수평형 지중열교환기의 전열량 변화에 대한 실험적 연구

조성우, 임병찬*[†]

창원대학교 건축공학과, 동아대학교 건축공학과*

A Experimental Study of Horizontal Geothermal Heat Exchanger System about Total Enthalpy Change

SungWoo Cho, PyeongChan Ihm*[†]

Department of Architectural Engineering, Changwon University, Gyeongnam 641-773, Korea

Department of Architectural Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea*

Abstract

This paper is performed to investigate of cooling effect and total enthalpy variation on EAHES(Earth-to-Air Heat Exchanger System) that is buried 3m depth and 60m length. Using EAHES, the reduction of the sensible heat is obviously but latent heat is showed increased trend. Although the outdoor average latent heat accounts for 53.2% of total enthalpy, latent heat of the exit air from EAHES was raised as 58%. For improving cooling effect of EAHES, it has to considered that how to remove the latent heat from EAHES.

Key words: EAHES(수평형 지중열교환기), Total enthalpy(전열량), Sensible heat(현열), Latent heat(잠열)

기 호 설 명

AH : 절대습도[kg/kg(DA)]
 C_p : 건공기 비열[kJ/kgK](=1.01kJ/kgK)
 t : 온도[°C] h : 전열량[kJ/kg]
 P : 압력[hPa]

하첨자

a : 건공기 w : 수증기 ws : 포화수증기

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

에너지 저감과 이산화탄소 배출 억제를 위하여 연중 온도변화폭이 적은 지중 또는 지열이용에 대하여 다양한 연구가 수행되어 오고 있다.

지중열 교환 시스템(Horizontal Earth-to-Air Heat Exchange System, 이하 EAHES라 칭함)은 팬(fan)이나 블로워(blower)의 동력장치를 이용하여 하절기 더운 외기 공기를 지중에 매설된 관을 통과시켜 온도를 하강시켜 실내로 취출하는 방식으로 운송동력 외의 동력은 필요하지 않다는 특징을

그리스

γ : 수증기의 증발잠열[kJ/kg](=2,501kJ/kg)

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-200-7619, Fax: +82-51-200-7616

E-mail: ihmp@dau.ac.kr

접수일 : 2014년 10월 14일

심사일 : 2014년 10월 29일

채택일 : 2014년 11월 21일

가지고 있다.

EAHES의 경우, 국내에서는 실질적인 건축물에 적용된 사례는 드물고, 연구소 등에서 실험용 건축물에 적용한 사례를 발표하고 있다. 코오롱건설의 실험용 주택인 이플러스 그린홈 실험결과에서는 렌지후드 및 화장실 배기량 발생 시 형성된 부압에 의한 급기를 쿨튜브(지중매설관)를 설치하여, 겨울철은 외기온도와 비교하여 6-7℃ 높이고, 여름철은 외기온도 대비 5-6℃ 낮추어서 실내 부하를 줄일 수 있다는 보고[1]를 하고 있다.

Kim et al.[2]은 다양한 축열 냉각을 기대할 수 있는 방안 가운데 쿨튜브와 할로우 코어를 병행한 방안을 채택하여 ESP-r를 이용한 시뮬레이션 결과를 발표하였으며, 쿨튜브를 통과한 공기가 외기온도보다 최소 6℃ 이상 낮은 공기를 할로우 코어로 유입하였을 경우 타 방법과 비교하여 60.6%와 75.3%의 냉방 에너지소비량 및 비용 절감을 할 수 있다는 결과를 보이고 있다.

Kim[3]은 쿨튜브의 성능을 파악하기 위하여 환기횟수 0.7회/h, 1.5m/s를 적용하여 130m의 지중매설관을 설치하여, 동절기 3개월간 측정한 결과에 따르면, 동절기 일중 기온이 낮은 22시부터 07시까지 실내 환경을 측정한 결과 12월에는 17.5℃, 1월에는 14.5℃를 일정한 온도를 공급하고, 실내 습도의 변화에는 23-43%의 영향을 미치는 것으로 결과를 발표하였다.

