

감광성 CNT 페이스트를 이용한 IED 폭발물 제거로봇 탐지전극 형성에 관한 연구

권혜진^a

국방기술품질원 선행연구계획팀

A Study on the Formation of Detection Electrode for
the IED Removal Robot by Using A Photosensitive CNT Paste

Hye Jin Kwon^a

Precedent Study Planning Team, Defence Agency for Technology and Quality, Daejeon 34027, Korea

(Received February 1, 2018; Revised February 22, 2018; Accepted February 23, 2018)

Abstract: In this study, two important requirements for the home production of a robot to detect and remove improvised explosive devices (IEDs) are presented in terms of the total cost for robot system development and the performance improvement of the mine detection technology. Firstly, cost analyses were performed in order to provide a reasonable solution following an engineering estimate method. As a result, the total cost for a mass production system without the mine detection system was estimated to be approximately 396 million won. For the case including the mine detection system, the total cost was estimated to be approximately 411 million won, in which labor costs and overhead charges were slightly increased and the material costs for the mine detection system were negligible. Secondly, a method for fabricating the carbon nanotube (CNT) based gas detection sensor was studied. The detection electrodes were formed by a photolithography process using a photosensitive CNT paste. As a result, this method was shown to be a scalable and expandable technology for producing excellent mine detection sensors. In particular, it was found that surface treatments by using adhesive taping or ion beam bombardment methods are effective for exposing the CNTs to the ambient air environment. Fowler-Nordheim (F-N) plots were obtained from the electron-emission characteristics of the surface treated CNT paste. The F-N plot suggests that sufficient electrons are available for transport between CNT surfaces and chemical molecules, which will make an effective chemiresistive sensor for the advanced IED detection system.

Keywords: IED, Robot, A system development expense, CNT paste, Photolithography

1. 서 론

급조폭발물(improvised explosive devices, IED)이란 휴대용 대전차 유탄발사기 탄두나 불발 포탄, 항공

기 탑재 포탄 또는 휘발유 등의 폭발물에 여러 가지 원격장치나 기폭장치(신관)를 부착하여 사용하는 폭발물을 의미한다. IED는 폭약과 금속 파편 및 간단한 폭발 장치를 사용하여 만든, 제조가 비교적 간단한 수준의 폭발물이지만 높은 파괴력과 어디서든 부지불식간에 발생할 수 있는 무기로서 현대 사회에 공포의 대상이 되고 있다. IED의 폭약은 일반적으로 폭발 반응을 할 수 있는 어떤 형태의 화학물질이나 이들의 혼합물로 구성된다. 폭약은 전형적으로 질산염(nitrates), 염소산

a. Corresponding author; hjkwon@daq.re.kr

염(chlorates), 과염소산염(perchlorates)과 같은 분자 결합 산소를 포함하는 무기 염류(inorganic salts)이거나 니트로기(nitro-), 니트라민기(nitramine-) 혹은 과산 화물(peroxides)을 갖는 유기 화합물로 만들어진다 [1]. 현재에는 군인이나 민간인을 대상으로 사용될 수 있는 폭발물이 수백 가지 이상이나 존재한다. 따라서 광범위한 종류의 IED에 대해 적용할 신뢰성 높은 효율의 탐지 시스템 개발이 중요한 문제로 대두되고 있다.

폭발물 탐지 및 제거 로봇은 전시나 평시에 폭발물, 특히 IED를 탐지하고 제거하는 임무를 수행하는 장치를 말한다. 이 장치는 전시에 적군의 은밀한 폭발물로부터 우리 병사들의 생명을 보호하거나 군집한 일반 민간인들이 테러단체에 의해 비밀리 숨겨진 폭발물로부터 대량 사상자가 발생하는 것을 막기 위한 지상 로봇 무기 체계에 해당된다. 그림 1은 폭발물을 탐지하고 제거하는 로봇의 실제 사례를 보여 주는 사진이다.

