

Energy Lining Segment 적용성 평가를 위한 기초연구

Basic Study for Evaluation on Application of Energy Lining Segment

한상현¹, 박시삼^{2*}

Sang-Hyun Han¹, Sisam Park^{2*}

¹Member, Professor, Department of Civil Engineering, Seoul Univ., 28, Yongmasan-Ro 90-gil, Jungnang-gu, Seoul, 131-702, Republic of Korea

²Member, Senior Research Engineer, Material & Energy Research Team, Technical Division, GS E&C Corp., 417-1, Deokseong-ri, Idong-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 449-831, Republic of Korea

ABSTRACT

Geothermal energy is easy to take advantage of renewable energy stored in the earth and the heat exchanger can be collected through a heat exchange piping system. In this study, have been developed a heat exchange pipe loop system which it could be installed in tunnel segmental linings to collect geothermal energy around the tunnel. The heat exchange pipe loop system incorporated in the tunnel segments circulate fluid to transport with heat from the surrounding ground and the heat can be used for heating and cooling of nearby structures or districts. The segmental lining incorporating heat exchange pipe loop system are called as ELS (Energy Lining Segment). There are a number of examples incorporating a heat exchange pipe loop system in a tunnel lining in Europe. In this study, a field case using Energy Lining Segment in Germany and applications in urban area are thoroughly examined. In addition, a CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis was carried out to investigate heat flow in Energy Lining Segment.

요 지

지열 에너지는 지구에 저장된 활용하기 쉬운 재생에너지이며, 열교환 배관 시스템을 통해 수집될 수 있다. 본 연구에서는 터널 주변 라이닝에 지열 에너지를 포집할 수 있는 열교환 파이프 루프를 간편하게 설치할 수 있는 시스템을 개발하였다. 터널 세그먼트에 결합된 열 교환 파이프 루프 시스템은 수송 유체 순환을 통해, 지중 주변의 열을 인근 구조물 또는 지역의 냉난방 열원으로 사용할 수 있다. 터널 세그먼트에 통합 연결된 열 교환 파이프 루프 시스템을 에너지 라이닝 세그먼트(Energy Lining Segment)이라고 명하도록 하였다. 유럽에서는 터널 라이닝에 열 교환 파이프 루프 시스템을 통합한 수차례의 사례가 있다. 본 연구에서는 에너지 라이닝 세그먼트에 대한 적용성 평가를 위해, 독일 사례와 유럽 도시에 적용된 사례를 조사해 보았다. 또한, 에너지 라이닝 세그먼트의 열 전도특성을 파악하기 위해, 전산유체해석(CFD)을 수행해 보았다.

Keywords : Geothermal energy, Energy lining segment, Exchange pipe loop system, Tunnel segment

1. 서 론

최근 이산화탄소 저감이 중요한 이슈로 떠오르면서 신 재생 에너지를 활용할 수 있는 방안에 많은 관심이 쏠리고 있다. 특히 건물에서 소비하는 에너지량이 많기 때문에 인

구수가 많고 변화한 도심지일수록 이산화탄소 배출량이 높아 태양열이나 지열과 같은 신재생 에너지의 필요성이 더욱 높다. 건물의 밀집도가 높은 도심지에서는 풍력이나 조력과 같은 신재생 에너지보다는 태양열이나 지열의 효율성이 높다. 지열은 신재생 에너지 자원 중에서 가장 많은 에너지를 공급하고 있으며, 국내에서는 지열의 중요성이 상대적으로 낮게 평가되고 있으나 최근 독일, 오스트리아, 호주 등 해외에서는 1MW급 이하의 소형 지열 발전이

Received 14 Nov. 2013, Revised 9 Dec. 2013, Accepted 10 Dec. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-31-329-4615; Fax: +82-31-329-4660

E-mail address: Parkss7@gsconst.co.kr (S. Park)

