

4방향성 탄소/탄소 복합재의 열충격 및 삭마 특성

홍명호* · 오인석 · 최돈목 · 주혁중 · 박인서**

충남대학교 공과대학 고분자공학과, *삼양그룹중앙연구소, **국방과학연구소

Thermal Shock and Erosion Properties of 4D Carbon/Carbon Composites

Myeong-Ho Hong*, In-Seok Oh, Don-Mook Choi, Hyeok-Jong Joo, In-Seo Park**

초 록 PAN계 탄소섬유와 페놀수지를 이용하여 rod를 인발성형 한 후, 다른 섬유분율을 갖는 두 종류의 hexagonal type 4D 프리폼을 제작하였다. 석탄계 핏치를 가압함침 탄화공정을 통하여 함침한 후 탄화와 고온열처리를 하였다. 이와 같은 공정을 반복하여 고밀도화된 4D CFRC를 제조하였다.

열충격 시험 후 새로운 크랙이 생성되었을 뿐만 아니라 기존의 크랙이 확장되었으며 이와 같은 크랙들은 공기와의 접촉면적을 제공하여 중량감소를 보였다. 공기 산화 저항성은 고온열처리 공정을 거친 것이 약 20% 우수하게 나타났다.

4D CFRC의 밀도와 섬유의 분율이 높을 수록 삭마 저항성이 커지고, 삭마량은 시간에 따라 선형적으로 증가하였으며, type II가 type I보다 삭마저항성이 우수하였다. 삭마 메카니즘을 관찰한 결과, 1차적으로 기질의 탈리가 먼저 일어난 다음 섬유가 삭마되었다.

Abstract Rods were made by pultrusion method with PAN based carbon fibers and phenolic resin matrices. Two kinds of hexagonal type 4D preform were fabricated with these rods. These were impregnated with coal tar pitch matrix through the PIC process and carbonized, high temperature treated. And then, densification processes were repeated to get high densified 4D CFRC. After thermal shock test, new cracks were formed and the existed cracks were propagated. With increasing of the contact surface area in air, weight loss was occurred. The oxidation resistance of high temperature treated samples were increased about 20% than that of carbonized samples. With increment of the density and volume fraction of the 4D CFRC, the erosion resistance was increased and the erosion weight was increased linearly according to the test time. And the erosion resistance of type II was more dominant than that of type I. According to the observation of erosion mechanism, matrices were broken away earlier than reinforced fibers.

1. 서 론

탄소/탄소 복합재료(Carbon Fiber Reinforced Composites; CFRC)는 높은 열전도도, 낮은 열팽창 계수로 인하여 열충격에 대한 저항성이 우수하며 가볍고, 비산화 분위기에서는 3000K이상의 초고온에서도 열안정성과 고강도 및 고강성을 유지하기 때문에 고성능 고온재료로 평가되고 있다.¹⁾

핏치는 높은 침윤력, 침투력, 낮은 점도, 높은 탄소수율과 흑연화의 용이성 등 여러가지 장점을 갖고 있으므로 CFRC의 기질로서 널리 사용되고 있다. 또한 핏치는 상압에서 탄

화하면 탄소수율이 낮지만 가압 탄화공정을 도입하면 90% 이상의 높은 탄소수율을 얻을 수 있으며 고밀도화 공정도 단축할 수 있다^{2~4)}.

프리폼 제조시 섬유의 보강방향에 따라서 UD와 2D 그리고 3D 이상으로 분류해 볼 수 있는데, UD와 2D는 탄소섬유가 보강된 방향에 대해서는 물성이 우수하지만 다른 방향에 대해서는 낮은 물성을 갖기 때문에 응용상 제한점이 있다. 따라서 모든 방향에 대하여 균일한 물성이 요구되는 노즈콘이나 로켓노즐 등의 재료에서는 3D 이상의 형태로 사용해야만 한다.⁵⁾

3D 구조는 등방성이 약하고 bundle간의 접

작력이 약해 탈리가 일어날 수 있으며, 단힌 기공이 형성되어 고밀도화 공정이 다소 어려운 문제점이 있으나 4D 구조는 섬유층의 충진율이 이상적으로 높으며 기공이 열린 형태로 되어 있어 고밀도화시 함침효율이 높은 장점을 가지고 있다.

CFRC는 열충격 저항성이 우수하므로 핵반응기와 로켓노즐, nose cone 등과 같은 열차단 구조물에 주로 사용되고 있으며, CFRC 제조시에 열충격 저항성을 보다 향상시키기 위하여 탄소나 흑연 분말을 첨가하고 흑연화공정을 도입시켜주고 있다⁶⁾.

로켓노즐 부분은 연소가스가 통과할 때 약 3000°C의 열과 음속에 가까운 기체에 접촉하게 되므로 열충격과 침식을 많이 받을 뿐만 아니라 노즐벽으로 전달되는 열량이 가장 큰 장소이다. 그러므로 노즐 구조물을 보호하기 위하여 반드시 열에 안정한 내열재를 사용해야 한다. 노즐재료는 과거에는 흑연재료, 세라믹복합재료 등이 사용되고 있었으나 최근에는 고온에서도 높은 기계적강도와 열전도도를 갖고 내산화성과 열충격 저항성 등이 대단히 우수한 CFRC로 대체되면서 많은 문제점들이 개선되었다^{7~9)}.

