

지중열교환기용 고성능 시멘트 그라우트 개발

이동철*, 양희정*, 전중규*, 서신석**, 최용민**

**코오롱건설 기술연구센터, **한일시멘트 테크니컬센터

Development of high-performance cement grout for ground heat exchangers

Dong-Chul Lee*, Hee-Jung Yang*, Joong-Kyu Jeon*

Shin-Seok Seo**, Yong-Min Choi**

*KOLON E&C R&BD Center, Young-In, Korea,

**Hanil Cement Technical Center, Dae-jeon, Korea,

Abstract

Performance of ground-source heat pumps (GSHPs) is mainly affected by ground heat exchangers which makes up more than 40% of construction cost. Exact construction and grout as backfill are important, because it is difficult to repair after being installed. As grout materials, bentonite grout material and cement material are used. In this paper, thermal conductivity according to mix proportion of cement grout has been experimentally studied. Some variables were set to evaluate thermal conductivities according to change in cement content, unit water ratio, mass per volume of fresh mortar, and aggregate types. From the experimental analysis, high performance cement grout has been proposed.

Key words : Ground heat exchangers(지중열교환기), GSHPs(지열냉난방시스템),
Cement grout(시멘트 그라우트), Bentonite grout(벤토나이트 그라우트)

기 호 설 명

OPC : 보통 포틀랜드 시멘트
(ordinary portland cement)
Ig. Loss : 강열감량 (ignition loss)
W/M_d : 물 대 모르타르 비 (water/mortar)
W/C : 물 대 시멘트 비 (water/cement)

1. 서 론

지중열교환기는 지열냉난방시스템의 성능에 가장 큰 영향을 미치며 시공비의 비중이 40% 이상 되는 중요한 부분이다. 그리고 설치 후 변경 및 수리가 어렵기 때문에 시공시 가장 신경을 써야 하는 부분이기도 하다. 시공시 천공 장비를 이용하여 설계 깊이만큼 Hole을 만든 후 그 Hole안으로 HDPE 파이프를 삽입하게 되는데 Hole과 열교환이 직접적으로 이루어지는 HDPE 파이프 사이에 빈 공간이 발생하여 열적 단락이 발생하게 된다.¹⁾ 따라서 이 공간을 매우게 되는데 그 역할을 하는 재료를 그라우트라고 한다. 일반적으로 지중열교환기용 그라우트로 팽윤성이 좋은 벤토나이트

† Corresponding author
Tel.: +82-31-329-0637, Fax: +82-31-329-0601
E-mail: ddong0001@kolon.com
접수일 : 2011년 5월 6일
심사일 : 2011년 5월 30일
채택일 : 2011년 5월 30일

트 혼합물(벤토나이트+물)을 사용한다. 물과 혼합된 순수 벤토나이트는 열전도도가 0.74W/m·K ~ 0.95W/m·K 로 주변의 지반보다 낮은 열전도도를 가진다.²⁾ 따라서, 실리카샌드 등과 같은 첨가제를 혼합하여 열전도도 향상을 도모하고 있다. 그러나 벤토나이트 자체의 낮은 열전도도로 인해 첨가제를 사용하여 열전도도를 높이는 데에는 한계가 있으며 열전도도 향상을 위해 첨가된 실리카샌드가 바닥으로 침전하여 재료분리가 일어나 원하는 열전도 성능을 발휘하지 못할 수도 있다. 그리고 해안지역에 시공될 경우 지하수의 염도에 의해 장기간에 걸친 부피의 감소와 투수계수 증가를 가져오게 된다. 또 다른 벤토나이트의 단점으로는 건조가 되면 고유의 특성인 팽창성이 감소하여 심한 균열이 발생하게 되는데 이는 열적단락을 일으켜 지중열교환기의 성능저하를 발생시킨다. 실제 지중열교환기는 한번 시공을 하고난 이후로는 그 안을 들여다 볼 수가 없으므로 벤토나이트의 상태를 확인할 수가 없다. 이러한 벤토나이트의 단점 및 지역적 제한을 극복하기 위해 일부 지역에서는 시멘트그라우트를 뒤채움재로 사용하고 있다. 시멘트를 그라우트로 사용하기 위해서는 열전도도가 높아야 하며 시공 후 건조수축이 발생하지 말아야 한다. 또한 혼합물의 비중 및 지하수에 의해 재료 분리가 일어나지 말아야 하며 시공성에 있어서도 편리성을 유지하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 배합비에 따른 시멘트그라우트의 열전도도 특성을 파악하였으며 그 결과로부터 무수축 고열전도성을 유지하는 시멘트 그라우트의 최적 배합을 도출하였다.

