

스핀 코팅법에 의한 Sb_2S_3 광흡수층 박막의 기계적 거동

장마오¹ · 유다영¹ · 전영선² · 이동윤^{1,2,*}

¹부산대학교 나노융합기술학과

²부산대학교 나노에너지공학과

Mechanical Behavior of Spin-Coated Sb_2S_3 light Absorption Thin Films

Mao Zhang¹, Dayoung Yoo¹, Youngseon Jeon², and Dongyun Lee^{1,2,*}

¹Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

²Department of Nanoenergy Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

Abstract: To measure the mechanical properties of Sb_2S_3 , a two-component compound semiconductor used in the light absorption layer of a solar cell, Sb_2S_3 thin films were formed on FTO glass using the spin coating method. The spin-coated Sb_2S_3 thin films were heat-treated at 200 °C in an Ar atmosphere for up to 1 hour to form a thin film with continuous crystalline structures. A nanoindentation system was used to measure the mechanical properties of the spin-coated Sb_2S_3 thin films, and the phenomena appearing during indentation were analyzed. We used the continuous stiffness measurement (CSM) technique, and Young's modulus and hardness measured with the indentation depth of 250 nm were about 53.1 GPa and 1.43 GPa, respectively. The results were analyzed and compared with literature values, which varied from 40 GPa for the nanowire forms of Sb_2S_3 to 117 GPa, based upon simulation results. Since there are few studies on the mechanical properties of spin-coated Sb_2S_3 thin films, the results of this study are worthwhile. Besides, we observed that the Sb_2S_3 thin film had a little brittleness in the indentation test at higher load, and the microstructure was pushed around the indenter depending on the degree of bonding to the FTO glass substrate. This is a matter to be considered when making flexible devices in the future.

(Received September 23, 2020; Accepted October 20, 2020)

Keywords: binary compounds, Sb_2S_3 , mechanical behavior, nanoindentation

1. 서 론

실리콘 기반 태양전지가 갖는 장점에도 불구하고 재료의 사용량을 줄이고 효율을 높여 제조 단가를 낮춰가는 일은 지속가능성이라는 면에서 아주 중요한 문제이다. 화합물 반도체 기반 박막 태양전지에 관한 연구는 이러한 기조에 매우 적합한 연구로써 Cu-In-Ga-Se/S (CIGS)계 화합물 반도체 태양전지가 가장 선두에 있다고 하겠다. CIGS계 박막 태양전지는 좋은 광전변환 효율을 나타내는데, 현재 화합물 반도체 박막형 태양전지의 최고 효율은 일본의 Solar Frontier사의 Cd free CIS계 태양전지로써 23.35%의 광전

변환 효율을 나타내고 있다 [1]. CIGS계 박막 태양전지의 높은 광전변환 효율에도 불구하고 In 및 Ga를 대체하고자 하는 연구가 대두되면서 Cu-Zn-Sn-Se/S (CZTS)계 태양전지가 많은 주목을 받았다. 그러나, CZTS계 태양전지는 고 효율을 낼 수 있는 화합물의 조성 구간이 국소적인 문제 등으로 인하여 최근에는 2, 3성분계 화합물 반도체에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 또한, 제조 공정에 드는 비용도 지속가능성 측면에서 아주 중요한 요소인데 상대적으로 높은 비용의 진공증착 대신에 경제적이고 대량 생산이 가능한 비진공 공정을 기반으로 한 태양전지 제조에 관한 연구도 많이 이루어지고 있다 [2,3].

Sb_2S_3 화합물의 구성 원소는 지구상에 풍부하게 존재하며 친환경적이기 때문에 지속가능성 면에서 적합한 재료이며, 대기중에서 우수한 안정성을 보이는 것으로 알려져 있다. 밴드갭 에너지는 ~ 1.7 eV 정도인 직접 천이 반도체이

- 장마오: 석사과정, 유다영: 박사과정, 전영선: 학부생, 이동윤: 교수

*Corresponding Author: Dongyun Lee

[Tel: +82-51-510-6120, E-mail: dlee@pusan.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

며 광흡수 계수도 CuInSe_2 화합물 반도체에 상당한 정도로 높아 태양전지 사용에 적합한 재료로서 많은 관심을 끌고 있다 [4,5]. 결정학적으로는 이방성이 큰 반도체 재료로 알려져 있다. 이러한 특성들로 인해 Sb_2S_3 는 태양전지뿐만 아니라 photoanode [6], microwave frequency [7], optical recording [8] 등의 응용 분야에도 매력적인 재료로 간주되어 오래전부터 연구되고 있다 [5]. 또한, 탄소 복합체로 배터리 분야에도 응용이 되고 있다 [9].

