

구조용 경량골재 개발에 따른 경량콘크리트의 동결융해특성에 관한 연구

Property Evaluation of the Freeze-Thawing for Lightweight Concrete with Development of Structural Lightweight Aggregates

장 동 일* 채 원 규** 조 광 현*** 김 광 일**** 손 영 현****
Chang, Dong Il Chai, Won Kyu Cho, Kwang Hyun Kim, Kwang Il Son, Young Hyun

Abstract

In this study, lightweight aggregates were developed to see the possible application as a structural uses.

For the evaluation purpose, several testings were conducted to compare the physical characteristics between the controlled lightweight aggregates and other lightweight aggregates purchased from different sources. The tests included property changes of fresh concrete and strength characteristics of hardened concrete for both normal and high strength ranges.

In addition, a experiment was performed to analyze the freezing and thawing resistance of new lightweight aggregate concrete against other lightweight aggregate concretes with some experimental parameters such as lightweight aggregates, curing conditions, and water-cement ratio.

The test results showed that the new lightweight aggregate could be used structural components. Continuous study will be planned for future evaluations.

1. 서론

경량콘크리트를 구조재료로 사용하면, 고층화 및 대형화에 따른 부재단면 확대를 경량화로 축소할 수 있으며, 이에 따른 기초비 절감효과를 볼 수 있고, 건물의 경우 단열성능 향상에 따른 에너지 절약 효과를 볼 수 있어 전체적으로 공사비 절감효과가 있다고 알려지고 있다. 또한, 경량골재를 사용함으로써 부족한 천연골재의 의존도를 저감시킬 수 있으므로 향후 골재수급에 대비를 할 수 있을 것이다.

선진 각국에서는 이러한 경량콘크리트의 장점을 인지하여, 현재까지 지속적이고 심도있는 연구를 수행하고 있다. 최근에는 난방비 절감이나 방음성능 개선을 위해 주택 외벽용으로 폭넓게 사용되고 있으며, 일반 구조물 뿐만 아니라 해양구조물 등의 특수 구조물에 이르기까지 경량콘크리트가 폭넓게 활용되고 있는 실정이다.⁵⁾ 그 예로 노르웨이의 Gullfaks C는 인류역사상 가장 큰 해양구조물로 유명하며

* 한양대학교 지구환경건설공학부 교수

** 신구전문대 토목과 조교수

*** 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

**** 현대건설(주) 기술연구소

압축강도 650~700 kg/cm²의 경량콘크리트 구조물이다. 또한, 노르웨이의 New Eidsvoll Bridge는 부교(浮橋)로서 PC 콘크리트거더교 형식의 단위용적중량 1.88t/m³, 강도 550 kg/cm²를 갖는 경량콘크리트로 건설되었다. 특히 최근에는 노르웨이 등지에서 굵은골재의 일부를 경량골재로 치환하여 경량콘크리트의 장점을 유지시키면서 강도나 기타 특성에서 보통콘크리트와 유사한 특성을 갖도록 제조한 MND(Modified Normal Density)콘크리트에 대한 연구¹⁾를 수행하여 단위용적중량 2.25t/m³, 압축강도 750kg/cm²를 갖는 새로운 초고강도 콘크리트에 적용하고 있는 실정이다.

한편, 국내의 경우 국내산 경량골재는 외국산에 비하여 골재 자체의 강도나 흡수율 등의 품질면에서 떨어지는 경향이 있으며, 이에 따라 구조용으로서 경량콘크리트의 사용에는 거의 전무한 실정이며, 일부 비구조용으로 이용되고 있다.

근래에 와서 경량콘크리트에 대한 수요가 증가하면서 인공경량골재와 천연경량골재 등 각종 경량골재를 이용한 콘크리트의 제조가 증가하고 있고 그에 따라 경량골재가 전 세계적으로 개발¹⁾되고 있다. 특히 국내에서도 인공경량골재의 개발을 통해 경량콘크리트의 이용이 늘어나고 있는데 이를 구조용으로 사용하려면 강도 못지 않게 내구성이 중요하게 취급된다. 특히 해양구조물이나 경량PC패널 등을 제작하여 외벽 등에 사용을 하려면 강도 및 내구성에 대한 평가가 반드시 이루어져야⁴⁾ 한다.

