

EDA 매개법을 이용한 고세장비 구리나노와이어 합성법의 개선

Improvement of Synthesis Process for High Aspect Ratio Copper Nanowires via EDA-Mediated Method

Duong Thanh Hung¹, 김현철^{1,#}
Duong Thanh Hung¹ and Hyun Chul Kim^{1,#}

¹ 고안전 차량 핵심기술연구소, 인제대학교 기계자동차공학부 (Department of Mechanical & Automotive Engineering, Inje University)
Corresponding Author / E-mail: mechkhc@inje.ac.kr, TEL: +82-55-320-3988
ORCID: 0000-0003-0637-7872

KEYWORDS: Copper nanowires (구리나노와이어), Synthesis (합성), Transparent electrode (투명전극), Aspect ratio (세장비)

There are two well-known synthetic approaches for copper nanowires (CuNWs): ethylenediamine (EDA)-mediated synthesis and alkylamine-mediated synthesis. The alkylamine-mediated synthesis produces very high aspect ratio nanowires but requires an autoclave for high-pressure environments, and a long reaction time, which normally is above 12 hours. The EDA-mediated synthesis can be carried out under normal conditions and requires 30 min. The CuNWs produced by this method have an average aspect ratio lower than 1000 and are produced in a lower yield. In this paper, the researchers present a modified EDA-mediated synthesis to improve the yield and reduce the synthesis time. When NaOH and Cu(NO₃)₂ were replaced with KOH and CuCl₂, respectively and the reaction temperature was kept at room temperature, the synthesis time was shortened to 15 min. Moreover, the aspect ratio of the as-synthesized Cu NWs increased to 650 and the synthesis yields raised from 17.73% to 80.16%.

Manuscript received: February 22, 2017 / Revised: August 11, 2017 / Accepted: August 28, 2017

1. 서론

현재 투명전극으로써 가장 널리 사용되고 있는 물질은 인듐 주석 산화물(Indium Tin Oxide, ITO)이고, 여기서 인듐은 반도체제조, 디스플레이 코팅, 전기도금, 태양전지 등 전자산업에 폭넓게 이용되고 있지만, 인듐 자체가 희토류 금속으로 매장량이 적어 값이 비쌀 뿐만 아니라 70% 이상이 중국에 매장되어 있어 꾸준한 가격 상승이 우려된다.¹ 또한, ITO는 고온, 고진공을 요구하는 스퍼터와 같은 공정에 의해 투명전극이 제작되므로 공정가격이 높고, 공정속도가 낮을 뿐 아니라 세라믹물질이 가지고 있는 내재적인 취성으로 유연기판에 적용하기에는 문제점을 가지고 있다.^{2,3} 이에 따라 그래핀,^{4,5} 탄소나노튜브,^{6,7} 금속 나노와이어가⁸⁻¹⁰ ITO를 대체하기 위한 재료로서 많은 연구가 진행되어 왔다. 그 중에서도 특히 금속 나노와이어를 이용한 투명전극은 높은 투과도, 낮은 저항 그리고 우수한 유연성을 가지고 있기에 ITO를 대체하기

위한 재료로서 많은 각광을 받고 있다. 금속나노와이어는 대량 합성이 가능하고 용액공정으로 투명전극이 제작 가능하기 때문에 공정가격이 저렴하다. 또한, ITO와 달리 플렉서블 어플리케이션에 적용이 가능하다는 큰 장점이 있다. 최근에 은 나노와이어에 대한 많은 연구들이 수행되었고 50-100 nm, 길이 100 μ m의 은 나노와이어를 합성하여 상용으로 사용되어지는 ITO의 성능에 유사한 면저항 20 Ω /sq, 투과도 90%(550 nm파장)를 달성하였다.¹¹

그러나 은 나노와이어는 두 가지의 큰 문제를 가지고 있다. 첫 번째는 은 자체가 고가의 금속이라는 점이다. 두 번째로 합성된 나노와이어의 지름이 상대적으로 커서 강하게 빛을 산란시켜 투과도에 비해 흐릿하게 보이는 경향이 있고, 특히 디스플레이에 적용 시에 문제를 가지게 된다. 이런 문제점으로 은과 전도도가 유사하면서 20배 가격이 저렴한 구리에 대한 관심이 커지게 되었다. 구리나노와이어는 20 nm이하의 지름으로 합성이 가능하여 은 나노와이어에 비해 빛의 산란을 크게 줄일 수 있을 뿐 아니라, 투명

전극으로 사용 시 좋은 광학적, 전기적 특성을 가지고 있다.¹² 이러한 장점 때문에 구리나노와이어를 적용하여 다양한 광전기 장치에 활용 가능한 투명전극 제작에 많은 연구들이 수행되어왔다.

