

양성자가속기 이용자프로그램 개발 및 운영

Development and Managemant of Proton Accelerator
User Program

양성자 조사를 이용한 탄소나노막대 제조와 특성
변화에 대한 연구

Fabrication of carbon nanorod from the irradiation of
proton beam on carbon nanotube and characterization of
its resistance variation

서울대학교 산학협력단

한국원자력연구원

제 출 문

한국원자력연구원 양성자기반공학기술개발사업단장 귀하

이 보고서를 "양성자 조사를 이용한 탄소나노막대 제조와 특성 변화에 대한 연구" 과제(세부과제: "이용자프로그램 개발 및 운영")의 보고서로 제출합니다.

2010. 4. 19

주관연구기관명 : 서울대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 김 곤 호

연구원 : 조 정 현

" : 허 성 렬

" : 임 선 택

협동연구기관명 :

협동연구책임자 :

보고서 요약서

과제고유번호	B-3-1	해당단계 연구기간	3단계 2차년도 (’09. 4 ~ ’10. 3)	단계구분	3단계 2차년도
연구사업명	양성자기반공학기술개발사업				
연구과제명	세부과제명	양성자 조사를 이용한 탄소나노막대 제조와 특성 변화에 대한 연구			
	위탁과제명				
연구책임자	김근호	해당단계 참여 연구원수	총 : 4 명 내부 : 1 명 외부 : 3 명	해당단계 연구비	정부 : 25,000 천원 기업 : 천원 계 : 25,000 천원
		총연구기간 참여 연구원수	총 : 4 명 내부 : 1 명 외부 : 3 명	총연구비	정부 : 50,000 천원 기업 : 천원 계 : 50,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 산학협력단 에너지시스템공학부	참여기업명			
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명 :	연구책임자 :			
요약				보고서면수	30 쪽
<p>1. 탄소나노튜브를 스프레이 코팅 방법을 이용하여 양성자 조사 대상인 유리 기관 위에 50 ~ 80 %의 투과도와 500 ~ 2000 Ω/sq의 면 저항을 갖는 투명 탄소나노튜브 시편 제작 기술을 완성함.</p> <p>2. 조사 양성자(10 MeV)의 조사량을 $8 \times 10^{13} \sim 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 로 변화시키며 이에 따른 다발형 단일벽 탄소나노튜브 네트워크의 손상과 접합현상 등에 관한 구조적 변형 특성을 관찰하고, 이를 기반으로 접합된 탄소나노튜브 네트워크 형성 메커니즘을 분석함.</p> <p>3. 양성자 조사에 의한 탄소나노튜브 네트워크의 전기 전도도가 변화함을 관찰하여 탄소나노튜브에 축적되는 에너지 변수에 따라 탄소나노튜브의 구조적 변형 및 네트워크 형성과의 상관관계를 분석함.</p> <p>4. 양성자 조사에 의한 투명 탄소나노튜브 네트워크 판의 전기 전도도 향상 가능성을 확인하였으나 고 에너지 입자 조사에 의한 유리 기관의 투명도 변화가 관찰됨.</p> <p>5. 탄소나노튜브 네트워크를 이용한 투명 전극 기술 개발의 핵심 기술은 양성자 조사에 의해 전기 전도도가 향상되나, 유리 기관의 투명도는 저하되는 효과에 대한 고려를 종합하여 조사 조건의 도출임을 찾음.</p>					
색인어	한글	탄소나노튜브, 변형, 접합, 네트워크, 전기 전도도			
	영어	Carbon nanotube, Deformation, Welded junction, Network, Electric conductivity			

요 약 문

I. 제목

양성자 조사를 이용한 탄소나노막대 제조와 특성 변화에 대한 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

탄소나노튜브에 양성자 조사를 통하여 교차 접합된 탄소나노튜브 네트워크의 제조 가능성을 확인하며 접합 정도에 따른 탄소나노튜브 네트워크의 전기 전도도 개선을 통하여 투명 전극 기술로의 개발 가능성을 확인함. 기존의 탄소나노튜브를 이용한 투명 전극 제조 방법으로는 기존의 ITO(Indium Tine Oxide)가 갖는 전기 전도도를 만족시킬 수 없었음. 본 연구에서는 기존의 방법과는 달리 탄소나노튜브를 자유롭게 유리 전극에 분산시키고 탄소나노튜브를 서로 접합시켜 네트워크를 형성하는 신기술의 개발가능성을 모색하고자 하였음. 이 방법은 탄소나노튜브가 갖는 본래의 전기 전도도를 유지하면서 서로 연결되어 분산된 탄소나노튜브가 서로의 네트워크가 원활하지 못해 면 저항을 크게 갖는 현상을 해소시키는 기술 개발이 목적임. 이를 위해서 입자와 탄소나노튜브의 충돌과 관련된 입자 크기, 조사 에너지 및 조사량과 충돌에 의해서 탄소나노튜브에 전달되는 에너지 크기에 따른 탄소나노튜브 접합과 네트워크에 대한 기반 연구가 절실함. 이러한 결과들은 탄소나노튜브를 이용한 투명 전극 제조 방법에 대한 기술개발의 가능성을 보여줄 것임.

III. 연구개발의 내용 및 범위

탄소나노튜브를 이용한 표면 전기 전도도 향상에 관한 기존 연구를 바탕으로 스프레이 코팅 방법을 이용하여 유리 기판 위에 50 ~ 80 %의 투과도와 500 ~ 2000 Ω /sq의 면 저항을 갖는 탄소나노튜브 시편을 제작하는 기술을 개발함. 탄소나노튜브가 분산된 시편에 10 MeV 양성자의 조사량을 $8 \times 10^{13} \sim 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 로 변화시켜 탄소나노튜브에 축적되는 에너지 변화를 유발시켜 다발 형태의 단일벽 탄소나노튜브가 형성하는 네트워크의 구조적 변화 및 접합 등의 변형 메커니즘을 분석함. 양성자 조사 조건 변화에 따른 유리 기판 위에 코팅된 탄소나노튜브 네트워크의 전기 전도도 변화 측정 자료 구축과 유리 기판의 투명도 변화 자료 도출을 통하여 탄소나노튜브 네트워크를 이용한 투명 전극 기술의 개발 가능성을 확인.

IV. 연구개발결과

탄소나노튜브와 에탄올의 혼합액을 스프레이 방식을 이용하여 유리 기판 위 투명 탄소나노튜브 필름을 제작하였으며 혼합액의 분사량 조절을 통하여 투명 탄소나노튜브 필름의 면 저항 및 투과도를 조절하였음. 양성자의 에너지를 10 MeV로 고정하고 양성자 조사량을 증가시켜 탄소나노튜브에 축적되는 에너지 변화를 유발시켰음. 양성자 조사에 따라 조사된 양성자가 탄소나노튜브를 구성하고 있는 탄소 원자와 충돌하여 격자에 빈 공간이 형성되는 격자 구조 손상이 있었고 이 때 형성된 dangling bond들이 재결합하는 과정을 통하여 손상된 구조가 다시 봉합되면서 탄소나노튜브의 직경이 감소하게 되는 현상을 관찰함. 양성자 조사에 의한 탄소나노튜브로부터의 탄소 원자의 이탈은 탄소나노튜브와 탄소나노튜브 사이에 가교를 형성할 뿐 아니라 다발과 다발 사이에도 가교를 형성함. 이에 따라 탄소나노튜브 다발 간 점점의 전기적 저항을 감소시켜 탄소나노튜브 다발로 형성된 네트워크의 전기 전도도를 향상시킬 수 있으며 양성자 조사 전 대비 약 2.5배 정도의 전기 전도도 향상을 측정함. 양성자 조사로 인하여 투명 탄소나노튜브 필름의 전기 전도도를 향상시켰으나 투과도는 오히려 떨어져 황화현상이 심화됨을 확인함. 투과도 변화는 유리 기판에 양이온 주입으로 인한 황화현상에 기여하며 이는 조사량 증가에 따라 유리 기판에 전달되는 에너지 증가에 의해 유리가 변색되면서 투과도가 떨어진 것으로 판단됨.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구를 통해 얻어진 양성자 조사 실험 결과를 분석하여 탄소나노튜브 네트워크의 구조적 변형 메커니즘에 대해 명확하게 이해할 수 있을 것으로 기대됨. 이에 따라 탄소나노튜브 네트워크의 손상, 접합 등의 형상 변형 조절 기술을 확보함으로써 탄소나노튜브 네트워크의 접합에 의한 전기 전도도를 향상시킬 수 있을 것임. 탄소나노튜브 네트워크의 접합에 의한 전기 전도도 향상은 기존의 탄소나노튜브를 이용한 전도성 투명 박막 제조 기술에 직접적으로 영향을 줄 것임. 스프레이 코팅 방식으로 제조된 투명 탄소나노튜브 필름의 단점인 탄소나노튜브와 유리 기판 및 탄소나노튜브들 간의 결합을 향상시킬 수 있는 후속공정으로서 양성자빔 조사의 적용가능성을 제시함. 탄소나노튜브의 합성을 최적화하는 기술을 개발하는 것과 함께 변형을 조절할 수 있는 기술의 개발은 탄소나노튜브를 구조적으로 변형시키는 것 뿐 아니라 구조적 변형에 의한 전도도, 반도체적 성질 등 전기적 특성과 기계적 성질 등을 변화시키는데 있어서 기반이 될 것이며 그에 따라 탄소나노튜브의 활용 범위를 보다 넓히고 실용화 시키는데 보다 접근할 수 있는 계기를 마련해 줄 것임.

