 줄어들어 플라이애

쉬 특성인 포졸란 반응에 의한 장기강도 개선의 효과로 사료된다.

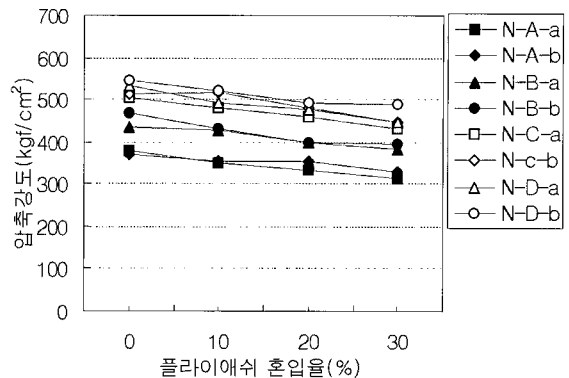


그림 2. 플라이애쉬 혼입에 따른 압축강도(재령 4주)

##### 2) 고로슬래그 혼입에 따른 압축강도

고로슬래그를 혼입한 경우와 혼입하지 않은 경우의 압축강도는 유사한 경향을 나타냈으며, 각 재령별 강도발현에 미치는 영향은 비교적 미미하나 장기재령에서 소폭의 강도증진 효과가 나타났다.

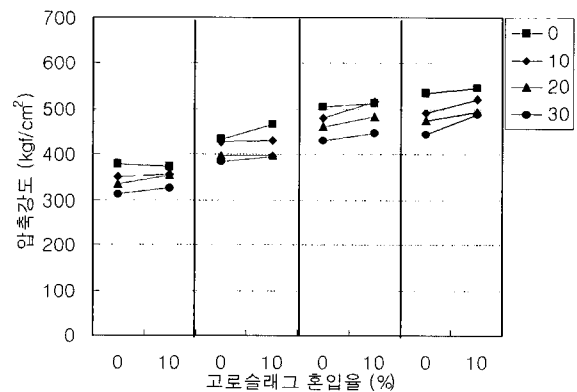


그림 3. 고로슬래그 혼입에 따른 압축강도(재령 4주)

이는 본 실험에 사용된 고로슬래그가 서냉슬래그 파쇄 잔토분으로서 잔골재와 유사한 입도범위를 지니고 있으며, 잠재수경성 재료로서 장기강도 증진효과가 있는 것으로 나타난 기존 연구결과와 유사한 경향을 보이고 있다.

##### 3) 재령에 따른 압축강도

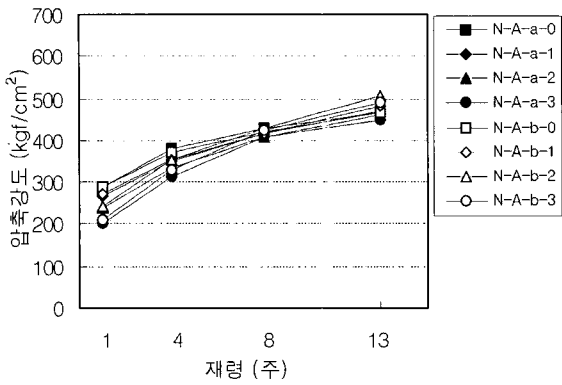
혼화제를 혼입한 고유동콘크리트의 재령별 압축강도 발현율은 4주강도를 기준으로 72%, 83%, 116%, 126%를 나타냈으며, 단위결합재량별 강도발현율은 4주 이전의 재령에서는 단위결합재량에 의한 영향이 미미하나, 4주 재령이후부터 단위결합재량이 많을수록 강도발현율은 점차로 낮아지는 경향을 나타내었다.

그리고, 플라이애쉬 혼입율에 따른 재령별 압축강도 발현율은 플라이애쉬 혼입율이 단계별로 증가함에 따라 재령 4주와 비교하여 재령 1주 및 2주에서는 평균 70.8%, 81.8%로 나타나 플라이애쉬 혼입율이 증가할수록 낮은 압축강도 발현율을 보이고 있으나, 감소폭은 재령이 경과함에 따라 낮아지는 것으로 나타났다.