2. 실험

2.1. 실험 재료

본 실험에 사용된 시멘트는 비중 3.15, 분말도 3,300 cm²/g인 국내 H사 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였으며, 화학조성은 Table 1과 같다. 잔골재는 국내에서 주로 사용되고 있는 비중 2.5~2.8, 조립율 1.1~2.9 입도범위의 규석질 및 돌로마이트질, 장식질 잔골재를 사용하였으며, 각 골재별 물리적 특성을 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of OPC.

Comp.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Ig.Loss
wt%	21.2	47	32	61.2	3.4	2.2	1.1	0.1	2.1

Table 2. Physical properties of aggregate.

Sample Name	Type of aggregate	Specific gravity	Fineness modulus
S1	Silica sand	2.62	1.12
S2			1.94
S3			2.93
D2	Dolomite sand	2.81	1.81
F2	Feldspar sand	2.52	1.78

2.2. 실험 변수 및 모르타르 배합

시멘트 모르타르의 배합비별 열전도율 변화 실험변수로 시멘트 함유량, 물/건조모르타르, 단위용적중량 및 골재의 종류 등에 따른 영향을 살펴보기로 하였다. Table 3에서 보는바와 같이 시멘트 함유량 변화에 있어서는 물/건조모르타르를 0.16로 고정시키고, 잔골재는 Silica sand S1+S2+S3를 동일하게 조합하여 시멘트량 변화에 따른 모르타르 배합을 실시하였으며, 물/건조모르타르 변화에 있어서는 시멘트/골재비를 0.30로 고정시킨 상태에서, 물/건조모르타르(W/M)를 0.19, 0.21, 0.23으로 변화시켰다.

Table 3. Mix proportions of cement mortar.

Parameters	Name of specimens	Unit Water ratio (W/M)	Unit content of Dry Mortar(wt%)							
			OPC	Aggregate					Admixture	Plasticizer (NP)
				S1	S2	S3	D2	F2		
Cement content	C-22	0.16	22	30	5	30			12.8	0.2
	C-19		19	30	5	30			15.8	0.2
	C-16		16	30	5	30			18.8	0.2
Unit Water ratio(%)	W-19	0.19	22	15	36	22			5	
	W-21	0.21	22	15	36	22			5	
	W-23	0.23	22	15	36	22			5	
Mass per Volume of Fresh Mortar	F-1	0.17	19	15	36	22			8	
	F-2	0.17	19	24	24	25			8	
	F-3	0.17	19	25	10	38			8	
Kinds of Aggregate	CM-S2	0.20	20			72			8	
	CM-D2	0.20	20				72		8	
	CM-F2	0.20	20					72	8	

한편, 굳지 않은 모르타르의 단위용적중량 변화를 주기위해 결합재/골재비는 0.37 및 물/건조모르타르를 0.17로 동일하게하고 골재의 조합비율(S1:S2:S3)만을 변화시켜 굳지 않은 모르타르의 충전율을 변화시키고자 하였다. 또한 골재 암질에 따른 열전도율 영향을 살펴보기 위해 단위수량 0.2 및 결합재/골재비 0.39로 동일하게 하고 유사 입도를 가지고 있는 S2, D2, F2의 골재를 각각 사용하여 골재 종류에 따른 시멘트 모르타르를 배합하였다.

