



산화물 나노섬유에서의 나노입자 성장거동

글 _ 변준혁, 김상섭
인하대학교

1. 서론

세라믹 소재에서 기존의 세라믹 벌크(bulk) 및 박막형태의 재료와는 다른 특이한 물리적, 화학적 성질을 가지고 있는 1차원 구조(one-dimensional structure)의 나노재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 1차원 구조의 나노재료는 벌크나 박막 형태의 재료와는 매우 상이한 화학적, 물리적 성질을 가지고 있는 것으로 알려져 있으며, 이러한 성질은 나노재료의 구조, 형상, 크기 등에 큰 영향을 받는다고 알려져 있다. 여러 가지 형태의 1차원 나노재료들을 합성하기 위해 솔-겔법, 전기방사법(electrospinning), 화학 기상 증착법, 수열합성법 등이 사용되고 있으며, 이중 전기방사법은 다양한 1차원 구조의 나노섬유형태의 재료들을 비교적 쉽고 경제적으로 합성할 수 있는 방법으로 알려져 있다.^{1,2)}

전기방사법으로 합성된 나노섬유의 경우 개별 나노섬유(individual nanofiber)가 미세한 입자, 즉 나노입자(nanograin)로 구성되어 있음이 알려져 있으며, 이러한 나노입자의 크기 조절이 전체 나노섬유의 물성을 좌우할 가능성이 크다. 따라서 본 소고에서는 나노섬유를 구성하고 있는 나노입자의 성장과 조절에 관련된 최근 연구 결과들을 중점적으로 기술하고자 한다.

2. 본론

2.1. 전기방사를 이용한 나노섬유 합성

전기방사 장치는 점성이 있는 용액을 밀어낼 수 있는 syringe 펌프, 고전압 발생장치, 그리고 나노섬유를 뽑아내기 위한 바늘, 그리고 방사된 나노섬유가 모이는 콜렉터(collector)로 구성되며, 전기방사 장치의 실제 예를 Fig. 1에 나타내었다.

전기방사는 콜렉터와 주사기 바늘 사이에 고전압이 인가되면, 점성이 있는 액체가 나노섬유의 형태로 방사되는 현상이다. 이를 더 자세히 기술하면, 바늘 끝에 매달려 있는 점성용액에 전기장이 인가되면 방울의 표면에 쌍극자 배향이 공기 층과 용액의 계면에 유도되고 이 쌍극자 반발로 표면장력과 반대되는 정전기력이 발생한다. 이 때 방울형태의 용액은 테일러 콘(Taylor cone)이라고 불리는 원추형 모양의 형태로 늘어나게 되고 임계 전기장 이상의 세기에서 정전기력이 표면장력보다 커지면서 점성용액의 제트(jet)가 테일러 콘 모양의 용액 끝에서

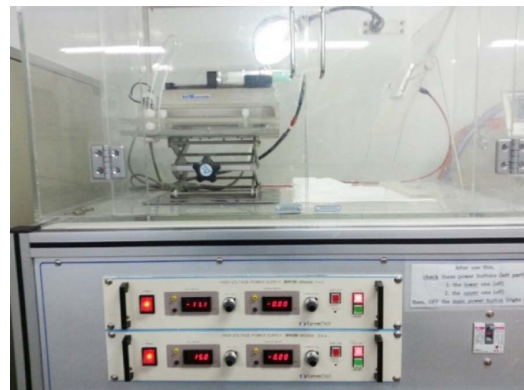


Fig. 1. A photograph of a real electrospinning equipment.

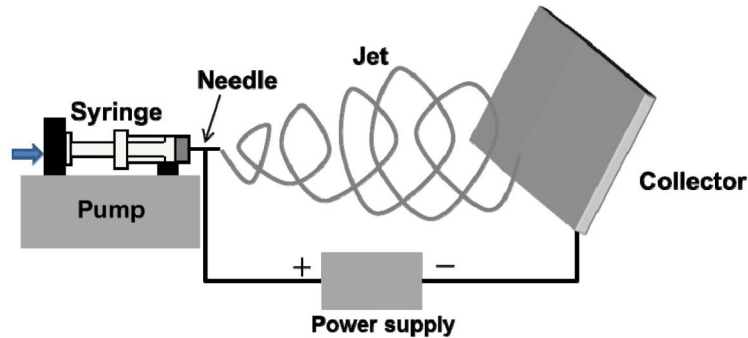


Fig. 2. A schematic of the electrospinning process.

컬렉터로 방사된다. 여기서 점도가 낮은 용액의 경우에는 나노섬유로 방사되는 것이 아니라 미세한 방울로 분무되며, 이를 전기분무(electrospray)라고 칭한다. Fig. 2에 전기방사 공정의 개략을 나타내었다.

전기방사 공정에서의 주된 변수들은 인가전압, 컬렉터와 바늘사이의 거리, 바늘크기, 용액의 점도, 용액농도, 온도 등을 들 수 있으며, 이러한 변수들의 조절에 따라 나노섬유의 형태나 직경이 달라지게 된다. 용액의 점성을 제어하기 위해 사용하는 고분자 물질로는 polyvinylpyrrolidone (PVP), polyvinyl acetate (PVAc), polyvinyl alcohol (PVA), polyacrylonitrile (PAN), polyethylene oxide (PEO) 등이 주로 사용되고 있다.

