

단열성능향상 재료를 사용한 구조용 콘크리트의 열전도 특성

The Thermal Conduction Property of Structural Concrete using Insulation Performance Improvement Materials

박 영 신¹

강 민 기²

김 정 호^{2*}

지 석 원³

전 현 규⁴

Park, Young-Shin¹

Kang, Min-Gi²

Kim, Jung-Ho^{2*}

Ji, Suk-Won³

Jeon, Hyun-Kyu⁴

Technology Research Center, Mapei Korea, Mapo-Gu, Seoul, 03908, Korea ¹

Department of Research, Halla Encom, Songpa-Gu, Seoul, 138-240, Korea ²

Department of Architecture, Induk University, Nowon-Gu, Seoul, 139-749, Korea ³

Department of Research, GS E&C, Youngin-Si, Gyunggi-Do, 449-831, Korea ⁴

Abstract

The part of a building with the biggest energy loss is the exterior and many studies are actively conducted to reduce the energy loss on that part. However, most studies consider the window frames and insulation materials, but many studies do not discuss the concrete that takes more than 70% of the exterior. In order to minimize the energy loss of buildings, it is necessary to enhance the concrete's insulation performance and studies need to be conducted on this. Therefore, this study used a micro foam cell admixture, calcined diatomite powder, and lightweight aggregates as a part of a study to develop a type of concrete with improved insulation performance that has twice higher thermal conductivity compared to concrete. It particularly secured the porosity inside concrete to lower thermal conductivity. As a result of the experiment, the slump and air capacity showed fair results, but all mixtures containing micro foaming agent showed 14.3~35.1% lower mass per unit of volume compared to regular concrete. Compressive strength decreased slightly due to the materials used to improve the insulating performance, but it all satisfied this study's target strength(24MPa). Thermal conductivity was up to twice higher than that of regular concrete.

Keywords : thermal conductivity, micro foam cell admixture, calcined diatomite powder, lightweight aggregate

1. 서 론

온실가스 배출로 인한 기후환경의 급격한 변화가 발생하면서 최근 냉난방 에너지 사용량에 대한 관심이 증가되고 있다. 이에 범세계적으로 에너지 사용량과 이산화탄소의 배출량을 줄이려는 다양한 노력이 계속되고 있으며 전 산업분야에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 건축재료에 대한 연구는 시멘트 제조에 의해 발생하는 이산화탄

소 저감 방안과 건축물에서 사용되는 에너지 사용량 감소가 가능한 재료의 개발 등이 진행되고 있는 실정이다.

이에 정부는 새로운 기후변화체제에 대응하고 온실가스 감축을 위한 방안으로 '저탄소 녹색성장 기본법' [1]과 '친환경주택의 건설기준 및 성능평가' [2]를 고시하고 환경과 에너지 관리에 대한 노력을 하고 있다.

에너지경제연구원의 연구결과에 따르면 공동주택의 에너지 소비량에서 가장 많은 비중을 차지하는 부문은 냉난방에 이용되는 에너지 소비량이다. 난방에너지 소비량은 전체 에너지 소비량의 약 42% 수준을 나타내고 있고 냉방에너지의 사용량은 1990년부터 2010년까지 꾸준한 증가세를 나타내고 있다[3]. 이에 전반적인 산업분야에서 온실가스 감축을 위한 다양한 해결책이 요구될 것으로 예상된다.

