

## 미사일 외면의 열 방호 단열재 연구

박병열\* · 류문삼\*

### A Study on the External Insulation of Missile Surface

Byeong-Yeol Park\* · Moon-Sam Ryoo\*

#### ABSTRACT

This paper presents the IR-Lamp test results of evaluating heat protection performance and measuring of mechanical/thermal properties in the heat protection material of missile external surface. The results showed that increasing the contents of microballoons improved the heat protection performance, but the mechanical properties were deteriorated. Among the kinds of microballoons, Epoxy/Phenolic Microballoons mixture showed the best mechanical properties and low thermal conductivity. Epoxy/Cork mixture showed the best heat protection in the IR-Lamp test, though it has low mechanical properties and high thermal conductivity.

#### 초 록

본 연구에서는 미사일의 외면에 단열재의 재료로 사용되는 재료들의 종류 및 배합비 별로 적외선 램프 시험 장비를 이용하여 단열 성능 평가와 기계적/열적 특성치를 측정하였다. 실험 결과 다공성 충전제 함유량이 증가할수록 단열성능은 증진되나 기계적 특성은 저하하였다. 다공성 충전제 종류 중에서 Epoxy/Phenolic Microballoon이 가장 우수한 기계적 특성과 낮은 열전도도 값을 보여 주었다. Epoxy/Cork 단열재는 낮은 기계적 특성치와 높은 열전도도 값을 보여주었으나, 적외선 램프 실험에서는 가장 우수한 단열 성능을 가졌다.

Key Words: Cork(코르크), Epoxy(에폭시 수지), Heat Flux(열유속), Insulation(단열재), IR-Lamp(적외선 램프), Microballoon(중공형 충전제)

#### 1. 서 론

미사일의 경량화에 따른 이점으로는 적은 연

료로 기동성 향상 및 장거리 이동 가능 등의 이점이 많다. 이에 따라, 금속 재료에 비해 비강도와 비강성이 우수한 탄소섬유/에폭시 복합재료가 미사일의 외면 구조재료로 많이 사용되고 있다. 탄소섬유/에폭시 복합재료의 가장 큰 단점 중의 하나는 분위기 온도가 에폭시의 유리 전이

† 2006년 6월 23일 접수 ~ 2006년 9월 10일 심사완료

\* 정회원, 국방과학연구소 기술연구본부 4부  
연락처, E-mail: pbych@hanmail.net

온도 도달 시점 이후 급격한 기계적 특성 저하가 생기는 현상이다.

초음속으로 고속 비행하는 미사일은 공력 가열에 의한 미사일 외면과 주위공기와의 마찰에 의해 표면 온도가 급격히 상승하면 미사일 외면에 구조체는 강도 저하로 예기치 않는 파손이 발생할 수 있다. 특히 탄소섬유/에폭시 복합재료는 온도 상승에 따른 특성 저하가 일반적으로 금속에 비해 크다. 아울러, 고온에서 견디는 에폭시 수지 및 다른 고온용 수지는 고가이며 제작 공정성이 떨어지며 인장 신율이 적어 충격에 취약한 특성을 가지고 있다. 따라서 탄소섬유/에폭시 복합재료의 우수한 비강도 및 비강성 특성을 활용하여 이를 미사일 외면으로 사용하게 되면 공력가열에 의한 미사일 외면의 온도 상승을 억제하고 열적 보호를 위하여 외면 단열재가 필요하게 된다.

