

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(9), 735-741(2018)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.9.735

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

초고속 카메라와 삼차원 표면 측정기를 이용한
삭마 재료의 정량적 표면 침식 분석

최화영*, 노경욱*, 천재희*, 신의섭**

Quantitative Analysis for Surface Recession of Ablative Materials
Using High-speed Camera and 3D Profilometer

Hwa Yeong Choi*, Kyung Uk Roh*, Jae Hee Cheon* and Eui Sup Shin**

Department of Aerospace Engineering, Chonbuk National University**,**

ABSTRACT

In this paper, the surface recession of ablative materials was quantitatively analyzed using a high-speed camera and a three-dimensional profilometer. The ablation tests of the graphite and carbon/phenolic composite samples were performed using a 0.4 MW arc-heated wind tunnel for simulating the atmospheric re-entry environment. The real-time images during the ablation test were captured by the high-speed camera, and analyzed to calculate the surface recession and recession rate. Also, the surface data of samples were obtained using a three-dimensional profilometer, and the surface recession was precisely calculated from the difference of height between the surface data before and after the test. It is effective to complement the two measurement results in the comprehensive analysis of surface recession phenomena.

초 록

본 논문에서는 초고속 카메라와 삼차원 표면 측정기를 이용하여 삭마 재료의 표면 침식량을 정량적으로 분석하였다. 대기권 재진입 환경을 모사하기 위해 0.4 MW 아크 가열 풍동을 이용하여 흑연과 탄소/페놀릭 복합재료의 삭마 실험을 수행하였다. 초고속 카메라를 이용하여 실시간 삭마 실험 영상을 획득하고, 이를 분석하여 침식량과 침식률을 산출하였다. 또한, 삼차원 표면 측정기를 이용하여 삭마 전후 시편의 표면 형상을 측정하였으며, 시편의 높이 차이로부터 침식량 분포를 정밀하게 산출하였다. 이를 통해 표면 침식 현상을 종합 분석하는데 있어서 두 측정 결과를 상호 보완하는 것이 유효함을 확인하였다.

Key Words : High-speed Camera(초고속 카메라), Three-dimensional Profilometer(삼차원 표면 측정기), Ablation(삭마), Surface Recession(표면 침식)

† Received : June 12, 2018 Revised : August 6, 2018 Accepted : August 27, 2018

** Corresponding author, E-mail : esshin@jbnu.ac.kr

I. 서 론

대기권을 재진입하는 우주 비행체는 공력 가열 현상으로 인해 고온 환경에 노출되어 극심한 열이 구조물에 전달된다. 이러한 열로부터 비행체 내부를 보호하기 위해서는 열 보호 시스템(thermal protection system, TPS)이 요구된다[1]. 열 보호 시스템에 사용되는 탄소/페놀릭, 탄소/탄소 복합 재료 등과 같은 삭마 재료는 재진입 환경에서 표면 물질을 소모함으로써 외부에서 유입되는 많은 열에너지를 소산시키는 삭마(ablation) 현상을 겪는다[2]. 이 현상은 표면 침식과 같은 재료 소모와 함께 열분해, 수축 및 팽창 등 열화학적 변화를 수반한다[3]. 이 중 표면 침식량은 열 보호 시스템의 두께를 결정하기 때문에 설계 단계에서 주요 인자로써 고려되어야 한다[4].

삭마 재료의 표면 침식량을 측정하기 위해 다양한 장비가 사용되어 왔다. 고전적으로 자 혹은 버니어 캘리퍼스(vernier calipers) 등의 계측 장비를 이용한 직접적인 측정법이 사용되어 왔다[5]. 그러나 이 방법은 측정 과정에서 시편과의 접촉을 통해 측정이 진행되기 때문에 강도가 낮아진 시편 표면에 손상을 줄 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 최근에는 디지털 일안 반사식 카메라(DSLR, digital single-lens reflex)[6], 초고속 카메라(high-speed camera)[7], 삼차원 표면 측정기(three-dimensional profilometer)[8]와 같은 비접촉식 장비가 사용되고 있다. 이러한 분석 장비는 표면 침식량 분석에 각각의 장점을 갖는 반면 장비간의 비교 검증이 부족하다.