방사된 나노섬유는 비행과정 중에 대부분의 용매가 휘발되지만 여전히 소량의 용매가 존재하는 고분자/전구체 물질의 혼합체로 되어 있다. 최종 원하는 상(phase)를 얻

기 위해서는 적절한 조건의 열처리 과정이 필요하며, 열처리 과정 중에 잔존하는 용매, 고분자 물질의 제거(burn-out) 그리고 전구체 물질의 상변화가 발생하게 되며, 열처리 온도 및 분위기를 조절함으로써 최종 목표상을 가진 나노섬유가 합성되게 된다.

열처리 후 개별 나노섬유는 나노입자로 구성됨이 알려져 있으며, ZnO 나노섬유의 경우를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)에서 알 수 있듯이 직경 약 20nm의 작은 입자로 나노섬유가 형성되어 있음을 명확히 알 수 있으며, Fig. 3(b)의 투과전자현미경 관찰결과에서 나노입자의 존재를 다시 확인할 수 있다. 이와 같은 나노입자의 존재는 대부분의 산화물 나노섬유에서 발견되고 있으며, 다결정(polycrystalline) 나노섬유의 물성을 좌우하는 가장 중요한 미세구조 인자로 여겨지고 있다. 본 소고에서는 이러한 나노입자의 성장과 조절에 관련된 선행 연구 결과들을 소

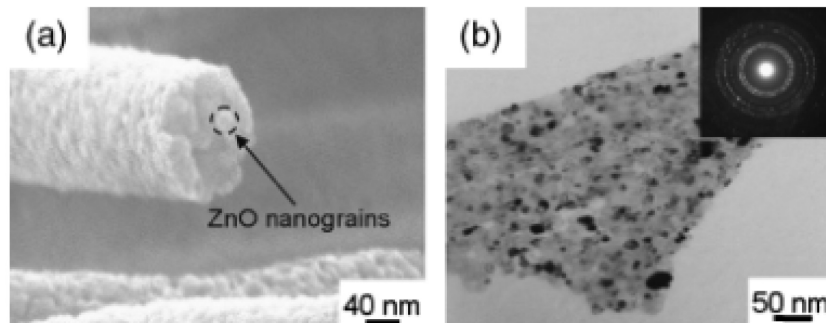


Fig. 3. (a) Cross-section field-emission scanning electron microscopy image. (b) Bright-field transmission electron microscopy image taken from an individual ZnO nanofiber synthesized by electrospinning and subsequent calcination at 600°C for 6 h in O₂ atmosphere. The inset in (b) shows a selected area electron diffractions pattern, indicating a polycrystalline nature of the ZnO nanofiber.³⁾



개하고, 향후 산화물 나노섬유를 이용한 여러 가지 응용에서 나노입자의 조절에 필요한 기본적인 지식을 제공하고자 한다.

2.2. 벌크재료에서의 입자성장

소결이란 금속 또는 비금속의 분말체가 녹는점 이하의 온도에서의 열처리 과정에 의해 조립화(coarsening) 또는 치밀화(densification)를 이루는 과정을 말한다.⁴⁾ 소결이 일어나게 되는 주된 구동력(driving force)은 물질의 표면 에너지 감소이다. 물질은 가능하면 그 표면적을 줄여서 낮은 에너지 상태가 되고자 하는 경향이 있는데, 충분히 높은 온도가 주어지면 상대적으로 높은 에너지 상태에서 낮은 에너지 상태로 바뀌고 동시에, 표면 에너지를 줄이기 위해서 입자끼리 서로 붙으면서 성장하는 소결 현상이 일어나고 결국 낮은 에너지의 안정한 상태가 된다. 소결 과정에서 발생하는 결정립 성장은 열처리 과정 동안 일어나는 원자들의 이동으로 인해 발생하게 된다. 이를 더 자세히 설명하기 위해, 원자 확산의 모식도를 Fig. 4에 나타내었다.^{4,6)}

소결 과정 중, 결정입계 영역에 있는 원자 혹은 이온들이 새로운 위치의 원자간 거리로 확산하고 궁극적으로 입자성장을 유발시킨다. 즉, 오목한 입계를 가지는 결정립과 볼록한 입계를 가지는 결정립이 있을 때, 오목한 입계에서의 원자보다 볼록한 입계에 존재하는 원자의 화학 포텐셜이 크기 때문에 결정입계에서 원자나 이온의 확산은 볼록한 쪽에서 오목한 쪽으로 더 잘 일어나게 된다. 따라서 볼록한 입계를 가지는 결정립은 소멸하게 되고, 오목한 입계를 가지는 결정립은 성장하게 된다.⁵⁾ 일반적으로 소결 과정 중 초기 입자보다 대략 10~100배의 결정립 성장이 발생하게 된다.⁴⁾ 입자성장을 좌우하는 주요 변수로는 원료분말의 입도 및 분포, 순도, 형상, 성형압, 밀도, 소결 온도, 소결 시간, 소결 분위기, 승온 및 냉각 속도 등이 있다.^{4,6)}

2.3. 나노섬유에서의 입자성장

전기방사법으로 얻어진 as-spun 나노섬유는 폴리머와 전구체 물질들이 혼합되어 있는 상태이다. 하소(calcina-

tion)과정, 즉 폴리머의 제거 및 전구체 물질의 상형성 등이 나타나는 과정을 거치게 되면서 나노입자로 이루어진 산화물 나노섬유가 얻어진다. 나노섬유를 구성하고 있는 나노입자들은 하소 과정에서의 온도와 시간에 따라 입자의 크기가 다르게 발달하게 되며, 벌크재료의 소결거동에서 발생하는 입성장 거동을 대비하여 조사하면 나노입자의 성장메커니즘 및 입성장 활성화 에너지를 유추할 수 있다.