SUMMARY

I. Title

Fabrication of carbon nanorod from the irradiation of proton beam on carbon nanotube and characterization of its resistance variation

II. Purpose and Necessity

Feasibility of the fabrication of the carbon nanotube network by proton beam irradiation and the fabrication of the transparent electrode by carbon nanotube network is confirmed. Present transparent electrode fabrication method is not appropriate for the required conductivity in application in comparison of the ITO (Indium Tin Oxide). In the study, carbon nanotubes are dispersed freely on the glass and the welding between carbon nanotubes are used for the new technology. This method may maintain the original conductivity of the carbon nanotubes and decrease the contact resistance generated by the poor contact between carbon nanotubes. Basic study on the collision between the particle and carbon nanotubes such as the size, energy and dose of the particle is required. These results will provide the feasibility of the fabrication of the transparent electrode using carbon nanotubes.

III. Contents and Scope

Fabrication method of the transparent carbon nanotubes film on the glass with the transparency of 50 ~ 80 % and the sheet resistance of 500 ~ 2000 Ω/sq is developed based on the established study of the enhancement of the conductivity. Deformation of the bundle-type single-walled carbon nanotubes are analyzed with the variation of the energy transfer in the carbon nanotubes by the variation of the dose of the 10 MeV proton beam. Construction of the variation of the conductivity of the carbon nanotube network and the variation of the transparency of the glass are used for the feasibility of the fabrication of the transparent electrode using carbon nanotubes network.

IV. Results

Transparent carbon nanotubes film are fabricated using spray method and the sheet resistance and transparency are controlled by the control of the quantity of the dispersion. Accumulated energy on the carbon nanotubes are controlled by the dose of the 10 MeV proton. Proton irradiation creates defects on the carbon nanotubes by particle collision and the recombination of the defects generates the decrease of the diameter ts generates the decrea. Ejection of the cates tfrom the carbon nanotubes generates not only the formation of the connection from the carbon nanotube but also from the carbon nanotub bundles. These connectionsf the diameterresistance between carbon nanotube networks and 2.5 times increase is measured. Although the electrical conductivity is increased by the proton irradiation, sulfuration of the glass is increased. Variation of the transparency is caused by the positive ion irradiation and the transparency is decreased with the dose due to the increase of the energy transfer on the glass.

V. Applications

Mechanism of the structural deformation of the carbon nanotubes is investigated with the analysis of this study. Control of the deformation of the carbon nanotubes such as damage and welding is achieved and this is used for the enhancement of the conductivity of the carbon nanotube network. Enhancement of the conductivity of the carbon nanotube network by welding influences on the fabrication of the transparent electrode using carbon nanotubes. Proton beam is used for the post treatment of the spray coated electrodes using carbon nanotubes because proton beam can solve the weakness of the spray coating method. Optimization of the synthesis of the carbon nanotubes and development of the control of the structural deformation of the carbon nanotubes are based on the variation of the conducting and semiconducting properties of the carbon nanotubes. This will provides the feasibility of the commercialization of the carbon nantoubes in the application.

CONTENTS

Chapter 1. Outline	11
Section 1. Purpose	11
Section 2. Necessity	11
Section 3. Scope	12
Chapter 2. Present state of technology development	13
Chapter 3. Contents and results	14
Section 1. Contents	14
Section 2. Results	14
1. Feasibility of the enhancement of the electric conductivity of the SWCNT network by proton irradiation	14
2. Fabrication of the transparent SWCNT film target for proton irradiation	17
3. Deformations of the SWCNT bundles by proton irradiation	20
4. Electrical conductance variation of the SWCNT bundles deformed by proton irradiation	22
5. Feasibility of the transparent electrode using SWCNT network	23
6. Deformation of the CNT by particle irradiation	24
Chapter 4. Achievement and contribution to related fields	26
Section 1. Achievement	26
Section 2. Contribution to related fields	27

Chapter 5. Applications	28
Section 1. Necessity of further study	28
Section 2. Applications to other research fields	28
Chapter 6. Overseas scientific information	29
Chapter 7. Reference	30



목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	11
1절. 연구개발의 목적	11
2절. 연구개발의 필요성	11
3절. 연구개발의 범위	12
제 2 장 국내외 기술개발 현황	13
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	14
1절. 연구개발수행 내용	14
2절. 연구개발수행 결과	14
1. 양성자 조사에 의한 탄소나노튜브 네트워크의 전기 전도도 향상 가능성 확인 (1차년도)	14
2. 양성자 조사 대상 투명 탄소나노튜브 판의 제작	17
3. 양성자 조사에 의한 다발형 단일벽 탄소나노튜브의 변형 분석	20
4. 양성자 조사에 의해 변형된 투명 탄소나노튜브 판의 전기 전도도 향상	22
5. 탄소나노튜브 네트워크를 이용한 투명 전극 기술 개발 가능성 확인	23
6. 입자 조사에 의한 탄소나노튜브 변형	24
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	26
1절. 목표달성도	26
2절. 관련분야에의 기여도	27

제 5 장 연구개발결과의 활용계획	28
1절. 추가연구의 필요성	28
2절. 타연구에의 응용	28
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	29
제 7 장 참고문헌	30



제 1 장 연구개발과제의 개요

1절. 연구개발의 목적

탄소나노튜브에 양성자 조사를 통하여 교차 접합된 탄소나노튜브 네트워크의 제조 가능성을 확인하며 접합 정도에 따른 탄소나노튜브 네트워크의 전기 전도도 개선을 통하여 투명 전극 기술로의 개발 가능성을 확인함.

2절. 연구개발의 필요성

탄소나노튜브의 전기적 성질 중에 전기 전도도는 다른 물질들과 비교하여 매우 뛰어나며 이를 유리 기판에 분산시켜 투명 전극 재료로 활용하려는 연구가 활발하게 진행되고 있음. 실용화를 위해 탄소나노튜브를 다양한 방법으로 분산시키거나 표면에 접착시켜 전도를 얻으려는 연구가 진행되고 있음. 아직까지 이러한 방법으로 기존의 ITO(Indium Tin Oxide)가 갖는 전기 전도도를 만족시킬 수 없었음. 본 연구에서는 기존의 방법과는 달리 탄소나노튜브를 자유롭게 유리 전극에 분산시키고 탄소나노튜브를 서로 접합시켜 네트워크를 형성하는 신기술의 개발 가능성을 모색하고자 하였음. 이 방법은 탄소나노튜브가 갖는 본래의 전기 전도도를 유지하면서 서로 연결되어 분산된 탄소나노튜브가 서로의 네트워크가 원활하지 못해 면 저항을 크게 갖는 현상을 해소시키는 기술 개발이 목적임. 이를 위해서 입자와 탄소나노튜브의 충돌과 관련된 입자 크기, 조사 에너지 및 조사량과 충돌에 의해서 탄소나노튜브에 전달되는 에너지 크기에 따른 탄소나노튜브 접합과 네트워크에 대한 기반 연구가 절실함. 이러한 결과들은 탄소나노튜브를 이용한 투명 전극 제조 방법에 대한 기술개발의 가능성을 보여줄 것임. 투명 전극은 디스플레이, 터치 패널, 전자파 차폐 등 여러 분야에 사용될 수 있으며 현재 ITO가 재료로 사용되고 있으나 ITO 제조 가격 및 방법 등의 비효율성은 문제점으로 대두되고 있음. 따라서 양성자빔 조사를 이용한 탄소나노튜브 네트워크의 접합 등 구조적 변형을 제어하여 투명 탄소나노튜브 필름의 전기 전도도를 향상시키는 신기술 개발은 탄소나노튜브를 이용한 투명 전극 제작 기술 개발로 활용될 수 있고 이는 디스플레이, 솔라셀, LED 등의 투명 전극 제작에 관한 원천기술에 해당하여 관련 기술 분야의 공정 기술의 도약과 투명 전극 제조 공정의 단순화를 통한 가격 경쟁력을 제고시킬 수 있을 것임.

3절. 연구개발의 범위

1. 탄소나노튜브 이용한 표면 전기 전도도 향상에 관한 기존 연구를 바탕으로 스프레이 코팅 방법을 이용하여 유리 기판 위에 50 ~ 80 %의 투과도와 500 ~ 2000 Ω/sq 의 면 저항을 갖는 탄소나노튜브 시편을 제작하는 기술 개발.
2. 유리 기판 위 투명 탄소나노튜브 필름으로의 고에너지 양성자 조사의 조사량 증가에 따라 탄소나노튜브에 축적되는 에너지 변화를 유발시켜 다발 형태의 단일벽 탄소나노튜브가 형성하는 네트워크의 구조적 변화 및 접합 등의 변형 메커니즘 분석.
3. 양성자 조사 조건 변화에 따른 유리 기판 위에 코팅된 탄소나노튜브 네트워크의 전기 전도도 변화 측정 자료 구축과 유리 기판의 투명도 변화 자료 도출을 통하여 탄소나노튜브 네트워크를 이용한 투명 전극 기술의 개발 가능성을 확인.