2.3. 열전도율 측정장비 및 시편 제작

본 실험에 사용된 열전도율 측정 장비는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 일본 KEM사에서 제작한 QTM-500 장비를 사용하였으며, 이 장비는 과도 열선방식(transient hot wire method)을 변형한 프루브법(Probe method)에 의해 열전도율을 측정하는 장비로 기본원리는 가장 널리 이용되고 있는 TLPP(two linear parallel probe)방식과 동일하다.³⁾ 즉, 열선과 K-type thermocouple이 내장된 probe를 이용하여 60초 이내에 측정이 가능한 것으로서, 측정온도의 증가량이 크지 않고 빠른 시간 내에 측정이 가능하므로 열전도율의 온도의존성이 큰 재료에서도 사용 가능하며, 시멘트 모르타르 및 콘크리트와 같은 건설재료의 열전도율을 측정하는데 적합하며, 열전도율 측정범위는 0.02~12.0 W/m·K로 이 측정범위내에서의 측정 오차는 $\pm 3\%$ 이내이다.

본 실험에서 사용된 QTM-500 측정 장비는 시편의 크기가 클수록 열전도율의 측정 정확도가 증가하기 때문에 시편의 크기를 가로×세로×두께 12×16×4cm의 직육면체 몰드를 이용하여 Table 3

의 모르타르 시편을 제작코자 하였으며, 굳지 않은 모르타르의 제작은 KS L ISO 679에 의한 모르타르 혼합방법⁴⁾에 의거 수행하고, 시편제작 몰드에 무다짐으로 채워 양생하였다. 양생방법은 재령1일 탈형후 표준양생조건(20℃, RH60%)에서의 28일 기건양생을 거친 후 질건(105℃, 48hr 건조)하여 각 모르타르별 열전도율을 측정하였다. 한편, 모르타르의 재령별 열전도율 변화 검토와 함께 모르타르내의 함유율에 따른 열전도율의 영향을 살펴보기 위해 건조시편을 수중에 침지시켜 함유율별 열전도율 변화 역시 검토하고자 하였다.⁵⁾ 모르타르 열전도율 측정부위는 프루브의 열선 센서 접촉이 완전하게 모르타르면에 밀착되어야 하기 때문에 모르타르 6면중에서 평평한 시편 밑면 중앙을 선정하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시멘트 모르타르 구성 재료별 열전도율 특성

시멘트 함유량별 모르타르의 열전도율 검토에 앞서 시멘트 모르타르의 각 구성재료에 대한 열전도율을 먼저 살펴보면, W/C=0.4, 0.5로 물과 시멘트만을 혼합하여 시멘트 페이스트의 열전도율을 측정한 결과, 14일 기건양생 시 W/C=0.4의 경우 약 1.04W/m·K, W/C=0.5의 경우 약 0.91W/m·K로 물시멘트비가 높을수록 시멘트 페이스트의 열전도율은 저하되는 것으로 나타났다. 한편, 골재(모래)의 경우 규석암 자체는 약 1.5~2 W/m·K의 높은 열전도율을 나타낸다고 보고되고 있으나, 모래와 같이 잔골재의 경우에 있어서는 열전도율 측정 시 모래 사이에 존재하는 공극(공기층)에 의해 의존되기 때문에 문헌의 열전도율 값에는 크게 못 미치는 것으로 나타났다. 그러나 시멘트 모르타르 경화체의 경우 모래 사이에 시멘트 페이스트 및 공극 자유수로 연결되어지기 때문에 모래 자체보다는 높은 열전도율 값을 나타낼 것으로 판단된다. 한편, 모르타르 공극 내에 존재하는 공극수 및 공극기체의 열전도율은 기존 문헌에 의하면 물의 열전도율은 0.598W/m·K, 기체의 열전도율은 0.0255W/m·K로 공기의 열전도율은 물

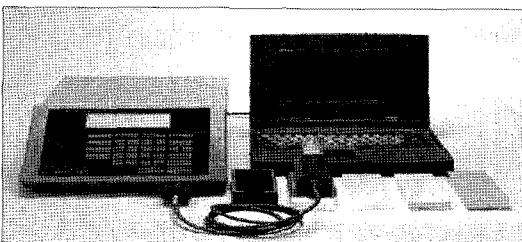


Fig. 1 Apparatus of quick thermal conductivity meter(QTM-500)

에 비해 약 1/23에 해당하는 낮은 열전도율을 지니고 있다. 따라서 모르타르 내 공극 중에 기체에 대한 수분의 비율이 높아질수록 높은 열전도율이 예상된다.