따라서, 본 연구는 새로이 개발한 경량골재에 대한 내구성을 규명하고 이를 기 생산중인 국내외산 경량골재 및 보통골재와 비교하기 위하여 수행되었다. 이를 위해 국내산 2종류 및 외국산 2종류(독일산 1종류, 일본산 1종류) 등 모두 4종류의 인공경량골재를 수집하여 경량골재콘크리트 공시체를 제조하고 이를 동결융해 처리하면서 그 동탄성계수의 변화 및 압축강도의 상태를 통해 내구성을 비교, 고찰하는 것을 본 연구의 목적으로 하고 있다.

2. 사용재료의 특성 및 실험개요

2.1 보통 및 경량굵은골재의 특성

본 연구에서는 새로이 개발한 경량골재(K10)와 기 생산중인 국내산 1종류, 독일산 1종류, 일본산 1종류 등 모두 4종류의 경량골재를 사용하였다. 각 골재에 대한 물리적 성질은 표 1과 같다.

표 1 사용골재의 물리적 성능

사용골재	Max. size (mm)	표건비중 (g/cm ³)	Unit weight (g/cm ³)	흡수율 (%)
국내산(AC)	19	1.16	0.595	15.5
독일산(G6)	16	1.25	0.678	13.3
일본산(JC)	15	1.43	0.789	7.7
국내산(K10)	13	1.33	0.730	7.3
천연(NC)	19	2.65	1.701	0.65

2.2 실험개요 및 방법

2.2.1 실험개요

본 실험은 크게 두가지로 나누어서 수행하였으며, 1차 실험에서는 경량콘크리트의 동결융해저항성에

영향을 미치는 인자를 파악하기 위한 실험을 수행하였고, 2차 실험에서는 고강도 경량콘크리트의 동결융해저항성에 관한 실험을 수행하였다. 그 실험내용과 실험인자는 다음의 표 2와 같다.

표 2 동결융해실험 내용 및 인자

	물시멘트비 (%)	사용골재		양생 조건
		보통Con'c	경량Con'c	
1차 실험	55, 50, 45	쇄석+ 강모래	국내산 2종, 외국산 2종+강모래	기건, 수중
2차실험	37, 33	쇄석+ 강모래	국내산 1종, 외국산 1종+강모래	-

한편, 보통강도 및 고강도에서 제조한 경량 및 보통콘크리트의 슬럼프 값은 $8 \pm 2.5\text{cm}$ 로 하였으며, 그 설계강도 및 배합비는 표 3과 같다.

표 3 보통 및 고강도 배합비

σ_{ck} (kg/cm ²)	사용 골재	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	단위량(kg/m ³)				혼화 제%
					W	C	S	G	
170	JC	4	55	46	165	300	837	541	0.2 ¹⁾
	G6							473	
	K10							503	
	AC							438	
	NC							990	
210	JC	4	50	45	165	330	807	543	0.2 ¹⁾
	G6							474	
	K10							505	
	AC							440	
	NC							994	
240	JC	4	45	44	165	367	776	543	0.2 ¹⁾
	G6							475	
	K10							505	
	AC							440	
	NC							995	
400	NC	3	37	41	181.3	490	875	978	0.5 ²⁾
	K10							497	
	G6							467	
500	NC	1	33	33	182	550	543	1111	0.5 ²⁾
	K10							564	
	G6							530	

비고 : 1) 공기연행 감수제 표준형특성
2) 고성능 감수제 표준형

2.2.2 실험방법

동결융해에 대한 저항성시험은 KS F 2456³³⁾에 따라 수행하였으며, 사용된 동결융해 시험기는 Satake 제품의 Programmable로서 온도조절 챔버를 이용하여 반복 사이클을 가하였다.