확대되고 있다. 지열의 경우 건물의 기초나 옹벽, 터널 등 지중에 건설되는 대규모 구조물에 열교환기를 삽입하여 쉽게 에너지로 전환될 수 있기 때문에 도심지에서의 활용도가 높다. 오스트리아 비엔나에서는 지하철 터널의 슛크리트 라이닝에 열교환기를 설치하여 지열을 활용하였고 (Adam & Markiewicz, 2009), 최근에는 열교환기를 기계화 시공으로 굴착된 터널의 세그먼트 라이닝에 설치하여 터널 상부의 건물에 지열을 공급한 사례도 있다(Franzius & Pralle, 2011). 본 연구에서는 TBM(Tunnel Boring Machine)으로 굴착된 터널의 세그먼트 라이닝에 열교환기를 설치하여 지열을 활용할 수 있는 ELS(Energy Lining Segment) 시스템을 소개하고, 이에 대한 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 통해 시스템의 효율성에 대해 살펴본다.

2. ELS 시스템 및 사례

터널 주변지반 및 내부에서 발생하는 열을 수집하기 위해, 쉘드 터널의 세그먼트 라이닝에 열교환 파이프를 설치한 후, 열교환된 열을 주변 구조물의 냉난방 에너지로 공급하는 시스템을 ELS(Energy Lining Segment) 시스템이라고 한다(Moseley, 2011). 지상에 비해 비교적 온도가 일정하게 유지되는 지중의 특성상 ELS 시스템은 여름철에는 주변 건물의 냉방을 위하여, 겨울철에는 난방을 위하여 사용될 수 있다(Fig. 1).

일반적으로 터널 내에서 포집할 수 있는 에너지는 터널의 단위 면적당 10~30 W 정도인 것으로 보고된바 있으며, 포집된 지열원은 주변 건물의 냉난방 공급 등의 다양한 방향으로 활용될 수 있다. 아울러, 본 시스템을 응용하여, 레

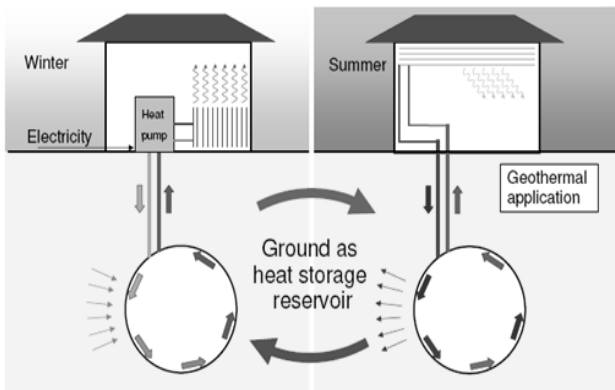


Fig. 1. Utilization of ELS System on winter & summer (Adam & Markiewicz, 2009)

일이나 하수도, 서비스 터널 등 다양한 시설에서 지열원을 포집할 수 있으며, 포집된 지열원은 주변 건물의 냉난방 공급 등의 다양한 방향으로 활용될 수 있다(Fig. 2).

유럽에서는 1990년대 후반부터 터널을 사용하여 지열을 활용하는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 특히, 오스트리아에서는 NATM으로 건설된 라인츠 터널(Lainzer tunnel)에 지열 시스템을 설치, 운영하고 있다(Bouazza, 2011). 최근에는 도심지에서의 터널 건설시 유발되는 진동, 소음 문제 등과 터널의 장대화 추세 등으로 인해 TBM을 사용한 기계화 굴착이 각광받고 있다. NATM 터널에서 이미 성공적으로 적용된 터널 지열 시스템은 기계화 굴착 터널에도 적용될 수 있으며, 독일과 오스트리아에서는 기계화 굴착 터널에 ELS 시스템을 시험 적용한 바 있다(Franzius, 2011).

