

4 방향성 탄소/탄소 복합재의 물성 및 삭마특성 연구

이점균* · 김정일* · 주혁중*

A study of mechanical and ablative properties for 4-D carbon/carbon composites

J. K. Lee*, J. I. Kim* and H. J. Joo*

KEY WORDS : Carbon/carbon composite, Ablation, Rocket nozzle

ABSTRACT

로켓엔진에서 노즐은 추력을 발생하고, 단위 면적당 열 전달이 최대가 되는 곳으로 구조적으로 가장 취약한 부분이다. 이런 가혹한 조건에서 사용되어질 수 있는 4D 탄소/탄소 복합재를 제조하였으며, 고밀도화시, 탄화압력은 100bar 와 900bar 에서 각각 시행되었다. 만들어진 시편의 밀도는 1.5~1.9g/cm³ 이었다. 실제 로켓을 모사할 수 있는 지상연소시험을 통해 밀도에 따른 삭마율을 계산한 결과, 밀도가 높을수록 삭마율은 감소하였다. 또한 3-point bending test 를 통해 굽힘강도(flexural strength)를 측정하였으며, 굽힘강도를 개선시켜주었다.

1. 서론

최근 우주항공산업의 발달과 함께 이동통신과 관련된 위성의 수요가 급증하고 있으므로, 보다 나은 물성을 지닌 소재, 보다 가혹한 조건에서 견딜 수 있는 경량 및 초고온 재료가 요구되고 있다. 특히 로켓의 노즐목(throat) 부분은 가스의 압력과 밀도가 비교적 높고, 가스의 속도가 음속이 되는 곳이며, 열충격과 침식을 많이 받을 뿐만 아니라 노즐벽으로 전달되는 열량이 가장 큰 곳이다. 노즐의 내부벽은 열전도에 의해 산화되고, 산화되어 약해진 부분이 고속의 연소가스에 의해서 깎여 나가는 삭마현상을 일으키게 된다. 그러므로, 노즐설계시에 높은 온도에서 오랫동안 견딜 수 있는 소재를 선정해야 하는데 이러한 요구에 부응할 수 있는 재료가 탄소/탄소 복합재이다. 이 재료는 초고온에서의 강도유지와 열충격에 대한 저항성이 우수하므로, 군사용 로켓과 우주왕복선을 쏘아 올

릴 때 사용되는 다단로켓의 노즐에 필수적인 재료이다.

로켓의 성능은 노즐 목 면적의 변화에 의해 많이 좌우되므로, 모터 설계 시에 노즐의 삭마로 인한 면적 변화를 반드시 예측하여야 한다. 노즐의 삭마율을 결정하기 위한 최선의 방법은 실제 로켓(full-scale)을 이용하여 연소시험을 하는 것이다. 그러나 비용과 시간이 상당히 소요되므로, 실제 로켓을 모사할 수 있는 경제적이고 효율적인 소형 로켓 엔진을 이용하여, 직접 연소실험 하는 방법이 도입되고 있다.

본 연구에서는 탄화압력이 각각 100bar 와 900bar 에서 만들어진 시편을 제조하여, 재료의 밀도와 탄화압력에 따른 탄소/탄소 복합재의 굽힘강도와 삭마특성을 연구하였다.

2. 실험

2.1. 시편 제조

4 방향성 탄소/탄소 복합재를 제조하기 위하여

* 충남대학교 고분자공학과

사용한 보강섬유는 PAN 계 고강도 섬유로서 국내 태광산업(주)의 TZ-307 이며, 이 재료를 이용하여 프리폼을 직조하였다. 4D 프리폼의 제작을 위하여 Z 축 방향을 축으로 하여 X, Y, U 축 방향으로 24K의 섬유를 60° 씩 번갈아 보강한 후, Z 축방향으로 48K의 섬유를 보강하여, 부피분율 50%의 프리폼을 제작하였다.

제조된 Preform 은 PIC 반응기 속에서 정우석탄 화학(주)의 석탄 타르 핏치로 함침되어졌다. 탄화압력은 각각 100bar 와 900bar 의 압력을 가해주었으며, 650℃ 까지 올려 10 시간 동안 코우크스화 시키고, 처리되지 않은 미반응물 제거를 위해 탄화로부터 1000℃ 까지 탄화시켰다.