극미량의 화학물질을 검출하기 위한 탐지를 위해 상업적 부품들이 개발되고 있으나 감도가 매우 우수하고 검출 속도가 빠른 방법에 대한 필요성은 여전히 증가하고 있으며 대체 기술들에 관한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 대표적인 방법들로서는 화학적 센서 [2], 바이오센서 [3], 질량분석(mass spectrometry) [4], 이온 이동도 분석기(ion mobility spectrometry) [5] 등이 있다. 최근에는 나노 기술에 기반을 둔 센서들에 대한 기술 개발이 이루어지고 있다 [6,7].

그중에서 특히 카본 나노튜브(carbon nanotube, CNT)에 기반을 둔 극미량 화학물질 탐지기술이 중요하게 대두되고 있다 [8,9]. CNT를 이용한 탐지기술의 장점은 먼저 CNT가 갖는 넓은 표면적과 높은 열 전도성 및 열적 안정성이며, 또한 폭발물의 분자들이 CNT의

표면에 효과적이고 매우 안정적으로 흡착된다는 CNT의 구조적 특징들이 장점으로 작용한다. 화학적 저항성(chemiresistive) 센서는 가장 흔히 사용되는 센서들 중의 하나로서 CNT가 전도성(혹은 저항성) 채널로서 적용될 수 있다. 이 센서들에 있어서 두 전극들 간에 CNT를 형성시키기 위해 사용되는 방법으로는 화학 기상 증착법(chemical vapor deposition), 스프레이 방법(spraying) 및 인쇄 방법(printing) 등이 있다. CNT 기반 탐지전극을 형성하기 위해서는 CNT 물질을 기판 상에 증착시키는 것 외에도 마이크로 단위의 저항체 형태로 형상화시키는 기술도 어려운 과제이다.

최근의 다른 연구 결과(W. Ruan, *et al.*)에 의하면 CNT 성장공정 중에 레이저 빔을 이용한 기판의 국부적 가열에 의해 전극 패턴을 형성시키는 기술의 실험 결과가 보고된 바가 있다 [8]. 그러나 이 기술은 연구 단위 측면에서 좋은 방안이기는 하나 실용화 측면에서는 아직 해결해야 할 요소들이 많은 방법이기도 하다. CNT에 의한 화학물질 센싱은 CNT 표면에 화학물질이 흡착되면 CNT 전극의 전도도(또는 저항성)가 변화하는 원리를 이용하는 것인데 이러한 센서 구조의 개념도가 그림 2에 보여 있다. 국외 유사 무기체계의 발전 추세를 고려해 볼 때 폭발물 탐지 및 제거 로봇의 국내 전력화가 필요할 것으로 보인다.

본 논문에서는 먼저, 폭발물 탐지 및 제거 로봇을 획득하기 위한 합리적 대안을 제시하기 위하여 획득 방안별 양산화를 위한 비용분석을 수행하였다. 폭발물 탐지 및 제거 로봇의 효율적 획득을 위해서는 비용적인 측면 외에도 성능, 그중에서도 특히 폭발물 탐지기능의 성능을 고려해야 한다. 이에 따라 폭발물 탐지기능의 선진화를 위한 방안으로 CNT 기반의 폭발물 탐지 기술에 대한 선행연구를 수행하였다. 특히, 본 연구에서는 앞에서 언급된 바와 같이 CNT 기반 탐지전극



Fig. 1. A robot system for detection and removal of explosive devices.

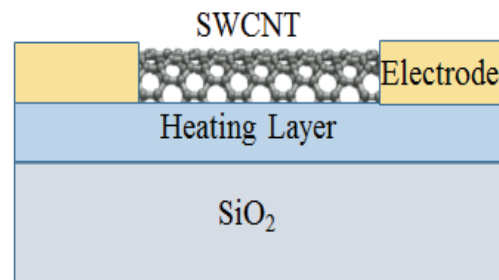


Fig. 2. Schematic of the chemiresistive sensor by using the absorption of explosive molecules on the CNT surfaces.

