

論文

Polycarbosilane을 도포한 3방향 탄소/탄소 복합재의 산화억제 효과

이재원* · 오인석* · 최돈목** · 주혁종*

Effects of the Antioxidation of 3D
Carbon/Carbon Composite Coated with Polycarbosilane

Jae-Won Lee*, In-Seok Oh*, Don-Mook Choi** and Hyeok-Jong Joo*

ABSTRACT

To improve the antioxidation of 3D CFRCs(3 directional carbon/carbon composites), polycarbosilane(PCS) was coated under the vacuum condition, and it was formed into the ladder state by the stabilization at 200°C under the air condition.

And it was also led to Si-C chemical bonding by the heat-treatment up to 1300°C under the argon atmosphere.

As a result of X-ray diffraction analysis, after the stabilization treatment of PCS at 200°C, PCS became an amorphous SiC and it became β -SiC crystalline with the heat treatment at 1300°C.

The cracks of SiC coating layer were observed on the coated surface of 3D CFRC by the difference of thermal expansion coefficient between 3D CFRC and SiC. The thicker the coated layers the less the cracks on the coated surface.

The initial oxidation of 3D CFRC without PCS coating was observed at about 480°C. However, that of 3D CFRC with PCS was observed at about 680°C to have an increasing effect of the temperature up to 200°C.

The effect of the antioxidation of 3D CFRC was the best, when the coating layer was 19 μ m and the contents of oxygen, 7.5wt.%, which was used during the stabilization treatment.

초 록

3방향 탄소/탄소 복합재의 산화억제효과를 증진시킬 목적으로 진공상태에서 Polycarbosilane을 도포하고, 공기분위기 하에서 200°C로 안정화 처리하여 코팅제를 가교화 시켰다. 그리고 아르곤 분위기하에서 1300°C까지 열처리하여 Si-C 화학결합을 유도하였다.

PCS를 200°C에서 안정화 처리한 후 X선회절 분석을 한 결과, 무정형의 SiC를 나타내었으며, 1300°C로 열처리된 PCS는 결정형 β -SiC를 나타내었다.

3D CFRC와 SiC의 열팽창계수 차이로 인하여 3D CFRC의 도포 표면에서 균열이 관찰되었으며,

* 충남대학교 고분자공학과

** 경원전문대학 소방안전관리과

도포층이 두꺼울수록 도포층 표면에서의 균열이 적게 나타났다.

PCS로 도포하지 않은 3D CFRC의 초기산화반응은 약 480°C에서 일어났으나 PCS로 도포한 3D CFRC의 초기산화반응은 약 680°C로 200°C의 상승효과를 나타내었다.

3D CFRC의 산화억제 효과는 안정화 처리시에 도입된 산소의 함입량이 약 7.5wt.%, 도포층의 두께는 19 μ m인 경우에 최적으로 나타났다.

1. 서 론

탄소/탄소 복합재료(Carbon fiber reinforced carbon; CFRC)는 초경량재료로서 대략 2000°C 이상의 초고온하에서도 기계적, 물리적 특성이 우수하여 로켓노즐, 노스콘, 브레이크 디스크 등의 항공 우주분야와 터빈 엔진의 wheel 및 rotor로도 사용되고 있다[1].

그러나 CFRC는 고온에서 공기중의 산소와 매우 민감하게 반응하여 이산화탄소나 일산화탄소로 열분해되기 때문에 고온 구조물로 응용하는데 있어서 큰 단점을 가지고 있다. 이와 같은 현상은 주로 탄소계 재료는 다공성의 구조를 가지며 표면적이 크기 때문에 산소의 침투가 용이하는데 기인한다[2]. D.W. McKee의 연구에 의하면 약 500°C 정도의 온도에서도 공기중의 산소와 반응하는 것으로 밝혀졌다[3].

따라서 고온재료로 탄소/탄소 복합재료를 응용하기 위해서는 산화방지가 필수적이므로 산화반응속도를 저하시키기 위한 산화억제제의 사용과 산소확산 억제층에 대한 연구가 필수적이다. B₂O₃, P₂O₅와 Cr, B₄C₃ 같은 산화억제제는 1000°C 이상부터 증발 또는 도포층의 균열에 의하여 산화를 일으키는 것으로 알려져 있으나[4], Si를 포함한 실란등을 탄소/탄소 복합재료의 표면에 도포하고 열처리를 하면 탄소와 실리콘이 반응하여 내산화성이 강한 SiC가 복합재 표면에 형성되기 때문에 산화저항성이 증가한다는 연구보고가 있다[5].

특히 SiC는 높은 열전도도의 낮은 열팽창계수 그리고 내열, 내산화성 등이 우수하기 때문에 Chemical Vapour Deposition(CVD), Chemical Vapour Infiltration(CVI) 방법을 통하여 복합재에 도포하는 경우도 있다[6~8]. 그러나 CVD 및 CVI 방법은

화학반응기구가 매우 복잡하고 많은 중간 생성물이 발생하는 단점을 가지고 있다[9]. 이러한 단점을 보완하기 위하여 S.Yajima는 전구물질(precursor)인 polycarbosilane(PCS)을 열처리하여 비교적 단일성분인 SiC로 전환하는 공정을 개발하였다[10].