Received : March 4, 2015

Revision received : April 7, 2015

Accepted : October 28, 2015

* Corresponding author :Kim, Jung-Ho

[Tel:82-2-6677-6647, E-mail : jung.ho.kim@halla.com]

©2016 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

이처럼 건축물에서 에너지 소비를 줄이기 위한 연구가 중요하게 부각되고 있는 가운데 저에너지 친환경 공동주택 연구, 고기밀성 단열창호 연구, 고단열재 연구 등 단열 성능 향상을 통해 건물에서 소비되는 에너지를 절감하는 패시브기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 더불어 건축물 외피 중 약 70%를 차지하는 콘크리트의 단열성능 및 열전도율 개선에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

콘크리트 단열성에 관한 선행 연구는 팽창점토로 제조된 경량골재를 사용한 연구[4]에서 폴리프로필렌섬유의 혼입률과 실리카흙 혼입률의 변화에 따른 구조용 단열경량콘크리트를 연구한 결과 섬유보강재를 용적비로 0.7% 사용하면 사용하지 않은 배합과 비교하여 약 1~2% 열전도율이 감소되는 현상을 밝혔다. 경량골재를 사용한 발포 폴리스티렌비드를 사용한 경량골재 콘크리트에 관한 연구[5]에서는 바닥공사용 콘크리트의 열전도율을 측정하고 압축강도 0.85MPa, 열전도율 0.141 W/mk의 최적배합을 도출하였다. 경량골재와 유리질 중공미소구체를 사용한 구조용 콘크리트를 개발하기 위해 연구[6]한 결과 유리질 중공 미소구체를 치환율 증가에 따라 열전도율이 감소하는 시험결과를 나타내었다. 상기 선행 연구는 비구조용 콘크리트에 국한되거나 굳지 않은 콘크리트의 특성 중 위커빌리티 확보가 어려움이 있다고 판단된다. 따라서 건물의 외벽을 이루고 있는 콘크리트에 단열성능을 부여함과 동시에 구조용으로 사용가능한 단열성능향상 콘크리트에 관한 연구가 새롭게 요구되고 있다.

이에 본 연구는 구조용 콘크리트의 단열성능을 향상시키기 위한 연구에 일환으로 마이크로기포제(Micro foam cell Admixture), 규조토 미분말(Calcined diatomite powder), 경량골재(Lightweight aggregate)를 혼합사용하고 그에 따른 물리·역학·열전도 특성에 대해 검토하고자 한다.

2. 콘크리트의 단열성능 향상에 대한 고찰

금속과 같은 고체의 경우 열을 가했을 때 분자가 제자리 진동하며 자유전자의 이동으로 열에너지를 전달시킨다. 기체의 경우에는 고체처럼 분자와의 간격이 상대적으로 멀어 진동에 의한 에너지의 전달과정이 느리기 때문에 기체의 열전도율은 다른 상보다 매우 낮은 값을 갖는다. 위

와 같은 원리에 입각하여 콘크리트의 단열성능을 향상시키기 위한 방법으로는 콘크리트의 자체 공극을 형성시키는 방법, 다공질 재료를 콘크리트에 혼입시키는 방법, 배합설계를 조정하는 방법으로 크게 구분할 수 있다. 그러나 콘크리트는 내부 공극 증가에 따라 기계적 성질 및 내구성이 저하되는 우려가 있으므로 이를 고려하여야 한다.

2.1 콘크리트 자체 공극에 의한 단열성능 개선

콘크리트 자체 공극은 콘크리트 제조 시 자연적으로 생성되는 갭공기와 인위적으로 콘크리트 속에 공극이 형성되도록 발생시킨 연행공기, 경화 시 시멘트 입자 사이에 수화물로서 채워지지 않고 남는 모세관 공극이 있다. 이와 같이 내부 공극을 증가시킴으로써 콘크리트의 단열성능을 개선할 수 있다.

2.2 재료에 의한 단열성능 개선

단열성능 향상 재료와 같은 다량의 공극을 함유하거나 발생시키는 재료는 콘크리트의 대류, 복사에 의한 열 이동을 억제하기 때문에 열전도율을 낮출 수 있다.