본 실험에서는 페놀수지와 고강도계 PAN 섬유를 사용하여 서로 다른 직경으로 인발성형한 뒤, 2가지 형태의 hexagonal type 4-D 프리폼을 제조하였다. 제조된 프리폼을 핏치로 함침하고 탄화과 고온열처리 과정을 반복하여 고밀도화된 CFRC를 제조하였다.

4D CFRC의 고온 열충격 특성을 알아보기 위하여 질소분위기하에서 관상로 열충격 시험을 하였으며, 초고온에 노출되었을 경우 받게 되는 열적, 화학적, 기계적 침식에 대한 저항성을 실험하기 위하여 아크 플라즈마 시험을 통하여 삭마 및 열충격 특성을 관찰하였다.

II. 실험

1. 실험재료

1-1. 보강재

4D CFRC 제조시 보강재로 사용된 탄소섬유는 (주)태광산업의 PAN계 고강도 섬유 ACELANTZ-307 3K로 물성은 Table 1과 같다.

1-2. 기질재료(matrix)

기질은 정우석탄화학(주)의 석탄계 핏치를 사용하였으며, 물성은 Table 2와 같다.

2. 실험 및 실험방법

4D CFRC의 제조는 hexagonal type 4방향 프리폼을 직조하고 여기에 프리폼을 고착화시키는 rigidization 과정과 높은 탄소수율을 얻을 수 있는 가압함침탄화 과정^{10, 11)}을 도입하여 Fig. 1과 같은 공정으로 제조하였다.

2-1. 4-D CFRC의 제조

2-1-1. 프리폼의 제조

프리폼의 제조에는 레졸계 페놀수지와 탄소 섬유를 사용하여 인발성형한 rod를 사용하였다. Rod의 필라멘트 수와 직경은 각각 18K(ϕ : 1.2mm, V_f : 60%), 30K(ϕ : 1.4mm, V_f : 72

Table 1. Characteristics of carbon fiber used for fabrication of the 4D CFRC

| Fiber type | Filament No. | Diameter (μ m) | T.S. (MPa) | T.M. (GPa) | U.E. (%) | Specific Heat (Cal/g°C) | Density (g/cm ³) |
|------------|--------------|---------------------|------------|------------|----------|-------------------------|------------------------------|
| TZ-307 | 3,000 | 6.85 | 3.4 | 235 | 1.3 | 17 | 1.80 |

T.S. : Tensile Strength T.M. : Tensile Modulus U.E. : Ultimate Elongation

Table 2. Characteristics of coal tar pitch used for fabrication of the 4D CFRC as a matrix impregnant

| Pitch type | Q.I. (wt.%) | B.I. (wt.%) | S.P. (°C) | C (%) | H (%) | N (%) | S (%) | C/H | Carbon Yield (%) |
|----------------|-------------|-------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|
| Coal tar pitch | 6.31 | 29.30 | 114.7 | 92.61 | 4.44 | 1.20 | 0.49 | 1.738 | 39.52 |

H.I. : n-Hexane insoluble Q.I. : Quinoline insoluble

B.I. : Benzene insoluble S.P. : Softening point

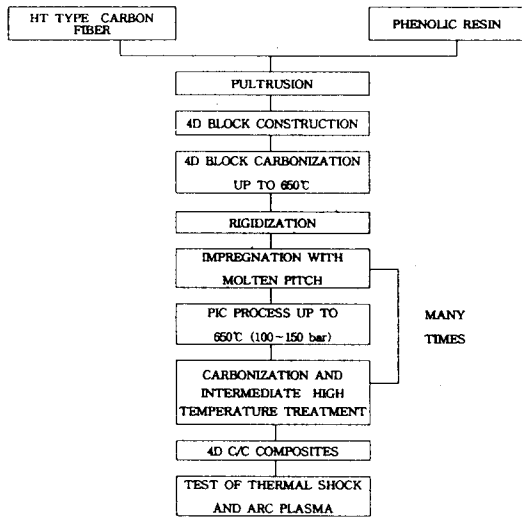


Fig. 1. Schematic flow chart for the 4D C/C composites.

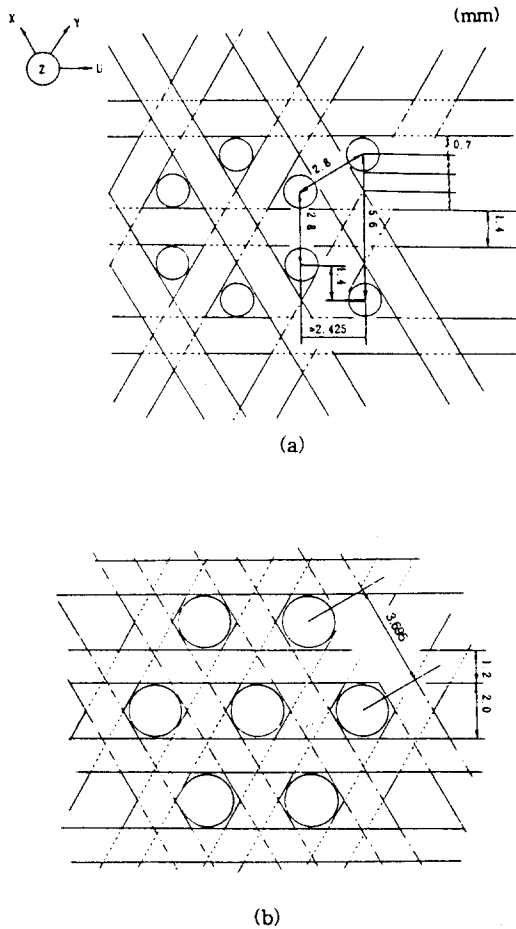


Fig. 2. Cross section of the reinforcement direction of 4-D preform with pultruded rods (a) type I, (b) type II.