구리나노와이어를 이용 한 전극 제작을 위해서는 기판 위에 무작위적으로 분산된 구조가 전하의 연결 통로를 만들어 줘야 한다. 일부 연구에서 실험적으로 전도도는 나노와이어의 길이 및 분산 밀도의 증가에 따라 향상되지만, 투과도는 반대로 감소한다는 것을 확인하였다. 또한, 분산된 나노와이어들 사이 접점에서의 저항이 전도도를 감소시키는 가장 큰 요인 중의 하나로 알려져 있다.¹³ 따라서 나노와이어들 사이의 접점 수를 줄이고 퍼콜레이션 네트워크(Percolation Network)를 형성해 전도도를 확보하면서 투과도를 향상시키기 위해서는 고세장비의 나노와이어의 합성이 필수적이다.¹⁴ 이에 대한 연구가 최근에 수행되었으며, 나노와이어의 길이, 지름 및 분산 밀도에 따른 면저항이 시뮬레이션을 통해 예측되었고, 실험 결과와 비교 되었다.¹⁵ 결과로 고세장비의 나노와이어가 적은 수의 나노와이어로부터 높은 전도도를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이뿐 아니라 저항의 증가에 가장 큰 역할을 하는 접점을 줄일 수 있을 뿐 아니라 나노와이어사이의 간격이 넓어져 빛의 투과도를 향상시키는 결과를 가져온다. 따라서 고세장비의 나노와이어의 합성은 무엇보다도 중요한 선결 과제라고 하겠다.

구리나노와이어의 합성은 예전부터 많은 연구들이 수행되어 왔지만, 용액공정을 이용한 합성법은 캡핑 물질로 Ethylenediamine (EDA, $C_2H_8N_2$)을 사용한 액상환원법과, 다른 Alkylamine을 사용한 수열합성법으로 나눌 수 있다. 수열합성법은 보통 고온, 고압이 필요하며 합성에 최소 10시간 이상이 소요된다.^{16,17} 이 방법으로 합성된 나노와이어들은 30-100 nm 지름에 수 밀리미터까지 길이를 성장시킬 수 있다. 반면, EDA 매개법은 1시간 이내의 빠른 시간에 특별한 장비 없이 상온에서 수행 될 수 있다.^{18,19} 그러나 이 방법에 의해 합성된 나노와이어의 세장비는 수열합성법에 낮은 것이 보통이다. 2014년도에 Ye¹⁹ 등은 기존 EDA 방법을 수정해서 단지 30분정도 소요되고, 평균 세장비(L/D)가 1860에 달하는 개선된 합성법을 제안하였다. 하지만, 이 개선된 방법은 신속히 고세장비의 나노와이어를 합성할 수는 있지만, 수득률이 12%로 매우 낮은 문제점을 안고 있다. 이를 개선하고자 Cu_2O 를 씨드(Seed)파티클로 사용하는 방법을²⁰ 제안하여 55%로 수득률을 향상시켰으나, 합성 과정이 복잡하고 시간이 오래 걸리는 단점을 안게 되었다.

본 연구에서는 기존 EDA 방법을 개선하여 기존 방법들이 가지고 있던 문제점들을 해결할 수 있는 단순하면서도 빠르게 고세장비 구리나노와이어를 높은 수득률로 합성하는 방법을 제안한다. 기존 방법의 NaOH와 $Cu(NO_3)_2$ 를 KOH와 $CuCl_2$ 로 각각 교체함으로 대기 상태에서 단지 15분만에 구리나노와이어를 얻을 수 있었고 평균 세장비도 기존보다 훨씬 향상된 650을 얻었다. 뿐만 아니라, 잘 분산된 구리나노와이어의 질량을 측정함으로써 기존의 EDA 방법에 비해 수득률이 명확히 향상된 것을 확인할 수 있었다.