콘크리트의 동탄성계수의 측정은 KS F 2437에 의거하여 수행하였다. 그 측정은 ELE 제품의 동탄

성계수 측정장치를 이용하여 수중양생 또는 기건양생 공시체 각각에 대하여 재령 14일에 최초로(동결융해 처리전) 동탄성계수를 측정하고 이후 매 24사이클 동결융해 처리 후 한 번씩 공시체를 꺼내어 동탄성계수를 측정하였으며, 그때마다 외관상태를 관찰한 후 다시 동결융해 처리를 계속하였다. 한편, 내구성지수(DF : Durability Factor)는 다음 식으로 계산하였다.

3. 동결융해실험

3.1 실험결과

본 연구에서는 앞서 수행한 굳지않은 콘크리트의 시험결과와 압축강도 및 동결융해시험 결과를 정리하여 보면 표 4와 같다.

표 4. 콘크리트의 공기량, 압축강도, 단위용적중량 및 동결융해시험 결과

시험체 종 류	Air (%)	Comp. (kg/ cm ³)	Unit Weight (t/m ³)	동결융해시험 결과			
				I.D. M.E.	Final Cyc.	R.D.M.E	DF
JC-45	-	291	1.751	196	240	60	48
JC-45A	8	391	1.833	194	300	72	72
JC-50	7	192	1.820	165	72	43	10
JC-55	7	204	1.824	164	72	61	15
G6-33	4	464	1.900	224	48	17	3
G6-37	5	434	1.909	225	72	36	9
G6-45	11	323	1.693	206	300	50	50
G6-45A	5	314	1.824	205	288	12	12
G6-50	7	271	1.735	144	24	77	6
G6-55	11	218	1.721	179	144	42	20
K10-33	6	440	1.855	231	72	60	14
K10-37	5	415	1.940	242	168	23	13
K10-45	12	297	1.749	209	300	82	82
K10-45A	6	264	1.809	199	300	63	63
K10-50	12	202	1.731	165	120	88	35
K10-55	11	211	1.752	177	72	82	20
AC-45	10	230	1.637	162	300	70	70
AC-45A	10	283	1.702	141	24	61	5
AC-50	10	198	1.691	159	70	37	9
AC-55	11	128	1.668	151	72	31	7
NC-33	4	500	2.326	361	168	16	9
NC-37	6	449	2.234	359	168	62	35
NC-45	8	332	2.170	357	300	50	50
NC-45A	4	349	2.280	357	288	23	22
NC-50	7	254	2.165	321	300	27	27
NC-55	4	249	2.236	283	120	88	35

비고) I.D.M.E : Initial Dynamic Modulus of Elasticity(초기동탄성계수, (10³kg/cm²))

R.D.M.E : Relative Dynamic Modulus of Elasticity(상대동탄성계수, %)

Final Cyc. : 최종 사이클수

D.F. : 내구성지수(%)

3.2 비강도 분석

압축강도와 단위용적중량의 비를 비강도라 정의하는데, 이로부터 가장 효율이 좋은 콘크리트의 압축강도와 단위용적중량의 배합범위를 예측할 수 있다.

보통강도와 고강도 배합시험 결과에서 얻어진 비강도를 나타내면 그림 1과 같다.

그림 1에서 대체적으로 K10의 경우 독일산 G6와 비슷한 비강도를 보이고 있으며, JC 나 AC 보다 높은 수치를 나타내고 있다.

그림 1에서 알 수 있듯이 높은 물-시멘트(낮은 압축강도)에서는 보통콘크리트(NC)에 비해 비강도가 낮거나 약간 상회함을 알 수 있으며, 물-시멘트비가 낮아질수록 즉 압축강도가 증가될수록 보통콘크리트와 경량콘크리트의 비강도 차이가 대체적으로 커지는 경향을 보이고 있다. 따라서 효율적인 경량콘크리트를 제조하기 위해서는 경량콘크리트의 고강도화가 반드시 필요하다고 판단된다.