따라서 본 실험에서는 PCS를 합성하여 3방향 탄소/탄소 복합재료(3D-CFRC)에 함침시켜 도포한 후 도포된 PCS를 산소로 안정화 처리한 다음, 다시 1300°C에서 열처리하여 SiC도포 3D CFRC를 제조하여 이에 대한 산화억제 효과를 연구하였다.

2. 실험

2-1. 실험재료

2-1-1. PDMS 합성 시약

3D CFRC의 산화억제제로 도포하기 위한 첫번째 단계로서 PDMS(polydimethylsilane)를 합성하기 위하여 사용한 시약은 MERCK사의 DCDMS(dichlorodimethylsilane), 금속나트륨, xylene, methanol 및 acetone 등으로 모두 고순도시약을 사용하였다.

2-1-2. 보강재 및 결합재

3D CFRC를 제조하기 위한 보강섬유는 PAN계 고강도 탄소섬유로 태광산업(주)에서 제조한 TZ-307, 12K이고, 결합재 핏치는 정우석탄화학(주)의 석탄계 핏치를 사용하였으며, 이들의 특성은 각각 Table 1 및 Table 2에 나타내었다.

2-2. 실험방법

CFRC에 SiC 도포를 위한 개략도는 Fig.1에 나

Table 1. Characteristics of carbon fiber used for fabrication of the 3D CFRC as a reinforcement

Fiber type	Filament No.	Diameter(μm)	T.S. (MPa)	T.M. (GPa)	U.E. (%)	Yield(g/1000m)	Density(g/cm ³)
TZ-307	12,000	6.85	3528	245	1.4	800	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 3D CFRC as a matrix impregnant

Pitch type	Q.I. (wt. %)	B.I. (wt. %)	S.P. ($^{\circ}\text{C}$)	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

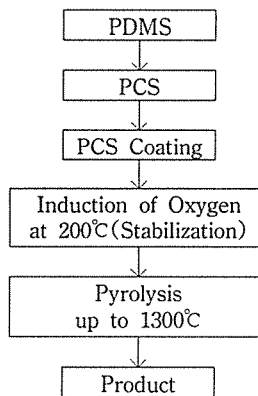


Fig. 1. Flow chart for the preparation of 3D-CFRC coated with PCS.

타내었다.

2-2-1. PCS 제조

SiC의 전구물질로 사용한 PCS를 제조하기 위하여 우선적으로 PDMS를 제조하였다. PDMS를 제조하기 위하여 xylene용매를 사용하였으며 110 $^{\circ}\text{C}$ 의 반응 온도에서 질소분위기 하에서 DCDMS를 금속나트륨으로 탈염소화반응에 의해 PDMS를 합성하였다.

이렇게 합성한 PDMS를 Autoclave Engineer사의 EZE-Seal Laboratory Scale-Stirred Autoclave에 넣고 아르곤 분위기하에서 14시간 동안 교반하고 가열하면서 470 $^{\circ}\text{C}$ 에서 열축합반응으로 PCS를 제조하였다.

2-2-2. 3D CFRC의 제조

3방향으로 직조한 3D 프리폼을 용융핏치로 30 bar, 300 $^{\circ}\text{C}$ 에서 진공함침한 후, 100bar의 압력으로

650 $^{\circ}\text{C}$ 까지 가압함침탄화하여 결합재 핏치를 코우크스화시켰다. 이를 다시 탄화로에서 1000 $^{\circ}\text{C}$ 까지 탄화시키고 Astro사의 High Temperature & High Pressure Graphitization Furnace를 이용하여 2300 $^{\circ}\text{C}$ 까지 흑연화처리를 하였으며, 위의 과정을 다시 7회 반복하여 고밀도의 3D CFRC를 제조하였다[11].

2-2-3. PCS 도포

3D CFRC에 PCS의 도포는 복합재의 표면 뿐만 아니라 내부의 기공까지도 채워주기 위해 진공가압함침방법을 이용하였다. 벤젠을 용매로 사용하여 PCS/벤젠의 무게비로 0.025, 0.05 및 0.075의 농

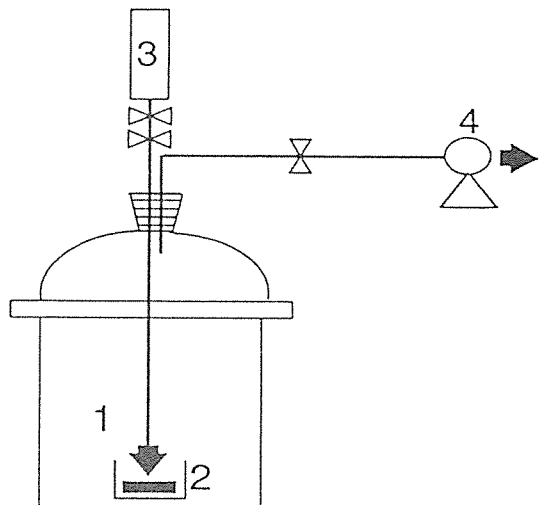


Fig. 2. Schematic diagram of impregnation apparatus. [1. Desiccator, 2. Dish, 3. Burret, 4. Vacuum pump]

도를 갖는 도포제를 제조하여 3H×5D×5W(mm)로 일정하게 가공한 3D CFRC를 Fig.2와 같은 장치내에 넣고 감압후 주입하여 도포한 뒤 건조하였다.

