

## 터널 지열 활용을 위한 에너지 텍스타일의 열교환 성능 연구

이철호\* · 박상우\*\* · 손병후\*\*\* · 최항식\*\*\*\*

Lee, Chulho\* · Park, Sangwoo\*\* · Sohn, Byonghu\*\*\* · Choi, Hangseok\*\*\*\*

### Study on Thermal Performance of Energy Textile in Tunnel

#### ABSTRACT

Textile-type heat exchangers installed on the tunnel walls for facilitating ground source heat pump systems, so called “energy textile”, was installed in an abandoned railroad tunnel around Seocheon, South Korea. To evaluate thermal performance of the energy textile, a series of long-term monitoring was performed by artificially applying daily intermittent cooling and heating loads on the energy textile. In the course of the experimental measurement, the inlet and outlet fluid temperatures of the energy textile, pumping rate, temperature distribution in the ground, and air temperature inside the tunnel were continuously measured. From the long-term monitoring, the heat exchange rate was recorded as in the range of 57.6~143.5 W per one unit of the energy textile during heating operation and 362.3~558.4 W per one unit during cooling operation. In addition, the heat exchange rate of energy textile was highly sensitive to a change in air temperature inside the tunnel. The field measurements were verified by a 3D computational fluid dynamics analysis (FLUENT) with the consideration of air temperature variation inside the tunnel. The verified numerical model was used to evaluate parametrically the effect of drainage layer in the energy textile.

**Key words :** Ground-coupled heat exchanger, Tunnel, Energy textile, Computational fluid dynamic analysis

#### 초록

터널 내부의 지열을 활용하여 지열 냉난방 시스템 가동에 필요한 열에너지를 얻을 수 있는 텍스타일 형태의 지중열교환기(에너지 텍스타일)를 충남 서천군 일대의 철도 폐터널 벽면에 시험 시공하였다. 현장에 설치된 에너지 텍스타일의 성능을 평가하기 위해 냉방 운영과 난방 운영에 대한 일일 냉난방 모사 시험을 수행하였다. 일일 냉난방 모사 시험을 진행하는 동안 터널 벽면에 설치된 지중 열교환기로 유입/유출되는 순환수의 온도, 순환 유량, 터널 벽면 내부 지반의 온도, 터널 내부의 온도를 지속적으로 측정하였다. 시험을 통해 현장에 설치된 에너지 텍스타일은 난방 가동에서 에너지 텍스타일 유닛당 57.6~143.5 W의 열교환률을 보였고 냉방가동에서는 362.3~558.4 W의 열교환률을 보였다. 또한, 시험결과로부터 터널에 설치된 지중열교환기의 열교환 성능은 터널 내부 기온의 변화에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한, 전산유체 수치해석을 통하여 터널 내부 기온 변화를 고려한 현장 시험을 모사하여 적용된 수치해석 모델을 검증하였다. 검증된 수치해석 모델을 이용하여 콘크리트 라이닝 내부의 유도 배수재 설치 유무에 따른 에너지 텍스타일의 열적 거동에 대한 매개변수 연구를 수행하였다.

**검색어 :** 지중열교환기, 터널, 에너지 텍스타일, 전산유체해석

\* 한국건설기술연구원, SOC성능연구소, Geo-인프라연구실 전임연구원 (chlee@kict.re.kr)

\*\* 정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (hchoi2@korea.ac.kr)

\*\*\* 한국건설기술연구원, 공공건축연구본부, 그린빌딩연구실 수석연구원 (byonghu@kict.re.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Corresponding Author · Korea University · hchoi2@korea.ac.kr)

Received December 26, 2012/ revised January 28, 2013/ accepted August 7, 2013

## 1. 서론

최근 지구 온난화와 기후변화에 대응하기 위해 세계적으로 이산화 탄소 가스 배출 저감과 신재생 에너지의 보급 및 개발에 노력을 기울이고 있다. 특히, 국내에서는 ‘신에너지 및 재생에너지 개발, 이용, 보급 촉진법 제11조’를 통하여 공공기관의 신축 또는 증개축에 신재생 에너지를 의무적으로 사용토록 권장하고 있다. 지열에너지는 신재생 에너지 중 비고갈성이며 환경친화적인 에너지원으로 지열원을 이용한 냉난방시스템은 다른 에너지원을 사용하는 냉난방시스템에 비해 에너지 효율적이고 친환경적이라고 알려져 있다(EPA, 1993). 지열에너지를 이용한 냉난방시스템은 지중의 항온성을 건물의 냉난방에 활용하는 시스템으로 최근에는 에너지 파이프와 같은 토목 구조물을 이용하는 지중열교환기에 대한 연구가 진행되고 있다(Brandl, 2006; Laloui et al., 2006; Pahud and Hubbuch, 2007; Gao et al., 2008; Nam et al., 2008; Adam and Markiewicz, 2009; Jun et al., 2009; Baujard and Kohl, 2010; Nam and Ooka, 2011).

