

역확산화염과 촉매금속 기판을 이용한 탄소 나노튜브와 나노섬유의 연소합성

이교우* · 정종수* · 황정호**

Synthesis of Carbon Nanotubes and Nanofibers on a Catalytic Metal Substrate by an Inverse Diffusion Flame

Gyo Woo Lee, Jongsoo Jung and Jungho Hwang

ABSTRACT

Synthesis of carbon nanotubes and nanofibers on a metal substrate by an ethylene fueled inverse diffusion flame was illustrated. Stainless steel plates were used for the catalytic metal substrate. Multi-walled carbon nanotubes and nanofibers with a diameter range of 30-80nm were found on the substrate. The temperature of the substrate played an important role in the formation of carbon nanotubes and nanofibers. The pathway to the nanotubes and nanofibers could be determined by the temperature history of the substrate.

Key Words : Flame synthesis, Inverse diffusion flames, Carbon nanotubes, Carbon nanofibers, Catalytic metal substrate

1. 서 론

1985년에 Kroto와 Smalley가 탄소의 동소체(allotrope)의 하나인 풀러렌(fullerene, C₆₀)을 처음으로 발견한 이후[1], 1991년 이 새로운 물질을 연구하던 일본전기회사(NEC) 부설 연구소의 Iijima가 아크방전(arc discharge)법을 사용하여 흑연 음극 상에 형성시킨 탄소덩어리를 TEM(Transmitting Electron Microscope)으로 분석하는 과정에서 가늘고 긴 대롱 모양의 탄소나노튜브(carbon nanotubes)를 발견하였다[2]. 이때 성장된 탄소나노튜브의 길이는 수십 nm에서 수 mm이고, 외경은 2.5-30nm였다. Fig. 1은 고체 상태로 존재하는 탄소인 다이아몬드(diamond), 흑연(graphite), 풀러렌(fullerene) 등과 함께 탄소나노튜브의 구조를 보여주고 있다. 탄소나노튜브는 말려진 각도에 따라서 arm-chair 구조와 zig-zag 구조 등으로 구분되며, 단일벽

(single-walled) 및 다중벽(multi-walled) 혹은 다발(ropes) 형태로 나타난다.

탄소나노튜브의 구체적인 응용분야로 연구되고 있는 것으로는 전자방출원(electron emitter), VFD(Vacuum Fluorescent Display), 백색광원, FED(Field Emission Display), 리튬이온 2차 전지 전극, 수소저장 연료전지, 나노 와이어, 나노 캡슐, 나노 핀셋(tweezer), AFM / STM tip, 단 전자 소자, 가스센서, 의·공학용 미세 부품, 고기능 복합체 등이 있다[3]. 특히 중량 당 수소저장 능력이 가장 크므로 차세대 연료 저장장치로서 실용 가능성이 가장 높다고 알려져 있다. 또한 최근에는 비표면적이 큰 탄소나노튜브에 의한 소각로 배출가스 중의 다이옥신 및 중금속 등의 미량독성물질의 효과적인 흡착 제거를 위한 기술이 제안되기도 하였다[4]. 우수한 물성과 다양한 응용 가능성으로 인하여 탄소나노튜브는 차세대 전자정보산업분야에서 폭넓게 이용될 것으로 기대되고 있다. 미국을 위시하여 일본, 독일, 프랑스, 영국 등에서 21세기 첨단전자정보산업분야의 경쟁력 확보와 고기능성 복합소재의 경쟁력 확보

* KIST 지구환경연구센터

** 연세대학교 기계공학과

차원에서 국가적인 지원 아래 탄소나노튜브의 합성 및 응용에 대한 연구가 추진되고 있다. 우리나라의 경우, 현재까지의 탄소나노튜브 대량합성 기술은 각종 전자방출원의 제작과 직결되어 있어서 디스플레이 전문업체가 이러한 응용에 커다란 관심을 가지고 있다. 이외에도 광기능성 소자 부품소재, 고성능, 저가격의 평판디스플레이, 캠코더용 뷰파인더(view finder), 항공기 및 자동차의 계기판, 각종 휴대용 정보통신기기, CRT, 컴퓨터 모니터 등에도 응용이 기대된다.

