

技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.4.080>

상변화물질을 이용한 열방어체계의 수치해석 연구

오창목* · 유영준* · 민성기**

A Numerical Analysis on the Thermal Protection System Applied Phase Change Material

Changmook Oh* · Yungjoon Yoo* · Seongki Min**

ABSTRACT

This study is for figuring out a possibility of realization of the thermal protection system(TPS) for temporary use under high temperature condition and improving a design of the future TPS. On this purpose, environmental condition of the system has been simplified: the boundary conditions consist of a internally heating surface and a externally heated surface which is simulating the external high temperature condition. Configuration of the system is simplified as a hexahedon. Melting characteristics of the phase change material(PCM) and air temperature variation of TPS with or without connector have been numerically analyzed and compared. As a result of numerical analysis, the heat from the internally heated surface could not be effectively transferred. Therefore, temperature of inner space has been increased.

초 록

본 연구는 상변화물질이 고상에서 액상으로 변화되는 동안, 상변화 물질의 온도가 변하지 않는 특성을 이용하여, 고온환경에 한시적으로 사용되는 열차폐 구조물의 구현가능성을 수치해석적인 방법으로 평가하고, 이에 대해 개선사항을 도출하여 열차폐 구조물의 설계에 반영하기 위한 것이다. 이를 위해 시스템에 적용되는 환경조건을 단순화하여 내부에서 발열하는 구성품에 의한 내부발열면과, 외부의 고온환경을 모의하는 외부가열면으로 경계조건을 설정하였고, 해석형상은 해석의 용이성을 위하여 육면체 형상으로 고려하였으며, 상변화물질의 용융특성과 열차폐 구조물내 공기온도 변화를 연결기의 유무에 따라 비교하고 분석하였다. 이 결과, 내부 발열면의 열이 상변화 물질로 원활히 전달되지 않아 내부 공간의 온도가 크게 상승하며, 연결기로 유입되는 열이 상당한 것으로 해석되었다.

Key Words: Thermal Protection System(열방어 시스템), Phase Change Material(PCM, 상변화 물질), Latent Heat(잠열), Melting(용융)

접수일 2010. 11. 30, 수정완료일 2012. 7. 9, 게재확정일 2012. 7. 13

* 정회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 5부

** 종신회원, 국방과학연구소 1기술연구본부 5부

† 교신저자, E-mail: cmoh99@hanmail.net

[이 논문은 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 25-26, 제주 샤인빌리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

최근 에너지의 저장 및 효율적인 활용에 관련된 기술의 발전은 차세대 에너지에 대한 위기의

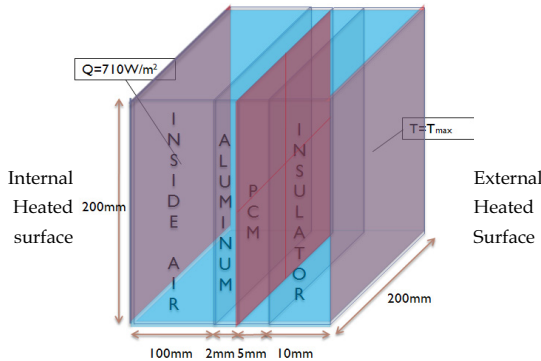


Fig. 1 Geometry of TPS System(Case1)

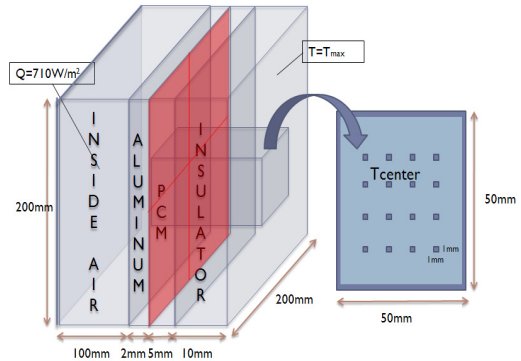


Fig. 2 Geometry of TPS system with Connector (Case2)

식과 함께 폭넓게 연구되고 있다. 그 중 잠열 에너지를 이용하는 상변화물질 시스템에 관련되어 연구가 활발히 진행되고 있다. 선진국에서는 상변화물질의 높은 에너지 저장밀도와 녹는점과 어는점 사이에서의 일정한 온도유지의 장점을 가지고 있어 태양열 에너지 저장과 빌딩 중앙공조 시스템의 온도 저장 그리고 폐열 회수(recovery) 시스템 등에 적용하는 연구가 진행되고 있으며[1-2], 국내에서는 유가가 상승함에 따라, 냉동기 소요를 대체하는 목적으로 상변화물질을 연구하고 있다[3-4]. 향후 동 분야의 발전은 화석연료의 생태계 파괴를 방지하는 목적과 에너지의 효율적인 관리라는 차원으로 지속적인 발전이 기대되는 분야이다.