2.3 배합설계에 의한 단열성능 개선

콘크리트 배합에 사용되는 물은 모두 시멘트 수화반응에 사용되는 것이 아니며 상당수량은 시공과정에서 요구되는 시공성의 확보를 위해 사용되는 것이다. 수화반응에 사용되지 않는 물은 이후 콘크리트 내부의 자유수로 존재하게 되어 굳은 콘크리트의 공극 형성에 기여하게 된다[7]. 또한 잔골재율이 높을 경우에는 밀실한 굵은골재의 사용량이 감소되어 콘크리트의 단열성능을 개선할 수 있다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

본 연구에서는 구조용으로 사용이 가능한 단열성능 향상 콘크리트를 제조하기 위해 액상 형태의 마이크로기포제, 분체 형태의 규조토 미분말과 경량골재를 사용하였다.

또한, 콘크리트의 목표강도는 24MPa이며, 목표슬럼프는 200 ± 15 mm로 설정하였고 열전도율은 일반콘크리트 대비 2배 개선을 목표로 설정하였다.

3.2 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 KS L 5201 규격에 적합한 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 잔골재는 KS F 2526, 굵은골재는 KS F 2527 규격에 적합한 세척사와 쇄석을 사용하였다. 마이크로기포제는 미국 G사 제품을 사용하였고 구조토 미분말은 미국 H사의 제품을 사용하였으며 경량골재는 미국 S사 제품을 사용하였다. 또한 혼화제는 국내 G사의 폴리카르본산 계열의 고성능AE감수제를 사용하였다.

Table 1. Physical property of cement

Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Setting time		Soundness (%)	Com. Strength (MPa)		
		Initial (min)	Final (min)		3age	7age	28age
3.15	3,266	215	306	0.15	22.0	29.1	38.4

Table 2. Chemical property of cement

Component	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Loss Ign.
Ratio (%)	61.3	21.1	5.2	4.0	2.8	2.4	2.0

Table 3. Physical property of aggregate

Types	Unit weight (kg/m ³)	Density (g/cm ³)	24h Absorption (%)	F.M	0.08mm sieve(%)
Fine	1,560	2.60	1.15	2.73	2.0
Course	1,567	2.62	0.63	7.05	0.31

Table 7. Mix proportion of concrete

Types	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)							
			Water	Cement	CDP	Sand	Gravel	Admixture		
								MFA	HA	Sp
Plain	40.0	45.0	192	479	0	714	880	0	0	0.61
M4	38.5	55.0	153	444	0	919	758	17.70	6.80	0.90
M4C10	40.0	70.0	192	479	56	829	358	19.15	8.62	0.91
M4L	30.0	55.0	115	444	0	973	441	17.70	7.90	0.50
M4C10L	40.0	70.0	192	479	56	829	196	19.15	8.62	0.91

※ Example : C10 : CDP 10%, M4 : MFA 4%, L : Lightweight aggregate 100%

※ CDP : Calcined diatomite powder, MFA : Micro foam cell admixture, HA : Hardening acceleration, Sp : Superplasticizer

Table 4. Physical property of Calcined Diatomite Powder

Unit weight (kg/m ³)	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	150 Mesh (% Retained)	Color
215	1.1	0.5	0.5	Red

Table 5. Physical property of Lightweight aggregate

Oven dry density (g/cm ³)	Density (g/cm ³)	24h Absorp. (%)	Porosity (%)	10% Crush load (kN)	F.M
1.46	1.54	5.6	45.5	89.4	6.4

Table 6. Property of Micro Foam cell admixture

Density (g/cm ³)	pH	Viscosity (CPS)	Residue ratio (%)	Color
2.15	6.97	80	15.6	White

3.3 실험방법

3.3.1 단일성능 향상 재료 분석 실험

본 연구는 단일성능 향상 재료인 마이크로기포제, 구조토 미분말, 경량골재의 분석 시험을 진행하였다. 구조토 미분말과 경량골재의 표면 및 내부 공극형태를 분석하기 위해 주사전자현미경(Scanning electron microscope) 과 광학현미경을 사용하였으며, 구조토 미분말의 화학 성분 분석을 위해 EDX(Energy dispersive x-ray)를 사용하였다.