탄화된 시편은 2400℃ 까지 흑연화 시켰으며, PIC, 후탄화, 흑연화 과정의 반복을 통해 얻고자 하는 밀도의 시편을 제조하였다. 전체적인 실험 절차는 Fig. 1 에 나타내었다.

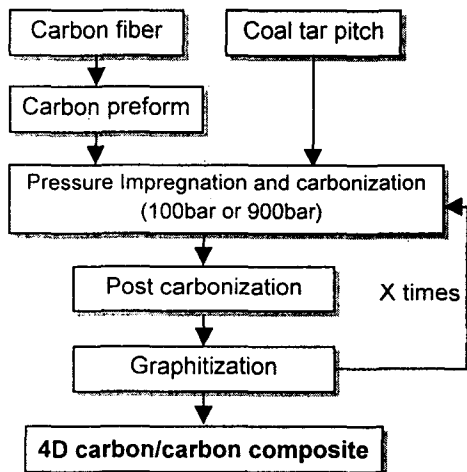


Fig. 1. Schematic flow chart for 4D c/c composite.

2.2. 굽힘강도 시험

탄화 압력에 따른 탄소/탄소 복합체의 굽힘강도를 알아보기 위해 LLOYD 사의 만능시험기(UTM)인 LR30K 를 이용하여 3-점 굽힘에 의한 방법으로 시험하였다. 굽힘강도 시험은 ASTM D790 의 방법으로 시행되어졌는데, 시편두께 4mm 를 기준으로 하여, 폭 10mm, 길이 80mm 의 시편을 제조하였고, 스핀길이는 64mm 로 정해진다. 이때 사용된 cross-head 속도는 2.1mm/min 이었다.

2.2. 삭마 시험

액체로켓의 실험 장치는 일반적으로 엔진부 (인젝터, 연소실, 노즐, 점화장치), 공급부(추진제 저장 및 공급 장치, 연소시험대), 그리고 제어부 (제

어장치, 자료처리 장치) 등으로 구성된다.

연소시험은 Fig. 2 와 같은 시험용 액체 로켓 엔진에서 hot gas generator 를 사용하여 실제 상황과 유사한 상태에서 연소시험을 하였다. 실험에 사용될 로켓은 액체산소와 kerosene 을 추진제로 하는 coaxial swirl 형태의 인젝터를 장착하고, 추력은 100lbf 정도로 하였다. 로켓의 설계는 성능을 위주로 한 것이 아니고 재질을 시험하기에 편하도록 하였으며, 연소압력은 330 psia 정도에서 시험하였고, 연소실 내부는 graphite 판을 장착하여 장시간 연소에 견딜 수 있도록 하였다.

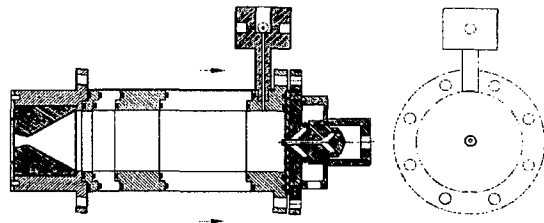


Fig. 2. Schematic diagram of thrust chamber

점화장치는 주 추진제를 점화시키기 위하여 메탄과 산소를 추진제로 하는 일종의 소형 로켓 형태를 사용하였다. 여기에는 고전압과 연결된 spark plug 에서 발생하는 spark 에 의해 점화가 되도록 구성하였다.

노즐은 실험하고자 하는 시편을 손쉽게 삽입·이탈할 수 있도록 설계, 제작하였다. Table 1 은 hot gas generator 의 설계 조건이다.

Table 1. Disposition of hot gas generator.

| | | |
|------------------|------------------------------|-----------------|
| Thrust | 100 lbf | |
| Chamber pressure | 330 psia | |
| Propellants | Oxidizer | LO ₂ |
| | Fuel | Kerosene |
| Nozzle | Throat (10mm) Exit (24mm) | |
| O/F ratio | 2 | |

이와 같은 조건에서 10 초 동안 연소시험을 수행하였으며, 연소시험 후 profile projector 를 사용하여 시편을 15° 간격으로 12 등분한 지점의 직경을 측정하고, 이를 평균하여 노즐목 평균직경을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 밀도변화

Fig. 3 은 탄화압력에 의한 시편의 bulk density 변화를 측정된 것을 나타내었다. 탄화압력이 100bar 에서 900bar 로 상승됨에 따라 밀도증가율이 크게 향상되어서, 900bar 의 압력에서는 4 번의 고밀도화 공정으로 밀도가 1.9g/cm³ 에 도달했다. 이것은 가해진 압력이 100bar 일 경우 기하학적으로 섬유 bundle 과 bundle 이 교차하는 공간이 함침핏치로 충분히 채워지지 못한 반면에 900bar 의 압력하에서는 상당히 높은 압력이 작용하여 미세한 기공까지 함침재가 침투하여 상당히 고밀도화가 된 것을 알 수 있다.