), 48K(φ : 2.0mm, V_f : 56%)이었으며 제조된 rod는 Fig. 2 (a)와 (b)같은 규격으로 섬유 보강분율이 다른 두 종류의 형태로 제작하였다. Type I 4D 프리폼의 rod 부피분율은 약 38%, 밀도는 0.462 g/cm³인 반면에 type II는 각각 54%, 0.626 g/cm³이었다.

제작된 프리폼은 질소분위기에서 100°C/hr의 승온온도로 650°C까지 열처리한 뒤 3시간 동안 유지시킴으로써 rigidization시 rod의 팽창을 일으킬 수 있는 rod 내부의 페놀수지를 탄화하였다.

2-2-2. 프리폼의 고밀도화

탄화가 끝난 프리폼은 질소분위기에서 용융 피치로 함침한 다음 450°C에서 20시간 동안 열중합시키고 650°C에서 코우크스화시킴으로써 프리폼이 변형되지 않도록 하는 rigidization 공정을 도입하였으며, 다시 상압에서 1000°C까지 승온하여 완전히 탄화되도록 하였다.

프리폼 내부의 기공을 피치로 치환하기 위한 과정으로, 용융피치가 유입되기 용이하도록 0.1mm Torr로 1시간 이상 감압한 다음, 350°C에서 용융된 피치를 주입한 뒤 다시 30 kg/cm²의 질소압을 가하며 250°C에서 3시간 동안 유지시켜 줌으로써 피치가 내부까지 침투되도록 하였다. 함침된 피치는 가압함침 탄화(PIC)공정을 수행하여 외부로의 방출을 억제시켜 수율을 높여 주었다. 이때 피치의 점도는 200~400°C 사이에서 가장 낮으므로 400°C로 5시간을 유지하며 100~150bar의 압력을 가하여 내부까지의 함침을 유도하였고, 피치가 코우크스로 완전히 전환되는 온도인 650°C까지 승온시켰다.

PIC 후, 기질을 완전히 탄화하기 위하여 박스형 로에서 33.3°C/hr의 속도로 1000°C까지 승온시킨 뒤, 1시간을 유지하며 탄화하였고, 기질의 흑연격자 간격을 줄이고 함침에 의하여 닫힌기공을 열어주기 위하여 2300°C까지 고온열처리 하였다.

3. 열충격 시험

3-1. 관상로(Tubular furnace) 열충격 시험

4D CFRC의 열충격 저항성을 알아보기 위하여 Fig. 3과 같은 관상로 열충격 시험 장치를 사용하였다. 시험방법은 시편을 냉각코일

근처의 시편용기에 놓고 질소가스를 관속으로 유입하면서 가열로의 내부온도를 1000°C까지 올린 다음, 시편을 관속의 가열로 내부까지 이동시켜 1000°C에서 15분 방치 후 냉각수가 흐르고 있는 냉각코일 부분으로 이동시켜 25분간 냉각시켰다. 열충격횟수는 이와 같은 방법으로 50회, 100회까지 반복하였다.

3-2. 플라즈마 토치 시험

플라즈마 토치시험에 사용된 아크 플라즈마는 전기아크를 이용하여 가스를 이온화시킴으로써, 초고온의 플라즈마를 형성하게 하고, 이를 고정된 시편에 고속으로 분사하는 방법으로, 고온의 열원이 고속으로 4D CFRC의 표면에 작용하게 함으로써 열적, 화학적 반응 외에도 기계적인 침식을 유도하였다.

4D CFRC가 고온에서 보이는 삭마특성을

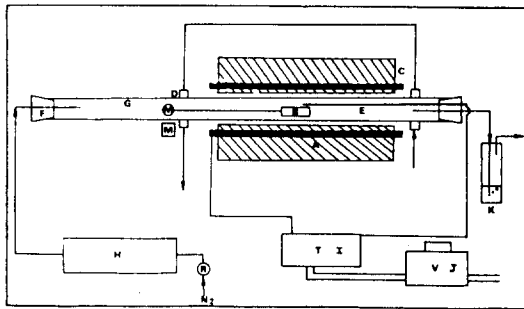


Fig. 3. Schematic diagram of thermal shock cycling equipment. A: Furnace. B: Substrate. C: Electric heater. D: Water jacket. E: Thermocouple. F: Silicone rubber cap. G: Quartz tube. H: Surge tank. I: Temperature controller. J: Transformer. K: Separator. R: Regulator. M: Magnetic.