2-2-4. 안정화처리

PCS는 용융특성을 가지므로 산소를 도입하여 가교형태의 불용성 고분자로 전환시켜야 고온 열처리시 용융현상을 방지할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 200°C의 공기조에 공기를 일정하게 주입하여 3D CFRC에 도포된 PCS의 함량에 따라서 2.5, 7.5, 15wt. %로 안정화처리를 하였다.

2-2-5. SiC 도포막 형성

PCS도포 3D CFRC를 열처리 장치에 투입하여 진공으로 산소를 제거한 후 다시 아르곤가스를 주입하여 불활성 분위기를 유지시킨 후에 승온속도를 100°C/hr로 하여 1300°C까지 열처리 한후, 이 온도에서 1시간 유지하여 SiC 도포막을 형성시켰다.

2-3. 분석

2-3-1. X-선 회절 분석

SiC의 결정상태는 Siemens사의 Diffractometer D5200을 사용하여 가압전압 40kV, 관전류 50mV, X선원은 CuK α 로 하여 X선회절 분석을 하였다.

2-3-2. 열중량 분석

3D CFRC 및 SiC로 도포한 3D CFRC의 산화저항성 시험하기 위하여 Setram사의 TG-DTA92를 사용하였다. 시험조건은 공기분위기 하에서 유량을 50cc/min로 일정하게 하였으며, 10°C/min의 승온속도로 가열하여 1000°C까지 승온열중량분석을 하였다. 또한 이 온도에서 1시간 동안 등온열중량분석도 하였다.

2-3-3. 주사전자현미경 관찰

SiC도포 3D CFRC의 표면 및 계면상태를 Joel사의 JSM-5200 SEM을 사용하여 관찰 하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. PDMS 및 PCS의 분석

PDMS와 PCS의 구조와 합성여부를 확인하기 위하여 FT-IR 스펙트럼 분석한 결과를 Fig.3에 나타내었다.

Fig.3에서 볼 수 있듯이 2950, 2900과 1400cm⁻¹에서 C-H 신축에 의한 흡수피크가, 1250, 835, 750, 690과 635cm⁻¹에서 Si-Me 흡수피크가 각각 나타난 것으로 볼 때 PDMS가 합성되었음을 분명히 확인할 수 있었다. 600~900cm⁻¹ 영역에서 Si-Me, 1020과 1355cm⁻¹ 부근에서 Si-CH₂-Si 그리고 가장 특징적인 흡수피크인 2100cm⁻¹ 부근에서 Si-H 신축에 의한 흡수피크가 나타난 것을 볼 때 PCS가 분명히 합성되었음을 확인할 수 있었다.

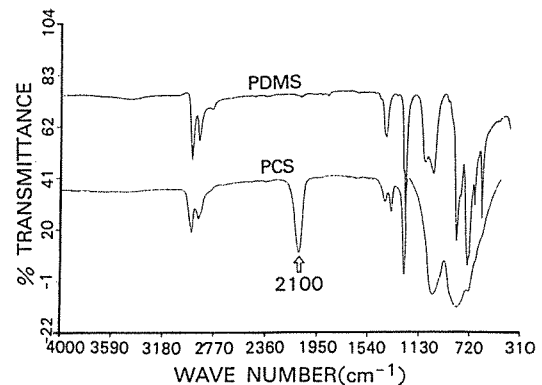


Fig.3. FT-IR spectrum of polydimethylsilane and polycarbosilane.

열중량분석 결과를 Fig.4에 나타내었다. 이 그림에서 볼 때 PDMS의 중량감소가 약 180°C에서 일어나기 시작하였으며, 530°C 부근에서 잔류량의 4.34wt. %였으나, PCS의 중량감소는 약 180°C에서부터 일어나기 시작하고 약 380, 525°C, 그 이상의 3단계로 구분되어 반응이 일어나는 것으로 보이며 1000°C에서 중량감소는 83.45wt. %로 PDMS 보다 열안정성이 상당히 우수한 것을 확인할 수 있었다.

따라서 3D CFRC의 내산화성을 개선하기 위해서는 PDMS 보다 PCS를 사용하여 도포, 열처리하여 SiC 형태로 전환시키는 것이 유리할 것으로 보여

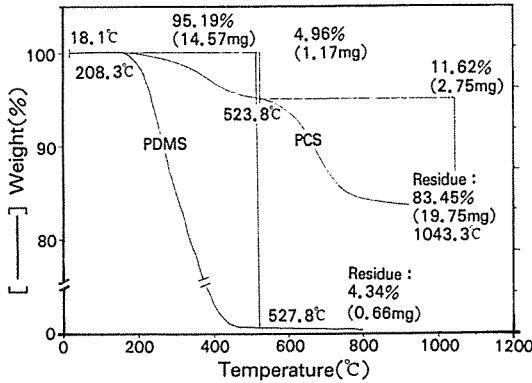


Fig. 4. TGA curves of polydimethylsilane and polycarbosilane.