박막 태양전지의 또 다른 장점은 유연 소자에 대한 접근성이 크다는 것이다. 박막 기술을 기반으로 한 유연한 태양전지는 대량생산이 가능한 Roll-to-Roll 공정을 통한 제조 비용 절감뿐만 아니라 새로운 응용 분야 개발에 매우 적합한 기술이다. 유연 소자의 개발을 위해서는 유연 소자를 구성하는 박막의 기계적 거동에 대한 분석이 반드시 필요하다. 또한, 박막과 기판의 결합력 등에 대한 분석도 필요할 것이다. 박막의 기계적 거동의 분석을 위해서는 박막의 탄성계수 (Young's modulus를 중심으로 기술함), 박막의 기계적 특성과 기판과의 관계 등의 매개 변수를 알아야 한다 [10].

Sb_2S_3 화합물의 기계적 특성을 연구한 경우는 아주 드문 편이다. H. Koc 등은 [11] 제일원리 시뮬레이션을 통해서 Sb_2S_3 의 탄성계수에 관한 연구를 발표하였고, L. Jasulaneca 등 [5]은 나노와이어를 제조한 후 Young's modulus를 측정하는 연구를 발표하였다. H. Koc 등은 [11] 제일원리 시뮬레이션에서 SIESTA 및 VASP라는 코드를 이용하여 Sb_2S_3 의 기계적 특성에 관해서 연구하였는데, SIESTA 코드 사용을 위해서는 volume-conserving 기술 [12]을 이용하였고, VASP 계산을 위해서는 strain-stress 관계를 이용하였다 [13]. H. Koc 등은 벌크 탄성계수 (B)와 등방성 전단 탄성계수 (G)의 계산을 기반으로 Sb_2S_3 의 경도의 척도로 사용하였으며 [14], 등방성 전단 탄성계수는 두 코드 모두에서 약 47 GPa 정도로 계산되었다. 벌크 탄성계수는 두 코드에서 약간의 차이는 있으나 대략적으로 75~80 GPa로 계산되었으며 이들을 Young's modulus로 환산하면 약 117 GPa 정도라고 보고하였다. 흥미로운 점은 B/G 비율 1.75를 기준으로 재료의 취성 및 연성을 구분하였는데, Sb_2S_3 의 경우는 B/G가 1.58~1.7정도로 취성을 띤다고 보고하였다 [14,15]. L. Jasulaneca 등 [5]은 Sb_2S_3 나노와이어를 anodic aluminium oxide (AAO) 템플릿 기반으로 제조한 후 'in situ electricfield-induced mechanical resonance' 방법과 'static bending' 실험을 통해서 나노와이어의 Young's modulus를 측정하였다. L. Jasulaneca 등

[5]은 Sb_2S_3 나노와이어의 Young's modulus는 나노와이어의 단면적에 많은 영향을 받지만 대략 35~40 GPa 정도로 측정되었다고 보고하였다.

본 연구는 Sb_2S_3 박막을 비진공 기반의 스핀 코팅 방법으로 전구체를 불소 도핑된 SnO_2 (Fluorine-doped Tin Oxide, FTO) 유리 기판에 코팅한 후 결정화를 위하여 열처리하여 제조하였으며 이의 기계적 거동을 나노인텐터를 이용하여 측정하였다. 또한, 본 연구에서 만들어진 박막의 구조를 통해 유연 소자 응용에 적합한 박막의 형태를 제안하고자 한다.

2. 실험방법

Sb_2S_3 박막 제조를 위한 전구체 용액은 안티몬 (III) 염화물 (SbCl_3), 티오요소 (Thiourea, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$) 및 메틸 알코올 (CH_3OH)을 혼합하여 제조 하였다. 스핀 코팅용 겔을 얻기 위해 위의 용액을 Hot-plate에서 80 °C로 교반 하여 적정 점도까지 가열하였다. 스핀 코팅을 이용한 용액 공정으로 제조하는 Sb_2S_3 박막의 미세구조는 Sb와 S의 비율에 영향을 받는데 [16,17] 본 연구에서는 SbCl_3 와 티오요소의 몰비가 1:2인 전구체 용액을 사용하여 제조된 것을 사용하였다. Sb_2S_3 층을 코팅하기 전에 FTO 기판 ($15 \Omega/\text{sq}$)을 아세톤, 메탄올 및 증류수에서 초음파로 세척하였다. 위의 용액을 세척된 FTO 기판에 4500 rpm의 속도로 30초 동안 스핀 코팅 한 다음 튜브 로에 장입 후 Ar 분위기, 200 °C에서 10분 동안 열처리 하였으며 이러한 공정을 4회 반복하여 박막을 제조하였다. 4번째 열처리 과정에서는 열처리 시간을 최대 1시간까지 증가시켰다. 미세구조는 주사전자현미경 및 X선 회절 장치를 이용하여 관찰하였다.