Table 4. Thermal conductivity of material proportions in cement mortar specimen.

Material	Condition	Thermal Conductivity(W/m·K)	
		Test Result	Reference ^{6,7)}
Cement Paste	W/C=0.4, 14days Curing (20°C, RH60%)	0.91	Cement paste : 0.6~1.0
	W/C=0.5, 14days Curing (20°C, RH60%)	1.04	Cement powder: 0.2~0.3
Sand	S1	0.20	Fine Sand : 0.4~0.5
	S2	0.23	
	S3	0.26	Silica Stone : 1.5~2.0
	D2	0.31	Quartz : 4.45
	F2	0.20	Limestone : 2.3~2.8
Water	Free Water in Mortar Specimen	-	0.598 (20°C)
Air	Air in Mortar Specimen	-	0.0255 (20°C)

3.2 시멘트 함유량별 열전도율 특성

상기 Table 4의 시멘트 모르타르 구성재료 간 열전도율을 살펴볼 경우, 시멘트 함유량이 증가할수록 시멘트 페이스트양이 상대적으로 증가하기 때문에 시멘트 모르타르의 열전도율은 증가할 것으로 예상되었으나, Fig. 2에서 보는바와 같이 이와는 반대의 결과가 나타났다. 이는 시멘트 모르타르 계에서는 시멘트 페이스트의 양에 크게 의존하지 않는다는 결과로, 실제로 Table 4의 시멘트 페이스트 열전도율 결과값 약 1.0W/m·K 보다,

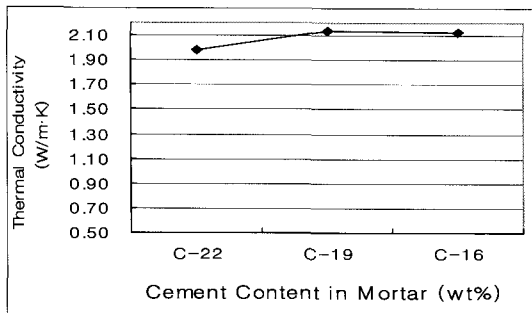


Fig. 2 Comparison of thermal conductivities with the cement content in mortar.

모르타르의 각 구성재료 간의 열전도율 값이 낮음에도 불구하고, 모르타르의 열전도율은 이보다 2배가량이 높은 1.9~2.1W/m·K의 높은 열전도율 값을 나타내고 있다. 즉, 시멘트 모르타르계 내의 시멘트 페이스트 양 보다는 모르타르의 충전밀도에 의존하는 것으로 판단된다.

3.3 물/건조모르타르(W/M)별 열전도율 특성

Fig 3에 시멘트 모르타르 제조 시 물/건조모르타르별 열전도율 특성을 살펴본 결과로, 물/건조모르타르가 증가할수록 열전도율은 감소되어지는 것으로 나타났으며, 이는 물/건조모르타르 증가에 따른 시멘트 모르타르의 공극율이 증가되어졌기 때문으로 판단된다. 한편, 3.2항의 시편과 비교하여 시멘트 함유량 및 골재 함유량이 증가되었음에도 불구하고 Fig 2의 열전도율 값에 비해 전반적으로 다소 낮은 열전도율 값을 보이는 것은 상대적으로 높은 물/건조모르타르(W/M, 0.16 → 0.19~0.23)에 의한 영향과 더불어 단위용적중량을 비교하여 본 결과, W-19~W-23의 단위용적중량(2.16~2.10 kg/L)이 C-22~C-16 단위용적중량(2.25~2.21 kg/L) 보다 상대적으로 작게 나타난 결과로 살펴볼 때, 시멘트 모르타르내의 골재 입도 구성비율에 의한 모르타르 전체계의 최밀충전에도 영향이 있을 것으로 판단되어진다. 따라서 이에대한 영향을 살펴보기 위해 3.4항에서는 골재 입도별 구성비율만을 달리하여 굳지 않은 모르타르의 단위용적중량을 측정하고, 모르타르계의 단위용적중량 증가(골재 최밀충전 증가)가 열전도율에 미치는 영향에 대해 살펴보기로 한다.