진다.

PCS의 중량감소는 세단계로 일어났는데 첫번째 단계인 180~380°C 범위에서는 주로 열처리에 의한 저분자량의 PCS의 방출에 의한 것이며, 두번째 단계인 380~525°C 사이에서는 주로 Si-H 결합사이에서 탈수소화 및 축합에 의해 발생된 Si-Si의 가교화와 관련된 것으로 보인다. 그리고 마지막 세번째 단계인 525°C 이상에서는 주로 탈수소화와 탈염소화에 의해 SiCH₃와 Si-CH₂-Si 결합중에서 Si-H와 C-H의 분해에 의해서 망상의 3차원 구조로 전환되는 것으로 생각된다. 그리고 대부분의 중량감소가 800°C 이전에 일어나므로 열처리시 이 온도구간 이전에서 세심한 주의를 하여야 할 필요성이 있다.

PCS의 열처리 온도에 따라 결정형성을 확인하기 위하여 X선 회절분석을 한 결과를 Fig.5에 나타내었다.

PCS를 도포하고 200°C에서 안정화 처리한 후 도포층을 채취하여 X선 회절분석을 한 결과, 어떠한 특성피크도 나타나지 않는 무정형의 SiC가 관찰되었다. 그러나 안정화처리한 PCS 도포막을 1300°C까지 열처리 한 다음 X선 회절분석을 한 결과, 결정성 β-SiC(111)의 고유 특성피크가 2θ ≃ 36°에서 나타났으며, 또한 2θ ≃ 60°에서 약한 β-SiC(220) 특성피크가 나타난 것을 볼 때 고온처리 할 수록 결정화가 용이하게 진행됨을 알 수 있었다.

따라서 PCS로 도포하여 내산화성이 우수한 3D CFRC를 제조하기 위해서는 도포후 안정화 단계를

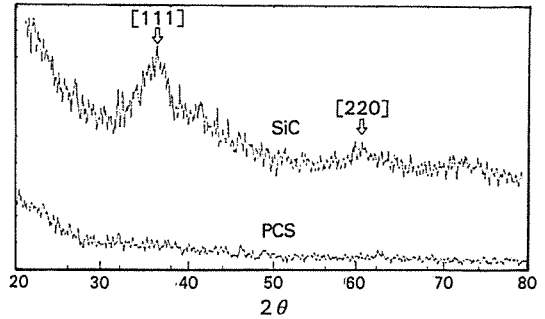


Fig. 5. X-ray diffraction patterns of PCS treated oxygen at 200°C and SiC heat-treated at 1300°C.

거친 다음 반드시 1300°C까지 열처리하여 도포표면에서 산화반응시 활성화 에너지가 큰 β-SiC 형태의 결정이 형성되도록 해야 한다.

3-2. PCS 도포 3D CFRC의 표면 관찰

PCS로 도포된 3D CFRC의 도포제와 복합제간의 계면 및 표면을 SEM으로 관찰한 결과를 Photo. 1, 2에 나타내었다. PCS/벤젠 용액을 3D CFRC에 도포하고 1300°C까지 열처리한 후 도포제의 농도에 따른 영향을 관찰하기 위하여 도포 표면을 일정한 배율(X100)로 관찰하였다. 안정화 처리시 함유된 산소가 7.5wt. %이고 PCS/벤젠 용액의 농도비가 0.025일 경우인 Photo.1(a)를 보면 도포제가 SiC로 전환되는 과정에서 표면의 균열이 매우 심하게 나타났으며, Photo.1(b)의 PCS/벤젠의 농도비가 0.050일 경우에서도 마찬가지로 도포 표면에서 심한 균열이 관찰되었다. 그러나 PCS/벤젠의 농도비가 0.075인 Photo.1(c)의 표면에서는 미세한 균열만이 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 도포제의 농도와 밀접한 관계가 있는 것을 알 수 있었다.

도포층 균열의 원인은 1300°C까지 열처리시 3D CFRC와 도포막인 SiC의 열팽창계수의 차에 의해 발생된 열응력에 의한 것으로 도포층이 두꺼울수록 어느 정도 응력을 흡수하여 도포층 표면에서의 균열이 적게 나타난 것으로 보여지며, 3D CFRC의 다공성과 승온속도도 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다. 또한 이러한 균열은 3D CFRC의 기공도