3.3.2 단일성능 향상 콘크리트 실험

예비 배합실험을 통해 각 재료의 특성을 고려하여 치환율(또는 혼입율), 물시멘트비, 잔골재율을 결정한 최적배합을 선정하였다. 혼입 및 치환방법으로 마이크로기포제는 시멘트 중량 대비 혼입하였으며 구조토 미분말은 전체 골재 용적에서 치환하였다.

미세공극인 마이크로기포셀(Micro foam cell)은 마이크로기포제와 골재가 믹서에서 마찰에 의해 충분히 혼합될 경우 생성된다. 이에 본 연구는 마이크로기포셀 생성을 위해 Figure 1과 같은 혼합방법을 사용하였다.



Figure 1. Mixing method

굳지 않은 콘크리트의 특성을 알아보기 위한 실험으로 슬럼프, 공기량, 단위용적질량을 KS 규격에 따라 실시하였으며 0, 30, 60분에 경시변화를 측정하였다. 굳은 콘크리트의 특성을 알아보기 위한 실험은 재령 3, 7, 28일에 압축강도 시험을 KS 규격에 따라 실시하였다.

열전도율은 Figure 2와 같이 Anter사의 QuickLine 30을 이용하여 ASTM C 1113 ‘Standard test method for thermal conductivity of refractories by hot wire’ 규격에 따라 비정상 열선법으로 시험하였는데 이는 Figure 3과 같이 평평한 슬래브 표면에 열선을 접촉하여 비정상 상태의 열전달을 측정하는 시험방법으로 매질 내의 열선에 일정한 열량이 공급될 때 시간경과에 따른 열선의 온도상승관계가 직선으로 주어지며 이 직선의 기울기를 통해 측정하고자 하는 매질의 열전도율을 측정하는 방법이다.



Figure 2. QuickLine 30

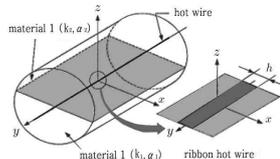


Figure 3. Instrumentation method

본 실험에서의 압축강도 측정 시험체는 측정일까지 수중양생을 실시하였으며, 열전도율 측정 시험체는 7일간 수중양생 후 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도 $60 \pm 5\%$ 조건의 항온항

습실에서 21일간 기건양생하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 단일성능 향상 재료의 특성

4.1.1 마이크로기포제(Micro foam cell admixture)

본 실험에 사용된 마이크로기포제는 기존 기포제가 가지고 있는 단점을 보완하기 위해 아크릴계 고분자 기포제를 변형하여 개발되었다. 마이크로기포제는 믹서에서 골재와 마찰을 통해 마이크로 크기의 미세기포를 생성시키며, 고점성으로 인해 내·외부 영향에 의한 소포가 적은 것이 장점이다.

4.1.2 구조토 미분말(Calcined diatomite powder)

본 실험에 사용한 구조토 미분말은 일반적인 구조토를 150Mesh에 통과시켜 1차 가공한 고분말 구조토이며 10 μm 내외의 입자크기를 지니고 있고 입자 자체에 다량의 공극이 존재하는 특징을 가지고 있다. 구조토 미분말의 SEM 촬영사진은 Figure 4와 같으며, EDX로 분석된 화학적 특성은 Table 8과 같다.

