

## 技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.1.61>

## 항공기용 블랙박스의 자료보호모듈 극한환경해석 및 시험에 관한 연구

이석규\*, 이병호\*\*, 최지호\*\*

## The Study of analysis and test for crash survival about the Crash Protected Module in Black Box used at aircraft

Sock-Kyu Lee\*, Byoung-Ho Lee\*\* and Ji-Ho Choi\*\*

## ABSTRACT

The purpose of Crash Protected Module in Black Box used at aircraft is to protect a stored information(Flight data & Cockpit Voice) safely even after extreme environment like a plane crash. This study shows the structure & thermal analyses and the comparisons of predictions and results of tests about CPM for Crash Survival through extreme environment such as Penetration Resistance, High Temperature Fire, Low Temperature Fire. Specially, the Effect of housing thickness change was studied through the Penetration Resistance analysis using LS-DYNA, and the influence of volume ratio change between phase change material and thermal insulation material was studied through the High Temperature & Low Temperature analysis using Icepak. Also, structural and thermal reliability of CPM was validated through the tests.

## 초 록

항공기용 블랙박스의 자료보호모듈(CPM)은 항공사고와 같은 극한 환경후에도 저장된 정보(비행데이터 및 조종석음성)를 안전하게 보호하는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서는 CPM에 대하여 관통저항력과 고온 및 저온내화의 극한환경시험에 대한 구조 및 방열측면의 해석 및 시험을 통한 검증에 대하여 기술하였다. 특히 관통저항력해석에서는 하우징의 두께에 따른 영향성을 LS-DYNA를 이용하여 검토하였으며, 고온 및 저온내화해석에서는 상변화물질과 단열재의 체적비에 따른 영향성을 Icepak을 이용하여 수행하였다. 또한 실험을 통하여 CPM의 구조 및 열적 신뢰성을 검증하였다.

**Key Words** : Crash Protected Module(자료보호모듈), Test for Crash Survival(극한환경시험), Black Box(블랙박스)

## 1. 서 론

항공기용 블랙박스는 항공기의 속도, 고도, 방법 및 엔진 특성과 같은 비행 데이터 및 조종사

의 음성신호를 기록하여 항공사고 발생시에는 사고 순간의 정보를 제공하며, 정상 운영 시에는 기록된 정보를 통하여 항공기의 비행특성 및 조종사의 조종 패턴 등을 분석하여 항공사고 예방 및 항공안전의 측면에서 활용되어지는 항공전자 장비이다.

블랙박스는 미국 및 유럽의 항공선진국에서는 일찍부터 그 소요기술을 확보하여 블랙박스에 대한 체계적인 규격을 정립하였으며, 다양한 종류

† 2011년 11월 21일 접수 ~ 2011년 12월 23일 심사완료

\* 정회원, LIG넥스원(주)

교신저자, E-mail : sockkyu.lee@lignex1.com  
경기도 성남시 분당구 판교로 333

\*\* 정회원, LIG넥스원(주)

의 블랙박스를 생산중에 있다.

국내의 개발현황은 LIG넥스원에서 2006년에 건교부 국책과제 “소형 항공기용 블랙박스개발”에서 처음 개발하여, 2009년에 KUH헬기에 탑재하였으며, 이후 2010년에 지경부 국책과제 “항공용 통합형 기록장치개발”에서 더욱 소형화된 블랙박스를 개발하여 2012년에 중고도무인항공기에 탑재 예정이다.

본 연구에서는 지경부 국책과제인 “항공용 통합형 기록장치 개발”에서 수행된, 자료보호모듈(CPM, Crash Protected Module)의 개발과정에서 고려한 관동저항력시험과 고온 및 저온내화시험과 같은 극한환경시험에 대한 모델링, 해석과 실험등을 기술하였다. 특히 CPM하우징의 두께에 따른 관동저항력시험에 대한 영향성과 단열제와 상변화물질의 체적비에 따른 고온 및 저온내화시험에 대한 열적특성을 분석하고 시험을 통해 검증한 내용에 대해서도 기술하였다.

## II. 본 론

### 2.1 CPM 및 극한환경시험개요

#### 2.1.1 CPM의 구조

“항공용 통합형 기록장치개발”에서 개발된 일반형 블랙박스(기록장치)는 그림 1과 같으며, 비행데이터 및 조종석 음성데이터를 극한환경에서 보호해주는 CPM 과 항공기에서 들어오는 신호를 CPM에 기록하도록 제어하는 Control Unit 으로 구성된다.