한편, 탄소필라멘트(carbon filaments) 등으로도 불리는 탄소나노섬유(carbon nanofibers)는 Fig. 1의 흑연(graphite) 면(sheet)이 섬유축과 일정 각을 가지면서 배열되어 있으며, 탄소나노튜브와 마찬가지로 탄소를 함유한 가스와 고온의 금속입자가 상호반응하여 형성된다고 1890년대에 보고되었다. 그 구조가 밝혀지기 시작한 것은 전자현미경이 보급된 1950년대 후반였으며, 1970년대부터 본격적인 연구가 이루어졌다. 일반적으로 탄소나노섬유는 2-100nm의 직경과 5-100 μ m 가량의 직경을 가진다. 탄소나노섬유는 넓은 비표면적, 높은 전기전도성과 기계적 강도 등을 보이는 탄소동소체로서 수소저장매체, 촉매담지, 전자파차폐, 정전기 방지용 전도상 코팅재, 필터, 선택적 흡착재, 축전기의 분극성전극재 및 고성능 2차전지의 분극재 등 다양한 분야에 적용이 가능하다[5].

오랜 시간동안 연소분야의 많은 연구자들은 매연입자(soot particles)의 생성기구를 밝히고자 노력해왔으며, 아직까지도 논란의 소지는 있지만 다양한 분석기술의 발달과 함께 1990년대 이후에

들어서 구체적인 매연입자 생성경로가 조심스럽게 밝혀지고 있다. 매연입자는 평면적인 2차원 구조의 흑연(graphite)이 적층된 구조가 모여서 이루어진 형태를 보이고 있는데, 일반적으로 기본입자(primary particles)의 직경을 30 nm로 보고 있다. 매연입자의 생성에는 아세틸렌(C_2H_2)으로 대표되는 C_2 화학종과 C_3 화학종 등의 PAHs(Poly-Cyclic Aromatic Hydrocarbons)가 필수적이며, 몇 가지 대표적인 생성모델이 제시되어 받아들여지고 있다[6-8]. 이보다 연구의 역사가 훨씬 짧은 탄소나노튜브의 경우 과거에 탄소섬유를 연구하던 연구자들이 추론하고 제시한 모델이 보편적으로 받아들여지고 있다. 대표적인 것이 Baker와 Harris가 1970년대에 탄소섬유의 촉매 성장(catalytic growth)에 대해서 제안한 모델이다[9]. Baker와 Harris는 전자현미경을 이용하여 필라멘트 형태의 성장에 관하여 자세히 조사하여, 금속 표면에서 탄화수소의 열분해 시 생성되는 나노섬유의 성장 모델을 제시하였다. 이 성장 모델에서는 4가지 단계에 걸쳐 일어난다고 제안하였는데, 첫 단계에서는 탄화수소가 금속 표면에서 열분해 되어 수소와 탄소가 방출되고 금속입자 내로 용해되어 들어간다. 둘째 단계에서는 금속 입자를 통하여 탄소가 확산되고 필라멘트의 몸체를 형성하기 위해 뒷면에 석출된다. 여기서 확산과정은 가장 느리게 일어나는 단계가 된다. 이 때 앞면에 탄소가 공급되는 속도는 확산되는 속도보다 빨라서 금속표면의 활성 표면을 덮어서 막아버리므로 앞면에 쌓이는 것을 피해야 한다. 이는 탄소의 표면 확산을 빠르게 하여 피할 수 있다. 표면 확산된 탄소가 필

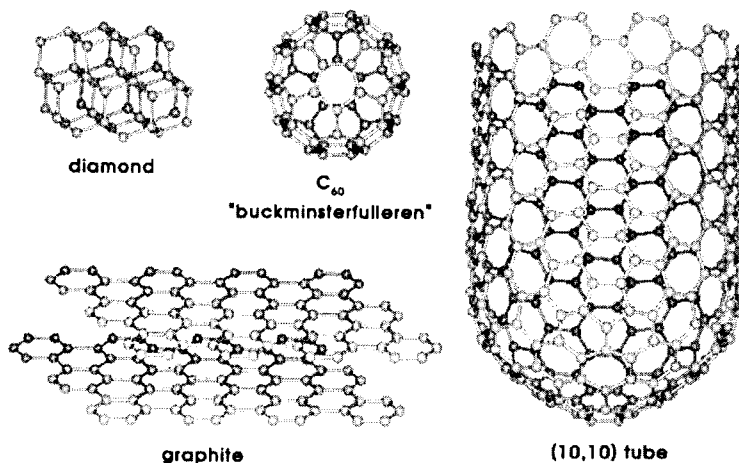


Fig. 1 Carbon-related materials.

라멘트 주 몸체의 껍질을 형성하게 되는 것이 세 번째 단계에 해당한다. 넷째 단계에서는 금속 촉매 표면에 보호막이 형성되어 활성을 잃게 되고 성장이 멈추게 된다[10]. 매연입자의 경우와는 달리 풀러렌 및 탄소나노튜브와 나노섬유는 3차원 구조를 가지고 있으며, 이는 매연입자와는 생성경로가 전혀 다름을 짐작할 수 있게 해주는 것이다. 탄소나노튜브나 나노섬유 모두 그 형상과 미세구조는 촉매의 종류, 촉매의 조성, 합성조건, 반응가스 등의 여러 가지 인자에 의해서 영향을 받는다.