KAERI

제 2 장 국내외 기술개발 현황

Basiuk와 Kobayashi 등 멕시코와 일본 연구진의 공동 연구는 3 MeV 양성자의 조사량 변화에 따라 조사에 의해 다발형 단일벽 탄소나노튜브의 직경이 불균일해지고 심하게 손상됨을 보였으며 비결정질화를 예상함 [1]. Khare 등 NASA 연구진은 1 MeV 양성자 조사에 의해 탄소나노튜브에 C-H 결합이 형성됨을 보였으며 이러한 화학적인 변화는 전자소자 혹은 메모리 소자 등에 응용될 것으로 예상함 [2].

탄소나노튜브의 전기 전도도 변화에 대한 연구로는 탄소나노튜브의 합성 조건 변화에 따른 탄소나노튜브의 길이 변화에 의한 전도도 변화, 탄소나노튜브 박막의 두께 변화에 의한 전도도 변화 또는 화학적 결합을 이용한 탄소나노튜브의 접합에 의한 변화에 관한 연구가 주로 수행되었음 [3-5].

양성자 조사에 의한 탄소나노튜브의 구조적 변형에 대한 연구는 수 MeV 에너지 범위에서 이루어져 왔으며 빔 조사에 의한 탄소나노튜브의 손상 등에 대한 결과는 보고되었으나 나노막대로의 변형 및 탄소나노튜브의 접합 등의 결과와 그에 따른 전기 전도도 변화에 대한 결과는 아직 보고되지 않고 있음. 본 과제를 통해 도출된 연구 결과는 10 MeV 양성자 조사에 의한 탄소나노튜브 다발의 접합에 의해 전기 전도도가 증가함을 보이며 이는 아직 국내외에서 보고된 바 없으므로 기술적 선점을 확보할 수 있을 것임.

KAERI

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1절. 연구개발수행 내용

1. 스프레이 코팅 방법을 이용하여 50 ~ 80 %의 투과도와 500 ~ 2000 Ω/sq 의 면 저항을 가지는 투명 탄소나노튜브 필름 제작.
2. 투명 탄소나노튜브 네트워크 판으로의 양성자 조사에 의한 변형 관찰을 통한 접합된 네트워크 형성 메커니즘 분석.
3. 양성자 조사에 의한 탄소나노튜브 네트워크의 변형과 전기 전도도 변화의 상관관계 분석을 통한 양성자 조사 전 대비 전기 전도도 향상 분석.
4. 탄소나노튜브 네트워크를 이용한 투명 전극 기술 개발 가능성 확보.

2절. 연구개발수행 결과

1. 양성자 조사에 의한 탄소나노튜브 네트워크의 전기 전도도 향상 가능성 확인 (1차년도).

분말 형태의 다발형 단일벽 탄소나노튜브 bundle type single-walled carbon nanotube)를 멤브레인 필터 등의 여과장치를 이용하여 직경 16 mm, 두께 100 μm 의 판 (sheet) 형태 및 두께 수십 nm, 투명도 52 %인 판 형태로 제작함. 그림 1과 같이 20 eV, 90 eV Ar 이온 조사에 의해서는 단일벽 탄소나노튜브 다발의 표면에 손상이 형성됨을 관찰하였으며, 7.5 keV Ar 이온 조사에 의해서는 탄소나노튜브 다발이 비결정질 나노막대로의 변형되고 접합됨을 관찰함. 그림 2와 같이 10 MeV 양성자 조사에 의해서는 다발 사이의 접합이 예상되거나 심각한 손상이 발생하지 않음을 관찰함. 이는 입자의 종, 에너지에 따른 탄소나노튜브 다발에서의 탄소 원자와의 충돌에 의한 에너지 손실 정도가 다르기 때문임. 10 MeV 양성자는 그림 3의 TRIM (TRansport of Ions in Matter) 전산모사 결과와 같이 수십 eV, 수 keV Ar 이온 보다 탄소 원자와의 충돌 단면적이 작으므로 탄소나노튜브 다발에서의 에너지 손실이 Ar 이온보다 매우 적음. 그림 4(a)와 같이 20 eV, 90 eV, 7.5 keV Ar 이온 조사의 경우 탄소나노튜브 다발의 표면 손상, 비결정질 나노막대로의 변형에 의해 탄소나노튜브 판의 전기 전도도는 감소함. 그림 4(b)와 같이 10 MeV 양성자 조사의 경우 수십 eV, 수 keV Ar 이온 조사의 경우에 비해 상대적으로 적은 손상 형성 조건에서의 다발 사이의 접합에 의해 전기 전도도가 증가하며 조사량이 증가함에 따라 전기 전도도가 점차 증가함을 보임. 1차년도 결과로부터 네트워크 구조의 탄소나노튜브 다발의 접합에 의한 탄소나노튜브 판의 전기 전도도 향상을 위해서는 탄소와의 화학 반응이 없는 고에너지, 가벼운 입자 조사가 적합함을 알 수 있었으며, 양성자 조사에 의해 탄소나노튜브 판의 전기 전도도를 향상시킬 수 있음을 확인하였음.

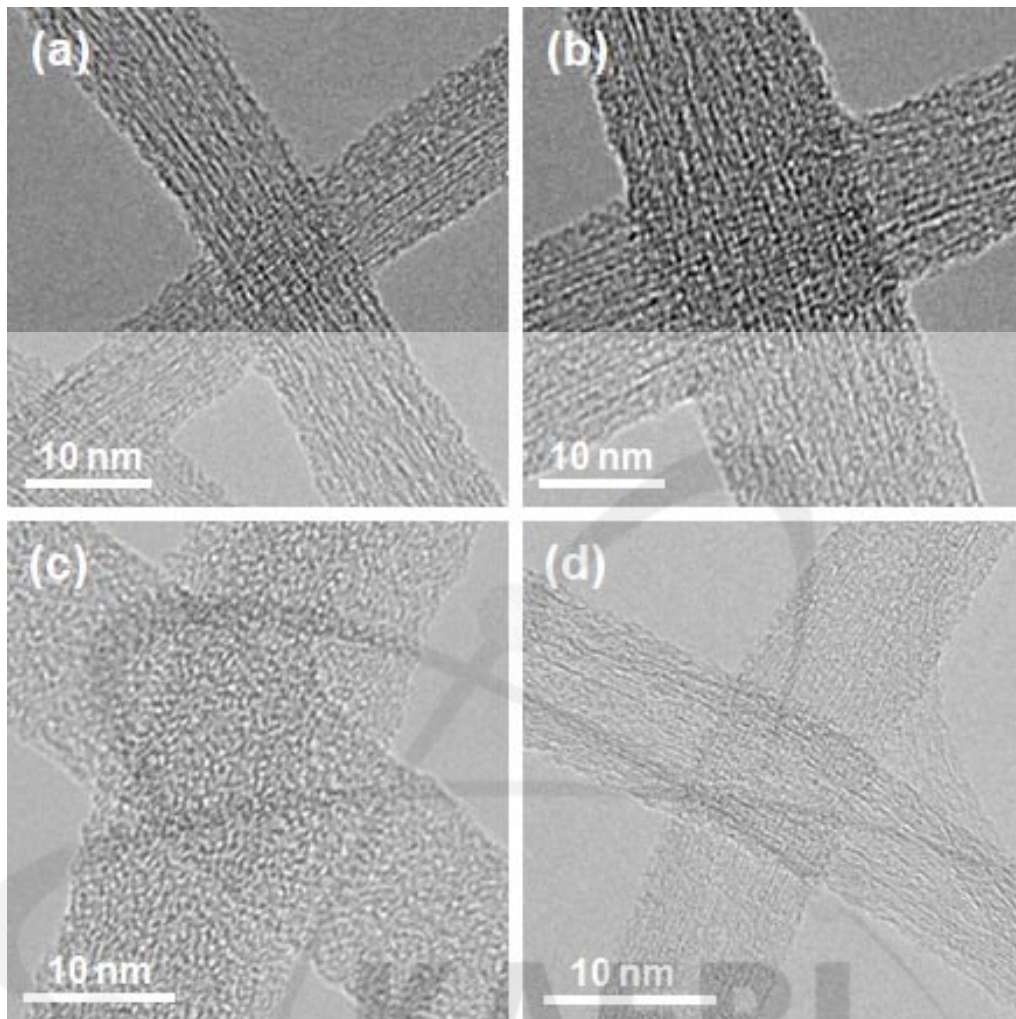


그림 1. $7.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 의 조사량 조건하에서 (a) 20 eV Ar 이온 조사에 의한 다발형 단일벽 탄소나노튜브의 표면 손상. (b) 90 eV Ar 이온 조사에 의한 다발형 단일벽 탄소나노튜브의 직경 감소 및 표면 손상. (c) 7.5 keV Ar 이온 조사에 의한 다발형 단일벽 탄소나노튜브의 비결정질화. (d) 7.5 keV, $1.9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ Ar 이온 조사 후 탄소나노튜브 다발의 이미지.