극한환경시험 대상품인 CPM은 그림 2와 같으며, 비행 Data 및 음성기록이 저장되는 Memory board와 Memory board를 외부의 물리적 외란으로부터 보호하기 위한 Housing, Thermal insulation, Phase change material 등으로 구성된다. Beacon은 해상에서 사고 시 수중에 있는 CPM을 찾을 수 있도록 음향신호를 발생하는 장치이다.

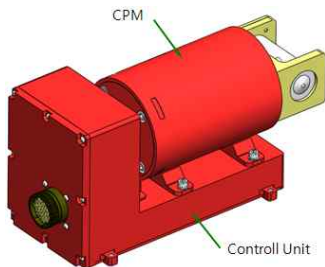


Fig. 1. Black Box

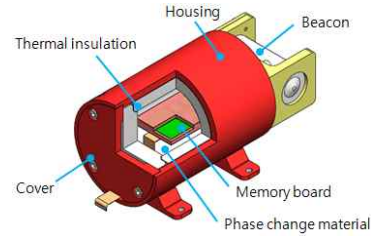


Fig. 2. CPM

Table 1. Tests for Crash Survival

Test Method	Requirement
Impact Shock	Half Sine 3400g, Duration 6.5ms
Penetration Resistance	Pin(Φ6.4mm, 40mm) Weight 227kg, 3m 높이에서 낙하
Static Crash	22.25 kN 을 5분간 가함
High Temperature Fire	1100℃ 온도로 1시간 노출
Low Temperature Fire	260℃ 온도로 10시간 노출
Deep Sea Pressure	60MPa 압력을 30일간 가함
Fuuld Immersion	연료, 윤활유, 유압유류 48시간 소화액류 8시간 침수

Table 2. Test Sequences for Crash Survival

CPM	Test sequence
#1	Impact shock⇒penetration resistance⇒static crush⇒high temperature fire⇒fluid immersion
#2	Impact shock⇒penetration resistance⇒static crush⇒low temperature fire⇒fluid immersion
#3	Impact shock⇒penetration resistance⇒static crush⇒deep sea pressure⇒sea water immersion

#### 2.1.2 극한환경시험 개요

항공기 추락으로 인해 CPM에 부과되는 극한환경시험들(Tests for Crash Survival)은 ED-112<sup>[1]</sup>에 규정되어 있고, 표 1의 7가지 시험으로 구성되며, 표 2의 시험순서에 따라 3개의 CPM으로 각각 수행되어야 한다.

#### 2.1.3 극한환경해석 개요

극한환경시험은 항공기 추락사고의 패턴을 고려하여 수립되었고, CPM은 여러 가지 상황을 모두 고려하여 설계되어야 한다. 각 상황에서 Modeling & Simulation의 방법을 활용하여 설계가 진행되었다. 극한충격의 경우 “소형항공기용 블랙박스”에서 이석규<sup>[2]</sup>의 연구결과로 Insulation 부분의 설계개선이 반영되었고, 극한관동저항력의 경우 “소형항공기용 블랙박스”에서 이석규<sup>[3]</sup>의 연구결과로 비선형 충돌 및 대변형해석의 정확한 해석결과를 위한 모래 물성치 연구가 진행되었다.

극한고온내화와 극한저온내화의 경우 “통합형 기록장치 대용량 블랙박스”에서 박석환<sup>[4]</sup>의 연구

로 상변화 물질과 단열재의 체적비 최적화가 진행되었다. 압박의 경우는 Ansys 비선형 해석을 통해 점접촉 및 선접촉에서는 소성변형이 있으나, 면접촉이 되면서 응력분산효과로 안정화됨을 알 수 있었고, 심해압 및 유체시험은 해석적 방법보다 실험적 방법으로 설계방향을 설정하였다.

본 연구에서는 더욱 소형화된 "통합형 기록장치 일반형 블랙박스"의 설계 최적화를 위해 가장 민감도가 높은 관통저항력과 고온 및 저온 내화 해석을 수행하였다.

## 2.2 관통저항력시험 및 해석

### 2.2.1 관통저항력시험조건

ED-112에 규정되어 있는 관통저항력시험은 그림 3과 같이 3m 높이에서 핀(직경6.35mm, 길이 40mm)이 장착된 227kg의 부하(Weight)를 CPM의 가장 취약한 부위로 낙하시켜 관통 저항력을 검증하는 시험이다.