2. 본론

2.1 금속나노와이어 합성

나노와이어를 제조하는 방법으로는 기공이 형성된 틀에 금속을 증발시켜 기공을 메우는 방법, 화학적 합성법 등이 있다.^{21,22} 그 중 용액 공정을 이용한 화학적 합성법은 공정의 제어조건에 따라서 제조되는 구리나노와이어의 형태를 조절할 수 있을 뿐 아니라 대량생산 할 수 있는 장점이 있다. Chang 등이 처음으로 용액공정을 이용한 구리나노와이어 합성법을 개발하였으며,¹⁸ 이 방법은 EDA를 캡핑물질로 사용하고 질산구리를 구리이온 제공자, 하이드로진을 환원제로 사용하여 구리나노와이어를 합성하는 방법이다. 상온에서 쉽고 빠르게 합성 할 수 있는 장점이 있어, 이후 많은 후속 연구자들에 의해 좀더 높은 종횡비와 수율을 갖는 합성법들이 지속적으로 개발되고 있으며, 나노와이어가 잘 자랄 수 있는 최적의 씨드(Seed)파티클을 만드는 단계가 중요하다. 본 연구에서는 이를 위해 기존의 구리이온 제공자를 $CuCl_2$ 로 대체하고 최적의 씨드파티클을 만들 수 있는 환경을 조성하기 위해 NaOH 대신 KOH를 이용하여 개선된 합성법을 제안하고자 한다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 KOH, 반응 온도 그리고 $CuCl_2$ 의 역할을 명확히 이해하기 위해서 3개의 실험으로 분리하여 실험을 진행하였다. 또한 모든 실험은 Ye¹⁹ 등이 제안한 금속 합성법과 비슷한 조건하에서 수행하였다.

첫번째로, KOH의 역할을 알아보기 위해 금속 합성법에서 사용한 NaOH와 같은 농도(15 M)의 KOH를 사용하여 합성을 진행하였다. 구리나노와이어의 합성을 위해서 KOH(20 mL, 15 M), $Cu(NO_3)_2$ (0.1 M, 1 mL)와 EDA(0.15 mL)를 플라스크에 넣고 60°C를 유지하면서 3분동안 700 rpm으로 교반 한 후, N_2H_4 (35%, 10.5 μ L)를 첨가하면서 2분 더 교반을 진행하였다. 그 후 완전한 붉은 케이크(Reddish Cake)가 생성될 때까지 계속해서 온도를 유지한다. 다음으로는 합성된 화합물을 50 mL 튜브에 옮기고 용매에 잘 분산될 수 있도록 3 wt% PVP와 산화 방지를 위해 5 wt% DEHA를 함유한 10 mL수용액으로 여러 번 세척을 하고 보관하였다.

두번째로, 질산구리가 구리이온 제공자로 최적인지 확인하기 위해 다른 조건은 동일하게 하고 $CuCl_2$ 로 대체하여 합성을 진행하였다. 다음으로는 구리나노와이어 합성 시 온도의 영향을 알아보기 위해 반응물, 캡핑 물질 및 환원제를 넣고 60°C로 유지하는 대신 상온(25 °C)에서 합성이 일어나도록 하였다.

마지막으로, 위에서 언급한 실험조건들을 조합하여 NaOH와 $Cu(NO_3)_2$ 를 KOH와 $CuCl_2$ 로 대체하고 상온에서 반응이 일어나도록 조절하여 합성을 진행하였다.

실험방법에 따라 생성되는 붉은 구리나노와이어 케이크의 두께가 달라지는 것을 확인 하였으며, 수득률을 확인하기 위해 구리나노와이어의 질량 분석을 위한 실험도 진행하였다. 측정의 정확도를 위해서 모든 실험에서 부피를 두배로 하였으며, 완전한 구리

나노와이어 케이크가 생성된 후 초순수(Deionized Water)로 3번 세척을 하고, 원하지 않은 유기물질들 및 Cu_2O 를 제거하기 위해 10 mL HCl 6% 용액을 첨가하였다. 마지막으로 HCl 잔여물, CuCl_2 및 원하지 않은 물질 등을 배제한 순수 구리나노와이어만 얻기 위해 4000 rpm으로 10분동안 원심분리 후 초순수를 이용해 세척하였다. 순수 구리나노와이어의 정확한 질량을 확인하기 위해 0.2 μm 기공을 갖는 PTFE 막(Membrane)을 이용하여 진공여과(Vacuum Filtration)한 후 PTFE막의 전, 후 질량을 측정함으로써 합성에서 얻어진 순수 구리나노와이어의 질량을 확인하였다.

