



자철광 및 철분말을 혼입한 고열전도 콘크리트의 열전도 평가 및 해석기법 비교에 대한 연구

이학수¹⁾ · 김민규²⁾ · 권성준^{1)*}

¹⁾한남대학교 건설시스템공학과 ²⁾원자력안전연구원

Study on Analysis Technique Comparison and Evaluation of High Thermal Conductivity Concrete with Magnetite Aggregates and Steel Powder

Hack-Soo Lee,¹⁾ Min-Kyu Kim,²⁾ and Seung-Jun Kwon^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

²⁾Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

ABSTRACT Concrete as a construction material is widely used in nuclear vessel and plant for excellent radiation shielding. However the isolation characteristics in concrete may affect adversely in the case of fire and melt-down in nuclear vessel since temperature cooling down is very difficult from outside. This study is for development of high thermal conductive concrete, and its mechanical and thermal properties are evaluated. Magnetite aggregates with volume ratio of 42.3% (maximum) and steel powder of 1.5% are replaced with normal aggregates and thermal properties are evaluated. Thermal conductivity little increases by 30% addition of magnetite but rapidly increases afterwards. Finally thermal conductivity is magnified to 2.5 times in the case of 42.3% addition of magnetite. Steel powder has a positive effect on high thermal conduction to 106~113%. Several models for thermal conduction like ACI, DEMM, and MEM are compared with test results and they are verified to reasonably predict the thermal conductivity with increasing addition of magnetite aggregates and steel powder.

Keywords : evaluation technique, high thermal conductive concrete, magnetite, steel powder, durability, nuclear concrete

1. 서 론

콘크리트는 경제성과 내구성을 가진 건설재료로서 많은 장점을 가지고 있으며, 강알칼리성을 가지고 있으므로 매립된 철근 부식에 효과적으로 저항할 수 있다.^{1,2)} 재료적인 문제로 건조수축 및 수화열과 같은 균열 발생과 염해, 탄산화와 같은 내구성 문제가 보고되고 있으나^{3,4)} 공학적 장점과 경제성으로 인해 많이 사용되고 있다. 특수 구조물의 경우 콘크리트의 사용이 더욱 두드러지는데 그중 방사선 투과에 대해서는 차폐율이 크므로 원전구조물과 같은 플랜트 구조물에 적극적으로 사용된다.⁵⁾ 또한 열전도도가 강재와 같은 건설재료에 비해 1/40~1/50 수준으로 매우 낮기 때문에⁶⁾ 건축 내외장재로도 많이 사용되고 있다.

그러나 이러한 고단열 특성이 오히려 부정적인 영향을

미칠 수 있다. 후쿠시마 원전사고와 같이 내부 원자로의 온도가 높아질 경우, 외부에서 온도를 강하시킬 수 있는 방법이 매우 제한적이 된다. 외부에서 인위적으로 원전 구조물을 냉각시켜도 콘크리트의 고단열 성능으로 인해 효과적인 내부냉각이 이루어지지 않는다. 비단 원전 콘크리트 구조물 뿐 아니라 지하 공동구에서는 다수의 전선케이블이 길게 벽체에 연결되어 있다. 이로 인해 전기 저항열(Joule 열)이 항상 발생하여 내부는 온도가 높으며, 화재의 위험성이 증가한다. 이러한 구조물에 대하여 고열전도성을 가진 콘크리트를 사용할 경우, 낮은 온도를 가진 지반의 냉기를 효과적으로 유입시킬 수 있다. 또한 지하철 구조물에서도 고열전도 콘크리트를 사용할 경우, 내부의 온도를 겨울에는 외기보다 따뜻하게 여름에는 외기보다 시원하게 조절할 수 있는 장점이 있다. 이처럼 기존의 콘크리트보다 열전도도가 높은 콘크리트를 사용할 경우, 외부의 낮은 또는 높은 온도를 효과적으로 내부로 유입할 수 있으므로 유지관리비용 및 설계에 따른 추가 비용을 줄일 수 있다.

이 연구는 강도성능을 만족하고 열전도가 높은 콘크리

*Corresponding author E-mail : jjuni98@hnu.kr
 Received February 12, 2014, Revised March 20, 2014,
 Accepted March 28, 2014
 ©2014 by Korea Concrete Institute

트를 개발하기 위해 자철광(Magnetite)과 철분말(SP: Steel Powder)를 혼입한 콘크리트를 제조하여 열전도를 향상시켰다.