이러한 생성기구를 바탕으로 많은 연구자들이 니켈(Ni), 철(Fe), 코발트(Co), 망간(Mn) 등의 촉매금속을 사용하여 탄소나노튜브를 성장시킨 결과를 발표하였다. 흑연 봉(graphite rod)에 촉매금속을 함유시켜 진공분위기에서 열분해(pyrolysis)시켜서 성장시키거나, 고온로(furnace)의 보트(boat)에 촉매금속을 두고 탄화수소(hydrocarbons)계 연료를 흘려보내는 등의 다양한 방법이 사용되었다. 1992년 Ebbesen, Ajayan 등은 아크방전법을 사용하여 탄소나노튜브를 합성할 때 챔버 내의 헬륨압력을 높이면 흑연 음극 상에서 탄소나노튜브의 합성 수율(yield)이 크게 증가한다는 사실을 발표하였으며[11], 1993년에는 IBM의 Bethune 등과 NEC의 Iijima 등이 아크방전법을 사용하여 직경이 1 nm 수준인 단일벽 나노튜브(single-walled nanotube; SWNT)의 합성을 발표하였다[12,13]. 이어서 1996년 Smalley 등은 레이저기화법(laser ablation)으로 직경이 균일한 SWNT를 고수율로 성장시키는 방법을 발표하였고, 1998년에 Ren 등이 플라즈마 화학기상증

착법을 사용하여 유리 기판 위에 수직으로 배향된 고순도의 탄소나노튜브를 합성시킴으로써, 탄소나노튜브의 합성과 응용기술 면에서 획기적인 진전을 가져오게 되었다[3].

한편, 본 연구의 대상인 연소합성은 화염의 고온 상태에서 물질을 합성하는 방안으로, 탄화수소화합물이 산소가 희박한 분위기에서 연소되면서 발생하는 연소 열이 열원으로 사용된다. 나노튜브 및 나노섬유 등의 탄소나노물질의 합성을 위하여 탄화수소계 반응가스와 촉매 전구체를 확산화염(diffusion flame) 분위기에 흘려줌으로써 온도 및 화학종의 농도 등 합성조건에 따라 MWNT(multi-walled nanotubes) 및 SWNT(single-walled nanotubes) 혹은 나노섬유가 합성된다. 주위의 온도가 600-1300℃의 범위로 균일하지 못하여 비정질(amorphous) 탄소가 다량 포함되고 결정성이 다소 떨어지는 편이지만, 저비용으로 대량합성에 용이하며 전극재료 및 복합소재 등에 유망하다. 연소 합성에 의해 풀러렌, 탄소나노튜브 및 나노섬유 등을 합성하는 실험이 미국 MIT의 Howard 교수 연구실[14,15] 및 Vander Wal[16,17] 등을 중심으로 몇 개의 연구자 그룹에서 저압의 예혼화염 및 확산화염에 대해서 수행되어 왔다. 하지만 본 연구에서 사용하고자 하는 역확산화염(inverse diffusion flame) 연소방식에 의한 합성은 국내외에서 최초로 시도되는 개념으로서, 연소합성법이 양산에 성공하기 위해서는 반드시 필요한 것이라고 사료된다. 일반적인 확산화염에서는 매연입자 및 탄소나노튜브 등의 탄소구조물질들은 화염대를 기준으로 탄소가 풍부한 쪽, 즉 연료 측에서 합성되며, 기존

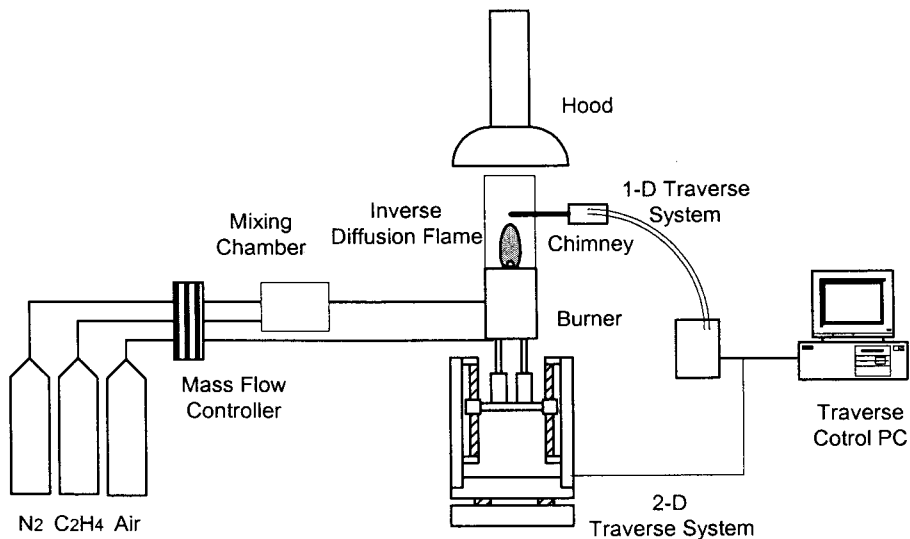


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus.