기술들에서 전극패턴 형성에 따른 어려운 공정을 피하고 보다 용이하게 전극패턴을 형성시킬 수 있는 제조 방법에 대해 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 폭발물 제거 및 탐지 로봇 개발을 위한 비용 분석

본 논문에서는 CNT 탐지전극에 관한 연구수행에 앞서 먼저, 지뢰탐지 장치를 폭발물 탐지 및 제거 로봇에 적용했을 경우의 생산단가를 공학적 방법에 의거하여 추정하여 보았다. 공학적 비용 추정이란 작업분할구조(work breakdown structure, WBS)의 보다 낮은 단계에서 이루어진 세부적 추정치들을 합산함으로써 전체적인 비용 추정을 설정하는 방식을 말한다.

본 논문에서 공학적 분석은 업체에서 제시한 비용자료를 바탕으로 방사청의 2014년도(선행연구 수행 당시 기준연도) 비용분석서 작성지침에 따라 수행하였다. 분석 결과는 작업분할구조 등에 근거하여 재료비, 노무비, 경비를 제시하고 업체에서 제시한 원가자료의 실체를 확인하고 타당성을 검토하였다. 지뢰탐지기능 적용 시와 제외 시에 대한 1대당 양산단가의 추정결과를 종합적으로 비교하였다.

그 결과, IED 폭발물 제거로봇 1대당 양산단가 총액은 지뢰탐지기능 적용 시에는 약 4억 1천7십만 원, 제외 시에는 약 3억 9천6백만 원으로 추정되었다. 모든 항목들 중에서 재료비가 가장 높은 비중(지뢰탐지기능 제외 시: 77.8%, 지뢰탐지기능 적용 시: 77%)을 차지하는 것으로 나타났다. 이에 비해 노무비는 지뢰탐지기능 적용 시와 제외 시에 각각 3.5%와 2.9%, 경비는 2.4%와 1.9%로 다소 차이가 발생하였으나 전체 비중은 매우 미미한 것으로 나타났다. 결론적으로 IED 폭발물 제거로봇 양산단가의 거의 대다수를 차지하는 재료비만을 비교해 보았을 때, 지뢰탐지기능을 적용한 경우에는 약 3억 1천7백9십만 원이고 지뢰탐지기능을 제외시킨 경우에는 약 3억 7백9십만 원으로서 거의 차이가 없음을 보여 주었다. 이는 폭발물 제거 로봇의 국내 양산화를 위한 개발 시 비용적 측면보다는 성능적 측면을 우선 고려하여 고효율의 탐지기능을 적용하는 것이 타당할 것이라는 것을 시사한다.

이에 본 연구에서는 최근 연구되고 있는 고효율 위험 화합물 탐지센서로 유망한 기술로서 CNT 기반의 탐지전극 형성에 관한 연구를 수행하였다.

2.2 폭발물 탐지를 위한 CNT 기반 센서전극 형성 실험

CNT 전극을 형성하는 방법으로는 최근 다른 연구에서 보고되고 있는 기상증착법 대신에 CNT 입자들을 자외선의 노광에 의해 감광화될 수 있도록 페이스트화하여 프린팅시키는 방법을 적용하였다. 이는 기존 방법들에서 가장 어려운 요소인 패턴 형성의 어려움을 극복하고 저온에서도 쉽게 형성시킬 수 있는 장점이 있다. 그림 3은 본 연구에서 적용된 감광성 CNT 페이스트를 이용하여 사진식각공정(photolithography) 방법에 의해 전극패턴을 형성시키는 과정을 보여 주는 흐름도이다. 이 흐름도에서 알 수 있듯이 감광성 CNT를 이용한 전극 형성 방법은 반도체 공정에서 흔히 사용되고 있는 사진식각의 단일공정과 거의 유사하므로 매우 공정이 용이하다는 것을 알 수 있다.