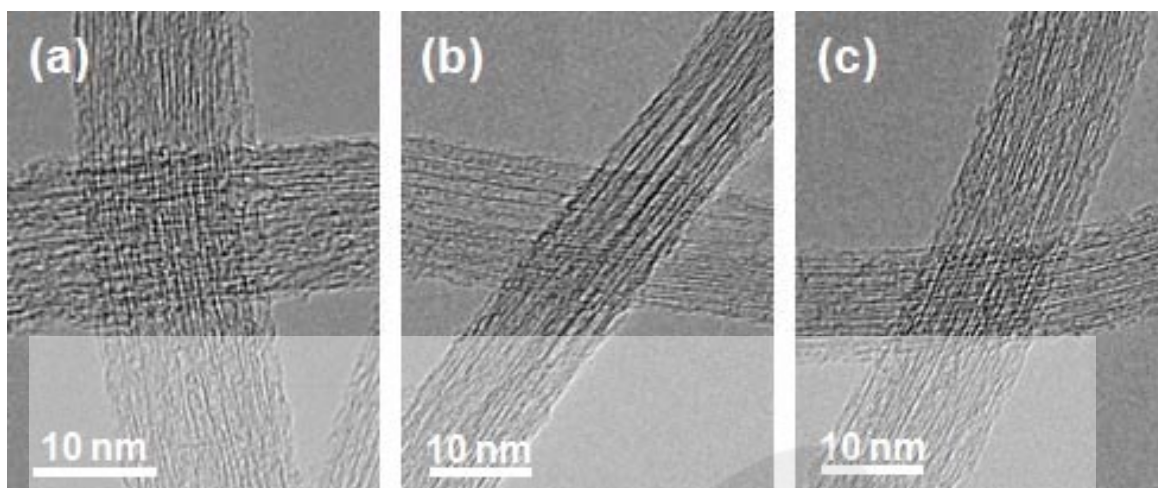


그림 2. 10 MeV 양성자 조사 후 다발형 단일벽 탄소나노튜브의 이미지. (a) 조사량 $2.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. (b) 조사량 $4.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. (c) 조사량 $8.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$.

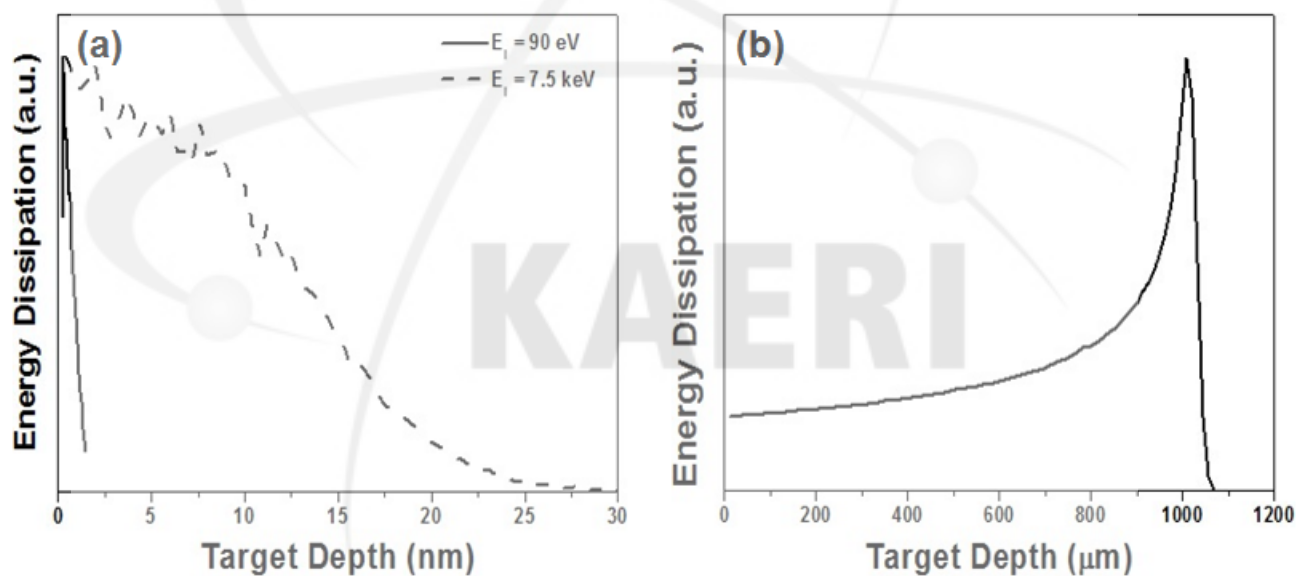


그림 3. (a) Ar 이온 에너지가 90 eV, 7.5 keV인 경우 탄소나노튜브에서의 이온의 에너지 손실의 예상 분포. (b) 10 MeV 양성자의 탄소나노튜브 내에서의 에너지 손실 예상 분포.

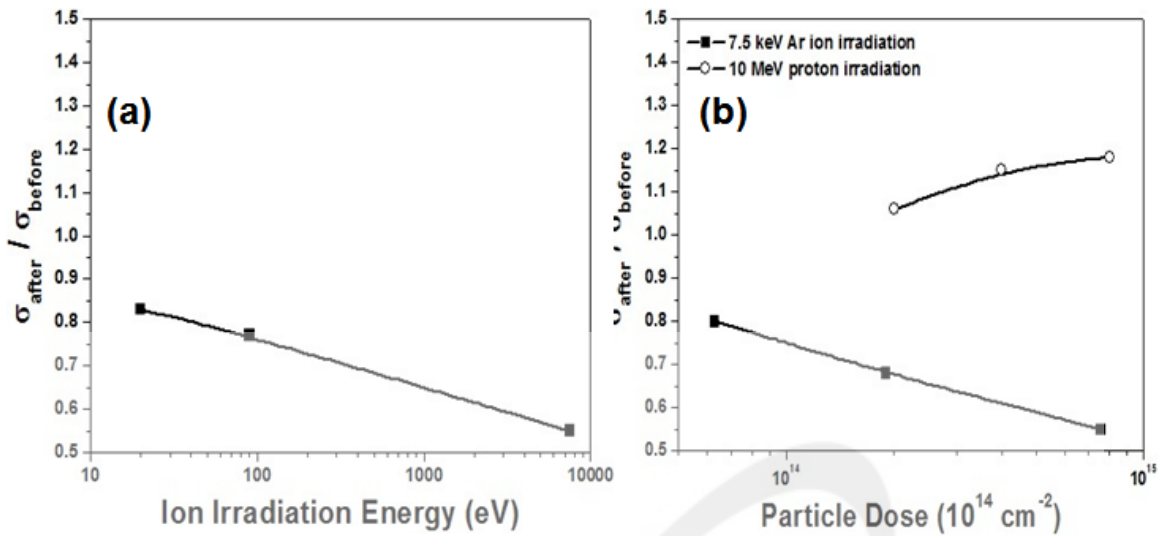


그림 4. (a) 그림 4. $7.6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ Ar 이온 조사의 경우 이온 조사 에너지 증가에 따른 탄소나노튜브 판의 전기 전도도 감소. (b) 7.5 keV Ar 이온 조사량 증가에 의한 탄소나노튜브 판의 전기 전도도 감소 및 10 MeV 양성자 조사량 증가에 의한 전기 전도도 향상.

2. 양성자 조사 대상 투명 탄소나노튜브 판의 제작.

본 연구에서 투명 탄소나노튜브 필름 제작에는 그림 5와 같이 유리 기판 위 탄소나노튜브와 용매의 혼합액을 분사하는 스프레이 방식을 이용함. 양성자 조사 대상 탄소나노튜브로는 아크방전 법을 이용하여 합성하고 산 처리를 통해 불순물을 제거하여 순도를 높인 직경 약 20 nm인 분말 형태의 다발형 단일벽 탄소나노튜브 (bundle type single-walled carbon nanotube, ASP-100F)를 한화나노텍으로부터 구입하여 사용하고, 용매의 선택이 중요하여 다양한 용매를 사용한 결과 최종적으로 메탄올을 사용하여 분산을 극대화시킬 수 있었음.

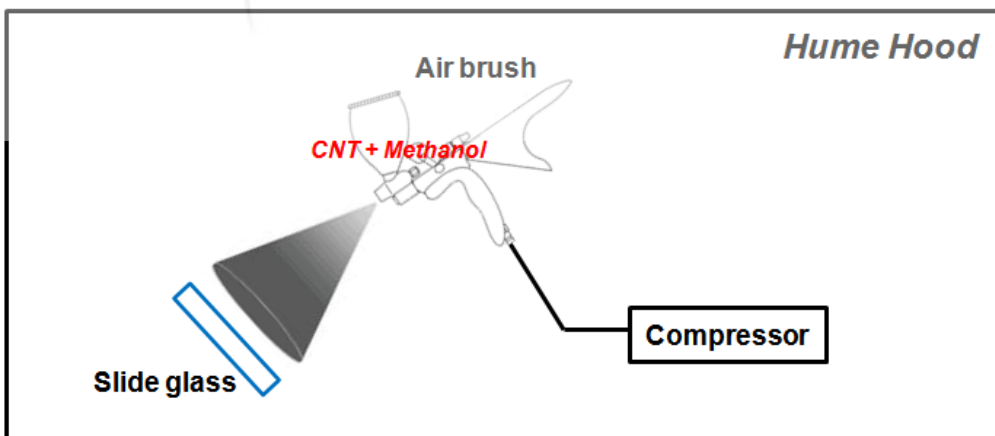


그림 5. 스프레이 코팅 방식의 개략도

탄소나노튜브 분말을 메탄올과 1:15의 비율로 혼합하고 실온에서 5시간 초음파 분해 후, 원심분리기에서 30분간 스팀링을 함. 탄소나노튜브의 고른 분산과 스프레이 분사에 있어 노즐이 막히는 현상을 방지할 수 있었으며, 탄소나노튜브와 메탄올 혼합 비율을 고정시키고 양성자 조사, 전자주사현미경을 통한 표면 형상분석 및 면 저항 분석에 유리한 크기인 25 mm × 18 mm로 자른 유리 기판 위에 스프레이로 분사하여 그림 6(a)와 같이 투명 탄소나노튜브 판을 형성함. 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이 탄소나노튜브 판은 유리 기판 위 고르게 형성되어 있으며 전자주사현미경을 통하여 표면 형상 분석을 하였음. 탄소나노튜브 필름의 면 저항 변화는 서울대학교 반도체공동연구소의 4극 프로브를 이용하여 서로 다른 다섯 지점을 선택하여 측정하고 평균한 값을 이용함.