본 논문에서는 0.4 MW 아크 가열 풍동을 이용하여 흑연과 탄소/페놀릭 복합재료의 삭마 실험을 수행하였다. 실험 중 초고속 카메라 촬영을 통해 삭마 재료의 침식 양상을 확인하였다. 또한 삼차원 표면 측정기를 이용하여 삭마 실험 전후 시편의 표면을 측정하고 침식량을 분석하였다. 표면 침식량 분석의 신뢰도 향상을 위해 두 장비를 이용하여 측정된 데이터를 비교 분석하였다.

II. 삭마 실험 및 측정 절차

2.1 재료 및 시편

삭마 실험에 사용된 재료는 흑연(GR, graphite)과 탄소 섬유 강화 페놀릭 기지 복합재료(CP, carbon fiber reinforced phenolic matrix composites)이다. 시편의 지름은 20 mm이고, 모서리에 필렛(fillet)이 있는 원통형이다. 또한

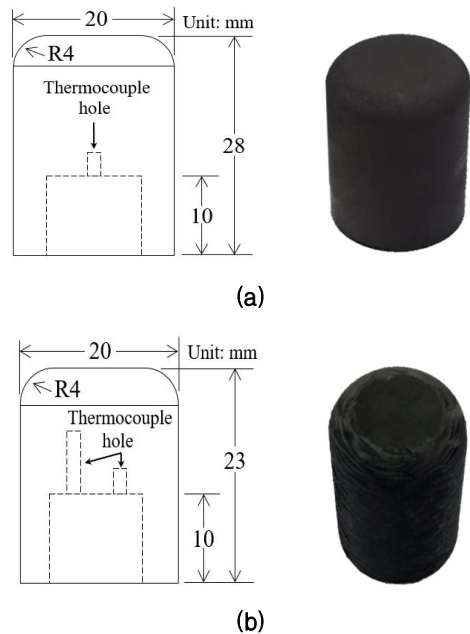


Fig. 1. Geometries and photographs of test samples: (a) GR, (b) CP

내부 온도 측정을 위해 시편 내부에 열전대를 삽입할 수 있도록 지름 1.6 mm의 작은 구멍을 설계하였다. 시편의 자세한 도면과 사진은 Fig. 1과 같다.

2.2 삭마 실험

삭마 실험은 전북대학교 고온플라즈마응용연구센터에서 보유하고 있는 0.4 MW 아크 가열 풍동을 이용하여 수행하였다. 풍동의 개략도는 Fig. 2와 같다. 플라즈마 유동을 생성하기 위하여 시험실(test chamber)과 분절형 아크 히터(segmented arc-heater) 내부를 진공 상태로 조성하고, 분절형 아크 히터에 아르곤과 공기를 공급하였다. 유동 조건은 Fig. 3과 같이 노즐로부터 85 mm 떨어진 시편 표면의 정체점을 기준으로 측정하였으며, 이를 Table 1에 제시하였다. 시편 GR과 CP의 유동 노출 시간은 각 42, 45초이다.

Table 1. Ablation test conditions

Input conditions	Power	83 kW
	Current	70 A
	Static pressure	10 mbar
	Mass flow	4.02 g/s
Flow conditions	Heat flux	3 MW/m ²
	Mach number	2.0