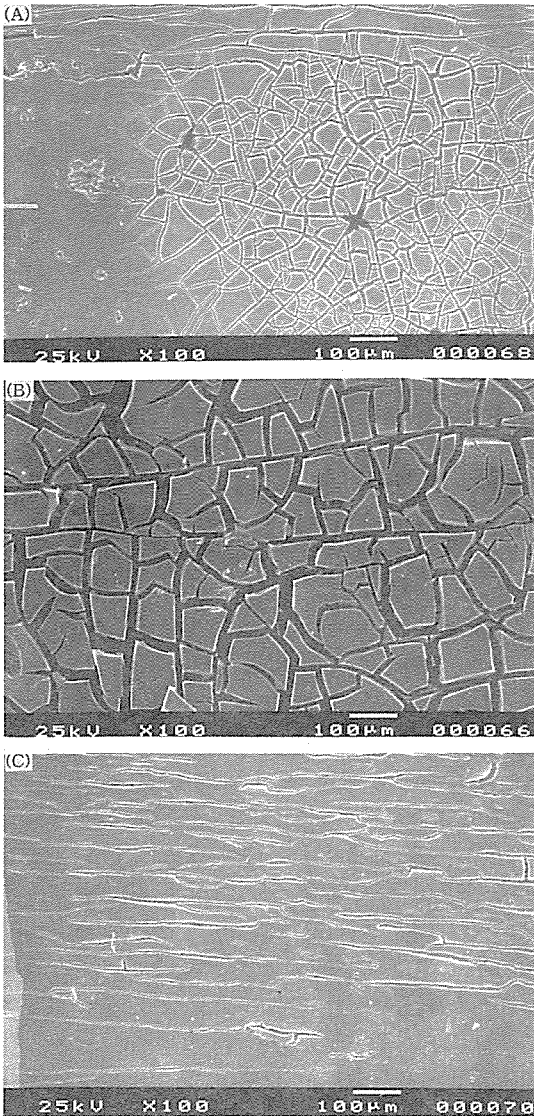


Photo. 1. SEM photographs of SiC coating surface of 3D CFRC after heat-treated at 1300°C [(a) PCS/benzene : 0.025, (b) PCS/benzene : 0.050, (c) PCS/benzene : 0.075].

및 표면의 거칠기 정도와도 관계가 있으므로 최종 흑연화 뿐만아니라 함침/탄화하여 고밀도화 시켜 주는 것이 필수적일 것으로 보여진다.

PCS/벤젠의 농도비에 따라 형성된 도포두께와 3D CFRC 표면과의 상용성을 관찰한 결과를 Photo. 2에 나타내었다. PCS/벤젠의 농도비가 0.025인 경우에는 Photo.2(a)와 같이 평균 15 μm , 0.050

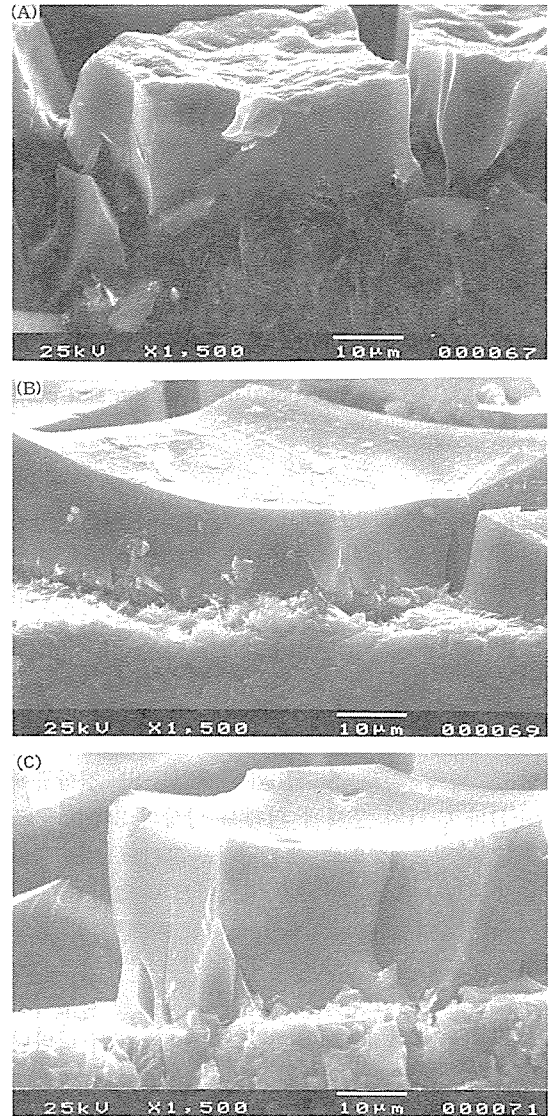


Photo. 2. SEM photographs of SiC coating layer of 3D CFRC after heat-treated at 1300°C [(a) PCS/benzene : 0.025, (b) PCS/benzene : 0.050, (c) PCS/benzene : 0.075].

인 경우는 Photo.2(b)와 같이 평균 19 μm , 0.075 일때는 평균 24 μm 로 Photo.2(c)에서 볼 수 있었다. 도포층과 복합재의 경계면은 경계층이 뚜렷이 구분되며 복합재의 기공까지도 도포제가 채워졌음을 볼 수 있었고 도포제와 3D CFRC와의 상용성이 양호한 것으로 관찰되었다. 따라서 PCS를 도포하면 산화억제 효과 뿐만아니라 기공까지도 채울 수 있

으므로 고밀도화에도 기여할 것으로 예측된다.

