

## 초고온용 안테나 덮개의 기계적 특성 시험결과

The Mechanical Properties Test Results of the Antenna Cover  
for Hyper Temperature

**김재하\***  
Kim, Jai-Ha

**황동기\***  
Whang, Dong-Kee

**최대근\***  
Choe, Dae-Geun

### ABSTRACT

This paper considers the mechanical properties test results of the ceramic fiber reinforced plastic using hyper temperature. These materials were developed to make antenna cover which should not only protect antenna from high temperature and high pressure but also transmit and receive radio frequency for hypersonic missile. So the bending strength tests under the room temperature and the hyper temperature for new materials were done to evaluate of their performances. Also, the conductivity, specific heat, diffusivity and density were tested.

주요기술용어(주제어) : Hyper Temperature(초고온), Ceramic Fiber Reinforced Plastic(세라믹복합재), Antenna Cover(안테나 덮개), Bending strength(곡강도), Conductivity(열전도율), Specific Heat(비열), Diffusivity(열확산도), Density(밀도)

### 기 호 설 명

$c_p$  : specific heat

$\alpha$  : thermal diffusivity

$\lambda$  : thermal conductivity

$\rho$  : bulk density

### 1. 서론

초고속 비행체에 부착하는 초고주파용 안테나는 적

용 장비의 전파를 일정수준까지 투과시켜야하며, 손실률이 작아한다. 그리고 초고속 비행중 발생하는 공력가열 환경에서 견뎌야하며 비행 및 기동중에 발생하는 하중에 견딜 수 있어야 한다.

본 논문에서는 이러한 특성을 만족시켜야하는 고속, 고기동 유도무기체계에 적용할 신관, 지령수신기와 원격측정장치 안테나에 적용하기 위하여 개발한 안테나 덮개 재료의 상온 및 고온에서의 강도시험 결과와 열전도도, 비열, 열확산도 및 밀도 등의 열 특성 시험결과를 분석하였다.

고속, 고기동 유도탄은 탐색기, 신관, 지령수신기, 원격측정장치 등 많은 초고주파 장치가 탑재된다. 특히 신관, 지령수신기 및 원격측정장치는 유사한 위치에 장착되어 운용중 발생하는 비행환경이 유사하며 [1~4] 사용하는 주파수도 유사하여 동일한 재질을 적

† 2007년 2월 5일 접수~2007년 8월 23일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : kjh3464@add.re.kr

용할 수 있다.

전파를 투과시키는 유전체는 테프론, 복합재, 세라믹 등 여러 가지가 개발되어 사용되고 있으나 많은 재료는 사용온도가 낮거나 취성이 강해서 운용이 제한되고 있다<sup>[5]</sup>.

고속, 고기동 유도탄에 사용하기 위하여 개발된 본 덮개의 재질은 Al-Cr-P-O의 결합구조를 갖는 세라믹 복합재료로서 5~100kgf/cm<sup>2</sup>의 비교적 저압과 200℃ 이하의 낮은 온도에서 제작이 가능하며, 다른 유전체에 비해 취성이 작아 가공성이 아주 뛰어나고, 전자기적 특성이 요구조건과 적절한 특성을 나타내어 강도, 열전도율, 비열, 열확산율, 밀도 등의 기계적 특성 시험을 수행하였다.

그리고, 안테나 덮개는 적용되는 구성품마다 공력 가열로 인하여 발생하는 온도가 아주 높아<sup>[1~2]</sup> 개발된 덮개 재질에 대해서는 그림 1, 2와 같이 덮개가 장착되어 비행시 공력가열로 인하여 온상승이 예상되는 온도까지 고온곡강도시험을 수행하였다<sup>[6]</sup>.

