

## 탄소섬유복합재(CFC)의 진공특성

인상렬 · 박미영

한국원자력연구소  
(1999년 7월 15일 접수)

### Vacuum properties of CFC (carbon fiber composite)

S. R. IN and M. Y. Park

Korea Atomic Energy Research Institute  
(Received July 15, 1999)

**요 약** - 탄소는 토카막(tokamak) 장치 등 핵융합 실험장치에서 플라즈마 대향부품의 재료로서 가장 널리 쓰이고 있다. 탄소는 좋은 열적, 기계적 특성을 가지고 있지만 기체방출률이 높아 진공용기의 기저압력이 용기 내에 들어 있는 탄소의 양과 표면적이 좌우될 것으로 예상된다. 본 실험에서는 탄소섬유복합재(CFC)를 사용하여 토카막에서 일상적으로 일어날 수 있는 여러 가지 상황(상온배기, 용기 가열 탈기체처리, 탄소재료 고온가열(250~500°C), 보수를 위한 대기개방 등)에서 용기압력, 기체방출률, 기체 스펙트럼의 변화를 측정하여 탄소재료가 진공성능에 미치는 영향을 조사했다.

**Abstract** - Carbon has been widely used for the material of plasma facing components in fusion experiment devices like a tokamak, because carbon has good thermal and mechanical properties. However carbon has a relatively high outgassing rate. Therefore the amount and the surface area of the carbon material used in the vessel will determine the background pressure of the vacuum vessel. In this experiment influences of carbon on the vacuum performance was investigated by measuring the chamber pressure, outgassing rate and gas spectrum of carbon fiber composite (CFC) samples in various situations, pumping out, chamber baking, carbon heating (250~500°C), exposure to atmosphere for maintenance of in-vessel components, etc., occurring routinely during tokamak operations.

### 1. 서 론

핵융합 실험장치의 진공용기가 플라즈마(plasma)로부터의 높은 열유속(heat flux)과 입자속(particle flux)에 노출되면 용융과 증발, 스퍼터링(sputtering) 등에 의한 표면손상, 고온에서의 강도저하, 열응력 발생, 기체방출 등 여러 심각한 문제점들이 나타난다. 따라서 용기 내벽이 플라즈마에 직접 노출되지 않도록 고융점 재료를 기반으로 하는 플라즈마 대향부품(plasma facing component)들로 벽을 덮어씌우는 것이 보통이다. 여러 재료들 중 탄소는 융점이 높은 것은 물론 원자번호가 비교적 낮고 화학적으로 안정하며 환경 면에서 무해하고 자원이 많아 저렴하므로 1980년대 초반 D-III 토카막(tokamak) 장치 등에서 사용된 이래 현재까지도 용기 방호재로서 가장

널리 쓰이고 있다.

플라즈마 대향부품의 재료로서 갖추어야 할 특성으로는 높은 열전도계수, 높은 기계적 강도, 낮은 물리적, 화학적 마모율(erosion rate)과 함께 낮은 기체방출률(outgassing rate)을 꼽을 수 있다. 우려하는 대로 탄소재료의 기체방출률이 용기재료 보다 훨씬 높다면 용기의 기저압력을 결정하는 것은 용기 내에 들어 있는 탄소재료의 양과 표면적이 될 것이다. 예를 들어 현재 국가사업으로 건조를 추진중인 KSTAR 토카막의 진공용기 내벽을 덮을 흑연(graphite) 또는 탄소섬유복합재(carbon fiber composite, CFC)의 표면적은 약 500 m<sup>2</sup>에 달하는데 만일 단위면적 당 기체방출률이 1×10<sup>-8</sup> Pa·m<sup>3</sup>/s·m<sup>2</sup>라면 총기체방출률이 5×10<sup>-6</sup> Pa·m<sup>3</sup>/s에 이르고 1×10<sup>-7</sup> Pa의 기저압력이 필요한 경우 배기속도가 50

m<sup>3</sup>/s인 엄청난 크기의 펌프가 요구된다. 펌프의 크기도 문제지만 필요한 배기 포트를 확보하는 것도 거의 불가능에 가깝고 배기통로를 구성하는 데 드는 비용도 비현실적이다. 이때 만일 탄소재료의 기체방출률이 10배 감소하면 배기계의 설계나 제작비용을 쉽게 해결할 수 있을 것이다.

탄소재료가 플라즈마 대향부품으로서 사용될 때 용기의 진공특성에 미치는 효과는 비단 기저압력 뿐만 아니라 용기 배기시간, 수소 재순환 특성, 용기 가열시 기체 방출, 고속 플라즈마 입자에 의한 기체탈리(desorption) 등 다양하다. 이런 특성들은 배기계 설계에는 물론 용기 설계와 플라즈마 특성에도 직접적인 영향을 미치므로 이들에 대한 정확한 평가가 필요하다. 본 실험에서는 토카막에서 일상적으로 일어날 수 있는 여러 가지 상황(탄소재료 설치 후 상온 배기, 용기의 가열 탈기체 처리, 탄소재료 고온가열(250~500°C), 보수를 위한 대기개방 후 배기 등)에서 용기압력, 기체방출률, 기체 스펙트럼의 변화를 측정하여 탄소재료가 진공시스템의 진공성능에 미치는 영향을 조사했다.

