



탄성내열재 배합 환경에 따른 내열 성능 변화에 관한 연구

김남조^a · 서상규^a · 강윤구^{a,*} · 고청아^a

A Study on the Thermal Protection Performance of Elastomeric Insulators in Different Mixing Environments

Namjo Kim^a · Sangkyu Seo^a · Yoongoo Kang^{a,*} · Cheongah Go^a

^aAgency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: eagle@add.re.kr

ABSTRACT

The thermal response of elastomeric insulators used as protection against high-temperature and high-pressure combustion gases varies depending on their composition and thermal environment conditions. In this paper, the thermal response characteristics of elastomeric insulators in different mixing environments were compared. Tests to determine thermal protection performance were carried out using a thermal protection rubber evaluation motor(TPREM), combustion gas velocities of 20 m/s and 100 m/s were tested at a chamber pressure of 1,000 psig. The pressure time curve of the chamber, the temperature time curve of the internal materials, the residual thickness and the thermal destruction depth of the test specimens were obtained. The results showed that the thermal protection performance of elastomeric insulators in different mixing environments was similar.

초 록

고온·고압의 연소가스로부터 구조물을 보호하는 탄성내열재는 재료 조성 및 열환경 조건에 따라 열반응에 차이를 보인다. 본 논문에서는 탄성내열재의 배합 환경 변화에 따른 열반응 특성을 비교하였다. 탄성내열재의 내열 성능 시험은 내열고무성능평가장치(TPREM)를 이용하였으며, 연소실 압력 1,000 psig에서 연소가스속도를 각각 20 m/s과 100 m/s로 시험하였다. 연소실 압력-시간 선도, 재료 내부 온도-시간 선도, 탄성내열재 시편의 잔류 두께 및 열파괴두께를 획득하였다. 배합 환경에 따른 탄성내열재의 내열 성능은 유사하였다.

Key Words: Solid Rocket Motor(고체로켓추진기관), Elastomeric Insulator(탄성내열재), Thermal Protection Performance(내열 성능), Thermal Destruction(열파괴)

Received 15 June 2018 / Revised 17 November 2018 / Accepted 21 November 2018

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2018년도 춘계학술대회(2018. 5. 30- 6. 1, 라마다프라자 제주호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

고체로켓추진기관에서 연소과정 중 발생하는

고온·고압의 연소가스로부터 연소관 구조물을 보호하기 위해 연소관 벽면과 추진제 사이에 탄성내열재가 적용된다. 탄성내열재는 3,000 K 이상의 극심한 고온 환경으로부터 구조물을 보호하기 위해 내열 성능 및 열적 안정성이 요구된다. 탄성내열재는 SBR(Styrene Butadiene Rubber), NBR(Nitrile Butadiene Rubber), EPDM(Ethylene Propylene Diene Monomer) 등이 모재로 사용되며, 케블라(Kevlar) 섬유, 탄소(Carbon) 섬유 등의 충전제가 첨가되어 기계적, 열적 성능의 향상을 필요로 한다.

탄성내열재는 두 가지 이상의 재료가 혼합되는 만큼 구성되는 모재 및 첨가제의 조성도 중요하지만, 이를 배합하기 위한 주변 분위기에 따라 그 성능의 차이가 발생하게 된다. 따라서 탄성내열재를 인슐레이터로 적용하기 위해 배합 환경에 따른 내열 성능을 분석하는 것이 중요하며, 이를 위해 적용되는 탄성내열재 열반응의 정량적인 평가[1]가 수반되어야 한다. 탄성내열재의 내열 성능 평가를 위해 모사장치를 이용한 실험적 방법과 다양한 이론을 기반으로 한 해석적 방법이 활용되고 있다.