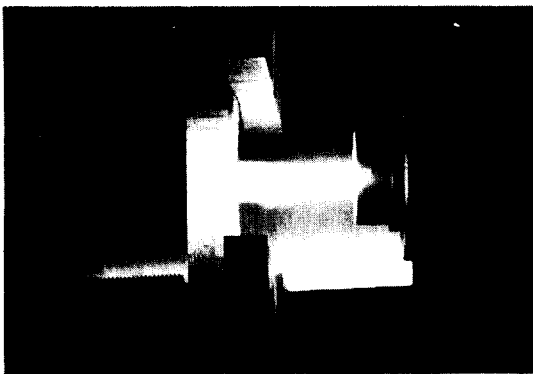


Fig. 4. Photograph of arc plasma test.

Table 3. Conditions of arc plasma test

| ITEM | CONDITION |
|---------------------------------------|--------------------------|
| Primary gas | Ar |
| Secondary gas | H ₂ |
| Jet time of plasma(sec) | 30, 60, 90 |
| Velocity of plasma(m/sec) | 650m/sec |
| Max. power of plasma gun(kW) | 80 |
| Distance of specimen & plasma gun(cm) | 3 |
| Size of specimen(mm) | dia : 40, thickness : 10 |
| Flame angle(°) | 90 |
| Max. temp. of specimen surface(°C) | 2600 |

관찰하기 위하여 사용된 장비는 미국의 METCO Co.의 아크 플라즈마 시험기이고 9MB type gun을 사용하였다. Fig. 4와 같이 일정한 크기의 시편을 고정하고 초고온, 고속의 플라즈마를 분사하여 시험하였다. 시편 표면의 온도는 pyrometer를 이용하여 측정하였으며 시험조건은 Table 3과 같다.

4. 열중량 분석(TGA)

4D CFRC를 열충격 시험전, 후 공기 산화 반응을 측정하기 위하여 Dupont Model 951 Thermo Gravimetric Analyzer(TGA)를 사용하였다.

열중량분석은 상온에서 1000°C까지 20°C/min의 승온속도로 가열했을 때의 분해개시 온도 및 무게 감소율을 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 관상로(Tubular furnace)열충격 시험

1-1. 공기 산화반응

4D CFRC가 반복적인 열충격을 받으면 크랙이 생성되거나 성장하게 되는데 이와 같은 균열들은 열중량 분석시 공기와의 접촉면적을 제공하여 빠른 중량감소를 보인다. 열충격 시험에 사용한 시편은 type I 이었으며 시편의 밀도는 탄화과정만 거친 경우는 1.71 g/cm³, 2300°C까지 중간 고온열처리과정을 거친 경우는 1.75 g/cm³였다. 열충격 시험전, 후의 시편을 TGA로 사용하여 공기산화반응에 따른 무게감량을 관찰한 결과 Fig. 5와 같이 나타났다.

열충격을 받지 않은 4D CFRC중 탄화과정

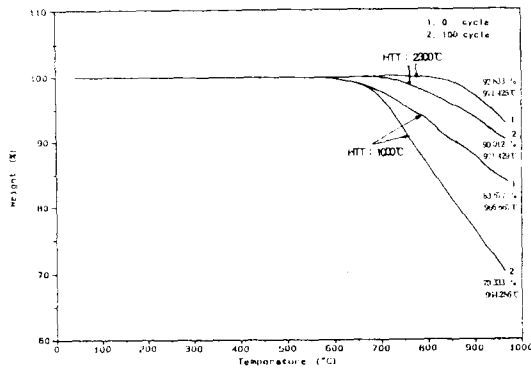


Fig. 5. TGA thermograms of the 4D CFRC after 100 cycles thermal shock test.

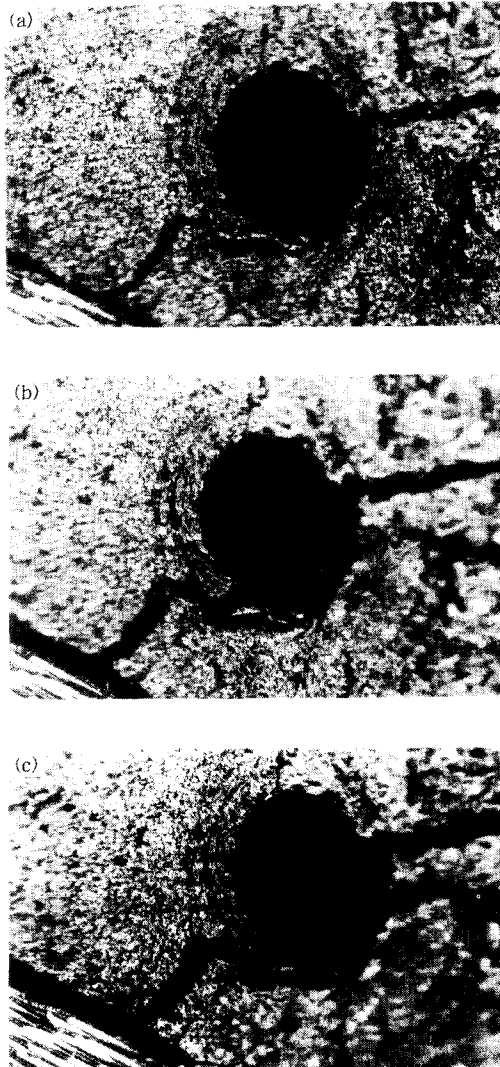


Fig. 6. Optical micrographs ($\times 200$) of 4D CFRC fabricated with PIC and carbonization after thermal shock test (a) 0 cycle (b) 50 cycle (c) 100 cycle.

