탄소섬유 강화 탄화규소 세라믹 복합소재 초음속 재생냉각 연소기 개발

김세영*† · 김수현* · 한인섭* · 우상국* · 성영훈*

Development of regenerative scramjet combustor with carbon fiber reinforced ceramic matrix composites

Seyoung Kim*† · Soohyun Kim* · Insub Han* · Sangkuk Woo* · Younghoon Seong*

ABSTRACT

Scramjet combustor materials are exposed at ultra high temperature over 2000K and severe erosion environment. Inconel alloys are usually applied for combustor material however its mechanical properties are decreased beyond temperature of 1000K so that is impossible for long term operation and reuse. In this study, fiber reinforced ceramic material was used as scramjet combustor material and its feasibility studied. To increase combustion efficiency, regenerative combustor system developed and channel fabrication in composite material also studied.

초 록

초음속 스크램제트 연소기는 약 2000K 이상의 고온과 빠른 유속을 가지는 연소 환경에 노출되며 현재 inconel 등의 고온 금속 소재를 적용하고 있다. 이러한 금속소재는 1000K 이상의 고온 환경에서 물성 저하 현상이 크게 나타나 장시간 및 재사용이 불가능하다. 이에 본 연구에서는 차세대 고온 내열 소재로 주목 받는 섬유강화 세라믹 복합소재를 스크램제트 연소기에 적용하기 위한 연구를 수행 하였으며, 연소효율 향상을 위해 고온의 연료를 분사할 수 있는 재생냉각형 연소기 제조를 위한 기초 기술을 개발 하였다.

Key Words: scramjet(스크램제트), regenerative(재생냉각), ceramic matrix composites(세라믹복합소재), carbon fiber(탄소섬유)

1. 서 론

스크램제트의 연소기는 약 2000K 이상의 고온과 빠른 유속을 가지는 환경에 노출되는 부품으로 현재 inconel 등의 고온 금속 소재를 사용하고 있다[1]. 이러한 금속 소재는 낮은 융점과 연화 온도에 의해 약 1000K에서 기계적 성질이 급격하게 감소한다. 이러한 금속 소재의 특성으로 인해 실사용 환경에서 충분한 고온 물성을 나타

* 한국에너지기술연구원 에너지소재연구실
† 교신저자, E-mail: saykim@kier.re.kr

내지 못해 재생 냉각을 통한 소재의 건전성 유지에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다[2]. 본 연구에서는 차세대 고온 내열 소재로 주목 받고 있는 섬유강화 세라믹 복합소재 (Ceramic Matrix Composites, CMC)를 연소기 제조에 적용 하였으며, 금속 소재를 대체할 경우 1/4 밀도와 400℃ 이상의 내열 특성 향상을 기대 할 수 있다[3]. 이를 제조하는 공정은 liquid silicon infiltration (LSI)를 적용 하였다. 적용된 CMC소재는 탄소섬유 강화 탄화규소 세라믹 복합소재(C/SiC)이며, 고온 내삭마 특성과 내부 유로 형성 공정 기술에 대한 여구를 수행 하였다.

2. 결과 및 토의

2.1 실험방법

연구에 적용된 복합소재는 LSI 공정을 이용하였으며, 사용된 섬유는 T300 grade plain woven를 사용하였다. 페놀수지에 함침된 섬유는 180℃에서 경화 된 후 N_2 분위기 1000℃에서 탄화 되었다. 탄화된 preform은 1600℃의 진공 챔버에서 용융된 Si의 함침/반응 공정을 수행하여 최종 C/SiC 복합소재를 확보 하였다.

섬유강화 복합소재의 장점인 비강도를 향상시키기 위해 섬유 체적비를 증가시키는 연구를 수행하였다.

제조된 복합소재는 kerosene과 oxygen을 연료로 하여 2000℃ 토치 삭마 시험을 수행하여 연소 환경 적합성을 판단하였다. 또한, 재생냉각을 위한 소재 내부 유로 형성 공정과 fitting 체결을 위한 토크 시험을 함께 수행 하였다.

2.2 토치 삭마 시험

토치삭마 시험은 2000℃에서 60, 220, 300 그리고 600초간 유지하였으며, 시험 전/후의 무게 변화 및 단면의 SEM 분석을 수행 하였다. Fig.1에 나타낸 것과 같이 600초 삭마 시험 후 약 0.5mm 표면에서 탄소섬유가 산화된 것을 확인 할 수 있었으며, 표면에는 SiO_2가 형성되어 있음을 관찰 하였다.

Fig. 2에 나타낸 것과 같이 산화, 삭마 거동은 시간에 따라 함께 증가함을 보이지만, 삭마율은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 SiO2에 의한 산화 피막의 형성과 산화 깊이에 따른 산소량의 감소에 따른 결과로 판단된다. 또한, 유로 형성 시 이러한 산화 손실 두께를 고려한 설계가 필요함을 확인 하였다.