3.3 동결융해에 미치는 인자분석

3.3.1 물시멘트비

보통강도 및 고강도 공시체를 동결융해시험 하였을 때의 각 사이클에 있어서 상대동탄성계수를 나타내면 그림 2~그림 4와 같다.

그림 2~4에서 알 수 있듯이 물-시멘트비가 낮아질수록 동결융해저항성은 좋아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 그림 4에서 나타났듯이 고강도라 할지라도 공기량이 부족하면 동결융해저항성이 낮아짐을 알 수 있다. 즉 물-시멘트비 33%에서 NC와 G6의 경우 공기량은 4%인데 이러한 경우의 동결융해저항성은 물-시멘트비 37%의 경우보다 현저히 저하된 결과를 보이고 있다.

따라서 물-시멘트비가 낮은 고강도 경량콘크리트의 내구성능은 비록 강도가 높다고 하더라도 낮은 공기량에서는 동결융해저항성을 기대할 수 없으며, 결국 물-시멘트비 보다는 연행공기량의 증감이 내구성에 더 많은 영향을 미치며⁵⁾, 고강도의 경우 경량콘크리트의 동결융해저항성과 압축강도를 동시에 만족하는 최적의 공기량은 5~7%의 범위에 드는 것으로 사료된다.

그림 2와 그림 3을 살펴보면 물-시멘트 45%에서 경량콘크리트(K10-45)가 보통콘크리트(NC-45)보다 동결융해저항성이 우수함을 보이고 있다. 이는 경량콘크리트라 할지라도 적절한 공기량이 도입되고 물-시멘트비를 낮추어 강도를 높이면 동결융해저항성이 보통콘크리트에 비해 결코 떨어지지 않는다는 것을 알 수 있다.

이상의 실험결과로부터 고강도콘크리트(낮은 물-시멘트를 갖는)라 할지라도 공기량이 적을 경우에는 동결융해저항성이 현저히 저하하는 것과 경량콘크리트라 할지라도 공기량이 적절하게 도입된다면 보통콘크리트에 비해 결코 떨어지지 않으며 오히려 더 우수한 성능을 갖출 수 있다는 것을 알 수 있었다.

한편, 본 실험에서 측정된 공기량은 4~12%를 보이고 있는데 이는 실제의 공기량이 아니라 공기량 측정기를 용적법이 아닌 압력수주법을 이용한 공기량측정기를 사용하여 나타난 결과라고 사료된다.

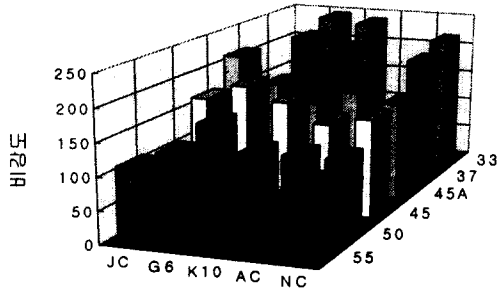


그림 1 물-시멘트 및 골재종류에 따른 비강도 분포

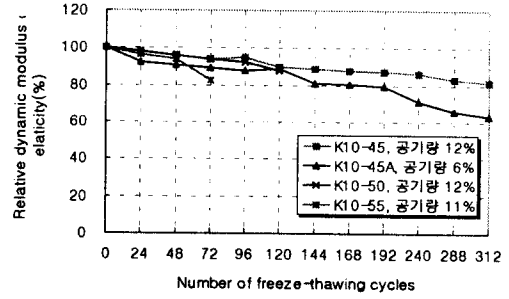


그림 2 경량콘크리트의 동결융해사이클수와 상대동탄성계수와의 관계(국내 B산 경량골재 사용)