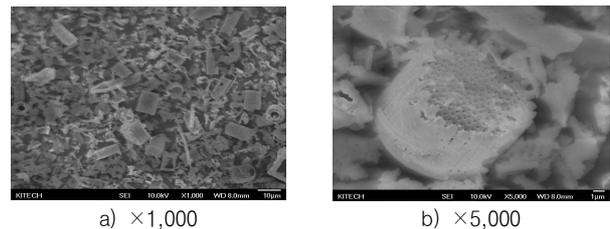


Figure 4. SEM images of calcined diatomite powder

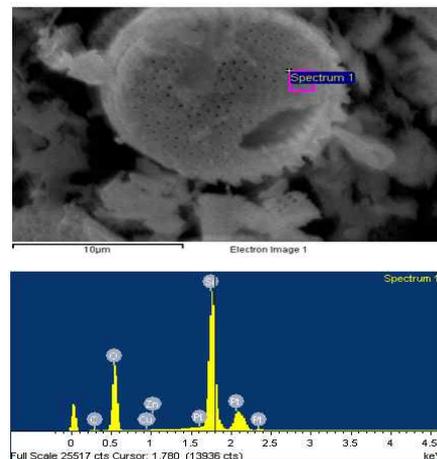


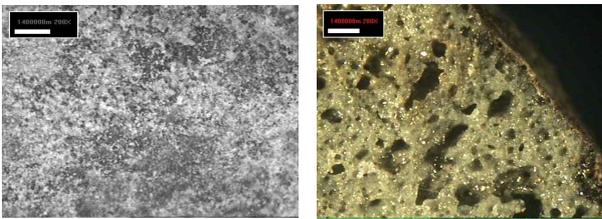
Figure 5. EDX result of calcined diatomite powder

Table 8. Chemical property of calcined diatomite powder

Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Loss Ign.
Ratio(%)	84.6	5.3	4.8	2.3	0.7	0.4	1.2

4.1.3 경량골재 (Lightweight aggregate)

본 실험에 사용된 경량골재는 팽창점판암을 주원료로 로터리 킬른에서 1,200°C로 소성시켜 생산된 KS F 2534 규격에 만족하는 쇄석형태의 비조립형 골재이며, 표면과 내부 형상을 파악하기 위해 현미경 촬영을 실시한 결과 Figure 6과 같이 폐쇄된 독립공극 구조를 지닌 것으로 분석되었다.



a) Surface of LA b) Internal pore of LA

Figure 6. Surface and internal pore of LA

4.2 단열성능 향상 콘크리트의 특성

4.2.1 슬럼프

슬럼프 시험결과는 Figure 7과 같다. 비빔 직후 슬럼프는 고성능AE감수제의 사용량 조절에 의해 Plain을 제외한 모든 배합에서 205~245mm의 결과를 나타내었으며, 60분 경과 후 슬럼프는 5mm 이내로 감소되어 경과시간 변화에도 유동성이 유지되는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트 내부에 마이크로기포셀이 상당수 연행되어 콘크리트의 유동성이 개선되었기 때문으로 판단된다.

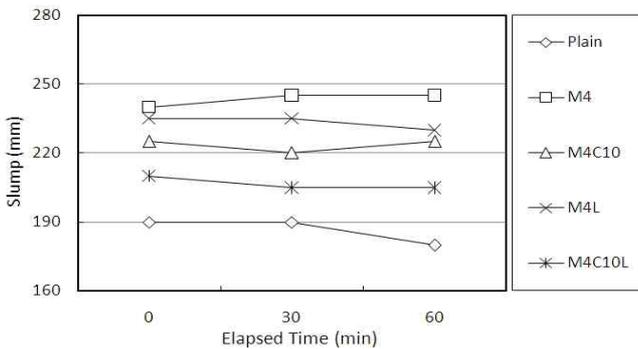


Figure 7. Slump of concrete according to elapsed time

4.2.2 공기량

공기량 시험결과는 Figure 8과 같다. 마이크로기포제를 사용한 배합의 공기량은 0분에서 60분까지 모두 10%를 상회하는 결과를 나타내었는데, 이는 콘크리트 내에 분포되어 있는 다량의 마이크로기포셀에 의한 영향으로 판단된다.