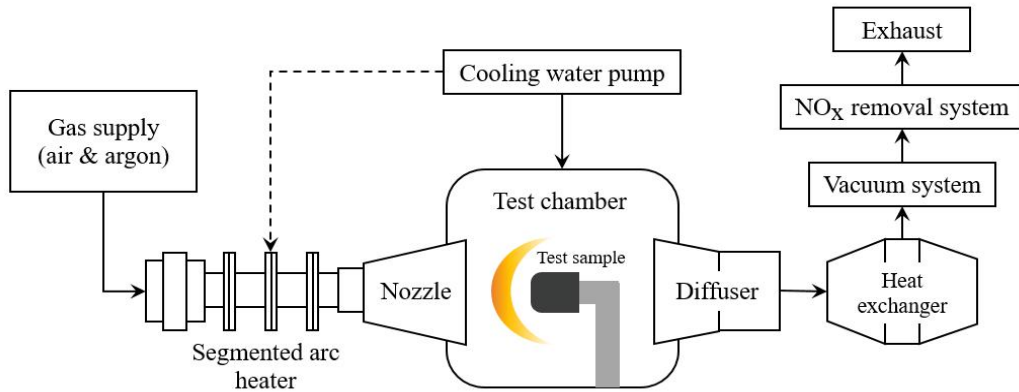


Fig. 2. Schematic diagram of arc-heated wind tunnel

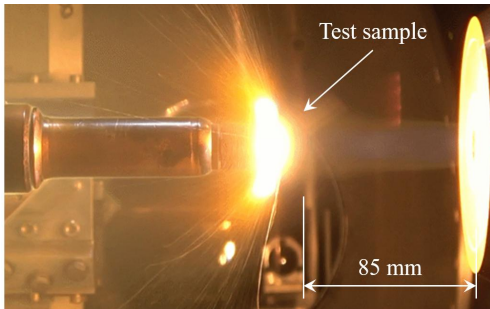


Fig. 3. Photograph of ablation test in arc-heated wind tunnel

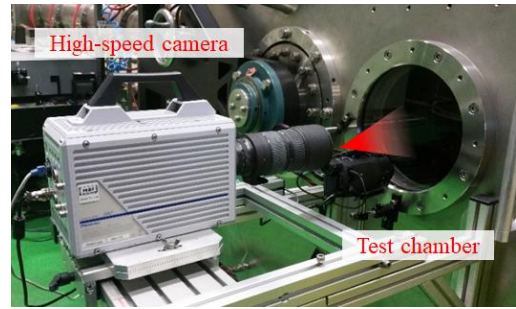


Fig. 4. Setup of high-speed camera for surface measurement

2.3 표면 측정 절차

초고속 카메라(FASTCAM SA2, Photron Co.)와 삼차원 표면 측정기(IFM G4, Alicona Co.)를 사용하여 시편 표면을 촬영하였다. 각 장비의 사양은 Table 2와 같다.

Table 2. Specification of equipments

High-speed camera (FASTCAM SA2)	Image sensor	CMOS
	Shot speed	2,048 × 2,048 pixels at 1,080 fps 1,920 × 2,080 pixels at 2,000 fps
Profilometer (IFM G4)	Measurement principle	non-contact, optical, based Focus-variation
	Vertical resolution	2.5x at 2300 nm, 5x at 410 nm, 10x at 250 nm, 20x at 100 nm

초고속 카메라는 Fig. 4와 같이 설치되어 삭마 실험이 수행되는 동안 플라즈마 유동에 노출되는 시편의 표면 변화를 측면에서 촬영하였다. 이 장비는 10 μm 픽셀 센서를 사용하며, 최소 2.46 ns 까지 짧은 노출을 설정할 수 있어 일반적인 카메라에 비해 시편의 변화 양상을 면밀히 분석할 수 있다. 또한 실시간으로 삭마 실험 과정을 촬영하기 때문에 표면 침식량 뿐만 아니라 표면 침식률의 산출이 가능하다.

사용된 삼차원 표면 측정기는 초점 변화(focus variation) 원리를 이용한 광학식 측정 장비이다. 비 접촉식 광학 센서를 사용하여 시편 표면에서 반사되는 가시광선을 검출함으로써 미세한 표면 형상을 측정할 수 있으며, 최대 10 nm의 해상도 까지 측정 가능하다. 삼차원 표면 측정기를 이용한 삭마 재료의 표면 측정 과정은 Fig. 5와 같다. 실험 진후 동일한 위치에서 측정하기 위해 치공구(fixture)에 시편을 고정하고 기준면과 측정 범위를 설정하였다. 표면 측정기와 연동된 측정 소프트웨어(IF-Laboratory Measurement Module 5.1)를 이용하여 빛의 노출 시간, 측정 영역, 해상도 등을 설정할 수 있다. 이를 통해 시편 표면