제조된 Sb_2S_3 박막의 기계적 특성은 나노인텐테이션 시스템 (Nanoindenter® G200, KLA Co. USA)을 사용하여 측정하였다. 실험은 표면으로부터 250 nm와 500 nm 깊이로 압입하는 방법으로 진행하였다. 본 연구에서는 continuous stiffness measurement (CSM) 기법을 이용하여 변형률 0.05/s (일정한 인텐테이션 변형, $(dh/dt)/h$ 은 일정한 $(dP/dt)/P$ (h = displacement, t = time, P = load) 실험을 통해서 얻음) 로 유지하면서 Nanoindenter XP™ load cell을 사용하여 측정하였다 [18,19]. Berkovich 다이아몬드 압자를 사용하여 40번 이상의 압입 실험 결과의 평균값으로 기계적 물성을 구하였다 [20]. 주사전자현미경을 이용하여 압입 과정 중에 발생했을 것으로 판단되는 미세구조의 변형에 대하여 관찰하였다.

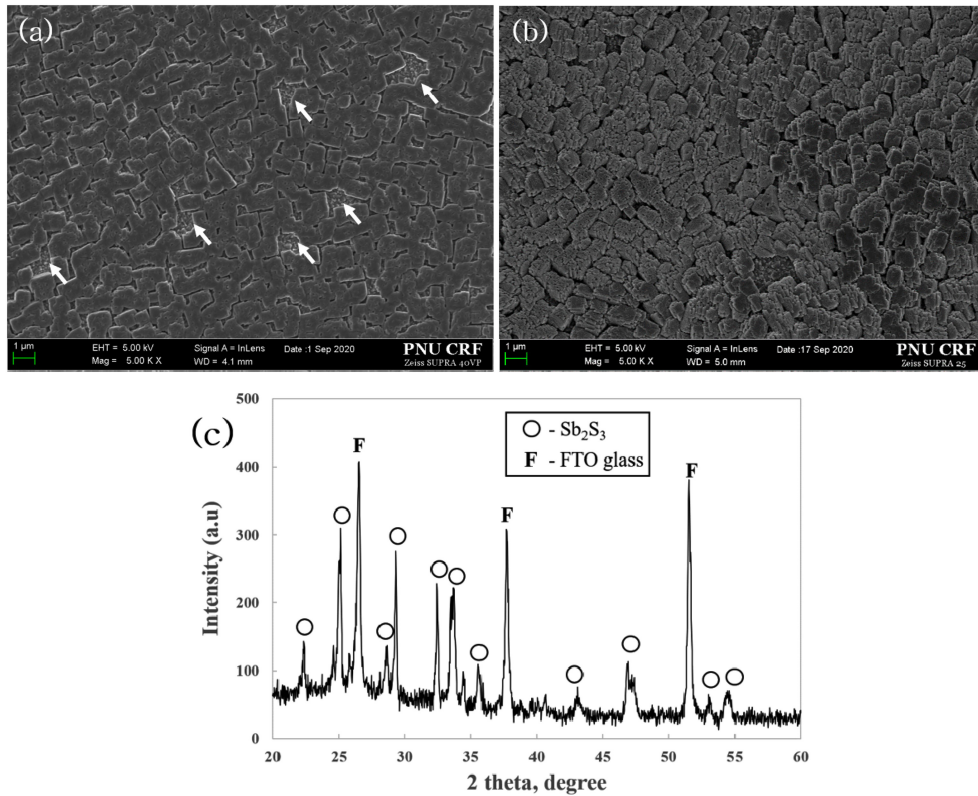


Fig. 1. SEM micrograph and X-ray diffraction pattern of the spin-coated Sb_2S_3 thin film. (a) and (b) Top-views of the spin-coated Sb_2S_3 thin film annealed for 10min and 1hour at $200^\circ C$, respectively; (c) X-ray diffraction results of the spin-coated Sb_2S_3 thin film.