상변화 현상은 고상에서 액상으로 변화하는 융해, 액상에서 고상으로 변화하는 응고, 액상에서 기상으로 변화하는 기화 및 기상에서 액상으로 변화하는 액화 등이 있다. 본 연구에서는 비교적 체적변화가 적어 시스템에 적용이 간단한 용융(melting) 현상을 해석하였다. 본 연구를 토대로 상변화물질을 이용한 열차폐 구조물의 개발 가능성을 해석적인 방법으로 검토하였고 고려 사항들을 도출할 수 있었다.

2. 전산해석 조건 및 지배방정식

2.1 해석형상

본 해석대상 열차폐 구조물은 고온환경에서

내부 장착된 발열장비를 고온환경으로부터 보호하는 구조물으로써, 외부의 열이 내부로 전달되는 것을 최대한 차단하여야하고, 내부에서 발생하는 열을 최대한 빨리 흡수하여야 하는 구조물이다.

본 연구에서는 상변화물질을 열차폐구조물에 적용하기 위한 가능성을 평가하기 위한 목적으로 가로 117 mm, 세로 200 mm 및 높이 200 mm 인 육면체 공간을 해석형상으로 설정하였고, 내부구성은 100 mm의 공기층, 2 mm의 알루미늄 케이스, 5 mm의 상변화물질 팩 및 10 mm의 단열재로 단순화하였다. Fig. 1은 이를 도시한 그림이다.

아울러, 장비와 연결되는 연결기(connector)의 영향을 Fig. 2와 같이 Fig. 1의 형상을 이용하여 추가적으로 검토하였다. 이 때, 연결기의 형상은 해석의 용이성과 신속성을 고려하여 정사각형 모양으로 단순화하여 전산해석을 수행하였다. 즉, 가로와 세로가 모두 50 mm 정사각형 형상의 연결기를 고려하였다. 연결기의 가장자리에 1 mm 두께의 하우징과 그 안쪽에 가로와 세로가 모두 1 mm 정사각형 모양의 핀(fin) 들이 등간격으로 16(4x4)개가 있으며, 핀의 주위에는 고무로 채워진 것으로 단순화하였다.

2.2 해석조건

내부발열체의 영향을 평가하기 위하여 열차폐 구조물의 외부가열면(externally heated surface)에 고온이 형성될 때, 내부발열면(internally

Table 1. Properties of PCM system compartments

	Density (kg/m ³)	Viscosity (kg/ms)	Specific Heat (J/kgK)	Thermal Conductivity (W/mK)	Latent Heat (J/kg)	Melting Temp. (°C)	Initial Temp. (°C)
Insulator (ASPEN Aerogel)	2.793	X	1047	0.0936	X	X	50
PCM	2180	X	1260(liq.) 1170(sol.)	1.26	301000	78	50
Rubber (vulcanized)	1190	X	2010	0.16	X	X	50
Copper	8960	X	385	385	X	X	50
Aluminum	2698.9	X	900	210	X	X	50
Inside Air	1.1614	1.846E-005	1007	0.0263	X	X	50

heating surface)이 단열조건인 경우(Case 1-1)와 발열조건인 경우(Case 1-2)로 구분하여 해석하고 그 결과를 서로 비교하였다.

또한, 연결기의 영향을 고려한 해석에서도 위 경우와 동일하게 내부발열면을 단열조건인 경우(Case 2-1)와 발열조건인 경우(Case 2-2)로 구분하여 해석을 수행하였다.

2.3 경계조건 및 물성치들

Case 1의 고온환경을 모사하기 위해 Fig. 1과 같이 열차폐구조물의 외부가열면에 T_{max} 조건과 내부발열조건을 고려할 경우에 내부발열면에 710 W/m^2 의 발열조건을 주었다. 이외 벽면은 실 적용상황을 예측할 수 없기 때문에 모두 단열조건을 주었다. 이때 T_{max} 는 $500^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{C}$ 사이에 있는 특정한 값이며, 시스템의 특성상 정확하게 정해지지 않는 값이다. Case 2에서도 위와 동일한 조건으로 경계조건을 설정하였다. 또한, 해석에 사용된 물질들의 물성치는 Table 1에 제시된 값을 이용하여 전산해석을 수행하였다.