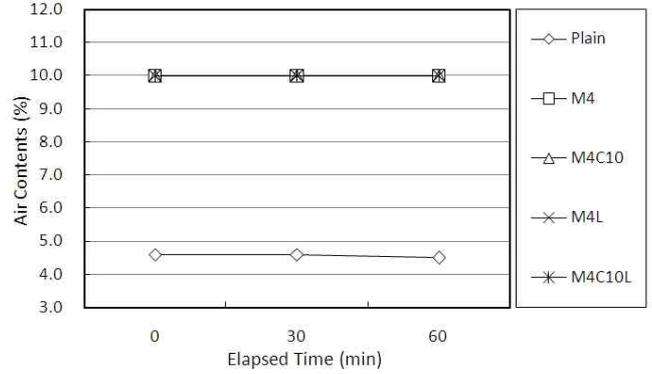


Figure 8. Air contents of concrete according to elapsed time

4.2.3 단위용적질량

단위용적질량 시험결과는 Figure 9와 같다. 기준배합인 Plain은 2.31t/m³의 단위용적질량을 나타내었고 단열성능 향상 재료인 마이크로기포제를 단독사용한 M4 배합은 Plain 대비 1.98t/m³로 14.3% 감소되었다. 단열성능 향상 재료를 혼합사용한 M4C10, M4L, M4C10L 배합에서는 1.84, 1.65, 1.50t/m³로 나타났으며 Plain 대비 20.3, 28.6, 35.1% 감소하였다.

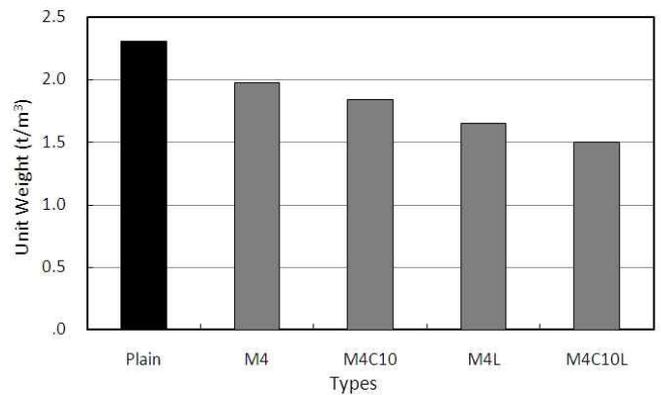


Figure 9. Unit weight test results

4.2.4 압축강도

압축강도 시험결과는 Figure 10과 같다. Plain 배합은

재령 28일에 38.9MPa로 나타내었고 단열성능 향상 재료인 마이크로기포제를 단독사용한 M4 배합은 28.3MPa로 Plain 대비 72.8% 수준의 압축강도를 나타내었다. 또한, 단열성능 향상 재료를 혼합사용한 M4C10, M4L, M4C10L은 28.5, 27.1, 24.1MPa로 Plain 대비 73.3, 69.7, 62.0%의 수준을 보였고 전 배합이 목표강도 24MPa이상을 발현하였다.

압축강도 결과 일반콘크리트보다 단열성능 향상 재료를 사용한 콘크리트의 압축강도가 다소 저하된 결과를 나타내었는데, 이는 콘크리트 내부에 존재하는 마이크로기포셀과 경량골재의 낮은 파쇄강도에 기인한 결과로 판단된다.