감광성 CNT 페이스트를 준비하는 과정을 설명하면 다음과 같다. 먼저, 직경이 20~50 nm이고 길이가 1~5 mm인 다수의 CNT들을 점액성 용액에 분산시킨다. 본 연구에서 사용된 CNT 분말은 MWCNT (multi-wall CNT)이다 [10]. CNT 페이스트를 전도체로 만들기 위하여 나노 은 입자를 매체(vehicle) 속에 분산시킨다. 바인더로서 사용될 낮은 용점을 갖는 프리트(frit) 유리를 용액과 혼합하여 페이스트 형태로 만든다. 다음은 CNT 페이스트가 네거티브 감광성을 갖도록 하기 위하여 포토 레지스트(photo resist)를 혼합함으로써, 포토 리소그래피의 노광기술에 의해 원하는 형태를 만들 수

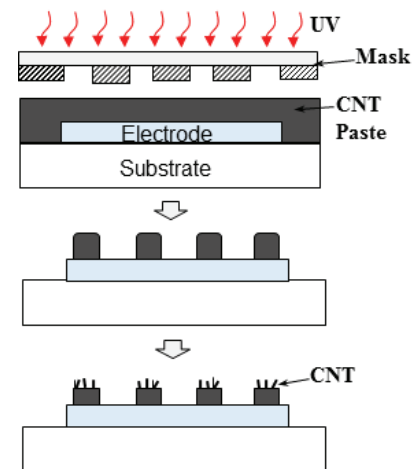


Fig. 3. Process sequences for the fabrication of CNT-based detection electrode: CNT paste printing and exposure and developing, and surface treatment.

있게 된다. 그림 3은 CNT 페이스트를 ITO/유리 기판에 프린팅한 후 마스크를 통해 자외선으로 노광하는 단계와 노광 작업이 이루어진 CNT 페이스트를 현상액에 담가 자외선에 노광된 부분만 남기고 노광되지 않은 부분을 제거시킴으로써 막대(stripe) 형태의 CNT 페이스트 전극패턴을 형성시키는 단계를 보여 준다. 그런데 CNT 페이스트 전극패턴 현상 직후에는 CNT 입자들이 바인더 성분에 묻혀 있기 때문에 CNT와 화학물질 분자들과 반응하지 못한다. 따라서 표면 처리(surface treatment) 공정을 통해 페이스트 표면 밖으로 CNT 튜브들을 노출시키는 후속 공정이 매우 중요하다. 그림 3의 마지막 단계는 표면 처리를 수행한 이후의 페이스트 표면형태를 보여 주는 그림이다.

본 연구에서는 CNT 페이스트의 포토공정을 통해 형성된 막대 형태의 CNT 페이스트에 대해 여러 가지 표면 처리 방법에 따른 CNT 튜브들의 표면 노출 정도를 확인하는 실험을 하였다. 즉, 이온 빔 조사(ion beam bombardment)에 의한 방법과 접착성 테이핑(adhesive taping)에 의한 표면 처리 방법 및 Ar 프라즈마에 의한 표면 처리를 수행하여 보았다. 이 방법들 중에서 어느 것이 CNT 튜브들을 페이스트 표면 밖으로 잘 노출시키는지 확인하기 위하여 전자방출 특성을 비교 분석하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 사진식각 공정에 의한 CNT 페이스트 전극 형성

ITO 저항막 패턴이 미리 형성되어 있는 유리 기판 상에 CNT 페이스트를 스크린 프린팅하고 마스크를 통한 노광작업 및 현상단계를 수행하였다. 그림 4는 사진식각공정에 의한 CNT 페이스트 전극 패턴 형성 후

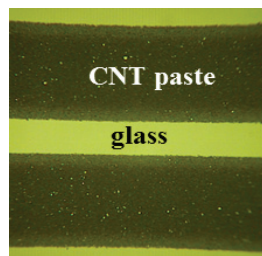


Fig. 4. Photo view of the untreated CNT paste pattern after baking at 450°C for 10 min.

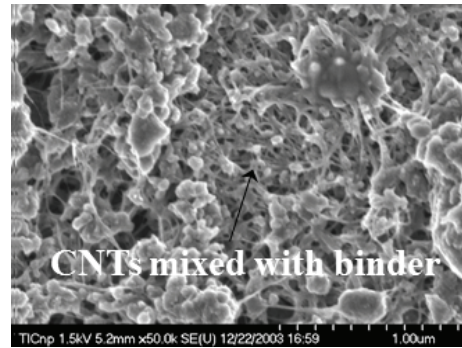


Fig. 5. SEM view of the untreated CNT paste after baking at 450°C for 10 min.