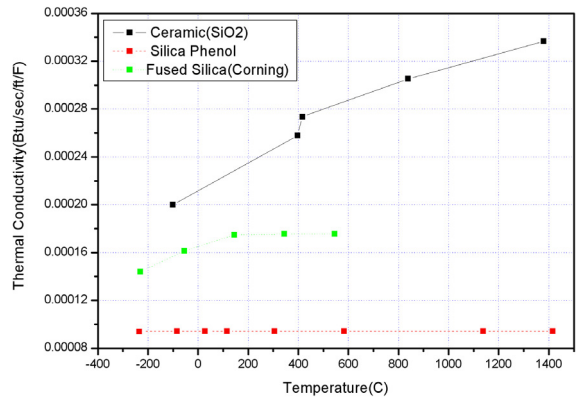
본 논문에서는 이러한 환경에서 사용하기 위하여 개발한 안테나 덮개 재질의 기계적 특성시험 결과를 살펴보고자 한다. 전자기적인 요구조건을 확인하는 시험과 결과는 추후 다시 검토하고, 본 논문에서는 기계적인 시험결과를 검토하기로 한다.

## 2. 안테나 덮개의 요구조건

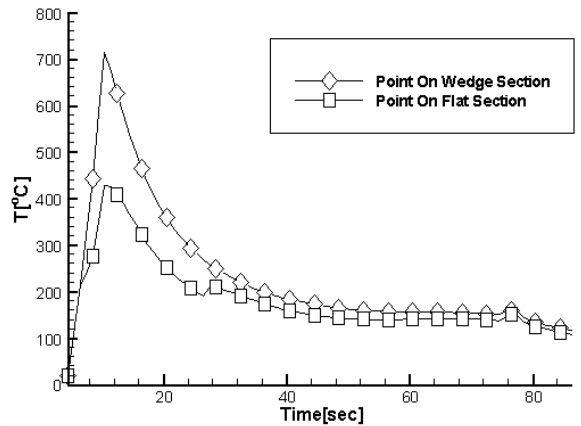
고속, 고기동 유도탄은 Mach 4.0이상의 초고속으로 비행하면서 50g이상의 기동성능을 확보하여야 한다. 따라서 덮개는 이러한 환경에서 발생하는 공력가열로 인한 고온 환경과 고압에서 구조적인 안정성을 확보하여야 한다.

안테나 덮개가 탑재되어 발생하는 공력가열 현상은 덮개가 그림 1과 같은 Fused Silica의 열적 특성<sup>[5]</sup>을 가정하여 두께 3.0mm로 가정하여 여러 가지의 비행 경로를 가정하여 해석을 수행하였다.

해석결과 개발된 재질이 적용되어야 하는 안테나 덮개는 공력가열로 인한 온도상승이 700℃ 이상으로 예상되었다.



[그림 1] Assumed Thermal Conductivity of Antenna Cover



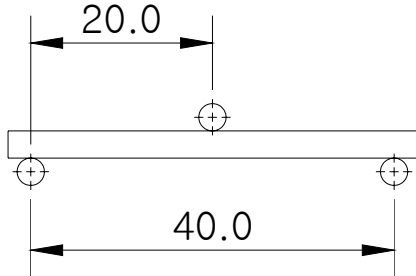
[그림 2] Aeroheating Simulation Results for Telemetry Antenna Cover

## 3. 시험방법 및 결과

### 가. 시험방법

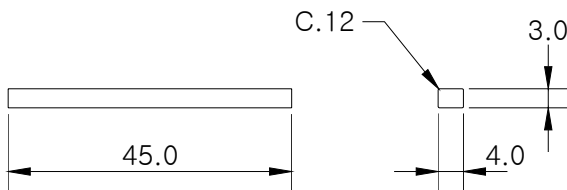
덮개에 대한 기계적 특성을 평가하기 위하여 상온 및 고온에서 강도시험, 밀도 및 열 특성 시험을 수행하였다. 강도시험은 ASTM C1211-98a(Standard Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Elevated Temperatures)에 따라 상온 및 고온에서 곡강도시험을 실시하여 요구조건에 적합한 한지를 판단하였으며, 열 특성 시험은 열전도율, 비열, 열확산도 등을 측정하였다.