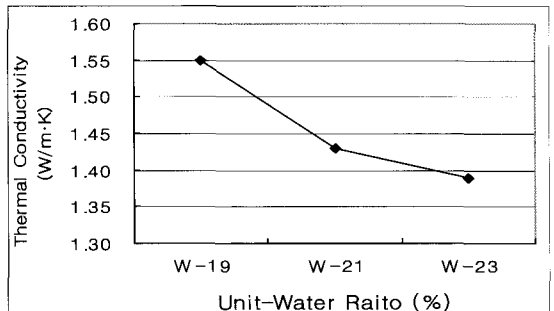


Fig. 3 Comparison of thermal conductivities with the unit-water ratio.

3.4 골재 입도구성에 따른 모르타르 단위용적 증량별 열전도율 특성

시멘트 모르타르계의 최밀 충전 유도를 위해서는 골재의 전체 구성 비율에 있어 넓은 입도분포를 갖게 하여야 하며, Table 3의 F-1→F-2→F-3로 갈수록 골재의 입도분포를 더욱더 넓게 유도한 배합비로 균지 않은 모르타르의 단위용적증량을 측정된 결과, 2.16→2.17→2.20 kg/L로 점차 증가하였다. 한편, 골재조합부분만을 가지고 겉보기밀도를 측정된 결과에 있어서도 1.65→1.68→1.72로 골재 실적을 역시 증가되는 경향을 보였으며, Fig 4에서 보는바와 같이 단위용적증량 증가에 따라 모르타르의 열전도율도 증가되고 있음을 알 수 있다. 이는 모르타르 전체 계에서의 최밀 충전이 열전도율을 향상시키는데 매우 큰 영향을 주는 것으로 판단되며, 모르타르계의 최밀 충전을 위한 골재의 입도분포에 있어서는 F-1의 정규분포 보다는 F-3의 굵은 골재와 미세골재가 상대적으로 많고 중간골재가 적은 쌍봉의 입도분포 곡선을 이루도록 배합 설계하는 것이 한층 더 높은 열전도율을 갖을 수 있을 것으로 판단된다.

3.5 골재 종류별 열전도율 특성

Table. 2의 골재별 진비중 및 Table 4의 골재의 열전도율을 비교하여 볼 때, 진비중이 가장 높은 돌로마이트질의 D-2 골재가 열전도율에 있어서도 가장 높게 나타나고 있으며, 진비중 크기순서인 D-2>S-2>F-2 순으로 골재 자체의 열전도율도 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 앞서 언급

한 바와 같이 골재의 입도분포에 따른 겉보기 비중 값의 상승(최밀충전: 공극량감소) 영향도 함께 고려되어야 할 것이다. 한편, 이들 골재를 적용하여 골재 종류별 시멘트 모르타르의 경화체 시편 열전도율 값을 Fig 5에 나타내었으며, CM-S2(규사질)>CM-D2(돌로마이트질)>CM-F2(장석질) 골재 사용 모르타르 순으로 열전도율 값이 감소되어지는 경향을 보이고 있다. 이는 앞서 골재자체의 열전도율 순서와는 다소 다른 경향을 보이는 것으로, 시멘트 모르타르 계에서의 골재자체 열전도율 값에 의한 영향도 있을 수 있으나, 이보다는 모르타르 계 전체의 충전 밀도 및 건조속도에 의한 잔여 함수량의 차이에서 오는 영향이 더 크기 때문으로 판단된다. 한편, Fig 5의 세 종류 시편 모두 전체적으로 앞서 시험한 시료보다 낮은 열전도율 값(1.06~1.22W/m·K)을 보이고 있는 것은 골재의 단일 입도만을 사용한 결과로 앞서 언급한 적용 골재의 입도분포를 넓게 가져가 줌으로써 모르타르 계 전체의 충전 밀도를 향상시킬 경우, 모르타르의 열전도율 값은 상승하게 되나, 단일 입도의 골재를 적용할 경우 단위수량 증가 및 모르타르의 충전밀도가 저하하게 되어(단위용중 : 2.16→2.10) 이에 의한 열전도 값이 전체적으로 감소되어진 것으로 판단된다.

