

# 대형 환경시험조 내의 복합무기체계 재료에 대한 열유동 수치해석

김성대<sup>†</sup> · 유성열\* · 백상화\*\* · 이정용\*\* · 박소진\*\*\* · 김철주\*\*\*\* · 고한서\*\*\*\*

## Numerical Analysis of Thermal Flow for Materials of Combined Weapon System in Large Environmental Tester

Sung-Dae Kim, Seong-Ryoul Ryoo, Sang-Hwa Baek, Jeong-Yong Lee,  
So-Jin Park, Chul-Ju Kim and Han Seo Ko

**Key Words:** Weapon Systems(무기체계), Environmental Tester(환경시험조), Soaking Time(침투온도 도달시간), Heat Flow(열흐름)

### Abstract

A numerical analysis for temperature distribution of four different materials such as iron, silicon, aluminum and PVC has been performed in this study to predict thermal behaviors of combined weapon systems in a large environmental tester. Thus, experimental conditions have been proposed using a calculating software (SolidWorks 2007 COSMOS FloWorks) to prepare for field tests and analyze heat flow inside the environmental tester and temperature distributions of materials. The boundary conditions of the analysis are composed of inlet and outlet conditions of the environmental tester with different pressures and the limit of low temperature of  $-30^{\circ}\text{C}$ . The soaking time of the system in the environmental tester has been calculated by this commercial program in this study to carry out the experiment.

기호 및 그리스 문자 설명

$u_i$  : 속도성분 [m/s]  $i=1, 2, 3$

$k$  : 난류운동에너지 [J/kg]

$\epsilon$  : 소산율 [J/kg · s]

$\tau_{ij}$  : 점성 전단응력 텐서 [N/m<sup>2</sup>]

$\tau_{ij}^R$  : 레이놀즈 응력 텐서 [N/m<sup>2</sup>]

---

† 성균관대학교 대학원 기계공학과

E-mail : sd4945@skku.edu

TEL : (031)290-7475 FAX : (031)290-7676

\* 성균관대학교 대학원 기계공학과

\*\* 국방과학연구소 중합시험단 2팀

\*\*\* 충남대학교 화학공학과

\*\*\*\* 성균관대학교 기계공학부

---

### 1. 서론

군사 무기체계 개발 단계에서 가장 기본적인 성능 중 하나가 예측 가능한 모든 상황에서의 동작안정성 확보이며 이러한 기능을 이루어 내기 위한 목적으로 신뢰도가 높은 고성능 복합재료가 적용되고 있다.

특히 저온환경에서 군사무기체계의 시동성 문제와 관련된 이들 복합재료의 열적 성능 및 안정성에 대한 환경시험이 반복적으로 현재 수행되고 있다.

이들 재료의 열적 안정성과 상호작용에 대한 영향을 검토하기 위하여 각각의 부품별로 환경시험이 수행되며 이에 따른 침투온도 시간 및 경제성 분석 문제가 제기되고 있다.

그래서 저온환경 실험을 수행하기 전 무기체계에 적용된 복합재료에 대한 온도분포와 침투시간에 대한 예측이 매우 중요하다.

이형식<sup>(1)</sup> 등은 대형 클린룸 장비에 대해 정상상태 내부 유동해석을 수행하여 속도 및 압력분포를 EFD.Lab을 이용하여 전산수치해석을 수행하였다.

이형식<sup>(2)</sup> 등은 대기 중에서 고온으로 유지되는 발열체 및 이에 인접한 대상체를 포함하는 모델에 대하여 열복사를 고려한 열유동해석을 SolidWorks COSMOS FloWorks로 전산수치해석을 하였다. 발열체 온도변화에 따른 대상체의 온도변화를 보였으며 발열체와 대상체의 재료는 각각 스테인리스 스틸(Stainless Steel)을 사용하였다.

김병철<sup>(7)</sup> 등은 수평 평판에서의 복합열전달을 FLUENT Ver.5.3을 이용하여 전산수치해석을 수행하였으며 온도분포, 열적거동, 속도변화에 대해 언급하였다.

그 외 복합열전달 및 유동해석에 대한 전산수치해석과 실험이 다수 연구되었으나 고온환경 및 저온환경에 대한 복합재료의 해석과 열유동에 관한 군사분야 관련연구 사례는 기밀 및 보안 제약으로 인해 파악하기 힘든 실정이다.