의 화염을 이용한 연소합성 연구에서는 정상확산 화염(normal diffusion flame)을 사용하기 때문에 기판(substrate) 혹은 샘플링 기구(sampling device) 등을 화염대에 걸쳐서 위치시킬 수밖에 없는 구조이다. 하지만 본 연구에서 대상으로 삼고 있는 연료가 산화제를 둘러싸는 형태의 역확산 화염(inverse diffusion flame)의 경우에는 이러한 나노구조물질들이 화염대의 외부에 형성되므로 기판(substrate) 등의 위치에서 고온의 화염대와 직접적인 접촉을 피할 수 있다는 큰 장점을 가질 수 있다. 이러한 기본 아이디어를 바탕으로 화염 내의 온도 분포, 연료 및 산화제의 종류 및 농도 등에 따라 최고의 탄소나노튜브 생산 수율(yield)을 나타내는 최적의 합성 조건을 찾아내는 것이 본 연구의 최종목표이다.

이러한 연구목표의 달성을 위하여 본 논문에서는 역 확산화염(inverse diffusion flame)을 사용하여 촉매금속 기판(substrate)에 탄소나노튜브 및 나노섬유를 성장시키고자 하였으며, 연소합성에 관계된 다양한 변수들의 영향을 조사하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 화염을 이용한 연소합성을 통해서 탄소나노튜브를 생성하고자 한다. Fig. 2에 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도를 제시하였다. 버너는 일반적으로 매연 연구에서 널리 사용되고 있는 내경 11mm와 94mm의 스테인레스스틸 동축관으로 구성된 버너를 사용하였는데, 일반적인 확산화염과는 반대로 중앙으로 공급되는 산화제를 주위의 연료가 둘러싸는 역확산화염 버너의 형태이며, 외부공기와 연료의 혼합을 차단하기 위하여 파이렉스유리 등으로 만들어진 굴뚝(chimney)을 설치하였다. 이 경우 기존의 합성법

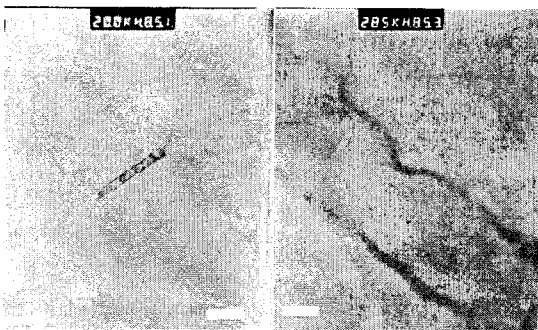


Fig. 3 TEM images of amorphous carbon nanotubes formed by flame synthesis using a methane inverse diffusion flame. (scale bars, 500 and 35nm, respectively)

들에서 공기 등의 산화제를 차단하기 위해서 필수적으로 사용하는 진공 챔버(반응로)가 필요치 않으며 공정 또한 매우 단순하게 구성할 수 있는 가능성이 있다. 물론 화염에서 배출되는 많은 불순물과 온도차가 매우 심한 반경방향의 미소한 영역에서의 적절한 포집 혹은 샘플링이 필요하다. 에틸렌을 연료로 사용하고 중앙의 산화제로는 공기를 사용하였다. 촉매금속을 함유한 기판(substrate)으로는 주변에서 쉽게 구할 수 있는 두께 0.2mm의 스테인레스 스틸(SUS-304)을 사용하였는데, 망간 2%, 코발트 18-20%, 그리고 8-10%의 니켈을 함유하고 있다. 열원을 정해진 지점에 위치시키기 위하여 2축 이송시스템으로 버너의 위치를 조정하고, 기판의 삽입 및 후퇴를 위하여 별도의 1축 이송시스템을 사용하였다. 중앙의 공기유량은 0.8lpm(liter per minute), 외부의 연료 측은 에틸렌 10lpm과 질소 25lpm을 예혼합하여 공급하였다. Non-sooting 화염을 연구 대상으로 선정하였으며, 기판의 체류시간은 300 초를 기준으로 살펴보았다.