3-3. PCS 도포 3D CFRC의 산화억제효과

산화저항성 시험은 공기 분위기하에서 온도 또는 시간에 대한 중량감소의 관계로 나타내었으며, 안정화과정중에 함유된 산소함량과 도포두께에 따라 산화저항성 효과를 비교 하였으며 그 결과를 Fig. 6~8에 나타내었다.

승온열중량분석에 의하면, 도포제(PCS/벤젠)의 농도비가 0.025이며 약 15 μ m로 얇게 도포된 경우에는 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 도포되지 않은 것보다 도포층에 의해 중량감소가 일어나는 온도가 약간 높게 나타났으며 초기 산화개시온도도 200 $^{\circ}$ C 이상 상승하는 결과를 보였다. 도포된 PCS에 함유된 산소가 7.5wt. %인 3D CFRC는 1000 $^{\circ}$ C에서 중량감소량은 33.1wt. %로 도포되지 않은 것에 비해 16.4wt. %의 산화억제효과를 나타내었다.

도포된 PCS에 함유된 산소가 7.5wt. %인 3D CFRC는 2.5, 5wt. % 함유된 것보다 산화저항성이 향상된 반면에 2.5, 5wt. % 함유된 3D CFRC는 거의

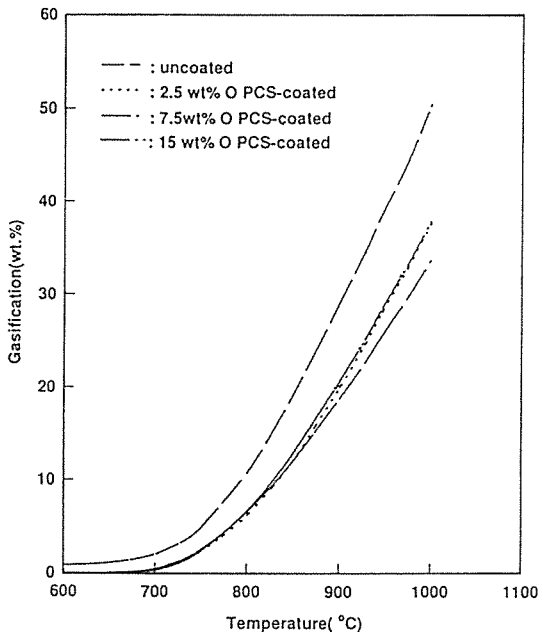


Fig. 6. Gasification of uncoated and PCS/benzene (0.025) coated 3D CFRC in air flowing.

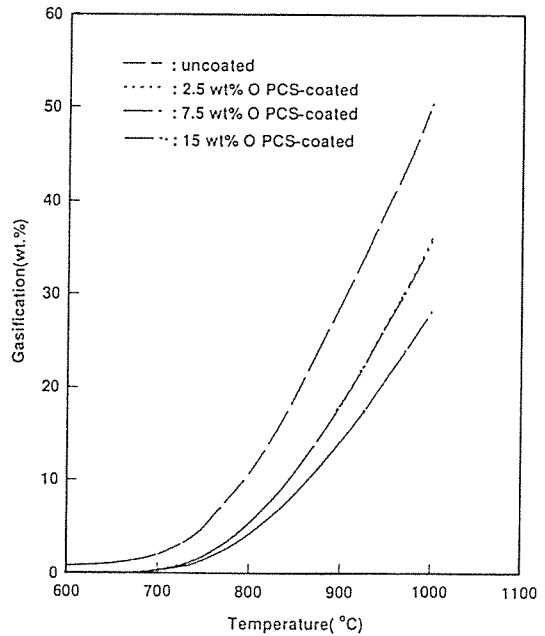


Fig. 7. Gasification of uncoated and PCS/benzene (0.050) coated 3D CFRC in air flowing.

비슷한 효과를 보였다.

왜냐하면 안정화시 산소가 소량 도입될 경우 안정화율이 저하되는 반면에 너무 과도하게 산소가 도입되면 안정화에 참여하고 남은 과잉산소가 안정화 반응에 의하여 ladder 형의 고분자를 이룰때 오히려 부반응을 일으키기 때문으로 판단된다. 따라서 안정화시 산소의 도입량은 7.5wt. % 정도가 적당하였다.

또한 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 도포제(PCS/벤젠)의 농도비가 0.050이고 약 19 μ m로 중간 정도의 도포두께를 갖는 3D CFRC의 경우도 15 μ m로 도포된 것과 마찬가지로 도포된 PCS에 함유된 산소가 7.5wt. %인 것이 산화억제효과가 가장 양호하게 보였으며, 1000 $^{\circ}$ C에서 중량감소량은 28.2wt. %로 도포하지 않은 것에 비하여 중량감소율이 21.3wt. % 높게 나타났다.

도포제(PCS/벤젠)의 농도가 0.075이며 도포두께가 24 μ m로 가장 두꺼운 3D CFRC의 경우도 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 PCS를 도포해 주므로써 산화억제효과가 양호하게 나타났으며 초기산화 온도도 상승하는 효과를 나타내었다.