투과도 측정은 그림 7과 같이 만들어진 시료의 위쪽에 백색광을 설치하고 시료의 아래쪽에서 광발광 분석기 (Optical Emission Spectroscopy)를 이용하여 측정 빔 크기를 비교하여 투과도 변화를 분석하였음. 투과도 측정의 경우 400 ~ 700 nm의 가시광 영역을 이용하여 조사 전 후 빛 세기의 비를 이용하였음. 그림 6(b)와 같이 탄소나노튜브와 메탄올 혼합액의 분사량이 늘어남에 따라 투명 탄소나노튜브 판의 면 저항 및 투과도는 감소하는 것을 확인할 수 있었음. 이는 유리 기판 위에 탄소나노튜브 다발이 늘어남에 따라 탄소나노튜브들 사이의 결합이 커지고 이로 인해 네트워크 간의 전기 전도도가 향상되어 저항이 감소되었음을 의미함. 하지만 탄소나노튜브 양의 증가에 따라서 빛의 투과도는 감소되어 투명 전극으로써의 공학적 활용도는 떨어지게 됨.

그림에서와 같이 탄소나노튜브와 메탄올 혼합액이 20 ml 이상 분사 한 경우에 면 저항의 감소 변화는 크지 않으나 빛의 투과도가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 현재까지 얻은 결과로부터 분산 방식의 개선 또는 후속 공정 없이는 75 % 이상의 투과도에서 1000 Ω/sq 이하의 면 저항을 얻을 수 없을 것으로 판단되어 스프레이 코팅 방식을 이용한 탄소나노튜브 분사 방법에 의한 투명 전극 기판 제작 기술은 한계를 가짐. 이를 바탕으로 추가 물리적 혹은 화학적 처리 기술의 보완이 필요하다고 판단할 수 있음.

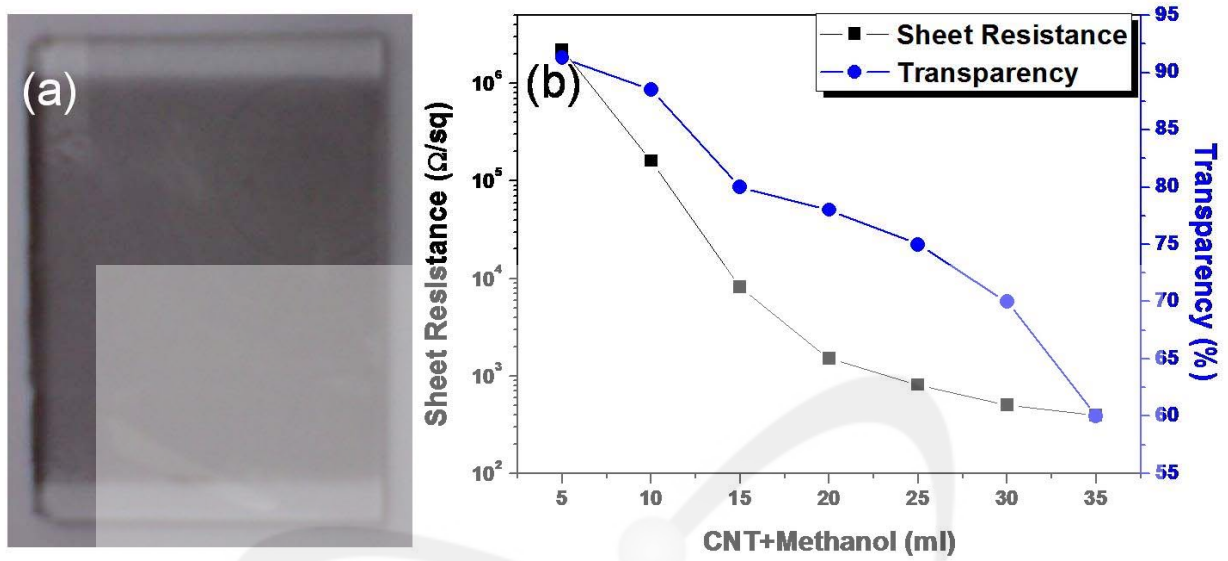


그림 6. (a) 제작된 유리 기판 위 투명 탄소나노튜브 필름. (b) 탄소나노튜브+메탄올 혼합액의 분사량에 따른 탄소나노튜브 필름의 면 저항 및 투과도.

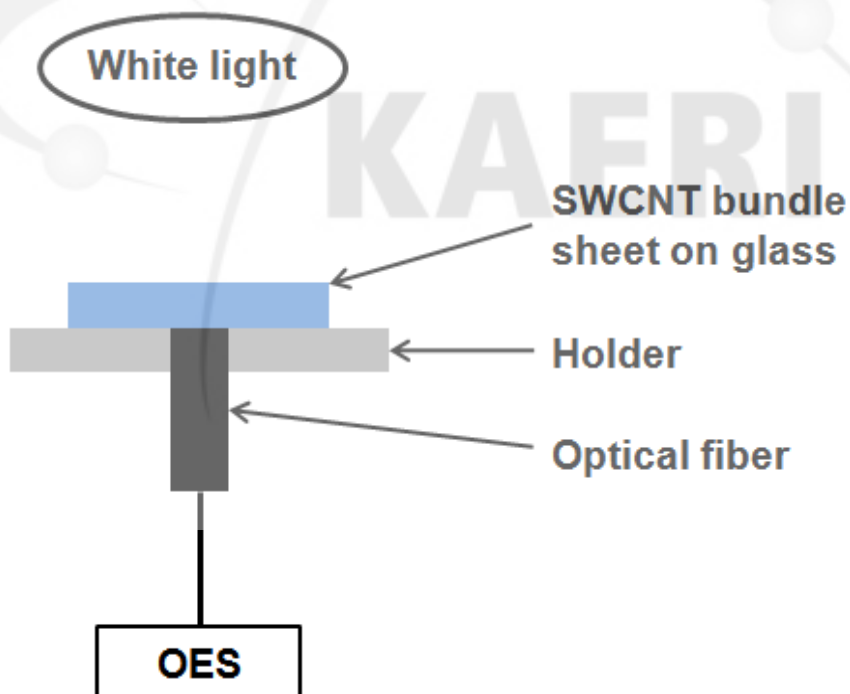


그림 7. 유리 기판 위 탄소나노튜브 판의 투과도 측정 개념도.

3. 양성자 조사에 의한 다발형 단일벽 탄소나노튜브의 변형 분석

나노튜브의 분사에 따른 면 저항 감소 기술은 원천적으로 나노튜브의 수에 전기 전도도는 비례하고 투과도는 반비례하기 때문에 기술적 개발의 한계를 가짐. 따라서 나노튜브의 접합 등을 통하여 네트워크를 개선시키는 방법에 대한 모색이 요구되며 이를 위해 본 연구에서 양성자 조사 방법을 활용함.

양성자 빔 조사 실험 장치로는 한국원자력의학원의 45 MeV 저선량 양성자 빔 실험 장치를 이용하였으며 (그림 8) 알루미늄 시트 (degrader)를 이용하여 45 MeV 양성자 빔의 에너지를 10 MeV로 낮추어 실험을 진행하였고 전류밀도를 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ 으로 고정하고 조사 시간을 조절하여 조사량 조절을 함. 10 MeV 에너지와 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ 전류밀도에서 실험한 결과 열로 인한 탄소나노튜브 판과 유리 기판의 탈착 및 유리 기판의 파손 등의 열문제가 발생하 \AA 기판았으며, 1차년도 결과로부터 , 한 20, 90 eV 및 7.5 keV Ar 이온 조사의 경우 주로 탄소나노튜브 다발 표면에서의 탄소 원자 이탈현상에만 관여할 것으로 예상됨. 10 MeV 양성자 조사의 경우 낮은 충돌단면적으로 인해 탄소 입자와의 충돌 가능성이 낮고 조사 입자의 질량이 가벼워 에너지 전달 효율도 낮으므로 나노튜브의 변형을 최소화시킬 수 있고 전달된 에너지와 자유 탄소 원자의 거동에 의해서 교차된 나노튜브의 네트워크에 따른 전기 전도도 개선이 가능할 것으로 예상됨. 이를 위해 양성자가 조사되기 전 유리 기판 위 투명 탄소나노튜브 판은 그림 9(a)의 주사전자현미경 이미지와 같이 제작하였으며 조사 후 서로 얽힌 나노튜브의 표면 손상은 관찰되지 않음.