소결과정에서 발생하는 입자성장은 다음 식(1)을 만족하는 것으로 알려져 있다.

$$D^m - D_0^m = k t \quad (1)$$

여기서 D 는 시간 t 만큼 하소한 후의 평균 입자크기, D_0 는 $t=0$ 일때의 평균 입자크기, m 은 입성장지수(grain growth exponent), 그리고 k 는 온도에 의존하는 상수이다. 입성장지수 m 은 주로 입자성장 메커니즘에 의존하는 값이다. 입자성장 메커니즘에 따른 입성장지수 m 값을 Table 1에 정리하였다. m 값이 2에서 4정도의 범위인 것을 알 수 있으며 대부분의 세라믹 재료에서는 m 값이 3정도를 보이고 있다. 순수 단상에서의 입자성장에서는 m 값이 일반적으로 2정도인 반면, 용질이나 공공의 존재하에서 일어나는 입자성장에서의 m 값은 3-4정도이다.^{3, 7-11)} 이러한 m 값을 통해 입자성장이 어떠한 메커니즘으로 발생하는가를 유추할 수 있다. m 을 구하기 위해서는 식 (1)에서 $D \gg D_0$ 라고 가정할 때, 식 (1)은 $\log(D) = 1/m \log(k) + 1/m \log(t)$ 의 형태로 나타낼 수 있으며, $\log(D)$ 와 $\log(t)$ 의 그래프에서 그 기울기로부터 m 을 구할 수 있다.^{3, 7-11)}

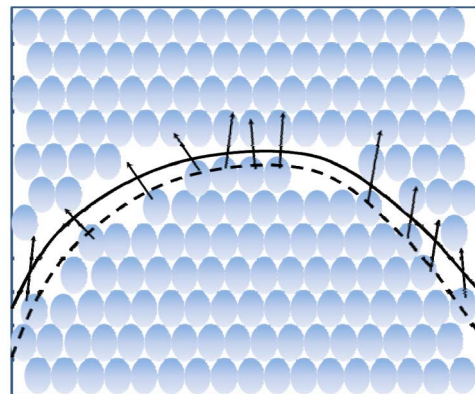


Fig. 4. A classical picture of a grain boundary movement.⁵⁾



입자성장 과정은 일련의 열처리 과정을 통해 이루어지게 된다. 나노섬유를 형성하고 있는 나노입자들은 열역학적으로 더욱 안정한 상태를 유지하기 위해 입자성장이 발생하게 되며, 이는 일련의 확산과정이라고 할 수 있다. 재료에서 원자들의 확산과정은 온도에 의해 지배되며, 식 (2)와 같은 Arrhenius 식을 따른다.

$$D^m - D_0^m = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) t \quad (2)$$

여기서 k_0 는 pre-exponential factor, E_a 는 입자성장에서의 활성화 에너지, R 은 기체상수(gas constant), T 는 Kelvin 온도이다. 위 식에서 $\log(D^m/t)$ 와 $1/T$ 의 그래프에서 기울기로부터 E_a 를 도출할 수 있다.⁷⁻¹¹⁾

2.3.1. ZnO 나노섬유에서의 입자성장

Fig. 5(a) - Fig. 5(f)는 전기방사법으로 합성된 ZnO 나노섬유를 600°C에서 각각 0.5, 2, 4, 6 및 8시간 동안 하소한 경우의 미세구조이다. 하소시간이 길어질수록 입자들의 크기가 증가한다. 이러한 하소시간에 따른 나노입자의 크기 변화를 $\log(D)$ vs $\log(t)$ 관계식으로 표시하면 Fig. 5(g)를 얻을 수 있다. 이 그래프의 기울기로부터 ZnO 나노섬유에서의 나노입자의 입성장지수 m 을 구할 수 있고, 그 값은 3.18이다. Table 1에 정리된 m 값에 따른 입자성장 메커니즘을 고려하면, ZnO 나노섬유에서의 나노입자들은 하소과정, 즉 열처리 과정중에 주로 격자 확산(lattice diffusion)에 의해 입자성장이 이루어진다고

Table 1. Grain Growth Exponent m in Eq. (1) $D^m - D_0^m = kt$ for Various Mechanisms⁵⁾

Mechanism	Exponent m
Pure control	
Surface diffusion	4
Lattice diffusion	3
Vapor transport(vapor pressure, $p = \text{constant}$)	
Vapor transport	2
Boundary control	
Pure system	
System containing second-phase particles	2
Coalescence of second phase by lattice diffusion	3
Coalescence of second phase by grain boundary diffusion	4
Solution of second phase	1
Diffusion through continuous second phase	
Doped system	
Solute drag(low solubility)	3
Solute drag(high solubility)	2

판단할 수 있다.

한편, ZnO 나노입자 성장에 필요한 활성화 에너지를 구하기 위해 온도에 따른 입자성장 거동을 조사하였다. Fig. 6(a) - Fig. 6(e)는 6시간 동안 각각 300, 400, 500 그리고 600°C의 온도에서 하소한 ZnO 나노섬유에서 나노입자의 미세구조이다. 온도에 따른 입자크기를 Fig. 6(f)와 같은 그래프로 나타내어 ZnO 나노섬유의 나노입자 성장에 필요한 활성화 에너지를 구하면 13.126 kJ/mol임을 알 수 있다.