초기의 실험에서는 직경 약 30mm의 원형 혹은 폭 2mm 길이 40mm의 사각형 시편을 유동방향과 수직으로 배치하여 그 높이에서의 반경방향으로 시편의 변화를 포괄적으로 관찰하였다. 이 경우에는 장치는 간단하지만 화염에서 발생하는 매연 등의 불순물이 기판에 쉽게 증착되어 결과 해석을 어렵게 한다. 이어지는 실험에서는 시편을 화염 외부에 유동방향으로 배치하여 화염을 간접열원으로만 사용하였다. 하지만 이 두 경우 모두 공간에 대한 정량적인 데이터를 얻지 못하고 시편 내부에서의 온도분포의 불균일성이 나타났다[18]. 이러한 이유로 인하여 본 실험에서는 시편을 2.5mm X 2.5mm로 소형 규격화하고 유동방향과 나란히 배치하여 반경방향으로의 공간 해상도를 확보하고 시편 전체에서 일정한 표면온도를 가지도록 하였다.

연소장의 경우 화염 내부는 물론이고 화염 외부에서도 축방향(높이)과 반경방향 위치에 따라 온도의 변화가 매우 심하며 이는 본 연구의 주요한 인자라 할 수 있다. 또한, 그 위치에서의 체류시간이 또 다른 변수이다. 화염대 근처에서 유선(streamline)을 따라 움직이는 입자들의 거동을 생각할 때 시편의 공간적인 위치는 온도, 체류시간, 그리고 연료 및 산화제의 농도라는 다양한 변수가 결합된 형태로 나타난다. 한편, 촉매 금속의 종류 및 다양한 금속들의 혼합 역시 나노튜브의 성장에 매우 큰 영향을 줄 수 있는 인자이다. 본 실험에서는 이러한 다양한 인자들의 영향을 단순화하기 위하여 시편의 종류도 스테인레스 스틸(SUS-304)로 고정하고, 시편의 크기와 두께도 상기와 같이 일정하게 유지하였다. 또한 온도 및

화학종의 농도는 시편의 공간적 위치로 결정하였다. 체류시간의 변수는 본 연구에서는 300초로 고정하고 추후의 연구로 남겨둔다.

3. 결과 및 고찰

역확산화염은 연료가 산화제의 외부에 공급되므로 일반적인 확산화염과는 달리 화염대의 바깥에 매연생성 지역과 탄소나노튜브(carbon nanotubes, CNTs) 생성지역이 존재한다. 때문에 일반적인 확산화염(normal diffusion flame)을 이용하는 경우와 비교할 때, 탄소나노튜브의 포집(sampling) 혹은 기판(substrate)의 삽입을 고온의 화염대를 거치지 않고 할 수 있다는 장점이 있다.

본 실험의 열원으로 사용된 에틸렌 역확산화염은 가시화염 길이가 23mm 가량이고 하부의 청염(blue flame)과 상부의 황염(yellow flame)이 결합된 형태를 보인다. 버너 팁에서 15 mm 높이에서 버너 중심 축을 기준으로 반경방향으로 5.5, 6.0, 6.5, 8, 10, 12mm에 시편을 위치시켰으며, 그 중에서 5.5mm와 6.0mm의 경우에만 결과를 얻을 수 있었으며 나머지 기판에서는 아무런 변화도 보이지 않았다.

먼저 Fig. 3은 실험 초기단계에 찍었던 TEM 사진으로서 생성되는 물질 속에 탄소나노튜브의 존재를 확인하기 위하여 행해졌던 예비실험의 결과이다. 좌측과 우측의 스케일 바는 각각 500 nm와 35nm를 나타내는데, 약 80 - 100nm 가량의 직경을 가지는 구조임을 확인할 수 있다.

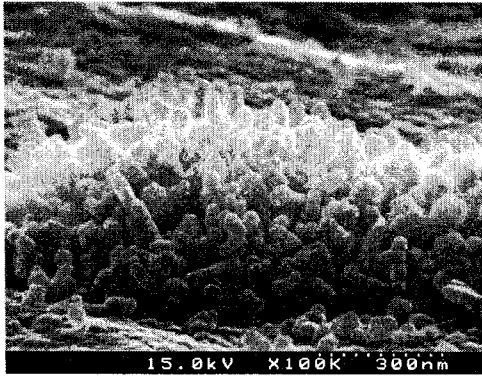


Fig. 4 SEM image of carbon nano- materials formed by flame synthesis using an ethylene inverse diffusion flame.(scale 30nm)

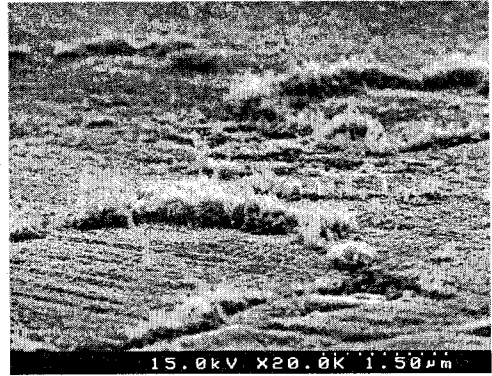


Fig. 6 SEM image of carbon nano- materials formed by flame synthesis using an ethylene inverse diffusion flame.(scale 150nm)