따라서 본 연구는 이들 무기체계 복합재료의 실험 환경 조건에 대한 열적 특성을 파악하고 각 무기 복합재료의 침투시간에 대한 자료를 확보하기 위한 일환으로 전산수치해석 기법 적용 가능성을 검토하기 위해 수행되었다.

해석관련 복합재료는 임의의 재료 철(Iron), 알루미늄(Aluminum), 실리콘(Silicon)과 폴리염화비닐(PVC)을 선정하였으며, 이 네 가지 재료는 각종 무기체계와 군사 통신장비 등 주 재료로 보급되어지고 있고 또한 많이 사용하고 있다.

## 2. 본 론

### 2.1 수치해석 방법

본 연구에서 해석한 상용 프로그램은 SolidWorks 2007 COSMOS FloWorks를 사용하였으며 3차원 유동장에 대하여 에너지방정식을 추가하여 유동장 및 대형 환경시험조 내의 온도를 해석하였다. 또한 방정식 내 대류항의 계산을 위

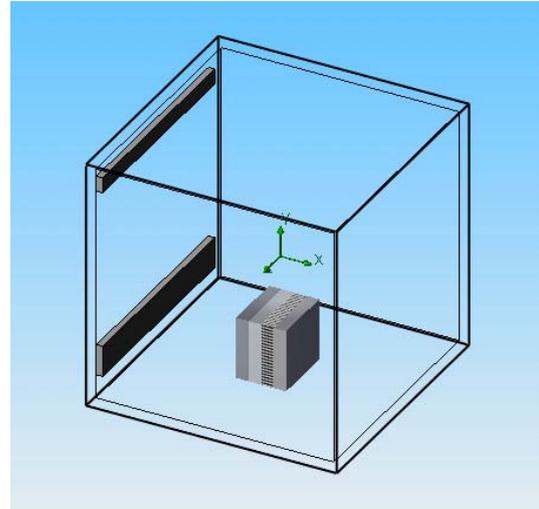


Fig. 1 Three dimensional geometry for the analysis

하여 상류차분도식(Upwind Difference Scheme)을 사용하였다. 수렴조건은 각 셀에 대한 운동량 유수의 합 및 연속방정식 유수의 합이 모두  $10^{-3}$  이하로 되도록 선정하였다.<sup>(1,2,3)</sup>

Fig. 1은 해석모델을 3D 트리메트릭(Trimetric) 구조로 나타낸 것이며 대형 환경시험조 내에는 네 가지 복합재료가 정 가운데에 위치해있다.

대형 환경시험조 사이즈는 가로, 세로, 높이가 각각 4×4×4m인 정사각형 이며 두께는 0.1m, 재료는 스테인리스 스틸(Stainless Steel)이다.

내부의 복합재료는 그림에서 보는바와 같이 왼쪽으로부터 철(Iron), 실리콘(Silicon), 폴리염화비닐(PVC), 알루미늄(Aluminum) 순이며 사각 평판이다. 가로, 세로 길이는 각각 1m, 두께는 0.2m이다.

### 2.2 지배방정식

대형 환경시험조 내의 유동은 정상상태의 난류 유동으로서 지배방정식은 식(1), (2) 및 (3)으로 표시되는 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동 에너지 방정식과 식(4)와 (5)로 기술되는 난류운동 에너지 소산율 방정식으로 구성된다.<sup>(1,2,3)</sup>

또한 난류모델로서 표준  $k-\epsilon$  모델을 적용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \epsilon + S_i u_i + Q_H$$

where

$$H = h + \frac{u_i u_j}{2} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i}((\mu + \frac{\mu_k}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}) + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i}((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}) + S_\epsilon \quad (5)$$

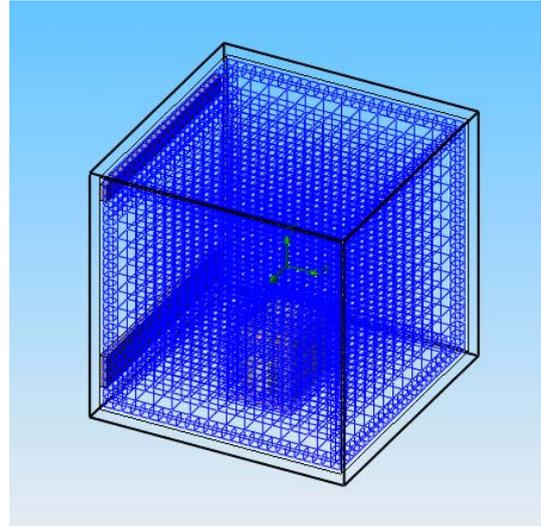
### 2.3 경계 및 계산조건

Fig. 2는 해석에 사용된 경계조건을 나타낸 것으로 대형 환경시험조 상하부에 각각 저온유체의 입구(Inlet)와 출구(Outlet)가 있으며 Table 1은 입구 및 출구의 제원을 나타낸 것이다.