을 거친 것은 시험후 잔류량이 약 83%인 반면에 고온열처리공정(2300°C)을 거친 것은 약 92%로 높게 나타났다.

열충격을 받은 4D CFRC의 산화에 의한 무게감량은 탄화공정만 거친 것이 열충격시험 후 약 13%의 감량을 보인 반면에 고온열처리(2300°C)한 경우에는 약 2%정도 감량을 보였다.

이같은 현상을 볼 때 우수한 고온특성을 부여해 주기 위해서는 결정화도가 좋고 흑연화성이 우수한 핏치를 결합재를 사용하고 PIC 공정과 고온열처리공정을 채택해 주는 것이 필수적인 것으로 판단된다.

1-2. 표면관찰

Fig. 6은 4D CFRC를 열충격 시험 후 광학현미경으로 200배로 확대하여 관찰한 것으로 a)로 표기된 사진은 열충격을 가하지 않은 것이고 b)로 표기된 것은 50회 열충격 시험을 c)로 표시된 것은 100회의 열충격 시험한 것이다.

열충격시험 이전의 사진을 보면 이미 기공과 크랙들이 형성된 것을 볼 수 있는데 이는 주로 결합재의 탄화에 의해서 열분해기체가 방출됨에 따라 형성된 것으로 보여진다.

50회 열충격 시험후 중앙의 큰 기공 우측에 새로운 크랙이 생성되었을 뿐만 아니라 기존의 크랙이 확장되어 기공의 크기가 증가되었고 함침에 의하여 기공벽에 침적된 함침핏치도 열충격에 따라 기공의 확장에 영향을 받아 탈리되려는 현상을 관찰할 수 있었다.

이같은 현상은 미반응 물질이 탄화되어 방출됨과 동시에 열충격의 반복에 따라 기공과 크랙부분에 응력 집중이 반복되었기 때문이다. 특히 보강재와 결합재간 계면에서의 크랙 확장은 인접한 크랙의 확산에 따른 영향과 열충격 이전에 크랙형성 원인으로도 볼 수 있는 보강재와 결합재간 열팽창계수의 차에 따라 열충격의 반복으로 열응력을 받았기 때문으로 보여진다.

100회 열충격 후에는 50회에 비해 크랙들이 크게 성장되지 않고 있는 것을 볼 때 미반응 물질의 완전 방출과 함께 CFRC가 열적으로 안정한 구조로 전환되었기 때문으로 판단된다.

그리고 고온열처리공정을 거친 CFRC는 열

팽창계수가 보다 낮아지는 반면 열전도도는 높아지기 때문에 크랙이 적게 성장될 것으로 예상된다.

2. 플라즈마 토치 시험

2-1. 삭마속도 및 삭마량

Type I, II 4D CFRC의 삭마 특성을 조사하기 위하여 시간과 시편의 밀도를 변수로 하여 아크 플라즈마 시험을 하였다.

Fig. 7은 각 시편의 밀도에 따른 삭마속도를 나타낸 것으로서 전체적인 경향성은 밀도

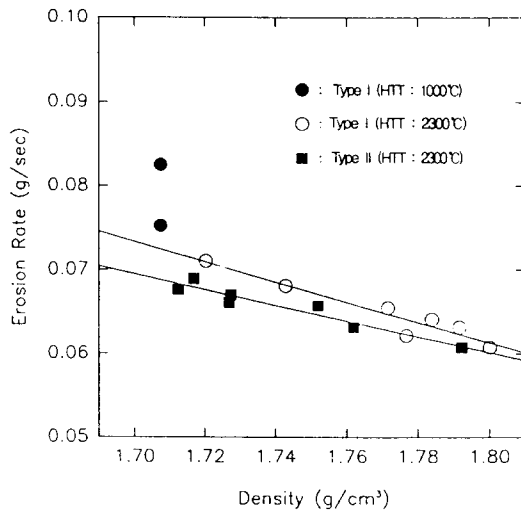


Fig. 7. Erosion rate of 4D CFRC according to the density after arc plasma test.

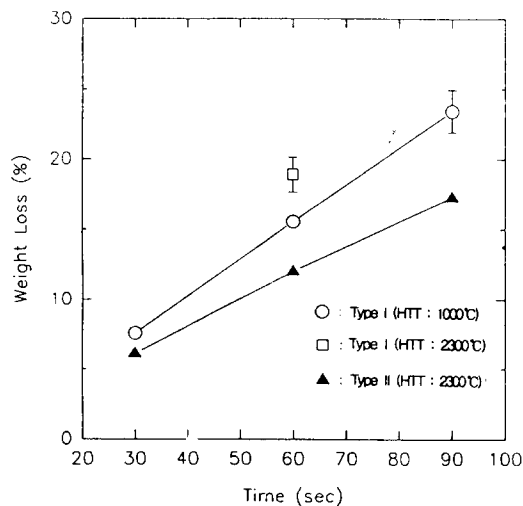


Fig. 8. Weight loss of 4D CFRC according to the test time after arc plasma test.