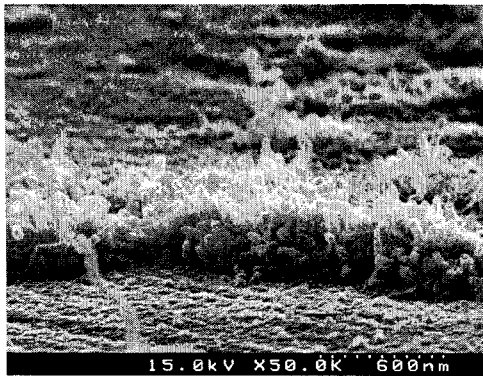


Fig. 5 SEM image of carbon nano- materials formed by flame synthesis using an ethylene inverse diffusion flame.(scale 60nm)

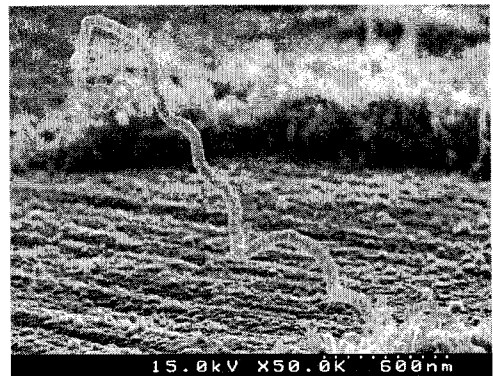


Fig. 7 SEM image of carbon nanofibers formed by flame synthesis using an ethylene inverse diffusion flame. (scale 60nm)

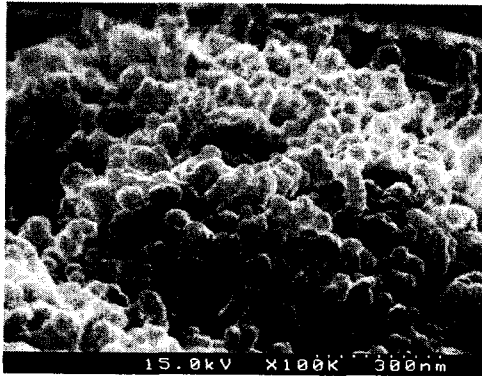


Fig. 8 SEM image of carbon nano-materials formed by flame synthesis using an ethylene inverse diffusion flame.(scale 30nm)

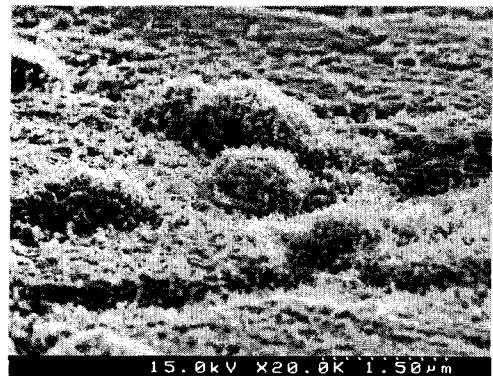


Fig. 10 SEM image of carbon nano-materials formed by flame synthesis using an ethylene inverse diffusion flame.(scale 150 nm)

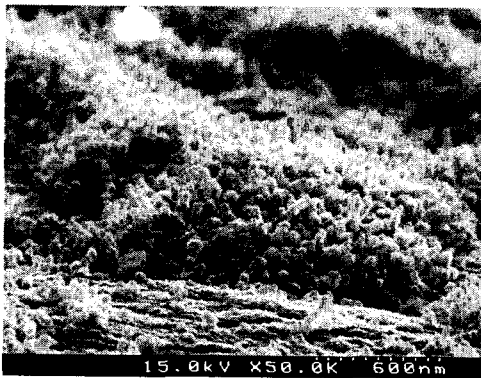


Fig. 9 SEM image of carbon nano-materials formed by flame synthesis using an ethylene inverse diffusion flame.(scale 60nm)

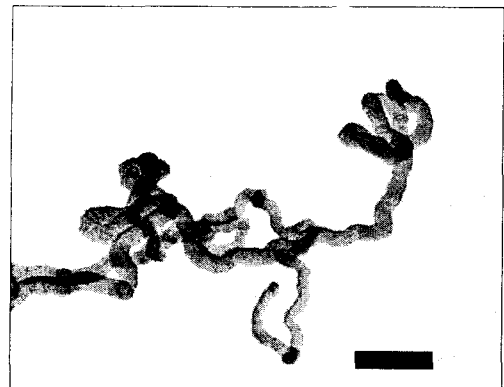


Fig. 11 TEM image of carbon nanofibers formed by flame synthesis using an ethylene inverse diffusion flame.(scale bar 200 nm)

이 두 사진에서 뚜렷한 벽면(wall) 형태를 확인할 수 있으며 내부가 비어있는 튜브임을 알 수 있다. 초기 단계이기는 하지만 탄소나노튜브의 연소합성 가능성을 보여주는 결과이다. 본 실험과는 유량 조건 등에서 다소 차이는 있지만 촉매 금속 기판과 역 확산화염을 사용한 결과이다[18].