의 모양을 광학 현미경으로 측정하여 나타난 사진이다. 현상 후 남겨진 CNT 페이스트 안에 남아 있는 용액 성분을 제거하기 위하여 450°C의 온도에서 10분간 열처리하여 소성된 CNT 전극막의 표면 상태를 전자현미경으로 관측한 결과가 그림 5에 보여 있다. 페이스트 밖으로 CNT 튜브들이 거의 드러나지 않은 것을 볼 수 있다.

3.2 CNT 페이스트의 표면 처리

사진식각 공정에 의해 전극패턴 형성 후 CNT 페이스트 표면의 바인더 성분을 제거하고 CNT 튜브들만 표면에 드러나게 하기 위하여 표면 처리를 수행하여야 한다. 이를 위해 먼저 Ar 프라즈마를 이용하는 공정을 수행하여 보았다. 아르곤 가스에 의한 프라즈마 공정은 시편을 프라즈마 진공챔버에 넣고 아르곤가스를 25 mtorr의 압력으로 채운 다음 RF 전압을 인가하여 100 W와 250 W의 전력으로 변화시켜 가며 5분간 표면 처리 하였다. 그 결과, 100 W의 낮은 전력 범위에서는 표면 처리가 이루어지지 않았으며 250 W의 전력에서는 그림 6에서 보는 바와 같이 CNT 페이스트의 바인더 외에도 CNT 입자들까지 모두 제거되는 결과를 나타내었다. 이는 아르곤 프라즈마 입자들에 의해 탄소계열의 분자들이 기계적 충돌 및 화학적 반응 현상에 의해 쉽게 제거되기 때문으로 생각된다.

CNT 페이스트의 표면 처리를 위한 두 번째 방법으로 Ar 프라즈마 대신에 Ar 이온빔을 가속시켜 CNT 페이스트 표면에 조사시키는 방법을 수행하여 보았다. 먼저 Ar 가스를 이온원 챔버 내로 유입시켜 Ar 프라즈마를 발생시킨 다음 챔버 앞에 구성된 가속전극에 의해 Ar⁺ 이온들이 CNT 기판을 향해 가속된다. 가속된 Ar⁺ 이온들이 CNT 페이스트의 표면에 충돌하게 되

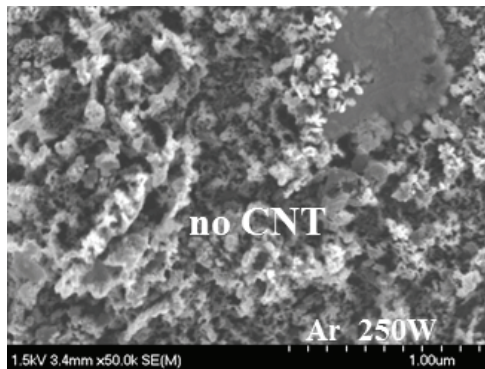


Fig. 6. SEM view of the CNT paste after the surface treatment by Ar plasma with 250 Watt/25 mtorr for 5 min.

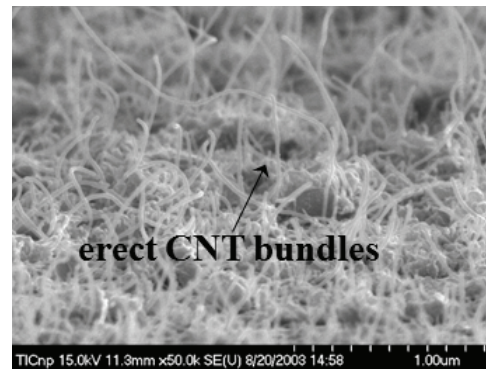


Fig. 8. SEM view of the CNT paste after the surface treatment by adhesive taping method.



Fig. 7. SEM view of the CNT paste after the surface treatment by Ar ion beam with 100 eV acceleration energy for 15 min.