2.3 결과 및 토의

Table 1에 간단한 실험 결과들을 기술하였다. Fig. 1은 실험에 따라 생성된 구리나노와이어 케이크를 보여준다.

2.3.1 KOH의 영향

본 실험을 통해 KOH가 구리나노와이어 합성반응에서 촉매제로서의 역할을 한다는 것을 알았다. 이전 많은 연구들에서 pH를 조절하는 물질은 합성과정에서 첫 번째 용액 형성을 위해 매우 중요하다는 것이 증명되었다.²³ 그러나, NaOH의 경우 농도가 15 M에 가까워지면 완전히 용해되지 않고 용액 속에 남아 구리나노와이어의 성장 보다는 단순 구리 입자를 만드는 역할을 하게 된다. 반면 KOH 입자들은 물에 완전히 용해되어 15 M KOH를 용액을 형성하게 된다. 이를 통해 구리나노와이어 합성을 위한 반응시간을 그 동안 발표된 EDA 매개 합성법들과 비교했을 때 절반 수준인 10-15분으로 획기적으로 줄일 수 있다. 그럼에도 불구하고, SEM 측정 결과를 보면 합성된 구리나노와이어들의 길이는 평균 33.39 μm 로 짧고, 지름은 85.14 nm로 큰 편이다. 또한 형태가 Fig. 2(a)에서 보는 것처럼 일정하지 않다. 그러므로 본 연구에서 KOH가 구리나노와이어 합성 반응을 촉진시키기 위한 촉매제로서의 역할을 할 뿐 바람직한 형태의 합성에는 부정적인 영향을 미친다고 생각할 수 있다.

2.3.2 CuCl_2 의 영향

EDA 매개 합성법에서 구리의 제공자로 주로 활용된 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 를 CuCl_2 로 대체하고 KOH와 함께 사용했을 때, 합성된 구리나노와이어의 질량과 길이의 뚜렷한 개선을 확인할 수 있었다. 구리이온의 농도가 충분하지 않다면, N_2H_4 에 의해 구리나노와이어의 합성보다는 구리나노입자가 생성될 가능성이 더 높다.²³ 결과적으로 구리나노와이어의 합성을 위해서는 환원 될 구리 이온의 농도가

충분히 높아야 함은 분명한 사실이면서 매우 중요하지만, 그 동안 EDA매개 합성법에서 CuCl_2 를 구리이온의 제공자로 활용한 연구가 이루어지지 않아 왔다. 본 연구에서는 구리이온의 제공자로 CuCl_2 를 사용함으로써 구리나노와이어의 길이를 증가시킬 뿐 아니라 수득률을 향상시킬 수 있다는 것을 확인하였다. Fig. 3(b)에서 보는 것처럼 60°C에서 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 를 CuCl_2 로 대체했을 때 길이는 33.39 μm 에서 36.89 μm 로 약간 증가하였지만, 수득률은 17.73%에서 59.38%로 급격한 향상을 보였다. 구리나노와이어의 지름은 85.14 nm에서 75.80 nm로 감소하여 전체적인 세장비는 증가함을 확인하였다. 상온(25°C)의 반응에서는 구리나노와이어의 지름이 75.8 nm에서 71.43 nm로 소폭 감소하였지만, 길이가 36.89 μm 에서 46.71 μm 로 상당한 변화가 있었으며, 결과적으로 보다 높은 세장비의 구리나노와이어를 얻을 수 있었다. 수득률에서는 59.38%에서 80.16%로 눈에 띄는 증가를 이뤘으며, 이를 통해 CuCl_2 는 충분한 구리 이온 제공자로의 역할을 함으로써 수득률에서 상당한 증가 효과를 가져다 준다는 것을 알 수 있다.