양성자의 에너지를 10 MeV로 고정하고 양성자 조사량을 $8 \times 10^{13} \sim 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 로 변화시키면서 조사량에 의한 효과를 그림 9(b)~(e)의 이미지와 같이 얻었음. 조사량 $8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 의 경우 양성자 조사 전과 마찬가지로 표면의 손상이 관찰되지 않았으나, 조사량 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 의 경우 다발 및 탄소나노튜브들이 양성자 조사에 의해 수축되며 끝단이 잘린 형상이 보임. 이는 양성자 조사에 따라 조사된 양성자가 탄소나노튜브를 구성하고 있는 탄소 원자와 충돌하여 격자에 빈 공간이 형성되는 격자 구조 손상이 있었고 탄소나노튜브와의 충돌에서 탄소나노튜브로 전달된 에너지에 의해 격자 구조에 형성된 dangling bond들이 재결합하는 과정을 통하여 손상된 구조가 다시 봉합되면서 탄소나노튜브의 직경은 감소하게 되는 현상을 보임. 따라서 단일벽 탄소나노튜브 다발의 표면에서 이 같은 현상이 많이 일어나고 이로 인해 다발의 직경은 감소되는 결과를 보였음. 또한 탄소나노튜브 표면을 표류하던 튀겨 나간 탄소 원자들은 다발 사이와 탄소나노튜브들의 접점 사이에서 탄소나노튜브 사이의 결합을 향상시켜 물리적으로 접합된 네트워크를 형성시킬 것으로 예상함. 만일 $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 이상의 조사량을 조사한 경우에는 양성자로부터 과도한 에너지가 전달되어 재결합에 의한 봉합률이 줄고 탄소나노튜브의 손상은 커져서 튜브 형상을 더 이상 유지하지 못하며 네트워크는 끊어진 상태가 됨. 더 큰 조사량에서는 대부분의 탄소나노튜브가

스퍼터링 되어 날아간 것을 확인할 수 있음. 따라서 양성자 조사량 조절을 통하여 탄소나노튜브의 형상 변형을 조절할 수 있었으며, 10 MeV 양성자 조사의 경우 $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 이하의 조사량을 이용하여 튜브의 형상을 유지하면서 네트워크 형성을 향상시킬 수 있었고 최적의 조사 조건은 탄소나노튜브의 물성과 관계될 것으로 예상함.

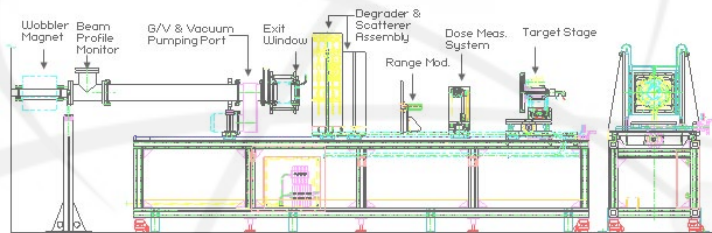


그림 8. 한국원자력의학원 45 MeV 저선량 양성자 빔 실험 장치 개략도.

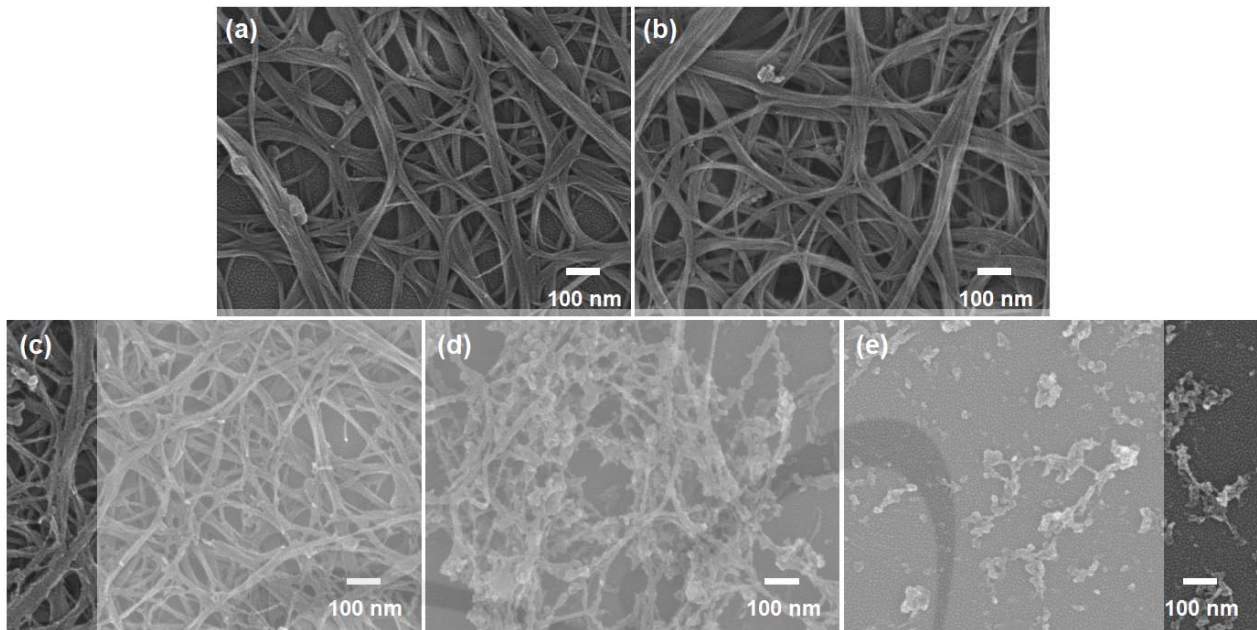


그림 9. 10 MeV 양성자 조사 후 다발형 단일벽 탄소나노튜브의 전자주사현미경 이미지. (a) 조사전, (b) 조사량 $8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, (c) 조사량 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, (d) 조사량 $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. (e) 조사량 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

4. 양성자 조사에 의해 변형된 투명 탄소나노튜브 판의 전기 전도도 향상

양성자 조사에 의한 탄소나노튜브로부터의 탄소 원자의 이탈은 탄소나노튜브와 탄소나노튜브 사이에 가교를 형성할 뿐 아니라 다발과 다발 사이에도 가교를 형성하여 두 다발의 접점부분은 접합시킴. 이에 따라 탄소나노튜브 다발 간 접점의 전기적 저항을 감소시켜 탄소나노튜브 다발로 형성된 네트워크의 전기 전도도를 향상시킬 수 있을 것임. 그림 10은 유리 기판 위 탄소나노튜브 판으로의 10 MeV 양성자 조사에 의한 면 저항 감소 결과로 양성자 조사에 의해 탄소나노튜브 다발 간의 접합이 증가하면 면 저항이 감소하는 것을 확인할 수 있었음. 약 500 Ω/sq 이었던 면 저항이 약 200 Ω/sq 로 감소하여 양성자 조사 전 대비 약 2.5배 정도로 전기 전도도가 향상된 것을 확인할 수 있음. $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 이상의 조사량에서는 전자주사현미경 결과에서 예측한 결과와 같이 탄소나노튜브 네트워크가 파괴되어 면 저항이 측정되지 않았음. 양성자 조사에 의한 면 저항 감소 결과는 기존의 스프레이 방식으로 제작된 투명 탄소나노튜브 필름의 단점인 탄소나노튜브 다발 사이 및 탄소나노튜브 다발과 유리 기판의 약한 결합력을 해결할 수 있는 방법으로 양성자 조사가 이용될 수 있음을 보여줌. 조사량 조절을 통하여 탄소나노튜브에 누적되는 에너지를 제어함으로써 탄소나노튜브 다발 간의 접합저항을 감소시키면서 탄소나노튜브의 구조적 변형을 적게 유지함으로써 탄소나노튜브 네트워크의 전기 전도도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단함.

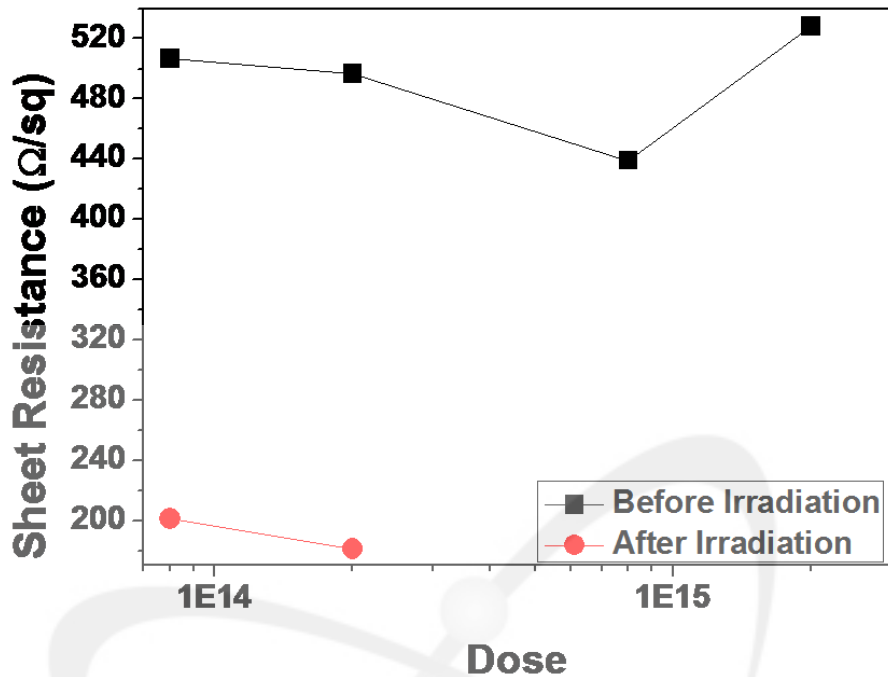


그림 10. 10 MeV 양성자 조사 전과 후 조사량에 따른 투명 탄소 나노튜브 판의 면 저항.