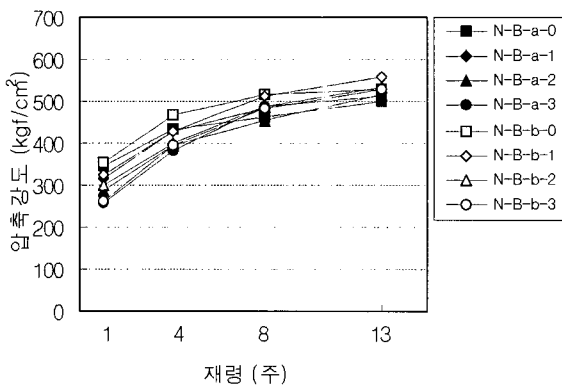
표 7. 실험결과표

공시체 번호	slag (%)	F.A (%)	슬럼프 플로우 (cm)	공기량 (%)	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )				상대동탄성계수(%)											Final Cyc.	D.F (%)
					1주	4주	8주	13주	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300		
N-A-a-0	0	0	63	4.5	287	378	428	464	100	99.5	96.5	98.5	90.2	93.2	91.8	89.2	93.5	90.1	89.8	300	90
N-A-a-1		10	62	4.6	266	352	415	468	100	93.7	93.7	95.8	98.5	90.2	88.5	91.2	96.4	95.1	91.7	300	92
N-A-a-2		20	63	4.4	238	334	408	460	100	95.6	95.6	94.1	92.8	86.7	91.2	96.4	90.2	91.2	90.3	300	90
N-A-a-3		30	60	4.3	203	312	407	450	100	94.7	99.9	95.5	95.1	95.1	98.1	94.2	95.3	90.2	87.2	300	87
N-A-b-0	10	0	61	5.0	290	372	422	466	100	96.5	97.8	96.5	95.9	94.5	92.5	93.7	96.5	94.9	93.8	300	94
N-A-b-1		10	62	4.5	271	356	415	482	100	98.2	95.7	97.8	97.4	98.2	97.4	99.1	90.1	95.4	91.3	300	91
N-A-b-2		20	63	4.4	241	355	428	507	100	100	96.5	92.1	95.6	93.4	95.2	96.4	97.4	92.1	90.9	300	91
N-A-b-3		30	59	4.0	211	328	424	489	100	99.1	102	95.7	93.6	94.4	95.7	93.2	94.4	93.2	80.3	300	80
N-B-a-0	0	0	64	4.3	347	435	463	502	100	102	99.1	94.7	96.3	95.4	93.6	94.4	93.2	94.5	86.0	300	86
N-B-a-1		10	64	3.3	316	428	482	529	100	95.4	95.8	93.2	88.9	82.4	65.7	33.7	-	-	-	195	39
N-B-a-2		20	66	3.2	289	397	454	518	100	100	99.2	89.4	90.3	85.1	80.7	43.2	-	-	-	167	39
N-B-a-3		30	66	3.2	259	383	488	511	100	100	98.4	95.1	84.1	80.4	70.5	35.8	-	-	-	159	38
N-B-b-0	10	0	61	4.7	356	466	517	530	100	99.5	100	98.2	97.4	96.7	95.3	95.3	97.0	97.4	93.9	300	94
N-B-b-1		10	60	4.0	325	431	511	557	100	91.7	83.9	85.8	85.8	85.9	86.2	82.5	86.2	79.3	82.4	300	82