Ahmed A. F.[2] 등은 삭마 실험을 통해 EPDM 모재에 첨가되는 충전제 종류에 따른 내열 성능을 비교하였다. McWhorter B.[3] 등은 실제 추진기관에 열전대를 삽입하여 실시간으로 재료의 열반응 특성을 연구하였다. Sheu S. M.[4] 등은 산소아세틸렌 토치를 이용하여 V-44, Kevlar/EPDM, I-58의 내열 성능을 상대 비교하였다. Lee H. S.[5] 등은 모사시험장치를 이용하여 추진제 연소로 인해 발생하는 Al_2O_3 입자와 연소가스 삭마에 대한 Kevlar/EPDM의 내열 특성을 분석하였다. Kang Y. G.[6] 등은 모사시험장치를 이용하여 연소관 내부 압력 변화에 따른 Kevlar/EPDM의 열반응을 비교하였다. Koo[7]는 이차원 모델을 이용하여 입자 삭마에 의한 기계적 표면 침식을 수학적으로 예측하였다. Liu Y.[8] 등은 연소가스 삭마 모델 및 알루미늄 입자 삭마 모델을 통해 EPDM 열반응의 수학적 예측 기법을 제시하고, 실험 결과와 비교하였다.

본 연구에서는 탄성내열재의 내열 성능에 영

향을 미칠 것으로 예상되는 여러 공정 변수 중 배합 환경을 변수로 하여 내열고무성능평가장치(TPREM, Thermal Protection Rubber Evaluation Motor) 시험을 통해 그 결과를 비교 평가하였다. 이를 위해 동일 조성의 Kevlar 단섬유 충전 EPDM계 탄성내열재를 2가지 배합 환경에서 제작하였다. 내열 성능 시험은 Kevlar/EPDM의 임계속도인 90 m/s[8]를 기준으로 삭마 조건(100 m/s)와 비삭마 조건(20 m/s)로 구분하여 내열 성능 시험을 수행하였다. 내열 성능 시험 후 각 탄성내열재의 열과괴두께 및 열과괴상수를 도출하였다. 이를 통해 배합 환경에 따른 탄성내열재의 내열 성능을 비교하였다.

2. 본 론

2.1 열과괴상수

연소과정에서 재료에 야기되는 현상은 삭마가 발생하는 경우와 삭마가 발생하지 않는 경우로 나뉜다. 재료의 열반응을 비교하기 위해 재료 내부에 온도센서를 삽입하여 측정된 결과를 이용한 방법이 주로 사용되고 있다. 열과괴상수는 노출 시간과 열과괴두께(TDD, Thermal Destruction Depth)의 함수로 표현된다. 열과괴두께는 재료 표면에 발생하는 삭마와 내부 열반응에 의해 발생하는 숯 두께를 모두 합한 값으로 정의된다. 노출시간(τ_{exp})이 임계속도에 도달하는 시간(τ_0)보다 작은 경우 삭마가 발생하지 않고, τ_{exp} 가 τ_0 보다 큰 경우 삭마가 발생하여 표면 삭마가 일어나는 삭마 두께와 숯 깊이가 같아지게 된다. 이를 준평형(Quasi-Stationary) 상태라 한다.

삭마가 발생하지 않는 경우와 삭마가 발생하는 경우에 따른 열과괴상수 산출식은 각각 Eq. 1 및 2와 같다[6].

$$\delta_{TD} = \xi(\sqrt{\tau_{exp} - \eta}) \quad (1)$$

$$\delta_{TD} = \xi(\sqrt{\tau_0 - \eta}) + V_w(\tau_{exp} - \tau_0) \quad (2)$$

where, δ_{TD} : Thermal destruction depth

- ξ, η : Coefficients of thermal destruction
- τ_{exp} : Exposure time of materials
- τ_0 : initiation time for ablation
- V_w : Ablation velocity in quasi-stationary state

위 식으로부터 삭마가 발생하지 않는 경우 열과피두께는 노출 시간의 0.5승에 비례하며, 삭마가 발생하는 경우 열과피두께는 노출 시간에 비례한다. 준평형 상태의 삭마 속도 및 열과피속도는 Eq. 3 및 4와 같다[6].