콘크리트는 내부에 공기, 굵은 골재, 잔골재, 시멘트 젤 등 다양한 요소들이 섞여 있는 복합체인 건설재료이다. 각각의 건설재료에 대한 열전도는 기존의 연구에서 꾸준히 진행되었으며,^{7,8)} 시멘트 뿐 아니라 플라이애쉬나 슬래그 미분말 같은 혼화재료의 열전도 특성도 연구되었다.⁷⁾ 특히 ACI 122R에서는 골재특성부터 단면제원에 이르기까지 다양한 열전도 특성을 분석하여 설계에 반영할 수 있도록 하였으며, 중량을 고려한 식을 제안하여 콘크리트의 열전도를 예측할 수 있도록 하였다.⁹⁾

이 연구에서는 자철광 골재의 체적비를 최대 42.3%까지, SP체적을 1.5%까지 증가시키면서 콘크리트의 열전도 특성을 평가하였다. 또한 ACI 122R 모델뿐 아니라 기계공학분야에서 주로 사용되는 미세등가물모델(DEMM: Differential Effective Medium Model)과 MEM(Modified Eshelby Model)을 적용하여¹⁰⁾ 실험값과 비교하였다.

2. 고열전도 콘크리트 실험의 개요

2.1 사용재료 및 배합

이 연구를 위해 기존 문헌의 원전배합을 고려하여 기본배합을 정하였으며,⁵⁾ 자철광 골재의 체적 치환률을 점차적으로 증가시켜 총 9개의 배합을 고려하였다. 물-결합재 비를 40%로, 플라이애쉬(FA: Fly Ash) 치환률을 전체 바인더의 20%로 고정하였다. Table 1에서는 이 연구를 위한 배합을 나타낸다.

Table 1의 기호 중 WG90WS50-SP는 자철광 굵은 골재 중량 치환비(90%)와 자철광 잔골재 중량 치환비(50%), 그리고 SP는 Steel Powder 혼입량을 나타낸다. OPC(Ordinary Portland Cement) 및 FA의 화학조성을 Table 2에 나타내었으며, 사용된 골재의 물리적 특성은 Table 3에 나타내었다. OPC는 비중 3.15, 분말도 3400 cm²/g인 국내 H사의 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, FA는 국내산으로 비중 2.21, 분말도 3362 cm²/g으로 조사되었다. 자철광골재는 국내 P사의 도움을 받아 입수하였으며, 잔골재 및 굵은 골재로 분류하여 시험을 수행하였다. Fig. 1에서는 SP 및 자철광골재의 모습을 나타내며, Table 4에서는 SP의 물리적 특성을 나타내었다.

2.2 열전도 실험

열전도 시험을 위해 9가지 배합에 대하여 각각 두 개씩 시편이 제조되었으며 공인시험기관에 의뢰하여 시험을 수행하였다. KS L ISO 8302 방법으로 시험을 수행하

Table 1 Mix proportions for this work

Type	Unit content (kg/m ³)									RV (%)
	W	C	FA	G	S	WRA	MG	MS	SP	
Control	163	324	82	935	750	2	0	0	0	0
WG50W S25	210	420	105	468	563	2	468	188	0	22.9
WG50W S25SP	210	420	105	468	563	2	468	188	120	22.9
WG50W S50	216	432	108	468	375	2	468	375	0	29.3
WG50W S50SP	216	432	108	468	375	2	468	375	120	29.3
WG90W S25	220	440	110	104	563	2	831	188	0	35.9
WG90W S25SP	220	440	110	104	563	2	831	188	120	35.9
WG90W S50	230	460	115	104	375	2	831	375	0	42.3
WG90W S50SP	230	460	115	104	375	2	831	375	120	42.3

W: Water, C: Cement, FA: Fly Ash, G: Gravel
S: Sand, WRA: Water Reducing Agent (super-plasticizer)
AE: Air Entrainment, MG: Magnetite Gravel
MS: Magnetite sand, SP: Steel powder
RV: Replacement ratio of volume

Table 2 Chemical component of cement and fly ash (wt.%)

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	etc.	Ig.loss
OPC	21.95	2.81	60.12	3.32	2.11	6.59	-	3.1	1.85
FA	53.60	9.40	4.70	2.60	1.80	20.00	4.2	3.8	3.4

Table 3 Physical properties of aggregate

Types		Gmax (mm)	Density (kg/m ³)	Absorption ratio(%)	F.M.
Sand	Normal	5	2,550	2.20	2.40
	Magnetite	5	4,200	-	2.21
Coarse aggregate	Normal	19	2,500	0.80	7.10
	Magnetite	19	4,000	-	6.80



(a) Steel powder (b) Magnetite gravel (c) Magnetite sand

Fig. 1 Various mineral admixture for the test

Table 4 Physical properties of steel powder

Density (g/cm ³)	Purity (%)	Melting point (°C)	Particle size (mm)	Carbon content (%)
7.87	over 98.0	932	< 5mm	< 1.5%

였으며, 시편의 제원은 100×100×50 mm의 직육면체 공시체를 사용하였다.