## 2. 탄소섬유복합재의 일반적 진공특성

탄소섬유복합재는 탄소섬유(carbon fiber)로 짜여진 뼈대와 그 사이를 메우고 있는 역시 탄소 성분의 기질(matrix)로 이루어져 있다. 예를 들어 본 실험에 사용된 CX2002U는 열전도도가 높은 피치(pitch) 기반의 탄소 섬유로 만든 부직포(carbon felt)에 화학증기침투(chemical vapor infiltration, CVI) 방법으로 기질을 형성한 재료다. 탄소는 다양한 형태를 취하고 있지만 기본이 되는 것은 두 가지 결정구조로서 그 중 흑연의 밀도가 2.27 g/cm<sup>3</sup>이고 다이아몬드의 밀도가 3.53 g/cm<sup>3</sup>인데 반하여 인공적으로 만든 탄소재료의 밀도는 2 g/cm<sup>3</sup> 이하이므로 많은 기공이 형성되어 있음을 뜻한다. CX-2002U의 밀도는 1.7 g/cm<sup>3</sup>이다. 따라서 탄소재료는 기공 속에 다량의 기체를 흡착할 수 있으므로 장치 가동 전에 탈기체를 해주어야 하며 특히 800 K 이하의 온도에서는 수소를 많이 함유하고 있어서 플라즈마 속에서 수소 재순환이 활발하게 일어난다. 탄소는 온도가 2000 K를 넘으면 스퍼터링 수율이 커지고 승화가 심해진다. 2300 K에서는 탄소의 증기압이 10<sup>-5</sup> Pa 정도이고 3000 K가 되면 1 Pa에 달한다 [1].

수소(H<sub>2</sub>)는 800K 이하에서는 탄소(C)와 작용하여 메탄(CH<sub>4</sub>)을 생성하고 더 고온에서는 반대로 탄화수소들이 열분해하여 탄소는 남고 수소가 방출된다. 수소는 탄소에 흡착하면 해리되어 원자상태로 확산하고 다시 방출될 때는 분자로 결합하는 과정을 거친다. 따라서 수소의 평형압력(P[Pa])은 탄소재료 중 수소농도(C<sub>H</sub>[std.cc/g])의 제곱에 비례한다. 즉  $P = S^{-1}C_H^2$ 으로 표현되는데 S는 용해도로  $1.4 \times 10^{-9} e^{19000/RT}$ 의 값을 갖는다 [2]. 예를 들어 C<sub>H</sub> = 10<sup>-5</sup>이라고 하면 온도가 20°C 및 350°C일 때 평형압력은 각각 3×10<sup>-5</sup> Pa 및 1.8×10<sup>-3</sup> Pa이다 [3]. 플라즈마나 원자상 수소의 조사에 의해 표면이 포화되면 국부적으로 H/C 비가 0.4에 이르는 것으로 알려져 있다. 탄소재료의 수소에 대한 흡착의 활성화 정도에 영향을 미치는 인자는 물론 기공율(기공의 부피÷전체 부피)과 비표면적(실효 표면적÷기하학적 표면적) 등이 포함되지만 실상은 기질의 흑연화도(또는 탄소화도)에 더욱 크게 의존한다. 흑연화도가 높을수록 화학적 활성이 낮아진다.

탄소재료로부터 방출되는 주요 기체는 수소, 물(H<sub>2</sub>O), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄 등이다. 탄소재료의 밀도가 높을수록 조직이 치밀하여 진공특성이 좋을 것으로 생각하기 쉬우나 여러 실험결과에 의하면 밀도가 높을수록 실효표면적이 크고 기체방출도 커지는 경향을 보인다 [2, 4]. 따라서 저밀도의 탄소재료가 오히려 핵융합 실험장치의 플라즈마 대향부품으로 적절하다. 기체방출을 줄이는 방안으로서는 설치 전 할로젠 기체(halogen gas) 처리(~2000°C), 설치 후 가열 탈기체 처리(baking) 및 방전세정(discharge cleaning) 등이 있다. 탄소를 고온으로 가열하여 탈기체 처리하면 기체방출이 현저히 줄어드는데 이는 저밀도일수록 더 효과가 높다 [2, 5].

CX2002U의 승온탈리측정(TDS)을 한 결과를 보면 ~300°C와 ~500°C에 탈리 피크가 나타나고 360°C로 30분 가열한 후에는 저온 쪽 피크는 거의 나타나지 않고 있다 [2]. 이때 적어도 저온 쪽 피크를 없애기 위해서는 탈기체 처리온도가 최소 350°C는 되어야 한다는 결론을 얻을 수 있다. 한편 핵융합 실험장치 가동중에는 높은 열유속과 입자속에 의해 탄소의 온도가 1000°C 정도로 높이 올라가고 강제탈리(stimulated desorption) 현상이 반복적으로 일어나므로 기체 잔류량이 적어지는데 이 또한 저밀도 탄소재료에서 현저하게 나타난다.

### 3. 실험

본 실험에 사용했던 실험장치 및 시료에 대한 자세한 설명은 참고문헌 [6]에 나와 있으므로 이 곳에서는 간략하게 기술한다. 실험장치는 그림 1과 같이 시료실, 표준 용기, 진공펌프 및 각종 진공계로 구성되어 있다. 시료는 일본 동양탄소(Toyo Tanso)사제 탄소섬유복합재 CX-2002U를 75 mm×135 mm×3 mm로 양면을 전식가공하고 실통으로 교대로 갈라 저항값이 0.1 Ω 정도가 되도록 만든 후 특별한 처리를 하지 않고 흡습제가 들어있는 용기 안에서 그대로 3개월 정도 보관했던 것이다. 시료는 두 개를 같이 장착하고 직렬로 연결하여 직접 전류를 흘려 가열하였다. 시료실 및 상부 교정용기의 총 면적은 약 8500 cm<sup>2</sup>이고 시료의 표면적은 약 405 cm<sup>2</sup>으로써 그 비는 21:1이다. 용기는 304 스테레스강으로 만들고 자기부상형 터보분자펌프로 배기하였으며 충분한 가열 탈

