

# 외부 마찰열에 의한 내부 관성측정장치의 과도 열전달 해석

탁승민\* · 박지원\* · 강민규\* · 박동진\* · 이종수\*\* · 이석순\*\*\*

## Transient heat transfer analysis of inertial measurement devices by outside frictional heat

Seungmin Tak\* · Jiwon Park\* · Minkyu Kang\* · Dongjin Park\* · Jongsu Lee\*\*  
· Seoksoon Lee\*\*\*\*

### ABSTRACT

Guided weapon is very excellent strategy system than conventional weapons. Recently, several devices and a technology developed much developing more, inertia measuring device is one example. Inertia measuring device is device that is used to improve more accuracy of guided weapon, this device is operated by sensors of inside. Sensors of inside are parts that is very sensitive about impact or shock, heat that interact when shoot, it is main purpose that verify durability of sensor by heat delivered from outside in this study.

Key Words: Heat Transfer, Numerical Analysis, Frictional Heat, Transient Analysis

### 1. 서 론

1944년 9월 8일, 최초의 유도탄인 독일의 V2가 사용되었는데 이 시기의 유도화 무기는 상당히 획기적인 전략체계였으나 속도나 정밀도, 그리고 개발비용이 많이 요구되었기 때문에 상당히 많은 문제점을 안고 있었다. 그러나 2차 대전 이후로 유도무기는 사거리, 속도, 정밀도 등에서 많은 발전을 이뤘었다. 최근 유도무기는 더욱 비약적으로 발전하여 수많은 종류의 유도화 무기가 개발되었고, 그리고 계속 개발 중이다.

유도화 무기와 재래식 무기의 가장 큰 차이점은 유도탄 제어시스템의 탑재 여부인데 재래식 무기는 개발비용에 대해서 유도화 무기보다 훨씬 큰 이점을 지니고는 있지만 사용 시 요구되는 인적 자원과 그리고 무기의 가장 중요한 특성인 정밀도에 대해서는 관련 기술이나 숙달 정도에 의해서 많이 좌우되기 때문에 특히 신속하고 정밀한 공격이 요구되는 현대전에서는 유도화 무기에 비해 경쟁력이 상당히 떨어진다.

따라서 유도화 무기에서 제어 시스템의 이상 유무는 상당히 중요한 변수라고 할 수 있는데 본 논문에서는 이러한 유도탄 제어 시스템 중 하나인 관성 측정 장치에 대한 열전달 특성에 대해 다루어 열에 의한 제어 시스템의 안전성에 대한 검증을 목적으로 한다.

\* 학생회원, 경상대학교 기계공학과

\*\* 경인테크(주)

\*\*\* 정회원, 경상대학교 기계항공공학부  
연락처, E-mail: Leess@snu.ac.kr

## 2. 관성 측정 장치의 형상 및 시스템

관성 측정 장치는 총 6개의 센서와 하나의 CPU로 이루어져 있다. 각각의 센서들은 Fixture에 고정되어 있으며 이 Fixture는 하부 케이스와 4개의 볼트로 고정되어 있고, 그 위에 상부 케이스로 덮여져 있다.

관성 측정 장치는 다른 장치와 마찬가지로 여러 가지 환경시험을 거치게 된다. 그 중 외부에서 발생하는 마찰열에 의해 전달되는 열에 의한 내구성 검사가 이 환경시험에 포함된다. 유도를 하기 위한 신호를 처리하는 과정에서 장치 내부의 신호처리보드와 센서보드에서 약 0.5W의 열이 발생한다.

따라서 상온 (25℃)상태인 장치에 외부로부터 70℃의 열과 내부 자체 발열 원을 2시간 동안 가하여 내부로의 열 전달 정도를 측정하여 Figure 1과 같이 주요한 부품인 센서보드와 신호처리 보드의 오작동 여부를 판단하게 된다.

## 3. 문제의 구성

열전달 프로세스는 적당한 율방정식(rate equation)으로 정량화 하는 것이 가능하며, 온도분포  $T(x)$ 를 가지는 1차원 평면 벽에 대한 율방정식은 다음과 같다.

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

열 유속(heat flux)  $q''_x (W/m^2)$ 는 전달 방향에 수직인 단위 면적당 열전달 율이며, 이 방향으로의 온도구배  $dT/dx$ 에 비례한다. 비례상수  $k$ 는 열전도율(thermal conductivity,  $W/m \cdot k$ )이라는 전도 물성치이며, 온도분포가 선형인 경우 온도 구배는 다음과 같다.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2)$$

Eq (2)에 의해 열 유속을 다시 쓰면

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (3)$$

이 방정식은 단위 면적(unit area)당의 열전달 율을 준다는 뜻이며, 면적  $A$ 인 평면 벽을 통한 전도에 의한 열전달 율  $q_x (W)$ 는 열 유속과 면적의 곱인  $q_x = q''_x \cdot A$ 이다. 대류열전달의 특별한 성질에 관계없이 적절한 대류열유속은 다음 형태로 표현된다.