국외에서는 EAHES에 대한 다양한 연구 결과가 발표가 되고 있으며, Yuebin et al.[4]은 지중열교환기를 가진 지중쿨링시스템과 태양열굴뚝과 조합을 한 실험에서 강한 일사를 가지는 낮 동안은 태양열굴뚝은 더 많은 환기량을 제공하였으며, PMV와 PPD를 분석한 결과는 강제 환기보다 자연환기에서 실내환경이 보다 열적으로 쾌적하다는 보고를 하고 있다. 실질적으로 건축물에 적용시킨 Trilok Singh Bisioniya et al.[5]은 2012년 6월에 완공된 인디아의 대학 건축물에 설치한 EAHES에 초점을 맞추어 검토한 결과, 약 30%의 전기절감을 꾀할 수 있다는 발표를 하였다.

또한, Huijun Wu et al.[6]은 Earth-air-pipe 시스템의 냉방능력 및 성능을 파악하기 위하여 CFD와 수치적 열이동을 바탕으로 한 모델을 개발하였고, 이를 검토하기 위하여 실험적인 조사도 수행한

결과, 개발된 모델과 실험값은 잘 일치하며, 일일 냉방능력은 반지름 0.2m인 경우에는 43.2kWh, 반지름 0.3m인 경우에는 74.6kWh를 예측하였고, 환기량 적정 설계는 열저하와 Earth-air-pipe 시스템의 냉방능력을 고려하여야 한다고 발표하였다.

EAHES에 대한 국내와 국외의 고찰을 통하여 냉방능력은 가지고 있다는 것은 확실하나, 더운공기와 차가운 표면과의 열교환으로 인한 습도 변화 즉 전열량의 변화에 대한 연구 결과가 미미함에 따라 본 연구에서는 실질 모델 실험을 통하여 매설관을 지중 3m 깊이, 길이 60m를 매설하여, 1차적으로 냉방효과를 검증하고, 2차적으로 전열량의 변화에 대하여 알아보하고자 한다.

1.2 연구방법

실온에 직접적으로 영향을 미치는 요소는 현열과 잠열의 두 요소이므로 EAHES를 통과하는 공기에 대한 전열량은 고려되어야 한다.

EAHES를 통과하는 공기의 전열량을 조사하기 위하여 온습도센스를 유입구와 출구에 설치하여 온습도의 변화량을 측정하였고, 측정된 값을 토대로 현열과 잠열로 구분하였으며, 연구진행방법은 아래와 같이 기술할 수 있다.

- ① 유입공기와 출구공기의 전열량을 측정하기 위하여 온습도센스를 부착하여 5분간 측정
- ② 온도측정을 통하여 EAHES 냉방효과 검토
- ③ 전열량을 현열과 잠열로 구분하기 위하여 건공기와 수증기의 엔탈피 계산
- ④ 전열량의 변화를 토대로 ब्ल로워 ON과 OFF 시 어느 정도의 변화가 나타나는지를 조사

2. 전열량 계산을 위한 이론적 고찰

실제 공기는 건공기와 수증기를 포함한 습공기이며, 습공기의 전열량은 온도변화에 따른 현열량과 상변화에 따른 잠열량의 합으로 표현된다.

습공기의 현열량은 공기 온도에 대한 함수관계이므로 식(1)과 같고, 수증기의 엔탈피는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h_a = C_p \cdot t \quad (1)$$

$$h_w = \gamma + C_w \cdot t \quad (2)$$

수증기 엔탈피를 구하기 위해서는 대상온도 및 상대습도에 대한 절대습도량과 포화수증기압이 필요하며, 이는 식(3)~식(5)부터 구할 수 있다.

$$AH = \frac{(C_1 \cdot (P_w \cdot 100) / (273.15 + t)) \cdot 0.833}{1000} \quad (3)$$

$$\text{여기서, } C_1 = 2.16679$$

$$P_w = P_{ws} \cdot RH \quad (4)$$

$$P_{ws} = C_2 \cdot 10^{\left(\frac{C_3 \cdot t}{t + C_4}\right)} \quad (5)$$

$$\text{여기서, } C_2 = 6.116441, C_3 = 7.591386$$

$$C_4 = 240.7236$$

$$\text{온도범위} = -20^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$$

식(1)~식(5)로부터 대상공기 상태에 대한 전열량은 식(6)으로부터 구할 수 있다.