면 바인더 성분들을 제거할 수 있게 된다. 이온빔의 조건을 최적화함으로써 CNT들의 이탈을 최소화시키고 바인더 물질만을 제거함으로써 CNT 튜브들을 표면에 드러나게 할 수 있다. 본 실험에서는 이온 빔의 방출 전류를 약 10 μ A로 형성시키고 가속 에너지를 50 eV에서 300 eV까지 변화시킨 결과, 100 eV로 가속시킨 경우에 가장 양호한 표면 처리 결과를 얻을 수 있었다. 그림 7은 Ar^+ 이온빔을 100 eV의 에너지로 가속시켜 15분간 CNT 페이스트 표면에 조사시킨 후의 전자현미경 사진을 보여준다. 그림에서 CNT 입자들이 적절하게 표면으로 드러나 있음을 볼 수 있다. 그러나 이 경우, 드러난 CNT들이 다소 뭉쳐진(en-tangled) 형태를 이루는 것을 볼 수 있다.

세 번째 방법으로서 접착성 테이핑(adhesive taping)에 의한 표면 처리 방법을 적용하여 보았다. 이 방법은 특수한 접착성 테이프를 소성된 CNT 페이스트의

표면에 롤링(rolling)하여 접착시킨 다음 다시 테이프를 벗겨냄으로써 표면상의 바인더 성분을 선택적으로 뜯어내어 CNT 튜브입자들이 표면에 드러나게 하는 방식이다.

그림 8은 3M사의 접착성 테이핑을 사용하여 수작업으로 표면 처리된 CNT 페이스트의 표면을 전자현미경으로 측정한 사진을 보여 주는데 앞서의 두 가지 방법보다 CNT 입자들이 더 많이 드러났음을 볼 수 있다. 또한 드러난 CNT 튜브 입자들이 보다 수직방향으로 잘 유지하고 있음을 볼 수 있다. 실제 양산에서는 롤링(rolling) 장비에 의한 접착성 테이핑 자동화 공정을 통해 훨씬 양호한 상태의 표면 처리가 가능할 것으로 기대된다.

3.3 CNT 페이스트 전극의 전계 방출 특성 측정

IED 폭발물과 같은 위험 유독 화학물질의 가스를 검출하는 센서 방법들 중에서 가장 흔히 사용하는 방법이 화학저항성(chemiresistive) 검출방식이다. 여기에서 CNT는 전도성 채널로 작용한다. CNT들은 거의 대다수 표면 원자들로 구성되기 때문에 CNT들 주변에 미세한 화학적 환경 변화에 의해 전도성이 상당히 변할 수 있다. CNTs에 의한 화학적 센싱원리는 다른 논문에서 이미 언급된 바 있다 [11]. 간략히 설명하면, CNT 표면에 어떤 화합물 성분이 흡착되면 몇 가지 원리에 의해 전도성(혹은 저항성)을 변화시키는데 그 원리로는 전극-CNT 간 접합에서의 쇼트키(Schottky) 장벽의 변동(modulation), CNT와 화합물 분자들 간에 전하전송 현상 등을 들 수 있다. 예를 들면, 화합물질의 흡착에 의해 화합물질의 분자들로부터 CNT의 가전자대(valence

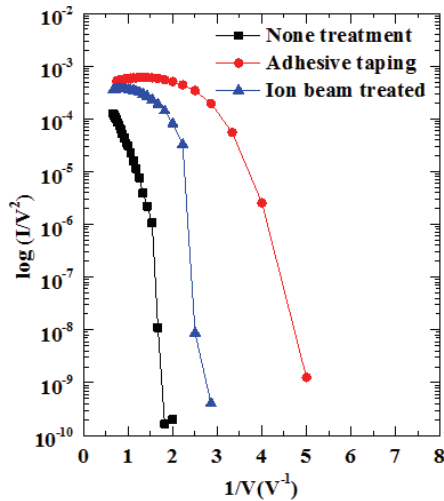


Fig. 9. Fowler-Nordheim plot obtained from the electron emission characteristics depending on the surface treatment method.

band)로 전자들이 기증(donate)되면 CNT들의 정공농도가 감소하여 전도성이 감소할 수 있다. 반대로, p형 CNT들로부터 전자들이 화학물질 속으로 빠져나오면 CNTs들 정공농도가 증가하여 전도도가 증가할 수 있다. SWCNT (single-wall nano tube) 자체가 위험폭발물을 구성하는 극미량의 유독성 화학물질인 trinitro-toluene (TNT)나 dimethyl methylphosphonate (DMMP) 등과 전기화학적 현상으로 잘 반응한다는 사실은 이미 다른 논문들의 결과에 명확히 보고되어 있다 [8,9].