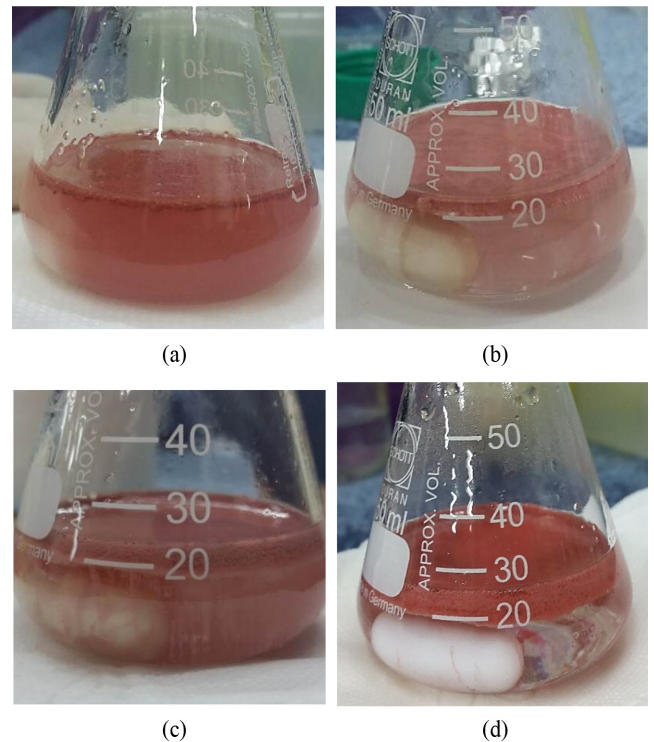


Fig. 1 Mixtures at final stage of 4 experiments : (a) KOH test, (b) CuCl_2 test, (c) Room temperature test, (d) Combination test

Table 1 Experiment result

Experiment	Time to make a perfect cake (minute)	Average length (μm)	Average diameter (nm)	L/D	Yield (%)
KOH test	10	33.39 $\pm$ 9.1	85.14 $\pm$ 25.25	397	17.73
CuCl_2 test	10	36.89 $\pm$ 10.72	75.80 $\pm$ 25.09	487	59.38
RT test	15	43.31 $\pm$ 13.91	72.0 $\pm$ 20.18	601	43.98
Combination test	15	46.71 $\pm$ 10.67	71.43 $\pm$ 17.02	654	80.16

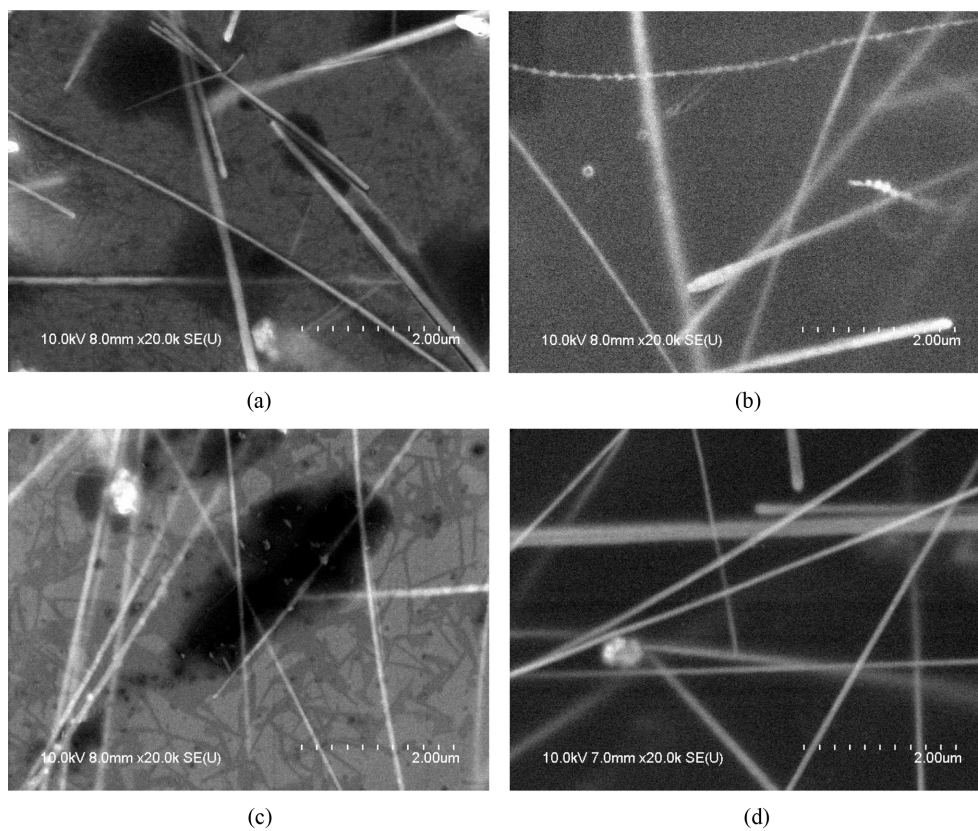


Fig. 2 SEM image of (a) KOH test, (b) CuCl_2 test, (c) Room temperature test, (d) Combination test