2.4 가정 및 지배방정식

본 연구는 전산해석 프로그램인 CFD-ACE+ 2009를 이용하여 해석모델을 바탕으로 다음 몇 가지 가정을 적용하여 수행하였다.

내부 공기는 밀폐된 공간에서 낮은 속도로 유동이 발생하므로 밀도는 일정하다고 볼 수 있어 비압축성 유체에 대한 질량보존식(Eq. 1)을 적용하였고, 중력이 고려된 밀폐공간의 유동에 대한

자연대류가 있는 운동량 보존 방정식(Eq. 2)을 적용하였다.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

에너지보존 방정식은 열역학 제 1법칙으로부터 유도한 방정식을 내부에너지 방정식으로 바꿔주면 Eq. 3과 같이 단순화 된다.

$$\rho \frac{De}{Dt} = \nabla \cdot q - p(\nabla \cdot u) + \phi \quad (3)$$

위 식에서 좌변은 유체 입자의 에너지 변화율이며 우변은 유체 입자에 추가된 순수열과 유체 입자에 수행된 순수일을 그리고 소스(source)항들을 합한 것이다[5]. 여기에서 ϕ 는 점성소산율이다.

그리고, 비압축성을 식에 고려하면 $\nabla \cdot u = 0$, $e = cT$ 가 되며 Fourier 법칙($q = -k\nabla T$)을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[6]. 아래 식에서 κ 는 열확산계수이다.

$$\frac{DT}{Dt} = \kappa \nabla^2 T \quad (\text{where, } \kappa \equiv \frac{k}{\rho c_p}) \quad (4)$$

시스템에서 상변화물질 층은 매우 얇은 팩형태로 적용되고 상변화 물질의 용융특성의 분석

이 본 연구의 연구대상이 아니고, 대류보다 전도에 의한 영향이 더 클 것으로 판단되어 상변화 물질이 녹은 후 발생하는 유동의 흐름은 무시하였다. 단, 상변화물질의 액상에서의 물성과 고상에서의 물성 중 비열이 달라 이를 고려하기 위하여 각각의 경우에 해당되는 비열값을 적용하였다.

본 해석에 사용된 다른 물질들의 물성은 해석의 결과와 본 연구의 목적에 큰 영향을 주지 않기 때문에 해석의 편이상 Table 1에서 제시된 상수값을 사용하였다.

3. 해석 결과

3.1 외부온도와 발열체 유무에 따른 열전달 현상 분석

외부가열온도면을 T_{max} 로 설정하고 내부발열면을 단열조건(Case 1-1)과 발열조건(Case 1-2)으로 설정하여 100초가 경과된 시점의 열차폐구조물 내부의 온도분포를 계산한 결과를 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 내부발열면을 단열조건으로 고려한 경우(Case 1-1) 외부가열면에서 열차폐구조물로 유입되는 열이 상변화 물질에서 차단되어 내부로 전달되지 않지만, 내부발열조건을 고려한 경우 내부에서 발생한 열이 상변화 물질로 전달되더라도 내부 발열에 의해 내부공기온도상승이 많이 되는 것을 알 수 있다.

Figure 4에서 상변화물질과 알루미늄 덮개 사이 온도를 계산한 값을 보면, Case 1-1의 경우

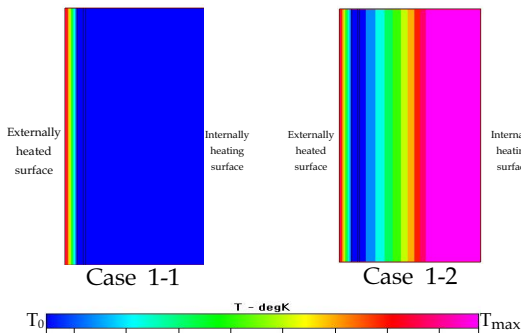


Fig. 3 Side View of Temperature Distribution at 100s (w/o Connector)

시간이 상변화물질에서 상변화가 발생하는 동안 상변화물질에서 열을 흡수하기 때문에 1800초까지 78°C로 유지되는 것을 볼 수 있다. 마찬가지로 Case 1-2의 경우 내부발열면에서 발생하는 열로 인해 상변화물질을 빠르게 용융시켜 온도가 유지되는 구간이 Case 1-1에 비해 300초 정도 짧아지게 된다. Case 1-1과 Case 1-2에서 모두 용융이 완료된 시점 이후에는 상변화물질이 완전히 액체상태가 되어 온도가 계속적으로 상승한다.