3 고열전도 콘크리트의 역학 및 열전도 특성 평가

3.1 압축강도 및 단위중량 평가

KS F 2403에 따라 시편을 제조하고 28일 수중양생 후 압축강도를 측정하였다. 모든 시편에서 설계압축강도인 40 MPa를 확보하였으나, 자철광 골재 및 SP 혼입을 통한 강도개선효과는 뚜렷하지 않았다. 또한 자철광 골재치환이 많아질수록 강도가 약간 저하되었는데, 이는 미립분이 많은 자철광 골재 혼입에 따라 다짐이 충분하지 않은 것으로 평가되었다. 기본배합이 FA를 20% 중량치환 한 배합이므로 재령의 증가에 따라 강도는 증가할 것으로 예상된다. SP를 혼입할 경우 탄산화 저항성, 공극률 감소, 염해저항성에서 증가하는 기존의 연구가 있었으나,¹¹⁾ 이 연구에서는 첨가량이 작아서 큰 강도증진은 확인할 수 없었다. 또한 28일 양생후 기건중량을 측정하였는데, 자철광 골재의 혼입률이 증가할수록 시편의 중량은 증가하였으며, 최대 127%의 중량증가를 나타내었다. Fig. 2에서는 압축강도 특성 및 중량변화를 자철광 골재 체적비율에 따라 나타내었다

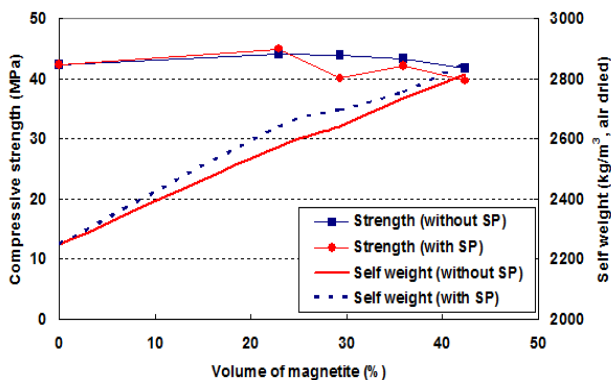


Fig. 2 Compressive strength and self weight

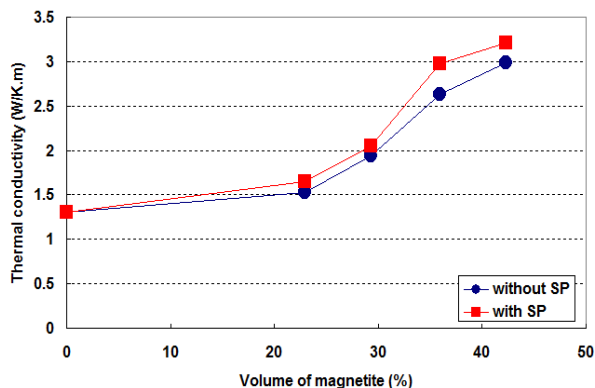


Fig. 3 Thermal conductivity in concrete with FA, magnetite, and steel powder

3.2 열전도 평가

시편의 크기가 달라서 자철광과 SP에 대하여 직접 열전도를 측정하지 못하였지만, 기존의 연구 결과를 조사한 결과, 자철광골재의 열전도도는 6~23(W/m.K)수준으로, SP는 46.5~58.2(W/m.K)수준으로 조사되었다.¹²⁾ 수분에 따라 다르지만, 일반 시멘트의 열전도도가 1.2 W/m.K, FA의 열전도도가 0.9 W/m.K, 일반골재가 1.3~2.8 W/m.K 정도의 수준을 고려할 때,¹³⁾ 치환률의 증가에 따라 열전도도가 크게 증가할 것으로 예상된다. Fig. 3에서는 자철광 체적의 증가에 따른 열전도 시험 결과를 나타내고 있다. 잔골재 중량 50%, 굵은골재 중량 90%인 경우(총 체적 42.3%)에 SP를 첨가하였을 때, 열전도는 최대 2.42~2.50배로 증가하였다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 SP 첨가시 약간 열전도도가 증가함을 알 수 있다.