CPM은 모래 위 6.35mm두께와 0.06m<sup>2</sup>의 넓이의 철판(Steel Plate)위에 놓이며, 0.5m의 깊이를 갖는 모래 중앙에 위치한다. 모래는 표 3의 입도 분포규격을 만족하며, 모래 15L당 물 1L의 비율로 수분을 유지해야한다.

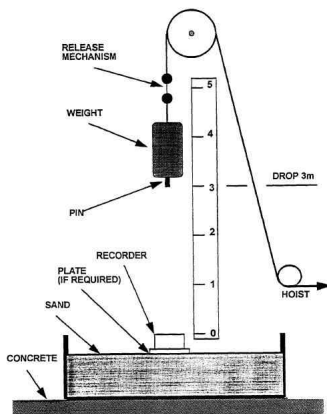


Fig. 3. Penetration apparatus

Table 3. Sand fineness specification

% by Mass	Particle size(Micrometers)
1 Max	Greater than 710
2 ~ 4	500 ~ 710
10 ~ 14	355 ~ 500
25 ~ 35	250 ~ 355
25 ~ 35	180 ~ 250
15 ~ 23	125 ~ 180
4 ~ 7	90 ~ 125
2 Max	Less than 90

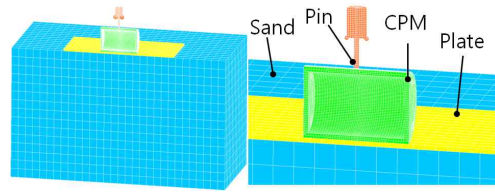


Fig. 4. Finite Element Model

Table 4. Properties for housing and plate

Property	housing	Plate
Young's modulus(GPa)	110	200
Poisson's Ratio	0.3	0.3
Yield strength(MPa)	900	270

### 2.2.2 관통저항력해석

관통저항력해석은 비선형 충돌 및 대변형 해석이므로 LS-DYNA<sup>[5]</sup>를 이용하여 수행하였다.

유한요소해석모델은 그림 4와 같이 대칭모델로 구성하였고, 이석규<sup>[3]</sup>의 연구를 통해 얻은 모래 물성치를 적용하였으며, Pin은 최악조건을 고려해 Rigid 요소를 적용하였다. 부하(Weight)는 점질량 요소로 분포시켰다. CPM의 크기는 직경 95mm, 높이 148mm, 두께 6.5mm이다.

해석에 적용된 철판(Steel Plate)과 CPM하우징의 물성치는 표 4에 나타내었다. CPM하우징은 티타늄(Ti-6Al-4V)의 물성치를 참고하였다.

경계조건은 모래의 최외곽 부위는 모든 자유도를 구속하였으며 대칭부위는 단면의 수직방향 변위만 구속하였다. 그리고 모든 요소에 중력가속도 9.8m/s<sup>2</sup>를 적용하였으며, 부하(Weight)의 초기속도는 3m 높이에서의 자유낙하를 고려하여 7.7m/s를 적용하였다.

### 2.2.3 하우징두께 영향

중량 감소와 소형화의 설계과정에서 CPM의 최적 두께를 얻기 위해, 0.5mm 간격으로 변화시키며 LS-DYNA로 해석을 수행하였고, 그 결과는 그림 5 와 그림 6에 나타내었다.

LS-DYNA에서는 포탄에 의한 외벽의 관통되는 효과를 구현하기 위해서 eroding 접촉조건을 많이 적용하고 있으나, 실제와 가깝게 구현하기 위해서는 굉장히 많은 element가 필요하고, 해석시간이 기하급수적으로 증가하므로, 본 연구에서는 해석시간과 해석모델 구축에 이점이 있는 Automatic surface to surface 접촉조건으로 해석을 진행하였다. 단, surface to surface 접촉조건은 파단강도 이상에서도 파단 없이 해석이 진행

되기 때문에, 각 조건에서의 소성변형을 크기 결과를 실제 그림 7의 티타늄의 응력변형을 곡선<sup>[7]</sup>과 비교하면서 설계치를 결정하여야 한다. 이에, 그림 7에 표현된 Plastic Strain 0.08에서 약간의 설계마진을 가진 조건으로, 두께 6.5mm를 설계에 적용하였다. 그림 6 에서 6.5mm에서의 핀에 의한 변형깊이는 약 1mm로 예상되었다.