N-B-b-2		20	62	3.8	299	399	487	533	100	104	97.4	91.3	96.1	96.5	97.0	95.7	88.6	79.9	73.3	300	73
N-B-b-3		30	62	3.9	262	396	485	530	100	102	99.1	94.4	95.7	95.7	94.4	93.2	89.1	85.7	75.3	300	75
N-C-a-0	0	0	65	4.0	382	506	534	511	100	96.0	97.7	95.9	96.8	99.4	95.9	90.1	90.2	87.1	93.3	300	93
N-C-a-1		10	64	4.2	358	481	538	543	100	100	92.9	98.4	90.2	93.2	91.2	90.3	94.2	92.9	85.3	300	85
N-C-a-2		20	65	3.5	299	461	522	502	100	94.7	99.9	98.1	94.2	95.3	90.1	85.4	88.4	56.4	-	267	53
N-C-a-3		30	63	2.9	239	432	504	494	100	96.8	94.4	89.9	84.4	80.8	26.6	-	-	-	-	161	32
N-C-b-0	10	0	62	4.2	384	512	533	582	100	91.9	89.5	91.1	89.9	91.1	90.4	89.1	89.9	90.7	85.7	300	86
N-C-b-1		10	61	3.4	362	517	548	580	100	99.5	98.2	92.1	87.5	80.2	70.4	40.3	-	-	-	190	38
N-C-b-2		20	62	2.8	318	482	553	587	100	96.0	93.1	91.5	89.1	84.1	39.3	-	-	-	-	166	33
N-C-b-3		30	61	2.5	243	447	564	571	100	99.5	96.7	62.0	29.2	-	-	-	-	-	-	91	18
N-D-a-0	0	0	60	3.2	412	535	577	598	100	99.4	96.1	90.4	83.1	75.5	62.1	10.4	-	-	-	190	38
N-D-a-1		10	60	3.5	365	491	567	575	100	93.4	95.6	98.9	96.4	95.9	96.8	88.4	80.3	51.4	-	261	52
N-D-a-2		20	64	3.7	345	475	530	557	100	103	99.9	98.5	97.0	96.6	97.8	96.2	90.1	80.4	18.7	280	56
N-D-a-3		30	63	3.3	341	446	513	523	100	98.8	96.4	95.1	91.4	88.7	81.5	20.7	-	-	-	191	38
N-D-b-0	10	0	62	4.1	422	546	573	597	100	102	92.0	92.8	94.4	92.8	91.6	92.0	92.0	90.2	86.4	300	86
N-D-b-1		10	64	3.7	372	521	570	614	100	106	98.6	98.6	94.1	85.6	95.4	85.1	88.1	80.3	51.4	291	58
N-D-b-2		20	62	3.7	353	494	564	573	100	104	100	98.2	97.8	98.7	92.8	86.1	90.5	85.7	12.8	290	58
N-D-b-3		30	60	3.5	360	488	544	588	100	107	101	101	95.2	93.1	91.5	82.4	85.1	46.3	-	259	52