일반적으로 외면 단열재에 부여된 임무는 고온의 환경에서 미사일 외면 구조체로의 열전달을 방지하는 것이며, 단열재 외면에 급격한 온도 상승에 의한 단열재 안팎의 온도 차이에 의한 열 충격을 견디어야 하며, 미사일을 진동과 외면 충격으로부터 보호하여야 한다. 공력 가열로부터 미사일 외면을 보호하기 위하여 도포되는 단열재는 미사일 노즐에 사용되는 내열재에 비해 낮은 열 환경이므로 낮은 온도 열삭마 재료(low temperature ablative materials, 이하 LTA)로 통칭된다[1, 2]. LTA는 일반적으로 열경화성 수지에 다공성 충전제를 함유한 물질이 많이 사용된다. LTA는 미사일 구조물을 높은 열 환경 조건에서 미사일 구조물의 온도 상승을 억제시킬 수 있어야 한다. LTA가 높은 열차폐 능력을 갖기 위해서는 외면 단열재의 초기 상태인 고체가 열을 받아서 숯으로 상변화되는데 있어서 높은 에너지가 필요하며 낮은 열전달 계수를 가지고 있어야 한다. LTA의 또 다른 바람직한 특성으로는 열에 의해 형성된 숯 층이 강해야 하는 점이다. 즉 숯 층과 숯 층이 되지 않은 층과의 높은 결합력을 가지고 있어서 미사일의 고속 비행 중 전단력에 의해서 숯 층이 없어지지 않고 그 형

태를 유지할 수 있어야 한다. 숯 층이 형성됨에 따라 숯 층 자체에 공기층을 많이 가지고 있으므로 낮은 열전달 계수를 갖는다[3].

많은 종류의 LTA는 상품화되어 이용 되고 있으나, 이러한 물질들이 각각의 사용 조건에 부합하는 최적의 조성들은 아니다. 따라서 본 연구에서는 체계 요구 조건을 만족하는 열 유속은  $10 \text{ W/cm}^2$ 에서 단열 성능을 가지는 최적 조성을 찾는 것을 그 목표로 한다. 외면 단열재에 사용되는 충전제들은 주로 낮은 비중과 열전달계수를 갖는 코르크와 내부에 공기층을 갖는 탁구공 형태인 microballoons이 있다. 따라서 이러한 충전제들을 함유한 수지 혼합물은 내부에 공기층을 많이 가지고 있어야 한다. Glass 또는 Phenolic microballoons의 경우 온도가 높아지면 Glass는 녹고, Phenolic 계열은 탄화되면서 열을 흡수하는 특성을 가지고 있다.

본 논문에서는 고정된 열 유속 조건에서 기계적 특성이 우수하면서 단열성능이 뛰어난 외면 단열재 조성의 개발을 위한 기초 연구로서 충전제들의 종류와 배합비 별로 기계적, 열적 특성 시험 및 적외선 램프 실험을 통해 그 특성을 파악 하고자 한다.

## 2. 실 험

본 연구에서 사용된 조성의 모재는 접착제로 사용되는 에폭시 수지(3M, 2216-translucent)이다. 모재에 첨가되는 충전제들에 부여된 임무는 낮은 열전달 계수와 비중이다. 이에 부합되는 충전제는 코르크(size: 40/80 ground) 및 내부에 공기층을 갖는 탁구공 형태인 Glass Microballoon(Emerson & Cuming, Eccospheres Si, 이하 GI-Mi)과 Phenolic Microballoon(Bakelite, BJO-0930, 이하 Ph-Mi)이다. 외면 단열재의 인장강도와 파괴 신율을 측정하기 위해서 배합비에 따라 혼합된 혼합물을 Fig. 1과 같은 ISO-1926에 부합되는 형상을 테프론이 코팅된 금속 금형 내에서 제작 하였다.