본 연구에서는 연중 비교적 일정한 온도가 유지되는 터널 내부 지반을 히트소스(heat source)나 히트싱크(heat sink)로 활용하기 위해 터널 외벽에 텍스타일 형태의 열교환기(이하 에너지 텍스타일)를 시공하고 장기 열교환 가동을 평가하였다. 터널은 지중에 시공되므로 연중 대기온도 변화에 영향을 적게 받아 항온성을 유지할 수 있기 때문에 지하철 역사와 같은 공공시설물에 활용될 여지가 많다(Brandl, 2006). 에너지 텍스타일은 터널의 슛크리트와 배수재 사이 또는 라이닝 내부에 열교환용 파이프가 설치된 텍스타일 형태의 지중 열교환기를 의미한다. 즉, 에너지 텍스타일을 지중열교환기로 활용하여 지열 냉난방시스템을 운영하도록 한다. Markiewicz (2004)는 처음으로 ‘Energy Fleece’라고 명명된 지중열교환기를 터널 벽면에 설치하고 텍스타일형 지중열교환기의 적용성에 관해 연구를 수행하였다. Energy Fleece는 오스트리아 Lanze 터널에 시험 목적으로 설치되어 열교환기의 열교환 성능 평가를 위한 현장 시험이 장기간 진행되었다. 독일과 영국에서는 TBM 터널의 라이닝 또는 세그먼트 내부에 열교환 파이프를 삽입하고 이를 터널 벽면에 시공한 사례에 대해 보고하였다(Franzius and Pralle, 2011; Reha, 2011). 한반도는 국토의 70% 이상이 산악지로 구성되어 있기 때문에 도로터널과 철도터널이 활발히 건설되고 대도시나 수도권 경우에는 다수의 지하철 터널이 시공되었다. 따라서, 터널 벽면에 시공할 수 있는 텍스타일형 열교환기를 활용할 경우, 기존 수평 또는 수평 밀폐형 지중열교환기와는 달리 열교환기 설치를 위한 별도의 부지와 천공비용이 추가로 소요되지 않기 때문에 터널 주변 공공시설물의 지열 냉난방시스템 구축에 필요한 전체 시공비 저감효과를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 에너지 텍스타일의 열교환 성능을 평가하기 위해 충남 서천군 일대의 철도 페터널(구 장항선)에 텍스타일형 열교환기를 시험 시공하고 장기간 냉난방 모사시험을 수행하였다. 본 논문의 연구와 관련해서 Lee et al.(2012)은 터널 벽면에 시공된 슛크리트와 라이닝 재료의 열전도도를 평가하고, 시험 시공된 6 case의 에너지 텍스타일에 대해 현장 열응답시험과 수치해석을 통하여 각 에너지 텍스타일의 상대적인 열교환 효율을 검토한 바 있다. 본 연구에서는 Lee et al.(2012)의 선행연구에 이어서, 에너지 텍스타일형 지중열교환기의 장기간 열교환 성능을 평가하기 위해 인공 냉난방 부하를 적용하여 예측된 결과를 비교분석 하였다. 즉, 지열 냉난방시스템에서 히트펌프 가동에 따른 일일 냉난방 운영을 모사하기 위해 인공 냉난방 부하를 적용하여 일일 8시간 가동-16시간 정지를 반복하도록 일주일간 운전하였다. 인공 냉난방 부하는 에너지 텍스타일로 유입되는 순환수의 온도가 일정하게 유지될 수 있는 항온수조와 순환 펌프, 그리고 입력된 시간에 간헐적 운전이 가능하도록 하는 자동 전원 차단장치로 구성되어 있다. 일일 냉난방 모사시험을 통해 에너지 텍스타일 유입/유출 순환수의 온도와 유량을 지속적으로 측정하여 순환수가 에너지 텍스타일을 순환하는 동안 방열(냉방모사) 또는 흡열(난방모사)된 열교환물을 산정하였다. 또한, 전산유체해석(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 통해 인공 냉난방 부하를 모사하여 이를 예측결과와 비교하고 수치해석 모델을 검증하여 라이닝 내부의 유도 배수재 설치 유무가 에너지 텍스타일의 열교환 성능에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 현장 냉난방 모사시험

### 2.1 시험 시공 개요

일일 냉난방 모사시험은 충남 서천지역에 위치한 총 연장 214m의 철도 페터널(구 장항선)에 시험 시공된 에너지 텍스타일을 이용하여 수행되었다. 에너지 텍스타일은 터널 중앙부(입구에서 100m 부근)에 시공되었으며 터널현장에 설치된 에너지 텍스타일은 열교환

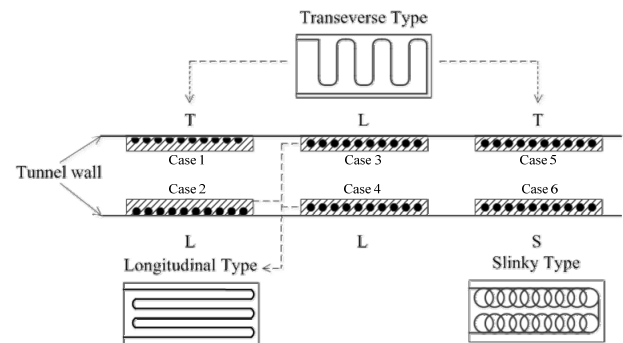


Fig. 1. Layout of Energy Textile Constructed in Test Bed Tunnel (T: Transverse Type, L: Longitudinal Type, S: Slinky Type)

환 파이프 형상별로 열교환 능력을 비교하기 위해 Fig. 1에 나타낸 3가지 형태의 열교환 파이프 배열이 고려되었다. 각 에너지 텍스타일의 길이는 10m이고 높이는 1.5m가 되도록 시공하였다. 열교환 파이프는 일반 PE(polyethylene) 파이프가 사용되었으며 내경은 15mm이고 파이프의 두께는 2.5mm이다. 각 에너지 텍스타일에 삽입된 열교환기 파이프의 총 길이는 장방향과 단방향 파이프 배치에서는 약 61m이고, Slinky형태에서는 약 173m이다. 또한 에너지 텍스타일 내부에 열교환 파이프의 위치에 따라 터널 벽면에 부착한 형태(벽면 부착형, Case 1과 Case 2)와 라이닝 내부 중앙에 위치하도록 한 형태(중앙형, Case 3, 4, 5, 6)로 구분하여 배치하였다(Fig. 2). Fig. 2(b)와 (d)는 라이닝 내부에 설치된 유도 배수제에 의한 영향을 검토하기 위해 열교환 파이프를 배수제로 감싼 후 콘크리트 라이닝을 타설한 Case 1, 2, 4의 경우를 보여준다.