5. 탄소나노튜브 네트워크를 이용한 투명 전극 기술 개발 가능성 확인

10 MeV 양성자 조사 후 투명 탄소나노튜브 판의 투과도는 그림 11과 같이 감소되고, 10 MeV 양성자 조사 시 적절한 조사량을 조절하여 투명 탄소나노튜브 판의 표면 저항을 약 200 Ω/sq 까지 감소시켰으나 투과도는 오히려 46 ~ 55 % 정도를 가져 황화현상이 심화됨을 확인함. 전기 전도도가 향상되는 효과는 탄소나노튜브 사이의 결합이 향상되기 때문으로 판단됨. 투과도 변화는 유리 기판에 양이온 주입으로 인한 황화현상에 기여하며 이는 조사량 증가에 따라 유리 기판에 전달되는 에너지 증가에 의해 유리 기판을 구성하는 규소 원자의 산화 및 비결정질화로 인하여 유리가 변색되면서 투과도가 떨어진 것으로 판단됨. 양성자 빔 에너지 조절을 통하여 대부분의 에너지가 탄소나노튜브에 전달되도록 침투 깊이 조절을 하면 변색되는 현상을 제어할 수 있을 것으로 판단됨.

전기 전도도를 보다 향상시키는 방법으로는 탄소나노튜브 분산 방법의 개선 및 조사량 조절로 가능할 것으로 판단되며, 황화현상도 에너지 및 조사량 제어를 통해서 개선할 수 있을 것으로 판단되나 ITO (Indium Tin Oxide) 박막 대비 높은 값을 갖는 현재 수준임. 따라서 현 기술은 ITO를 대체할 가능성을 보이고 있으나, 특히 ITO 박막의 경우 90 %의 투과도에서 수십 Ω/sq의 면 저항에 대비하여 양성자 조사에 의해서 최소한 200 Ω/sq 이하의 면 저항과 80 % 이상의 투과도를 목표로 하는 양성자 처리 요건 도출에 관한 추가

연구가 요구됨. 또한 이 기술은 기존의 탄소나노튜브 코팅 및 프린팅 방식들에 의해 제작된 투명 전도성 필름에 대한 후속 공정으로써 양성자 조사를 이용하여 전도도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대함.

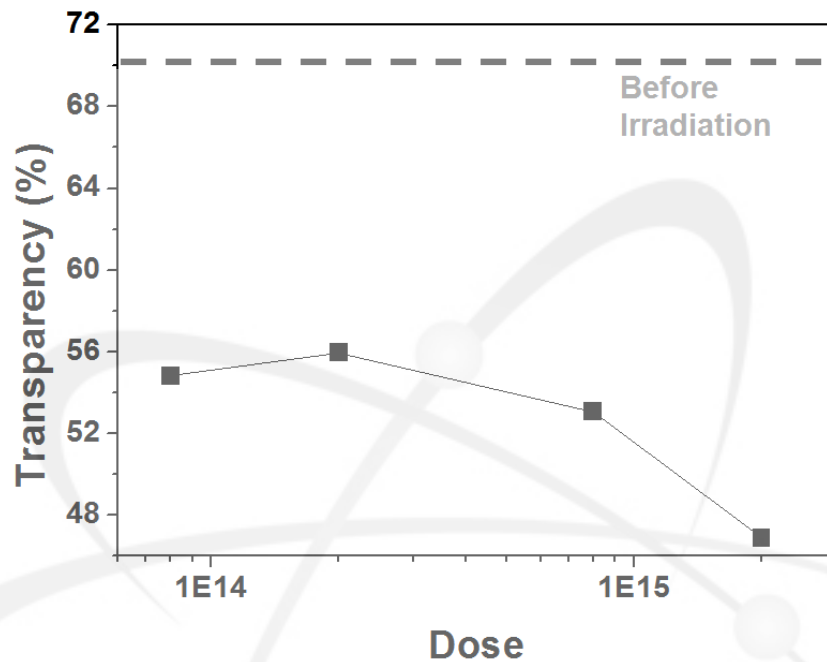


그림 11. 10 MeV 양성자 조사 후 조사량에 따른 투명 탄소나노튜브 판의 투과도.

6. 입자 조사에 의한 탄소나노튜브 변형

본 연구를 통하여 입자 충돌에 의한 탄소나노튜브의 변형 기전에 관한 자료를 축척할 수 있었음. 입자 조사에 의한 탄소나노튜브의 변형은 입사 입자의 종류, 에너지에 따라 탄소나노튜브를 구성하는 탄소 입자에 전달 혹은 누적되는 에너지 크기에 따라서 결정됨. 이를 입자간 충돌 각도를 고려한 이중 물체 충돌 모형 (binary collision) 및 TRIM (TRansport of Ions in Matter) 전산모사를 통하여 탄소나노튜브 및 탄소나노튜브 다발 내에서의 입자당 에너지 손실을 결정하고, 이로부터 이온빔 및 전자빔의 에너지와 조사량에 따라 탄소나노튜브를 구성하는 탄소가 얻게 되는 평균 에너지를 결정함. 이에 따른 변형의 종류가 표 1과 같이 정리됨.

Information of Particle	E_{C-avg}	Type of Deformation
Ar ion, 5.5 eV, 2.1 ~ 6.3 nm ⁻²	0.3 ~ 0.9 eV	Incompletion of re-closing of SWCNH
Ar ion, 5.5 eV, 31.5 nm ⁻²	4.3 eV	Re-closing of SWCNH
Electron beam, 300 keV, 7.2 ~ 72 nm ⁻²	0.08 ~ 0.8 eV	Non-serious defect with shrinkage and inter-tube linkage of SWCNT bundle
Ar ion, 7.5 keV, 95 ~ 190 nm ⁻²	16.3 ~ 32.5 eV	Amorphization of SWCNT bundle
Ar ion, 90 eV, 780 nm ⁻²	693 eV	Thinning and breaking of SWCNT bundle
N ₂ ion, 70 eV, 4680 nm ⁻²	2199 eV	Wall and tip opening of MWCNT
N ₂ ion, 150 eV, 4680 nm ⁻²	3038 eV	Breaking and rupturing of MWCNT

표 1. 입자 조사에 의해 탄소나노튜브를 구성하고 있는 탄소가 얻는 평균 에너지에 따른 탄소나노튜브 변형의 종류.

1차년도 TRIM 전산모사 결과로부터 10 MeV, $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 양성자 빔 조사의 경우 직경 20 nm 단일벽 탄소나노튜브 다발에서의 입자 당 에너지 손실은 약 96 eV로 예측되었음. 이로부터 본 실험에서 사용된 조사 조건인 10 MeV, $8 \times 10^{13} \sim 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 양성자 빔 조사의 경우 탄소나노튜브를 구성하는 탄소가 얻는 평균 에너지가 약 38.4 ~ 960 eV로 예측됨. 조사량 $8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 의 경우 탄소나노튜브를 구성하는 탄소가 얻는 평균 에너지가 약 38.4 eV로 단일벽 탄소나노튜브 다발의 비결정질화가 주로 일어나나 나노튜브 표면의 손상은 크게 관찰되지 않으며 이는 그림 9(b)를 통해 확인됨. 조사량이 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 로부터 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 으로 증가될수록 단일벽 탄소나노튜브 다발 직경이 수축하여 절단이 일어나게 되며 이는 표 1로부터 예측해볼 수 있고 그림 9(c)~(e)를 통해서 이를 확인할 수 있음. 이온빔 및 전자빔 뿐 아니라 양성자 빔 결과 정리를 통하여 입자 조사에 의한 탄소나노튜브의 변형을 정리할 수 있었으며 이로부터 에너지 및 조사량 등 입자 조사 변수를 조절함으로써 탄소나노튜브의 변형의 제어 가능성을 확인할 수 있었음.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

1절. 목표달성도

목 표	평가의 착안점	달성도(%)	내 용
투명 탄소나노튜브 기관 제작	투명 탄소나노튜브 네트워크 판 제작 여부 및 투과도 측정 결과 제시	100	스프레이 코팅 방식을 이용하여 유리 기관 위 투명 탄소나노튜브 판을 제작하였으며, 탄소나노튜브와 메탄올 혼합액의 분사량 조절을 통하여 투명 탄소나노튜브 판의 면 저항 및 투과도를 조절함.
투명 탄소나노튜브 네트워크 필름으로의 양성자 조사에 의한 구조적 변형 관찰	양성자 조사 조건 변화를 통한 탄소나노튜브의 손상 및 접합 등 구조적 변형 관찰 및 조절 결과물 제시	100	유리 기관 위 투명 탄소나노튜브 판을 대상으로 에너지 10 MeV, 조사량 $8 \times 10^{13} \sim 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 조건의 양성자 조사를 수행하였으며 이에 따른 탄소나노튜브 다발의 구조적 변형을 관찰함.
양성자 조사에 의해 변형된 투명 탄소나노튜브 네트워크의 전기 전도도 변화 분석	투명 탄소나노튜브 네트워크 판의 투과도 유지 조건 하에서 양성자 조사 전 대비 10배 이상의 전기 전도도 향상 결과물 제시	80	양성자 조사 후 유리 기관 위 투명 탄소나노튜브 판의 면 저항 변화를 측정함. 양성자 조사 전 대비 약 2.5배의 전기 전도도 향상을 측정하였으며 과제계획서 상의 10배 이상의 전기 전도도 향상에 미치지 못함.
탄소나노튜브 네트워크 판을 이용한 투명 전극 기술 개발 가능성 확인	탄소나노튜브 네트워크 판의 구조적 변형과 전기 전도도 변화에 대한 상관관계 분석을 토대로 탄소나노튜브를 이용한 투명 전극 기술 개발 가능성 판단 결과 제시	100	양성자 조사 후 유리 기관 위 투명 탄소나노튜브 판의 투과도 변화를 측정함. 조사량이 증가함에 따라 유리 기관에 전달되는 에너지 증가에 의해 유리가 변색되면서 투과도가 감소되는 것을 확인함. 양성자 빔 에너지 조절을 통하여 대부분의 에너지가 탄소나노튜브에 전달되도록 침투 깊이 조절을 하면 변색되는 현상을 제어할 수 있을 것으로 판단됨.