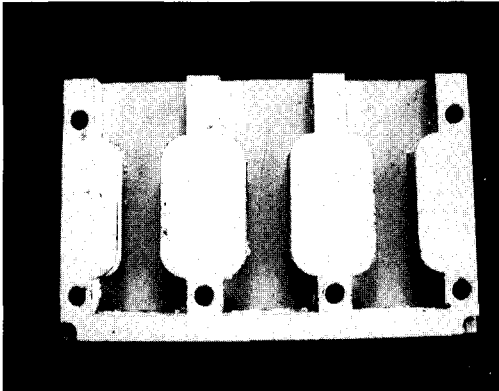


Fig. 1 Mold for Tensile Test's Specimens of External Insulation

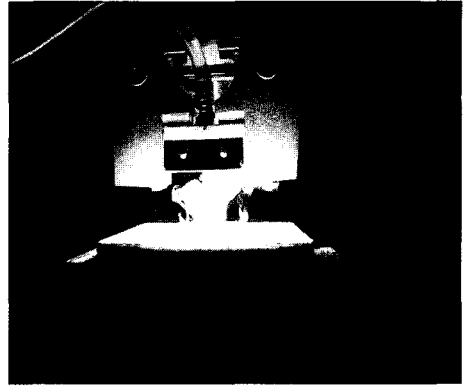


Fig. 4 IR-Lamp Test

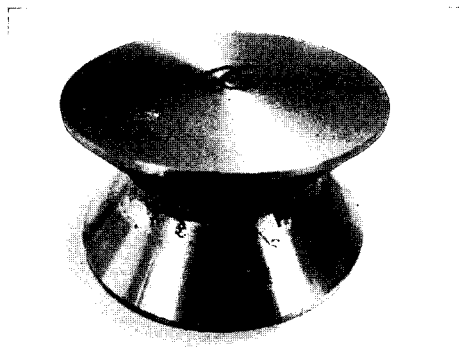


Fig. 2 Specimen for Circle Tensile Adhesion Test

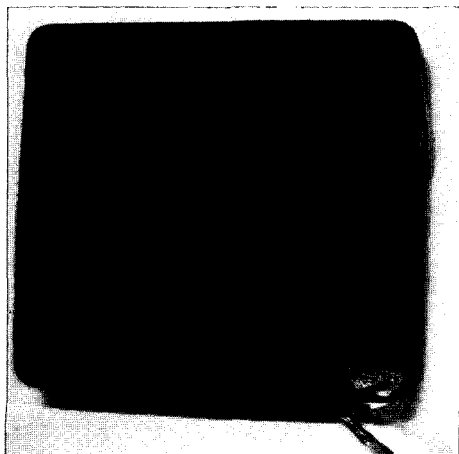


Fig. 3 Specimen for IR-Lamp Test

열전달 계수를 측정하기 위해서 가로x세로x두께 (140x70x3mm)의 직사각형 형태인 시편을 ASTM-M-D2326에 근거한 열선법을 이용하여 측정하였다. 외면 단열재와 탄소섬유/에폭시 사이에 접착력을 측정하기 위해서 원형인장 시험을 실시하였다. Fig. 2와 같은 형태의 금속에 외면 단열재와 접착되는 부분만 탄소섬유/에폭시 재료를 오토 크레이브 공법으로 성형하여 접착하였다. 따라서 탄소섬유/에폭시와 단열재 사이에 원형 인장 접착력을 시험 할 수 있었다. 단열재의 실제 사용조건에 가장 부합하는 내열성을 평가하기 위하여 적외선 램프(IR-Lamp)를 이용한 시험을 수행하였다. 시편은 Fig. 3과 같이 크기가 가로x세로x두께(50x50x2mm)의 정사각형의 강제 시편 표면 중앙부에 열전대 두께 만큼 홈을 파고 열전대를 점 용접(spot welding)을 하여 강재에 고정하였다. 강제 시편을 금형에 설치하여 강제 시편의 열전대가 있는 표면 위로 단열재를 균일한 두께 2.0mm로 제작하였다. 복사 열전달을 응용한 적외선 램프 실험에서 표면 방사율은 중요한 변수이며, 복사 열량을 측정하기 위한 열 유속 센서 감지부의 색깔도 방사율이 1인 흑색으로 도포되어 있다. 따라서 모든 시편 표면은 흑색 무광 내열 불소 수지 코팅제를 얇게 도포하였다.