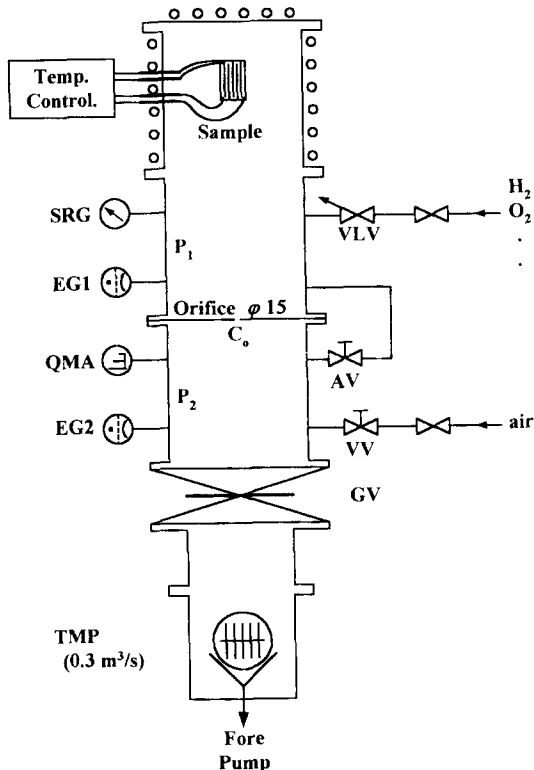


그림 1. 탄소섬유복합재의 진공특성 측정을 위한 실험장치의 개념도. SRG: spinning rotor gauge, EG: extractor gauge, QMA: quadrupole mass analyzer, TMP: turbo molecular pump.

기체 처리후  $3 \times 10^{-8}$  Pa의 도달압력을 나타냈다.

실험은 토카막 운전과 보수과정에서 일어날 수 있는 다양한 상황과 조건에서 탄소가 나타내는 진공특성을 조사하는 것이 목적이다. 실험의 기본 과정은 여러 조건에서 용기 내의 전압력과 기체 스펙트럼의 변화를 읽는 것인데 실험에 사용한 시료의 표면적이 용기 면적에 비해 충분히 넓지 않아서 용기의 기체방출을 보정해 주어야 한다. 이를 위해 시료의 기체방출률 측정 전에 빈 용기만으로 대기개방과 배기 및 가열 탈기체의 과정을 10여회 시행하여 용기가 소위 고갈상태(fully degassed state)에 도달한 후 시료장착 전 마지막으로 구한 배기곡선을 용기의 기준 배기곡선으로 삼고 이를 시료장착 후의 전체 배기곡선에서 빼어 시료의 배기곡선을 구했다.

#### 3.1. 탄소섬유복합재의 상온 배기특성

대기 중에 3개월 이상 방치했던 탄소섬유복합재 시료를 처음 용기에 장착한 직후와, 1년 이상 각종 실험을 하면서 시료의 기체방출률이 거의 용기 수준으로 줄어든 시점에서 용기를 10일 동안 대기개방한 후의 두 경우에 대해 각각 배기를 시작해서 가열 전까지의 상온에서 압력변화를 측정하여 그림 2와 같은 배기곡선을 얻었다. 이들과 그림에 같이 그려져 있는 용기의 배기곡선(시료가 없을 때)의 차이가 시료만의 배기곡선이다. 시료 장착 직후에는 시료가 없을 때에 비해 압력이 10배 내외로 증가하므로 면적비를 고려하면 시료가 용기에 비해

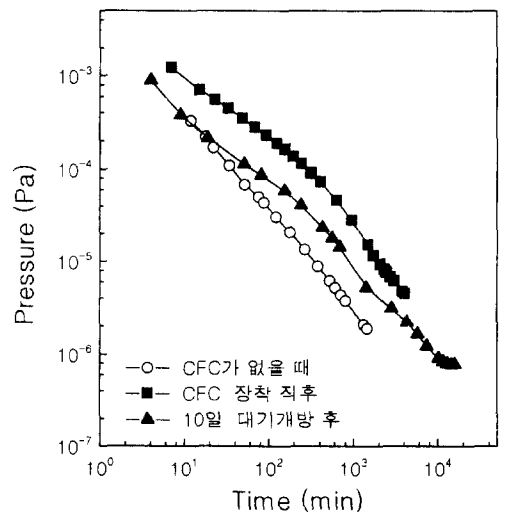


그림 2. 탄소섬유복합재 CX-2002U 시료장착 전후의 용기 배기곡선의 변화.

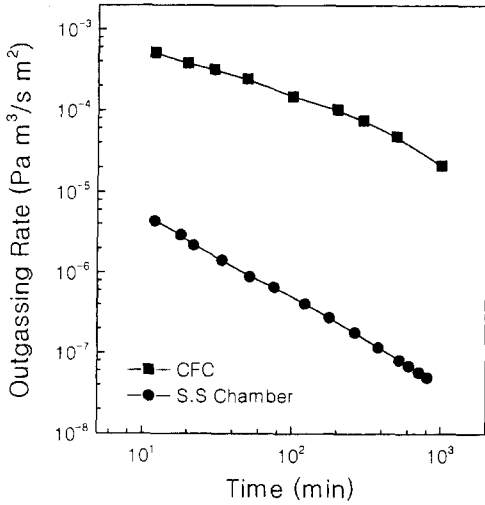


그림 3. 탄소섬유복합재 및 304 스테레스강의 상온에서 단위면적당 기체방출률의 변화.

200배 정도 큰 기체방출률을 가지고 있음을 짐작할 수 있다. 실험은 용기온도를 40°C로 유지하면서 수행했다.

실험중에 흡습필터를 거치지 않은 공기를 주입하여 10일 동안 대기개방을 하고 측정한 것은 시료의 기체방출 특성을 여전히 잘 나타내고 있지만 시료가 없을 때와의 압력차이는 시료장착 직후에 비해 줄어들었다. 결국 시료의 기체방출은 대기에 노출되어 있던 기간에 의존하는 것으로 보여지는데 이 그림에 신지는 않았지만 1~2일의 대기개방은 용기의 배기곡선을 크게 바꾸지 않았다. 특히 흡습필터를 거쳐 공기를 주입했을 때는 더욱 그렇다.