Table 2에는 여러 가지 세라믹 벌크재료에서의 입성장 거동과 나노섬유에서의 나노입자 성장거동을 정리하였

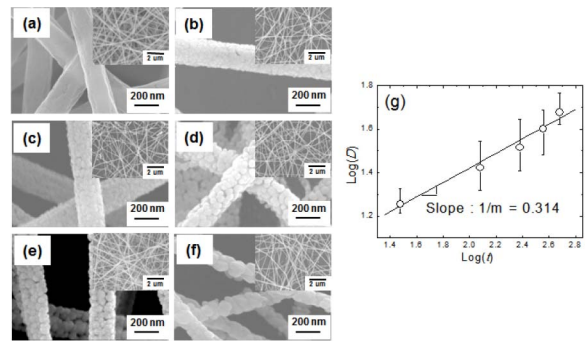


Fig. 5. Field-emission scanning electron microscopy(FE-SEM) images of ZnO nanofibers calcined at 600°C in O_2 atmosphere for various calcination times; (a) as-spun, (b) 0.5h, (c) 2h, (d) 4h, (e) 6h, and (f) 8h. The insets are their corresponding low-magnified FE-SEM images. (g) Plot of $\log(D)$ vs $\log(t)$.

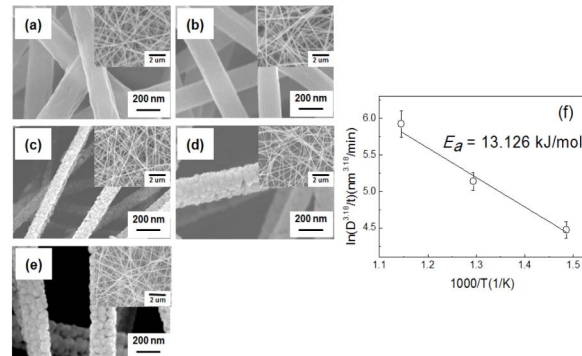


Fig. 6. Field-emission scanning electron microscopy(FE-SEM) images of ZnO nanofibers calcined at various temperatures for 6 h in O_2 atmosphere; (a) as-spun, (b) 300°C, (c) 400°C, (d) 500°C, and (e) 600°C. The insets are their corresponding low-magnified FE-SEM images. (f) Plot of $\ln(D)$ vs $1/T$.



Table 2. Comparison of Activation Energy and Grain Growth Exponent for Bulk Materials and Nanofibers

Oxide materials	Activation energy E_a (kJ/mol)	Grain growth exponent (m)	Growth mechanism	Reference
SnO ₂ nanofiber	28.28	2.85	Lattice diffusion	8
ZnO nanofiber	33.48	3.18	Lattice diffusion	3
NiO nanofiber	10.94 ; 137.58	9.1 ; 2.04	-	9
CuO nanofiber	18	2.22	Vapor transport	10
Co ₃ O ₄ nanofiber	113.36	3.23	Lattice diffusion	11
SnO ₂ powder	44±2	0.291	Boundary control	12
ZnO bulk	199	3	-	13
NiO bulk	131.7±41.1	6	Boundary control	14
CuO bulk	60.69	-	-	15
Co ₃ O ₄ nanopowder	37±7	-	Surface diffusion	16
Co ₃ O ₄ micropowder	113±8	-	Surface diffusion	16

다. Table 2에서 알 수 있듯이 벌크 ZnO에서의 입성장을 위한 활성화 에너지는 199 kJ/mol로서, 나노섬유에서의 나노입자 성장을 위한 활성화 에너지보다 매우 큰 값을 알 수 있다. 이는 나노섬유에서 존재하는 나노입자의 크기가 매우 작고 따라서 입계의 굴곡(curvature)이 크며, 이로부터 입계에서 화학포텐셜의 차이가 매우 크게 되어 작은 에너지 공급에도 나노입자의 성장이 매우 빠르게 진행될 수 있다는 것을 의미한다.³⁾

2.3.2. SnO₂ 나노섬유에서의 입자성장

Fig. 7(a) - Fig. 7(d)은 SnO₂ 나노섬유를 600°C의 온도에서 각각 4, 10, 12 그리고 24시간 동안 하소한 나노섬유의 미세구조이다. ZnO 나노섬유의 경우와 동일하게 하소시간이 길어질수록 나노입자들의 크기가 증가한다는 것을 알 수 있다. Fig. 7(e)의 그래프로부터 SnO₂ 나노섬유의 나노입자 입성장지수 m 의 값이 2.85임을 알 수 있다. Table 1로부터 SnO₂ 나노입자의 입성장은 주로 격자확산에 의해 이루어진다고 판단할 수 있다.

Fig. 8(a) - Fig. 8(d)은 6시간동안 각각 500, 600, 700 그리고 900°C에서 하소한 경우의 SnO₂ 나노섬유의 미세구조이다. ZnO 나노섬유와 마찬가지로의 접근방법을 사용하면 SnO₂ 나노섬유에서 나노입자의 입성장을 위한 활성화 에너지는 28.28 kJ/mol로 평가할 수 있다. Table 2로부터 SnO₂ 나노섬유의 나노입자 성장을 위한 활성화 에너지도 벌크소재의 경우에 비해 매우 작으며, 매우 엄