3.6 모르타르 양생재령별 함수율에 따른 열전도율 변화

시멘트 모르타르의 양생 재령이 길어질수록 강도의 증진 및 수밀성이 향상되어 경화체의 열전도율이 증가되어질 것으로 예상되었으나, Fig 6에

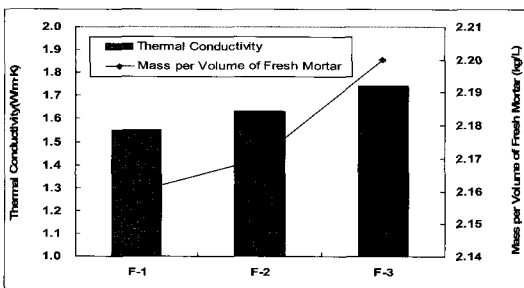


Fig. 4 Comparison of thermal conductivities with the mass per volume of fresh mortar.

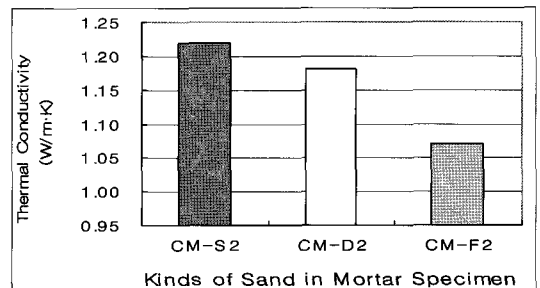


Fig. 5 Comparison of thermal conductivities with the kinds of sand in mortar specimen.

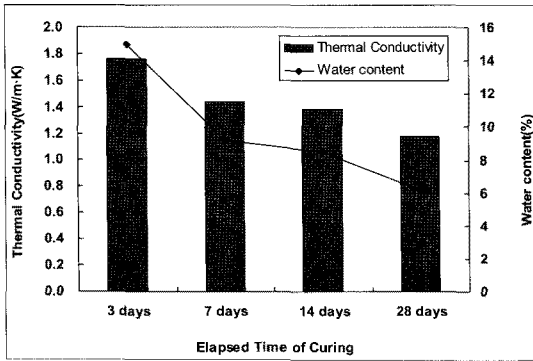


Fig. 6 Variations of thermal conductivity with the curing time(condition : 20°C, RH60%).

서 보는 바와 같이 기건양생 재령 기간에 따라, 오히려 열전도율이 점차 감소되어지는 경향을 보이고 있으며, 이는 모르타르의 열전도율에 미치는 인자에 있어서 모르타르의 강도증가에 의한 열전도율 증가 영향보다는 모르타르내의 함수율 저감에 의한 열전도율 감소영향이 상대적으로 크게 작용되고 있음을 간접적으로 시사하는 바이다. 즉, Fig 7에서 보는바와 같이 모르타르의 함수율과 열전도율과의 상관관계는 상관계수 $R^2=0.97$ 로 매우 높은 비례 선형적 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있으며, 일반적인 시멘트 온돌바닥 모르타르와 같은 경우 장기간 대기 노출 시 최종 함수율이 3~5%정도 유지됨을 감안할 때, Fig 7의 상관관계식으로부터 시멘트 모르타르의 재령에 따른 열전도 감소율을 예측하여 볼 경우, 초기 3일 재령의 열전도율 측정값에서 중국적으로는 약40~50%정도 감소된 값을 유지할 것으로 판단된다.

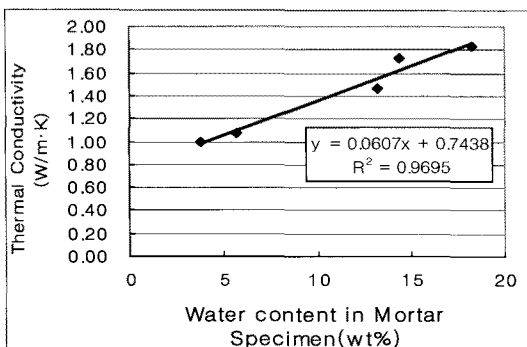


Fig. 7 Variations of thermal conductivities with the water content in mortar specimen.