3. 결과 및 고찰

스핀 코팅 후 열처리 공정을 통해 만들어진 Sb_2S_3 박막의 전자현미경 사진을 그림 1에서 볼 수 있다. 스핀 코팅에 의해 제조된 Sb_2S_3 박막은 ‘S’ 원소의 소스로 사용되는 티오요소(Thiourea, CH_4N_2S)의 함량에 따라 박막의 표면 형상(morphology)이 달라지며, 스핀 코팅 후 열처리 조건에 따라서도 박막의 표면 형상이 달라질 수 있다. 그림 1(a)는 $200^\circ C$, 아르곤 분위기에서 10분간 열처리한 시편으로써 열처리 시간이 10분으로 짧았기 때문에 원소들이 확산을 통해서 완전하게 연속된 박막을 이룰 수 있는 충분한 시간이 없어 군데군데에 FTO 유리 기판이 드러나 보인다(하얀색 화살표) [21]. 그림 1(b)는 같은 온도에서 열처리 시간을 1시간으로 늘인 시편의 표면 조직을 보여준다. 10분간 열처리한 시편에 비해 박막의 연속성이 확연히 개선되는 것을 볼 수 있는데, 이는 시간에 따른 원소들의 표면 확산에 의해서 박막이 연속적으로 형성된 것으로 보인다. 그러나, 그림 1(b)에서 보듯이 열처리 시간을 증가시킴으로써 박막의 연속성은 개선되었으나 결정립계는 여전히 명확하게 관찰되는 미세구조를 나타내는데 이러한 구조 형성

에 대한 보충실험이 필요할 것으로 판단된다. 그림 1(c)는 Sb_2S_3 박막의 X선 회절 분석 결과로써 박막이 얇기 때문에 FTO 기판의 회절 패턴이 함께 검출되었으나 FTO 기판 회절 패턴을 제외하면 모두 Sb_2S_3 구조에 대한 회절 패턴으로 확인되어 열처리에 의해서 Sb_2S_3 결정화가 잘 일어난 것을 확인할 수 있다.

박막의 기계적 특성은 박막의 미세구조와 직접적인 연관이 있으며, 미세구조는 박막의 기능적 특성에 직접적인 영향을 준다. 예를 들어 박막의 전기적 특성이나 광학적 특성에 영향을 미치며 본 연구에서 사용된 Sb_2S_3 와 같은 화합물 반도체 박막의 경우는 광전 변환에 직접적인 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되며 특히, 앞서도 언급했듯이 화합물 반도체 박막은 유연 소자에 응용이 가능하기 때문에 박막의 기계적 거동에 대한 분석이 필요하다고 판단된다. 나노인덴테이션 시스템은 인장 시험이 어려운 박막의 기계적 거동을 관찰하는데 적합하다. 또한, 미소강도(small-scale mechanical properties)의 경우는 박막을 구성하는 미세조직의 국소적인 부분의 특성까지 확인할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서 사용된 나노인덴터는 CSM 기술이 적용된 장치인데 이는 나노인덴터를 이용하여 단단한

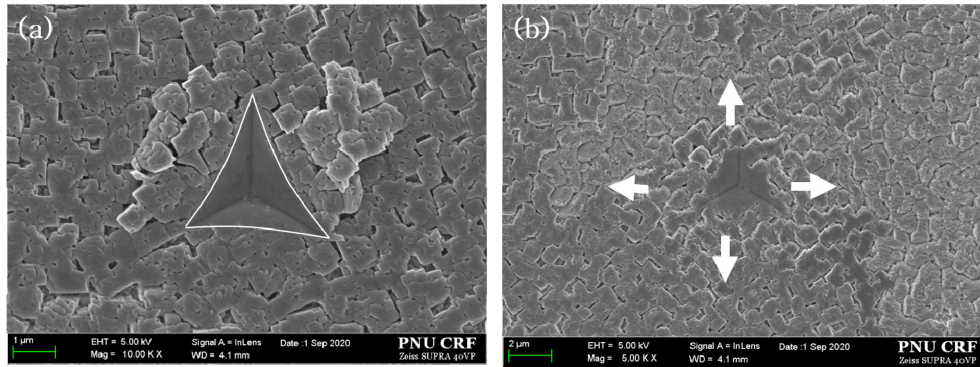


Fig. 2. SEM micrographs of nanoindentation tests by depth of 500 nm. (a) the films are piled up around indent; (b) It appears that the thin film has been pushed toward the face of the indenter tip during the indentation (indicated by white arrows).