밀한 온도제어가 원하는 크기의 나노입자를 얻기 위한 필수적인 조건임을 알 수 있다.⁸⁾

2.3.3. NiO 및 기타 나노섬유에서의 입자성장

NiO 나노섬유의 경우 다른 물질들과 비교하여 특이한 입성장거동을 보인다. Fig. 9와 Fig. 10에서 나타낸 바와 같이 두 개의 입성장지수와 활성화 에너지값들을 가진다. NiO의 경우 입자성장 초기의 입성장지수 m 의 값은 9.09이다.⁹⁾ 이 값은 기존의 세라믹 벌크재료에서의 입자성장에서 보이는 입성장지수 값 2에서 4의 범위를 훨씬 초과하는 값이다. 하지만 나노크기 재료에서의 입자성장은 종종 특이한 거동을 보여주는 경우가 있으며, 실제로 Fe 나노결정 같은 경우 3에서 11 정도의 입자성장지수 값을 보인다고 보고된 바 있다.¹⁷⁾ 결론적으로 NiO 나노섬유의 나노입자 성장은 입성장 초기에는 표면확산(surface dif-

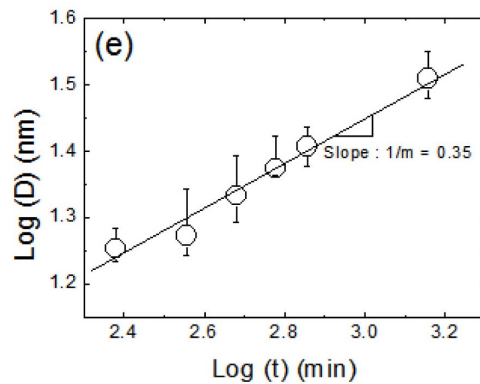
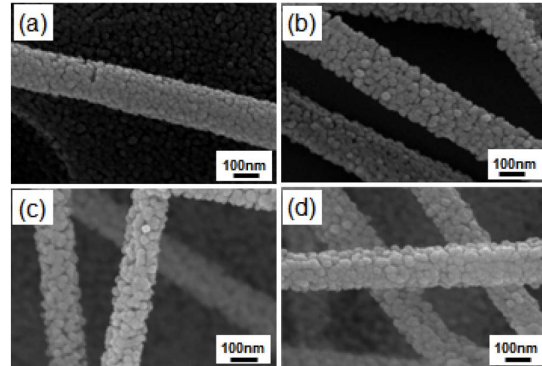


Fig. 7. FE-SEM images of the SnO₂ nanofibers calcined at 600°C in O₂ for various calcination times; (a) 4h, (b) 10h, (c) 12h, and (d) 24h. (e) Plot of log(D) vs log(t).⁸⁾

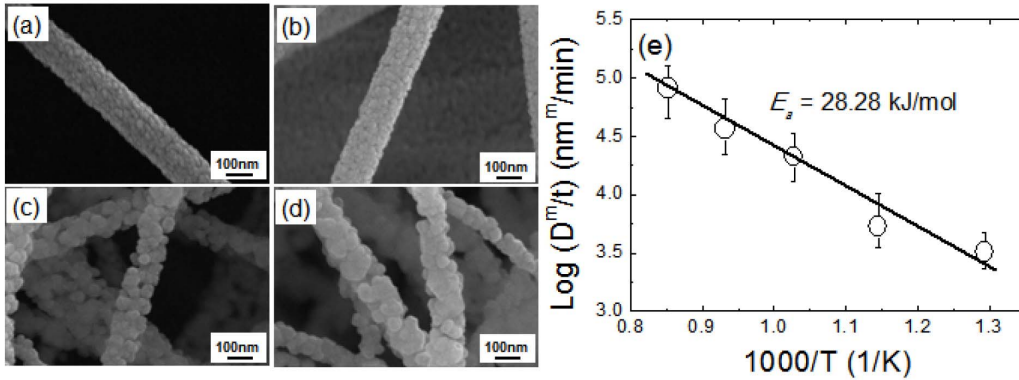


Fig. 8. FE-SEM images of the SnO₂ nanofibers calcined at various temperatures for 6 h in O₂ atmosphere; (a) 500°C, (b) 600°C, (c) 700°C, and (d) 900°C. (e) Plot of ln(D) vs 1/T.⁸⁾

fusion) 기구에 의한 입자성장이 우세하게 일어난다. 하지만 하소 시간이 점점 더 길어지고 입자가 약 30nm 이상까지 성장되었을 때는 입성장지수 값이 2.04로 변하게 되고, 그 시점부터 대부분의 입성장이 증발이동(vapor transport)에 의해 발생한다 것을 알 수 있다.⁹⁾

활성화 에너지 측면을 고려해 보면 500°C에서 600°C 범위에서 나노입자의 입성장을 위한 활성화 에너지는 10.94 kJ/mol이다. 이 범위에서의 활성화 에너지는 NiO 벌크재료의 활성화 에너지(131.7±41.1kJ/mol)보다 상당히 작다.¹⁴⁾ 하지만 1050°C 정도의 높은 온도로 올라가면 활성화 에너지가 137.58 kJ/mol까지 증가하는데, 이 값은 NiO 벌크에서의 값과 거의 유사하다. 특이한 사항은 NiO 나노섬유에서는 하소 온도가 1000°C 이상이 되었을 때, NiO 나노섬유가 bamboo-like grain이라고 칭할 수 있는 입자들로 구성됨도 보고된바 있다.⁹⁾ 이와 같이 나노입자가 충분히 성장하게 되면 나노크기 효과가 소멸되고, 벌크에서의 소결거동에서 발생하는 입자성장과 유사한 입성장 거동 양상을 보인다고 판단할 수 있다.⁹⁾

CuO, Co₃O₄ 나노섬유에서의 나노입성장 거동에 관련된 결과들을 Table 2에 정리하였다. 세라믹 벌크재료와 나노섬유에서의 입성장지수 m과 그에 따른 입자성장 메커니즘 그리고 활성화 에너지를 비교하면, 벌크보다 나노섬유에서의 입성장 활성화 에너지가 대체적으로 훨씬 낮음을 알 수 있다. 이는 나노입자들의 원자들이 더 높은 화학적 포텐셜을 가지게 되고 하소온도 및 하소시간에

매우 민감하게 입자성장이 발생할 수 있다는 것을 의미한다.