적외선 램프 시험 장치에서 램프와 시편사이의 거리와 램프 세기를 조정하면서 원하는 열 유속을 사전에 조정 하였다. 열 유속을 측정할

수 있는 열 유속 감지기(제조사: Medyherm)을 가지고 제조사에서 제공한 열 유속 vs. millivolts 차트를 참고하여 원하는 열 유속 10 W/cm<sup>2</sup>를 확인하였다. Fig. 4에 제시된 적외선 램프 실험에서는 단열재 안쪽에 삽입된 열전대의 온도가 상온에서 300°C까지 도달하는데 걸리는 시간으로 단열성능을 평가하였다.

### 3. 결 과

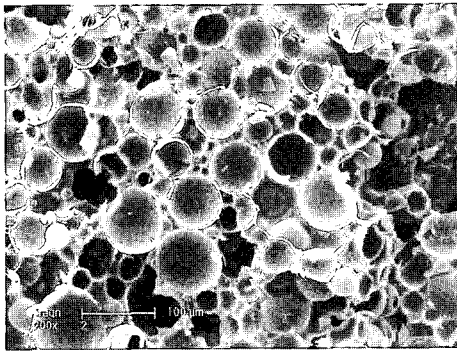
Figure 5 에서와 같이 Ph-Mi와 Gl-Mi는 충전제가 탁구공 형상이며, 코르크가 충전된 것은 하니컴 형상이다. Table 1에서 알 수 있듯이 에폭시 수지에 충전제의 첨가량이 증가함에 따라 비중은 작아진다. 같은 무게 비율이 첨가되더라도 충전제의 종류에 따라 최종 비중은 달라진다. 동일한 무게비 30%가 첨가한 필러들이 첨가된 혼합물에서 코르크계 보다는 Gl-Mi계와 Ph-Mi계가 작은 비중을 갖는다. 자체 형태의 유사함으로 인하여 Gl-Mi계와 Ph-Mi계는 비슷한 비중 결과를 보여주고 있다. 충전제의 첨가량이 증가함에 따라 열전도의 값은 비중 값과 비례 관계를 보여주고 있다. 충전제의 첨가량이 30%에서 비중값이 가장 큰 코르크계가 열전도도 값도 최대치를 보여주고 있다. 이것은 충전제 첨가에 따른 비중이 감소한다는 뜻으로서 혼합물 내에 공기층이 많이 들어감을 의미하므로 비중 값의 증가는 곧 열전도도 값의 증가를 척도로 생각할 수 있다. 또한 동일한 무게비 30%로 첨가된 충전제들이 첨가된 혼합물의 기계적 특성 변화를 관찰하였다. 기계적 강도는 Ph-Mi계가 가장 큰 값인 52.5 kg/cm<sup>2</sup>를 가지고 있으며, 코르크계가 가장 작은 값인 21.7kg/cm<sup>2</sup>을 나타내었다. 충전제 형태가 유사한 Gl-Mi계는 Ph-Mi계 보다 약간 작은 45.8kg/cm<sup>2</sup> 값을 보여 주었다. 코르크계가 자체 강도가 3가지 충전제 중에서 가장 작은 값을 갖는 것은 코르크 자체의 낮은 기계적 특성 때문에 이는 이미 예상된 결과이다. 기계적 인장 신율은 Ph-Mi계는 가장 큰 값인 31.6%를 가지고

Table 1. Mechanical, Thermal Properties and IR-Lamp for the Formulation of External Insulation