가 증가함에 따라 삭마속도는 감소하는 경향을 보였다. 따라서 삭마 특성에는 밀도가 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한 밀도가 낮을 경우에는 섬유유 보강분율이 높은 type II가 type I보다 삭마속도는 낮고 그 차이는 컸지만 밀도가 1.8 g/cm³에 가까워질수록 그 차이는 작아지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 섬유유 보강분율이 높을수록 삭마 저항성이 크며, 밀도가 높을수록 그 차이는 작아진다는 것을 알 수 있다.

탄화과정만 거친 시편은 고온열처리공정을 거친 시편의 경향성에 비하여 빠른 삭마속도를 나타내며 그 삭마범위도 넓게 분포한다. 따라서 높은 밀도와 열충격에 강한 CFRC를 제조하기 위해서는 반드시 고온열처리공정이 필요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 시험시간에 따른 시편의 삭마량을 나타낸 것으로서 type I과 type II 모두 시간에 따른 삭마량이 선형적인 증가를 보여주고 있다. 30초 동안 시험한 경우 있어서 type I이 type II보다 0.928~1.998% 정도 높은 삭마량을 나타내었고, 90초 동안 시험한 경우는 4.838~7.433%로 시간의 흐름에 따라 차이가 심해지는 것을 볼 수 있다. 이는 장시간 동안의 시험에서 섬유유 보강 분율이 높은 type II가 유리하다는 것을 나타내는 것으로 섬유유 보강 분율이 높을수록 삭마에 대한 저항이 큰 것을 알 수 있다.

2-2. 표면관찰

Fig. 9는 type I, II를 60초 동안 삭마시험 후 시편의 표면을 관찰한 사진으로 (a), (c)는 2300°C까지 고온열처리공정을 거친 시편이며 (b)는 탄화과정만 거친 시편이다.

고온열처리공정을 거친 시편은 각각 시간이 지남에 따라 삭마의 영역이 넓어지고 깊어지는 것을 볼 수 있으며, 안정된 삭마표면을 나타내는데 반해, 탄화과정만 거친 시편 (b)는 다른 시편에 비하여 삭마된 영역도 넓으며, 특히 열충격에 의한 심한 파괴현상을 나타내었다. 이러한 사실로 볼 때 열충격에 우수한 CFRC를 제조하기 위해서는 반드시 고온열처리공정이 도입되어야 함을 알 수 있었다.

Fig. 10은 삭마시험을 거친 type I과 II의 표면을 SEM을 이용하여 관찰한 사진으로 고온열처리공정을 거친 (a)와 (c)는 type I과 II

