

과학 관측용 로켓 내열재 개발 연구



閔 庚 宙 / 한국항공우주연구소
선임연구원, 이학박사

추진기관

내에서 고체 추진제 연소시 일어나는 특성은 크게 다음의 3가지, 즉 높은 열의 발생, 높은 압력, 빠른 속도의 연소가스 생성입니다.

이러한 조건하에서 사용될수 있는 내열재는 삭마 재료이어야 하며, 특수한 물성을 갖도록 개발되어야 합니다. 요구되는 재료의 특성은 높은 내열성 및 낮은 침식 속도가 필수적입니다.

내열재는 일반적으로 복합재료이며, 크게 매트릭스와 충전제로 구성됩니다. 매트릭스는 고분자재료가 사용되며, 충전제는 각종 무기질 혹은 유기질이 사용됩니다.

특히 충전제는 강화재 역할을 하면서 삭마 특성과 열적 성질에 큰 영향을 미치고 있음이 알려져 있으며, 종류에 따라서 제작방법도 달라집니다.

내열재의 삭마 현상은 침식 속도를 측정함으로써 이해할수 있으며, 이론적인 계산보다는 시험 모타를 통해서 측정됨이 바람직하며, 연소관 부위에 따른 삭마 성질을 이해해야 합니다.

최종적인 삭마 현상은 실제 크기의 모타 연소 시험을 거쳐야 하며, 이에 따른 성능을 점검한 후, 재현성 있는 결과가 나올수 있도록 재료 개발 및 설계가 이루어져야 합니다.

설계는 여러가지 조건, 특히 고체 추진제 그레인 형상에 좌우되며, 이론적인 계산식만으로는 많은 시행착오가 뒤따름이 일반적입니다. 설계시 가장 중요한 고려사항은 연소관 내부의 위치에 따른 내열재의 두께 결정입니다.

고체 추진제가 그레인 형상을 따라 수직방향으로 타 들어가 연소관 벽, 즉 모타 케이스에 이를 때 web burning이 거의 끝나고, sliver의 형태가 이루어질때 연소관 벽은 직접적으로 고온의 영향을 받게 되며, 이때 부착된 내열재의 두께에 따른 온도 구배(Thermal Gradient)가 이루어 집니다. 발생된 온도 구배는 연소관 내부 위치에 따라 달라지며, 최종적인 내열재 두께가 결정됩니다.

지금까지는 3,000°C이상 고온에서 견디는 완벽한 내열재가 없기 때문에 열전도도 및 삭마 성질을 이용한 열해석을 통해서 설계가 이루어 집니다.

위에서 언급한 내열재 개발은, 로켓의 성능 및 기능에 따라서 좌우되며, 요구되는 성능 또한 매우 달라집니다. 즉, 무인 및 유인 로켓, 우주개발 및 군사용 로켓, 무연 및 유연 추진제로 구분되어 개발됩니다.

이번 연구는 국내 최초의 과학 관측용 로케트인 KSR-420 고체 추진기관에 사용될 연소관 내열재의 조성 개발을 목적으로 수행 되었습니다.

기계적 성질 및 물성

• 기계적 성질

일반적으로 DOP의 함량이 증가할수록 변형율을 제외하고는 모든 기계적 성질이 감소하고 있으며, 이는 DOP가 NBR 분자사이에 골고루 배합되어 물리적 가소제 역할을 보여주기 때문입니다.

강도 및 modulus가 감소되면서 동시에 변형율이 증가됨은 추진기관 내열재로써 매우 바람직한 결과이며, 밀도의 감소 또한 추진기관의 무게 감소를 위해서 좋은 결과가 됩니다.

따라서 물성 및 성질 측면에서 DOP가 12phr 함유된 것이 연소관 내열재로써 바람직함을 알 수 있습니다.