기관 위에 증착된 아주 얇은 박막의 기계적 특성을 측정할 때 아주 유용하게 사용된다 [22]. 누르는 깊이에 따라 loading, unloading을 주기적으로 반복함으로써 깊이에 따른 물성을 한번의 loading-unloading 실험으로 깊이에 따라 반복된 실험을 대신할 수 있으며, 박막의 급격한 물성의 변화가 단단한 기관에 의한 것이며 그 이전의 물성은 박막에 의한 것으로 판단할 수 있기 때문이다.

그림 2는 인텐테이션 실험에서 Berkovich 압자를 이용하여 박막을 500 nm 깊이로 누른 뒤의 전자현미경 사진들이다. 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 박막의 구조가 압자의 주변에서 박막의 표면보다 위로 밀려 올라온 것을 확인할 수 있다. 즉, pile-up과 같은 현상이 관찰되었다. 그러나, 압흔을 자세히 보면 흔히 금속에서 일어나는 pile-up의 형태와 다른 것을 볼 수 있다. Pile-up 현상을 나타내는 경우에는 압흔이 압자의 면부분이 바깥으로 불룩하게 휘어지는 형태를 보이는데 그림 2(a)에서 보듯이 압흔은 sink-in 현상에서 보이는 모양을 하고 있는 것을 확인할 수 있다 (그림의 흰색 삼각형 모양). 이는 일반적인 pile-up 현

상이 아니라 완전히 연속적인 박막을 형성하지 못한 상태에서 압자가 눌러지면서 박막이 전체적으로 밀려가면서 압자 근처의 구조체가 더 많이 밀려서 위로 올라온 형태로 보인다. 이는 그림 2(b)에서 확인할 수 있다. Sb_2S_3 구조가 기관 위에 완벽하게 접착되지 않았기 때문에 일어난 현상으로 보인다. 그러나, 그림 2에서 보는 것과 같은 현상 때문에 500 nm의 깊이로 압입한 경우는 이러한 CSM 기술의 장점을 차용할 수 없었기 때문에 밀림 현상이 발생하지 않는 깊이로 실험을 진행하였다.

원추형 압자 (conical indenter)나 피라미드 압자 (pyramidal indenter)의 경우는 pile-up이나 sink-in이 압입 깊이에 따라 변하지 않는다고 알려져 있다 [21]. 따라서, 그림 2(a)에서 보여주는 현상이 일반적인 pile-up 현상이라면 얇은 압입에서도 pile-up 현상이 일어나야 하지만, 그림 3에서 보여주는 것과 같이 250 nm의 압입 깊이에서는 pile-up 현상을 관찰할 수 없는 것으로 보아 그림 2에서 관찰된 것은 일반적인 pile-up 현상은 아니라고 판단된다. 따라서 본 박막의 기계적 특성을 알기 위해서 250 nm 깊

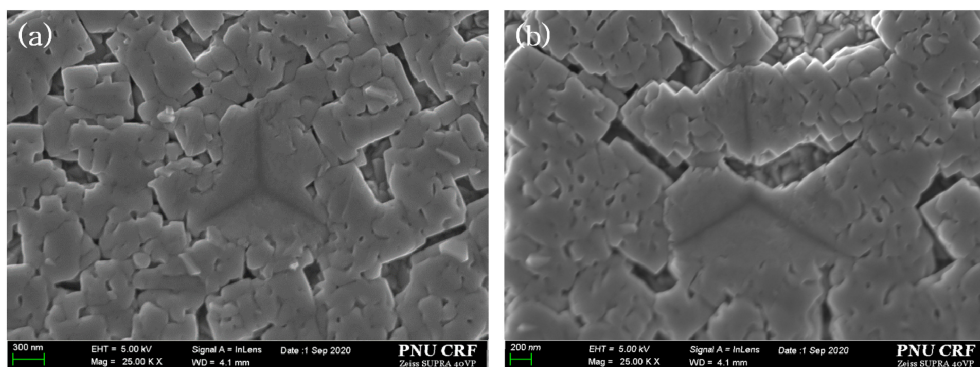


Fig. 3. SEM micrographs of nanoindentation tests by depth of 250 nm. No pile-up events have been observed. (a) indents on Sb_2S_3 microstructure; (b) indents in between Sb_2S_3 microstructures.