$$V_w = \frac{\xi}{2\sqrt{\tau_0}} \quad (3)$$

$$V_{TD} = \frac{\xi(\sqrt{\tau_{exp}} - \tau_0)}{\tau_{exp}} \quad (4)$$

2.2 시험장치 및 조건

시험장치[10,11]는 크게 연소관부, 시편부, 노즐부로 구성되어 있다. 연소가스 속도에 따라 두 시험 장치를 사용하였지만, 연소관부의 직경을 제외한 시험장치의 구성요소를 모두 공유하기 때문에 100 m/s의 연소가스 유동을 발생시키는 시험 장치에 대해서 대표적으로 Fig. 1에 정리하였다. 연소관부 내에 추진제는 카트리지 형태로 제작하였으며, 반복 사용이 가능하도록 하였다. 추진제 연소로 인해 연소관부 내에서 연소가스 유동을 발생시켜, 실제 고체추진기관의 내부 환경을 모사할 수 있도록 제작하였다. 시편부는 사각 단면이며, 천이영역부 및 센서부로 구성되었다. 천이영역부는 연소관부에서 발생하는 연소가스 유동을 안정화시키는 역할을 하며, 센서부는 재료의 시험을 수행하는 역할을 한다. 센서부에 삽입되는 시편의 형상은 Fig. 2와 같다. 윗면을 기준으로 90o 및 270o 시편 두 개에 열전대(Thermocouples)를 각 5개씩 장착하여 연소가스에 의한 온도 변화를 측정할 수 있도록 하였다. 시편의 번호는 천이영역부 및 센서부의 후면을 기준으로 시계방향으로 정하였으며, 0°가 1번, 90°가 2번, 180°가 3번, 270°가 4번이다.

본 시험의 압력 조건은 일반적인 고체추진기

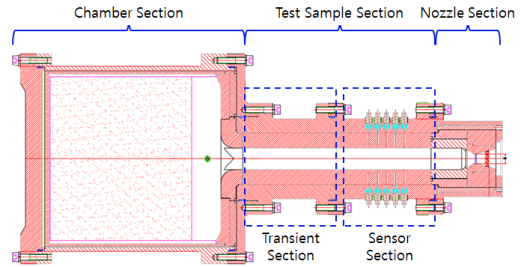


Fig. 1 Configuration of test equipment.

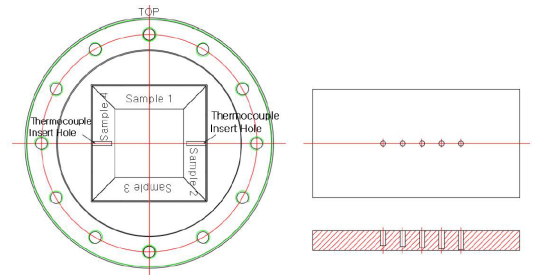


Fig. 2 Configuration of test sample.

Table 1. Mixing Environments of Kevlar/EPDM Insulator.

	Internal mixer (kneadar, 75L)		Open roll (22 in, 2 rolls)	
Insulator A	T (°C)	120±40	T (°C)	40±20
	t (min)	5	t (min)	20
Insulator B	T (°C)	80±40	T (°C)	40±20
	t (min)	30	t (min)	20

관의 연소실 압력을 모사할 수 있도록 1,000 psig로 설정하였다. 연소가스속도에 따라 20 m/s(Test 1)와 100 m/s(Test 2)일 때로 나누어 삭마가 발생하는 조건과 발생하지 않는 조건을 고려하였다. 탄성내열재 시편은 배합 환경에 따라 A와 B로 구분하였으며, 배합 환경은 Table 1에 정리하였다. 탄성내열재 A, B는 동일한 배합량 60 kg을 기준으로 정리하였으며, 시편 1, 2가 탄성내열재 A(이하 A1, A2), 시편 3, 4는 탄성내열재 B(이하 B3, B4)이다. Kevlar/EPDM의 열과피상수를 산출하기 위해 시편 A2, B4의 총 10 채널에서 온도를 측정하였으며, 열전대 삽입 깊이는 후면을 기준으로 유동 표면으로부터 1.0

mm, 2.0 mm, 3.0 mm, 4.0 mm, 5.0 mm가 되도록 하였다.