2.3.5. 나노섬유 가스 센서에서의 나노입자 크기와 가스감응관계

나노입자 크기에 따른 가스 감응 특성을 알아보기 위해 SnO₂ 나노섬유를 합성한 다음 600°C에서 4 및 24시간 하소하여 합성된 SnO₂ 나노섬유 가스 센서의 CO 가스 감응도를 Fig. 11에 비교하였다. Fig. 11(a)에 CO 가스 농도에 따른 센서의 dynamic resistance curve를 나타내었으며, 이로부터 센서의 CO 감응특성을 Fig. 11(b)에 정리하였다. 하소시간이 짧은 나노섬유에서 더 높은 CO 감응성이 얻어졌다. 하소시간이 짧을 경우 SnO₂ 나노입자의 크기가 하소시간이 긴 경우에 비하여 작게 되고, 이러한 작은 나노입자로 구성된 SnO₂ 나노섬유의 경우 가스 감응성이 향상될 수 있다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 12는 ZnO 나노섬유 기반 가스센서의 CO 가스 감응특성을 나타낸 것이다. SnO₂ 나노섬유의 경우와 동일하게 4 및 24시간 하소하여 합성된 ZnO 나노섬유를 이용하여 제작된 센서이다. ZnO 나노섬유 센서의 경우, SnO₂ 나노섬유 센서와 반대로, 24시간 하소된 나노섬유, 즉 나노입자의 크기가 큰 나노섬유로 제작된 센서의 감응특성이 더 우수하다.

이상에서 언급한 두 가지 사례를 보건데 나노섬유로 제작된 센서의 경우 나노입자의 크기에 대한 매우 엄밀

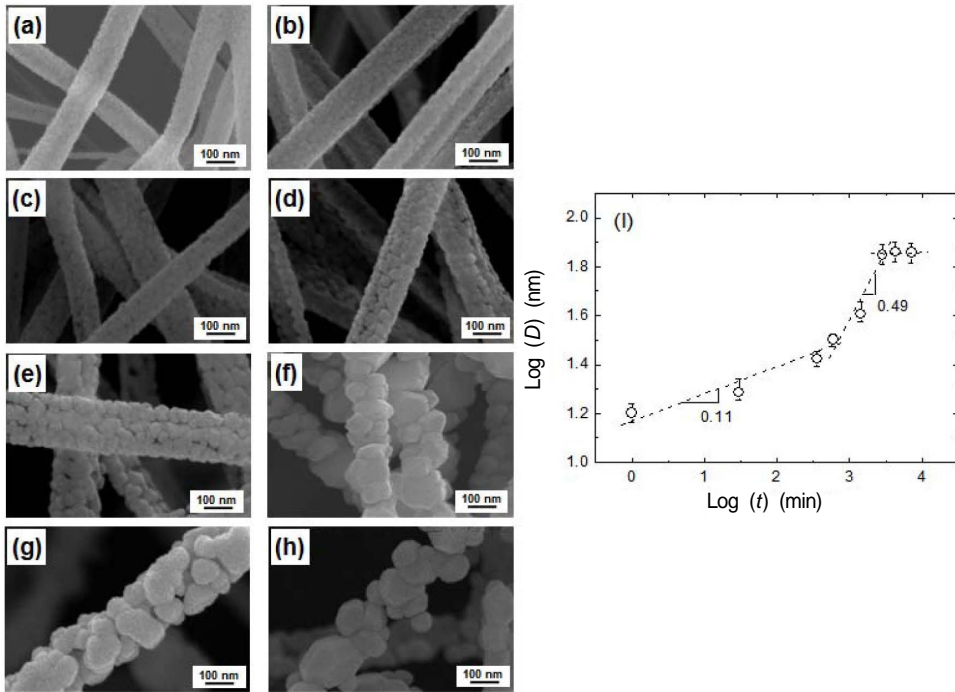


Fig. 9. Field-emission scanning electron microscopy(FE-SEM) images of NiO nanofibers calcined at 600°C in O₂ atmosphere for various calcination times; (a) 1min, (b) 0.5h, (c) 6h, (d) 10h, (e) 24h, (f) 48h, (g) 72h, and (h) 120h. (I) Plot of log(D) vs log(t).⁹⁾