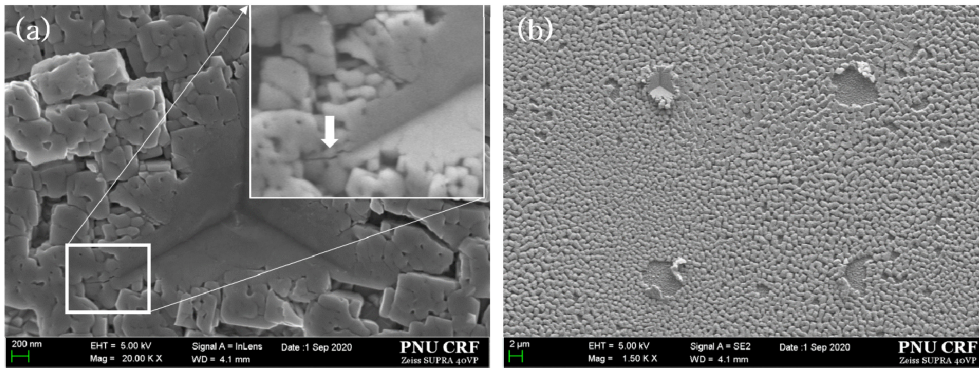


Fig. 4. SEM images illustrating the mechanical behavior of the Sb_2S_3 thin films. (a) A crack formed at the tip edge of the indentation. The in-set in (a) is an enlarged crack with an in-lens secondary electron image; (b) In-lens secondary electron image showing the part where the thin films were cracked and peeled off during the indentation experiment.

이의 인덴테이션 실험을 바탕으로 관찰하였다. 본 연구에서 측정한 Sb_2S_3 박막의 기계적 특성은 그림 3에서 보는 바와 같이 250 nm의 깊이로 누른 실험에서 얻은 값들이다. 앞서 언급한바와 같이 CSM 기술을 적용하여 기판의 영향을 최대한 배제한 영역의 특성을 박막의 물성으로 취하였다. 그림 3(a)는 아일랜드 형태로 만들어진 구조에서 연속적으로 이루어진 박막 구조에 압입한 사진인 반면 그림 3(b)는 압자가 불완전하게 연결된 박막 구조를 누른 사진이다. 본 연구에서 취한 Sb_2S_3 박막의 기계적 특성은 그림 3(a)와 같은 영역에 압입된 결과만을 고려하였다.

앞서 서론 부분에서 H. Koc 등의 연구 결과를 언급하였다. H. Koc 등은 박막의 B/G 비율을 이용해서 박막의 취성 및 연성 특성을 구분했는데, Sb_2S_3 의 경우는 B/G가 1.58~1.7정도로 취성을 띤다고 보고하였다 [14]. 그림 4(a)는 압흔의 모서리 끝부분을 확대한 사진으로 끝부분에 균열이 형성된 것을 볼 수 있다. 그림 4(a)의 inset 사진은 in-lens 이차전자 이미지인데 균열을 더 선명하게 볼 수 있다. In-set 사진의 흰색 화살표가 균열을 보여주는데 H. Koc 등의 연구와 같이 Sb_2S_3 박막은 어느 정도의 취성을 가졌다고 볼 수 있을 것으로 판단된다. 그림 4(b)는 압입 실험 중에 박막 자체가 완전히 박리된 부분을 찍은 in-lens 이차전자 이미지이다. 열처리 시간을 늘릴 경우 기판과의 결합력이 향상되어 그림 4(b)와 같은 박리 현상은 일어나지 않았다. 그러나, 그림 2와 그림 4를 종합적으로 볼 때 유연 소자를 위해서는 박막이 연속적이면서도 어느 정도 움직일 수 있는 공간을 갖게 형성시키는 것도 필요할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 대한 연구는 앞으로 더 진행해서 그 결과를 세심히 관찰할 필요가 있을 것으로 판단되며, 현재 본 연구실에서 일부 연구를 진행하고 있다.

나노인덴테이션 실험에서 얻은 대표적인 하중-변위

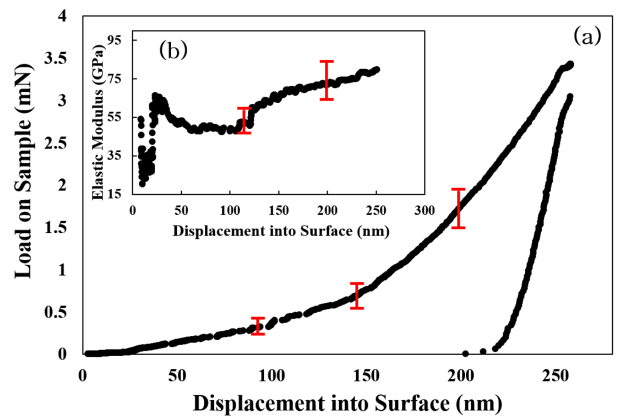


Fig. 5. Nanoindentation results of spin-coated Sb_2S_3 thin films. (a) A representative load-displacement (L-D) curve. Deviations obtained from several experiments are indicated by error bars according to the indentation depth; (b) A representative graph showing the change in modulus of elasticity according to the indentation depth. Deviations are indicated by error bars.