4. 해석방법에 따른 열전도 평가

4.1 열전도 평가에 따른 기본 이론

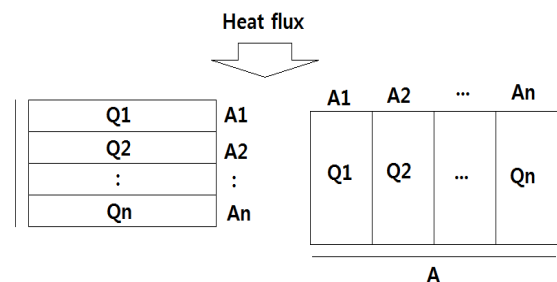
4.1.1 열전도도의 상한치 및 하한치

복합재 전체 체적에 대한 등가 열전도도는 Fig. 4와 같은 상한치 및 하한치를 가진다.¹⁴⁾ 이러한 구조는 다층의 투수구조 또는 전기전도의 회로구성에서 쓰이는 이론과 동일하다.

Fig. 4(a)와 같은 하한치는 식 (1), Fig. 4(b)와 같은 상한치에 대해서는 식 (2)와 같이 등가 열전도로 나타낼 수 있다. 이는 발열이 없는 정상상태의 1차원 열전도법칙으로부터 유도되는데, 다음과 같은 가정을 가진다.

- 열의 출입이 없을 것
- 공간내에 발열반응이 없으며 전도로만 열전달이 이루어 질 것
- 수직 층간 경계면은 등온면(constant temperature surface) 일 것

$$Q_{eq} = \frac{A}{(A_1/Q_1 + A_2/Q_2 + \dots + A_n/Q_n)} = \frac{1}{\sum A_{fi} Q_i} \quad (1)$$



(a) Lower boundary

(b) Upper boundary

Fig. 4 Thermal conductivity in composite layers

$$Q_{eq} = \frac{(A_1 Q_1 + A_2 Q_2 \dots A_n Q_n)}{A} = \sum A_{fi} Q_i \quad (2)$$

여기서, Q_{eq} 는 등가 열전도, A_i 는 각 재료의 면적 또는 체적, Q_i 는 각 재료의 열전도도, A_{fi} 는 각 재료의 면적비 또는 체적비를 나타낸다.

4.1.2 열전달 해석을 위한 DEMM 및 MEM

4.1.1에서 기술한 내용은 박판구조를 가진 복합체에 적합한 모델들이며, 콘크리트에 직접 적용하기는 많은 무리가 있다. 콘크리트는 그 자체가 이미 내부에 공극을 포함하고 있으며, 이는 판구조가 아닌 미세한 구형요소가 퍼져있는 것으로 가정할 수 있다. 이러한 각 성분이 하나의 구체로 형상화 된다면 Fig. 5와 같은 등가모델을 적용할 수 있다.¹⁰⁾

DEM을 사용하여 3상 복합체의 등가열전도계수를 구하는 방법으로는 일반화된 DEM을 적용하는 것과, DEM을 연속 2회 적용하여 3개의 재료를 2개의 재료로 바꾸어 계산하는 방법이 있다.¹⁵⁾ 이 연구에서는 DEM을 연속하여 2회 적용하는 기법을 사용하였다. 일반화된 DEM을 여러 종류의 구형 입자가 포함된 복합체에 적용하면 등가열전도계수는 다음과 같은 일차 비선형 미분방정식으로 표현된다.^{10,15)}

$$\frac{dk_c}{df} = \frac{k_c}{(1-f)} \sum_i f_i \frac{k_c - k_{fi}}{(k_c - k_{fi})S - k_c} \quad (3)$$

여기서, k_c , k_{fi} , S , f , f_i 는 각각 복합체의 열전도계수, 구형입자의 열전도계수, polarization 계수, 입자의 총 체적비, 총 체적비중 각 입자의 체적비를 나타낸다.

3개의 재료가 복합적으로 들어있는 경우에는 먼저 모재에 포함되는 2가지 종류의 구형 입자중 한 종류만 모재에 포함된 복합체의 열전도계수로 가정하여 계산한 뒤, 이를 새로운 모재로 간주한다. 이 모재의 열전도계수 (k_{m1})와 원모재의 열전도계수(k_m)의 관계는 비선형 3차 방정식으로 식4(a)와 4(b)와 같이 표현할 수 있다.¹⁰⁾

$$\left(\frac{k_{m1}}{k_m}\right)^3 - 3\left(\frac{k_{f1}}{k_m}\right)\left(\frac{k_{m1}}{k_m}\right)^2 + 3\left(\frac{k_{f1}}{k_m}\right)^2\left(\frac{k_{m1}}{k_m}\right) + (1-f_1')^3\left(\frac{k_{f1}}{k_m} - 1\right)^3 \frac{k_{m1}}{k_m} - \left(\frac{k_{f1}}{k_m}\right)^3 = 0 \quad (4a)$$