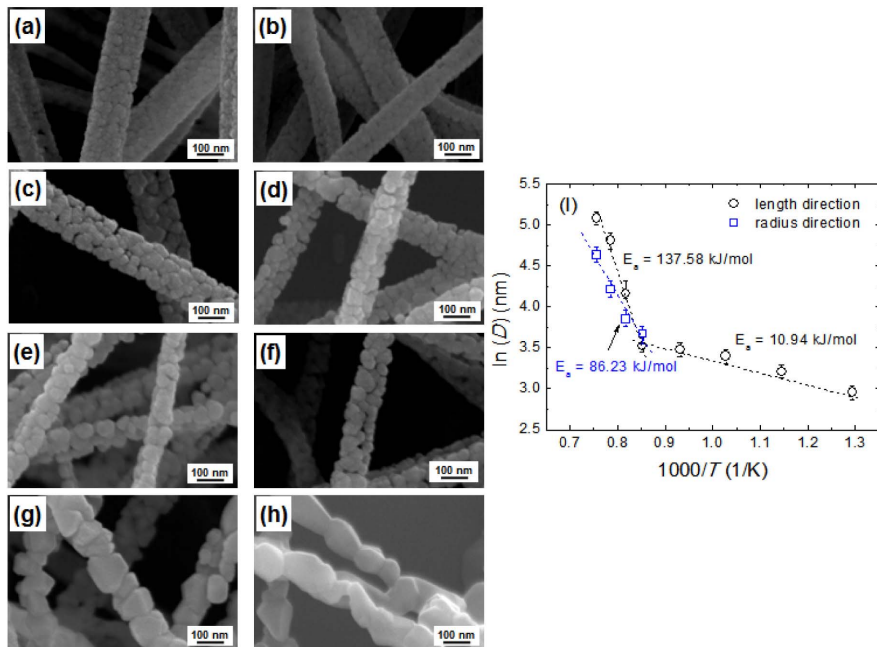


Fig. 10. Field-emission scanning electron microscopy(FE-SEM) images of NiO nanofibers calcined at various temperatures for 6 h in O₂ atmosphere; (a) 500°C, (b) 600°C, (c) 700°C, (d) 800°C, (e) 900°C, (f) 950°C, (g) 1000°C, and (h) 1050°C. (I) Plot of ln(D) vs 1/T.⁹⁾

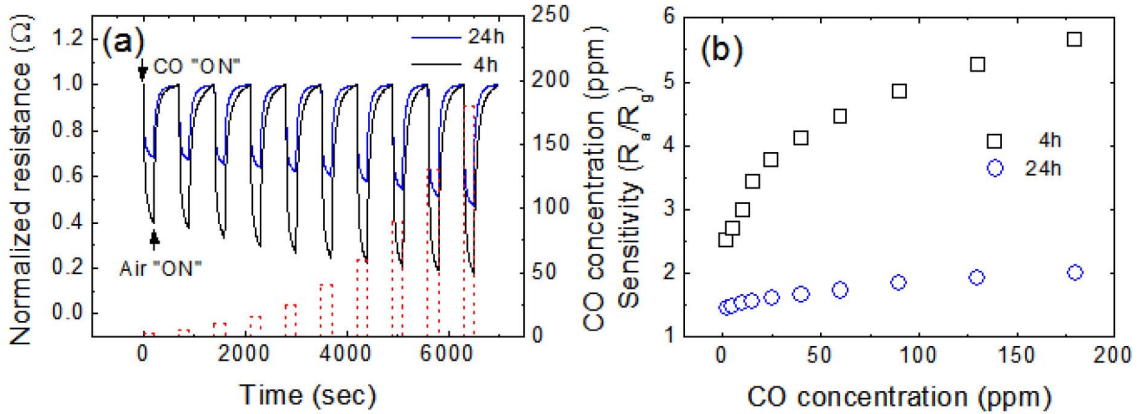


Fig. 11. (a) Dynamic responses of the sensors fabricated with SnO₂ nanofibers calcined for 4 h and 24 h to CO. (b) Comparison of the sensitivity of the sensors.⁸⁾

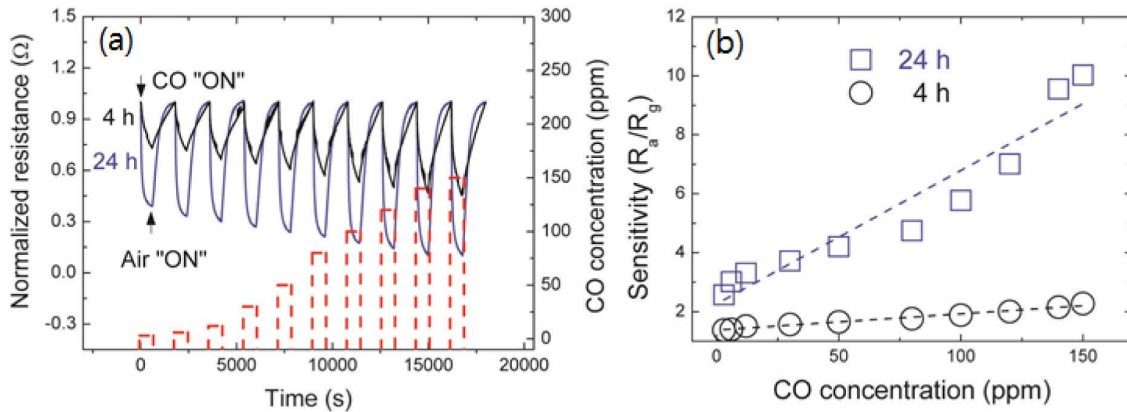


Fig. 12. (a) Dynamic responses of the sensors fabricated with ZnO nanofibers calcined for 4 h and 24 h to CO. (b) Comparison of the sensitivity of the sensors.¹⁸⁾

한 조절이 우수한 가스 감응성을 얻기 위한 매우 중요한 실험인자임을 알 수 있다.¹⁸⁻²¹⁾

3. 결론

본 소고에서는 전기방사법으로 합성된 산화물 나노섬유의 나노입자 성장에 대한 기본적인 사항들을 소개하였다. 나노섬유에서의 입자 성장과 벌크에서의 입자 성장과 어떤 차이점이 있는지 기술하였고, 센서 분야에서 나노입자 크기의 중요성을 소개하였다.