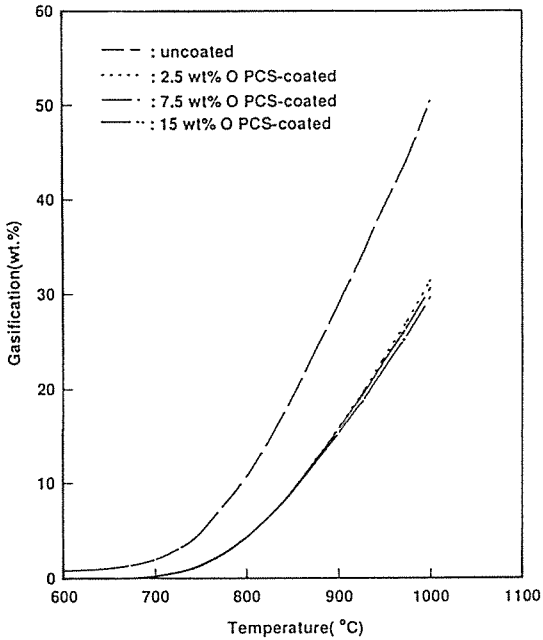


Fig. 8. Gasification of uncoated and PCS/benzene (0.075) coated 3D CFRC in air flowing.

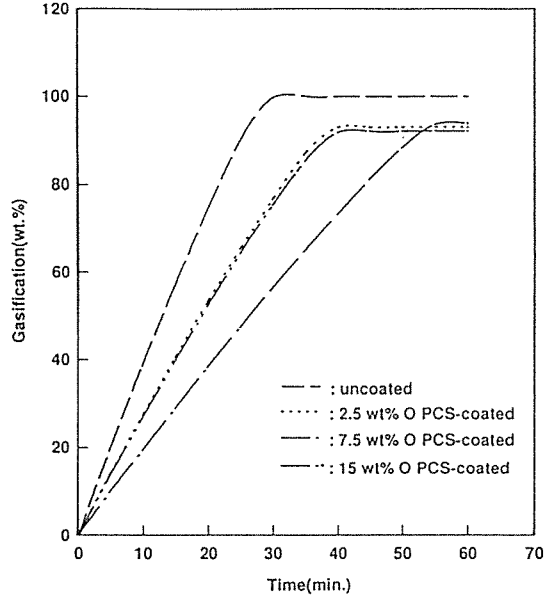


Fig. 10. Gasification of uncoated and PCS/benzene (0.050) coated 3D CFRC in air flowing at isothermal condition.

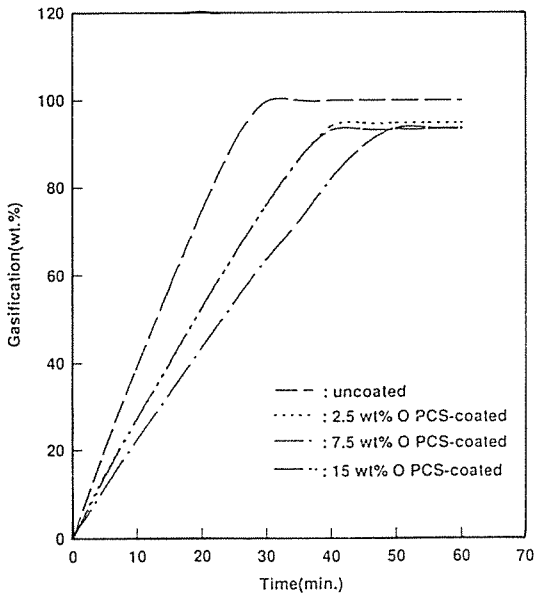


Fig. 9. Gasification of uncoated and PCS/benzene (0.025) coated 3D CFRC in air flowing at isothermal condition.

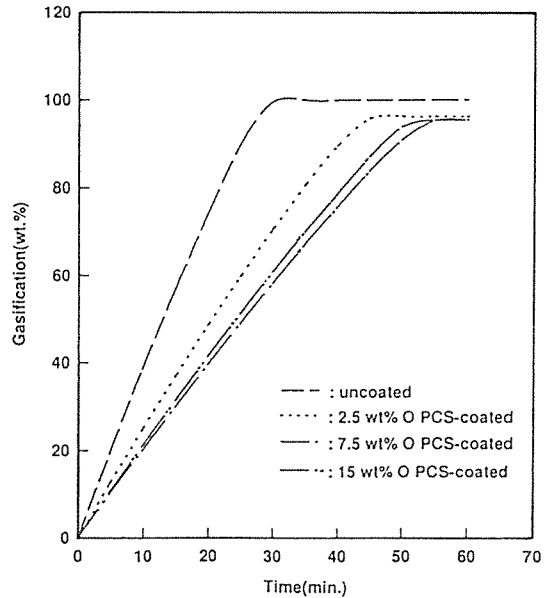


Fig. 11. Gasification of uncoated and PCS/benzene (0.075) coated 3D CFRC in air flowing at isothermal condition.