$$f_1' = f_1 / (1 - f_2) \quad (4b)$$

새로 만들어진 모재에 다른 종류의 구형 입자를 추가하여 최종 복합체를 구성하면, 3상(Three-Phase) 복합체의 최종 등가열전도계수(k_c)를 식 (5)와 같이 도출할 수 있다.¹⁰⁾

$$\left(\frac{k_c}{k_{m1}}\right)^3 - 3\left(\frac{k_{f2}}{k_{m1}}\right)\left(\frac{k_c}{k_{m1}}\right)^2 + 3\left(\frac{k_{f2}}{k_{m1}}\right)^2\left(\frac{k_c}{k_{m1}}\right) + (1-f_2)^3\left(\frac{k_{f2}}{k_m} - 1\right)^3 \frac{k_c}{k_{m1}} - \left(\frac{k_{f2}}{k_{m1}}\right)^3 = 0 \quad (5)$$

Fig. 5(b)에서 Z^* 는 Eshelby의 등가전도법에 의한 발생되는 고유온도구배인데, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.¹⁰⁾

$$\bar{Z} = f_1(Z^1 + Z^{1*}) + f_2(Z^2 - Z^{2*}) = 0 \quad (6)$$

여기서, f_1 및 f_2 는 입자 1과 입자 2의 체적비를 나타내고 Z^i 는 i 입자내의 교란온도구배이다. 여기에 3×3행렬을 이용하여 식을 구성하면 3상 복합체의 등가열전도 계수는 식 (7)와 같이 나타난다.¹⁰⁾

$$k_c/k_m = 1 + 3 \left[\frac{1}{1 - \frac{k_{f1} - k_m}{k_{f1} + 2k_m} f_1 - \frac{k_{f2} - k_m}{k_{f2} + 2k_m} f_2} - 1 \right] \quad (7)$$

4.2 해석에 따른 열전도 평가

4.2.1 평가모델과의 적합성

이 절에서는 4.1장에서 소개된 DEM과 MEM모델을 이용하여 이 실험 결과와 비교를 수행하였다. 자철광 및 SP에 대한 열전도계수를 실험적으로 도출하지 못하였으므로 기존의 실험자료를 이용하여 열전도 해석을 수행하였다. Table 5에서는 3상 혼입 복합체의 열전도 해석을 위한 해석조건을 나타내고 있다.

이 실험을 위한 콘크리트 역시 엄밀한 의미에서는 공기, 시멘트 수화물, 굵은 골재 및 잔골재, FA로 분리된 다상 복합체라고 할 수 있으나, 자철광 및 SP에 비하면 열전도는 매우 낮은 수준이므로 콘크리트 구체, 자철광, SP로 구분하여 3상 복합체의 열전도 평가를 하였다. 또한 ACI 221R에서 제시한 식과의 비교하였는데, 제안된 식은 식 (8a, b)과 같다.⁹⁾

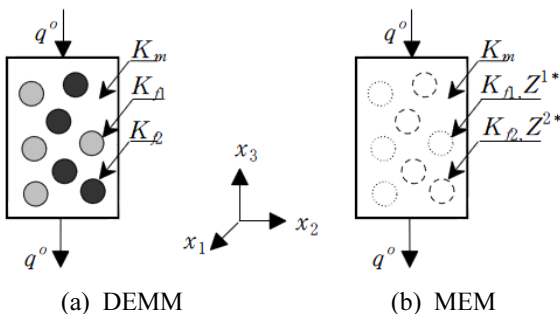


Fig. 5 Models for equivalent thermal conduction in composite

$$k_c = 0.072e^{0.00125d}, \text{ oven dried} \quad (8a)$$

$$k_c = 0.0865e^{0.00125d}, \text{ air dried} \quad (8b)$$

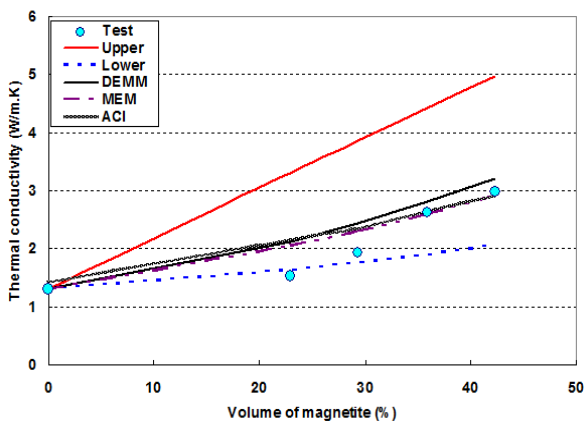
여기서, k_c 는 콘크리트 열전도계수(W/m.K), d 는 단위중량(kg/m³)을 나타낸다.