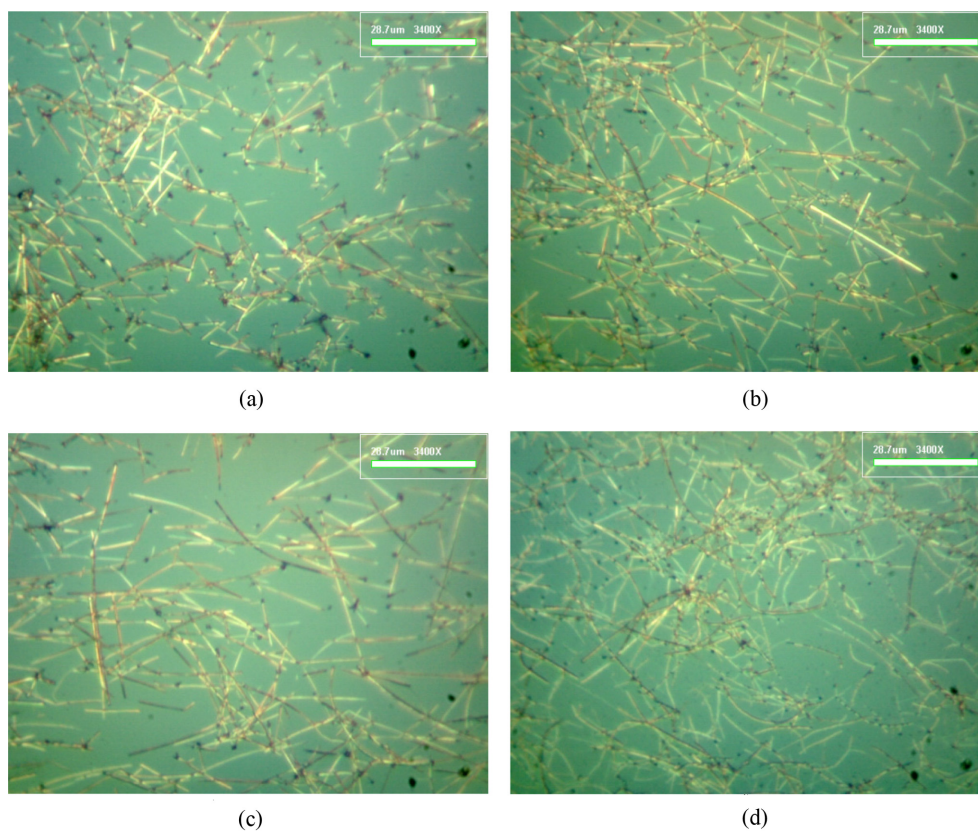


Fig. 3 Images from video microscope of (a) KOH test, (b) CuCl_2 test, (c) Room temperature test, (d) Combination test

2.3.3 온도의 영향

합성 시 온도 또한 수득률 및 세장비를 개선하는데 중요한 역할을 한다. Table 1의 결과로부터 반응온도를 상온으로 낮췄을 때 구리나노와이어의 길이 및 수득률의 증가를 볼 수 있다. 이전 연구들에서 열은 나노와이어의 형성을 가속시킨다는 것이 알려졌다지만, 너무 많은 열은 상대적으로 짧고 두꺼운 구리나노와이어를 생성시키게 된다.²⁴ 그러므로, 본 실험에서는 처음 반응 물질들을 5분의 짧은 시간 동안 60°C로 유지시킨 경우 보다 길고 두께가 얇은 나노와이어가 생성될 것이라는 가정을 가지고 상온에서 합성 반응이 일어나도록 하였다. 결과는 기대한 것처럼 구리나노와이어의 길이는 33.39 μm 에서 43.31 μm 로 증가하였으며, 지름은 85.14 nm에서 72 nm로 감소하여 기존보다 고세장비의 나노와이어를 얻을 수 있었다. 뿐만 아니라 수득률은 17.73%에서 43.98%로 개선이 이루어졌으며, 전체적으로 상온에서의 반응이 길이와 수득률을 향상시키고, 지름을 감소시킨다는 것을 확인할 수 있었다.