### 2.2 일일 냉난방 모사시험

인공 냉난방 부하를 적용한 일일 냉난방 모사시험의 개략도는 Fig. 3과 같다. 각각의 에너지 텍스타일에 대해 일일 냉난방 모사시험을 개별적으로 수행하였으며 계절별 터널 벽면 온도를 감안하여

냉방 모사시험에서는 순환유량을 1.5~2.0lpm(liter per minute)을 적용하고 난방 모사시험에서는 0.5~1.0lpm을 적용하였다. 순환유량은 펌프와 유입 파이프 사이에 설치한 Backflow 밸브와 유량계를 사용하여 조절하였다. 인공 냉난방 부하를 에너지 텍스타일에 적용하기 위해 항온수조를 이용하였으며, 냉방 모사시험에서는 에너지 텍스타일로 유입되는 순환수의 온도를 30℃, 난방 모사시험에서는 순환수의 온도를 5℃가 유지되도록 조절하였다. 실제 상업용 건물의 일일 냉난방 운영을 모사하기 위해 항온수조와 순환 펌프를 일일 8시간 가동-16시간 정지를 반복하도록 하여 일주일간 냉방 혹은 난방 운전하였다. 일일 냉난방 모사시험을 통해 순환수가 에너지 텍스타일을 순환하는 동안 방열(냉방모사) 또는 흡열(난방모사)한 열교환률을 산정하였다.

일일 냉난방 모사시험을 진행하는 동안 에너지 텍스타일로 유입되는 순환수의 온도와 유출되는 순환수의 온도, 순환수의 유량, 터널 벽면 내부온도, 터널 내부 기온을 5분 단위로 계속하였다. 에너지 텍스타일을 순환하는 동안 발생(방열 또는 흡열)한 단위시간당 열교환량( $q$ )은 주로 터널 내부 공기를 통한 열교환( $q_a$ )과 지중으로의 열교환( $q_g$ )에 의해 이루어지는데 이는 에너지 텍스타일을

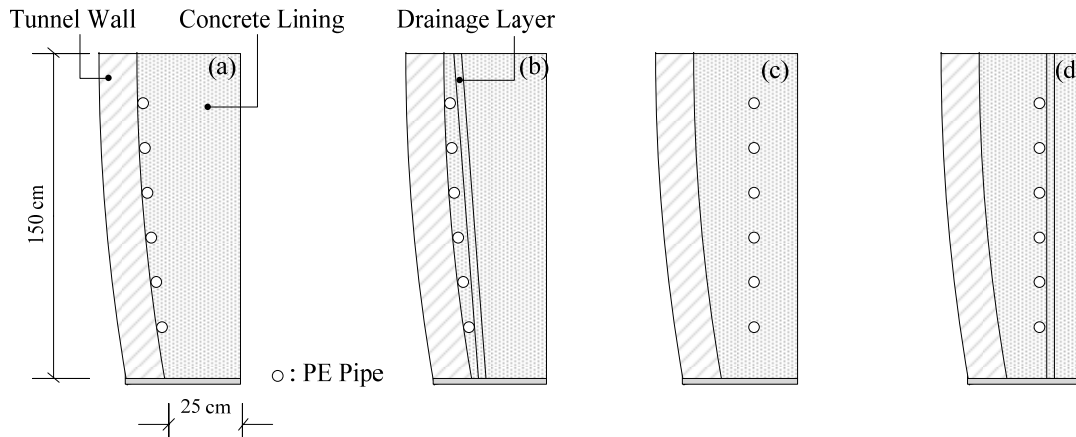


Fig. 2. Cross Section of Energy Textiles. (a) Wall-Attached Type, (b) Wall-Attached Type + Drainage Layer, (c) Centered Type, (d) Centered Type + Drainage Layer

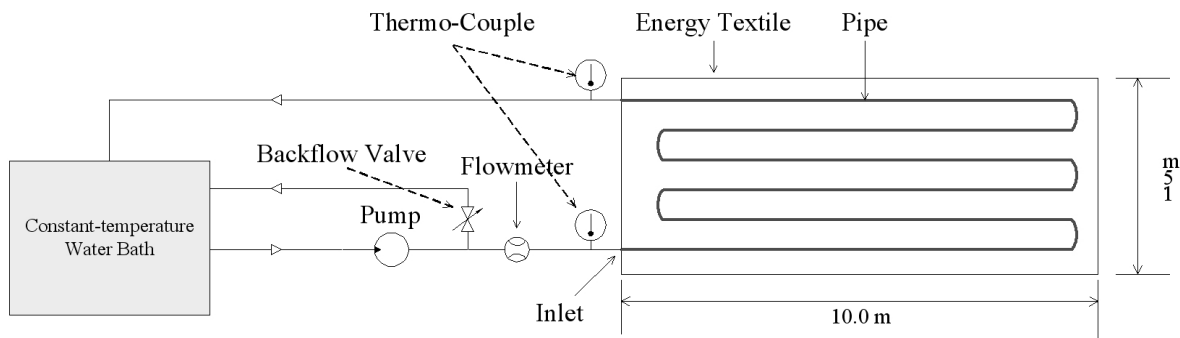


Fig. 3. Experimental Set-Up of Thermal Performance Monitoring for Energy Textile

순환하는 순환수의 유입구 온도( $T_i$ )와 유출구 온도( $T_o$ )의 차와 순환수의 질량유속( $m$ )과 비열( $C$ )의 곱으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 냉난방 시스템을 가동하는 동안(8시간) 발생한 단위시간당 열교환량을 산술평균한 후 이를 에너지 텍스타일의 평균 열교환률로 표시하였다. 또한, 냉방과 난방 운영시 발생하는 열교환률을 상호비교하기 위해 열교환률은 절대값으로 표현하였다.