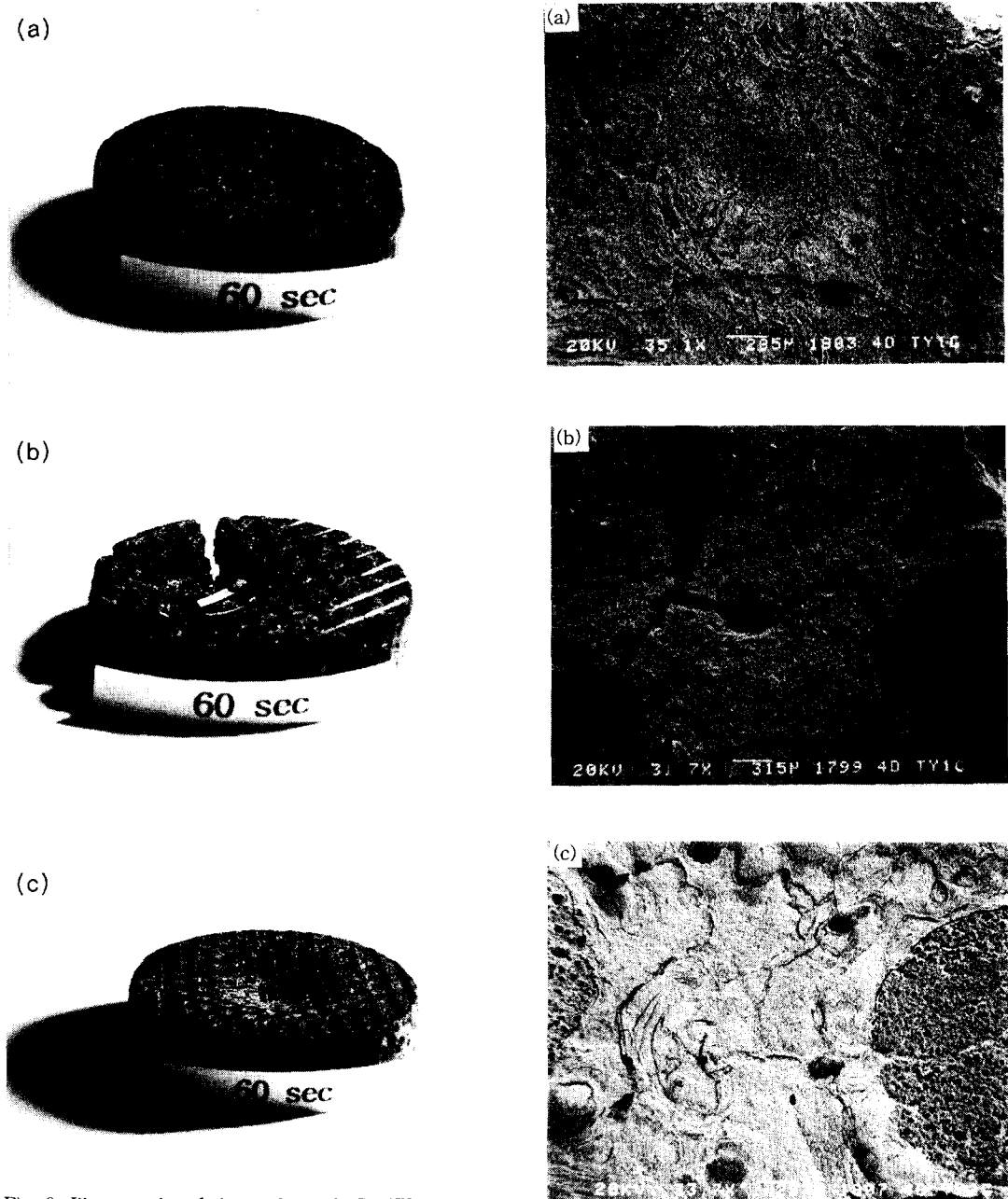


Fig. 9. Photographs of the surface of 4D CFRC after arc plasma test for 60sec (a) type I (HIT: 2300°C), (b) type I (HIT: 1000°C), (c) type II (HIT: 2300°C).

Fig. 10. SEM photographs of the surface of 4D CFRC after arc plasma test for 60sec

(a) type I (HIT: 2300°C), (b) type I (HIT: 1000°C) (c) type II (HIT: 2300°C).

모두 2600°C 이상에 이르는 아크 플라즈마의 열충격에 의하여 표면에 약간의 균열이 발생하였지만 전체적으로는 안정한 것을 볼 수 있었다. 탄화과정만 거친 (b)는 그 파괴정도가 심하여 결합재 뿐만 아니라 보강재에도 큰 균열이 발생하고 있음을 볼 때 열충격에 대하여 아주 취약함을 알 수 있다.

Fig. 11은 type I 4D CFRC에 보강된 rod를 삭마시험 전과 후 각각 약 1000배로 관찰한 사진으로 두 보강형태 모두가 유사한 삭마현상을 나타내고 있다. 시험 전의 상태(a)에서는 섬유 사이에 기질이 완전히 채워져 있는

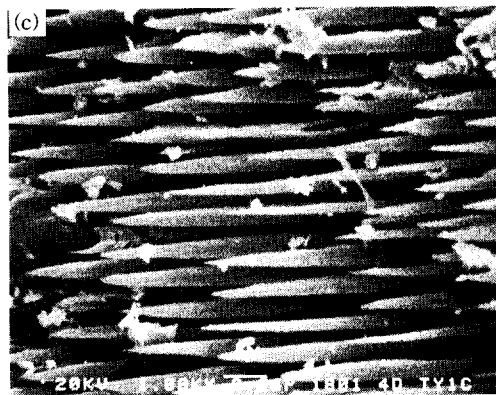
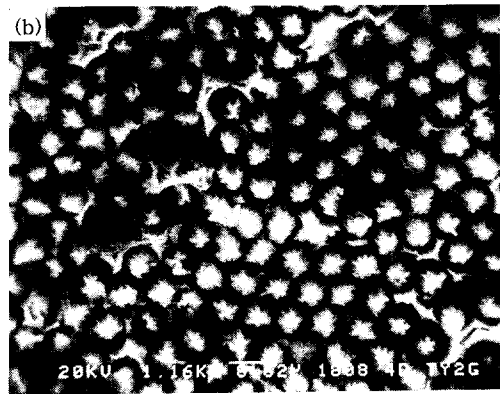
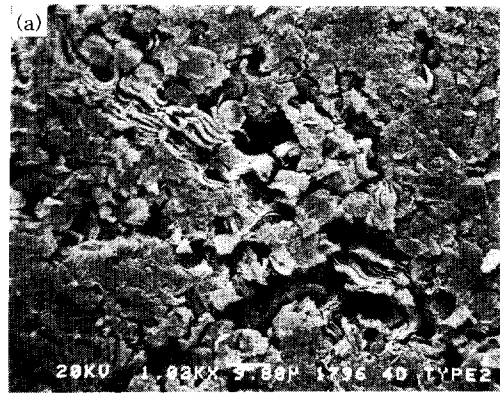
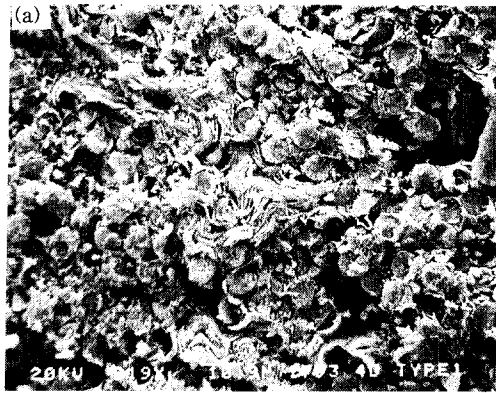


Fig. 11. SEM photographs of the type I 4D CFRC after arc plasma test for 60sec (a) before test (b), (c) after test.

