한국신·재생에너지학회 2009년도 춘계학술대회논문집 pp.604~607

텍스타일형 지중열교환기의 터널에서의 적용

*이 철호[1], 이 강자[2], 길 후정[3], 정 재형[4], **최 항석[5]

Application textile-type geothermal heat exchanger for tunnel

*Chulho Lee, Kangja Lee, Hujeong Gil, Jaehyeung Jeoung, **Hangseok Choi

Key words : Ground heat exchanger(지중열교환기), Tunnel(터널), Thermal conductivity(열전도도), Energy textile(에너지 텍스타일)

Abstract : The geothermal energy have been developed as the pro-environmental and the substantial long-term energy. Recently energy foundations and other thermo-active ground structures have been developed to enhance the use of geothermal energy. In this research, a tunnel wall is focused as a source of geothermal energy. If the tunnel wall can be used for geothermal source, it can provide relatively lower cost because it is not necessary to make a deep borehole like in case of closed-loop vertical ground heat exchanger. For analyzing efficiency of heat exchanger in tunnel, laboratory tests and the numerical analyses are performed.

Nomenclature

K: coefficient of thermal conductivity, W/mK

Subscript

W, C, S, G : water, cement, sand, gravel
FA, BE : fly ash, bentonite
W/C : water-cement ratio
S/a : sand-aggregate ratio

1. 서 론

지열 에너지는 냉난방 시스템을 중심으로 친환경적이며 지속가능한 에너지 이용 기술로써 발전되어 왔다. 최근에는 건물의 기초를 위한 말뚝 내부에 지중 열교환기용 파이프를 함께 매설하는 에너지 파일(Energy pile), 지하철 역사와 같은 지하 구조물 외벽에 지중 열교환기용 파이프를 설치하는 에너지 벽체(Energy wall) 등 적용분야도 다양해지는 추세이다.

터널 외벽을 이용하는 지열 시스템 연구는 오스트리아를 중심으로 진행되고 있다. 학교나 지하철 역사와 같은 공공시설에 적용되어 실증 연구를 거치고 있다. Markiewicz(2004)는 터널 외벽에 라디에이터를 열원으로 하여 사진 1과 같은 Geotextile 형태의 열교환기를 설치하고 열원에서 발생한 에너지가 열교환기를 통해 소산되는 과정을 시뮬레이션 하여 터널 외벽이 가지는 항온성을 검증하고 효율을 검토하였다. 국내에서는 최근 백성권(2004)은 사진 2와 같이 중공말뚝을 이용한 지열 냉난방 시스템 연구를 통해 지하 구조물을 이용한 냉난방 시스템 운전 효율을 연구하였다.

1) 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정
E-mail : cryfreer@korea.ac.kr
Tel : (02)3290-3742 Fax : (02)928-7656
2) 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정
E-mail : rkdwk2000@korea.ac.kr
Tel : (02)3290-3742 Fax : (02)928-7656
3) 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정
E-mail : kilmanner@korea.ac.kr
Tel : (02)3290-3742 Fax : (02)928-7656
4) 한국건설기술연구원 선임연구원
E-mail : jjhcivil@kict.re.kr
Tel : (031)910-0378 Fax : (031)910-0211
5) 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수
E-mail : hchoi2@korea.ac.kr
Tel : (02)3290-3326 Fax : (02)928-7656

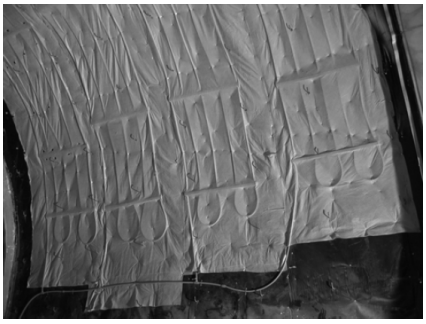


사진 1. 터널에 설치된 열교환기용 Geotextile (Brandl, 2006)

사진 2. 중공 말뚝에 설치한 열교환기(백성권, 2004)

국토해양부와 지하철공사의 발표에 따르면 우리나라는 산악지형으로 인해 도로터널이 817개소, 철도터널은 577개소, 수도권 지하철 총 연장은 약 286km에 이르는 등 터널 시공이 많고 전국에 분포하고 있다. 터널 외벽을 활용한 지열 냉난방 시스템은 기존에 시공 된 지하 구조물을 사용하므로 100~200m 까지 지반을 천공하여 지중 열교환기를 시공하는 기존 지열 냉난방 시스템에 비해 상대적으로 시공비를 절약할 수 있다는 강점을 가지고 있다. 본 연구에서는 새로운 지열 에너지원으로써 터널의 항온성을 이용하기 위해 터널 외벽에 사용되는 라이닝 등의 열 물성치를 실내시험을 통해 산정하고 수치해석을 통해 효율을 검토하였다.