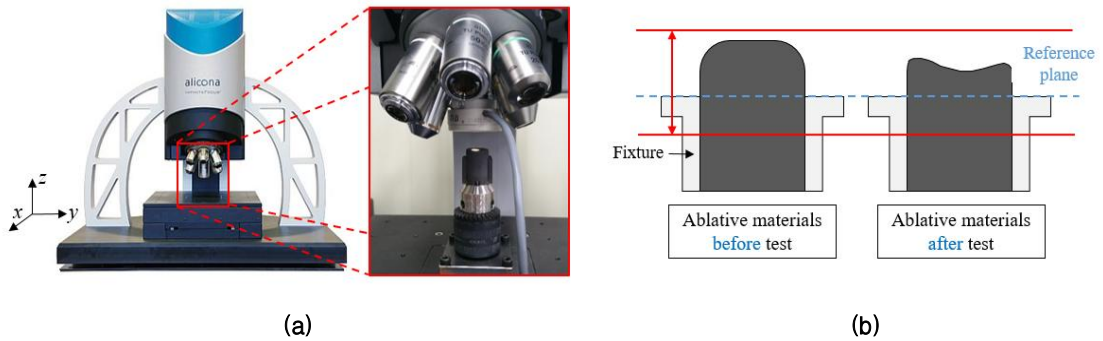


Fig. 5. Surface measurement procedure of three-dimensional profilometer: (a) Setup of test sample and (b) Setup of reference plane

의 기하학적 정보를 좌표 데이터로써 저장하여 정량적인 표면 분석이 가능하다. 측정된 좌표 데이터를 통해 표면 침식량 및 체적 손실, 표면 거칠기 분석 등의 다양한 삭마 특성을 산출할 수 있다.

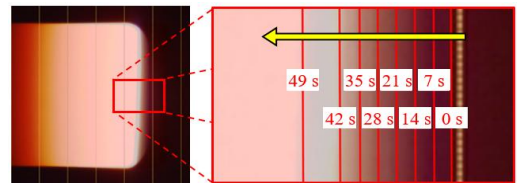
III. 표면 침식 분석

3.1 초고속 카메라 영상 분석

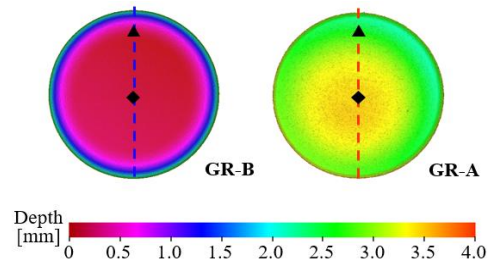
초고속 카메라를 이용하여 삭마 실험동안 시편을 측정하였다. 측정에 사용된 초고속 카메라는 프레임률 86,400 fps(frame per second)까지 촬영이 가능하지만 프레임률을 크게 하면 큰 저장 공간이 요구될 뿐만 아니라 분석에 있어서 많은 시간이 요구된다. 따라서 흑연 시편 250 fps, 탄소/페놀릭 복합재료 시편 125 fps으로 설정하여 촬영하였다. 표면 침식량을 산출하기 위하여 흑연과 탄소/페놀릭 복합재료의 촬영 영상을 각각 7초, 9초 간격으로 샘플링 하였다. Fig. 6과 Fig. 7의 (a)는 일정한 시간 간격으로 샘플링한 영상을 겹쳐 표면 침식 변화를 가시화한 그림이다. 영상이 0초일 때 시편 표면의 중앙부를 기준선으로 설정하고, 픽셀 단위로 기준선과의 거리를 산출하였다. 측정한 거리를 mm 단위로 환산하여 시간에 따른 표면 침식량을 산출하였다. 삼차원 표면 측정기는 시편이 식은 후의 표면을 측정하기 때문에 이와 비교하기 위해 각 시편의 영상을 50초까지 추가적으로 분석하였다.

3.2 삼차원 표면 측정기 데이터 분석

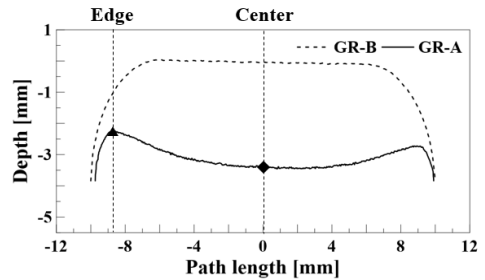
삭마에 의한 표면 침식량을 산출하기 위해 삼차원 표면 측정기를 이용하여 삭마 실험 전후의 시편 표면을 측정하였다. 표면 측정을 위해 5배율의 대물렌즈를 사용하였고, 종/횡 방향의 분해