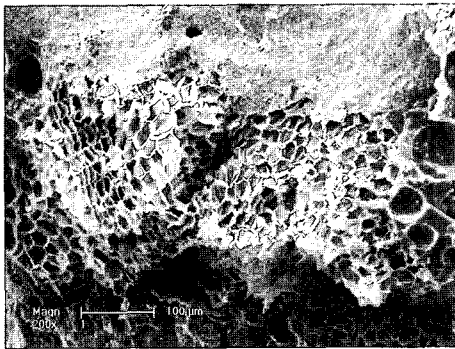
배합비 (wt %)				특성치				
Epoxy	Cork	Gl-Mi	Ph-Mi	비중 g/cm <sup>3</sup>	열 전도도 W/m <sup>2</sup> C	인장 강도 kg/cm <sup>2</sup>	인장 신율 %	IR Lamp* sec
100				1.21	0.220	24.7	54.9	135.5
70	30			0.80	0.176	21.7	10.4	185.0
70		30		0.54	0.126	45.8	3.01	165.0
70			30	0.52	0.110	52.5	31.6	172.0
70	15	15		0.63	0.110	36.0	4.3	175.2
83	9	8		0.56	0.122	76.4	8.3	163.2

\* 상온에서 300°C 도달시간

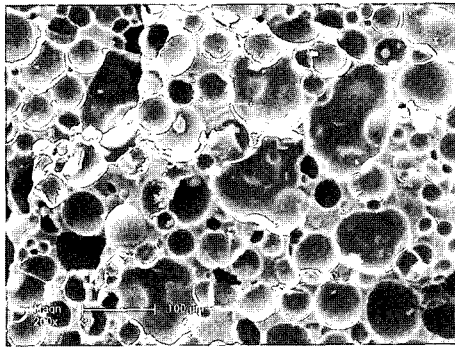
있으며, 코르크계는 중간 값인 10.4%이고, Gl-Mi계가 가장 작은 값인 3.1% 값을 보여 주었다. 이러한 경우는 Fig. 5에서 충전제 표면에 에폭시가 묻어 있는 것으로 부터 에폭시와 접착력이 Ph-Mi이 Gl-Mi보다 좋기 때문이라고 판단된다. 코르크(15%)+Gl-Mi(15%)계는 기계적 강도와 인장신율이 코르크(30%)계와 Gl-Mi(30%)계의 중간 값을 나타내었다. 적외선 램프 시험 방법은 실제 미사일의 고속 비행에 의한 공력가열을 가장 유사하게 모사할 수 있는 시험 방법이다. 본 연구에서 실험한 조건에서는 상온에서 300°C 도달 시간이 길어질수록 단열재의 단열 성능이 우수한 것으로 판단하였다. 본 실험에서 채택한 열 유속 10.0 W/cm<sup>2</sup> 조건에서는 적외선 램프 시험에서 시편의 표면온도 측정 결과 500-600°C 범위 이었다. 적외선 램프 시험 후 외면 상태는 Fig. 6 에서 알 수 있는 것처럼 코르크계와 Ph-Mi계는 표면에서 숯 층이 발생하였다. 아울러, Gl-Mi계는 숯 층의 형성이 미약한 것으로 보인다. 수지만의 실험에서는 상온에서 300°C 도달시간이 135.5 sec 이었다. 동일한 무게비 30%를 첨가된 충전제들이 첨가된 혼합물 중에서 가장 긴 시간인 185.0 sec를 보인 것은 코르크(30%)계이다. 충전제 형태가 유사한 Gl-Mi(30%)계는 165.0 sec이며 Ph-Mi(30%) 계는 172.0 sec 이므로 Ph-Mi(30%)계가 Gl-Mi(30%)계 보다 약간 우수한 결과를 보여주고 있다. 코르크(15%)+Gl-Mi(15%)계는 Ph-Mi(30%)계와 Gl-Mi(30%)계 사이에 중간값을



(a) Epoxy/Ph-Mi(30%)



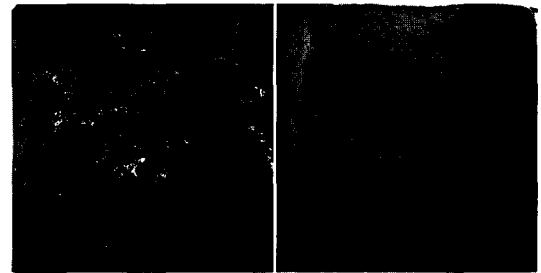
(b) Epoxy/Cork(30%)