곡강도 시험은 그림 3과 같은 형태의 Three-Point Fixture를 사용하였다.



[그림 3] Three-Point Fixture Configuration

시험조건은 600°C에서 8분간 유지 후 곡강도 시험을 수행하였으며, 시험에 적용한 시편형상은 그림 4와 같다.



[그림 4] Bending Test Sample Configuration

#### 나. 강도시험 시험결과

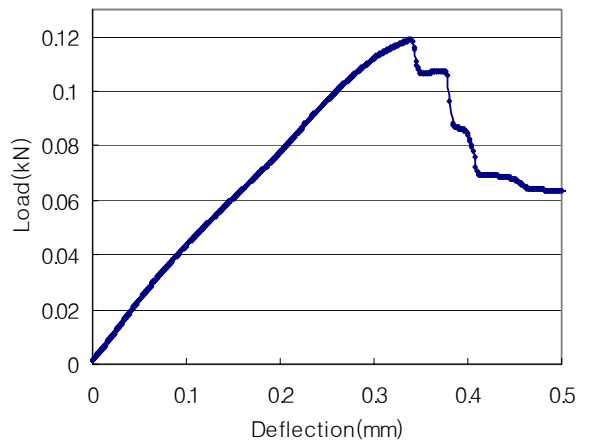
개발된 덮개 제질은 개발중에 여러 가지의 유리섬유 직조와 binder의 조합으로 개발하였으나 각종시험 결과 Silica Glass 직조(Hitco Carbon Composites Inc., Refrasil C100-48, 이하 Silica 덮개)와 Quartz Glass(JPS Glass Co. Astroquartz 581, 이하 Quartz 덮개) 직조 및 국산화한 Silica Glass 직조(강남정공, KN-651A)에 대한 시험결과가 기준에 적합한 결과를 나타내었지만 국산화한 Silica Glass 직조에 대해서는 전자기적 특성 검증이 추가로 필요하여 본 논문에서는 그 결과를 제외하였다.

특히, 개발된 재료는 다공성 재질로서 습기에 대한 영향 평가가 필요하다고 판단되어 MIL-STD-810F의 Method 507.4의 습도시험 규격에 따라 5주기의 습도시험 후 고온강도를 시험하여 습도의 영향을 비교하였다.

#### 1) Quartz 덮개의 강도 시험결과

Quartz시편에 대한 습도시험전의 상온 굽힘강도 시험결과 그림 5와 같은 결과들을 얻었으며, 이로부터 강도는 160.89~162.79MPa임을 알 수 있으며, 영율은 31.2~31.6GPa로 나타났다.

이는 영율이 34~62GPa로 알려진 Fused Silica (High purity slip-cast, Corning Code 7941)<sup>[5]</sup> 보다 작음을 알 수 있다.

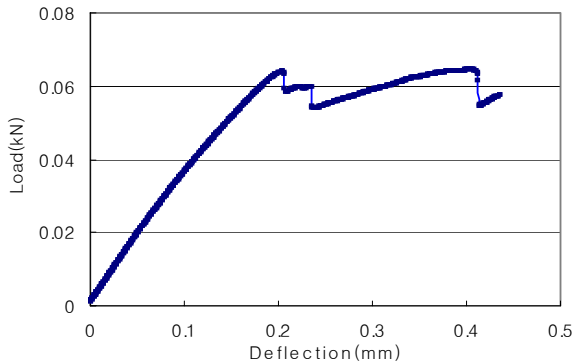


[그림 5] The Results of Bending Strength Test for Quartz Samples under Room Temperature before Humidity Test

[표 1] Quartz시편의 습도시험 전 상온 곡강도시험 결과

Displacement (mm)	Stress, MPa (standard deviation)	Modulus (GPa)
0.342	160.841(1.379)	31.445

Quartz시편에 대한 습도시험 후 상온 곡강도시험결과 그림 6과 같은 결과들을 얻었으며 이로부터 강도는 82.49~86.84MPa임을 알 수 있으며, 영율은 22.76~25.26GPa로 나타났다. 습도시험 전에 비해 강도가 51.27~53.33%로 작게 나타났으며, 영율은 71.95~79.99%로 작아졌다.