것을 볼 수 있으나, 시험 후 수직방향으로 보강된 rod 사진인 (b)에서 보면 섬유 사이의 모든 기질이 보강섬유에 비하여 먼저 떨어져 나가고 섬유 끝부분의 모서리부분부터 삭마가 진행되어 마지막에는 바늘형태로 변화되어 가

Fig. 12. SEM photographs of the type II 4D CFRC after arc plasma test for 60sec (a) before test (b) after test.

는 것을 볼 수 있다. 수평방향으로 보강된 rod인 (c) 사진에서도 기질이 먼저 떨어져 나간 뒤 섬유는 기질의 보호를 받지 못하기 때문에 삭마의 영향을 받게 되어 점점 가늘어지고, 바늘형태로 삭마가 진행되어 가는 것을 볼 수 있었다.

삭마시험한 후 관찰한 사진인 Fig. 12에서도 type II는 역시 type I과 같은 양상을 보였다. 수직방향으로 보강된 rod 사진인 (b)를 보면 삭마에 의하여 형성된 cokes 입자가 섬유의 끝 부분에 덮혀있는 것을 볼 수 있다. 또한 이러한 현상을 통하여 삭마의 진행 메카니즘을 예측할 수 있다. 즉, 삭마는 우선적으로 고온, 고속의 가스에 의하여 강도가 취약한 결합재 핏치가 이탈되고 섬유층이 노출되어 보강섬유가 기질과의 결합력이 약화되기 때문에 격렬한 삭마에 의하여 섬유가 절단되

는 현상이 일어나는 과정의 반복으로 생각할 수 있다.

IV. 결 론

PAN계 탄소섬유와 페놀수지를 이용하여 rod를 인발성형 한 후, 다른 섬유분율을 갖는 두 종류의 hexagonal type 4D 프리폼을 제작하였고, 가압함침 탄화공정과 고온열처리 공정을 반복하여 고밀도화된 4D CFRC를 제조하였다. 제조된 두가지 형태의 4D CFRC는 열충격 시험기를 이용하여 열충격특성을 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 관상로내에서 열충격 시험한 4D CFRC의 공기 산화 저항성을 관찰해 본 결과, 열충격으로 크랙과 기공이 새로 발생하거나 확장되어서 공기와의 접촉면적을 많이 제공해 주어 빠른 중량감소를 보였으며 고온열처리 공정을 거친 것이 약 20% 우수하게 나타났다.

2. 열충격시험 후 광학현미경을 이용하여 관찰한 결과, 새로운 크랙이 생성되었을 뿐만 아니라 기존의 크랙이 확장되어 기공의 크기가 증가되었다.

3. 플라즈마 토치 시험 결과 밀도와 섬유의 보강분율이 높을수록 삭마 저항성이 커지고, 삭마량은 시간에 따라 선형적으로 증가한다는 사실을 알았으며 type II가 type I 보다 삭마저항성이 우수하였다.

4. 삭마시험 후 SEM을 이용하여 표면을 관찰한 결과, 고온열처리가 열적, 기계적 강도를 높여 줌으로써 시편의 열충격에 대한 내구성을 증가시켜 준다는 사실을 알았으며, 삭마는 우선 기질이 이탈되고 난 뒤 섬유가 바늘형태로 삭마되는 것을 알 수 있었다.

V. REFERENCES

1. Fitzer, E., "The future of carbon-carbon composite.", Carbon, Vol. 25, No. 2, 1987, pp. 163~190.
2. Fitzer, E., Huttinger, K.J. and Tillmanns, H., Proc. 4th Int. Conf. on Carbon and Graphite, 1974, p. 108.
3. Huttinger, K.J and Rosenblatt, U., Prepr. 12th Biennial Conf. on Carbon, Pittsburgh, 1975, p. 269
4. T. Hosomura and H. Okamoto "Effect of pressure carbonization in the C/C composite process.", Mat. Sci. & Eng., A143, 1991, pp. 223-229
5. Michael Berdoyes., "SRM nozzle design breakthroughs with advanced composite materials", AIAA 29th conference, 1993, pp. 1-10
7. Kelly, A. and Mileiko, S.T., Handbook of composites, Vol. 3, 1983, pp. 172-173.
8. Choury, "High temperature resistant materials for space motors", proceedings of an ESA symposium, 1979, p. 293
9. J. Jortner et al, "Ablative recession of 3D carbon-carbon composites", 14th biennial conference of carbon, 1977, pp. 411-412
10. E. Fitzer and B. Terwiesch, "The pyrolysis of pitch and the baking of pitch bonded carbon/carbon composites under nitrogen pressure up to 100 bar", Carbon, Vol. 11, 1973, pp. 570~574.
11. Gerald Rellick "Densification efficiency of carbon-carbon composites", Carbon, Vol 28, No. 4, 1990, pp. 589~594.