$$h = 1.01 \cdot t + (2501 + 1.85 \cdot t) \cdot AH \quad (6)$$

EAHES의 성능을 파악하기 위하여 외기상태에서 통과된 공기 상태에 대한 전열량을 구할 수 있으며, EAHES내의 수분에 의한 잠열량은 전열량에서 현열량을 빼면 식(7)과 같다.

$$h_w = h - h_a \quad (7)$$

3. EAHES에 대한 실험 및 결과

3.1 실험개요

EAHES의 성능파악을 위하여 실험을 수행하였으며, EAHES의 매설깊이는 지중 3m, 매설길이는 60m, 지름 100mm인 PVC관을 경상남도에서

한 C대학에서 설치하였으며, 개요는 Table 1과 같다. 지상에 노출된 유입구와 유출구는 외기 영향을 줄이기 위하여 공사 후 단열시공을 실시하였고, Radionode(온습도센스) 위치 또한 외기영향을 고려하여 유입구 상부에 구멍을 뚫어 삽입하였다.

그리고 블로워에 의한 온도 상승을 방지하기 위하여 Radionode의 위치를 블로워의 뒤에 두었으며, 이에 대한 개요도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 2는 지중온도를 측정하기 위하여 총 6개 지점에 열전대를 설치하는 사진이고, Fig. 3은 매설관의 단열시공을 하기 전 지표 위로 노출된 유입구와 유출구를 나타내고 있다.

Table 1 Model experiment summary

Division	Contents	
Measure-ment contents	Date	14.08.31., 00:03-17:30
		14.09.05., 11:00-18:00
	Interval	5 minute
	Point	Inlet of EAHES
		Tube in EAHES
		Indoor of Container
Measuring instrument	Temperature & humidity	Radionode ($\pm 0.3^\circ\text{C}$, $\pm 2.0\text{RH}$)
		DEKIST.
	Temperature Buried Length	Thermocouple Data Logger 60m
		K-type GL-820
EAHES contents	Buried Depth	3m Depth
	Quality of Tube	PVC

Fig. 1 Measurement schematic diagram.

Fig. 2 Temperature measured point.

Fig. 3 Inlet and outlet of EAHS.

3.2 측정결과

블로워 가동유무에 따른 외기와 실내의 온도변화는 Fig. 4와 Fig. 5와 같다.

블로워를 가동하지 않은 경우, 평균외기온도와 실내온도는 각각 20.4℃와 23.5℃이며, EAHS의 온도는 21.9℃로 외기온도보다 높게 나타났다. 이는 컨테이너박스의 축열로 인한 것으로 판단된다. 그러나 외기온도가 낮은 야간의 경우에는 외기온도보다 EAHS의 온도가 높게 나타남에 따라 정오시간대와 비교하면, 온도에 대해서는 역전현상이 발생한다고 할 수 있다.

Fig. 4 Temperature distribution of EAHS at blower off.

Fig. 5 Temperature distribution of EAHS at blower on.

Fig. 6 Temperature distribution between blower-on and blower-off in the same time.

Table 2 Results of temperature with blower on/off

Temperature [°C]	Blower on			Blower off		
	Out	Tube	In	Out	Tube	In
Average	28.8	24.3	31.5	24	23	27.8
Minimum	25	22.6	29.1	22.1	21.8	25.3
Maximum	30.5	25.1	33.2	25.2	23.9	29.6

블로워를 가동하는 경우, 평균외기온도와 출구온도는 각각 28.8℃, 24.3℃로 그 차이는 4.5℃이나, 최고온도가 30.5℃인 경우, EAHS의 출구온도는 25.1℃로 5.4℃의 온도 하강 효과를 보이고 있다. 이를 통하여 외기온도가 높을수록 EAHS의 출구온도와 차는 크다고 할 수 있다.

최저 외기온도와 실내온도는 각각 25.0℃와 29.1℃이고, 최고 외기온도와 실내온도는 각각 30.5℃와 33.2℃로 실내온도가 2.7℃ 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 컨테이너 박스의 축열에 의한 것으로 판단된다.

동일 시간대에 대한 블로워의 가동 유무에 따른 온도 분포는 Fig. 6이고, 평균외기온도 및 출구온도와 실내온도의 결과는 Table 2와 같다.