2. 실내 시험

2.1 시험 방법

일반적으로 터널의 외벽은 그림 1과 같이 터널 굴착 후 먼저 숏크리트(shotcrete)를 시공한 후 지하수 흐름을 유도하는 배수재를 설치하고 콘크리트 라이닝이 시공되는 순서로 진행된다. 에너지 텍스타일은 터널 외벽에 시공되므로 주변 재료의 열물성치는 중요한 인자이다. 따라서 표 1, 2와 같은 국내 터널 외벽 시공에 사용되는 배합비를 사용하여 시료를 각각 성형하였다. 사진 3은 시험에 사용된 시료의 모습이다. 열전도도는 비정상 열선법(transient hot wire method)을 사용하는 QTM-500(사진 4)를 사용하여 측정하였다.

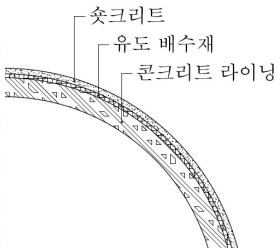


그림 1. 일반적인 터널 외벽 단면

표 1. 시험에 사용한 숏크리트 배합비

구분	W/C (%)	S/a (%)	단위 재료량(kg/㎥)						
			W	C	S	G	강섬유	급결제	유동화제
일반	44	65	194	441	1100	608	-	22.05	4.41
강섬유	45	65	216	480	1042	576	40	24.00	4.80

표 2. 시험에 사용한 터널 라이닝 배합비(박상규 등, 2003)

물/혼합재료 비	단위 재료량(kg/㎥)			
	W	C	FA	BE
0.8:1	672	320	420	101

(a) 강섬유 숏크리트 (b) 콘크리트 라이닝

사진 3. 시험에 사용된 시료의 모습

사진 4. 열전도도 측정기(QTM-500)

2.1 시험 결과

열전도도 측정 결과는 표 3에 나타나듯이 습윤상태에서 강섬유가 첨가된 숏크리트의 열전도도가 2.5261 W/mK로 가장 높게 나타났으며 굵은 골재가 첨가되지 않은 라이닝이 1.1311 W/mK로 가장 낮게 나타났다. 지반의 열전도도가 대략 2.0 W/mK인 점을 고려할 때 숏크리트의 열전도도는 양호한 것으로 나타났다. 라이닝의 경우 터널 외벽 시공 시 마감재 역할을 하므로 표면이 매끄러운 재료를 선택해야 하므로 굵은 골재의 사용이 제한되어 배합비에 포함되지 않아 열전도도가 상대적으로 낮게 났다.

표 3. 열전도도 측정 결과

구분	K(W/mK)	
	건조상태	습윤상태
일반 숏크리트	1.6327	2.1079
강섬유 숏크리트	2.3457	2.5261
라이닝	1.0497	1.1311

3. 수치해석

3.1 해석 방법

터널 외벽의 숏크리트와 라이닝 사이에 그림 2와 같이 텍스타일형 열교환기를 모사하고 열교환기 파이프 안으로 흐르는 유체의 흐름으로 인한 열전달 효율을 수치해석 방법을 적용하여 해석하였다. 해석에 사용된 파이프의 총 길이는 18m이고 그림 3과 같이 U자관으로 연결된 수직 배열로 가정하였다. 숏크리트의 두께는 10cm, 라이닝의 두께는 20cm로 가정하고 열교환기용 파이프가 설치된 단면은 5cm로 가정하였다. 지하수는 정수상태로 고려하였으나 지하수 흐름에 의한 열전도 상승을 고려하기 위해 지하수(물)의 열전도도를 변화시키며 해석을 수행하였다.