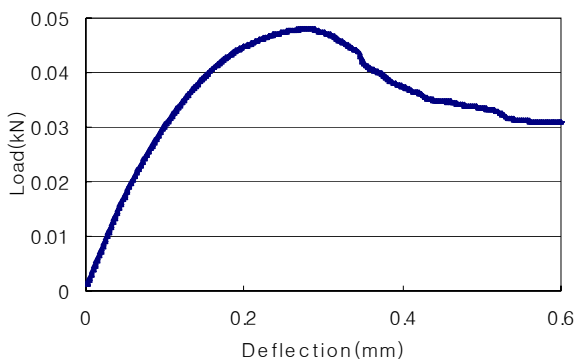


[그림 6] The Results of Bending Strength Test for Quartz Samples under Room Temperature after Humidity Test

[표 2] Quartz 시편의 습도시험 후 상온 곡강도 시험 결과

Displacement (mm)	Stress, MPa (standard deviation)	Modulus (GPa)
0.313	84.387(1.806)	24.390

습도시험 후에는 고온 곡강도시험결과 그림 8과 같은 결과들을 얻었으며, 강도는 59.64~61.94MPa로 나타났으며, 영율은 21.56~27.08GPa로 나타났다. 습도시험 후에 상온강도에 비해 강도가 61.15~71.33%로 감소하였으나, 영율은 94.73~105.95%로 크게 차이가 나지 않았다.



[그림 7] The Results of Bending Strength Test for Quartz Samples under High Temperature after Humidity Test

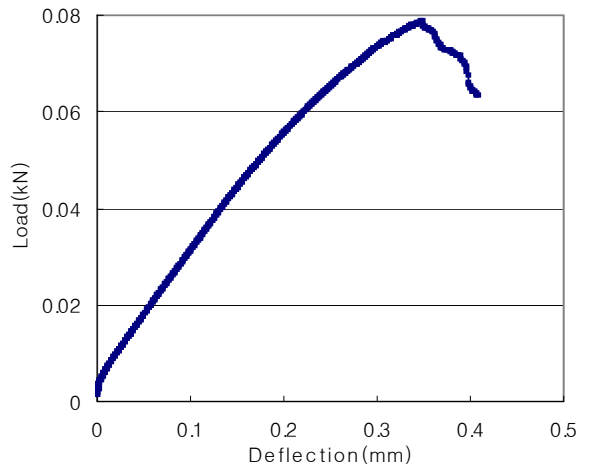
[표 3] Quartz시편의 습도시험 후 고온 곡강도시험 결과

Displacement (mm)	Stress, MPa (standard deviation)	Modulus (GPa)
0.375	60.542(1.226)	24.048

## 2) Silica 덮개의 강도 시험결과

Silica로 제작한 세라믹 복합체에 대한 상온 강도 시험결과 그림 8과 같은 결과들을 얻었으며, 이로부터 강도는 99.83~120.69MPa(평균 : 108.28MPa)로 Quartz로 제작한 시편보다 작게 나타났다.

Silica로 제작한 세라믹 복합체에 대한 영율은 20.24~23.10GPa로 Quartz로 제작한 시편보다 작게 나타났다.



[그림 8] The Results of Bending Strength Test for Silica Samples under Room Temperature before Humidity Test

[표 4] Silica 시편의 상온 곡강도시험 결과

Displacement (mm)	Stress, MPa (standard deviation)	Modulus (GPa)
0.344	108.268(8.988)	21.532

## 다. 열 특성 시험결과

열 특성 측정시에는 Nano Flash Diffusivity(LFA

447) 장비를 사용하였으며, 열전도율 측정을 위하여 세라믹 복합재를  $8.0 \times 8.0 \times 1.0\text{mm}$ 로 가공하여 측정하였다.