그리고 입구에는 1.5m/s 내부유입 공기속도와 3bar의 압력 및 -30℃의 온도, 출구에서는 1bar의 대기압조건을 적용하였다. 대형 환경시험조 내부와 복합재료의 온도는 각각 상온 25℃이다.

**Table 1** Environmental tester Inlet and Outlet Size

Environmental tester	Inlet	Outlet
Length (m)	0.25	0.5
Width (m)	3.4	3.4



**Fig. 2** Computational grids for fluid and solid

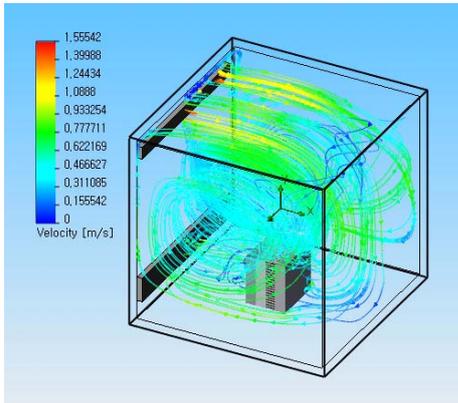
Fig. 2에서 대형 환경시험조와 내부의 복합재료 해석격자를 볼 수 있으며, 격자수는 약 300,000개이다.

본 연구는 공기가 입구에서 내부로 유입될 때 과도상태 유동해석을 수행함으로써 내부의 유동상태를 파악하고, 그에 따른 압력, 속도 등을 분석할 수 있으며 시간에 따른 복합재료의 온도변화도 관찰할 수 있다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 대형 환경시험조 내의 유동속도

Fig. 3은 대형 환경시험조 내의 유동속도 분포를 유선과 화살표로 나타낸 것이다. 대형 환경시험조 내의 유동은 수력지름과 공기의 물성치를 고려하여 레이놀즈수(Re)를 계산한 결과 약 61,069이었으며 그 결과 난류(Turbulence)임을 알 수 있다.



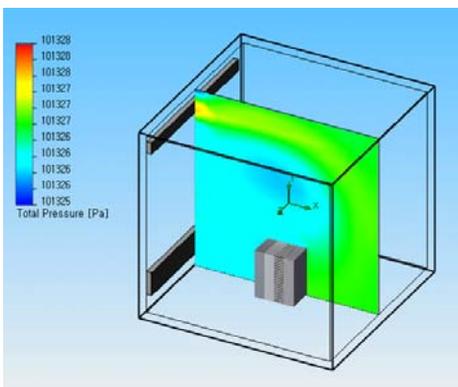
**Fig. 3** Air velocity distribution for 1.5m/s of inlet in environmental tester

또한 대형 환경시험조의 입출구 압력차에 의해 공기흐름이 형성되며, 중앙부분에서 난류가 심하게 나타나는 경향을 볼 수 있다.

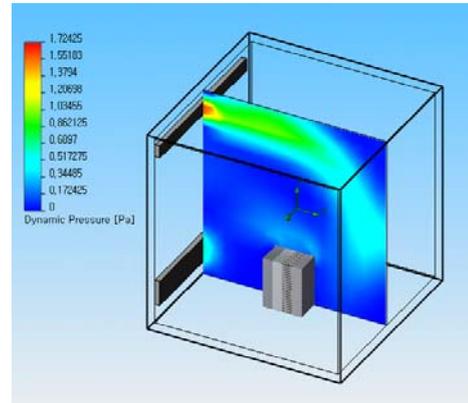
또한 입구에서 1.5m/s의 속도로 나오는 공기는 대형 환경시험조 내에서는 그 속도가 감소되는 경향이 있음을 알 수 있다.

### 3.2 대형 환경시험조 내의 압력분포

**Fig. 4**와 **Fig. 5**는 대형 환경시험조 내의 공기유동에 따른 압력분포를 전압과 동압으로 나타낸 것이다. 입출구의 압력차는 초기조건으로부터 2bar 차이였으며 이 압력차이로 공기유동이 형성되었고 이로부터 내부 복합재료는 강제대류 열전달이 이루어짐을 알 수 있다.