$$q_t = q_a + q_g = Cm\Delta T = Cm(T_i - T_o) \quad (1)$$

### 3. 에너지 텍스타일 열교환 성능 평가

일일 냉난방 모사시험에서 나타난 열교환률의 최대값과 최소값, 평균 열교환률 그리고 시험기간 동안 측정된 터널 내부 평균 기온을

Table 1에 정리하였다. 일일 냉난방 모사시험은 동절기 난방과 하절기 냉방 시 외기온도 조건을 적절하게 반영할 수 있도록 2월부터 4월까지 난방 모사시험을 수행하였고 7월부터 10월까지 냉방 모사시험을 수행하였다. 일일 냉난방 모사시험 결과를 통해 산정된 열교환률을 운전 조건에 따른 각 에너지 텍스타일의 열교환 성능으로 평가하였다. 일일 냉난방 모사시험 결과, 난방 모사시험의 경우 에너지 텍스타일의 열교환률은 57.6~143.5W로 나타났고 냉방 모사시험의 경우 362.3~558.4W로 난방 모사의 시험 결과보다 대체적으로 크게 나타났다. 또한, 각 에너지 텍스타일의 평균 난방 열교환률은 88.8W, 평균 냉방 열교환률은 453.7W로 나타났다. 에너지 텍스타일 Case 2에 대한 시간에 따른 현장 계측결과와 산정된 열교환률을 대표적으로 Fig. 4와 5에 나타냈다.

본 연구에서 고려한 철도 폐터널의 경우 냉방조건이 난방조건

Table 1. Summary of Simulation Results for Daily Heating and Cooling Operation

Type of Energy textile		Heating operation (W)				Cooling operation (W)			
		Max.	Min.	Avg.	Air* (°C)	Max.	Min.	Avg.	Air* (°C)
Case 1	T, attached, Drainage	76.5	5.35	58.2	11.8	775.3	73.2	362.3	18.6
Case 2	L, attached, Drainage	234.1	1	98.6	8.4	591.3	125.8	366.1	19.5
Case 3	T, centered	406.9	1	94.6	5.8	783.9	255.2	508.8	19.8
Case 4	L, centered	224.5	1	80.5	5.3	650.9	189.2	401.9	19.5
Case 5	L, centered, Drainage	250.0	19.9	143.5	8.1	929.2	124.1	416.8	14.9
Case 6	Slinky, centered	148.3	13.6	57.6	8.2	1371	122.4	558.4	14.4

Air\* indicates an average air temperature inside the tunnel

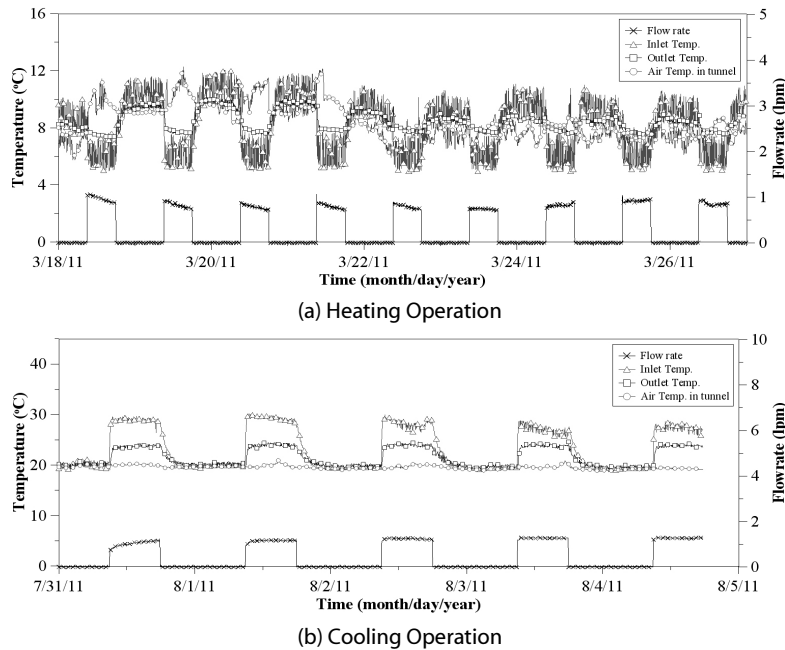


Fig. 4. Field Measurements of Case 2 for Daily Heating/Cooling Operation

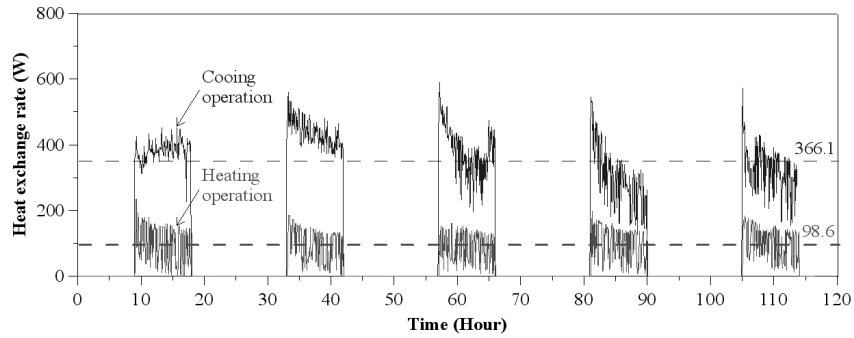


Fig. 5. Heat Exchagne Rate of Case 2

보다 상대적으로 열교환률이 높게 나타났다. 동절기 난방 모사시험에서는 에너지 텍스타일 유입수의 온도가 5℃일 때 터널 내부 평균 기온은 5.3~11.8℃로 유입수 온도와 0.3~6.8℃ 차이를 보였다. 반면에 하절기 냉방 모사시험에서는, 에너지 텍스타일 유입수의 온도가 30℃일 때 터널 내부 평균 기온은 14.4~19.8℃로 유입수의 온도와 10.2~15.6℃ 차이를 보였다.