4. 고찰 및 결론

최근 저에너지 건축물 시공 요소기술의 개발과 함께 신재생에너지의 이용도 증가하고 있는 추세로, 이중 지중열을 이용한 에너지 절약형 건축물의 시공 기술이 활성화 되고 있는 추세이다. 이러한 지열 냉난방시스템에 있어서 수직형 지중열교환기용 채움재로 기존에는 경제적인 이유로 벤토나이트를 주로하여 시공되어져 왔으나, 자체 열전도율이 낮고 균열을 동반한 건조수축 및 장기간 재료의 침식으로 인해 열효율성 및 내구성이 크게 저하되는 이유로 이러한 단점을 보완한 고성능 시멘트 그라우트의 필요성을 느끼게 되었다. 이에 따라, 본 연구에서는 국내 지열보급사업 선두업체인 코오롱건설(기술연구센터)와 국내 레미탈 선두업체인 한일시멘트(테크니컬센터)와의 공동연구를 통해, 지중열교환기용 고열전도율을 갖는 고성능 시멘트계 그라우트를 개발하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 시멘트 모르타르의 열전도율 특성에 미치는 요인검토를 위해, 모르타르 배합에 있어서 시멘트 함유량, 물/건조모르타르, 단위용적 중량, 골재종류 등에 따른 영향 검토 및 모르타르 함수율과 열전도율과의 상관관계를 도출하였다.
- 2) 시멘트 모르타르의 각 구성재료 별 열전도율 산술적 값 보다는 실제 모르타르 경화체 전체로 구성되어질 경우, 시멘트페이스트와 골재 및 자유수분과의 연결에 의한 시너지효과로 보다 높은 열전도율값을 보인다.
- 3) 시멘트 모르타르 계에서의 열전도율은 시멘트 페이스트 양에 의존하지 않으며, 단위수량 및 골재의 입도구성을 통한 모르타르 전체의 충전밀도에 큰 영향을 받는다.
- 4) 모르타르에 사용되어지는 골재의 종류에 따라서도 모르타르 열전도율 값에 차이를 보이며, 장식질<돌로마이트질<규사질 골재 적용 순으로 모르타르의 열전도율값이 증가하게 되며, 단일입도 골재 적용보다는 입도분포를 넓게 가져가 줄 수 있는 골재조합(조골재+세골재) 적용배합이 모르타르의 열전도율을 높여주는 효과가 크다.

5) 시멘트 모르타르의 열전도율은 모르타르내의 함수율에 따라 비례선형적 관계를 가지고 있는 것으로 나타났으며, 시멘트 모르타르의 경화정도에 따른 열전도율 상승효과보다는 재령이 지남에 따른 모르타르 내 함수율이 낮아지면서 모르타르 경화체의 공극량 증가로 열전도율 값은 이에 비례하여 감소되어지는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 백성권, 전중규, 안형준, 2007, "지열냉난방시스템 수직형 지중열교환기 그라우트의 열적 특성에 관한 연구", 한국신·재생에너지학회 추계논문집, pp. 546-549.
2. 최항석, 2009, 지중열교환기용 그라우팅, 설비학회 제 38권, pp. 56-60.
3. 김국한, 김상은, 방기성, 김진근, 2001, "콘크리트의 열전도율에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제13권 4호, pp. 305-313.
4. KS L ISO 679, 2006, Methods of testing cements—Determination of strength, 한국표준정보망.
5. Japan Concrete institute, 1982, "The measuring methods of conductivity, diffusivity, and specific heat of concrete and their application", J. Japan Concr., pp. 11-14.
6. Yunsheng Xu, 2000, "Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement", Cement and Concrete Research 30, pp. 59-61.
7. Rohsenow, W.M., 1973, handbook of Heat Transfer, Mcgraw-Hill, New York.