2.3.4 KOH, CuCl_2 및 온도 조합의 영향

앞에서 언급한 내용들을 조합하여 기존 방법의 NaOH, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 를 KOH, CuCl_2 로 대체하여 반응을 촉진 시키고, 구리 이온의 농도를 증가시켰다. 또한 상온에서 반응이 일어나도록 함으로써 가장 높은 수율 및 고세장비의 구리나노와이어를 얻을 수 있었다. Fig. 1(d)에서 보는 것처럼 가장 밀집된 구리나노와이어 케이크가 용액 위에 떠있고, 아래 용액이 가장 맑은 것을 볼 수 있다. 전체 합성 시간은 15분 미만이었으며, 나노와이어의 길이, 지름은 각각 46.71 μm , 71.43 nm로 기존에 비해 고세장비의 구리나노와이어를 얻었다. 수득률도 80.16%로 증가하여 생산성 향상 및 저비용 구리나노와이어 합성이 가능함을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 짧은 시간에 저비용으로 고세장비(L/D-650)의 구리나노와이어를 합성하는 개선된 EDA 매개 합성법을 개발하였다. 제안된 방법을 이용해 고세장비의 구리나노와이어를 80.16%의 높은 수득률로 합성하였다. KOH가 반응을 빠르게 촉진시키는 촉매제의 역할을 하며, CuCl_2 는 구리 이온의 제공자로 수득률을 크게 향상시키는데 기여하고, 상온에서의 반응은 구리나노와이어의 세장비에 크게 영향을 미침을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2017년도 정부(교육부, 미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 및 나노·소재기술 개발 사업임(Nos. 2017R1D1A1B03029074, 2017R1C15014970, 170626010).

REFERENCES

1. Rathmell, A. R., Bergin, S. M., Hua, Y. L., Li, Z. Y., and Wiley, B. J., "The Growth Mechanism of Copper Nanowires and their Properties in Flexible, Transparent Conducting Films," *Advanced Materials*, Vol. 22, No. 32, pp. 3558-3563, 2010.
2. Hecht, D. S., Hu, L., and Irvin, G., "Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures," *Advanced Materials*, Vol. 23, No. 13, pp. 1482-1513, 2011.
3. Gordon, R. G., "Criteria for Choosing Transparent Conductors," *MRS Bulletin*, Vol. 25, No. 8, pp. 52-57, 2000.
4. Sagar, R. U. R., Zhang, X., Xiong, C., and Yu, Y., "Semiconducting Amorphous Carbon Thin Films for Transparent Conducting Electrodes," *Carbon*, Vol. 76, pp. 64-70, 2014.
5. Kim, K. S., Zhao, Y., Jang, H., Lee, S. Y., Kim, J. M., et al., "Large-Scale Pattern Growth of Graphene Films for Stretchable Transparent Electrodes," *Nature*, Vol. 457, No. 7230, pp. 706-710, 2009.
6. Ding, Z., Zhu, Y., Branford-White, C., Sun, K., Um-I-Zahra, S., et al., "Self-Assembled Transparent Conductive Composite Films of Carboxylated Multi-Walled Carbon Nanotubes/Poly (Vinyl Alcohol) Electrospun Nanofiber Mats," *Materials Letters*, Vol. 128, pp. 310-313, 2014.
7. McCarthy, M., Liu, B., Donoghue, E., Kravchenko, I., Kim, D., et al., "Low-Voltage, Low-Power, Organic Light-Emitting Transistors for Active Matrix Displays," *Science*, Vol. 332, No. 6029, pp. 570-573, 2011.
8. De, S., Higgins, T. M., Lyons, P. E., Doherty, E. M., Nirmalraj, P. N., et al., "Silver Nanowire Networks as Flexible, Transparent, Conducting Films: Extremely High DC to Optical Conductivity Ratios," *ACS Nano*, Vol. 3, No. 7, pp. 1767-1774, 2009.
9. Lee, D., Paeng, D., Park, H. K., and Grigoropoulos, C. P., "Vacuum-Free, Maskless Patterning of Ni Electrodes by Laser Reductive Sintering of Ni Nanoparticle Ink and Its Application to Transparent Conductors," *ACS Nano*, Vol. 8, No. 10, pp. 9807-9814, 2014.
10. Ge, Z. and Wu, S.-T., "Nanowire Grid Polarizer for Energy Efficient and Wide-View Liquid Crystal Displays," *Applied Physics Letters*, Vol. 93, No. 12, Paper No. 121104, 2008.
11. Song, M., You, D. S., Lim, K., Park, S., Jung, S., et al., "Highly Efficient and Bendable Organic Solar Cells with Solution Processed Silver Nanowire Electrodes," *Advanced Functional Materials*, Vol. 23, No. 34, pp. 4177-4184, 2013.
12. Cui, F., Yu, Y., Dou, L., Sun, J., Yang, Q., et al., "Synthesis of Ultrathin Copper Nanowires Using Tris (Trimethylsilyl) Silane for High-Performance and Low-Haze Transparent Conductors," *Nano Letters*, Vol. 15, No. 11, pp. 7610-7615, 2015.
13. Han, S., Hong, S., Ham, J., Yeo, J., Lee, J., et al., "Fast Plasmonic Laser Nanowelding for a Cu Nanowire Percolation