Fig. 6에서는 다양한 방법의 열전도 해석 결과와 실험 결과를 비교하였다.

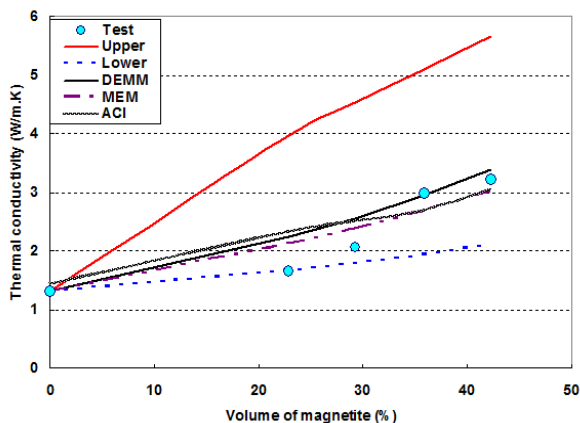
Fig. 6에서 알 수 있듯이 DEMM, MEM, ACI model은 30%이상의 자철광 체적비에서는 적절하게 배합에 따른 열전도 변화를 묘사하고 있었다. 전체적으로 Upper boundary의 2/3 수준으로 값이 평가되었으며, 각 시편에 대한 공극률과 수분 포화도를 고려하면 좀 더 정량적인 평가식을 제안할 수 있을 것이다.

Table 5 Variables for thermal conductivity analysis

Material	Density (kg/m ³)	Thermal conductivity (W/m.K)
Magnetite	4200	10
Steel powder	7800	45



(a) without SP



(b) with SP

Fig. 6 Thermal conductivity comparison with test and various technique

4.2.2 자철광 혼입비에 따른 열전도 분석

배합중 전체 자철광 골재의 체적 치환률이 30%까지는 열전도의 증가가 크게 발견되지 않았다. 여러 이유가 있겠지만, 콘크리트 자체의 열전도 특성이 명확하지 않기 때문이며 시편에 공기량이 다소 많은 것으로 판단된다. 이 연구에서는 콘크리트를 하나의 열전달매개체로 가정하여 자철광골재와 SP를 혼입하였는데, 콘크리트내의 시멘트겔, 공기, 골재의 열전도율은 각각 다르다. 특히 공기량의 수준이 큰 영향을 나타내는데, 공기의 열전도는 콘크리트의 70배 수준으로 낮기 때문이다.⁶⁾

자철광 골재의 치환률이 30% 이상인 경우에는 뚜렷한 열전도의 증가를 확인할 수 있었다. x축을 전체체적에 대한 자철광 골재의 체적비로, y축을 정규화된 열전도 계수의 증가비로 나타내면 Fig. 7과 같이 도시할 수 있다.

Fig. 7과 같이 자철광 골재 체적비가 30% 정도까지는 큰 증가를 확인할 수 없었으나, 그 이후부터는 거의 체적비의 증가에 따른 선형증가관계를 보이고 있다. 식 (9)에서는 자철광골재의 체적비와 열전도 증가비에 대한 회귀 분석 결과를 나타내었다.

$$Y = 6.0541X - 0.2345, R^2 = 0.9861 \quad (X > 0.23) \quad (9)$$

여기서, Y 는 정규화된 열전도의 증가율, X 는 자철광의 골재 체적비이다.

4.2.3 SP 혼입에 따른 열전도 분석

전술한대로 SP를 체적비 2~4% 수준으로 첨가하면 공극률 감소 및 염해에 대한 내구성이 증가된다고 보고되고 있다.¹¹⁾ 이는 장기실험 결과에서는 확실하지 않지만, 단기축진 실험에서는 철의 산화물이 공극을 채움으로서 염화물 확산이 늦어지기 때문이다. 그러나 1.5% 수준으로 SP를 혼입한 경우, 열전도 증가효과는 크게 증가하지 않았다. 또한 콘크리트 제조를 위해서 SP를 대단위 사용할 수가 없는데, 워커빌리티와 경제성을 무시할 수 없기 때문이다. 이 실험에서는 SP를 첨가한 경우 같은 배합에