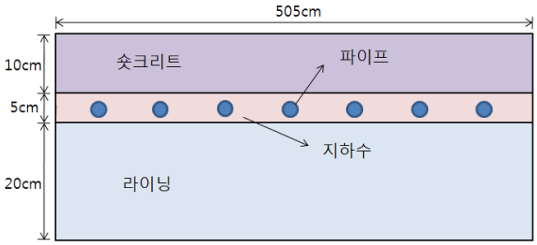


그림 2. 수치해석 해석 단면

해석에 사용한 숏크리트와 라이닝의 열전도도는 실내시험을 통해 측정한 결과 중 습윤상태의 일반 숏크리트와 라이닝의 물성치를 사용하였으며 해석에 사용한 물성치와 조건은 표 3과 같다. 열교환 파이프 내를 순환하는 유체의 순환속도는 0.1m/s로 사용하였으며 유입온도는 20℃로 냉방조건을 모사하도록 하였다.

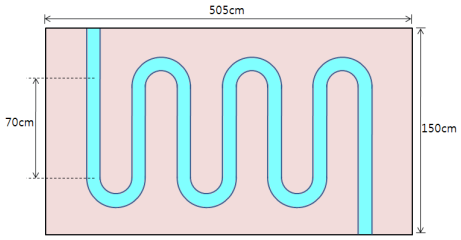


그림 3. 열교환기용 파이프 배열

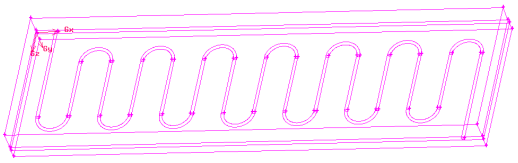
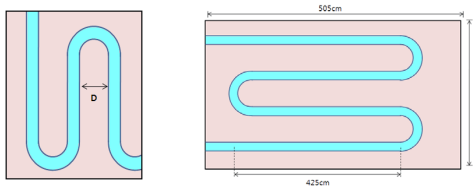


그림 4. 지중열교환기 3차원 해석망

표 4. 해석에 사용된 재료의 물성치

구분	라이닝	숏크리트	지하수	유동액
밀도(kg/m³)	3640	3640	998.2	1000
열용량(J/kg·K)	840	840	4182	2360
열전도도(W/m·K)	1.13	2.11	0.6	0.55
점성계수(kg/m·s)	-	-	0.001	16.1

지중 열교환기 파이프 사이의 열간섭에 의한 영향을 파악하기 위해 파이프 사이의 간격(그림 5a)을 각각 30, 40, 50cm 3가지 경우로 해석하였다. 또한 그림 5b와 같은 파이프의 횡방향 배열을 고려하여 해석하여 유출온도의 변화를 고찰하였다. 지하수 흐름에 대한 영향은 지하수의 열전도도를 0.6, 1.0, 1.5 W/mK 의 3가지 경우로 해석하고 결과를 고찰하였다. 라이닝과 숏크리트의 열전도도에 따른 영향을 비교하기 위해 라이닝과 숏크리트의 열전도도를 각각 1.5, 2.0, 2.5 W/mK의 3가지 경우로 열전도도를 변화시키며 해석을 수행하였다. 마지막으로 파이프내 유동액의 순환속도에 따른 영향을 분석하기 위해 순환속도를 0.05, 0.1, 0.3 m/s의 3가지 경우로 해석하고 이에 따른 영향을 고찰하였다.



(a) 파이프 간격 (b) 횡방향 파이프 배열

그림 5. 파이프 간격과 횡방향 파이프 배열

3.2 해석 결과

열교환기의 3차원 해석망 해석 결과는 그림 6의 A-A' 단면에서 유입구 파이프부터 유출구 파이프로 진행하면서 온도가 감소하는 그림 7과 같은 결과가 나타났다. 이때 유출 온도는 약 3.6℃ 감소한 16.41℃로 나타났다.

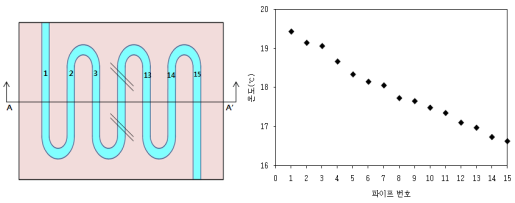


그림 6. 열교환기 파이프 단면(A-A')과 온도분포

열교환 파이프 사이의 열간섭 영향을 고려한 해석에서 그림 7에서 나타나듯이 열교환기 파이프 사이의 간격(D)이 가장 큰 50cm에서 약 17.0℃로 유출온도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 횡방향 배열의 경우 동일한 파이프 길이를 사용한 상태에서는 횡방향 배열의 유출 온도가 16.11℃로 수직방향 배열의 유출온도 16.41℃에 비해 상대적으로 효율이 좋은 것으로 나타났다. 이는 동일한 파이프 길이로 설계 되었을 경우 터널의 단면 특성상 횡방향으로 배열한 열교환기 단면이 파이프 배열 시 굴곡(U자관)을 줄일 수 있어 파이프 사이의 간격이 멀어지는 효과로 해석할 수 있다.