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

여기서 대류열유속(heat flux)  $q'' (W/m^2)$ 은 표면 온도  $T_s$ 와 유체온도  $T_\infty$ 와의 차이에서 비례한다.

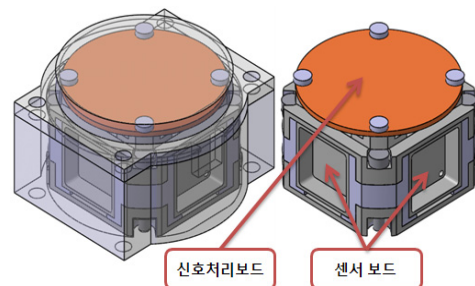


Figure 1. Whole model and signal processing board, sensor board

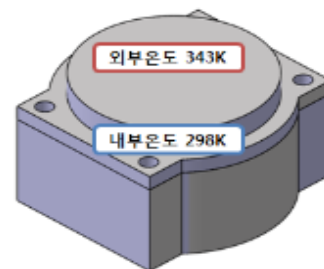


Figure 2. Temperature of inside and outside of whole system

이 식을 Newton의 냉각법칙(Newton's law of cooling)이라 하고 비례상수  $h(W/m^2 \cdot K)$ 는 대류 열전달 계수(convection heat transfer coefficient), 막 컨덕턴스(film conductance), 또는 막 계수(film coefficient)라 부르며 대류 열전달에 영향을 미치는 모든 파라미터들을 포괄한다. 특히 이것은 표면의 기하학적 형상, 유동의 성질 그리고 유체의 열역학적 물성치와 전달 물성치들의 변화에 영향을 받는 경계층에서의 조건들에 의존한다.

#### 4. 유한요소해석 Finite Element Analysis)

ABAQUS를 사용하여 유한요소(Mesh)를 생성하였다. Element Type은 DC3D4(4 node linear heat transfer tetrahedron)를 사용하였고, 전체 Element의 개수는 105,251개, Node의 개수는 43,471개이다.

각 부품에 대한 재질은 Table 2에서 나타낸 것과 같이 CPU와 ISC보드, 그리고 6개의 센서보드는 FR4, Bolt는 STS316이며, 나머지 부품들의 재질은 A7075-T6를 적용하였다. 전도에 의한 열전달을 고려하기 위하여 각 부품이 접촉하는 곳에 Contact 조건을 적용하였고, Contact Property option에 thermal Conductance를 부여하였다. 각 부품간의 접촉 시 간격의 차이에 따라 Thermal Conductance가 달라진다. 일반적으로 두 부품간의 간격이 좁을수록 열전도도는 높아지는데, 본 해석에서는 Table 1과 같이 두 부품간의 거리가 0mm일 때  $100,000 W/m^2 \cdot K$ 을, 1mm 일 때  $100 W/m^2 \cdot K$ 을 적용하였다.

Table 1. Thermal Conductance

Conductivity( $W/m^2 \cdot K$ )	Clearance(mm)
100,000	0
100	1

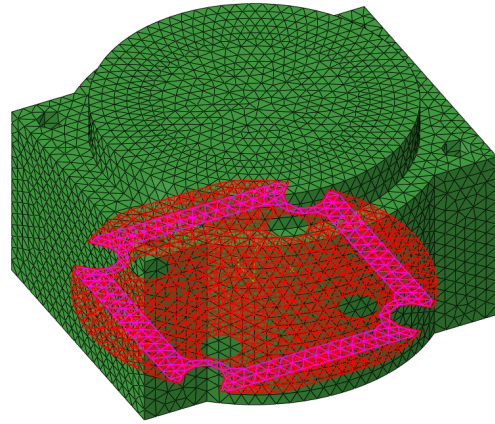


Figure 3. Thermal Conductance area

Table 2. Material property

	Conductivity ( $W/m^2 \cdot K$ )	Density ( $m^3$ )	Specific Heat ( $kJ/kg \cdot K$ )
A7075-T6	130	2810	960
STS316	16.3	7800	500
FR4	0.35	1100	1300

또한 본 논문에서는 응력이나 변위가 아닌 Transient state(과도상태)에서 열전달에 대한 문제만을 다루기 때문에 각 재질에 대한 물성치는 열전달에 관련된 물성치인 Thermal Conductivity(열전도도)와 Specific Heat(비열) Density(밀도)를 적용하였다.