2절. 관련분야에의 기여도

탄소나노튜브는 발견된 이래로 구조적, 전기적, 기계적 특성을 이용하여 많은 분야에서 기존의 재료들을 대체할 수 재료도 대두되어 왔으나 아직 실용화 된 경우는 매우 드문 상태임. 이는 활용 분야에 따라 탄소나노튜브의 특성을 기존 재료의 특성에 비해 향상시키지 못하였으며 또한 이를 위해 그 특성을 조절하지 못하였기 때문인 것으로 생각됨. 많은 연구진이 탄소나노튜브의 합성 단계에서 여러 가지 특성을 조절하려고 시도하고 있으며 합성 후 물리적, 화학적 방법을 통해 탄소나노튜브의 특성을 변화시키려는 연구를 진행하고 있음. 본 연구진은 입자 조사 방법을 이용하여 탄소나노튜브의 특성을 변형시키는 연구를 진행하였음. 특히 구조적 변형을 통한 탄소나노튜브의 전기적 특성을 변화시키려는 연구를 진행하였으며 이를 통해 탄소나노튜브 네트워크의 전기 전도도를 향상시킬 수 있음을 보였음. 이는 기존의 탄소나노튜브 합성법 변화, 기관으로의 탄소나노튜브 코팅법 변화에 따른 전기 전도도 변화 연구와 차별화 된 방법임. 본 연구 결과는 나노 스케일 소자 제작을 위한 배선 재료 혹은 기존의 ITO를 대체할 투명 전극 재료로 탄소나노튜브를 활용할 수 있는 가능성을 보였음. 또한 입자의 중, 조사 에너지, 조사량은 탄소나노튜브의 구조적 변형을 조절하는 중요한 인자이며 결국 탄소나노튜브의 특성 변화를 결정짓는 인자가 됨을 확인하였음. 이는 전기적 특성을 이용한 활용 분야 외에 다른 분야에 활용하기 위한 탄소나노튜브의 변형 연구에도 기여할 것으로 생각됨.

KAERI

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1절. 추가연구의 필요성

본 연구를 통해 고에너지 양성자 조사에 의해 네트워크 구조의 탄소나노튜브 필름의 전기 전도도가 향상될 수 있음을 보였다. 이는 양성자가 탄소나노튜브 네트워크를 통과하면서 교차 지점을 접합시켜 저항을 감소시켰기 때문이다. 하지만 통과된 고에너지 양성자는 탄소나노튜브 필름 하단의 유리 기판의 투명도를 감소시킴. 결국 고에너지 양성자 조사에 의해 탄소나노튜브 필름의 전기 전도도는 증가하는 반면 투과도가 감소되는 문제점이 발생하므로 본 기술을 투명 전극 제작에 활용하기 위해서는 이를 해결하기 위한 연구가 요구됨. 이는 본 연구팀의 입자 조사에 의한 탄소나노튜브의 구조적 변형 연구에 대한 기반 Ⅱ 의한 탄토타대로 조사 입자의 에너지, 조사량 등의 조건을 세밀하게 조절하여 해결할 수 있을 것으로 판단되며 조사 입자로 인해 전달되는 대부분의 에너지가 탄소나노튜브에 전달되도록 침투 깊이 조절을 하면 변색되는 현상을 제어할 수 있을 것으로 판단됨.

2절. 타연구에의 응용

입자 조사에 의한 탄소나노튜브의 전기 전도도 향상은 본 연구에서 제시하였듯이 탄소나노튜브의 전기적 성질을 기반으로 한 응용 분야로써 나노 스케일 배선 혹은 투명 전극 제조에 활용될 수 있는 기술임. 이는 입자 조사에 의한 탄소나노튜브의 구조적 변형에 기인함. 탄소나노튜브의 구조적 변형은 전기 전도도 변화 이외에 여러 특성을 변화시킬 수 있음. 입자 조사에 의해 탄소나노튜브의 다공성 구조를 변화시킬 수 있으며 이는 수소 등 가스 흡착 특성을 변화시킬 수 있음. 또한 입자 조사에 의해 탄소나노튜브에 열린 끝이 형성될 수 있으며 알칼리 금속 등의 입자가 삽입되어 탄소나노튜브의 반도체적 성질을 변화시킬 수 있음. 수직 합성된 탄소나노튜브는 전계 방출 팁으로 이용될 수 있으며 입자 조사에 의해 보다 안정적인 전계 방출 팁으로의 변형이 가능할 수 있음. 입자 조사에 의한 탄소나노튜브의 구조적 변형 및 조절은 여러 활용 분야에 있어 탄소나노튜브의 특성을 향상시키거나 조절하는데 요구되는 기반 기술이 될 것임.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

탄소나노튜브 분산 방식의 개선을 통하여 그림 8과 같이 전체 필름의 전기 전도도를 증가시킬 수 있음을 확인함. 일본의 Song의 연구자들은 dip coating과 스프레이 코팅 방식을 혼합하여 polyethylene(PET) 위에 다발형 단일벽 탄소나노튜브를 분산시켰고 이를 통하여 투과도는 유지하면서 면 저항은 낮은 투명 탄소나노튜브 필름을 형성함. Dip coating을 이용하여 PET 위에 탄소나노튜브들이 방향성을 가지도록 분산시켰으며 이를 스프레이 코팅의 무작위적인 분산을 이용하여 탄소나노튜브 네트워크를 형성하여 투과도를 유지하면서 면 저항을 낮추었음. 이렇게 형성된 탄소나노튜브 네트워크 또한 탄소나노튜브 다발 간 점점의 저항이 높을 것이므로 양성자빔 조사를 이용한 탄소나노튜브 다발 간 접합을 형성시킬 경우 면 저항을 더 낮출 수 있을 것으로 판단됨.

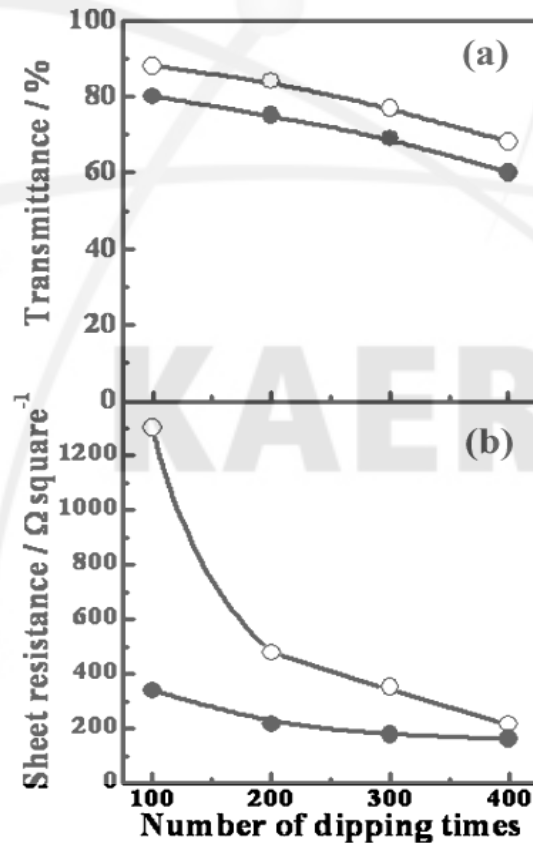


그림 12. Dip coating 방식으로만 제작된 탄소나노튜브 필름 (열린 원)과 추가적인 스프레이 코팅을 한 탄소나노튜브 필름 (닫힌 원)의 (a) 투과도 및 (b) 면 저항 [6].

제 7 장 참고문헌

- [1] V. A. Basiuk, K. Kobayashi, T. Kaneko, Y. Negishi, E. V. Basiuk and J.-M. Saniger-Blesa, *Nano Lett.* **2**, 789 (2002).
- [2] B. Khare, M. Meyyappan, M. H. Moore, P. Wilhite, H. Imanaka and B. Chen, *Nano Lett.* **3**, 643 (2003).
- [3] D. hecht, L. Hu and G. Grüner, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 133112 (2006).
- [4] M. Kaempgen, G. S. Duesberg and S. Roth, *Appl. Surf. Sci.* **252**, 425 (2005).
- [5] B. B. Parekh, G. Fanchini, G. Eda and M. Chhowalla, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 121913 (2007).
- [6] Y. S. Song, C. M. Yang, D. Y. Kim, H. Kanoh and K. Kaneko, *J. Coll. Int. Sci.* **318**, 365 (2008)