• 유리전이온도 및 용융온도

조성된 NBR 내열재의 온도에 따른 열적 성질을 이해하기 위해 DSC(Differential Scanning Calorimeter)를 이용해 유리전이온도 및 용융온도를 측정하였습니다. 시험조건을 살펴보면, 온도 상승 속도는 1분당 10°C로 하였으며, 시료량은 15.0mg으로 하였습니다.

유리전이온도는 각각 -13.4°C, -18.6°C, -21.8°C로써 DOP 함량이 증가할수록 낮아졌으며 최고 속도로 용융이 되는 온도는 5.2°C, 5.7°C, 7.3°C로써 DOP 함량에 비례함을 알 수 있습니다.

• 열 분해 속도

온도에 따른 열 분해 속도를 측정하기 위해 TGA(Thermogravimetric Analysis)를 이용해 온도에 따른 무게감소를 측정하였습니다. 이때 온도 상승 속도는 1분당 20°C로 하였으며, 상온에서부터 약 800°C까지 측정하였습니다.

무게 감량은 대체적으로 300°C부터 나타나기 시작하였으며, 약 400°C에서 500°C사이에 약 80%의 무게 감량이 발생하였습니다. 약 600°C이상에서부터 약 10%의 무게를 나타내는데, 이는 모두가 거의 char 상태이며, DOP의 함량이 증가할수록 char 무게는 감소하였음을 알 수 있습니다.

• 열 팽창 계수

온도가 올라가거나 내려갈때 발생하는 치수의 변화 측정을 시도하기 위해, TMA(Thermo-mechanical Analysis)를 사용했습니다. 측정온도 범위는 25°C에서 350°C까지 하였으며, 치수 변화가 가장 크게 일어나는 온도 범위에서 열 팽창 계수들을 구했습니다.

가장 기울기가 큰 온도 범위는 150°C에서 200°C이며, DOP의 함량에 따라 조금씩 변화됨을

볼 수 있습니다. DOP가 12phr 함유된 시료가 가장 작은 열 팽창 계수를 나타냈으며, 126µm/m°C값을 얻었습니다.

이 값은 모타 케이스의 열팽창 계수, 1×10^{-5} m/m°C와 일반 복합 고체 추진기관의 열 팽창 계수 1×10^{-4} m/m°C의 중간값이기 때문에 Case-bonded 고체 추진기관 제작을 위한 고체 추진제/내열재/모타 케이스의 접착에 기여할 것으로 기대됩니다.

• 열전도도

연소관 내열재가 고체 추진제의 연소가스에 노출되면 온도가 급격히 상승하게 되며, 이때 내열재 자체의 열전도도에 따라 열 전달이 발생하기 때문에 비교적 낮은 열전도도가 요구됩니다.

개발된 NBR 내열재의 열전도도는 Kyoto Electronics사의 Kemtherm기기로 측정하였습니다. DOP 함량에 따라 열전도도의 값은 조금씩 변화하면서 DOP 함량에 반비례 하였으며, 각각 0.282, 0.276, 0.269(W/m·k)를 보여주었습니다.

• 삭마 성질

이번 연구에서 개발된 NBR 내열재의 삭마속도를 측정하기 위해 BATE모타를 이용하였으며 주어진 조건하에서 0.3mm/초를 얻었습니다.

맺는 말

과학 관측용 로켓 연소관 내열재 개발을 위한 연구가 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 얻었습니다.

첫째, NBR 내열재 조성에서 DOP의 함량이 증가함에 따라 기계적 성질이 저하됨을 알 수 있으며, 변형을 및 추진기관의 무게 감소 그리고 유리한 공정조건을 위해서는 DOP가 첨가되어야 함을 알 수 있습니다.

둘째, 개발된 NBR 내열재의 침식 속도는 주어진 조건하에서 0.3mm/초로써 KSR-420S 추진기관의 요구조건에 만족하며, 충분한 Safety Margin을 갖고 디자인을 할 수 있습니다. *