에너지 텍스타일은 구조적 특성상, 열교환 파이프가 비교적 얇은 두께의 라이닝으로 덮여 있기 때문에 터널 내부 공기의 영향을 받기 쉽다. 이는 열교환기 설치 형태가 유사한 수평형 지중 열교환기의 설계 시 대기 온도의 변화를 주요 설계인자로 고려하는 것과 같은 맥락이다. 본 논문의 일일 난방 모사시험 중 터널 내부 평균 기온과 에너지 텍스타일 유입수의 온도차는 난방 모사시험에서 2.9℃, 냉방 모사시험에서 9.2℃로 냉방 모사시험에서 온도차가 상대적으로 컸다. 이 온도차는 에너지 텍스타일에서 열교환을 발생시킬 수 있는 에너지 포텐셜 차이를 의미하므로 본 연구결과에서

냉방 시 훨씬 우수한 열교환률을 얻은 사실을 설명할 수 있다. 이 관계를 명확하게 하기 위해 난방 모사 시험 중 터널 내부 평균 기온과 유입수의 온도차이를 각 에너지 텍스타일의 평균 열교환률과 비교하면, Fig. 6에 나타난 바와 같이 터널 내부 평균 기온과 유입수의 온도차가 증가할 수록 에너지 텍스타일의 평균 열교환률이 증가하는 것을 알 수 있다. Baujard and Kohl(2010)는 수치해석을 통해 터널에 설치된 열교환기에서 발생하는 전체 단위 시간 당 열교환량의 1/3~1/2 가량이 터널 내부 공기로 전달된다고 보고한 바 있다. 그러므로 터널 내부 기온은 에너지 텍스타일의 중요한 설계인자로 고려되어야 하며 터널 내부 온도의 연간 변화를 설계에 반영해야 한다. 본 연구에서 적용한 철도 폐터널의 내부 기온 변화를 고려하면, 냉방 순환(여름)이 난방 순환(겨울)에 비해 평균적으로 약 5배의 평균 열교환률을 기대할 수 있다.

현장 시험에서 상대적으로 우수한 열교환률을 보여주는 냉방조건에서 에너지 텍스타일의 열교환 파이프 길이당 열교환률은 5~10W/m 범위를 갖는다. 이는 Johnston et al.(2011)이 보고한 기존 밀폐형 지중열교환기의 단위 열교환 파이프 길이당 열교환률 (5~50W/m)의 하한 범위에 해당하는 것으로 터널 내부 기온의 영향으로 인해 일반 지중열교환기에 비해 열교환 파이프 길이당 열교환 효율이 낮게 평가되었다. 하지만, 지하철 터널과 같이 지상과 단절된 터널의 내부 기온은 비교적 연중 항온성이 유지되므로 본 논문에서 얻어진 5~10W/m 범위 보다 큰 에너지 텍스타일의 열교환률을 기대할 수 있을 것이다.

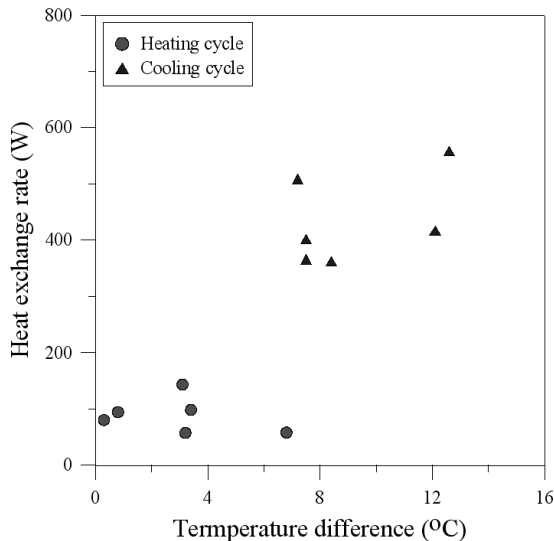


Fig. 6. Effect of Temperature Difference Between Air and Circulating Fluid

#### 4. 전산유체 수치해석을 통한 에너지 텍스타일의 열거동 평가

##### 4.1 수치해석 모델링

현장 시험조건을 모사한 전산유체해석(Computational Fluid Dynamics, CFD) 수치모델을 검증하기 위해 현장 시험결과와 비교하고 검증된 수치모델을 이용하여 라이닝 내부에 설치된 유도 배수체가 에너지 텍스타일 열전달 거동에 미치는 영향에 대한

Table 2. Material Properties of Energy Textile for Numerical Analysis

Property	Ground	Tunnel wall	Concrete lining	PE Pipe	Fluid
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1,820	2,300	2,288	950	998.2
Heat capacity (J/kg·K)	1,480	750	960	2,302	4,182
Thermal conductivity (W/m·K)	2.5	1.7	3.09	0.4	0.6
Viscosity (kg/m·s)	-	-	-	-	0.001