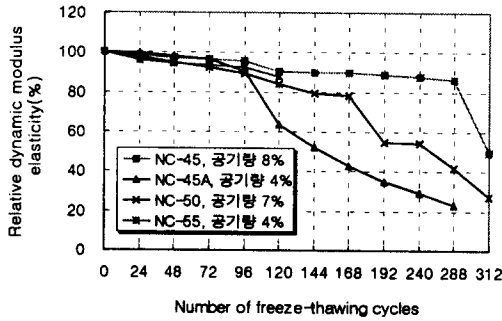


그림 3 보통콘크리트의 동결융해사이클수와 상대동탄성계수와의 관계

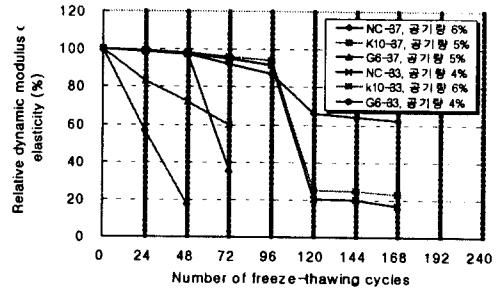


그림 4 고강도에서의 보통콘크리트와 경량콘크리트의 동결융해사이클수와 상대동탄성계수와의 관계

3.2.2 사용골재

사용골재에 따른 동결융해저항성을 비교하기 위하여 물-시멘트비별로 나타내면 그림 5~그림 9와 같다.

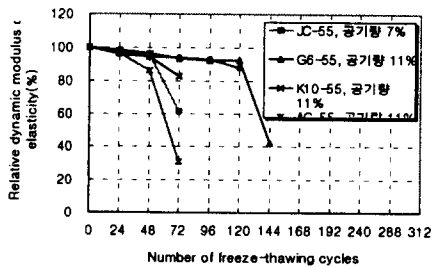


그림 5 사용골재에 따른 각종 콘크리트의 동결융해사이클수와 상대동탄성계수와의 관계(W/C=55%)

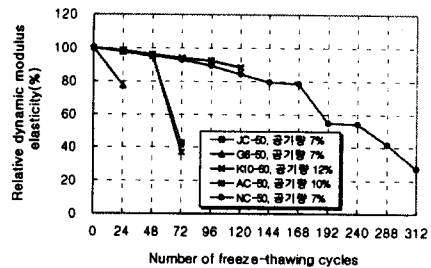


그림 6 사용골재에 따른 각종 콘크리트의 동결융해사이클수와 상대동탄성계수와의 관계(W/C=50%)

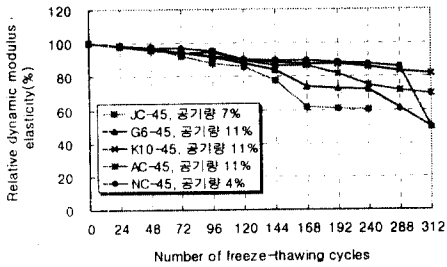


그림 7 사용골재에 따른 각종 콘크리트의 동결융해사이클수와 상대동탄성계수와의 관계(W/C=45%)

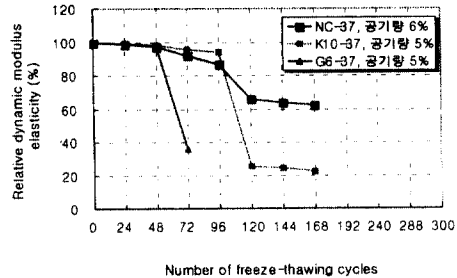


그림 8 사용골재에 따른 각종 콘크리트의 동결융해사이클수와 상대동탄성계수와의 관계(W/C=37%)

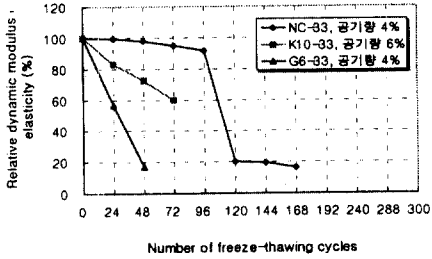


그림 9 사용골재에 따른 각종 콘크리트의 동결융해사이클수와 상대동탄성계수와의관계(W/C=33%)