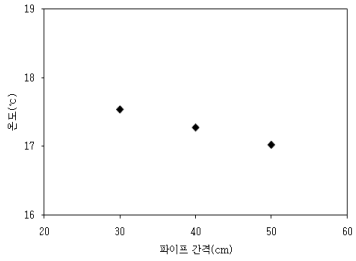


그림 7. 파이프 간격에 따른 유출수 온도 분포

지하수 흐름에 대한 영향을 고려하기 위한 열전도도에 따른 해석 결과는 그림 8와 같다. 지하수의 열전도도가 1.5 W/mK인 경우 유출온도 16.20℃로 열전도도가 0.6 W/mK인 경우에 비해 상대적으로 높은 열전달 효율을 보임을 알 수 있다.

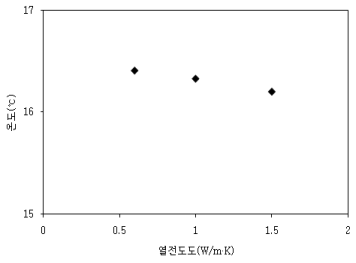


그림 8. 지하수 열전도도에 따른 유출수 온도 분포

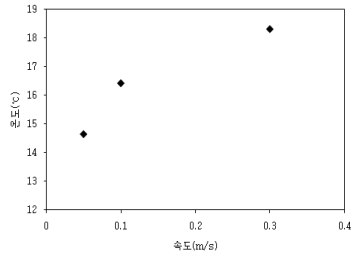


그림 9. 유동액 순환 속도에 따른 유출수 온도 분포

파이프 내 유동액의 순환 속도에 따른 해석을 실시한 결과를 그림 9에 나타내었다. 순환 속도 0.05m/s 와 0.3m/s 의 경우 유출온도는 각 각 14.64℃, 18.29℃로 약 3℃ 가량의 차이를 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 터널 외벽을 이용하여 텍스타일형 열교환기를 시공하였을 경우 열전달 효율을 고찰하고자 실내시험과 수치해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 국내에서 사용되는 터널 외벽의 숏크리트와 라이닝의 열전도도를 실내시험을 통해 측정한 결과 습윤상태에서 강섬유를 첨가하지 않은 일반 숏크리트는 대략 2.11 W/mK, 강섬유를 첨가한 숏크리트의 열전도도는 대략 2.53 W/mK, 라이닝의 열전도도는 대략 1.13 W/mK로 나타났으며 건조상태에서는 각각 1.63, 2.35, 1.05 W/mK로 나타났다.
- 실내시험을 통해 측정한 터널 외벽의 물성치를 통해 열교환기용 파이프를 설치한 3차원 단면을 사용하여 해석한 결과 파이프 내 유동액의 온도는 유출구 방향으로 이동할수록 온도가 감소하는 것으로 나타났으며 유입온도가 20℃일 때 유출온도는 대략 16.41 ℃로 나타났다.
- 열교환 파이프 간격을 각가 30, 40, 50cm로 다르게 해석해 본 결과 파이프 사이 간격이 넓을수록 유출온도가 낮아지는 것으로 나타났다.
- 열교환 파이프 배열을 횡방향으로 설계하였을 경우 동일한 길이의 파이프 설계 시 횡방향 파이프로 설계한 경우가 상대적으로 유출온도가 낮은 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 지식경제부 신재생 에너지 센터 신재생에너지 기술개발 사업(2008-N-GE08-R-01)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

[1] 박상규 등, 2003, “터널 라이닝 배면 공동용 그라우팅 주입재료”, 특허 등록번호 10-0377829
[2] 백성권, 2004, “중공 말뚝을 이용한 지열 냉난방 시스템 개발에 관한 연구”, 박사학위 논문, 부산대학교, pp. 104
[3] Brandl, H., 2006, "Energy foundations and other thermo-active ground structures", Geotechnique, Vol. 56, No. 2, pp. 81-122.
[4] Markiewicz, R., 2004, "Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau", Doctoral thesis, Institute for Soil Mechanics and Geotechnical Eng., Technical Univ. of Vienna, pp. 247-315.