(Load-Displacement, L-D) 곡선과 압입 깊이에 따른 박막의 Young's modulus의 변화를 그림 5에서 보여준다. 3면 피라미드 형 Berkovich 다이아몬드 압자를 최소 40회 이상의 실험을 하였다. 이들의 평균값을 사용하여 얻은 Sb_2S_3 박막의 일반적인 L-D 곡선은 그림 5(a)에 나타내었으며 편차는 오차막대 (error bar)로 표시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 CSM 기법으로 250 nm 압입 깊이로 측정하였는데 압입 깊이가 깊어질수록 압입 하중의 편차가 커지는 것을 볼 수 있다. 그래프에서 알 수 있듯이 100 nm 정도의 아주 얇은 압입 깊이에서는 L-D 곡선의 편차가 거의 없으며 그 이후에는 압입깊이에 따라 서서히 편차가 커지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 단단한 FTO 기판의 물성이 100 nm 두께 이후에 L-D 곡선에 반영된 것으로 판단된다. 박막의 경도와 Young's modulus는 Oliver-Pharr

분석법 [18]에 따라 하중-변위 데이터로부터 계산하였다. 그림 5(b)는 압입 깊이에 따른 Young's modulus 보여준다. Young's modulus 그래프에서도 알 수 있듯이 압입깊이 100 nm 정도를 기점으로 Young's modulus 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 깊이 100 nm 이하의 값이 박막의 기계적 특성으로 판단하였다. 그래프에서 보다시피 50 nm 이하에서는 값이 안정되지 않으며 이는 표면의 거칠기로 인해 압입 면적이 안정화되지 못해서 보이는 일반적인 현상이다. 따라서, 본 연구에서는 압입 깊이 50~100 nm 사이의 값들의 평균치를 이용해서 박막의 Young's modulus와 경도를 측정하였다.

본 연구에서 스핀 코팅으로 제조한 Sb_2S_3 박막의 Young's modulus 값과 경도 값은 각각 53.1 ± 5.6 GPa와 1.43 ± 0.25 GPa로 측정되었다. 이는 H. Koc 등 [14]이 보고한 약 117 GPa 과 L. Jasulaneca 등 [5]이 보고한 35-40 GPa 정도의 값 사이를 나타내는 것을 알 수 있다. H. Koc 등의 연구는 시뮬레이션 결과를 바탕으로 계산된 값이므로 실제 재료를 제조하는 과정 중에 만들어 질 수 있는 구조적인 결함 등에 대한 요소는 배제되었기 때문에 얻어진 값으로 보여진다. 또한, L. Jasulaneca 등이 보고한 Sb_2S_3 나노와이어는 일방향 결정 성장에 의해서 만들어진 것이며 이러한 경우 나노와이어의 Young's modulus 값은 본 연구에서 사용된 Sb_2S_3 박막과는 다를 수 있다고 판단된다. 따라서, 위에서 언급한 두 개의 다른 연구와 본 연구에서의 값들은 각각의 유의미한 값들로 판단되며 스핀 코팅에 의하여 제조된 Sb_2S_3 박막의 기계적 특성에 대한 보고가 거의 없기 때문에 본 연구의 결과가 의미 있다고 생각된다. 또한, 차후에 태양전지를 유연 소자에 응용할 경우에 박막의 조건 등에 대한 실마리도 제공한 것으로 의미 있다고 판단된다. 즉, 유연소자에 응용될 박막은 변형이 발생하더라도 완전한 파단이 발생하지 않아야 하는데 기존의 연속된 박막 형태보다는 본 연구에서 얻은 형태의 박막이 유연 소자에 유용할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

태양전지의 광흡수층에 사용되는 2성분계 화합물 반도체인 Sb_2S_3 의 기계적 특성을 측정하기 위해 스핀 코팅을 이용하여 FTO 유리 기판위에 Sb_2S_3 박막을 성공적으로 형성하였다. Sb 소스와 S 소스를 이용하여 전구체를 형성한 후 적절한 점도로 만들어서 FTO 유리 기판 위에 스핀 코팅하였다. 스핀 코팅한 박막은 Ar 분위기 200 °C에서 최장 1시간까지 열처리 하여 연속적인 구조를 갖는 박막을 형성