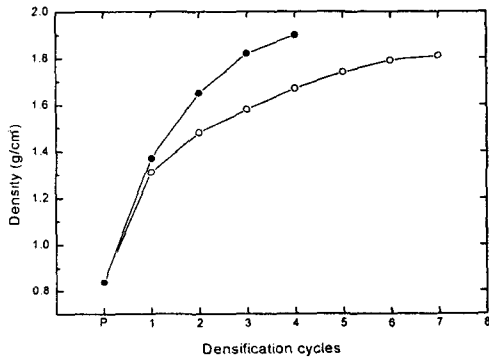


Fig. 3. Density changes of 4D c/c composite with various carbonization pressures.

3.2. 굽힘강도

Fig. 4 는 탄화압력에 의한 굽힘강도 결과를 나타낸 것이다. 900bar 에서 만들어진 시편이 조금 우수한 강도를 나타내었지만, 큰 차이는 보이지 않았다.

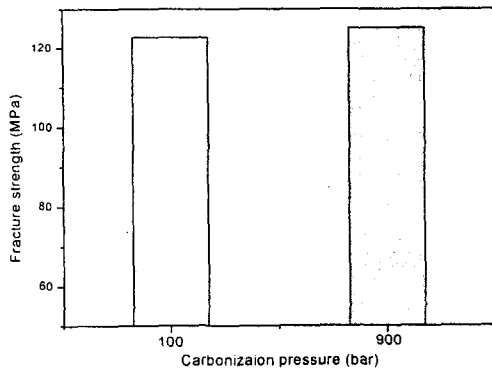


Fig. 4. Flexural strength for c/c composite according to carbonization pressure.

3.3. 삭마시험

Fig. 5 는 연소시험 동안의 연소압력의 변화를 나타낸 그림이다. (a)의 경우는 연소 중 노즐의 삭마로 인해 연소압이 급격히 떨어지는 경향을 보이는데, 이 시편은 밀도가 1.54g/cm³ 으로써, 충분히 함침되지 않은 상태로 섬유분율이 높으며, 상대적으로 결합재가 부족하기 때문에 서로의 결합력이 약하며, 또한 결합재가 섬유를 보호해주지 못하므로 일정한 연소압력을 유지 못하는 것이다. 밀도가 증가함에 따라 연소압력이 일정히 유지되는 경향을 보이는데, (c) 의 경우는 연소압력이 거의 일정하다. 이것은 밀도가 삭마특성에 중요한 인자로 작용 한다는 것을 의미한다.

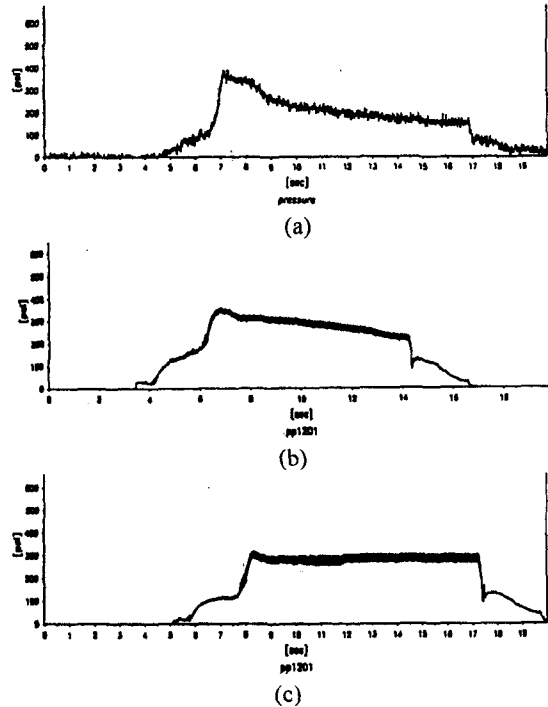


Fig. 5. Combustion pressure history of 4D c/c composite with various density. ; (a) ρ : 1.54g/cm³, (b) ρ : 1.73g/cm³ and (c) ρ : 1.90g/cm³