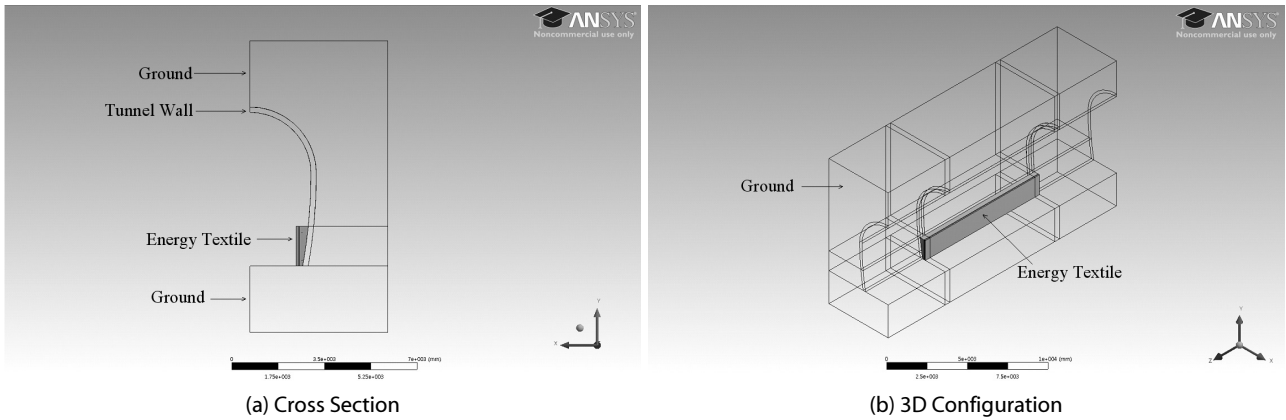


Fig. 7. Numerical Modeling of Energy Textile for Simulating Long-Term Monitoring Test

매개변수 연구를 수행하였다. 전산유체 수치해석은 유한체적법을 기반으로 하는 상용프로그램인 FLUENT(ANSYS, 2010)를 적용하였고 수치해석에 적용된 재료의 입력 물성치를 Table 2에 정리하였다. 터널 벽면과 콘크리트 라이닝의 물성은 기존 문헌에서 제시한 값을 사용하였다(Gil et al., 2009; Lee et al., 2011, 2012; Engineering Toolbox website). 특히, 콘크리트 라이닝은 현장 시공조건을 고려하기 위해 에너지 텍스타일 시공 시, 현장에서 채취한 콘크리트 시료를 실내에서 양생하여 라이닝의 열전도도를 측정하였다. 양생 후 건조상태에서의 콘크리트 라이닝의 열전도도는 Lee et al.(2012)이 제시한 3.09W/m·K를 적용하였다.

FLUENT를 이용하여 에너지 텍스타일을 모사하기 위한 수치해석 모델은 Fig. 7과 같다. 현장 시험조건과 동일하게 각 에너지 텍스타일에 삽입된 열교환기 파이프의 총 길이는 장방향과 단방향 파이프 배치에서 약 61m로 모델링하였다. 또한, 수치해석에서 해석격자의 수가 과도하게 증가하는 것을 방지하여 해석시간을 합리적으로 단축하기 위해 열교환 파이프를 직접 격자화하지 않고, FLUENT에서 제공하는 Wall-Thickness Function을 적용하여 단순화하였다. 열교환 파이프 내 순환 유체의 흐름은 난류모델 중에 하나인  $k-\epsilon$  모델(Launder and Spalding, 1972)을 적용하였다.

에너지 텍스타일 내 삽입되어 열교환 파이프를 감싸는 유도 배수재가 에너지 텍스타일의 열전달 효율에 미치는 영향을 평가하기 위해 배수재 부분은 콘크리트 라이닝과 같은 강체(solid)로

모사하고 상대적으로 매우 낮은 열전도도(0.1W/m·K)를 적용하였다. 시간에 따른 터널 내부 기온의 변화를 수치해석에서 에너지 텍스타일 외부 경계조건으로 적용하기 위해 일일 냉난방 모사 시험 중 측정된 터널 내부 기온을 Fig. 8(Case 5)과 같이 시간에 따른 삼각함수 형태로 단순화하여 라이닝 외부에 시간에 따른 온도 경계조건으로 적용하였다. 터널 벽면과 지반의 초기온도는 각 현장 시험시, 측정된 지반의 평균온도를 적용하였다.

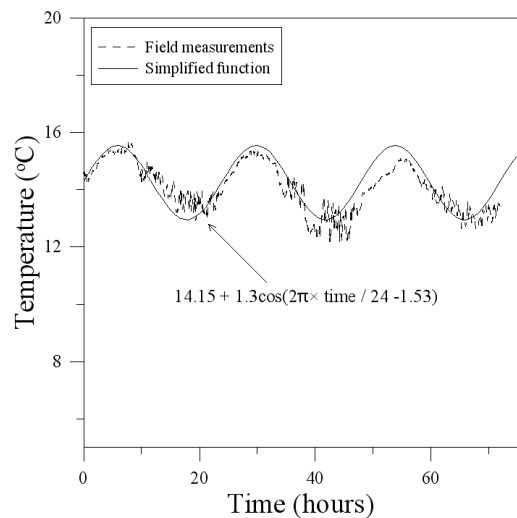


Fig. 8. Simplified Tunnel Air Temperature Variation (Case 5)

#### 4.2 수치해석 결과

앞서 3장에서 6가지 에너지 텍스타일에 대해 수행한 일일 냉난방 모사시험과 동일한 조건에 대해 전산유체 수치해석을 수행하여 결과값을 비교하였다. 본 논문에서는 지면 제한상 Case 5(장방향, 중앙형, 배수재)의 현장 시험결과 중 냉방 모사시험에서 측정된 유출수 온도(Outlet temperature)와 수치해석을 통해 산정된 유출수 온도를 Fig. 9에 대표적으로 비교하였다. Case 5의 현장 냉방 모사시험 중에 측정된 에너지 텍스타일의 초기 유입수의 온도(27~28℃)와 초기 지중온도(14.5℃)를 수치해석의 초기값으로 동일하게 적용하여 수치해석 모델을 검증하였다. Table 2에 제시된 기존 문헌과 실험을 통해 측정된 에너지 텍스타일 구성요소의 물성치를 적용하여 수치해석을 수행한 결과, 본 논문에서 적용한 전산유체 수치해석 모델이 일일 냉방 모사시험 결과를 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다(Fig. 9).