(c) Epoxy/GI-Mi(30%)

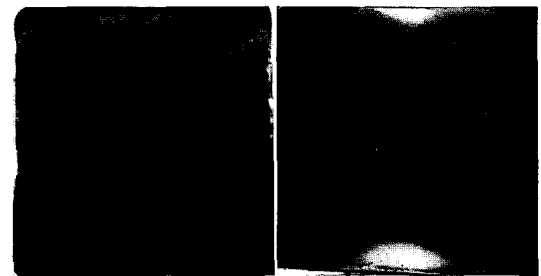
Fig. 5 SEM Photographs of Fracture Surface

보여주고 있다. 시험 후 3종류 충전제들의 30% 들어간 시편 상태를 전자 현미경으로 확인한 결과 Fig. 7에서와 같이 가장 긴 시간을 갖는 코르크계의 표면에 가장 많은 숯 층이 형성됨을 알 수 있었다. 이러한 경우는 3가지 충전제 중에 코르크가 가장 낮은 온도에서 숯 층이 형성된다는 결론으로 부터 이미 예측된 결과이다.



(a) Epoxy

(b) Epoxy/Ph-Mi(30%)



(c) Epoxy/Cork(30%)

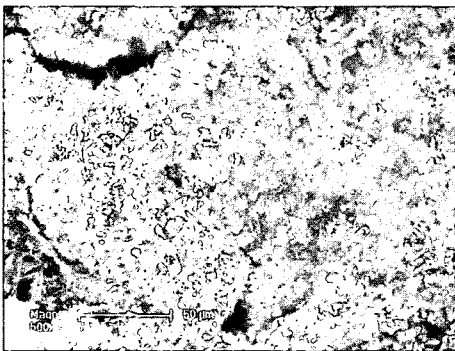
(d) Epoxy/GI-Mi(30%)

Fig. 6 Surface after IR-Lamp Test

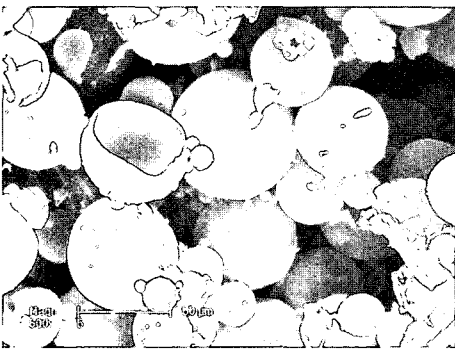
열전달계수 측정에서는 코르크계가 다른 2종류에 비해 큰 값을 보였으나 적외선 램프 실험에서는 가장 우수한 단열 성능을 보여주었다. 이러한 현상은 코르크계 자체는 높은 열전달계수를 가지고 있으나 적외선 램프 실험에서 새로운 숯 층이 많이 형성되었고 이것이 단열 성능을 항상 시켰기 때문으로 해석된다. 2 종류의 충전제를 함유한 코르크(9%)+GI-Mi(8%)계는 충전제 30%를 함유한 각각의 혼합물 중에서 가장 짧은 시간을 갖는 GI-Mi(30%)계 보다도 짧은 시간을 가졌다. 그 원인은 충전제의 절대량이 적기 때문이라고 판단된다. 코르크계 보다는 적지만 Ph-Mi계에서도 탁구공 형태의 표면에는 숯 층과 시험 후에 처음 형상과 달라진 것을 Fig. 7에서와 같이 확인할 수 있었다. 이러한 발포의 형태는 Ph-Mi는 유기물이므로 열을 받으면 자체의 열분해로 인하여 발포될 가능성이 있다. 적외선 램프 실험에서 가장 짧은 시간을 갖는 GI-Mi계는 그 자체가 무기물이므로 본 실험 조건이 열유속 실험 조건  $10 \text{ W/cm}^2$ 에서는 Glass 자체의 녹는 상변화 현상이 없음을 Fig. 7에서 확인할