ELS 시스템은 지중 및 터널의 열을 포집하기 위한 열교환 파이프와 이를 설치할 터널 라이닝 세그먼트로 구성된다. 터널 라이닝 세그먼트는 기계화 시공 터널에서 일반적으로 사용되는 철근 콘크리트 라이닝이 사용되며, 세그먼트 제작 시 철근 보강재에 열교환 파이프를 장착하는 것이 ELS 시스템의 특징이다. 이 열교환 파이프는 직경 20mm의 폴리에틸렌 재질로 철근보강 콘크리트에는 철근 배근에 케이블 타이로 묶어 설치하며, 섬유보강 콘크리트의 경우에는 간단한 프레임 구조물을 이용하여 세그먼트 안에 설치된다(Fig. 3).

각 세그먼트 안에 길이 20~30mm 가량의 열교환 파이프가 삽입되며, 파이프의 단말은 세그먼트의 터널 내경 쪽

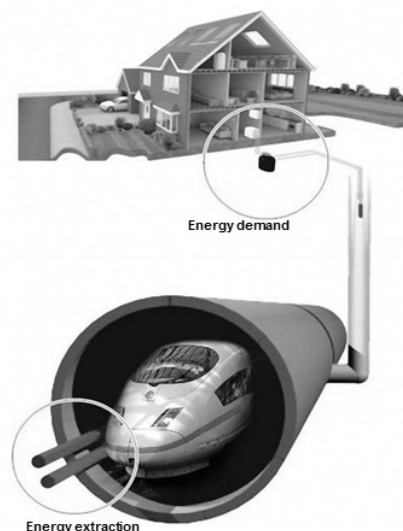


Fig. 2. Concept of ELS System (REHAU, 2011)

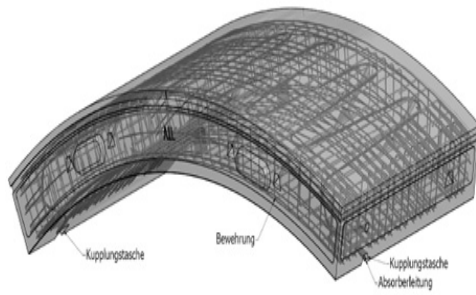


Fig. 3. Segment Lining & Heat Exchange Pipe

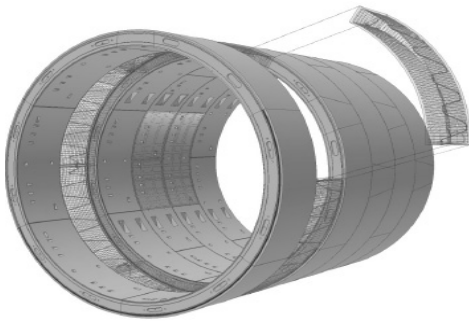


Fig. 4. Detail of ELS System

면에 설치되어 인접 세그먼트의 열교환 파이프와 접합된다. 이 세그먼트들을 서로 연결하여 링을 형성하게 되며, 열교환 파이프 루프를 통해 유체(fluid)를 순환시켜 지반의 열교환을 할 수 있도록 고안하였다(Fig. 4).

지반과의 열교환 효율을 높이기 위해서는 지반과 접촉 면적이 넓은 대구경 터널이 유리하다. 터널 라이닝 세그먼트를 통해, 지중 열교환을 효율적으로 행하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다. 우선 열교환 파이프를 설치하더라도 라이닝의 구조적 성능에 문제가 없어야 하며, 세그먼트 라이닝의 수밀성이 확보되어야 한다. 또한 세그먼트 라이닝 제작시 열교환 파이프의 설치가 정확해야 하며, 각 세그먼트의 열교환 파이프 단말끼리 접합시 TBM 굴진을 방해하지 않도록 해야 한다.

아울러, ELS 시스템과 유사한 공법이 적용된 사례를 살펴보면, 오스트리아 및 독일 등에서 시험적으로 적용한 사례가 있다. 이 중, 오스트리아의 라인츠 터널의 경우, NATM (New Austrian Tunneling Method)으로 굴착된 터널로 LT 24구역과 LT 44구역에 지열 시스템을 설치하여, 비엔나의 지하철 역 네 곳과 터널의 냉난방에 지열을 활용하였다. 이러한 NATM 터널에서는 열교환 파이프가 슛크리트와 현장 타설 라이닝 사이에 설치되었다. 또한, 오스트리아 엔바흐(Jenbach) 지역에서는 기계화시공 터널에 열교환 파이프를 설치한 ELS 시스템의 실증을 행한 바 있다.