그림 3은 스테레스강재 용기와 시료의 단위면적당 기체방출률을 오리피스법으로 구하여 비교한 것이다. 그림 2와 3에서 용기의 압력과 기체방출률은 거의 1/t (배기시간)의 꼴로 변하므로 표면방출이 주로 일어나고 있다고 볼 수 있지만 시료가 있을 때는 1/t<sup>0.5</sup>의 꼴에 가까우므로 표면방출 보다는 미세한 기공을 통한 확산이 기체방출을 주도하고 있음을 알 수 있다.

그림 4는 시료가 있을 때와 없을 때 방출기체 중 수소(M=2)와 물(M=18)의 분압을 잔류기체분석기(RGA)의 이온전류값으로 표현한 것이다. 이 그림을 통해 시료로부터 방출되는 기체의 대부분은 수소임을 알 수 있다. 물은 시료에서 특별히 많이 방출된다고 보기 어렵다. 이는 탄소가 수소는 잘 흡착하지만 물분자는 잘 흡착하지 않는다고 알려져 있는 것과 잘 부합된다. 또

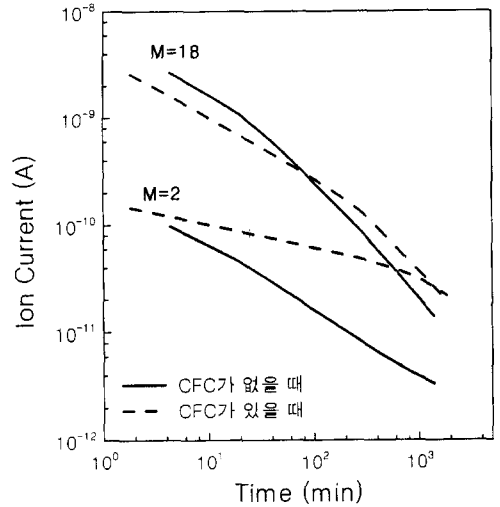


그림 4. (a) 시료장착 전과 (b) 시료장착 직후 상온에서 수소와 물의 스펙트럼(이온전류) 변화.

물은 스테레스강(0.65, 0.51 eV)보다 탄소(0.37, 0.12 eV)에 대한 탈리에너지가 낮아 방출이 쉬운 것으로 알려져 있다 [7]. 이때 그림 5처럼 기체농도의 변화를 그려보면 시료가 없을 때는 상온에서 오랫동안 배기해도 물분자의 농도가 가장 높지만 시료가 있을 때는 배기시작 약 12시간 후에는 수소의 농도가 더 높아진다. 상온에서는 수소 외에 일산화탄소와 메탄 등은 큰 증가를 보이지 않았다.

시료 장착 직후 배기할 때와 달리 시료 및 용기의 고온가열 등 실험 중간에 용기를 대기개방한 후 잔류기체의 조성을 분석하면 초기 배기중에는 질소와 산소가 전반적으로 높은 농도로 증가하지만 곧 점차 감소하고 대신에 시간이 지나면서 물과 수소의 농도가 꾸준히 증가하는 양상을 보인다 (그림 6). 수분 농도와 질소 농도의 상대적인 크기는 대기개방 시간에도 관계하지만 대기개방시 실내의 습도에 의해 더 좌우되는 것으로 보인다. 대기 중에 질소와 산소의 농도가 높지만 흡착이 금방 포화되는 반면 물과 수소의 흡착은 상당한 기간 동안 계속되는 것으로 생각된다. 그 중에서도 수소는 거의 무한히 흡착된다. 따라서 짧은 시간의 대기개방에서는 질소의 흡착량이 크지만 매우 긴 시간 동안 대기에 노출시키면 비록 대기 중 수소분압은 매우 낮지만 누적되는 수소의 흡착량이 훨씬 높아지는 것이라고 해석할 수 있다. 마찬가지로 이유로 같은 성질의 공기에 노출된다면 노출시간이 길면 길수록 배기 도중 수소 분압이 물 보다

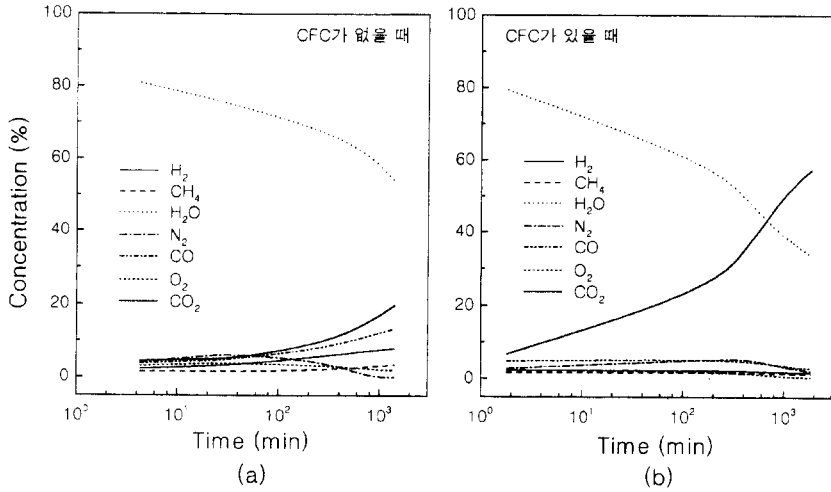


그림 5. (a) 시료장착 전과 (b) 시료장착 직후 상온에서 방출 기체성분의 변화.