**Fig. 4** Total pressure distribution in environmental tester



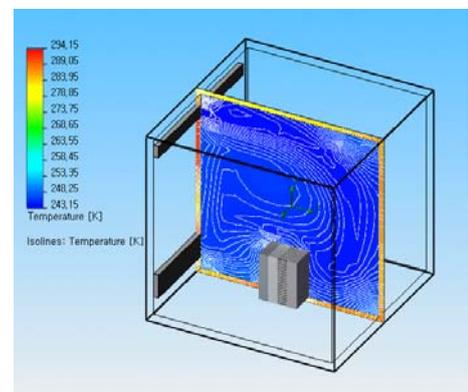
**Fig. 5** Dynamic pressure distribution in environmental tester

### 3.3 대형 환경시험조 내의 온도분포

**Fig. 6**은 대형 환경시험조 내의 온도분포이며 시간이 지남에 따라 도달된 온도는 그림과 같이 등고선으로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 대형 환경시험조의 온도가 -30℃까지 고르게 분포되어 있는 모습을 볼 수 있다.

반면 대형 환경시험조 벽면온도는 환경시험조 내 온도와 다른 경향을 보였으며, 이는 초기 경계조건에서 벽면온도(Wall Temperature) 조건을 사용하였기 때문이다. 본 연구에서 벽면온도와 단열(Adiabatic)조건을 비교 수행한 결과 전산수치 해석상 별 차이가 없는 것으로 나타났다.

실제 대형 환경시험조는 실외에 설치되어 있고, 태양에 직접 노출되어 있기 때문에 자연대류 열전달을 고려하여야 한다.



**Fig. 6** Air temperature distribution in environmental tester

### 3.4 복합재료의 온도분포

Fig. 7은 시간변화에 따른 복합재료 온도에 대한 그래프이며 Fig. 8은 대형 환경시험조 내 복합재료의 최종도달 온도에 다다랐음을 나타낸 것이다. 이로부터 복합재료의 침투도달 온도시간을 해석적으로 얻을 수 있었다.

그래프에서 나타낸바와 같이 공기의 온도가 빠르게 강하함에 따라 복합재료의 온도가 서서히 강하됨을 알 수 있다.

대형 환경시험조 내에서 공기의 온도는 처음 2시간 경과 때까지는 급격하게 강하하는 경향을 보였고 약 24시간 후에는 정상상태에 도달하였다.

반면 복합재료의 온도는 급격한 강하를 보이지 않았으며 약 1~2°C 선형적으로 강하하는 경향을 보였으며 약 85시간 후에는 정상상태에 도달하였다. 즉 침투도달 온도시간은 대략 85시간임을 전산수치해석으로 밝혀졌다.

임의의 네 가지 사용된 복합재료의 침투온도 도달시간은 대략적으로 알루미늄(Aluminum) > 실리콘(Silicon) > 철(Iron) > 폴리염화비닐(PVC) 순으로 나타났으며 각 재료간의 침투도달 온도시간은 큰 차이를 보이지 않았다. 그래서 각 재료의 침투도달 온도시간 그래프는 표현하지 않았으며 평균 합산하여 나타내었다.

Fig. 8은 85시간이 지난 후 복합재료가 최종 침투도달 온도에 다다른 결과를 보여주고 있으며 고르게 온도가 떨어졌음을 알 수 있다.

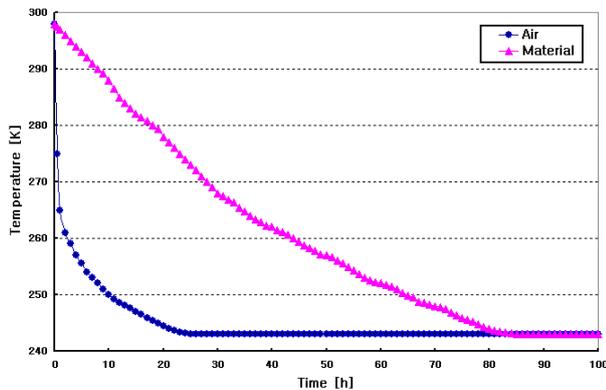


Fig. 7 Temperature change with time for air and material

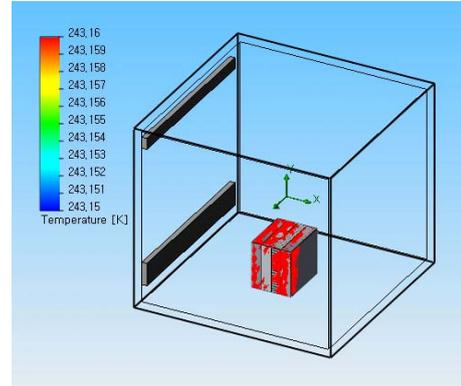


Fig. 8 Temperature distribution for combined materials in environmental tester

## 4. 결론

대형 환경시험조 내에서 무기체계 복합재료의 침투도달 온도시간을 예측하기 위하여 실험을 수행하기 전 전산수치해석을 수행하였고 얻은 결과는 다음과 같다.