Fig. 4에서 7까지의 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진은 버너 팁에서 15mm 높이, 반경 방향으로는 중심 축에서 6mm 떨어진 지점에 시편이 300초 동안 체류하였을 때 시편에 성장한 탄소나노물질들을 확대한 배율에 따라 시편 내의 각 지점을 보여주고 있다. 이 높이에서 육안으로 관찰한 화염대는 반경 방향 3mm 정도에 위치하고 있으며, 시편이 위치한 지점은 매연입자의 생성지역보다 바깥쪽이다. 1300K 이상의 고온지역에서 주로 생성되고 성장하는 매연과 달

리 그 이하에서 생성되는 탄소나노튜브나 섬유의 특성상 시편을 반경방향에 수직하게 세우면 매연의 생성 및 성장지역과의 중복을 피할 수 있다. Fig. 4는 10만 배로 찍은 사진이며, 하단의 한 눈금이 30nm이다. 시편의 표면에 나타난 나노구조 물질들은 30-50nm 가량의 직경을 가지고 있으며 시편 전체에 걸쳐서 고르게 분포되어 있다. 이는 대상으로 삼은 시편의 크기가 적절하여 전 영역에서 어느 정도 고른 온도분포를 나타내고 있음을 간접적으로 확인할 수 있다. Fig. 5는 근처 지점을 5만 배로 찍은 사진으로 역시 유사한 상태를 확인할 수 있다. 사진 하단의 한 눈금은 60nm이다. Fig. 6은 보다 넓은 영역을 확인하고자 2만 배의 배율로 찍은 것인데, 성장하고 있는 나노물질이 시편 여러 부분에 불규칙하게 산재함을 보여주고 있다. Fig. 7은 Fig. 5와 6의 좌측

하단 부에 보이는 비교적 긴 형태의 나노물질을 확대해 보았는데, 상당한 길이로 성장하였음을 알 수 있다. 여기에서 나노물질이라는 명칭을 사용하는 것은 나노튜브와 나노섬유가 함께 존재하고 있는 것으로 판단되기 때문이다. TEM 사진을 찍어보면 튜브의 경우 내부가 비어 있는 것이 보이게 된다. 본 결과의 경우 다수가 보이는 Fig. 4와 같은 비교적 짧은 구조들은 튜브 형태이고, Fig. 7과 같이 긴 것들은 섬유로 판명되었다.

한편, Fig. 8부터 10의 사진은 동일한 높이의 반경방향 5.5mm, 즉 약간 안쪽에서의 결과이다. 앞선 6.0mm에서의 결과와 비교할 때 큰 차이는 보이지 않지만, Fig. 8에서 보듯이 나노물질의 직경이 다소 커지고, Fig. 9와 10에서 보면, 6.0mm의 결과보다는 전체 영역에서 훨씬 더 고르게 분포됨을 알 수 있다. 단편적이기는 하지만 이러한 결과로 미루어 본 실험의 조건에서는 탄소나노튜브나 나노섬유 등의 나노물질은 온도에 매우 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있다. 보다 고온인 것으로 예상되는 반경방향 5.5mm의 결과에서 시편 전체적으로 매우 조밀하고 균일한 분포를 보였으며 나노물질의 직경도 약간 커진 것으로 보인다.

Fig. 11은 Fig. 7에서 보이는 것과 유사한 형태의 나노물질을 5만 배로 찍은 TEM 사진인데, Fig. 3의 튜브와는 달리 내부가 균일하게 채워져 있으므로 나노섬유임을 알 수 있다. 스케일 바는 200nm를 나타낸다. SEM 사진에서의 직경과 비교해 보면 같은 형태를 찍은 것을 알 수 있다.

4. 결론 및 향후계획

본 논문에서는 화염을 이용한 탄소나노물질의 생성기구를 연구하였다. 역확산화염(inverse diffusion flame)을 사용하여 촉매금속 기판(substrate)에 탄소나노튜브 및 나노섬유를 성장시키고, 연소합성에 관계된 다양한 변수들의 영향을 조사하여 연소합성에서 중요하게 다루어야 할 다양한 변수들에 관한 정성적인 평가를 수행하였다.