(a)Epoxy/Ph-Mi(30%)



(b)Epoxy/Cork(30%)



(c) Epoxy/GI-Mi(30%)

Fig. 7 SEM Photographs of Surface after IR-Lamp Test

수 있었다. 그러므로 가장 짧은 시간에 온도 상승을 보여주고 있다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 시험 후 표면에는 균열 형태만 있었고 숯 층의 형성에 따른 발포된 폼 형상이 전혀 없었다. 외면 단열재의 탄소섬유/에폭시와의 인장 접착력은 Epoxy/코르크(15%) + GI-Mi(15%)계가 32.1

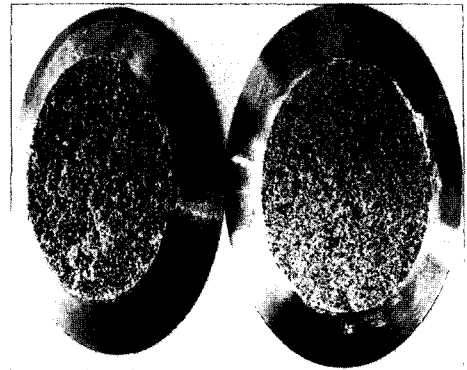


Fig. 8 Fracture Surface after Test of Tensile Adhesion

$\text{kg/cm}^2$  이었다. 이 값은 혼합물 자체의 인장 강도  $36.0 \text{ kg/cm}^2$ 보다 약간 작게 나온 것이다. 접착 파괴된 파단면의 형상은 Fig. 8에서 알 수 있듯이 cohesive 이다. 따라서 외면 단열재의 조성에 따라 약간의 접착력 차이가 있을 것이지만 기본적으로 모재는 동일한 것이므로 충전제의 종류와 양에 무관하게 유사한 접착력을 나타낼 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

미사일 구조물의 외면 단열재 재료로 사용되는 원료들의 종류 및 배합비 별로 적외선 램프 시험 장비를 이용한 단열 성능 평가와 기계적/열적 특성치를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 충전제인 코르크, Ph-Mi 및 GI-Mi 중에서 우수한 기계적 특성과 열전달계수가 낮은 것은 Ph-Mi이었다.
- 2) 적외선 램프 시험에서는 열전달 계수가 가장 큰 값을 갖는 코르크계가 가장 우수한 단열 성능을 갖는 것으로 확인되었다. 이것은 시험 중에 코르크가 탄화 되어서 새로운 숯 층이 형성되기 때문이며 SEM 분석을 통해서도 확인할 수 있었다.
- 3) Ph-Mi계도 표면에 숯 층이 있음을 SEM 분석에 의해 확인되었다. 가장 낮은 단열성능을 갖는 GI-Mi계는 적외선 램프 시험 조건에서는

Glass가 녹는 등의 상변화는 없었다.

#### 참 고 문 헌

1. Wong, J.L., Jovanovic, V., Tang, I. and Broeren, R., "Effects of Shear on Ablation Characteristics of Charring Low Temperature Ablatives," AIAA-2000-2436
2. Wong, J.L., Jovanovic, V., Tang, I. and Johnson, G., "Low Temperature Ablatives Thermal Performance Testing," AIAA-99-0346
3. Smith, E., Lamb, B., Beck, R. and Fretter, E., "Thermal/Ablation Model of Low Density Cork Phenolic For the Titan IV Stage I Engine Thermal Protection System," AIAA-92-2905
4. 이준호, 오범석, 박정주, 조광래, "KSR-III의 열해석 및 단열에 대한 연구," 한국항공우주학회지, 제28권 제7호, 2000, pp.1-7