3. 시험평가 및 결과

3.1 압력 및 온도 계측 결과

시험 후 압력-시간 선도는 Fig. 3과 같다. 이를 통해 유효 연소 시간(τ_{eff}) 및 유효 평균 압력($P_{c,eff}$)을 산출하였다. 유효 연소 시간은 시험 초기 연소실 압력이 100 psig에 도달하는 시간부터 시험 말기 30 psig에 도달하는 시간으로 설정하였으며, 유효 평균 압력은 Eq. 5를 통해 산출된다.

$$P_{c,eff} = \frac{\int_{\tau_{100\psi g}}^{\tau_{30\psi g}} P_c d\tau}{\tau_{30\psi g} - \tau_{100\psi g}} \quad (5)$$

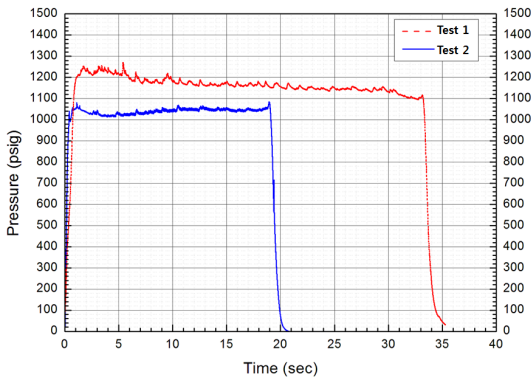


Fig. 3 Pressure-time curve (Test 1 and 2).

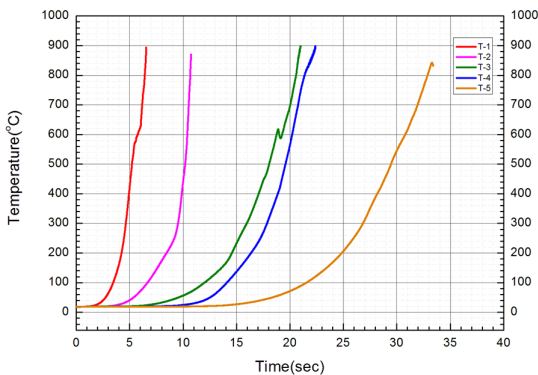


Fig. 4 Temperature-time curve (T-1~T-5, Test 1).

Test 1 및 2의 유효 평균 압력은 각각 1,100 psig, 1,000 psig이고, 유효 연소 시간은 각각 35.3 s, 20.1 s이다. 온도 계측 결과는 유효 연소 시간 중 초기 온도부터 900 °C까지의 계측 결과를 도식화하였다. 시편 A2의 열전대 채널은 T-1 (1.0

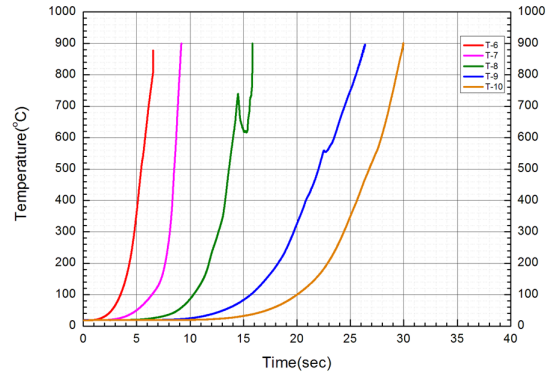


Fig. 5 Temperature-time curve (T-6~T-10, Test 1).