Fig. 6 은 연소시험 후 노즐의 각인 형상을 나타낸 그림이다. 가장 이상적인 삭마현상은 초기상태와 동일한 즉, 진원을 유지하며 삭마하는 것이지만, 어느 정도는 불규칙한 형상으로 삭마하게 된다. (a), (b) 시편은 삭마형상이 우수하게 나타난 편이며, (c)의 경우 전혀 삭마가 되지 않은 형상을 보여준다.

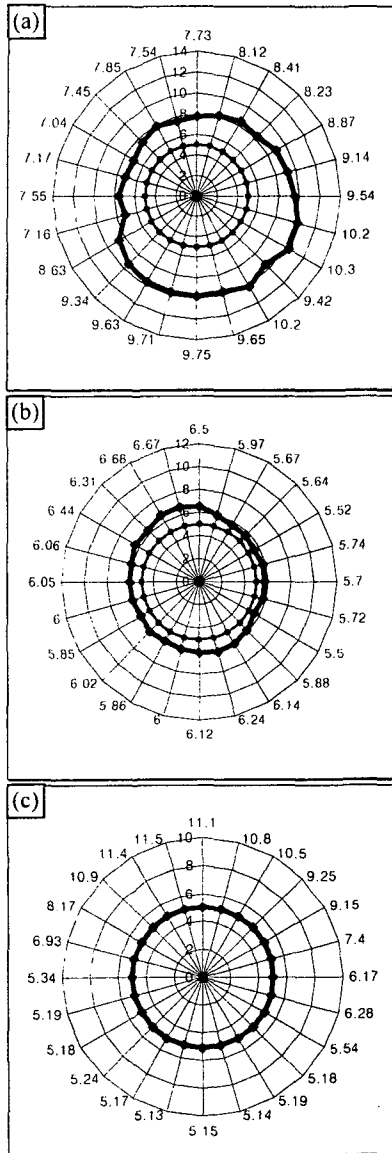


Fig. 6. Nozzle throat Ablation shape of nozzle throat with various density. ; (a) $\rho : 1.54\text{g/cm}^3$, (b) $\rho : 1.73\text{g/cm}^3$ and (c) $\rho : 1.90\text{g/cm}^3$

4. 결론

석탄 다르 핏치를 이용하여 4 방향성 고밀도 탄소/탄소 복합재를 제조하였다. 탄화압력이 100bar 에서 900bar 로 상승됨에 따라 밀도증가율이 크게 향상되어, 고밀도화 시간을 상당히 단축시켜주었다. 또한 탄화압력이 굽힘강도에 영향을 주었다.

밀도에 따른 삭마특성을 연구한 결과, 밀도가

증가하면서 삭마율은 크게 감소하였다. 또한 삭마 시험 후 삭마형상을 관찰한 결과 불규칙한 형상이 아닌, 진원과 유사한 모양으로 각여 나간 것으로 보아, 4 방향성 탄소/탄소 복합재는 등방성 특성이 우수하여, 균일한 삭마현상이 나타나는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (1999-2-30100-012-3) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1)L. Cleese, E. Fitzer, W. Huttner and L. Kinzl, Carbon, 18, (1980) 383-387.
- 2)E. Fitzer and A. Gkogkidis, "Carbon Fiber Reinforced carbon composite Fabricated by Liquid impregnation, Petroleum-Derived carbons", ACS Symposium series 303, (1986) 346-378.
- 3)J. B. Donnet et al., "Carbon fibers". Marcel Dekker, Inc, (1984) 247-250.
- 4)H. D. Batha et al., "Engineered materials handbook Composites", ASM International, (1987) 922-923.
- 5)P. Baojian et al., "Tribological characteristics of Carbon/Carbon Composites", 19th Biennial Conference on Carbon, (1989) 352-353.
- 6)Diniel E. and Donald Allendorf, "High-temperature kinetics of graphite oxidation by dissociated oxygen", AIAA. J. Vol. 3, No. 8, 1522-1523.