두께 6.5mm CPM하우징에 대하여 핀에 의해 최대 변형깊이에 도달하는  $t=0.0037\text{sec}$ 의 해석결과를 그림 8에 나타내었다. 핀의 충돌부위에서

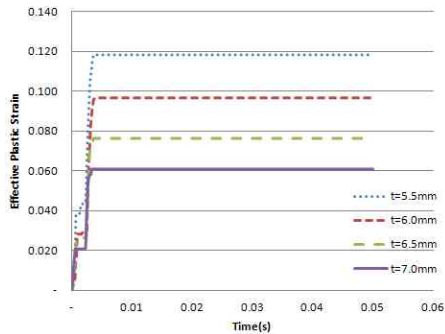


Fig. 5. Effective Plastic Strain 비교

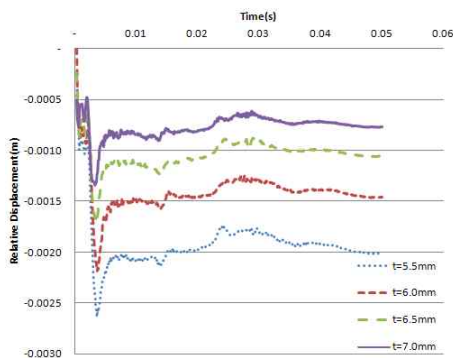


Fig. 6. 핀에 의한 변형깊이 비교

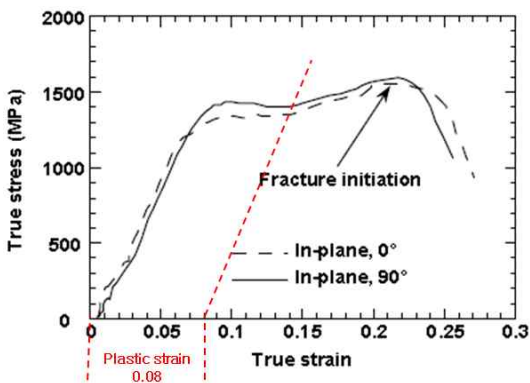


Fig. 7. Stress-strain curve of titanium

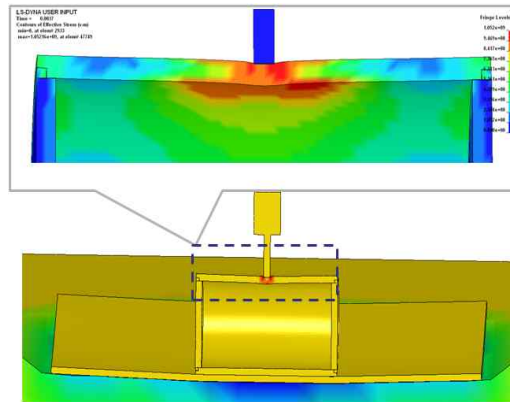


Fig. 8. Contours of effective strain and stress

최대응력집중이 발생하고 있다. 이때의 변형량은 약 1.0mm이며, 모래의 깊이는 약 157mm의 결과를 얻었다.

### 2.2.4 관통저항력시험

관통저항력시험은 항공우주연구원에 설치되어 있는 그림 9의 관통저항력 시험장치를 이용하여, CPM은 그림 10과 같이 수평 또는 수직으로 고정한 후 시험을 수행하였다.

두께 6.5mm인 CPM하우징의 시험결과는 그림



Fig. 9. Penetration test apparatus



Fig. 10. penetration test axis



Fig. 11. Penetration test results

11과 같으며 핀 접촉 부위가 일부 손상되었으나, CPM하우징 표면은 관통되지 않았다. 실제 시험 시에는 핀이 부러지면서 해석시의 거동과는 다르게 나타나지만, 최초 접촉후 짧은 시간동안은 해석과 유사하게 CPM하우징에 소성변형을 유발시킨다. 변형깊이는 약 0.7mm로 측정되었다. 모래의 깊이는 172mm의 결과를 얻었다.

### 2.3 고온&저온내화시험 및 해석

#### 2.3.1 고온&저온내화시험조건

##### 2.3.1.1 고온내화시험조건

ED-112 에 규정되어 있는 고온내화시험은 그림 12와 같은 시험장치에 CPM을 설치하고 158kW/m<sup>2</sup>의 열용량에 1시간 연속적으로 노출하며, 시험 중 CPM의 표면에서 25mm떨어진 곳의 측정온도는 공칭 1100℃(온도범위 950~1100℃)가 되어야 하며, 시험 후 장비는 공기 중에서 냉각한다.