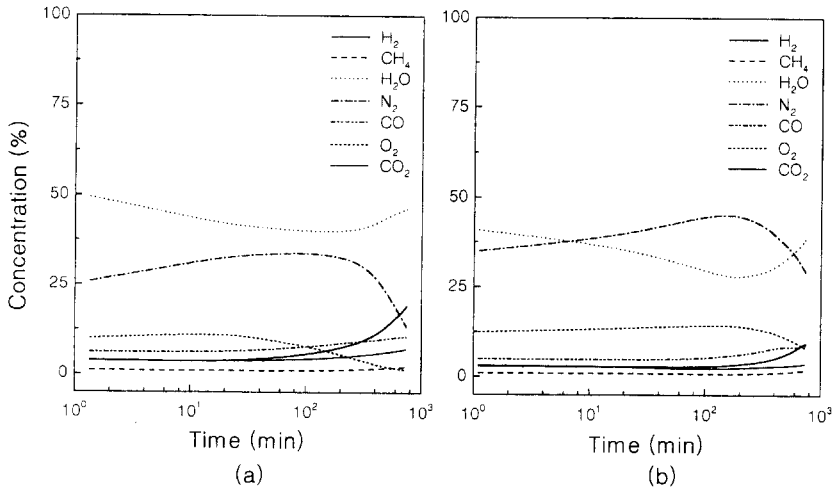


그림 6. 실험중 진공용기의 대기개방 후 상온에서 방출 기체성분의 변화. (a)는 10시간 대기개방 후, (b)는 11시간 대기개방 후 배기중에 측정된 값이다.

높아지는 시간이 빨라진다고 말할 수 있다 (그림 6a 및 6b와 5b를 비교).

시료나 용기를 가열하지 않고 상온배기를 오랫동안 계속하면 결국 수소, 일산화탄소 등이 물 보다 많아지고 (그림 7) 전체 압력은  $10^{-7}$  Pa 대에 도달한다 (그림 2).

### 3.2 탄소섬유복합재의 고온 가열특성

그림 8은 시료 장착 직후 차례로 (a)  $100^{\circ}\text{C}$ , (b)  $300^{\circ}\text{C}$ , (c)  $500^{\circ}\text{C}$ 까지 승온가열할 때 얻은 스펙트럼의 변화들을 보여주고 있다. (a)와 (b) 사이에는 4.5시간의

간격이 있고 (b)와 (c) 사이에는 36시간의 간격이 있다. 이때 용기는  $25^{\circ}\text{C}$  정도로 냉각했다. 시료장착 후 가열 전에는 수소의 분압이 가장 높고 물이 그 다음이지만 가열이 시작되면서  $M=28$ (질소)의 분압이 급격히 증가하여 수소 보다 높아진다. 질소와 수소 외에는  $M=16$ (메탄),  $M=44$ (이산화탄소)가 많이 나오고  $M=18$ (물)은  $70^{\circ}\text{C}$  정도가 되었을 때부터 상대적으로 빠르게 증가한다. 시료를 냉각한 후 다시  $300^{\circ}\text{C}$ 까지 온도를 올리면 초기에는 질소가 잠깐동안 다량 발생하지만 곧 물과 이산화탄소가 빠르게 증가하여 주종을 차지한다. 또 다시

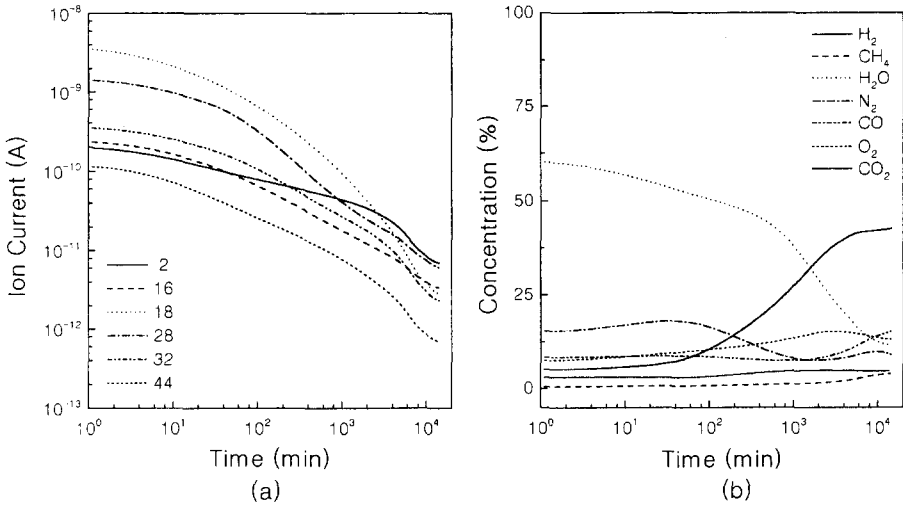


그림 7. 탄소섬유복합재를 12일 대기개방 후 상온에서 장시간 배기할 때 (a) 방출 기체스펙트럼 및 (b) 성분의 농도 변화.

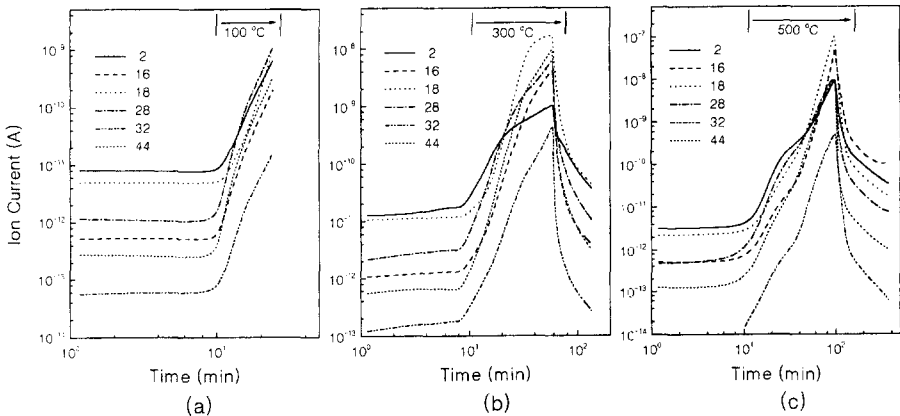


그림 8. 시료장착 직후 40분 배기에 이어서 탄소섬유복합재를 (a) 100°C, (b) 300°C, (c) 500°C로 가열할 때 방출 기체스펙트럼의 변화.