탄소나노물질의 연소합성에는 여러 가지 어려움이 있는데 그 중에서도, 화학반응이 존재하는 고온인 연소장에서는 공간적 위치, 특히 반경방향 위치에 따라 온도 구배가 매우 심하고, 또한 연료 및 산화제의 농도도 급격히 변화된다는 점이 탄소나노물질의 생성조건으로 가장 제어하기 어려운 점으로 꼽을 수 있다. 또한 적절한 온도에서 촉매금속과 탄화수소계 연료가 체류하는 시간이 또 다른 변수이다. 즉, 촉매금속 기판을 사용할 경우 기판의 온도가 탄소나노튜브 생성 및 성장 온도를 유지하기 위해서는 기판의 공간적

위치 뿐 아니라 기판이 화염의 복사열로 가열된다는 점을 생각하면 체류시간 역시 위치에 못지않은 중요한 변수임을 알 수 있다.

향후의 연구에서는 탄소나노튜브와 나노섬유의 생성에 영향을 미치는 이러한 변수들을 보다 정밀하게 제어하여, 어떤 조건에서 튜브 혹은 섬유의 형태로 선택되는지에 대한 연구를 수행할 계획이다.

후 기

본 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2001-041-E00019)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- [1] Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. F. and Smalley, R. E., " C_{60} : Buckminsterfullerene," *Nature*, Vol. 318, 1985, pp. 165.
- [2] Iijima, S., "Helical Microtubules of Graphite Carbon," *Nature*, Vol. 354, 1991, pp. 56.
- [3] <http://www.iljinnanotech.co.kr> (일진나노텍).
- [4] Long, R. Q. and Yang, R. T., "Carbon Nanotubes as Superior Sorbent for Dioxin Removal," *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 123, 2001, pp. 2058.
- [5] <http://www.nanomirae.com> (주)나노미래 홈페이지.
- [6] Homann, K. H., "Fullerenes and Soot Formation-New Pathways to Large Particles in Flames," *Angew. Chem. Int. Ed.*, Vol. 37, 1998, pp. 2434-2451.
- [7] Grieco, W. J., Howard, J. B., Rainey, L. C. and Vander Sande, J. B., "Fullerene Carbon in Combustion-generated Soot," *Carbon*, Vol. 38, pp. 597-614.
- [8] Grieco, W. J., Lafleur, A. L., Swallow, K. C., Richter, H., Taghizadeh, K. and Howard, J. B., "Fullerenes and PAH in Low Pressure Premixed Benzene/Oxygen Flames," *27th Symp. on Combustion*, The Combustion Institute, 1998, pp. 1669-1675.
- [9] Harris, P. J. F., "Carbon Nanotubes and Related Structures," *Cambridge Univ. Press*, 1999.
- [10] Rao, C. N. R., Satishkumar, B. C.,

- Govindaraj, A. and Nath, M., "Nanotubes," *Chem. Phys. Chem.*, Vol. 2, 2002, pp. 78-105.
- [11] Ebbesen, T. W. and Ajayan, P. M., "Large-scale Synthesis of Carbon Nanotubes," *Nature*, Vol. 358, 1992, pp. 220.
- [12] Bethune, D. S., Kiang, C. H., de Vries, M. S., Gorman, G., Savoy, R., Vaquez, J. and Beyers, R., "Cobalt Catalysed Growth of Carbon Nanotubes with Single-atomic-layer Walls," *Nature*, Vol. 363, 1993, pp. 605.
- [13] Iijima, S., Ichhashi, T. and Ando, Y., "Pentagons, Heptagons and Negative Curvature in Graphite Microtube Growth," *Phys. Rev. Lett.* Vol. 69, 1992, pp. 3100-3103.
- [14] Howard, J. B., "Fullerene Formation in Flames," *24th Symp. on Combustion*. The Combustion Institute, 1992, pp. 933-946.
- [15] Howard, J. B., McKinnon, J. T., Makarovsky, Y., Lafleur, A. L. and Johnson, M. E., "Fullerenes C₆₀ and C₇₀ in Flames," *Nature*, Vol. 352, 1991, pp. 139-141.
- [16] Vander Wal, R. L., Ticich, T. M. and Curtis, V. E., "Substrate-support Interactions in Metal-catalyzed Carbon Nanofiber Growth," *Carbon*, Vol. 39, 2001, pp. 2277-2289.
- [17] Vander Wal, R. L., "Fe-catalyzed single-walled Nanotube Synthesis within a Flame Environment," *Combust. Flame*, Vol. 130, 2002, pp. 37-47.
- [18] KIST 연구보고서, "탄소나노튜브의 연소합성 기술," 2002.