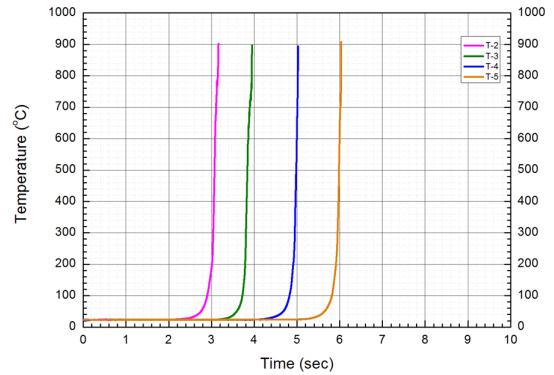


Fig. 6 Temperature-time curve (T-1~T-5, Test 2).

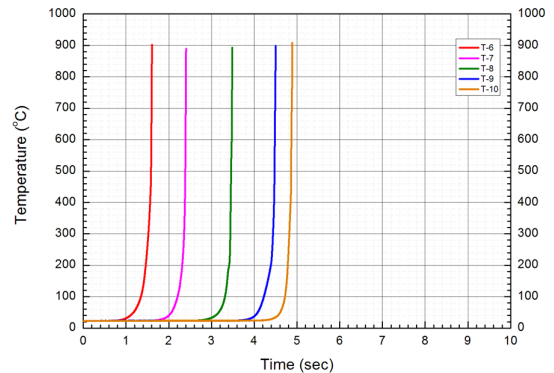


Fig. 7 Temperature-time curve (T-6~T-10, Test 2).

mm), T-2 (2.0 mm), T-3 (3.0 mm), T-4 (4.0 mm), T-5 (5.0 mm), 시편 B4는 T-6 (1.0 mm), T-7 (2.0 mm), T-8 (3.0 mm), T-9 (4.0 mm), T-10 (5.0 mm)으로 설정하였다.

Test 1의 온도-시간 선도는 온도 계측 채널에 따라 Fig. 4 및 5에 정리하였다. 저속(20 m/s)인 경우 열전대 삽입 깊이가 깊을수록, 온도 상승이 느리고 온도 상승률도 낮게 나타났다. 이는 연소 가스 유동에 의해 숯 화가 진행된 표면이 이탈되지 않고 추가적인 열 차폐 역할을 해줌으로써, 재료의 새로운 표면이 유동에 노출되지 않아 온도가 상승이 지연되는 것으로 판단된다. 또한, T-3과 T-8이 각각 18.88 s와 14.46 s에서 주춤거리는 온도 상승 경향을 보였다. 이는 측정점 혹은 인근 영역의 재료가 열로 인해 변형되는 과정에서 측정점이 순간적으로 떨어졌다가 붙으면서 생기는 현상으로 판단된다. Fig. 4에서 보듯이 T-1은 매끄럽지 못한 온도 상승 경향을 보였다. 이는 열변형 혹은 재료 내부의 기공 형성으로 인한 결과로 판단된다.

Test 2의 온도-시간 선도는 온도 계측 채널에 따라 Fig. 6 및 7에 정리하였으며, T-1은 열전대 조립 과정에서 단선되었다. 고속(100 m/s)인 경우 온도 상승 곡선은 매끄러운 경향을 보이며, 연소 가스 유동으로 인해 탄화(Carbonization)가 진행된 표면이 이탈되면서 새로운 재료 표면이 노출되는 현상이 반복되면서 온도 상승률이 높은 것으로 보인다. 두 시험에서 계측된 온도는 전반적으로 정상적인 계측 결과로 판단된다.

3.2 열파괴상수 도출

내열 성능 시험 후 시편 상태를 확인하였다. Test 1 천이영역부 및 시험부에서는 비교적 고른 삭마 현상이 발생되었지만, Test 2 천이영역부에서는 비균일한 삭마 현상이 발생되었다. Fig. 8은 시험 종료 후 Test 2 천이영역부의 후면 사진이다. Test 2 시험 장치의 천이영역부에 장착된 시편의 경우 Fig. 8의 적색 점선과 같이 'W' 형태의 삭마 현상이 발생되었다. 이는 고속의 연소가스 유동에 의해 나타나는 현상이며, 연결부 내열재(탄소/페놀릭) 및 천이영역부 탄성내열재 사이의



Fig. 8 Cross-section of transient section.