비열( $C_p$ )은  $\mu$ -Sensor가 부착된 비열전용 DSC (Differential Scanning Calorimetry)장비를 사용하였다. 시편은  $\Phi 4.5 \times 0.5\text{mm}$ 로 가공하여 측정하였다.

열전도율은 측정된 밀도, 열확산계수와 비열에 의해 다음의 관계식에 따라 계산하였다.

$$\lambda = \alpha \rho c_p$$

where  
 $\alpha$  : thermal diffusivity  
 $c_p$  : specific heat  
 $\rho$  : bulk density  
 $\lambda$  : thermal conductivity

### 1) Quartz 덮개의 열 특성 시험결과

열전도율은 시편 5개에 대하여 실시한 결과 Quartz 시편의 경우 평균값이 각각  $0.934\text{W/mK}$ ( $\approx 0.000149$  Btu/ft-sec- $^{\circ}\text{F}$ )로 나타났으며, 열전도율이 각  $0.865\text{W/mK}$ 인 Fused Silica(High purity slip-cast, Corning Code 7941) 보다 약간 높게 나타났으며, 열전도율이  $1.394\text{W/mK}$ 인 Fused Silica Clear Glass (Corning Code7940)<sup>[5]</sup> 보다는 낮음을 알 수 있다.

[표 5] Quartz 재질에 대한 열 특성 시험결과

열전도율, W/mK (Standard Deviation)	비열, J/g/K (Standard Deviation)	열확산도, mm <sup>2</sup> /K (Standard Deviation)
0.933(0.0050)	0.819(0.0005)	0.546(0.0030)

### 2) Silica 덮개의 열 특성 시험결과

Silica 시편의 열전도율은 평균값이 각각  $0.680\text{W/mK}$ ( $\approx 0.000109$  Btu/ft-hr- $^{\circ}\text{F}$ )로 나타났으며, 일반적으로 단열재로 많이 사용되고 있는 그림 1의 Silica Phenol과 유사하며, Fused Silica보다는 작음을 알 수 있다.

세라믹 소재의 경우 온도가 증가하면 열에너지를 전달하는데 포논이 자유전자 만큼 효율적이지 못하고, 이로 인해 온도의 증가에 따라 격자 진동의 산개

가 많이 일어나 열전도율이 떨어지는 경향을 나타내므로, 온도가 증가할수록 열전도율이 떨어질 것으로 예상된다.

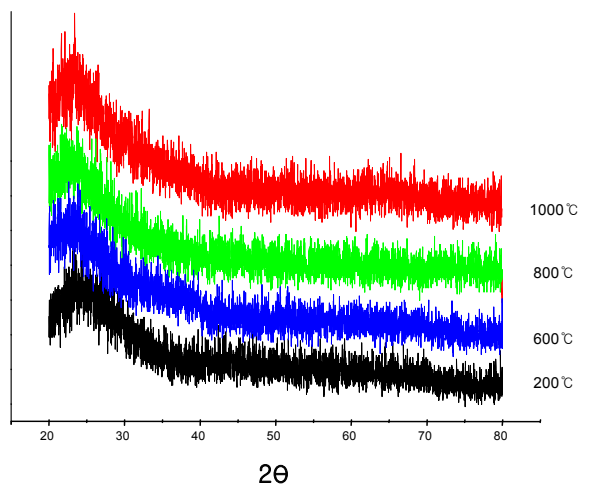
[표 6] Silica 재질에 대한 열 특성 시험결과

열전도율, W/mK (Standard Deviation)	비열, J/g/K (Standard Deviation)	열확산도, mm <sup>2</sup> /K (Standard Deviation)
0.680(0.0019)	0.929(0.0004)	0.412(0.0010)

### 3) 내열성 시험결과

고온환경에서 적용이 가능한지를 확인하기 위하여 바인더에 대한 XRD, TG/DSC 분석과 내열평판시험을 실시하였다.