Figure 5는 시간에 따른 내부공간 공기의 평균 온도를 계산한 것이다. Case 1-1의 경우에 외부가열면의 가열량을 상변화물질이 흡수하는 동안 내부공간의 공기온도 상승이 둔화되는 것을 확

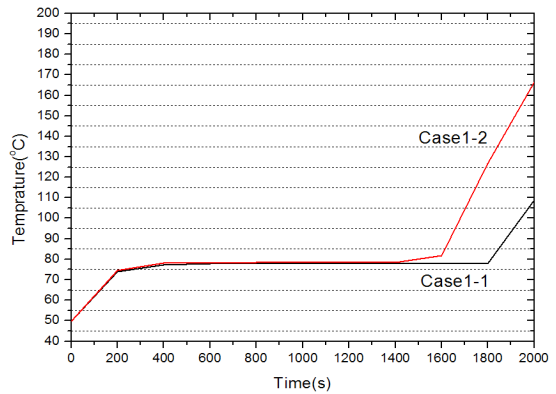


Fig. 4 Comparison of Average Temperature of PCM-Aluminum Plate in Case1-1 and Case1-2

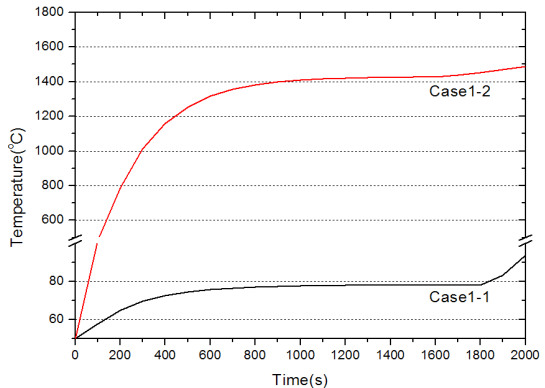


Fig. 5 Comparison of Average Temperature of Inner Space in Case 1-1 and Case 1-2

인할 수 있으나, Case 1-2에서는 추가적인 내부 발열면으로부터의 열원에 의하여 내부온도는 800초에 1400℃까지 상승한다.

이는 내부발열면에서 발생한 열이 자연대류에 의하여 상변화 물질에 전달되는데, 내부발열량과 상변화물질로 전달되는 열전달량이 증가가 되는 온도인 1400℃까지 상승한 것으로 분석된다. 이후 상변화물질이 완전히 녹는 시점인 1500초 이후에는 상변화물질의 온도변화에 따라 내부 공기온도가 다시 상승하는 것을 확인할 수 있다. Case 1-2의 경우에서처럼 상변화 물질로 열전달이 잘 되지 않을 경우 내부 공기온도가 높아져 장비가 손상될 수 있기 때문에 열차폐 구조를 시스템에 적용을 위해서는 구조물 내부에 내부 발열량을 최소화 할 수 있는 방법이 강구되어야 할 것으로 판단된다.

3.2 연결기를 통한 열전달 현상 분석

연결기를 통하여 외부가열면의 열이 상변화물질로 빠르게 전달될 수 있기 때문에 이의 확인을 위하여 본 해석을 수행하였다. Fig. 6은 각각 내부발열면의 경계조건을 단열조건으로 한 경우(Case 2-1)과 발열조건으로 한 경우(Case 2-2)의 결과를 도시한 것으로 열차폐 구조물 중심부를 옆면에서 평행하게 자른 단면에서 본 온도분포도이다. Fig. 6의 Case 2-1을 보면 외부가열면에서 유입된 열이 컨넥터의 가장자리에 위치한 컨넥터 하우징을 통해 내부로 전달되므로 근접한 상변화물질의 용융이 빠르게 용융시키는 것을

확인할 수 있다. 그리고 하우징을 통해 전달된 고온은 상변화물질을 지나 내부로 침투하게 되고 열은 Fig. 6의 Case 2-1과 같이 방사형으로 넓게 전달이 된다. 그리고, Fig. 6의 Case 2-2에서 내부발열면을 고려할 경우, 내부발열면으로부터의 열과 외부가열면에서 유입된 열이 동시에 상변화물질로 전달이 되고 용융시키므로 전체 시스템의 온도는 더욱 빠르게 상승하는 것을 확인할 수 있다.