시료를 냉각하고 하루 이상  $10^{-7}$  Pa 대에서 배기한 후 500°C까지 가열하면 초기에 물과 이산화탄소가 급격히 증가하다가 이산화탄소는 증가세가 줄어들지만 물은 계속 빠르게 증가한다. 이렇게 시료를 가열할 때 초기에 물이 많이 방출되는 현상은 10시간 정도의 짧은 대기개방에서도 항상 나타났다.

장치를 가열 탈기체 처리하여 기저압력이  $10^{-8}$  Pa 대에 들어간 후에도 시료를 가열하면 역시 물의 증가세가 두드러지지만 가열 전 수소가 가장 큰 분압을 나타냈던 것이 뒤바뀌지는 않는다. 그림 9처럼 수시간의 간격을 두고 세 번 연달아 12시간씩 끊어서 350°C로 가열할 때 얻은 스펙트럼의 변화를 보면 M=18의 증가폭은

갈수록 낮아지지만 M=2의 증가폭은 거의 변하지 않으며 가열중에는 일정한 값을 유지하거나 오히려 증가하는 경향을 나타낸다. 물은 수소에 비해 빠른 시간 내에 제거될 수 있음을 알 수 있다.

시료를 고온에서 계속 가열하면 수소, 물, 일산화탄소, 산소 등이 주종을 이룬 상태에서 기체방출이 점차 줄어든다. 그림 10과 11은 대기개방 후 250°C 또는 350°C로 가열할 때 24시간 동안 압력 및 스펙트럼의 변화를 보여주고 있다. 가열시 초기 변화는 사용이력에 매우 민감하므로 두 경우를 절대적으로 비교할 수는 없지만 높은 온도로 가열하는 것이 기체방출이 큰 대신 냉각 후 압력이 낮아진다는 일반적 경향을 나타내고 있

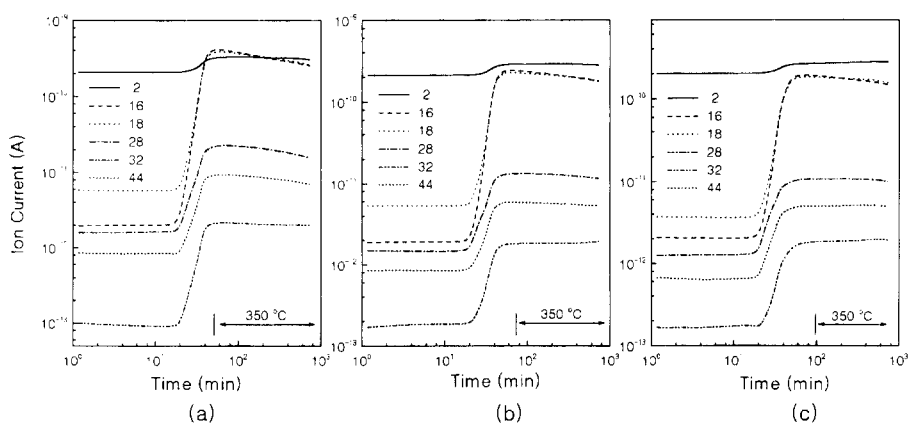


그림 9. 탄소섬유복합재를 350°C로 12시간씩 세 번((a), (b), (c)) 가열했을 때 얻은 방출 기체 스펙트럼의 변화.

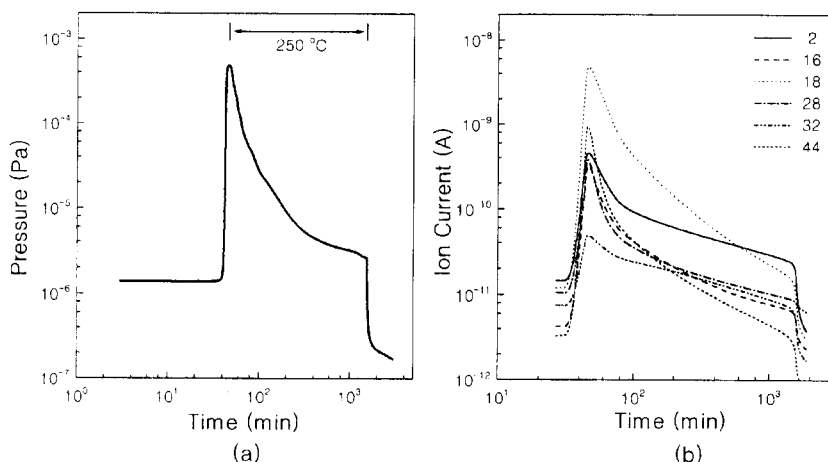


그림 10. 용기를 16시간 대기개방한 후 55시간 배기에 이어서 탄소섬유복합재를 250°C로 24 시간 가열했을 때 (a) 방출 기체스펙트럼 및 (b) 성분의 농도 변화.

다. 방출기체로서  $M=18$ 과  $M=2$ 는 온도가 다른 두 경우에 현저한 차이를 발견할 수 없는데 반하여 가장 두드러진 증가를 보이는 것은  $M=16$ (메탄분자 또는 일산화탄소 중 산소원자) 곡선이다. 이것은 탄소 내에서 머물고 있던 산소가 600 K 이상에서 탄소와 반응하여 방출되는 일산화탄소 및 800 K 이하에서 수소와 탄소가 반응하여 만들어지는 메탄 외에도 물과 탄소와 반응하여 만들어지는 일산화탄소가 그 원인으로 생각된다. 시료만 350°C로 가열하면 용기온도는 60°C 정도로 올라가는데 하루 이내의 대기개방이었다면 24시간의 가열 후 10시간 이내에  $10^{-8}$  Pa 대에 들어서고 1주일 배기 후 낮은  $10^{-8}$  Pa 대에 들어갈 수 있었다. 시료를 250°C로 24시간 가열하는 것만으로는  $10^{-8}$  Pa 대에 들어서는 것이

어려웠다.