##### 2.3.1.2 저온내화시험조건

ED-112 에 규정되어 있는 저온내화시험은 260℃조건으로 10시간 동안 노출하는 것으로 정의되어 있다. 실제 시험은 그림 13과 같이 오븐에서 수행하게 된다.

#### 2.3.2 고온&저온내화시험 열해석

고온 및 저온내화시험에서는, CPM내의 단열재와 상변화물질의 조합으로, 외부 열로부터 메

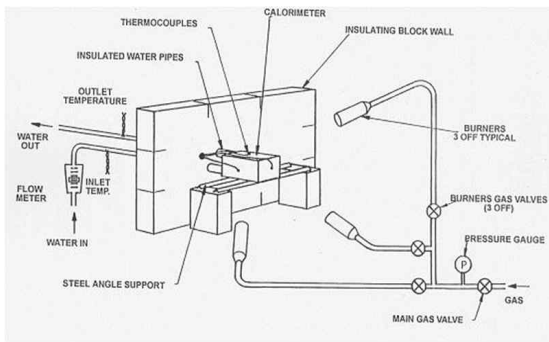


Fig. 12. High temperature fire test apparatus



Fig. 13. Low temperature fire test apparatus

모리보드를 보호한다. CPM의 열해석은 그림 14와 같이 외부에서는 복사 및 대류, 내부에서는 전도 및 상변화물질의 잠열로 모델링하여 해석을 진행하였다.

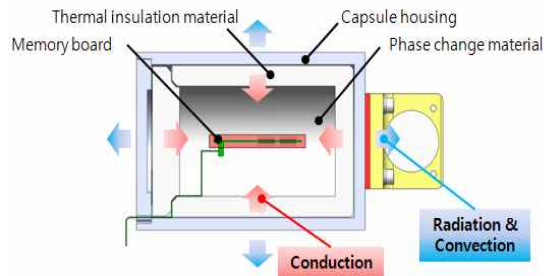


Fig. 14. Thermal modelling of CPM

해석 툴로써는 FLUENT Solver를 사용한 Icepak 12.0 S/W를 이용하여 수행하였다.

상변화물질의 열적특성은 Icepak 12.0에서는 직접 모사하기가 어렵기 때문에 “Lumped Slope Method”<sup>[6]</sup>의 개념을 도입하여 상변화물질의 열특성을 유한한 온도범위 내에서 잠열을 고려한 등가비열을 구하여 열해석을 수행하였으며, 등가비열은 식 (1)과 같이 같다.

$$C_{eq} = C + \frac{h}{\Delta T} \tag{1}$$

여기서

$C_{eq}$  : 등가비열[KJ/KgK],  $C$  : 비열[KJ/KgK]

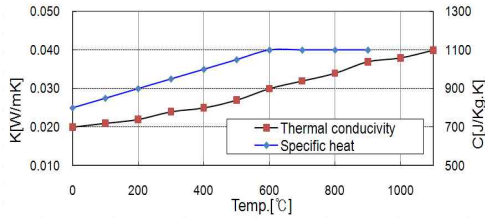
$h$  : 잠열[KJ/Kg],  $\Delta T$  :  $T_2 - T_1$

열해석에 사용된 상변화물질의 열적물성치는 표 5와 같고, 단열재 및 CPM하우징의 열적물성치는 그림 15와 같으며, 온도에 따른 변화값을 사용하였다.

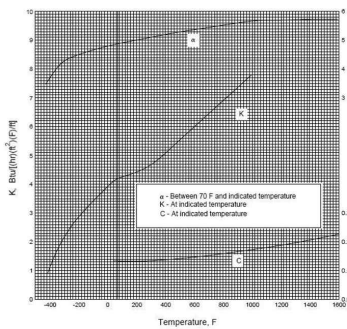


Table 5. Thermal properties for phase change material

Density( $\rho$ )	7903.0Kg/m <sup>3</sup>
Latent heat(h)	822.79KJ/Kg
Specific heat(C <sub>p</sub> )	1214.3 J/Kg-K
Heat conductivity(K)	1.6 W/mk



(a) Thermal insulation



(b) Capsule housing

Fig. 15. Thermal properties

2.3.3 상변화물질과 단열재의 체적비 영향

그림 16과 그림 17은 메모리보드를 제외한 하우징 내부체적에서 단열재의 체적비가 55%, 60%, 65%의 경우에 대하여 Fluent Solver를 이용하여 Icpak12.0으로 수행한 고온 및 저온내화 시험 해석결과이다.