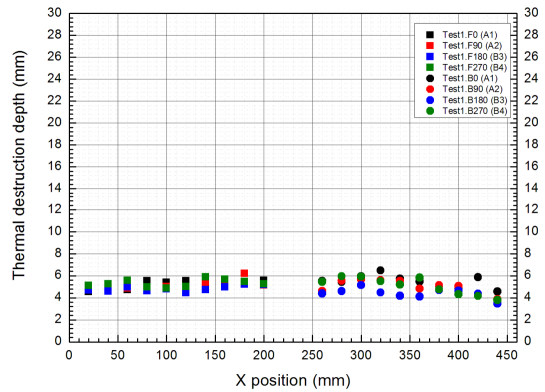


Fig. 9 TDD-position curve (Test 1).

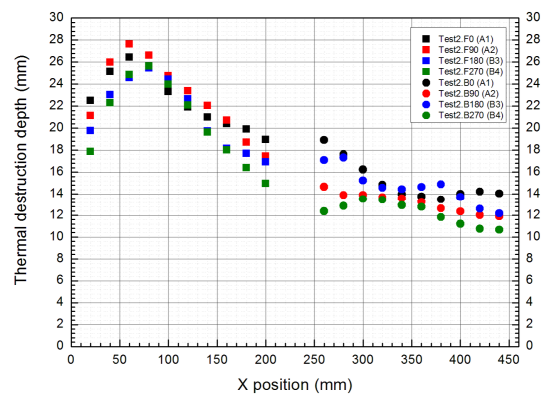


Fig. 10 TDD-position curve (Test 2).

삭마 정도와 원형 단면에서 사각형 단면으로 시험 장치 내면 형상 변화에 따른 유동의 특성으로 판단된다.

천이영역부 및 센서부의 탄성내열재 시편을 분

리하는 과정에서 시편 표면에 탄소잔유물이 덮여 있고, 얇은 숯 층을 확인하였다. 이러한 숯 층의 생성은 열반응에 의한 결과이며, 각 시편의 정량적인 열과피두께를 측정하기 위해 연마 작업을 통해 숯 층을 제거하였다. 시험 후 잔류 두께를 측정하기 위해 숯 층이 제거된 시편 내면 및 배면에 중앙선을 긋고 20 mm 간격으로 그 두께를 측정하였다. Test 2 시험장치 천이영역부의 시편은 'W' 삭마 형상으로 인해 중앙선 양 쪽의 깊이 파인 곳에 선을 더 그어 세 선의 평균값을 계산하였다. 각 시편의 시작점과 끝점은 조립 틈 및 밀봉제가 유동에 영향을 준 것으로 판단되어 평균 계산에서 제외하였다.

열과피두께는 시험 후 잔류 두께를 시험 전 두께에서 뺀 값으로 계산하였으며, 계산 결과를 Fig. 9 및 10에 도식화하였다. 이 때, 열과피두께는 시편의 길이 방향(x축)을 기준으로 정리하였다. Test 1과 달리 Test 2는 열과피두께의 상당한 편차가 발생하였다. 이는 앞서 거론한 바와 같이 천이영역부 앞의 연결부 내열재의 재료와 내면 형상에 따른 유동 특성으로 판단된다. 평균 열과피두께는 Test 1의 경우 시편 A1, A2와 시편 B3, B4에 대해 각각 5.22 mm, 4.91 mm로 시편 A1, A2의 열과피두께가 6.3% 두껍다. Test 2의 경우 각각 14.15 mm, 13.45 mm로 시편 A1, A2의 열과피두께가 5.2% 두껍다. 이는 연소 종료 후 잔류 화염, 소화조건, 배치 간 열과피두께 편차를 고려하였을 때 두 재료의 내열 성능은 유사하다고 판단된다. 또한, 연소가스 속도 차이에 따른 열과피두께를 비교하였을 때 Test 2가 Test 1에 비해 2배 이상의 열과피가 진행되었다. 이는 고속(100 m/s)에서 열반응으로 형성된 숯 층이 유동에 의해 시편으로부터 이탈되어 새로운 재료 표면이 유동에 노출되면서 열과피가 더 빠르게 진행된 것으로 판단된다.