2.3 인서트 토크 시험

복합소재 내부 유로를 통해 연료를 주입하기 위해 fitting등의 삽입이 필수적이며, 이를 위해 복합소재에 체결 가능한 나사산 구조 조임에 대한 토크 시험을 수행 하였다[4]. 각 시편은 30mm 사각형이며 두께는 8mm였다. 삽입된 fitting은 NPT 1/4"이며 토크를 증가 시키며 시험편의 파손 상태를 A-scan 초음파 탐상법을 적용하여 확인 하였다.

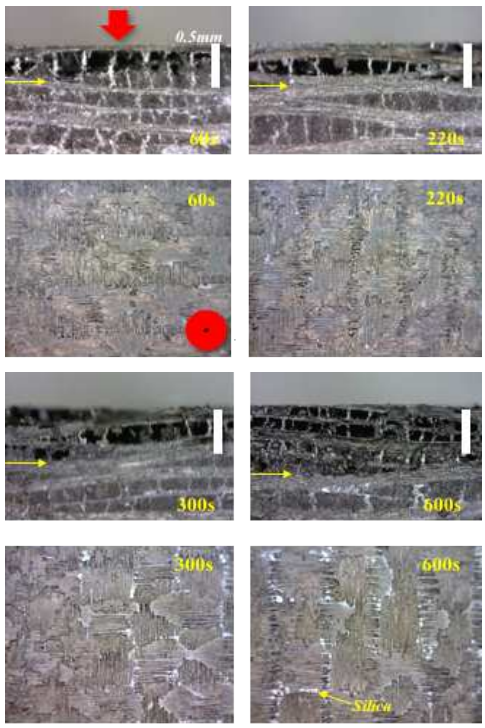

Fig. 1 Cross sectional observation after torch test of C/SiC composites

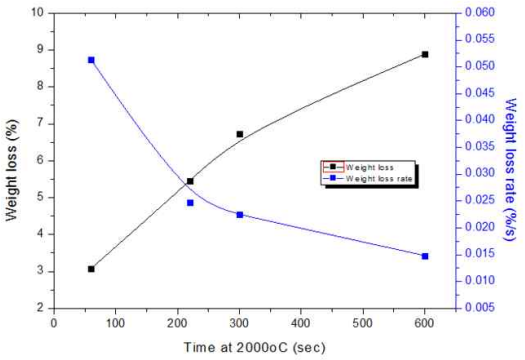

Fig. 2 Weight loss and loss rate according to torch test time

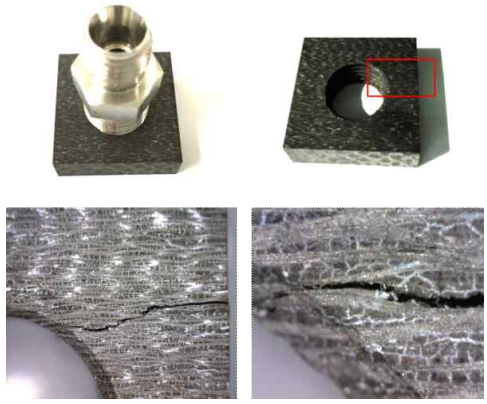

Fig. 4 Interlaminar crack after torque test

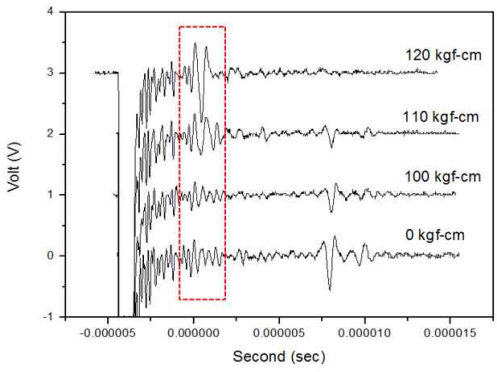

Fig. 3 A-scan ultrasonic pulse result during torque test

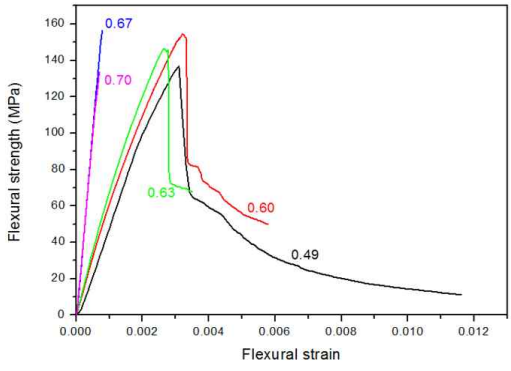

Fig. 5 3-point flexural strength-strain curve with various fiber volume fraction

Fig. 3에는 각 토크별 초음파 탐상 결과를 나타내었는데, 110kgf • cm 이후 파손 신호가 확인되었으며, 10개의 시험편 측정 결과 125.5±31kgf • cm 이상의 토크로 fitting을 조임 시 시험편에 파손이 발생하는 것으로 나타났다. 시험 이후 표면 관찰 결과, Fig. 4와 같이 섬유 층간으로 균열이 발생한 것을 확인 할 수 있었다. z 방향 면에서 토크 하중에 의한 파손은 섬유 적층 층간으로 발생 하였으나, xy plane의 경우는 이보다 더 높은 하중 범위에서 파손이 발생 할 것으로 예측 된다.