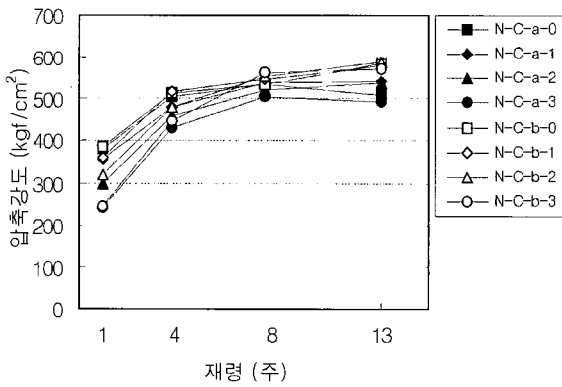
주) N : 쇠석사용 고유동콘크리트 A : 단위결합재량 400kg/m<sup>3</sup> B : 440kg/m<sup>3</sup> C : 480kg/m<sup>3</sup> D : 520kg/m<sup>3</sup>  
a : 고로slag 0% b : 고로slag 10%  
0 : 플라이애쉬 0% 1 : 플라이애쉬 10% 2 : 플라이애쉬 20% 3 : 플라이애쉬 30%



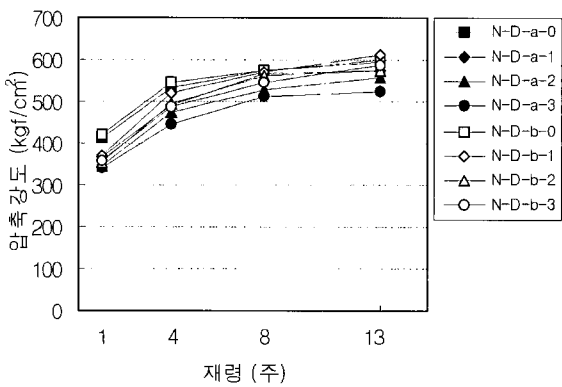
(a) 단위결합재량 400kg/m<sup>3</sup>



(b) 단위결합재량 440kg/m<sup>3</sup>



(c) 단위결합재량 480kg/m<sup>3</sup>



(d) 단위결합재량 520kg/m<sup>3</sup>

그림 4. 재령에 따른 압축강도

### 3.3 동결융해 저항성

#### 1) 상대동탄성계수에 따른 동결융해저항성

플라이애쉬의 혼입율이 많은 배합에서 상대동탄성계수가 다소 낮게 나타나는 것으로 관찰되었으나, 플라이애쉬의 재료적 성질에 기인한 상대동탄성계수의 감소보다는 플라이애쉬를 혼입함에 따라 나타나는 초기재령에서의 강도저하와 공기량의 감소에 기인하는 것으로 판단된다.

분체량 480kg/m<sup>3</sup>, 520kg/m<sup>3</sup>의 경우 고로슬래그에 의한 상대동탄성계수의 확보 및 플라이애쉬 혼입량 증가에 따른 상대동탄성계수의 감소를 확인 할 수 있었으며, 특히 고로슬래그 무혼입의 경우 플라이애쉬를 혼입하지 않은 배합에서 가장 불리한 내동해성을 보여 180사이클에서부터 급격히 감소된 상대동탄성계수를 볼 수 있었다.

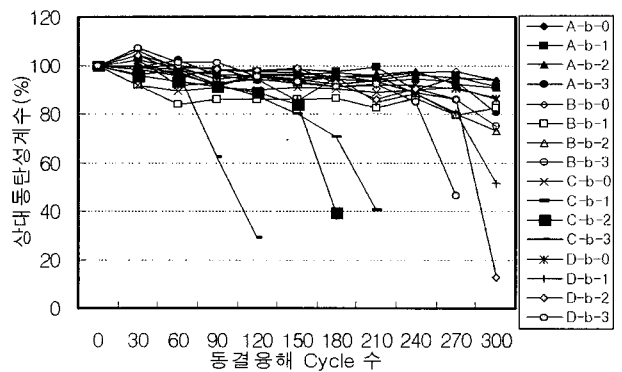


그림 5. 동결융해 사이클수와 상대동탄성계수

#### 2) 내구성 지수에 따른 동결융해 저항성

플라이애쉬 혼입율의 증가에 따른 내동해성 저하는 유사하나 고로슬래그의 혼입 유무에 따라 상대동탄성계수의 경우 혼입시 큰 차이를 보이며 양호한 값을 나타내던 것에 반하여 내구성지수 측면에서는 오히려 분체량에 따라 서로 다른 경향을 보였다. 내구성 지수는 대부분의 영역에서 고로슬래그의 혼입이 다소 유리하게 나타났다.

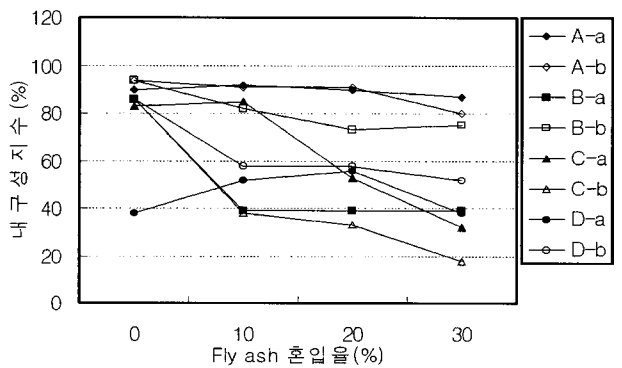


그림 6. Fly-ash 혼입율과 내구성지수

고로슬래그의 경우, 혼입한 경우가 더 우수한 내구성능을 가지고 있다고 할 수 있으며, 플라이애쉬 혼입율은 20%를 기점으로 내구성지수가 저하되어 적절한 혼입율에 대한 고려가 요구되는 것으로 판단된다.