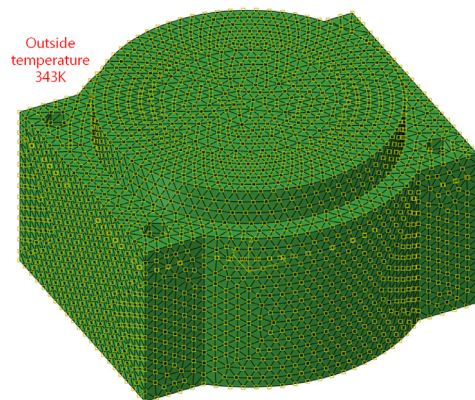


Figure 4. Apply Outside temperature

경계조건(Boundary Condition)은 외부 온도가 70℃이기 때문에 절대온도 단위(Kelvin)로 환산한 값인 343K를 상·하부 Housing의 외부에 적용하였다. 나머지 각 부품의 초기온도는 상온(298K)으로 적용하였고,

ABAQUS에서는 두 매질이 접촉해 있을 경우 에너지 차단 막 역할을 하는 Surface film condition을 적용하게 되는데 이 값은 고체, 액체, 기체와 같이 액상에 따라 달라진다. 여기에서는 고체와 기체간의 열전달을 고려하였다. Figure 5와 같이 케이스의 외부와 외부 공기, 그리고 Fig 6과 같이 케이스의 내부 각부와 내부 공기를 고체와 기체간의 조건 설정 값인 Film coefficient  $28 W/m^2 \cdot K$ 로 설정하였다.

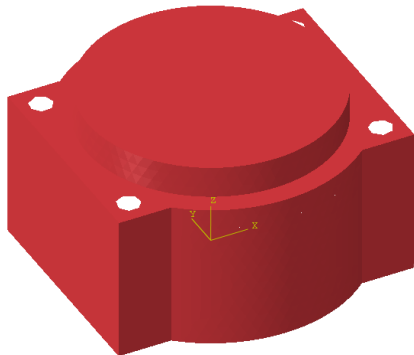


Figure 5. film coefficient of outside area

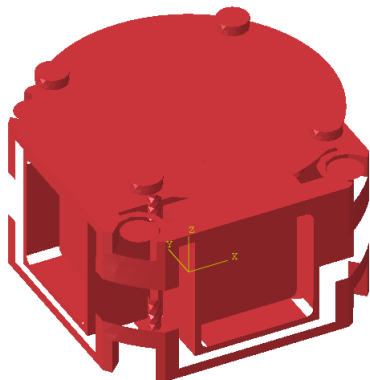


Figure 6. film coefficient of inside area

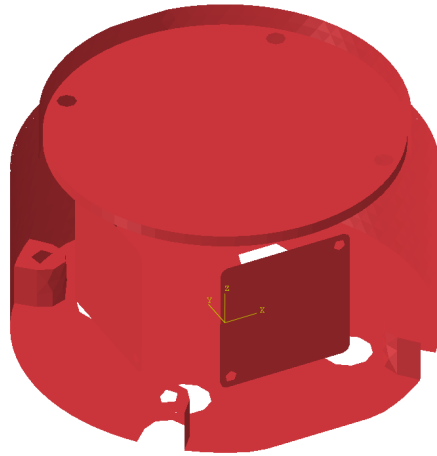


Figure 7. radiation area

또한 복사열에 의한 열전달도 고려하였다. 복사는 외부 열에 의해 외부 케이스가 가열되면서 복사열을 발생하는 것과 내부 센서에서 발열에 의해 복사하는 것을 고려하여 Figure 7과 같이 복사 영역을 지정하였다. Stefan-Boltzmann 상수는  $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ , 그리고 방사율은 0.7로 적용하였다.

## 5. 유한요소 해석 결과 (Finite Element Analysis Result)

해석 결과, 외부의 온도가 내부의 온도보다 높기 때문에 Figure 8과 같이 외부로부터 열이 시간이 지남에 따라 내부의 신호처리보드와 센서보드를 포함한 여러 부품에 전달되었다.

신호처리보드에서 초기 상태부터 약 140초까지 온도가 급격히 증가하다가 그 뒤부터 시간에 따른 온도 변화율은 낮아지기 시작하여 약 700초 이후부터 343K로 열평형 상태에 도달하였다.

신호 처리 보드는 4개의 볼트가 체결되어 있는데 이 볼트로부터 열이 전달되어 Figure 9와 같이 평형상태에 도달하게 된다.