최대 온도를 살펴보면, 블로워를 가동하지 않은 경우에는 외기와 관내와의 온도 차이는 2.3℃인 것과 비교하여 블로워를 가동한 경우에는 5.4℃로 그 차이가 크게 나타났다. 이를 바탕으로 EAHS는 블로워의 가동과 관계없이 온도하강효과 즉 현열량의 감소가 확실하다는 것이 실험으로 확인되었다.

4. 전열량을 고려한 EAHES 성능 검토

여름철 EAHES은 더운 공기를 냉각시킴에 따라 결로에 따른 관내의 수분발생으로 인하여 출구온도는 잠열에 대한 영향을 받을 것으로 판단됨에 따라, 전열량 변화에는 어느 정도의 영향이 미치는 가를 파악할 필요가 있다고 사료된다.

본 장에서는 EAHES에서 블로워를 가동한 경우에 대하여 외기상태와 EAHES의 출구상태를 비교하고자 하며, Fig. 7은 외기와 EAHES를 통과한 공기의 현열량과 잠열량을 나타내고 있다.

Fig. 7 Enthalpy distribution of EAHES at blower on.

전체적으로 현열량은 외기보다 EAHES를 통과한 공기가 낮게 나타난 것을 볼 수 있다. 이는 외기의 더운 공기가 지중열과의 열교환을 통하여 현열에 대해서는 열손실이 발생하는 것을 의미하게 된다. 그러나 잠열량은 EAHES를 통과한 공기가 외기보다 높은 것으로 나타남에 따라 잠열측면에서 보면 외기는 열획득이 발생하게 된다.

외기에 대한 전열량과 잠열량에 대한 평균값은 각각 62.2kJ/kg, 33.1kJ/kg이고, EAHES를 통과한 공기에 대한 각각의 값은 58.3kJ/kg, 33.8kJ/kg로 나타났다.

여름철 더운 공기는 EAHES를 통과하면서 전열량은 줄어든 반면 잠열량은 증가하는 양상을 보이고 있으며, 현열량과 잠열량 및 전열량에 대한 변화량은 Table 3과 같다. 전열량은 EAHES를 통과한 경우 낮게 나타났으나, 평균값을 보면, 현열량의 감소는 15.8%를 보이는 반면, 잠열량은

2.1%의 증가를 나타내고 있다.

외기가 EAHES를 통과하게 되면, 현열량은 평균 4.6kJ/kg, 최대 5.4kJ/kg의 감소되나, 잠열량은 전반적으로 증가되는 추세를 보이고 있다.

측정데이터를 바탕으로 2장의 식을 활용하여 얻은 전열량에 대한 값으로, 외기와 EAHES를 통과한 경우, 통과 전후의 공기에 대한 현열량과 잠열량의 시간대별 엔탈피 차이는 Fig. 8과 같다.

현열량은 (+)의 값이고, 잠열량은 대부분 시간대에서 (-)의 값으로 나타났다. 즉 (+)의 값은 외기에서 열손실, (-)값은 외기에서 열획득이 발생하는 것을 의미한다.

Table 3 Results of Enthalpy with blower on

Enthalpy [kJ/kg]	Outdoor			Exit of EAHES		
	Total	Dry air	Vapor	Total	Dry air	Vapor
Average	62.2	29.1	33.1	58.3	24.5	33.8
Minimum	51.3	25.3	26.0	49.9	22.8	27.1
Maximum	72.9	30.8	42.1	65.8	25.4	40.4

Fig. 8 Enthalpy difference between outdoor and exit air of EAHES.

EAHES 통과전후의 전열량에 대한 현열과 잠열량의 비율은 Fig. 9와 같다. 외기 전열량에 대하여 평균 현열량은 46.8%, 잠열량은 53.2%인 상태의 공기가 EAHES를 통과하여 되면, 현열량의 평균값은 4.8%감소하는 반면 잠열량의 평균값은 4.8%증가하는 것으로 나타났다.

외기가 EAHES로 유입될 때, 최소와 최대값에 대한 현열량과 잠열량의 변화는 Fig. 10과 같다.

Fig. 9 The ratio of Dry and vapor enthalpy/ Total enthalpy.