결론적으로, CNT가 화학저항성 센서로서 검출능력이 향상되기 위해서는 CNT 입자들이 표면에 잘 노출되어 있어야 함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 앞에서 수행된 CNT 페이스트의 표면 처리 방법들 중에서 가장 효과적인 방법을 예측하기 위하여 CNT가 표면에 잘 노출된 정도를 비교하고자 하였다. 이를 위한 효과적인 방법으로 표면 처리된 CNT 페이스트 전극을 진공 챔버 속에 넣고 일정 거리에 아노드 전극을 두어 아노드 전압 인가에 따른 CNT 방출전류를 측정하였다. 챔버의 진공도를 약 1×10^{-6} torr로 유지하고 아노드 전극과 CNT 페이스트 전극 간에 200 μm 간격을 두고 (+) 전압을 인가하여 방출된 전류를 측정하였다.

그림 9는 CNT 페이스트의 표면 처리 방법에 따라 측정된 전류-전압 데이터를 사용하여 fowler-nordheim (F-N) plot 형태로 계산하여 그린 그래프이다. 가로축은 $1/V$ 값이며 세로축은 I/V^2 의 로그 값이다. 어떤 물질에 전압을 인가하였을 때 전계(electric field) 효과에 의해 전자가 방출되어 형성되는 전류에 관한 전류-전압

방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$I = aV^2 \exp(-b/V) \quad (1)$$

위 식에서 I 는 전류, V 는 아노드에 인가된 전압이며 a 와 b 는 물질의 일함수(work function), 면적 및 기하학적 구조와 관련된 상수들이다. 이 식을 이용하여 F-N plot을 얻기 위해 양변을 로그함수로 처리하면 식은 다음과 같이 간단히 표현된다. 즉,

$$\log(I/V^2) = \log(a) - (b/V) \quad (2)$$

이 식으로부터 물질에 전압을 인가하였을 때 발생하는 전류가 전계 방출에 기인한 것이라고 가정 시, F-N plot을 취해 보면 $\log(I/V^2)$ 값이 $(1/V)$ 에 대해 음(-)의 기울기를 갖는 직선으로 나타남을 알 수 있다.

그림 9에서 보인 측정 결과의 fowler-nordheim plot을 보면 일정한 전압 구간에서 직선성을 보여 주는 것을 볼 수 있다. 이는 CNT 페이스트 전극으로부터 얻어지는 전류가 전계 방출에 의한 것임을 의미한다. 즉, CNT의 전도대에 존재하는 전자들이 진공전위 장벽을 넘어 진공 밖으로 방출된다는 것이다.

또한 그래프에 의하면 접착성 테이핑에 의해 표면 처리된 CNT 페이스트의 전계 방출 전류 값이 가장 높게 나타난 것으로 보아 이 방법이 CNT 튜브 입자들을 페이스트 표면 밖으로 가장 많이 노출시키는 것으로 판단할 수 있다. 이는 앞에서 보인 전자현미경 사진의 결과와도 잘 일치한다.

결론적으로, 감광성 CNT 페이스트를 이용하여 사진 식각공정에 의해 형성된 CNT 페이스트는 소성 후 적절한 표면 처리에 의해 CNT 튜브 입자들이 표면 밖으로 잘 노출될 수 있음을 알 수 있다. 이와 같이 표면 처리에 의해 노출된 CNT는 방출 가능한 전자들이 많으므로 흡착된 화합물과의 전자이동을 통해 전도성의 변화가 민감하게 작용하여 효과적인 폭발물 탐지센서로 작용할 것으로 기대된다.