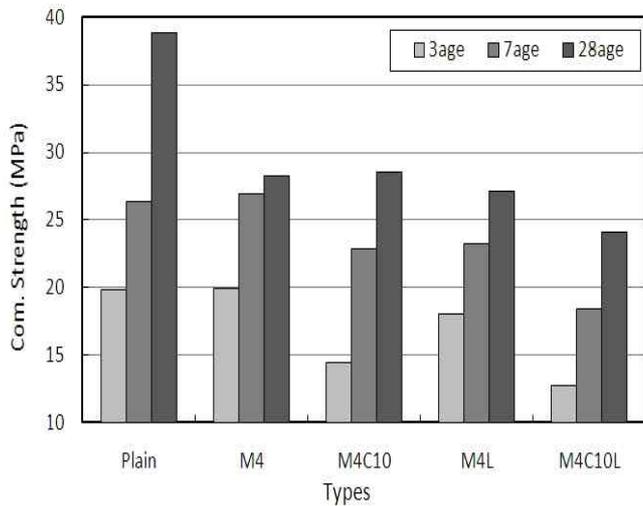


Figure 10. Compressive strength test results

M4와 M4C10 배합의 재령에 따른 강도증진 추이를 살펴보면, M4C10 배합의 압축강도는 M4 배합 대비 재령 3일에 72.4%, 재령 7일에 85.1%의 수준을 나타내었으나 재령 28일에 100.7%로 M4 배합보다 소폭 높게 나타났다. 이는 구조도 미분말 제조과정 중 열처리 시 활성화되는 실리카 성분이 수산화칼슘과 반응하여 CSH Gel을 형성함으로써 치밀한 공극구조를 갖게되어 강도증진이 이루어진 것[8]으로 판단되었다.

4.2.5 열전도율

열전도율 시험 결과는 아래 Figure 11과 같다. 기준배합인 Plain은 1.98W/mk의 열전도율을 나타내었고 단열성능 향상 재료인 마이크로기포제를 단독사용한 M4 배합은 1.27W/mk 로 Plain 보다 35.9% 열전도율이 개선되

었다. 또한, 단열성능 향상 재료를 혼합사용한 M4C10, M4L, M4C10L 배합은 0.93, 0.85, 0.85W/mk로 Plain 보다 53.0, 57.1, 57.1%의 열전도율 개선을 보였는데, 특히 M4L과 M4C10L 배합의 경우 Plain보다 약 57% 개선되어 열전도율 개선율이 가장 높은 것으로 나타났다.

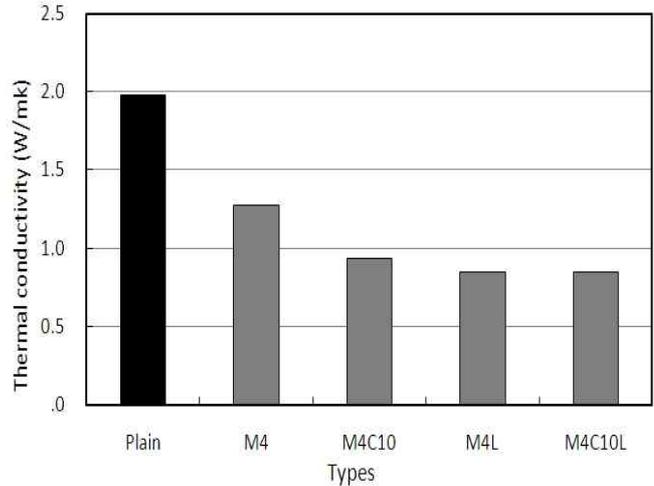


Figure 11. Thermal conductivity test results

5. 결 론

본 연구는 단열성능 향상 재료를 사용한 콘크리트의 물리 역학 및 열전도 특성에 관한 실험적 연구 결과, 본 연구의 범위에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 슬럼프 시험결과에서는 마이크로기포제를 사용한 전 배합에서 경과시간에 따른 슬럼프 저하가 미미한 것으로 나타났다. 이는 콘크리트 내부에 마이크로기포셀이 상당수 연행되어 콘크리트의 유동성을 개선시키기 때문으로 판단된다.
- 2) 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험결과 마이크로기포제를 사용한 전 배합에서 다량의 마이크로기포셀 연행에 의해 공기량이 10%를 초과하였으며 경과시간에 따른 공기량 감소는 미미한 것으로 나타났다.
- 3) 단위용적질량 시험결과에서는 마이크로기포제를 사용한 전 배합이 Plain 대비 약 14.3~35.1% 감소하였는데, 이는 낮은 밀도의 단열성능 향상 재료의 사용으로 인한 결과로 판단되었다.
- 4) 압축강도는 단열성능 향상 재료의 사용으로 다소 감소하였으나 전 배합이 목표강도 24MPa를 만족하였다.