엔바흐 터널은 지중 27m에 설치된 TBM 터널로 직경 12m, 너비 2m, 두께 50cm의 세그먼트 6개와 1개의 키세그먼트로 이루어져 있다. 27개의 세그먼트에 열교환 파이프가 설치되어 총 터널 길이 54m 부분에 ELS 시스템이 적용되었다. 이 ELS 시스템은 엔바흐 터널 주변의 건물에 40 kW 가량의 열에너지를 공급할 수 있는 것으로 소개되었다. 아울러, 독일에서도 2007년 고속 철도 터널의 세그먼트 라이닝에 ELS 시스템을 시험 적용한 바 있다. 터널 라이닝 중 다섯개의 세그먼트에 ELS 시스템을 적용하여 2009년 5월부터 9월까지 시험가동을 하였다.

3. CFD 해석

여름 및 겨울철에 ELS 시스템의 열 교환이 양상을 살펴 보기 위해, CFD를 활용한 열해석을 수행하였다. CFD 해석에서 사용된 터널은 지표 하 40m에 건설된 기계화 시공 터널로, 내경 6m이며, 세그먼트는 너비 1.5m, 두께 40cm의 철근 콘크리트 세그먼트로 가정하였다. 터널 링은 세그먼트 여섯 개와 한 개의 키 세그먼트로 구성되었다. 열교환 파이프는 지름 20mm의 폴리에틸렌 재질로 열교환 파이프 내부의 유체는 물을 사용하였다(Fig. 5). 외기온도는 여름철 30°C, 겨울철 -5°C로 가정하고, 지중 온도는 계절에 관계없이 15°C로 일정하다고 가정하였다. 유체의 온도는 여름철 27°C, 겨울철 0°C를 적용하였고, 세그먼트 라이닝의 콘크리트 및 물의 물성치는 Table 1에 나타난 바와 같다.

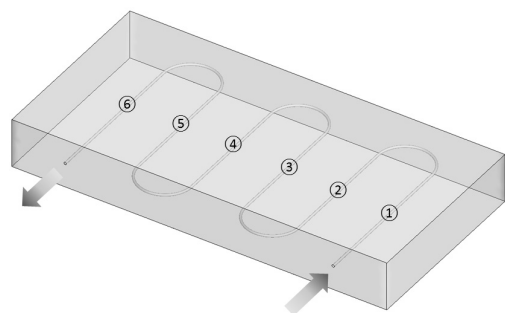


Fig. 5. Model of Segment Lining

Table 1. Material of Concrete & Fluid

Material	Concrete	Fluid
Density (kg/m ³)	2,300	988.2
Specific Heat (J/kg·K)	1,000	4,182
Thermal Conductivity (W/mK)	1.63	0.6
Viscosity (kg/m·s)	-	0.001003