[1] 임의의 네 가지 재료를 가지고 최종 침투도달 온도시간을 전산수치해석을 수행하였으며 그 결과 대략 85시간임을 알 수 있었다.

네 가지 사용된 복합재료의 침투온도 도달시간은 알루미늄(Aluminum) > 실리콘(Silicon) > 철(Iron) > 폴리염화비닐(PVC) 순으로 나타났다.

[2] 본 연구에서 해석한 상용 프로그램은 SolidWorks 2007 COSMOS FloWorks이며 전산수치해석간의 신뢰성을 검토하기 위해서는 타 상용 프로그램과의 병행연구가 이루어져야 할 것이며 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 해석격자수를 늘리고, 그 해석에 타당한 지배방정식의 변화와 각 재료간의 물성치를 엄밀하게 분석할 필요가 있다.

[3] 본 연구에서는 복합재료 두께를 0.2m로 적용하였으나 최근 무기체계는 재료의 경량화와 단일 복합재료를 채택함으로 인해 본 재료의 두께 보다는 얇을 것이므로 향후 해석결과 및 실험결과로 얻어지는 목표도달 온도시간은 줄어들 것이라 예상된다.

## 후 기

이 연구는 2006년도 제1단계 국방과학연구소 기초연구과제(No. UD060014AD) 연구비의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 이형식, 함병철, 이상호, 2005, 상부로부터 공기가 유입되는 챔버형 검사 장비의 내부 유동 해석, 대한기계학회 논문집
- (2) 이형식, 도기정, 이상호, 2006, 미소 챔버 내 복사열전달을 수반한 열유동 해석, 대한설비공학회 하계학술발표대회, pp.194~199
- (3) 이형식, 곽동렬, 이상호, 2005, 발열 강관을 포함하는 아연 도금 설비 내 유동장 해석, 대한기계학회 논문집
- (4) 명현국, 2006, 비정렬격자계를 사용하는 복합 열전달 해석에서의 고-액 계면 처리방법, 대한설비공학회 논문집 제18권 제5호, pp.451~457
- (5) 이강엽, 김형모, 한영민, 이수용, 2002, 고온부 냉각을 위한 스윙챔버내의 유동 및 열전달 해석, 한국전산유체공학회 논문집 제7권 제3호
- (6) 이인태, 박상희, 2002, 열전도기판에 실장된 모듈로부터의 복합열전달, 대한기계학회 기계관련 산학연 연합심포지엄, pp.1413~1420
- (7) 김병철, 주동인, 2002, 열원이 부착된 수평 평판에서 복합 열전달에 관한 연구, 대한설비공학회 논문집 제14권 제6호, pp.512~518
- (8) 이진호, 조성훈, 2001, 경사진 채널 밑면에 부착된 모사모듈의 복합열전달, 대한기계학회 춘계학술대회논문집 D, pp.471~476
- (9) 장병훈, 1999, 복합열전달과 열경계조건에 관한 연구, 대한기계학회 논문집 B권 제23권 제1호, pp.33~42
- (10) 김의광, 백병준, 박복춘, 조병수, 1995, 돌출된 열원이 부착된 수직채널내 복합열전달, 대한기계학회 추계학술대회 논문집(II), pp.391~395
- (11) F. P. Incropera, D. P. Dewitt, 2003, Introduction to heat transfer, 5th edition, John Wiley & sons, Inc.
- (12) Lei, T. K., 2001, Use of computational fluid dynamics applications in cleanroom design, *Journal of IEST*, Vol. 44, No. 2, pp.30~40
- (13) Nigen, J. S. and Amon, C. H., 1995, Effect of Material Composition and Localized Heat Generation on Time-Dependent Conjugate Heat Transfer, Vol. 38, no. 9, pp.459~470
- (14) Nakayama, W. and Park, S. H., 1996, Conjugate heat Transfer from a single surface mounted block to forced convection air flow in a channel, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 118, pp.301~309