5) 열전도율 시험결과에서는 단열성능 향상 재료의 공극형성에 기인하여 열전도율이 개선되는 것으로 나타났다. 단열성능 향상 재료인 마이크로기포제를 단독사용한 경우 Plain 배합보다 35.9% 개선되었으며, 혼합사용한 배합에서는 41.9~57.1% 개선되어 단열성능이 일반콘크리트 대비 2배 이상 개선된 것으로 나타났다.

상기와 같이 열전도율이 개선된 콘크리트를 사용할 경우 건축물에서 소비되는 냉난방 에너지의 감소가 가능할 것으로 판단되며, 후속연구로 구조용 단열성능 향상 콘크리트의 현장적용에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단되었다.

요 약

건물에서 에너지 손실이 가장 큰 부위는 외피로서, 이 부분의 에너지 손실을 감소하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나 이는 대부분 창호 및 단열재를 사용한 연구이며 건물 외피의 70% 이상을 차지하고 있는 콘크리트에 대한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 건물의 에너지 손실을 최소화하기 위해서는 콘크리트 자체에서 단열성능을 확보할 수 있어야 하며 이에 대한 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 보통콘크리트보다 열전도율을 2배 이상 개선시킨 구조용 단열성능향상 콘크리트 개발 연구의 일환으로 마이크로기포제, 규조토 미분말, 경량골재를 사용하였으며, 콘크리트 내부공극을 다량확보하여 열전도율을 낮추고자 하였다. 실험결과, 슬럼프와 공기량은 양호한 결과를 나타내었으며, 단위용적질량에서는 마이크로기포제를 사용한 모든 배합에서 보통콘크리트보다 14.3~35.1% 감소된 결과를 나타내었고 압축강도는 단열성능 향상 재료를 사용하여 다소 감소하는 경향을 나타내었으나 본 실험의 목표강도(24MPa)를 모두 만족하였다. 또한 열전도율은 보통콘크리트 대비 최대 2배 이상 개선된 결과를 나타내었다.

키워드 : 열전도율, 마이크로기포제, 규조토 미분말, 경량골재

Acknowledgement

This research was supported by a grant(Code

11-Technology Innovation-F04) from Construction Technology Research Program(CTRP) funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MLIT) of Korean government.

References

1. Basic act on low carbon green growth [Internet]. Korea: Korea ministry of government legislation, 2013 - [cited 2015 March 3]. Available from: <http://www.law.go.kr/>.
2. Construction standards and performance of eco-friendly house [Internet]. Korea: Korea ministry of government legislation, 2014 - [cited 2015 March 3]. Available from: <http://www.law.go.kr/>.
3. Choi MS, Energy efficiency indicators for services and residential sectors, 1st ed, Uiwang: Korea energy economics institute: 2012, Chapter 4, Characteristics of energy consumption; p. 32
4. Park YJ, The Properties of the Insulated Lightweight Concrete with Fiber Reinforcement [master's thesis]. [Seoul]: Konkuk University; 1996. 81p.
5. Lee JC. (An) Experimental Study on the Properties of Lightweight Aggregate Concrete Contained Coated-Expanded Polystyrene Beads [dissertation]. [Seoul]: Konkuk University; 2003. 135p.
6. Kim SH, Kim SH, Park YS, Jeon HG, Seo CH, An Experimental Study on the Property of the Concrete with Glass Hollow Micro Sphere. Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. 2014 Apr;(29):160-6.
7. Kang MG, A Study on the Properties of Lightweight Aggregate Concrete Using Hollow Micro Sphere [master's thesis]. [Seoul]: Konkuk University; 2014. 69p.
8. Kim YB, The In-situ application of Recycled Aggregate Concrete Using Calcined Diatomite Powder [dissertation]. [Ansan]: Hanyang University; 2008. 133p.