Fig. 10 Enthalpy variation when the minimum and maximum outside air enthalpy have passed the EAHES.

최소값을 살펴보면, 현열량과 잠열량은 각각 9.5%와 3.6%로 감소하는 반면, 최대값에서는 현열량은 19.5%로 크게 감소하나, 잠열량에서는 약간 상승하는 것으로 나타났다. 전열량을 살펴보면, 최소값의 감소폭은 5.8%이나, 최대값에서는 9.4%로 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다.

그러므로 EAHES의 경우, 전열량이 낮은 경우보다 높은 경우에서 전열량의 감소폭이 크게 나타남에 따라 EAHES는 전열량이 높은 경우에 보다 효율적이라고 할 수 있다. 또한, 현열량의 감소폭과 비슷한 잠열량의 감소가 이루어지면 냉방효과는 크게 상승할 것으로 판단됨에 따라, 잠열을 조절하여 잠열량을 낮출 필요성이 있다.

본 실험을 통하여 EAHES의 설치는 대상지역의 기후조건을 감안할 필요가 있다. 국내 여름철 기후 특징인 고온 다습한 경우, EAHES가 보다 나은 냉방효과를 얻기 위해서는 수분에 의한 잠

열량을 감소시킬 필요가 있으므로 이에 대한 방안을 모색할 필요가 있다고 판단된다.

5. 결 론

지중 3m깊이에서 길이 60m, 관경 $\Phi 100$ 인 수평형 지중열 교환기(EAHES)에 대하여 온도하강효과에 대한 검토와 전열량의 변화를 알아보기 위하여 모델실험을 수행한 연구 결과는 아래와 같이 정리할 수 있다.

- (1) EAHES를 설치하여 블로워를 작동시킨 경우, 외기와 EAHES의 출구온도와 차이는 평균 4.5°C 의 온도 하강효과를 나타냄에 따라 이는 다수의 연구 발표된 결과와 비교하여 온도 하강 효과는 확실하다는 것을 확인하였다.
- (2) 본 실험을 통하여 더운 외기가 EAHES를 통과하게 되면, 현열량은 평균적으로 4.6kJ/kg 의 열손실을 발생시키고, 잠열량은 0.7kJ/kg 증가하는 것으로 결과를 얻었다.
- (3) 측정기간 중 외기공기의 엔탈피가 최소값인 경우 현열량과 잠열량은 각각 9.5%와 3.6%로 감소하였으나, 외기공기 엔탈피가 최대값인 경우에는 현열량은 19.5%로 크게 감소한 반면, 잠열량은 다소 증가하는 것으로 나타났다.
- (4) EAHES는 외기의 전열량이 낮은 경우보다 높은 경우에서 전열량이 큰 폭으로 줄어드는 것으로 나타났다. 그러나 냉각효과를 높이기 위해서는 잠열량을 줄일 방안을 강구할 필요가 있다고 사료된다.

후 기

이 논문은 2013~2014년도 창원대학교 연구비에 의하여 일부 연구되었음

references

1. Lee, S.J, 2012, KOLON GLOBAL e+ Green Home, *Reviews Architecture and Building*

- Science*, Vol. 56, No. 3, pp.71-72.
2. Kim,G.H., Lee,M.K., Leigh,S.B., 2002, An analysis of mass cooling effects of hollow core concrete slabs combined with cool tubes, *KSES 2002 spring annual conference*, pp.193-198.
 3. Kim,J.Ho., 2013, A study on performance evaluation of cool tube system using differential pressure in winter, *AIK 2013 autumn annual conference*, Vol. 33, No, 2, pp. 415-416.
 4. Yuebin Yu, Haorong Li, Fuxin Niu, Daihong Yu, 2014, Investigation of a coupled geothermal cooling system with earth tube and solar chimney, *Applied Energy*, 114, pp. 209-217.
 5. Trilok Singh Bisoniya, Anil Kumar, Prashant Baredar, 2013, Experimental and analytical studies of earth-air heat exchanger(EAHE) systems in India :A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, pp. 238-246.
 6. Huijun Wu, Shengwei Wang, Dongsheng Zhu, 2007, Modelling and evaluation of cooling capacity of earth-air-pipe systems, *Energy Conversion and Management*, 48, pp. 1462-1471.