등온열중량 분석은 도포층 두께 및 안정화시 산소함량에 따른 산화억제 효과를 1000°C 등온에서

시간경과에 따른 중량감소량의 관계를 Fig.9~11에 나타내었다.

도포층의 두께가 약 15 μm 로 얇게 도포된 경우에는 Fig.9에서 볼 수 있듯이 안정화시에 산소함량이 7.5wt. %인 경우는 도포되지 않은 것에 비해 20분정도 산화시간이 지연되었으며 산화완료시까지 소요시간이 50분 정도였지만 2.5, 15 wt. %로 도포된 것은 약 40분 정도에서 산화가 완료되었다. 또한 약 19 μm 로 도포된 경우에는 Fig.10에서 볼 수 있듯이 안정화시에 산소함량이 2.5, 15 wt. %인 것도 15 μm 로 도포된 것과 마찬가지로 약 40분 정도에서 산화가 완료되었으나 7.5 wt. %에서는 55분 정도에서 산화가 완료되었고 도포하지 않은 것에 비해 25분 정도 산화시간이 지연되었으며 이때의 잔류량은 4.4 wt. %이었다. 약 24 μm 로 도포된 경우인 Fig.11에서도 같은 양상을 보였으며 함입된 산소함량에 따른 산화지연 시간의 차이가 적게 나타났다.

따라서 등온열중량분석과 승온열중량분석결과, 도포제(PCS/벤젠)의 농도비가 0.050이며 도포층의 두께가 19 μm , 안정화시에 산소함량이 7.5 wt. %인 경우가 가장 양호한 산화억제 효과를 보였음을 알 수 있었다.

4. 결 론

(1) PCS의 적외선분광분석결과, 2100 cm^{-1} 에서 나타나는 Si-H의 신축에 의한 흡수피크와 열중량 분석결과, 잔류량이 PDMS가 약 530 $^{\circ}\text{C}$ 에서 4.34 wt. %인 반면에 PCS는 1000 $^{\circ}\text{C}$ 에서 83.46 wt. %로 상당히 높게 나타난 것을 볼 때 PCS가 망상의 3차원 구조로 전환된 것으로 판단 되었다.

(2) PCS를 200 $^{\circ}\text{C}$ 에서 안정화 처리한 후 1300 $^{\circ}\text{C}$ 로 열처리된 PCS를 X선회절분석한 결과, 2θ 는 36 $^{\circ}$ 에서 SiC(111)의 회절을 갖는 결정형 β -SiC로 나타났다.

(3) SEM 분석결과 PCS의 농도가 클수록 균열이 감소하였는데, 이 균열은 3D CFRC와 SiC의 열팽창계수의 차에 의해 발생된 열응력에 의한 것으로, 도포층이 두꺼울 수록 어느 정도 응력을 흡수하여 도포층 표면에서의 균열이 적게 나타났다.

(4) PCS도포 3D CFRC는 약 680 $^{\circ}\text{C}$ 에서 산화되기

시작하며 도포하지 않은 복합재는 480 $^{\circ}\text{C}$ 에서 산화가 시작되었다. 즉 PCS를 도포함으로써 초기산화온도를 200 $^{\circ}\text{C}$ 정도 상승시키는 효과를 얻었다. 안정화 처리시에 도입된 산소함입량의 약 7.5 wt. %, 도포층의 두께는 19 μm 에서 가장 양호한 산화억제 효과를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. Erich Fitzer, "The Future of Carbon-Carbon Composite," Carbon, 25, 1987, p.163.
2. Krishan L. Luther, "Oxidization of Carbon/Carbon Composites-A Theoretical Analysis," Carbon, 26, 1988, p.217.
3. D.W. McKee, "Borate Treatment of Carbon Fibres and Carbon/Carbon Composites for Improved Oxidation Resistance," Carbon, 24, 1986, p.737.
4. K.H. Han, H. Ono, K.S. Goto and G.R. St. Pierre, J. Electrochem. Soc., 134, 1987, p.1003.
5. P.E. Gray, U.S. Patent 4894286, 1990.
6. R.D. Veltri, F.S. Galasso, U.S. Patent 4476178, 1984.
7. V.L. Vaughn, H.G. Maahs, J. Am. Ceramic. Soc. 73, 1990, p.1540.
8. J.A. Costello, R.E. Tressler, J. Am. Ceramic. Soc. 69, 1986, p.674.
9. Stevan T. Diimitrijevic, "Infiltration and Coating of the Porous Carbonaceous Bodies by Chemical vapour Deposition," Carbon, 29, 1991, p.605.
10. Sheishi Yajima, Mamoru Omori, Josaburo Hayasi, Kiyohito Okamura, Takao Matsuzawa, and Chiu-fong Liaw. "Simple Synthesis of the Continuous SiC Fiber with High Tensile Strength," Chemistry Letter, 1976, p.551.
11. 주혁중, 최돈목, 손민영, 오인석 "가압함침 탄화공정이 3차원 탄소/탄소 복합재의 특성에 미치는 영향", 한국복합재료학회지, 제 7 권 제 3 호, 1994, pp.51-57.