바인더에 대하여 온도별 XRD 분석을 위하여, 시편은 각 온도별로 승온 한 후, 그 온도에서 3시간 경과한 시편을 분쇄한 후 분석을 실시하였으며, 실험결과, 아래 그림 9와 같이  $200^{\circ}\text{C}$ 에서 제조된 바인더는 온도증가( $1000^{\circ}\text{C}$ 까지)로 인한 상변화는 발견되지 않았으며, 비정질상임을 확인할 수 있었다. 이는 온도증가가 파괴를 일으키는, 즉, 상변화에 따르는 부피변화로 인한 파괴현상이 발생하지 않는다는 것을 보여준다.

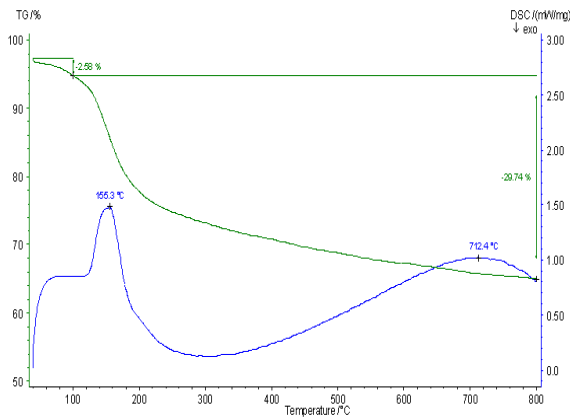


[그림 9] XRD Graph of binder vs temperature increasing

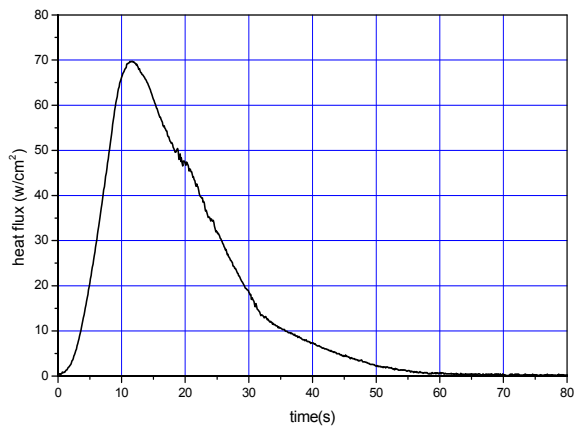
마찬가지로 바인더를 100℃ 2시간 건조한 후에 공기분위기 하에서 10℃/min의 속도로 승온, 상온부터 800℃까지 TG/DSC(Netzsch사, 모델명 : STA409C) 분석을 실시하였다.

TG/DSC 실험결과 그림 10에서처럼 155℃ 정도에서는 결합수의 증발과 가교반응에 의한 흡열반응이 나타나며 이때 결합수의 증발에 의한 무게감소가 나타나지만 바인더를 제작한 200℃ 이후부터 800℃까지는 완만한 경사도를 보이며 서서히 중량이 감소하였다