Case 5에서 수행한 터널과 에너지 텍스타일 구성 요소의 물성치와 경계조건을 이용하여 Case 2(장방향, 벽면부착)에 대해 유도 배수재 유무에 따른 에너지 텍스타일 열거동에 대한 매개변수 해석을 수행하였다. Case 2의 일일 냉방 모사시험에서 측정된 에너지 텍스타일 유출수 온도와 수치해석 결과를 Fig. 10에서 비교하였다. Case 2의 현장 시험 시, 터널 내부의 평균 기온은 약 19.5℃였다. 시공된 Case 2 에너지 텍스타일은 유도 배수재가 설치되지 않은 조건이지만 수치해석에서는 현장과 동일하게 배수재가 없는 조건과 추가적으로 배수재를 고려한 조건에 대한 해석을 수행하여 배수재 유무에 따른 에너지 텍스타일의 유출수 온도를 현장 시험결과와 비교하였다. 유도 배수재가 설치된 경우는 열교환 파이프 외부에 열적 단락을 야기하여 유도 배수재가 설치되지 않은 경우에 비해 외부와의 열교환률이 감소하여 유출수 온도가 상대적으로 높은 것을 Fig. 10에서 확인할 수 있다.

Fig. 11은 전산유체 수치해석을 통해 산정된 배수재 유무에 따른 에너지 텍스타일의 열교환률을 비교하여 보여준다. 배수재가 설치된 조건에서 평균 열교환률은 445.6W이고 배수재가 설치되지 않은 조건에서 평균 열교환률은 480.9W이다. 즉, 배수재가 설치되지 않은 경우에는 열적 단락구간이 존재하지 않아 배수재가 설치된 조건에 비하여 열교환률이 평균 8%정도 크게 산정되었다. 또한, 실제 지중열교환기 거동과 동일하게 냉방 일수가 증가됨에 따라 지반의 온도와 에너지 텍스타일 내부의 순환수 온도가 완전히 회복되지 않아 에너지 텍스타일의 열교환률이 점차 감소하는 경향을 보인다. 하지만, 유도 배수재가 에너지 텍스타일의 열교환 능력에 미치는 영향은 터널 내부 기온과 열교환 파이프 내 순환수 온도차에 따라 달라질 수 있다. 즉, 터널 내부 기온과 순환수의 온도차가 클 경우, 유도 배수재는 열교환 파이프의 열교환을 방해하는 열적 단락 요소로 작용할 수 있다.

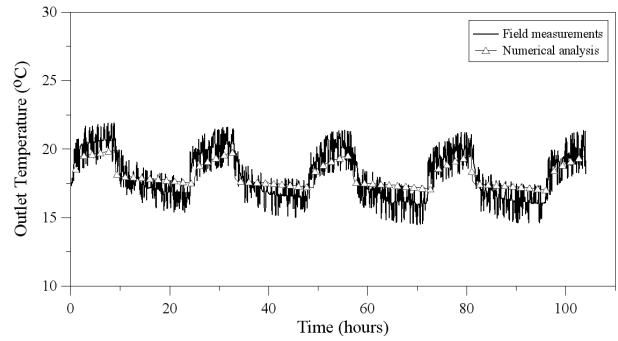


Fig. 9. Comparison of Outlet Temperature Between Field Measurement and Numerical Analysis (Case 5: Longitudinal Type, Centered, With Drainage)

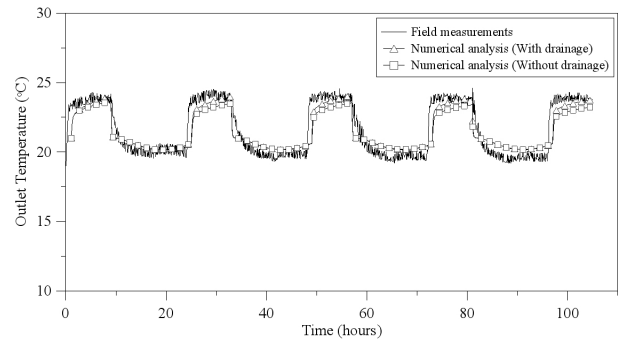


Fig. 10. Effect of Drainage Layer on Outlet Temperature Variation (Case 2: Longitudinal Type, Wall-Attached)

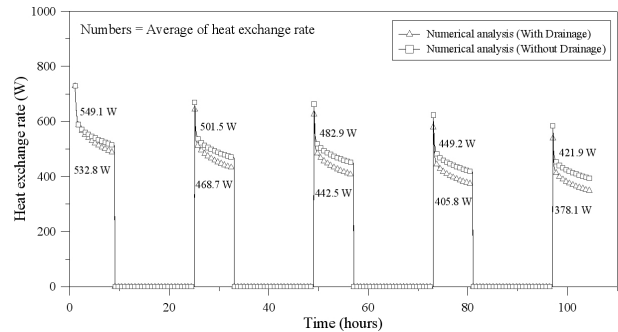


Fig. 11. Effect of Drainage Layer on Heat Exchange Rate (Case 2: Longitudinal Type, Wall-Attached)