시료를 따로 가열하지 않고 용기만 가열하여도 약간의 시차는 있지만 시료의 온도는 거의 용기온도까지 올라간다. 따라서 시료를 가열하는 효과를 간접적으로 얻을 수 있다. 그림 12에서는 용기를 대기개방 후 배기하면서 200°C로 가열 탈기체할 때 얻은 스펙트럼을 시료가 없을 때의 것과 비교하고 있다. 두 스펙트럼은 기본적으로 큰 차이가 없지만 시료가 있을 때는 역시  $M=16$  곡선이 높은 값으로 유지된다는 점이 특이하다. 가열시작 7시간 후에는 시료 온도가 195°C가 되는데 이때 시료를 30분 동안 350°C로 가열하면 이미 알고 있는 대로  $M=18$ 과  $M=44$  피크가 가장 많이 증가한다. 12시간의 용기가열이 끝나고 12시간 냉각 후에는 압력이  $10^{-8}$

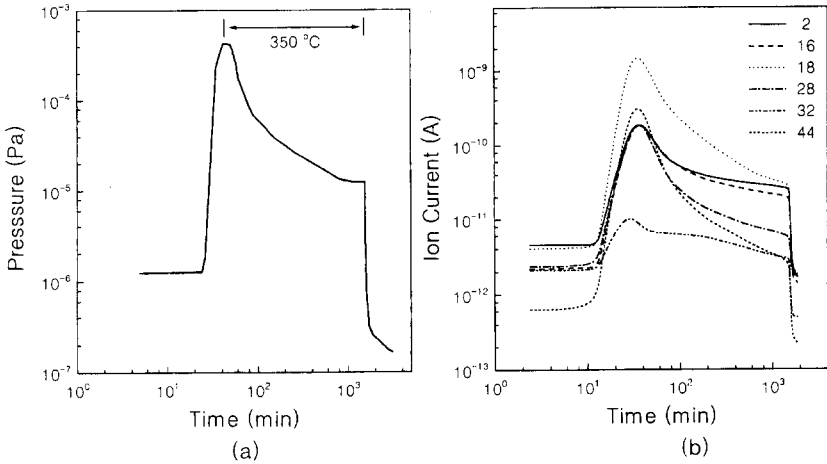


그림 11. 용기를 21시간 대기개방한 후 48시간 배기에 이어서 탄소섬유복합재를 350°C로 24시간 가열했을 때 (a) 방출 기체스펙트럼 및 (b) 성분의 농도 변화.

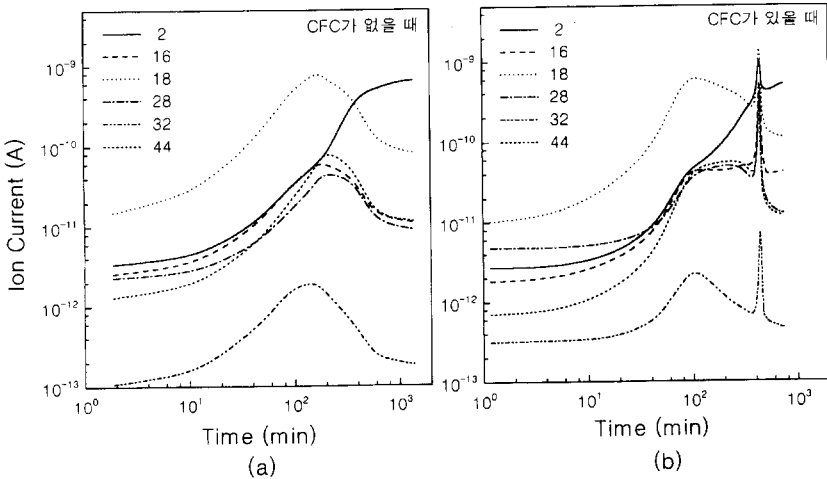


그림 12. (a) 시료장착 전(220°C)과 (b) 시료장착 후(200°C) 용기의 탈기체 처리중 방출 기체스펙트럼의 변화. (b)는 11시간 대기개방과 24시간 배기 후 탈기체 처리를 한 것.

Pa대로 들어갔다.

3.4 실험결과에 대한 고찰

본 논문의 주목적 중 하나는 탄소섬유복합재를 초고진공 장치의 용기 내 부품의 재료로 사용하기 위해서는 어느 정도의 온도로 가열하여 기체를 탈리시켜야 하는가를 검토해 보려는 것이다. 탄소를 더 높은 온도에서 더 오랫동안 가열하면 더 높은 진공도를 얻을 수 있다는 것은 명백하지만 용기 내에 장착한 후에는 여러 이유로 인해 충분한 온도로 가열하는 것이 어렵기 때문이다.

탄소재료를 진공용기에 설치하기 전에 진공로에서 500~700°C(혹은 또는 탄소섬유복합재만은 염소분위기에서 2000°C로 가열하여 처리할 수도 있지만 만일 탄소 타일에 냉각판 등이 접합되어 있는 구조라면 이 정도 온도가 적절하다)의 고온으로 가열하여 탈기체 처리하고 용기 내에 장착한 후에는 낮은 온도에서 가열 탈기체하여도 기체방출률을 대폭 낮출 수 있다는 것은 잘 알려져 있다 [4]. 이는 한 번 가열한 효과를 대기개방을 거친 후에도 상당히 유지하기 때문인데 본 실험의 결과도 바로 이런 가열에 대한 기억효과가 탄소섬유복합재 시료



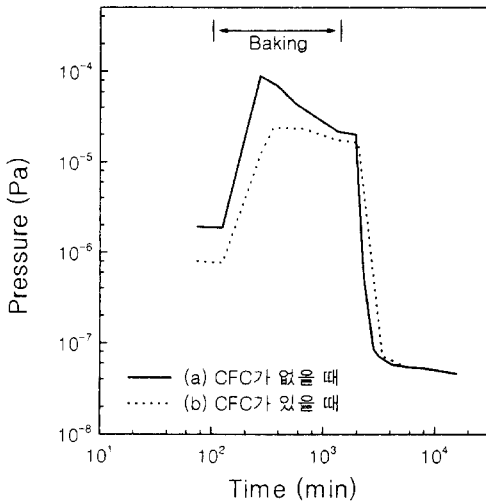


그림 13. (a) 시료장착 전(220°C)과 (b) 시료장착 후(200°C) 용기의 탈기체 처리시 및 처리 후의 용기압력 변화. (b)는 16시간 대기개방과 30분 동안 350°C 승온가열 및 50시간 배기 후 탈기체 처리를 한 것.