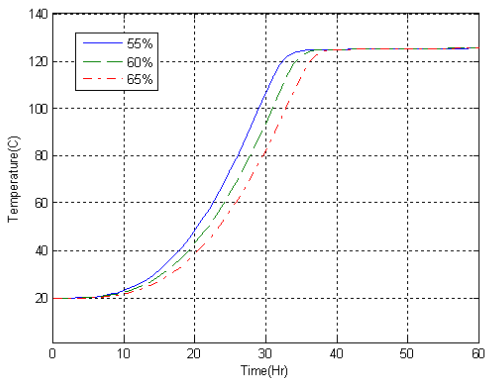


Fig. 16. High temp. fire simulation

그림 16의 고온해석결과와 단열재의 체적증가에 따라, 전도열 저항이 커지기 때문에 온도 증가율이 낮아지고, 상변화의 시작온도 120°C까지 도달하는데 오랜 시간이 소요됨을 보여준다. 그림 17의 저온해석결과와 단열재의 체적비가 너무 작을 경우 10시간이 경과하기 전에 상변화물질의 상변화가 모두 이루어져 온도가 급격하게 증가함을 보여주고 있다. 약 60%의 단열재의 체적비가 바람직함을 알 수 있다.

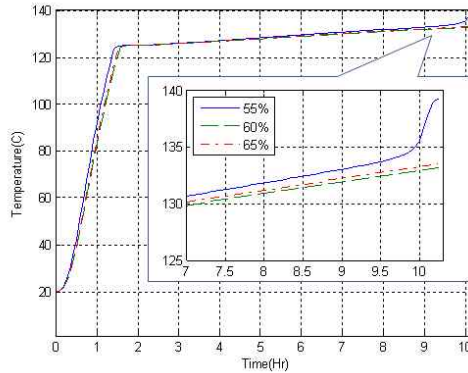


Fig. 17. Low temp. fire simulation

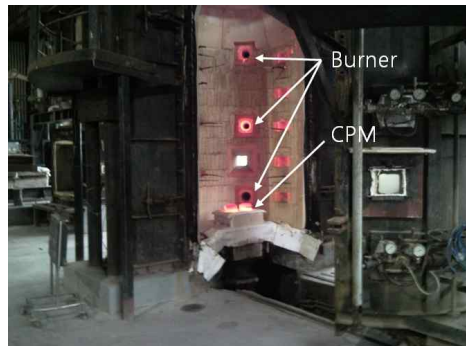


Fig. 18. High temperature fire test set-up



Fig. 19. High temperature fire test result

### 2.3.4 고온&저온내화시험

#### 2.3.4.1 고온내화시험

ED-112 규격의 그림 12와 같은 고온내화시험을 할 수 있는 시설이 없기 때문에, 유사한 형태의 시험을 수행할 수 있는 방제시험연구원에서 그림 18의 시험장비를 이용하여 1100℃, 1시간 기준을 적용한 고온시험을 실시하였다.

그림 19는 고온시험후 결과이며 메모리보드에 부착된 온도테이프의 온도는 128℃였다.

#### 2.3.4.2 저온내화시험

그림 20은 저온내화시험후의 결과이다. 저온내화시험의 경우는 메모리보드의 온도를 측정하기 위해 온도테이프와 온도센서(Thermocouple)를 동시에 이용하였고, 그림 21과 같이 메모리보드에 부착된 온도센서(Thermocouple)에서 10시간 후 약 135℃가 됨을 알 수 있었다.

## 2.4 해석 및 시험결과 비교

### 2.4.1 관통저항력해석 및 시험비교

관통저항력해석 및 시험결과를 표 6에 나타내었다. 오차발생의 원인으로서는 해석시 편을 Rigid로 보수적으로 해석하였고, 시험시 편이 부러짐으로 인한 비선형성으로 판단된다. 편이 부러짐으로 인한 거동은 재현성의 어려움등 거동을 예측하는데 많은 애로사항이 존재하여 본 연구에서는 고려하지 않았다.