Figure 7은 연결기의 열전달 현상을 확인하기 위하여 상변화물질과 알루미늄 덮개 사이를 수직으로 자른 단면의 열분포도이다. 외부가열면에서 들어오는 열은 고무가 있는 컨넥터의 중심보다 하우징이 있는 연결기의 가장자리로 열이 더 집중되는 것을 확인할 수 있다.

열이 집중되는 원인은 고무의 열전도도(0.16 W/mK)가 연결기의 하우징에 비하여 상대적으로 매우 작고 하우징의 열전도도(385 W/mK)는 매우 높기 때문에 열은 하우징으로 빠르게 전달되며 Fig. 6과 Fig. 7과 같이 하우징의 주변으로 열이 빠르게 전달된다. 연결기를 통한 열전달특성을 분석한 결과 핀과 고무 등으로 구성된 연결기 내부로의 열전달량은 연결기 하우징을 통한 열전달량에 비하여 상대적으로 작아, 연결기의 고려시 하우징의 단열방안을 고려하면, 열차폐효과를 얻을 것으로 판단되었다.

Figure 8과 Fig. 9에서 상변화 물질이 모두 이루어지는 약 100초 이후에 온도분포를 볼 때, 내부발열면의 유무에 따른 영향이 크지 않은 것으

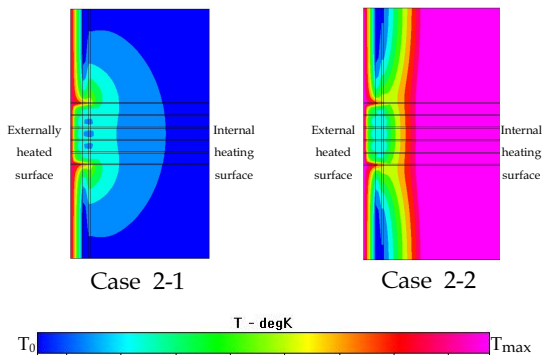


Fig. 6 Temperature Distribution at 100 s (w Connector)

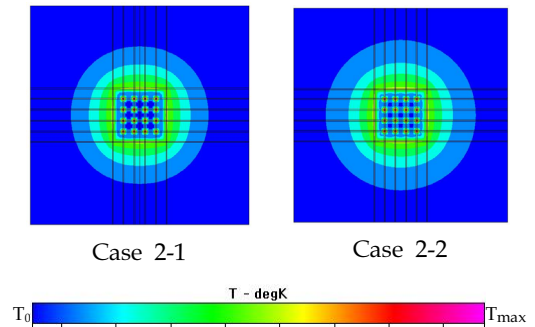


Fig. 7 Temperature Distribution at PCM-Aluminum Plate(100s)

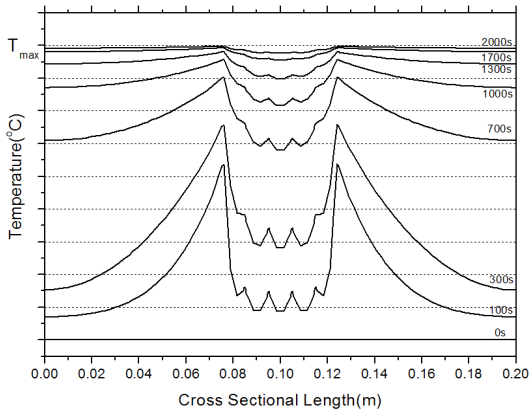


Fig. 8 Temperature Distribution of Case 2-1 at Center of the PCM-Aluminum Plate

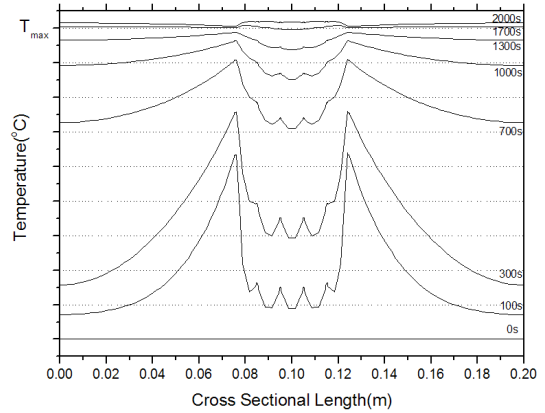


Fig. 9 Temperature Distribution of Case 2-2 at Center of the PCM-Aluminum Plate

로 해석되었다. 이는 상변화물질의 연결기층 온도 분포는 내부발열면의 공기보다 외부가열면으로부터의 영향이 더 큰 것으로 확인되었다.