#### 5. 결론

본 논문에서는 철도 페터널 내부 벽면에 6 유닛의 에너지 텍스타일 형 지중 열교환기를 시험시공하여 현장 냉난방 모사시험을 통해 각 에너지 텍스타일의 열교환 성능을 산정하고 전산유체(computational fluid dynamics, CFD) 수치해석을 통해 현장 시험을 모사하여 유도 배수재 설치 유무에 따른 영향을 검토하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 일일 냉난방 모사 시험을 통해 산정된 에너지 텍스타일의 평균 열교환률은 난방기동인 경우 88.8W, 냉방기동인 경우 435.7W로 나타났다. 주입온도와 터널 내부 기온의 온도차가 상대적으로 큰 냉방 모사에서 열교환률이 크게 산정된 점을 고려할 때, 에너지 텍스타일은 터널 내부 기온의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.
- (2) 에너지 텍스타일의 열교환 파이프 길이당 열교환률은 5~10 W/m 범위를 갖는다. 이는 기존문헌에서 제시한 밀폐형 지중열교환기의 열교환 파이프 길이당 열교환률(5~50W/m)의 하한 범위에 해당한다. 이 결과는 터널에 시공된 에너지텍스타일은 수평 밀폐형 지중열교환기와 유사하게 터널의 내부 기온에 영향을 받아 지반 또는 지중의 항온성을 수직 밀폐형 지중열교환기나 에너지파일에 비해 충분히 활용하지 못하기 때문이다.
- (3) 본 논문에서 적용한 전산유체 수치해석 모델은 시험 시공된 터널 현장에서 수행한 일일 냉난방 모사시험을 비교적 정확하게 예측할 수 있으므로 다양한 형상의 에너지 텍스타일의 열적 거동 예측을 위해 전산유체 수치해석을 충분히 적용할 수 있음을 시사한다.
- (4) 동일한 에너지 텍스타일에 대해 수행한 매개변수 해석결과, 배수재 유무에 따른 열교환률은 배수재가 설치된 조건에서 445.6W이고 배수재가 설치되지 않은 조건에서 480.9W 였다. 즉, 주어진 조건에서 배수재가 설치되지 않은 경우에는 열적 단락구간이 존재하지 않아 배수재가 설치된 경우에 비하여 열교환률이 평균 8%정도 크게 산정되었다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술연구개발사업(해저터널연구단, 13건설연구T01)의 지원과 한국건설기술연구원 주요사업(운용 중 공간확장이 가능한 지하 굴착 및 안정화 기술 개발)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

### References

Adam, D. and Markiewicz, R. (2009). "Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers." *Geotechnique*, Vol. 59, No. 3, pp. 229-236.

Brandl, H. (2006). "Energy foundations and other thermo-active ground structures." *Geotechnique*, Vol. 56, No. 2, pp. 81-122.

Baujard, C. and Kohl, T. (2010). "Evaluation of the potential use of geothermal heat exchangers in the CEVA tunneling project." *World Geothermal Congress 2010*, 25-29 April, Bali, Indonesia.

Engineering Toolbox Website. Available at: <http://engineeringtoolbox.com>.

EPA (1993). *Space conditioning: The Next Frontier*, Office of Air and Radiation, 430-R-93-0044 (4/93), US Energy Protection Agency, Washington DC.

Franzius, J. N. and Pralle, N. (2011). "Turing segmental tunnels into sources of renewable energy." *Proceedings of ICE Civil Engineering 2011*, Paper No. 164, pp. 35-40.

FLUENT (2010). *ANSYS manual ver. 12.0*, Fluent Inc.

Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K. and Yang, J. (2008). "Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy pile." *Applied Energy, An application*, Vol. 85, pp. 901-910.

Gil, H., Lee, K., Lee, C. and Choi, H. (2009). "Numerical evaluation on thermal performance and sectional efficiency of closed-loop vertical ground heat exchanger." *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 25, No. 3, pp. 57-64.

Hahn, J., Hahn, G., Hahn, H. and Hahn, C. (2005). *Geothermal Heat Pump System*, Hanrimwon (in Korean).

Johnston, I. W., Narsillio, G. A. and Colls, S. (2011). "Emerging geothermal energy technologies." *Journal of Civil Engineering, KSCE*, Vol. 15, No. 4, pp. 643-653.

Jun, L., Zhang, X., Gao, J. and Yang, J. (2009). "Evaluation of heat exchange rate of GHW in geothermal heat pump system." *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 2898-2904.

Lauder, B. E. and Spalding, D. B. (1972). *Lectures in mathematical models of turbulence*, Academic Press, London, England.

Laloui, L., Nuth, M. and Vulliet, L. (2006). "Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile." *Int J Numer Anal Meth Geomech*, Vol. 30, pp.763-781.

Lee, C., Park, M., Min, S., Kang, S. H., Sohn, B. and Choi, H. (2011). "Comparison of effective thermal conductivity in closed-loop vertical ground heat exchangers." *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 3669-3676.

Lee, C., Park, M., Jeoung, J., Shon, B. and Choi, H. (2012). "Evaluation of thermal performance of energy textile installed in tunnel." *Renewable Energy*, Vol. 42, June 2012, pp. 11-22.

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, Austria (in German).

Nam, Y., Ooka, R. and Hwang, S. (2008). "Development of a numerical model to predict heat exchange rate for a groune source heat pump system." *Energy and Building*, Vol. 40, pp. 2113-2140.

Nam, Y. and Ooka, R. (2011). "Development of potential map for ground and groundwater heat pump systems and application to Tokyo." *Energy and Building*, Vol. 43, pp. 677-685.

Pahud, D. and Hubbuch, M. (2007). "Measured thermal performances of the energy pile system of the dock midfield at zürich airport." *Proceedings European Geothermal Congress 2007 Unterhaching*, Germany, 30 May-1 June 2007.

Rehau (2011). *Geothermal tunnel lining*, Available at: <http://www.rehau.co.uk>.