하였다. 열처리 시간에 따라 미세구조가 달라졌으며 시간이 길어질수록 보다 더 연속적인 박막을 형성함을 관찰하였다. 박막의 기계적 특성을 측정하기 위하여 나노인덴테이션 시스템을 이용하였으며 압입 깊이에 따라 나타나는 특이점들을 분석하였다. CSM 기법을 이용하여 박막의 물성을 알고자 하였으며 500 nm 깊이의 압입 시험에서 Sb_2S_3 박막이 일정부분 취성을 갖는다는 것과 FTO 유리기판에 결합되는 정도에 따라 압입자 주변으로 미세구조가 밀려나는 현상 등을 관찰하였는데, 이는 향후 유연소자를 만들 때 참고해야 할 사항으로 판단된다. 압입 깊이를 250 nm로 하여 측정한 Young's modulus는 약 53.1 GPa이었으며 이는 문헌에 발표된 최소/최대값 사이에 해당되는 값이었으나, 스핀 코팅을 이용해서 제조한 박막에 대한 값으로는 보고된 바가 없기 때문에 유의미하다고 판단된다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University.

REFERENCES

1. SOLAR FRONTIER, *Solar Frontier Achieves World Record Thin-Film Solar Cell Efficiency of 23.35%*, <http://www.solar-frontier.com/eng/news> (2019).
2. M. Kaelin, D. Rudmann, and A. Tiwari, *Sol. Energy* **77**, 749 (2004).
3. D. Yoo and D. Lee, *Kor. J. Mater. Res.* **28**, 748 (2018).
4. L. Zhang, C. Jiang, C. Wu, H. Ju, G. Jiang, W. Liu, C. Zhu, and T. Chen, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10**, 27098 (2018).
5. L. Jasulaneca, R. Meija, A. I. Livshits, J. Prikulis, S. Biswas, J. D. Holmes, and D. Erts, *Beilstein J. Nanotechnol.* **7**, 278 (2016).
6. A. D. DeAngelis, K. C. Kemp, N. Gaillard, and K. S. Kim, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8**, 8445 (2016).
7. J. Grigas, J. Meshkauska, and A. Orliukas, *Phys. Status Solidi A* **37**, K39 (1976).
8. S. Shaji, A. Arato, J. J. O'Brien, J. Liu, G. A. Castillo, M. I. M. Palma, T. K. Das Roy, and B. Krishnan, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 075404 (2010).
9. J.-H. Choi, C.-W. Ha, H.-Y. Choi, H.-C. Shin, and S.-M. Lee, *Met. Mater. Int.* **23**, 1241 (2017).
10. A. Gerthoffer, C. Poulain, F. Roux, F. Emieux, L. Grenet, and S. Perraud, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **166**, 254 (2017).

11. H. Koc, A. M. Mamedov, E. Deligoz, and H. Ozisik, *Solid State Sci.* **14**, 1211 (2012).
12. D. C. Wallace, *Thermodynamics of Crystals. Chap. 1*, Wiley, New York (1972).
13. Y. L. Page and P. Saxe, *Phys. Rev. B* **63**, 174103 (2001).
14. I. R. Shein and A. L. Ivanovskii, *J. Phys. Condens. Matter* **20**, 415218 (2008).
15. S. F. Pogh, *Philos. Mag.* **45**, 833 (1954).
16. L. Zhang, C. Wu, W. Liu, S. Yang, M. Wang, T. Chen, and C. Zhu, *J. Mater. Chem. A* **6**, 21320 (2018).
17. E. K. Gil, S.-J. Lee, S.-J. Sung, D.-H. Kim, and K. Y. Cho, *Nanosci. Nanotech. Lett.* **9**, 1327 (2017).
18. W. C. Oliver and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.* **7**, 1564 (1992).
19. J.-H. Kim, J. Lee, W. Kim, J. Kim, S.-K. Kang, and D. Kwon, *Korean J. Met. Mater.* **57**, 289 (2019).
20. B. N. Lucas and W. C. Oliver, *Metall. Mater. Trans. A* **30**, 601 (1999).
21. P. Kaienburg, B. Klingebiel, and T. Kirchartz, *Beilstein J. Nanotech.* **9**, 2114 (2018).
22. W. C. Oliver and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.* **19**, 3 (2004).
23. B. Taljat and G. M. Pharr, *Int. J. Solids Struct.* **41**, 3891 (2004).