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Surface recession analysis of GR: (a) High-speed camera image, (b) Depth contours, (c) Profiles of sample before and after the ablation tests

능을 각각 1 μm , 10 μm 로 설정하여 미세한 형상을 측정하고자 하였다. 삼차원 표면 측정기의 후

처리 소프트웨어(IF-Measure Suit 5.1)를 사용하여 표면 침식량을 산출하고 가시화하였다. 삭마 실험 전후 시편의 표면 좌표 데이터는 직교 좌표계의 x, y, z 성분으로, 약 5백만 개 이상의 포인트(point)로 구성된다. Fig. 6과 Fig. 7의 (b)는 흑연 시편과 탄소/페놀릭 복합재료 시편의 표면 형상 데이터를 깊이 분포로 나타낸 그림이다. 이를 통해 삭마 전후 표면 변화를 시각적으로 확인할 수 있다. 중앙 기준선 영역의 단면 윤곽(profile)을 추출하여 Fig. 6과 Fig. 7의 (c)에 도시하였다. 가장자리의 한 지점(▲)과 열 유속이 집중되는 중앙 부분(◆)을 샘플링하여 표면 침식량을 산출하였다.

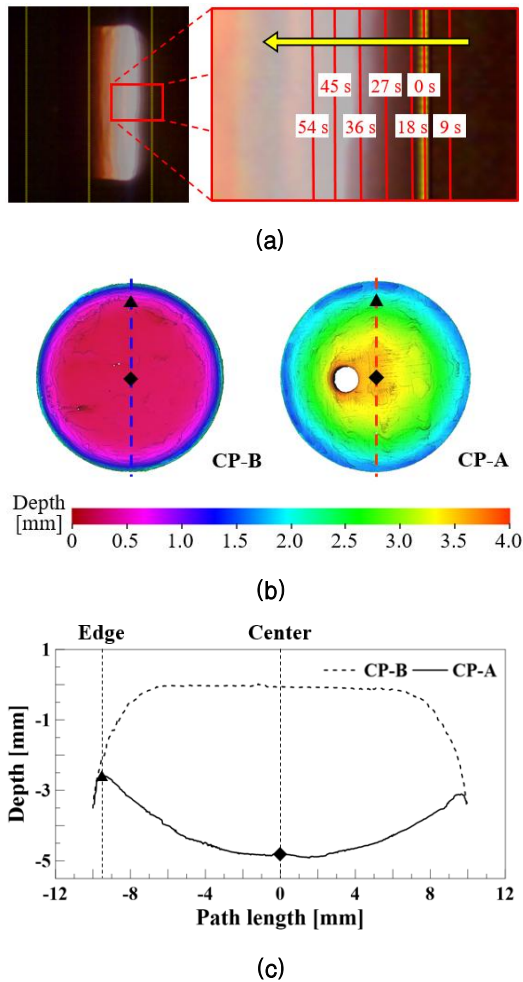


Fig. 7. Surface recession analysis of CP: (a) High-speed camera image, (b) Depth contours, (c) Profiles of sample before and after the ablation tests

3.3 표면 침식량 비교 분석

Figure 8은 초고속 카메라와 삼차원 표면 측정기를 이용하여 산출한 표면 침식량 결과이다. 여기서 기호 A, D는 유동 노출 시간 이후 초고속 카메라로 측정된 침식량이고, B, E는 삼차원 표면 측정기로 측정된 시편 중앙 지점의 침식량이다. 초고속 카메라를 이용하여 측정한 침식량과의 경향성 비교를 위해 삼차원 표면 측정기의 침식량은 시편 표면의 최대높이를 기준으로 측정하였다. C, F는 삼차원 표면 측정기로 측정된 시편 가장자리 지점의 침식량을 의미한다.