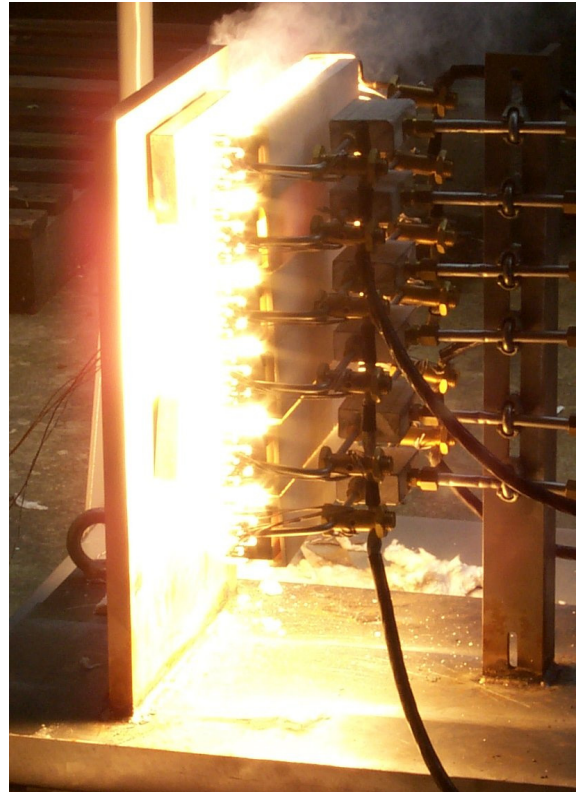
이로부터 개발된 재질은 800℃ 이상의 온도에 대하여 안정성을 가지고 있음을 확인할 수 있다.



[그림 10] TG/DSC Analysis Result of Binder



[그림 11] Heat Flux Applied for Heat Resistance Test



[그림 12] Heat Resistance Test for Ceramic Fiber Reinforced Plastic Plate

또한, 공력가열해석결과<sup>[1]</sup>에서 도출한 그림 11의 heat flux를 그림 12와 같이 가하면서 실시한 내열평판시험에서는 일부 그늘은 자국을 제외하고는 외형상의 변화가 없음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

고온용 안테나 덮개로 사용하기 위하여 개발한 Al-Cr-P-O의 결합구조를 갖는 세라믹 복합체에 대한 상온 및 고온 곡강도 시험결과는 다음과 같이 나타났다.

- Quartz 복합체의 습도시험 전 상온 곡강도는 160.8MPa, 영율은 31.445GPa,
- Quartz 복합체의 습도시험 후 상온 곡강도는 84.39MPa, 영율은 24.39GPa,

- Silica 복합재의 상온 곡강도는 108.268MPa, 영율은 21.532GPa로 나타났다.

또한 열특성시험결과

- Quartz의 열전도율은 0.934W/mK, 비열은 0.818 J/g/K, 열확산도는 0.546mm<sup>2</sup>/K,
- Silica의 열전도율은 0.929W/mK, 비열은 0.680 J/g/K, 열확산도는 0.412mm<sup>2</sup>/K로 나타났다.

그리고 열확산시험결과 800℃ 정도까지 온도증가로 인한 상변화가 일어나지 않고 비정질상임을 유지함을 알 수 있었다. 이는 온도증가가 파괴를 일으키는 즉, 상변화에 따르는 부피변화로 인한 파괴현상이 일어나지 않는다는 것을 의미하므로 높은 온도에서의 사용시에도 안정성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

특히 Quartz시편은 내열성시험 800℃ 이상까지 열적 안정성을 확보하고 있고, 습도시험 후 고온 곡강도시험 강도가 60.54MPa임을 확인하여 초고속비행체의 안테나 덮개재질로 사용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] 성웅제, 임기철, 홍승규, “M0102 형상의 공력가열 해석결과”, 국방과학연구소, TM321-0132, 2001. 6. 15.
- [2] 신영석, 양해석, 이열화, “M0206동체 및 접는날개 공력가열 해석결과”, 국방과학연구소, TM321-0301, 2003. 1. 29.
- [3] 신영석, 양해석, 이열화, “M0102 모델에 대한 구조해석 결과”, 국방과학연구소, TM-323M-0104, 2001. 8.
- [4] 선철, 이광섭, 안창수, “M0206 형상의 하중해석 결과”, 국방과학연구소, TM-321-0329, 2003. 10.
- [5] J. D. Walton, JR., “Radome Engineering Handbook : Design and Principles”, Marcel Dekker, inc., New York, 1970.
- [6] 김재하, 최대근, 황동기, “고온용 안테나 덮개 기계적 특성시험 결과”, 국방과학연구소, MADC-411-060577, 2006. 6.