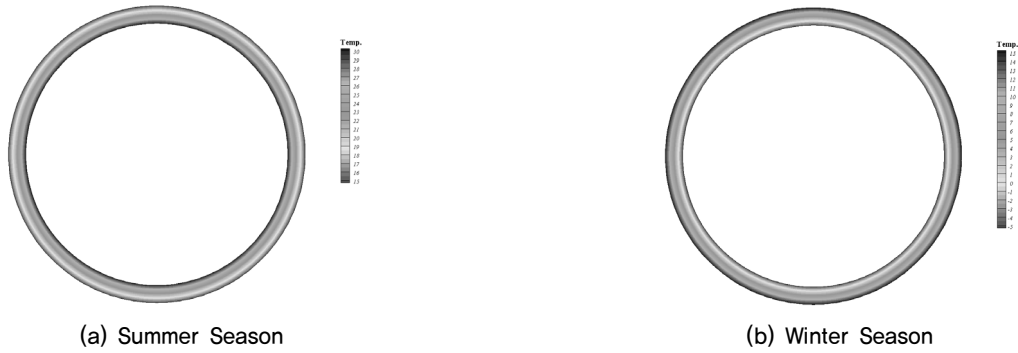


Fig. 6. Temperature Variation of Tunnel Lining

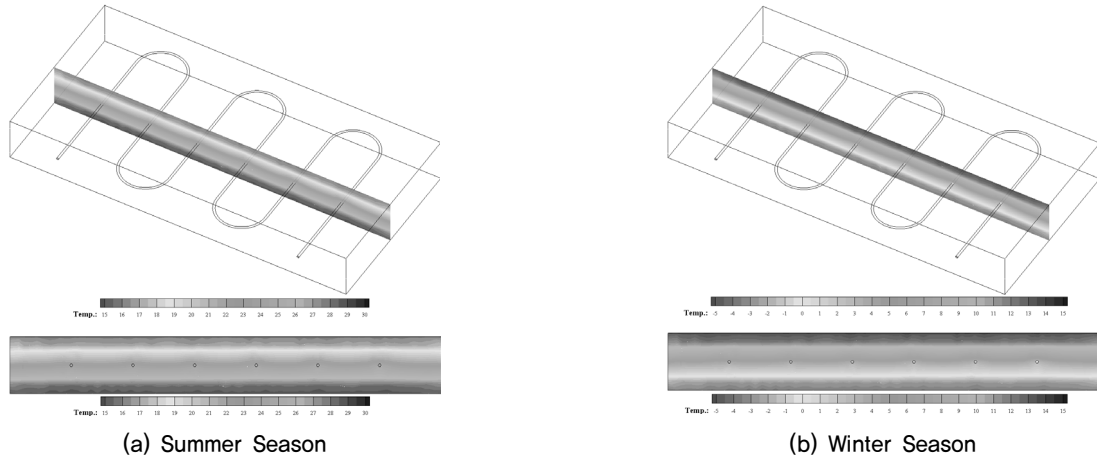


Fig. 7. Temperature Variation of Pipe Loop in Segment

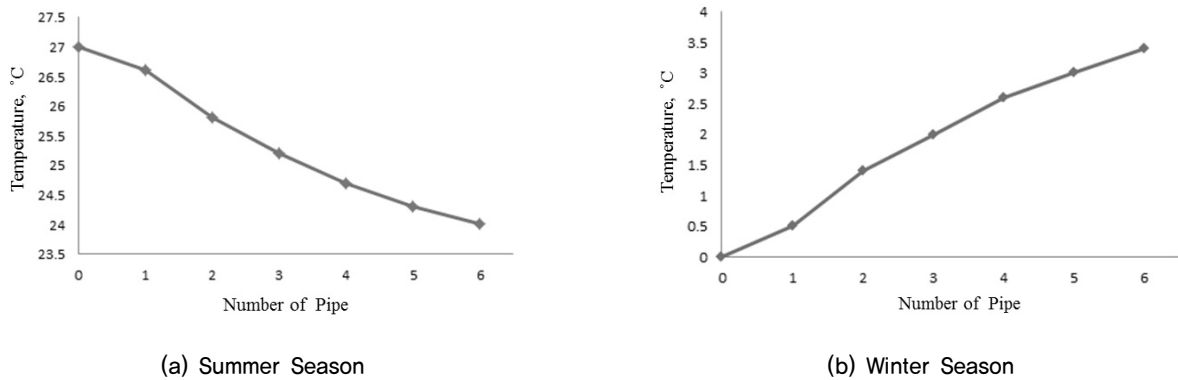


Fig. 8. Temperature Variation of Fluid

Fig. 6(a)과 Fig. 6(b)는 여름 및 겨울의 터널 라이닝 단면의 온도 분포를 나타내고, 각 세그먼트의 내의 온도 분포는 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)와 같다. 지중의 온도는 계절에 상관없이 일정하게 유지되기 때문에 여름철에는 열교환 파이프에 유입된 유체의 온도가 내려가고 겨울철에는 열교환 유체의 온도가 올라가게 된다. 여름의 터널 세그먼트 단면의 중앙부 온도는 22.5°C로 수렴하며, 겨울에는 5°C로 수렴하는 양상을 보인다. 이러한 세그먼트 단면에 설치된 열교환 파이프를 따라 이동하는 유체의 온도 변화는

Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 8(a) 및 Fig. 8(b)를 살펴보면, 열교환 파이프에 유입된 유체는 세그먼트 중앙부를 통과하면서, 여름철의 경우에는 3.2°C 정도의 열교환을, 겨울철에는 3.5°C 정도의 열교환을 하는 것으로 평가되었다. 따라서, Energy Lining Segment를 활용한 열교환 시스템의 경우, 지중열교환을 위한 천공비용 등의 절감효과를 가져올 수 있으며, 집단에너지 공급시설 등과의 연계를 통한 효율성 극대화가 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

최근 열교환 파이프를 세그먼트 라이닝에 설치하여 지열을 이용하는 ELS 시스템이 오스트리아, 독일 등 유럽에서 주목을 받고 있다. 따라서 본 연구에서는 보다 개선된 한국형 EELS(Enhanced Energy Lining Segment) 시스템을 개발하기 위한 기초연구의 일환으로, 기존 ELS 시스템에 대한 성능 평가를 위한 CFD 해석을 수행하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 터널 내에서 포집할 수 있는 에너지는 터널의 단위 면적당 10~30W 정도이며, 포집된 지열원은 주변 건물의 냉난방 공급 등의 다양한 방면으로 활용될 수 있다.
- (2) 아울러, 본 시스템을 응용하여, 레일이나 하수도, 서비스 터널 등 다양한 시설에서 지열원을 포집할 수 있으며, 포집된 지열원은 주변 건물의 냉난방 공급 등의 다양한 방면으로 활용될 수 있다.
- (3) 여름의 터널 세그먼트 단면의 중앙부 온도는 22.5°C로 수렴하며, 겨울에는 5°C로 수렴하는 양상을 보인다.
- (4) 열교환 파이프에 유입된 유체는 세그먼트 중앙부를 통과하면서, 여름철의 경우에는 3.2°C 정도의 열교환을, 겨울철에는 3.5°C 정도의 열교환을 하는 것으로 평가되었다. 따라서, Energy Lining Segment를 활용한 열교환 시스템의 경우, 지중열교환을 위한 천공비용 등의 절감효과를 가져올 수 있으며, 집단 에너지 공급시설 등과의 연계를 통한 효율성 극대화가 가능할 것으로 판단된다.

- (5) 향후, ELS 시스템의 적용성을 평가하기 위한, 실내 모형실험 및 수치해석을 추가로 진행할 예정이며, 이를 토대로 개발하고 있는 한국형 EELS(Enhanced Energy Lining Segment)에 대한 성능에 대한 검토가 추가로 진행될 예정이다.

Acknowledgement

The present research has been conducted by the Research Grant of Seoul university in 2012. The authors are very grateful thanks to the cooperation of Seoul university.

References

1. Adam, D., Markiewicz, R., (2009), "Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers", *Geotechnique*, Vol.59, No.3, pp.229-236.
2. Bouazza, A., Adam, D., Rao Singh, M., Ranjith, PG., (2011), "Direct Geothermal Energy from Geostructures", *Australian Geothermal Energy Conference 2011.*, pp.21-24.
3. Franzius, J.N., Pralle, N., (2011), "Turning segmental tunnels into sources of renewable energy", *Proceedings of ICE Civil Engineering*, pp.35-40.
4. Franzius, J.N., (2011), "Energy Lining Segment design & construction for harvesting energy from TBM tunnels" *Geothermal workshop London*, 2011.
5. Moseley, M., (2011), "Geothermal Tunneling" *The rail engineer seminars*, 2011.
6. REHAU (2011), "Geothermal tunnel lining, Turning infrastructure into green energy sources".