Figure 10에서 내부공기의 온도를 도시하였으며, 그 결과 연결기의 하우징을 통하여 내부로 열이 빠르게 전달되므로 연결기가 없는 경우(Case 1)에 비하여 연결기가 있는 경우(Case 2) 온도 상승이 급격함을 확인할 수 있다. 즉, Case 1-1의 경우에는 80℃를 1800초 동안 유지하는 것으로 해석되었었는데, Case 2-1에서는 약 1600초에서 이미 외부가열면 온도와 같아진 것으로 해석되었다.

Case 2-2의 결과는 Case 1-2의 결과와 크게 다르지 않으나, Case 2-2의 결과가 더 높은 온도까지 상승되는 것으로 확인되었다. 이는 내부공기 온도가 높아졌기 때문으로 분석된다.

열차폐 구조물 내부공기 온도가 상변화물질이 모두 녹는 동안 78℃ 이하로 유지될 것으로 기대하였으나 본 해석결과에서는 온도가 지속적으로 상승하는 경향이 확인되어 상변화물질을 이용한 열차폐 구조물 설계시 이에 대한 대책이 강구되어야 한다.

4. 결 론

외부 고온 환경과 내부 발열 상황에서 상변화

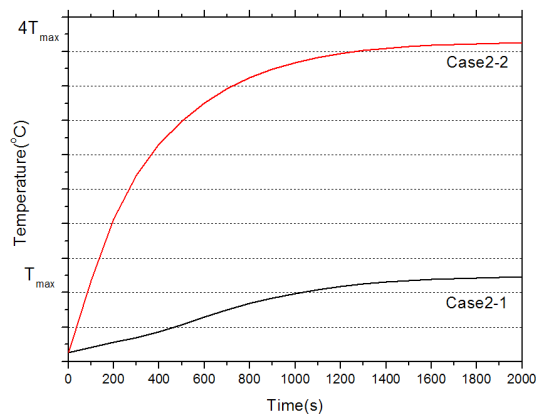


Fig. 10 Comparison of Average Temperature of Inner Space in Case 2-1 and Case 2-2

물질 시스템의 적합성 및 개발 가능성을 알아보기 위해 전산해석을 수행하였다. 전산해석에서는 외부 고온 환경만 있을 경우와 내부에 추가적으로 발열이 있을 경우로 나눈 후 해석을 한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

외부에서 들어오는 고온의 열을 차단하기 위해 단열재, 상변화물질로 구성된 열차폐 구조물은 내부 온도 유지에는 적합하지만 내부에서 발생하는 열원이 있을 경우, 열이 상변화 물질로 효과적으로 외부로 전달이 되지 않으며 내부온도는 급격하게 상승하게 된다. 따라서 내부의 열을 상변화물질 쪽으로 효과적으로 전달시키는 기구물에 대한 연구가 필요하다.

외부 고온 환경에서 열차폐 구조물에 연결기를 적용할 경우 연결기 하우징의 열전도도가 높아 하우징 주변을 감싸고 있는 상변화물질을 빠르게 용융시킬 수 있으며, 그 결과 외부의 고온이 컨넥터 하우징을 통하여 빠르게 내부로 유입되어 내부공간의 공기온도를 상승 시킬 수 있다.

상기 결과들로부터 내부 열원이 있는 열차폐 구조물의 설계시 내부열원을 효과적으로 상변화물질로 전달하는 방법과 연결기의 열차폐 방안에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Stritih, U., "Heat Transfer Enhancement in Latent Heat Thermal Storage System for Buildings," Energy and Buildings Vol. 35, 2003, pp.1097-1104
2. Regin, A. Felix, Solanki, S.C. and Saini, J.S., "Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsule: a review," Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 12, 2008, pp.2438-2458
3. 오창묵, 유영준, 민성기, "상변화 물질 적용 시스템의 열해석 연구," 제15차 유도무기학술대회 논문집, 2009, pp.186-188
4. 유영준, 오창묵, 민성기, "과형 유로를 갖는 마이크로채널 PCM 열교환기의 전산해석 연구," 2010년 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2010, pp.1559-1562
5. 박한영, 조용, 김영준, 전산유체 따라잡기, 홍릉과학출판사, 2010
6. Kundu, Pijush K. and Cohen, Ira M., Fluid Mechanics, Elsevier Academic Press, 2004