초고속 카메라로 촬영된 영상 분석을 통해 흑연 시편이 플라즈마 노출 시간에 따라 선형적으로 침식하는 것을 확인하였으며, 침식률은 0.037 mm/s이다. 42초일 때의 침식량은 1.505 mm이고, 유동 노출 시간 이후인 50초일 때의 침식량(A)은 2.055 mm로 차이를 보였다. 이는 유동 노출 이후 흑연이 식으면서 수축이 발생한 것으로 판단된다. 탄소/페놀릭 복합재료 시편이 45초일 때의 침식량은 1.679 mm이고, 유동 노출 시간 이후인 50초일 때의 침식량(D)은 2.207 mm이다. 흑연과 달리 유동 노출 초기부터 9초까지 팽창한 후 침식하는 경향을 보였으며 이는 시편 내부에 열분해로 인해 기공이 생성되어 팽창한 것으로 보인다. 이후 선형적으로 침식이 발생하였고 이때의 침식률은 0.076 mm/s이다.

삼차원 표면 측정기는 표면의 어느 지점에서나 침식량을 산출할 수 있지만, 대표적으로 Fig. 6과 Fig. 7에서 중앙 지점과 가장자리 지점을 샘플링하여 표면 침식량을 산출하였다. 흑연 시편의 중앙 지점 침식량(B)은 3.372 mm이고 가장자리 지점의 침식량(C)은 2.241 mm이다. 탄소/페놀릭 복합재료 시편의 중앙 지점 침식량(E)은 4.811 mm이고 가장자리 지점의 침식량(F)은 2.579 mm이다.

삼차원 표면 측정기를 이용한 침식량 결과는 시편이 완전히 식은 후에 측정되었기 때문에 유동 노출 시간 이후의 초고속 카메라 침식량 결과와 비교하였다. 흑연 시편의 침식량 A와 B는 64.1% 차이가 있었고, A와 C는 9.1% 차이가 있었다. 탄소/페놀릭 복합재료의 침식량 D와 E는 118.0% 차이가 있었고, D와 F는 16.9% 차이가 있었다. 두 시편 모두 초고속 카메라로 측정된 침식량과 삼차원 표면 측정기로 산출된 침식량이 차이가 있었다. 이는 플라즈마 유동의 지름(16 mm)이 시편의 지름(20 mm)보다 작기 때문에 열 유속이 시편 중앙에 집중되어 차이를 보인 것으로 판단된다. 이를 통해 표면 전반에 걸쳐 비

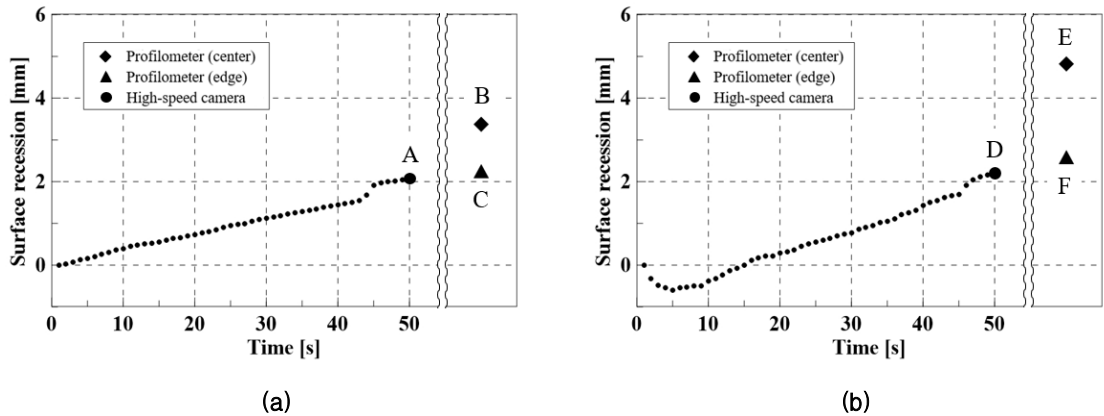


Fig. 8. Comparison of surface recession between high-speed camera and three-dimensional profilometer: (a) GR, (b) CP

균일한 침식 양상이 보일 때 모든 위치에서 시편 표면을 측정할 수 있는 삼차원 표면 측정기의 유용함을 확인하였다. 가장자리 지점의 차이는 샘플링 위치에 영향을 받기 때문에 샘플링 기준을 명확히 함으로써 두 결과의 오차는 감소할 것으로 보인다.