### 3) 공기량과 동결융해 내구성지수

고유동콘크리트의 공기량이 3.5% 이하인 경우 내구성지수는 40% 이하를 나타내고 있어 내동해성 향상을 위한 적정 공기량의 확보가 필요한 것으로 판단된다.

콘크리트의 내구성능 지표를 내구성지수 60% 내지는 80% 이상으로 볼 때, 고유동콘크리트의 최소한의 하한 공기량 기준을 표시한다면 약 3.7~4.0% 이상을 확보하는 것이 필요하다고 판단된다.

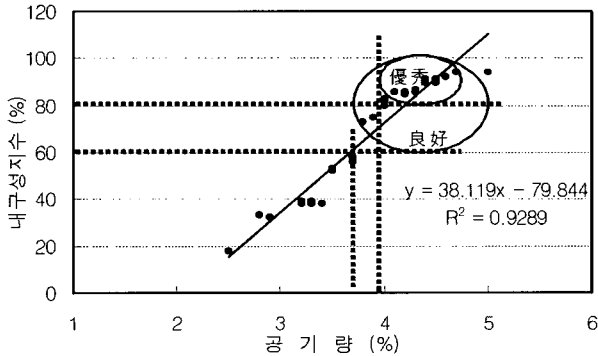


그림 7. 공기량과 내구성 지수

### 4. 결 론

플라이애쉬와 고로슬래그를 각각 시멘트 및 잔골재 대체재로 사용하여 제조된 고유동콘크리트의 특성을 분석하기 위하여 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유동화 현상은 대체적으로 높은 슬럼프플로우값을 나타낸 반면 슬럼프 플로우 65cm 이상의 배합에서 부분적으로 재료 분리현상이 관찰되었으며, 이러한 재료분리현상은 혼화재 혼입에 따라 부분적으로 개선되는 모습을 나타내었다.
2. 혼화재 혼입에 따른 압축강도는 플라이애쉬 혼입을 증가에 따라 압축강도는 초기재령에서는 감소하는 경향을 나타냈으나, 장기재령에서는 그 감소의 폭이 개선되었다.

3. 고로슬래그와 플라이애쉬를 대체재로 사용하여 혼입한 결과 고로슬래그의 혼입에 따라 상대동탄성계수의 개선효과를 나타내고 있었으며, 분체량이 증가할수록 높은 값을 나타냈다.
4. 플라이애쉬 혼입량이 증가함에 따라 초기재령에서의 낮은 압축강도와 공기량의 감소로 내구성 지수는 저하하는 것으로 나타났다.
5. 내구성 확보를 위한 최소한의 공기량은 3.7% 이상으로 나타났으며, 고유동콘크리트의 제조시 공기연행제 등과 같은 혼화제의 투입으로 공기량을 확보하여야 할 것으로 판단된다.

이러한 결과를 토대로 고유동콘크리트의 개발과 실용을 위하여 내구성 증진을 위한 동결융해 저항성을 향상시키기 위한 혼화제의 최적 혼입량에 대한 지속적인 연구와 실제 구조물에 적용되어 다양한 현장조건에 노출시킨 장기간의 평가가 이루어져야 할 것으로 사료되며, 고유동콘크리트의 각 성능저하에 대한 심도있는 연구와 성능저하의 복합작용 등에 대한 깊이 있고 지속적인 연구가 요구된다.

### 참 고 문 헌

1. 대한건축학회, 철근콘크리트 구조물의 내구성 향상에 관한 심포지움, 대한건축학회, 1995. 5
2. 전현규, 고유동콘크리트의 내구성에 관한 실험적 연구, 건국대학교 박사학위논문, 1999. 8
3. 전현규, 홍순조, 서치호, 고유동경량골재콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집 구조계, 17권 4호 통권 150호, 2001. 4
4. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조물의 성능저하와 내구성, 콘크리트 학회지, 1992. 4
5. 한국콘크리트학회, 최신콘크리트공학, 한국콘크리트학회, 1993. 6
6. 岡田 清, 콘크리트의耐久性, 朝倉書店, 1986.
7. 笠井芳夫, 콘크리트의試驗方法(下), 技術書院, 1993