2.4 복합소재 섬유 체적비 연구

복합소재의 섬유 체적비에 따른 특성 변화 연구를 위해 탄소섬유/페놀수지 복합소재 제조 시 다양한 성형 압력을 적용해 0.49~0.7의 섬유체적비를 갖는 복합소재를 제조 하였으며, 각 조건 시험편의 3점 굽힘 강도 응력-변형률 곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 굽힘강도는 섬유 체적비를 증가시킴에 따라서 함께 증가 할 것으로 예측하였으나, 실제 측정 결과에서는 0.56 이후 다시 감소하는 경향을 보였다. 또한, 섬유강화 세라믹 복합소재의 장점이라 할 수 있는 최대 응력 이후 fiber pull-out 현상에 의한 파괴 지연 효과 역시 섬유 체적비의 증가에 따라 점차 감소하는

것을 확인 하였다. 이러한 파괴 지연 효과는 섬유 체적비 0.67 이상의 복합소재에서는 전혀 나타나지 않아 섬유강화 복합소재로서의 기능이 사라진 것으로 나타났다.

Fig. 6에는 섬유 체적비별 복합소재의 단면에 대한 SEM 과 파단면 분석 결과이다. 파단면의 경우 섬유 pull-out 현상이 낮은 섬유 체적비의 경우 매우 잘 형성 된 것이 확인 되었으나, 높은 섬유 체적비의 시편의 경우 취성 파괴가 발생한 것으로 나타났다. SEM 결과 낮은 섬유 체적비 시편의 경우 하중이 전달 되어야 할 탄소섬유가 segment 내에서 잘 존재하고 있는 것을 확인 할 수 있으나, 높은 섬유 체적비 시편의 경우 segment 내부 까지 용융된 Si가 침투하여 탄소섬유와 반응한 것으로 나타났다. 이로 인해 탄소섬유에 반응 손상이 발생하고, 하중 인가 시 취성 파괴가 발생한 것으로 판단된다. 섬유 체적비를 높일수록 내부에 생성되는 잔류응력이 함께 증가하고, 탄화 공정에서 잔류응력에 의한 미세균열 발생량의 증가가 원인으로 판단된다[5].

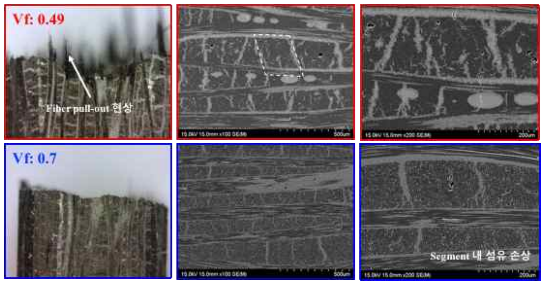

Fig. 6 SEM observation after LSI process with different fiber volume fraction

3. 결론

기존 스크램 제트 연소기에 적용되는 금속 소재를 고온 내열성 및 비강도가 우수한 섬유강화 세라믹 복합소재로 대체하기 위한 연구를 수행 하였으며, 연소 효율 향상을 위해 내부 유로를 갖는 재생 냉각형 구조 연구도 함께 수행 하였다.

섬유강화 세라믹 복합소재의 연소 환경 저항성 확인을 위해 2000℃ 토치삭마 시험을 수행 하였으며, 표면 0.5mm 정도의 낮은 삭마율을 보여 연소기 실제 적용에 적합함을 확인 하였다. 또한, 유로 내 연료 주입을 위한 fitting 조임 하중 한계 값을 도출 하였으며, 비강도를 더욱 향상시키기 위한 최적 섬유 체적비 값을 함께 확인 하였다.

참 고 문 헌

1. Lina, P., Guoqiang, H., and Peijin, L., "Experimental and Nuumerical Investigation of Active Cooling Ceramic Matrix Composite for Ramjet Propulsion System," 45*th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Colorado, Denver, U.S.A., Aug. 2009.
2. Lim, B.J., Lee, K.J., Kim, J.G., Yang, S.H. and Kim, H.T., "Hydrocarbon Fuel Heating Experiments Simulating Regeneratively Cooled Channels of LRE Combustor," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 11, No. 5, pp. 78-84, 2007.
3. Bouchez, M. and Beyer, S., "PTAH-SOCAR Fuel-Cooled Composite Materials Structure" *Progress in Propulsion Physics*, Vol. 1, pp. 627-644, 2009.
4. Bohrk, H., and Beyermann, U., "Secure tightening of a CMC fastener for the heat shield of re-entry vehicles," Composite Structures, Vol. 92, pp. 107-112, 2010.
5. Zhao, L, Warrior, N., and Long, A., "Analysis of Residual Stress in Fibre Reinforced Polymer Composites," 16*th International Conference on Composite Materilas*, Kyoto, Japan, 2007.