초고속 카메라는 실시간으로 촬영되기 때문에 표면 침식에 대한 직관적인 분석에 도움이 되며, 표면 침식량 뿐만 아니라 침식물 또한 산출 가능하다. 삼차원 표면 측정기는 표면의 어느 지점에서나 침식량을 산출 가능하고, 고해상도로 표면을 측정할 수 있어 면밀한 표면 분석에 유용하다. 또한 표면의 좌표 데이터를 통해 거칠기 변화, 체적 손실 등과 같은 결과를 추가적으로 산출 가능하다. 따라서 삭마 재료의 표면 변화를 정량적으로 분석하기 위해서는 두 장비의 강점을 반영한 표면 분석이 수행되어야 한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 초고속 카메라와 삼차원 표면 측정기를 이용하여 삭마 재료의 표면 침식량을 정량적으로 산출하였다. 0.4 MW 아크 가열 풍동을 이용하여 흑연 및 탄소/페놀릭 복합재료 시편의 삭마 실험을 수행하였다. 초고속 카메라는 플라즈마 유동에 의한 표면 침식을 실시간으로 촬영하기 위해 사용하였고, 촬영된 영상 분석을 통해 흑연 시편이 선형적으로 침식한 후 유동 노출 시간 이후에 수축이 발생함을 확인하였다. 탄소/페놀릭 복합재료 시편은 0~5초까지 팽창하였으며, 이후 일정한 표면 침식률을 보였다. 삼차원 표면 측정기는 삭마 실험 전후 시편의 표면을 측

정하기 위해 사용되었고, 측정된 데이터로부터 산출한 표면 침식량은 시편의 가장자리와 중앙에서 차이를 보였다. 이는 시편의 지름이 유동의 지름보다 크기 때문에 유동이 중앙부에 집중되어 나타난 결과이다.

초고속 카메라는 표면의 실시간 촬영을 통해 표면 침식 양상을 확인할 수 있고, 표면 침식물을 산출할 수 있지만 위치가 고정되어 모든 위치에서의 침식량을 산출할 수 없다. 삼차원 표면 측정기는 시편 표면의 기하학적 좌표 데이터를 측정함으로써 모든 위치에서의 표면 침식량을 산출할 수 있지만 삭마 재료의 실시간 침식 양상을 파악할 수 없다. 따라서 표면 침식 현상을 종합 분석하는데 있어서 두 측정 결과를 상호 보완하는 것이 유효함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (No. 2014M1A3A3A02034622)

References

- 1) Splinter, S. C., Bey, K. S., and Gragg, J. G., "Comparative Measurements of Earth and Martian Entry Environments in the NASA Langley HYMETS Facility," *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Jan. 2011.

- 2) Yun, N. G., Jung, B., and Cho, Y. J., "Ablative Composite Materials for Rocket propulsion System," *Composites Research*, Vol. 3, No. 2, 1990, pp. 57-64.
- 3) Zahra, E., Farchad, Y., and Mir, A. M., "Thermal and Mechanical Properties of Phenolic-based Composites Reinforced by Carbon Fibres and Multiwall Carbon Nanotubes," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 72, 2015, pp. 22-31.
- 4) David, M. D., Michael, W. O., Michael, D. B., and Matthew, M., "Understanding High Recession Rates of Carbon Ablators Seen in Shear Tests in an Arc Jet," *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Aerospace Sciences Meeting*, AIAA Paper 2010-1177, Orlando, Florida, USA, 2010.
- 5) Albert, T., Carl, F., Michael, R., and Joseph, R., "Development of a closed pore insulation material," *NASA Contractor Report 2254*, Washington, DC, 1973.
- 6) Stefan, L., and Thomas, R., "Experimental Investigation of Photogrammetric Surface Analysis of Heat Shield Materials during Plasma Wind Tunnel Testing," *7th European Workshop on Thermal Protection Systems and Hot Structures*, Noordwijk, the Netherlands, 2013.
- 7) Helber, B., Asma, C., Babou, Y., Magin, T., and Chazot, O., "Experimental Investigation of the Material Response of Carbon Composite Ablators in the VKI Plasmatron Facility," *17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, 2011.
- 8) Kim, N. J., Oh, P. Y., and Shin, E. S., "A Study on Surface Properties of Ablative Materials from 0.4MW Arc-heated Wind Tunnel Test," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 43, No. 12, 2015, pp. 1048-1053.