4. 결론

본 논문에서는 먼저 폭발물 제거로봇의 국산화 방안으로서, 위험 화합물 탐지기능을 포함하는 것이 비용과 성능을 고려한 효율적 양산 개발 측면에서 유리하다는 것을 공학적 추정 방법에 의한 비용 분석을 통해 확인

하였다.

이에 따라, 폭발물 탐지роб을 위한 극미량의 위험 화합물을 탐지하기 위한 센서로서 CNT 페이스트를 이용한 제작방법을 알아보았다. 그 결과, 감광성 CNT 페이스트를 이용하여 사진식각 방법으로 쉽게 CNT 전극 패턴을 형성할 수 있었다. 특히, 센서로 작용할 CNT 튜브 입자들을 페이스트의 표면 밖으로 많이 노출시키기 위해서는 접착성 테이핑 방법이나 아르곤이온 빔에 의한 조사 방법이 효과적인 것으로 확인되었다. 이렇게 하여 형성된 CNT 페이스트 전극의 화학물 흡착특성을 확인하기 위한 간접적 방법으로 진공 내에서 전자들의 전계 방출 특성을 측정하였다. 그 결과 표면 처리에 의해 노출된 CNT 튜브 입자들로부터 전자 방출이 용이하게 발생하였다. 특히, 접착성 테이핑 방법이 표면 처리에 가장 효과적인 것으로 나타났다. 결론적으로 감광성 CNT 페이스트를 이용하여 사진식각 공정으로 형성된 전극이 표면 처리를 통해 위험 화합물 탐지 센서로서 용이하게 작동할 것으로 기대되었다.

감사의 글

NCMRC 연구센터의 연구 자문 및 도움에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] Z. Bielecki, J. Janucki, A. Kawalec, J. Mikołajczyk, N. Pałka, M. Pasternak, T. Pustelny, T. Stacewicz, and J. Wojtas, *Metrol. Meas. Syst.*, **19**, 3 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.2478/v10178-012-0001-3>]
- [2] J. Wang, *Electroanalysis*, **19**, 415 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1002/elan.200603748>]
- [3] D. R. Shankaran, K. V. Gobi, T. Sakai, K. Matsumoto, K. Toko, and N. Miura, *Biosens. Bioelectron.*, **20**, 1750 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2004.06.044>]
- [4] C. Mullen, A. Irwin, B. V. Pond, D. L. Huestis, M. J. Coggiola, and H. Oser, *Anal. Chem.*, **78**, 3807 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1021/ac060190h>]
- [5] R. G. Ewing, D. A. Atkinson, G. A. Eiceman, and G. J. Ewing, *Talanta*, **54**, 515 (2001). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(00\)00565-8](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(00)00565-8)]
- [6] L. A. Pinnaduwege, A. Gehl, D. L. Hedden, G. Muralidharan, T. Thundat, R. T. Lareau, T. Sulchek, L. Manning, B. Rogers, M. Jones, and J. D. Adams, *Nature*, **425**, 474 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1038/425474a>]
- [7] L. A. Pinnaduwege, D. Yi, F. Tian, T. Thundat, and R. T. Lareau, *Langmuir*, **20**, 2690 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1021/la035658f>]
- [8] W. Ruan, Z. Wang, Y. Li, and L. Liu, *J. Microelectromech. Syst.*, **22**, 152 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2012.2220526>]
- [9] Y. Liu, C. L. Chen, Y. Zhang, S. R. Sonkusale, M. L. Wang, and M. R. Dokmeci, *IEEE Sens. J.*, **13**, 202 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2211007>]
- [10] M. H. Esfe, W. M. Yan, M. Akbari, A. Karimipour, and M. Hassani, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, **68**, 248 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.09.001>]
- [11] J. F. Fennell Jr, S. F. Liu, J. M. Azzarelli, J. G. Weis, S. Rochat, K. A. Mirica, J. B. Ravnsbæk, and T. M. Swager, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **55**, 1266 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201505308>]

[1] Z. Bielecki, J. Janucki, A. Kawalec, J. Mikołajczyk, N. Pałka, M. Pasternak, T. Pustelny, T. Stacewicz, and J. Wojtas,