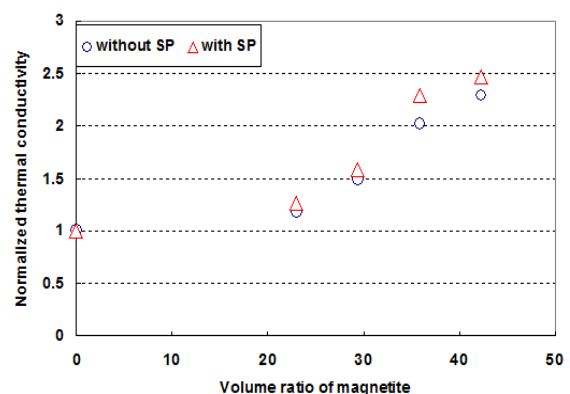


Fig. 7 Magnetite volume ratio and normalized thermal conductivity

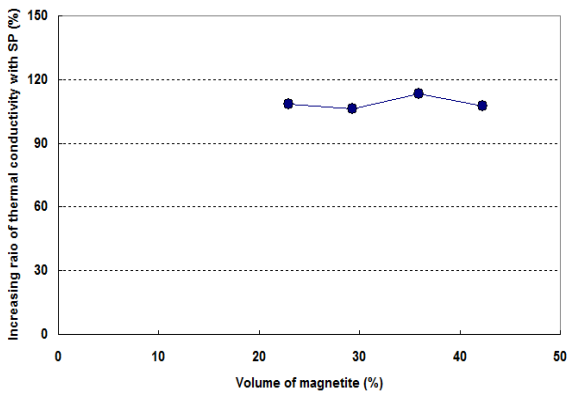


Fig. 8 Effect of steel powder on thermal conductivity

서 열전도가 106~113% 증가하였다. Fig. 8에서는 SP첨가(체적비 1.5%)에 따른 열전도 변화를 나타내고 있다.

이 연구에서는 자철광 및 SP의 혼입을 통하여 열전도의 증가와 이를 등가적으로 해석할 수 있는 기법들을 평가하였다. 그러나 이러한 기법들은 등가체적에 대한 실험과 해석이므로 실제 자철광 골재의 조립률, 시멘트와 공기량 등 구성 재료 각각의 특성과 열전도를 복합적으로 고려하여 합리적인 열전도 모델을 개발할 필요가 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 잔골재 및 굵은 골재를 자철광 골재로 치환하고 철분말을 첨가하여 열전도 특성을 분석하였으며, 기존의 열전도 모델과의 적합성을 평가하였다. 이 연구범위 내에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 잔골재와 굵은 골재를 자철광골재로 치환하여 열전도 평가를 수행한 결과, 자철광골재 체적비 42.3%에 steel powder 체적비 1.5%를 첨가하였을 때, 2.42~2.50배로 열전도가 증가하였다.
- 2) 기존 DEMM, MEM, ACI 제안식과 실험값을 비교할 때, 세가지 식 모두 중량과 혼화재료(자철광 및 SP)의 변화에 따른 열전도의 변화를 비교적 잘 예측하고 있었다. 기계공학분야에서 주로 사용되는 등가열전도 모델들(DEMM, MEM) 역시 콘크리트에 충분히 적용가능성을 가지고 있었으며, 실험값은 상한치(upper boundary)의 2/3 정도 수준으로 평가되었다.
- 3) 자철광 골재의 치환률이 낮은 경우, 해석보다 낮은 열전도효과가 평가되었다. 자철광골재를 사용하여 열전도를 높이려면 자철광 골재의 체적비가 30% 이상 되어야 골재 치환에 의한 열전도 증가효과를 기대할 수 있다.
- 4) SP를 체적비 1.5% 혼입한 경우 106~113% 수준으로 열전도도가 증가하였다. SP 체적을 늘릴 경우 열전도도는 증가하지만, 작업 성능 및 강도에 영향을 미칠 수 있으므로 이를 고려하여야 한다.

- 5) 이 연구에서 사용된 모델의 신뢰성을 높이기 위해서는 시멘트, 공기량, 골재 특성을 각각 고려하여야 하므로 DEMM 적용단계에 따른 개선이 필요하다. 또한 고전도성 골재가 소량 함유된 경우에 신뢰도를 높일 해석방안이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-286 2013 R1A1A2060114)이며 저자는 이에 감사드립니다.