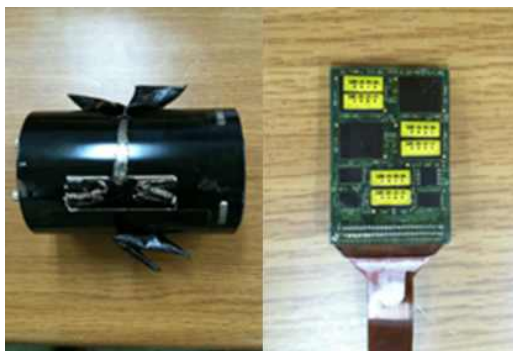


Fig. 20. Low temperature fire test result

Table 6. Comparison of analysis and test result

t=6.5mm	Simulation	Experiment
변형깊이	약 1.0 mm	약 0.7mm
모래깊이	157mm	172mm

### 2.4.2 고온&저온내화시험해석 및 시험비교

고온내화시험과 해석결과는 표 7과 같으며, 약 3℃의 차이를 보이고 있으며, 저온내화시험과 해석결과는 표 8과 같으며, 약 3℃의 온도 차이를 보였다. 그림 21은 저온내화성시험 해석과 실험값 비교 그래프를 나타내었다. 상변화물질의 열특성을 "Lumped Slope Method"의 개념을 도입하여 수행한 열해석 결과는 실험값과 유사함을 보여주고 있다.

Table 7. High temp. simulation and test result

	Simulation	Experiment
High Temperature	125℃	128℃

Table 8. Low temp. simulation and test result

	Simulation	Experiment
Low Temperature	132℃	135℃

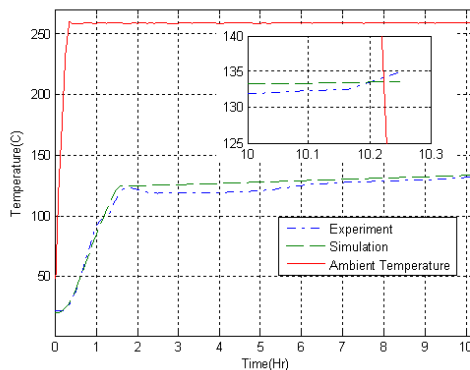


Fig. 21. Low temp. simulation & test result graph

## III. 결 론

본 연구에서는 통합형 기록장치 일반형 블랙박스의 CPM 설계에 대하여 관통, 저온 및 고온내화 극한시험을 만족하기 위한 모델링, 해석, 실험을 수행하였으며, CPM하우징의 두께에 따른 관통저항력에 대한 영향성과 상변화물질과 단열재의 체적비에 따른 고온 및 저온내화시험에 대한 열적특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 관통저항력시험에 대한 해석을 기술하였고, 관통규격을 만족하는 최소 두께를 LS-DYNA를 이용한 시뮬레이션을 통하여 구하였고, 실제 관통시험을 통하여 해석결과를 검증하였다.
- (2) CPM의 단열 특성은 고온내화시험보다는

저온내화시험을 만족하기 어려움을 알 수 있으며, 단열재의 체적비에 따른 해석을 통하여 약 60%일 때 열적성능이 가장 우수함을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 국책과제로 진행된 “항공용 통합형 기록장치 개발”사업의 일환으로 수행된 연구결과입니다.

## 참고문헌

- 1) ED-112, Minimum Operational Performance Specification for Crach Protected Airborne Recorder Systems, March 2003
- 2) 이석규, “소형항공기용 블랙박스의 극한충격해석 및 실험”, 한국항공우주학회 춘계학술대회 논문집, pp. 176-180, 2006.
- 3) 이석규, “소형항공기용 블랙박스의 관통저항력 해석 및 실험”, 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집, pp. 463-366, 2005
- 4) 박석환, “상변화를 수반하는 항공용 블랙박스의 열특성에 관한 연구”, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 2659-2664, 2010.
- 5) LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL, April 2003, Version 970, Livermore Software Technology Corporation
- 6) Gauche Paul and Shidore Sarang, "Thermal performance comparison of a microprocessor using phase change materials in various configurations", vol. 4339, pp. 375-380, 2000.
- 7) Donald R. Lesuer, Experimental Investigations of Material Models for Ti-6Al-4V Titanium and 2024-T3 Aluminum, DOT/FAA/AR-00/25, Final Report, Federal Aviation Administration, 2000.