- Network for Flexible Transparent Conductors and Stretchable Electronics,” *Advanced Materials*, Vol. 26, No. 33, pp. 5808-5814, 2014.
14. Li, J. and Zhang, S.-L., “Finite-Size Scaling in Stick Percolation,” *Physical Review E*, Vol. 80, No. 4, Paper No. 040104, 2009.
 15. Bergin, S. M., Chen, Y.-H., Rathmell, A. R., Charbonneau, P., Li, Z.-Y., et al., “The Effect of Nanowire Length and Diameter on the Properties of Transparent, Conducting Nanowire Films,” *Nanoscale*, Vol. 4, No. 6, pp. 1996-2004, 2012.
 16. Shi, Y., Li, H., Chen, L., and Huang, X., “Obtaining Ultra-Long Copper Nanowires via a Hydrothermal Process,” *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 6, No. 7, pp. 761-765, 2005.
 17. Li, S., Chen, Y., Huang, L., and Pan, D., “Large-Scale Synthesis of Well-Dispersed Copper Nanowires in an Electric Pressure Cooker and their Application in Transparent and Conductive Networks,” *Inorganic Chemistry*, Vol. 53, No. 9, pp. 4440-4444, 2014.
 18. Chang, Y., Lye, M. L., and Zeng, H. C., “Large-Scale Synthesis of High-Quality Ultralong Copper Nanowires,” *Langmuir*, Vol. 21, No. 9, pp. 3746-3748, 2005.
 19. Ye, S., Rathmell, A. R., Stewart, I. E., Ha, Y.-C., Wilson, A. R., et al., “A Rapid Synthesis of High Aspect Ratio Copper Nanowires for High-Performance Transparent Conducting Films,” *Chemical Communications*, Vol. 50, No. 20, pp. 2562-2564, 2014.
 20. Ye, S., Rathmell, A. R., Ha, Y. C., Wilson, A. R., and Wiley, B. J., “The Role of Cuprous Oxide Seeds in the One-Pot and Seeded Syntheses of Copper Nanowires,” *Small*, Vol. 10, No. 9, pp. 1771-1778, 2014.
 21. Choi, H., and Park, S.-H., “Seedless Growth of Free-Standing Copper Nanowires by Chemical Vapor Deposition,” *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 126, No. 20, pp. 6248-6249, 2004.
 22. Haase, D., Hampel, S., Leonhardt, A., Thomas, J., Mattern, N., et al., “Facile One-Step-Synthesis of Carbon Wrapped Copper Nanowires By Thermal Decomposition of Copper (II)-Acetylacetonate,” *Surface and Coatings Technology*, Vol. 201, No. 22, pp. 9184-9188, 2007.
 23. Wiley, B. and Rathmell, A., “Compositions and Methods for Growing Copper Nanowires,” *US Patents*, 20130008690 A1, 2010.
 24. Rathmell, A. R. and Wiley, B. J., “The Synthesis and Coating of Long, Thin Copper Nanowires to Make Flexible, Transparent Conducting Films on Plastic Substrates,” *Advanced Materials*, Vol. 23, No. 41, pp. 4798-4803, 2011.