References

1. Broomfield, J. P., *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, London: E&FN, 1997, pp. 1-15.
2. Thomas, M. D. A. and Bamforth, P. B., "Modeling Chloride Diffusion in Concrete: Effect of Fly Ash and Slag," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 4, 1999, pp. 487-495. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00192-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00192-6))
3. Ishida, T. and Maekawa, K., "Modeling of PH Profile in Pore Water Based on Mass Transport and Chemical Equilibrium Theory," *Concrete Library of JSCE*, Vol. 37, No. 1, 2001, pp. 151-166. (http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp/en/demos/ducom/brieftheory/Clib_JSCE_pH.pdf)
4. Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., and Park, C. K., "Predicting Carbonation in Early-Aged Cracked Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, No. 5, 2006, pp. 979-989. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.019>)
5. Yang, K. H. and Moon, J. H., "Mix Proportions and Physical Properties of Heavy Weight Concrete for Nuclear Power Plant," *The Korea Institute of Building Construction*, Vol. 12, No. 3, 2012, pp. 9-14, (in Korean).
6. Spicer, J. W. M., Osiander, R., Aamodt, L. C., and Givens, R. B., "Microwave Thermoreflectometry for Detection of Rebar Corrosion," *Structural Materials Technology III: An NDT Conference*, San Antonio, TX, SPIE, pp. 402-409.
7. Kim, K. H., Jeon, S. E., Kim, J. K., and Yang, S. C., "An Experimental Study on Thermal Conductivity of Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 2, pp. 363-371. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00965-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00965-1))
8. Lanciani, A., Morabito, P., and Rossi, P., *Measurement of the Thermophysical Properties of Structural Materials in Laboratory and in Site: Methods and Instrumentation*, High Temp. High Press. 21, 1989, pp. 391-400.
9. ACI 122R-02, *Guide to Thermal Properties of Concrete and Masonry System*, ACI Committee 122, 2002, pp. 1-21.
10. Lee, J. K. and Kim, J. G., "Analytical Study on Effective Thermal Conductivity of Three-Phase Composites," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 12, No. 7, 2011, pp. 2931-2938 (in Korean).

11. Kim, J. J., Han, M. C., and Han, C. G., "Fundamental Research on Corrosion Control for Reinforcing Bar by Incorporation of Steel Powder," *Conference of AIL-RA*, Vol. 1, No. 1, 2007, pp. 792-795 (in Korean).
12. Manahan, M. P., "Thermal Expansion and Conductivity of Magnetite Flakes Taken from the Oconee-2 Steam Generator," *Journal of Materials Science*, Vol. 25, No. 3, 1990, pp. 3424-3428.
13. Jeon, S. E., "An Experimental Research on Thermal Properties of Concrete," MS thesis, Department of Civil Engineering in Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1997, pp. 3-48.
14. Mutnuri, B., "Thermal Conductivity Characterization of Composite Materials," MS Thesis, College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, 2006, pp. 14-28.
15. Molina, J. M., Prieto, R., Narciso, J., and Louis, E., "The Effect of Porosity on the Thermal Conductivity of Al-12 wt.% Si/SiC Composites," *Scripta Materialia*, Vol. 60, No. 2, 2009, pp. 582-585. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.12.015>)

요 약 콘크리트는 경제적이면서 내구적인 건설재료로서 고단열성능을 가지고 있으므로 RC 구조물 뿐 아니라 내외장재에 많이 사용되고 있다. 또한 우수한 방사선 차폐 성능을 가지고 있으므로 원전구조물 및 플랜트 구조에 사용되고 있다. 그러나 이러한 고단열 성능으로 인해 내부에 원전구조물 내부에 화재나 멜트다운(melt-down)과 같은 문제가 발생하면 외부에서 인공적으로 온도를 낮출 방법이 매우 제한적이다. 이 연구는 자철광 골재와 철분말을 이용하여 고열전도 콘크리트를 제조하고 이에 대한 역학적 성능과 열전도 특성을 평가하였다. 자철광 골재를 체적비 최대 42.9%, 철분말을 1.5% 혼입하여 열전도 특성을 분석하였다. 자철광골재의 체적비가 30% 수준까지는 큰 열전도가 평가되지 않았으나, 이후 선형적으로 증가하여 체적비 42%가 되었을 때, 열전도는 2.5배 수준으로 증가하였다. 또한 철분말을 포함한 경우는 포함하지 않은 경우에 비해 열전도가 106~113% 증가하였다. 기존의 열전도 모델(ACI, DEMM, MEM)의 결과들이 실험 결과와 비교되었으며, 이러한 모델들은 자철광 및 철분말이 함유된 고열전도 콘크리트에 대해서도 합리적으로 적용될 수 있음을 검증하였다.

핵심용어 : 평가기법, 고열전도 콘크리트, 자철광, 철분말, 내구성, 원자력 콘크리트