Fig. 4 ~ 7의 온도-시간 선도로부터 열분해온도인 292 °C에 도달하는 시간, 측정점의 깊이, 열과피두께를 이용하여 열과피상수를 산출하였다[6]. 먼저, y축은 열과피두께, x축은 열분해온도 도달 시간인 그래프에 계속 불량인 데이터를 제외하고 선형 보간법을 이용하여 열과피상수를 산출하였

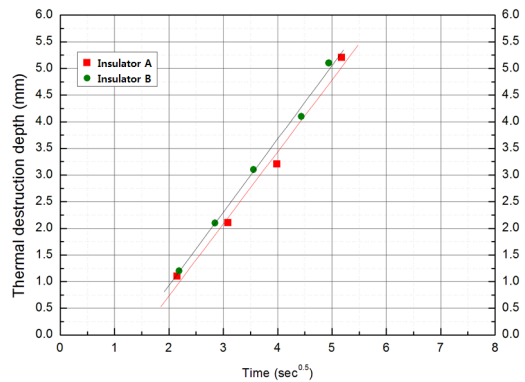


Fig. 11 TDD-time curve (Test 1).

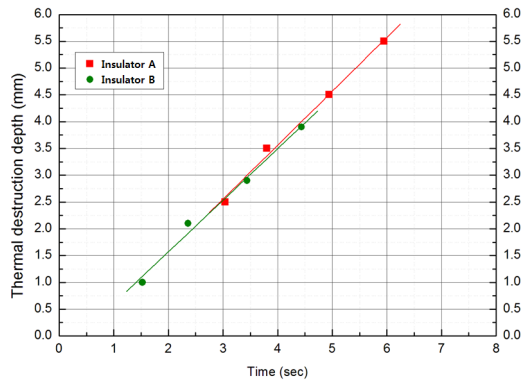


Fig. 12 TDD-time curve (Test 2).

Table 2. Calculation results of coefficients of thermal desctruction (Test 1 and 2).

Test 1	Slope	Y-intercept
Insulator A	1.3513	-1.9691
Insulator B	1.3741	-1.8180
Test 2	Slope	Y-intercept
Insulator A	1.0062	-0.4634
Insulator B	0.9621	-0.3532

다. Test 1 및 Test 2의 열과피두께-열분해온도 도달 시간 선도는 Fig. 11 및 12, 열과피상수 계산 결과는 Table 2에 정리하였다.

Fig. 11(Test 1)은 연소가스 유동의 속도를 감안하여 Eq. 1을 적용하여 열과피상수를 산출하였다. 비삭마 조건인 경우, 노출 시간은 0.5승에 비례하

기 때문에 x축의 단위는 [$s^{0.5}$]으로 표기하였다. Eq. 1에서 기울기는 열과피울을 나타내며, y절편은 열반응 시작 시간을 의미한다. Test 1의 결과를 비교해보면, 열과피울은 탄성내열재 A가 B에 비해 1.7% 낮으며, 열반응 시작 시간은 8.3% 열반응 시작 시간은 8.3% 지연됨을 확인하였다. Eq. 2에서 기울기는 삭마 속도를 의미하며, y절편은 준평형 상태에 도달하는 시간과 관련된다. Test 2의 결과를 비교해보면, 탄성내열재 A가 B에 비해 삭마 속도가 4.6% 빠르다. 이는 잔류 화염, 소화 조건, 배치 간 열과피두께 편차를 고려할 때, 탄성내열재 A, B의 내열성능은 유사하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 2가지 배합 환경의 Kevlar/EPDM 탄성내열재 내열성능을 비교하였다. 이를 위해 내열고무성능평가모터를 이용하였으며, 시험은 연소가스 유동의 속도가 20 m/s(Test 1)와 100 m/s(Test 2)로 두 차례의 시험을 수행하였다. 배합 환경이 다른 두 탄성내열재에 대해 열과피상수를 도출하였다.