### 6. 결론

이 관성 측정 장치를 포함한 포탄은 일회성인 소모품이기 때문에 열 적 피로에 의한 오작동을 고려하지 않아도 된다. 하지만 신호처리보드나 센서보드는 상당히 민감한 부품들이기 때문에 목표물에 정확히 도달하기 위해서는 내부의 장치에 대한 열전달이 가능한 최소화 되어야 한다.

엔트로피 증가의 법칙에 따라 열은 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 전달되게 된다. 외부 온도 343K가 내부의 온도인 298K보다 45K 정도로 높기 때문에 시간이 지나면서 외부에서 내부로 열이 전달되는 것을 확인할 수 있다. 700초 이후부터 열평형에 도달해 장치 전체의 온도가 343K로 CPU의 한계온도는 약 70℃이기 때문에 신호처리 보드에 오작동을 일으킬 수 있는 온도이다. 하지만 60초가 지났을 때의 신호처리 보드의 온도는 약 315K(42℃) 이다. 실제로 포의 비행시간은 목표물에 도달하기까지 1분도 채 되지 않기 때문에 약 60초까지의 시간대에서 결과를 보는 것이 타당하고, 이때 열전달에 의해서 신호 처리 보드에서 오작동을 일으키지는 않을 것으로 판단된다.

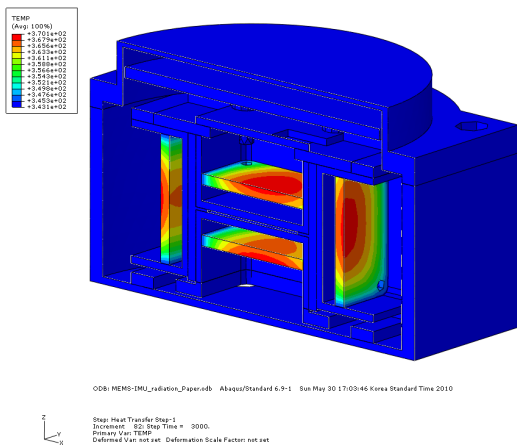


Figure 8. Temperature distribution at 3000s

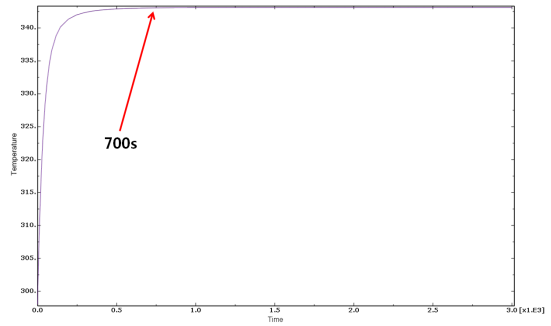


Figure 9. Signal processing board temperature

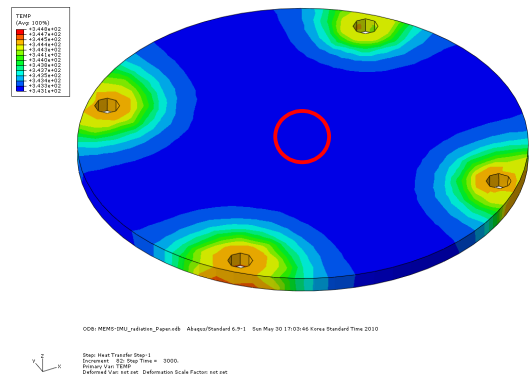


Figure 10. Signal processing board temperature

단순히 열전달에 관한 결과만을 검토한다면 이 관성측정장치에 사용되는 재료를 열전도도가 가능한 낮은 재료로 사용하여 내부로의 열 전달을 최소화 하는 것이 이 장치에 대한 안전성을 높이는 데 중요한 변수가 될 수 있다.

### 후기

본 연구는 2단계 지역대학 육성사업(BK21)의 지원에 의해서 연구 되었다.

### 참고 문헌

- [1] Incropera, Frank., DeWitt, Dave., "Introduction to Heat Transfer," Vol.5, pp. 106~168, 2007
- [2] Peterson, G. P., and L. S. Fletcher,. "Thermal Contact Resistance of Silicon Chip Bonding Material," Proceeding of the International Symposium on Cooling Technology for Electronic Equipment, Honolulu, pp. 438~448.
- [3] Cahill, D, G., W. K. Ford, K. E. Goodson, G. D. Mahan, A. Majumdar, H. J. Maris, R. Merlin, and S. R. Phillpot, App. Phys >Rev., 93, 793, 2003.
- [4] 김양술, 안수철, "브레이크 드럼의 형상에 따른 과도 열전달 해석", 한국 정밀공학회지, 제 25권, 제 8호, 2008, vol. 25, No. 8, pp. 65-71.