에서 잘 나타난다는 것을 보여주고 있다.

용기 압력을  $10^{-8}$  Pa 대로 만들기 위해서 시료장착 직후에는 1주일 정도의 탈기체가 필요하지만 기체방출이 많이 이루어진 후 24시간 정도의 대기개방은 24시간의 탈기체로 충분하였다. 이때 탈기체는 시료를 직접 가열 하든 용기를 가열하든 대기에 노출되었던 시간에 따라 적산온도가 어느 이상 되어야 원하는 진공도에 도달하였다. 물론 필요한 적산온도값은 사용이력에 따라 민감하게 변하고 대기개방 시간에 단순히 비례하지는 않는다. 예를 들어 통상적인 용기 탈기체를 병행하는 것을 전제로 할 때 12시간의 대기개방 후에는  $5000^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$ 이면  $10^{-8}$  Pa 대에 들어서고 10일 이상의 대기개방 후에는  $15000^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$ 가 필요했다.

탄소는 많은 기체를 흡착하고 있는 반면 낮은 탈리 에너지를 가지고 있어서 짧은 시간 동안 가열하여도 용기재료와 같은 수준( $\sim 5 \times 10^{-9}$  Pa·m<sup>3</sup>/s·m<sup>2</sup>)의 기체방출률을 가지므로 용기 압력을 낮은  $10^{-8}$  Pa 대에서 유지하는 데 어려움이 없다. 물론 본 실험에서는 낮은 기저 진공도를 얻기 위해서는 용기의 가열이 필수적이었고 통상 1시간 이내에서 350°C의 시료 가열과 24시간, 200°C 내외의 용기가열을 거치면 시료가 없을 때와 같은 수준의 압력을 얻을 수 있었다(그림 13).

앞서 언급한 대로 본 실험에서는 용기면적에 비해 시

료의 면적이 작기 때문에 용기를 가열하는 것이 도달진공도에 큰 영향을 미쳤지만 대형 토키막과 같이 대부분의 용기 내벽이 탄소로 덮여 있는 경우는 탄소의 가열 조건이 용기를 어떻게 가열할 것인가 하는 것 보다 더 중요할 것으로 생각된다. 간단한 계산에 의하면 KSTAR 장치에서는 탄소를 350°C로 가열하는 것만으로 용기의 온도가 250°C 이상으로 올라가는 것으로 구해졌다[8]. 따라서 이런 경우는 가열시간을 고려하지 않는다면 원리적으로는 굳이 용기를 따로 가열하지 않아도 되며 시간만 충분하다면 탄소의 가열만으로도 높은 진공도에 도달할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

탄소섬유복합재를 시료로 하여 스텐레스강(304계) 용기에서 상온 및 고온 배기특성을 조사했다. 상온에서 탄소섬유복합재는 용기재료에 비해 약 180배 높은 기체방출률을 가지는 것으로 측정되었으며 잔류기체의 주종은 초기에는 물이지만 어느 정도 시간이 경과하면 수소가 대부분을 차지하는데 이는 상당기간 물이 계속 우위를 차지하는 스텐레스강의 상온배기 특성과 아주 다른 것이다.

탄소섬유복합재를 가열하면 물, 수소 외에 메탄과 일산화탄소가 꾸준히 나오는데 이는 수소 또는 물과 탄소와의 화학반응에 의한 것으로 생각된다. 통상적인 탈기체처리를 위한 용기가열과 짧은 탄소섬유복합재 가열을 병행하면 용기만 있을 때와 거의 같은 기저압력을 얻을 수 있다. 만일 탄소섬유복합재만 350°C로 가열하면 용기온도는 60°C 정도로 올라가는데 하루 이내의 대기개방이었다면 24시간의 가열 후 10시간 이내에  $10^{-8}$  Pa 대에 들어서고 1주일 배기 후 낮은  $10^{-8}$  Pa 대에 들어갈 수 있었다. 탄소섬유복합재만을 250°C로 24시간 가열하는 것으로는  $10^{-8}$  Pa 대에 들어서는 것이 어려웠다.

탄소섬유복합재를 플라즈마대항부품의 재료로 사용하려는 것을 염두에 두면 플라즈마 입자 및 열유속의 영향으로 일어날 수 있는 기체 스파이크 발생을 방지하기 위해서는 설치 전 고온가열과 설치 후 방전세정 처리가 효과적이라고 판단되므로 이를 위한 실험을 계획하고 있다.

#### 참고문헌

- [1] 田邊哲朗, 丸山忠司, 核融合研究 **69**, 415 (1993).
- [2] 山科俊郎, 日野友明, 核融合研究 **63**, 385 (1990).

- [3] 田邊哲朗, 核融合研究 **61**, 367 (1989).
- [4] K. L. Fospier, *The role of micropore size and chemical nature of the pore surface on the adsorption poperties of activated carbon fibers*, Ph. D. thesis, Univ. of Illinois (1991).
- [5] Y. Watanabe, T. Tanabe, and S. Imoto, *Fusion Eng. and Design* **9**, 143 (1989).
- [6] 인상렬, 한국진공학회지 **5**, 175 (1996).
- [7] S. Kato, H. Oyama, *Vacuum* **41**, 1998 (1990).
- [8] 이강희 외 한국진공학회지 **8**, 397 (1999).