두 차례의 시험에서 연소실 내 유효 평균 압력은 각각 1,100 psig, 1,000 psig였으며, 유효 연소 시간은 각각 35.3 s, 20.1 s이었다. 시험 후 Test 2의 천이영역부 시편에서 연결부 내열재의 재료와 내면 형상으로 인해 'W' 형태의 삭마 현상이 발생하였다. Test 1 조건에서 열과피상수는 열과피울과 열반응 시작 시간에 대해 각각 1.7%, 8.3%의 차이를 보였으며, Test 2 조건에서 삭마 속도는 4.6%의 차이를 보였다.

시험 결과로부터 배합 환경에 따른 탄성내열재의 내열 성능은 유사하다고 판단된다. 탄성내열재 내열 성능에 영향을 주는 여러 제작 공정 변수 중 배합 환경은 내열 성능에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 향후 재료 조성 및 제작 공정 변수에 따른 탄성내열재의 소재 성능 평가를 통해 내열 성능에 영향을 끼치는 인자에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

References

1. Ahmed, A.F., "Thermal Insulation by Heat Resistant Polymers," PhD Thesis, Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 2009.
2. Ahmed, A.F. and Hoa, S.V., "Thermal Insulation by Heat Resistant Polymers for Solid Rocket Motor Insulation," *Journal of Composite Materials*, Vol. 46, No. 13, pp. 1549-1559, 2011.
3. McWhorter, B., Ewing, M., Albrechtse, K., Noble, T. and Longaker, M., "Real-Time Measurements of Aft Dome Insulation Erosion on Space Shuttle Reusable Solid Rocket Motor," 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, F. L., U.S.A., AIAA 2004-3896, Jul. 2004.
4. Sheu, S.M., Chu, H.T. and Chou, J.H., "Experimental Study of Ablative Materials by Oxyacetylene Flame Flow System," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 27, No. 5, pp. 1108-1113, 2011.
5. Lee, H.S., Kang, Y.G., Lim, S.Y., Oh, J.Y. and Lee, K.H., "A New Test Method to Evaluate Influence of Al_2O_3 to Rubber Insulator in Solid Propellant Rocket Motor," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 5, No. 3, pp. 9-14, 2011.
6. Kang, Y.G. and Park, J.H., "A Comparison with Thermal Reaction Characteristic of Kevlar/EPDM Internal Insulator by Change of Chamber Pressure," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 3, pp. 71-77, 2016.
7. Koo, J.H., "Numerical Investigation of Thermo-Chemical and Mechanical Erosion of Ablative Materials," AIAA/SAE/ASME

- /ASEE 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Monterey, C.A., U.S.A., AIAA 93-2045, June, 1993.
8. Liu, Y., Yu, X.J., Ma, J.M., Guan, Y.W., Li J., Li, Q. and Yang, S., "A Volumetric Ablation Model of EPDM Considering Complex Physicochemical Process in Porous Structure of Char Layer," *Open Physics*, Vol. 15, No. 1, pp. 344-353, 2017.
9. Yezzi, C.A. and Moore, B.B., "Characterization of Kevlar/EPDM Rubbers for Use as Rocket Motor Case Insulators," *AIAA/ASME/SAE/ASEE 22nd Joint Propulsion Conference*, Huntsville, A.L., U.S.A., AIAA-86-1489, June, 1986.
10. Kang, Y.G. and Park, J.H., "A Development of Test Equipment for Thermal Protection Performance on Insulator used in Rocket Motor Chamber," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 3, pp. 32-36, 2016.
11. Kang, Y.G., Yun, D.J., Kim, S.Y., Lee, J.S. and Kwon, T.H., "A Development of Test Equipment for Thermal Protection Performance on Insulator used in Solid Rocket Motor," *Proceeding of the KSPE Spring Conference*, pp. 543-546, 2017.