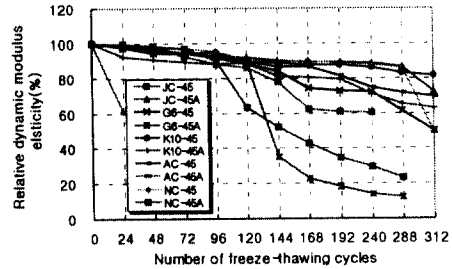


그림 10 양생방법의 차이가 콘크리트의 동결융해저항성에 미치는 영향

기건양생한 물-시멘트비 45%를 제외한다면 K10을 사용한 경량콘크리트가 가장 우수한 동결융해저항성을 보이고 있으며, 그 다음이 NC측 보통콘크리트, 그 다음이 G6, AC, JC를 사용한 경량콘크리트 순서로 동결융해저항성을 갖는 것으로 나타났다. 즉 내구성면에서 K10을 사용한 경량콘크리트가 가장 우수한 내구성을 보이며, G6, AC, JC의 순으로 동결융해저항성을 갖고 있음을 알 수 있다.

3.2.3 양생방법

그림 10은 물-시멘트비 45%에서의 각종골재를 사용한 콘크리트를 양생방법의 차이를 두어 실험한 결과를 보여주고 있다.

그림 10에서 알 수 있듯이 일본산 경량골재(JC)를 사용한 경량콘크리트를 제외하고는 대체적으로 수증양생하였을 경우가 기건양생하였을 경우보다 동결융해저항성이 우수함을 나타내었으나 그 차는 근소함을 보이고 있었다.

4. 결론

- 1) 새로 개발한 KCC 경량골재는 골재의 물리적 성능과 콘크리트의 특성에서 국내외산에 비하여 비교적 우수한 성능을 나타내었다.
- 2) 비강도 분석결과, 설계기준강도가 높아질 수록 보통콘크리트와 경량콘크리트와의 차이가 커지는 것으로 나타났다. 이는 효율적인 경량콘크리트를 제조하기 위해서는 경량콘크리트의 고강도화가 반드시 필요하다는 것을 나타내 주고 있는 것이라고 사료된다.

- 3) 동결융해실험 결과 KCC 경량골재는 국내외산에 비해 비교적 우수한 성능을 보여주었으며, 오히려 특정 W/C비에서는 보통콘크리트 보다 우수한 성능을 나타내었다. 이는 경량콘크리트라 할지라도 적절한 공기량이 도입되고 적절한 W/C비를 유지시킨다면 보통콘크리트 보다 내구성이 향상된 콘크리트의 제조가 가능하다고 추정된다.
- 4) 향후 실리카흄이나 플라이애쉬 등의 혼화재를 첨가하여 보다 고강도이면서 내구성이 우수한 구조용경량콘크리트를 제조할 수 있을 것으로 사료된다.
- 5) KCC 경량골재는 유리생산시 얻어지는 부산물인 규사미분을 주원료로한 구조용 경량골재로서, 이것이 구조용 골재로서 활용되어진다면 산업부산물 재활용이라는 측면에서 의의를 갖을 수 있을 것으로 기대된다.

●참 고 문 헌●

1. Proceedings of International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway, 1995.
2. Andrew Short : "Lightweight Concrete", Applied Science Publishers Ltd, 1978.
3. Andrew Short : "Lightweight Aggregate Concrete", CEB/FIP Manual, The Construction Press Ltd, 1977.
4. A.M. Neville : "Properties of Concrete", Pitman Publishing Ltd, 1981, pp.605~632.
5. P. Kumar Mehta : "Concrete", Prentice-Hall, 1993, pp.358~367.
6. F.D. Lydon : "Concrete Mix Design", Applied Science Publishers Ltd, 1982, pp.121~138.