나노섬유는 하소과정에서 나노입자가 형성하게 되고, 나노입자의 크기가 나노섬유의 전체 물성을 좌우하는 중요한 인자일 가능성이 크다. 나노입자의 크기를 조절하

기 위해서는 하소온도 및 하소시간을 적절히 선택하여야 하며, 특히 벌크재료에 비하여 매우 작은 활성화 에너지를 가지고 있는 까닭에 하소온도 및 하소시간에 대한 매우 엄밀한 조절이 요구된다고 할 수 있다.

참고문헌

1. K. M. Sawicka and P. Gouma, "Electrospun Composite Nanofibers for Functional Applications," *J. Nanopart. Res.*, **8** 769-81 (2006).
2. S. V. T. Kuchibhatla, A. S. Karakoti, D. Bera, and S. Seal, "One Dimensional Nanostructured Materials," *Prog. Mater. Sci.*, **52** 699-913 (2007).
3. J. Y. Park and S. S. Kim, "Growth of Nanograins in Electrospun ZnO Nanofibers," *J. Am. Ceram. Soc.*, **92** 1691-1964 (2009).



4. J. K. Lee, "The Sintering of Ceramics (*in Korean*)"; pp. 52-103, Bando Publishing Company, Seoul, (1991).
5. M. N. Rahaman, "Ceramic Processing and Sintering"; pp. 447-95, DEKKER, New York, (1995).
6. K. Akio, "Foundations and Applications of Ceramic Materials(*in Korean*)"; pp. 18-20, YAS Media, Seoul, (2003).
7. J. Y. Park, S. W. Choi, K. Asokan, and S. S. Kim, "Growth of Nanograins in TiO₂ Nanofibers Synthesized by Electrospinning," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **10** 3604-08 (2010).
8. J. Y. Park, K. Asokan, S. W. Choi, and S. S. Kim, "Growth Kinetics of Nanograins in SnO₂ Fibers and Size Dependent Sensing Properties," *Sens. Actuators, B*, **152** 254-60 (2011).
9. S. W. Choi, J. Y. Park, and S. S. Kim, "Growth Behavior of Nanograins in NiO Fibers," *Mater. Chem. Phys.*, **127** 16-20 (2011).
10. S. W. Choi, J. Y. Park, and S. S. Kim, "Growth Behavior and Sensing Properties of Nanograins in CuO Nanofibers," *Chem. Eng. J.*, **172** 550-56 (2011).
11. S. W. Choi, J. Y. Park, and S. S. Kim, "Growth Kinetics of Nanograins in Co₃O₄ Fibers," *Ceram. Int.*, **37** 427-30 (2011).
12. J. K. L. Lai, C. H. Shek, and G. M. Lin, "Grain Growth Kinetics of Nanocrystalline SnO₂ for Long-Term Isothermal Annealing," *Chem. Eng. J.*, **49** 441-46 (2003).
13. J. Han, P. Q. Mantas, and A. M. R. Senos, "Grain Growth in Mn-Doped ZnO," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **20** 2753-58 (2000).
14. R. W. Jackson, J. P. Leonard, F. S. Pittit, and G. H. Meier, "The Effect of Minor Elements on the Growth and Electrical Properties of NiO on Ni," *Solid State Ion.*, **179** 2111-20 (2008).
15. J. Y. Kim, J. A. Rodriguez, J. C. Hanson, A. I. Frenke, and P. L. Lee, "Reduction of CuO and Cu₂O with H₂: H Embedding and Kinetic Effects in the Formation of Suboxides," *J. Am. Chem. Soc.*, **125** 10684-92 (2003).
16. Y. Yeh, I-H. Liu, and P. Shen, "Onset Coarsening/Coalescence of Cobalt Oxides in the Form of Nanoplates Versus Equi-axed Micron Particles," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **30** 677-88 (2010).
17. T.R. Malow and C.C. Koch, "Grain Growth in Nanocrystalline Iron Prepared by Mechanical Attrition," *Acta Mater.*, **45** 2177-86 (1997).
18. S. W. Choi, J. Y. Park, and S. S. Kim, "Dependence of Gas Sensing Properties in ZnO Nanofibers on Size and Crystallinity of Nanograins," *J. Mater. Res.*, **26** 1662-65 (2011).
19. Z. M. Seeley, A. Bandyopadhyay, and S. Bose, "Influence of Crystallinity on CO Gas Sensing for TiO₂ Films," *Mater. Sci. Eng.*, **164** 38-43 (2009).
20. J-P. Ahn, J. H. Kim, J. K. Park, and M. Y. Huh, "Microstructure and Gas Sensing Properties of Thick Film Sensor Using Nanophase SnO₂ Powder," *Sens. Actuators, B*, **99** 18-24 (2004).
21. Y. Chen, J. Zhu, X. Zhu, G. Ma, Z. Liu, and N. Min, "Gas Sensing Property and Microstructure of SnO₂ Nanocrystalline Prepared by Solid State Reaction /Thermal Oxidation," *Mater. Sci. Eng.*, **99** 52-55 (2003).

●● 변준혁



- 2012년 한국해양대학교 기계소재공학 학사
- 2012년-현재 인하대학교 대학원 신소재공학부 석사과정

●● 김상섭



- 1987년 서울대학교 금속공학과 학사
- 1990년 포항공과대학교 신소재공학과 공학석사
- 1994년 포항공과대학교 신소재공학과 공학박사
- 1994년 NIRIM, Japan, Japan-Korea Foundation fellow
- 1995년 한국과학기술연구원 (KIST) 선임연구원
- 1996년-2001년 순천대학교 재료공학과 전임강사 조교수, 부교수
- 2002년-2006년 전남대학교 신소재공학부 부교수 교수
- 2007년-현재 인하대학교 신소재공학부 교수