[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 29, No. 2, 2009
ISSN 1598-6411

태양에너지 박막의 광퇴화 연구를 위한 표면분석

이길동*

*경기대학교 자연과학대학 전자물리학과(gdlee@kyonggi.ac.kr)

Surface Analysis Techniques for Studying Optical Degradation of Solar Coatings

Lee, Kil-Dong*

*Dept. of Electrophysics, Kyonggi University(gdlee@kyonggi.ac.kr)

Abstract

This paper reviews the state-of-the art in surface analysis techniques for solar coatings. For analyzing solar coatings and interfaces, surface properties were very important factor for obtaining the information related to the optical degradation processes and microstructure. Various types of analytical techniques for chemical composition, microstructure and surface topography analysis of solar coatings were discussed. In addition, the examples of solar selective coating analysis results for applications were demonstrated. Development and analysis technique of solar coating for energy conservation was felt to be necessary at this time.

Keywords : 표면분석(Surface analysis), 태양에너지박막(Solar coating), 광퇴화(Optical degradation), 에너지절약(Energy conservation)

1. 서 론

태양에너지 박막이 자연적이거나 혹은 인위적으로 시간이 흐름에 따라 성능이 퇴화되는 원인에 대한 이해의 정도는 물질의 퇴화과정과 관련된 정보를 얻을 수 있는 분석 장비의 사용과 선택에 상당히 많이 좌우 된다. 과거에는 태양 선택흡수막(solar selective coating) 재료의 광퇴화는 주로 성능 특성 인자인 태양흡수율(α)과 열복사율(ϵ)의 변화를 측정함으로서 평가 되었다. 그러나 거시적인 물리적 특성 변화도 중요하지만 분자 차원의 미시적인 관점에서 선택흡수막의 퇴화기구(degradation mechanism)에 대한 깊은 통찰력을 주지 않는다. 여기서 선택흡수막은 태양 복사스펙트럼 영역 ($0.3\mu m < \lambda < 2.0\mu m$) 에서는 α가 높고

투고일자 : 2009년 3월 10일, 심사일자 : 2009년 3월 13일, 게재확정일자 : 2009년 4월 13일
교신저자 : 이길동(gdlee@kyonggi.ac.kr)

흡수막의 작동온도에 해당하는 열복사 스펙트럼($2.0\,\mu m < \lambda < 50\,\mu m$)에서는 ϵ가 낮은 특성을 갖고 있다.[1] 지난 30년간 많은 표면분석 장비가 발전되어 최근에는 태양에너지 박막에서의 선택 흡수성의 물리적 해석, 기판물질의 확산, 표면구조와 열퇴화 현상, 표면산화, 태양전지 재료의 특성분석 등에 대하여 Fiele Ion Microscopy(FIM), X-ray Photoelectron Spectroscopy(XPS), Auger Electron Spectroscopyb(AES), Elastic Recoil Detection Analysis(ERDA), Scanning Electron Microscopy(SEM), Energy Dispersive X-ray Analysis(EDX), Secondary Ion Mass Spectroscopy (SIMS), Atomic Force Microscopy(AFM), GDS(Glow Discharge Spectrometry), Scanning Tunneling Microscopy(STM) 등의 표면분광기를 이용하여 실험적으로 많은 연구가 진행되었다.[2-13] 재료의 광학적 특성은 Infrared(IR) Spectroscopy, Fourier Transform Infrared(FTIR) Spectroscopy, Ultraviolet-Visible-Near Infrared (UV-VIS-NIR) Spectroscopy 등을 이용하여 주로 수행되었다. 이 표면분석 기술의 대부분은 시료에 전자, 광자, 혹은 이온으로 충격을 주면 충돌 결과로써 방출되는 입자들의 에너지와 세기, 질량, 방향 등을 분석하는 데에 기초를 두고 있다. 본 논문에서는 태양에너지 박막의 광퇴화를 분석하는 중요한 장비인 IR, FTIR, AFM, AES, XPS 등에 대해 간단히 설명하고자 한다.[13]

2. 광자 흡수 분광기술

광자 흡수 분광기술은 임의의 파장의 전자기 복사에너지가 물질에 흡수 되는 것에 기초를 두고 있으며 관심 있는 파장영역은 200 nm ~ 50 μm 이다. 200 nm 이하의 파장은 주로 대기의 산소와 질소에 의해 흡수가 되며 50 μm 보다 큰 파장에서의 흡수는 분자의 회전 진동의 여기 상태가 되면서 일어난다. UV-VIS-NIR과 FTIR 분광기는 시료의 반사율을 측정하여 흡수율, 복사율, 투과율 등을 결정하여 재료의 성능 특성을 평가 할 수 있기 때문에 특히 태양 선택흡수막에서의 광퇴화를 연구하기 위해서는 대단히 중요한 장비이다.

2.1 IR 및 FTIR 분광기

IR은 가장 오래되고 일반적으로 분자 수준에서의 물질의 특성을 분석하는 데 사용되며 특히 폴리머 재료의 산화현상, 선택흡수막의 광학적 특성 등을 연구하는 데에 중요하다. 대부분 사용되는 파장은$2.5\,\mu m\,(4000\,cm^{-1})$ $\sim 50\mu m(200cm^{-1})$이다. 적외선 분광은 분자내 원자가 뒤틀리거나 굽어지고 또한 길게 펼쳐지는 진동운동 형태에 따라 다르게 반응된다. 분자는 입사되는 적외선과 상호작용하여 입사파의 임의의 파장이 분자에 흡수되어 진동에너지 준위 사이에서 전이가 일어난다. 분자에서 동시에 발생하는 다중 진동은 복잡한 흡수 스펙트럼을 나타내는데 이것은 분자를 이루는 작용기(functional group)의 유일한 특징이다. 파수 $1300 \sim 600\,cm^{-1}$ 영역에서의 흡수밴드의 대부분은 유기분자의 골격구조와 관련된 진동에 기인한 진동수로서 지문 영역에 해당된다. 집단적으로 이 영역에서의 흡수밴드는 개스, 액체, 고체 등의 물질을 확인하는데 유용하다. 최근에는 적외선 분광기에서 다양한 시료를 측정하기 위한 많은 악세서리와 부착물(attachment)이 개발되어 고체 시료의 특성 분석도 가능하다. 적외선 파장 범위 $2.5 - 50\,\mu m$에서 태양 선택흡수막 시료의 거울 반사율(specular reflectance)을 측정하기 위해서는 거울 반사율 부착물을 분광기에 설치하여 측정한 반사율로 부터 복사율 ϵ을 계산하기도 한다.[1]

FTIR 분광장치의 경우는 입사하는 빛의 작은 부분만 검출기에 도달하게 하는 단색광

장치 대신에 Michelson 간섭계가 사용된다. 이 간섭계는 비임 분리기(beam spliter), 고정된 거울, 움직일 수 있는 거울로 구성 되어 있다. 광원에서 나오는 넓은 파장 범위의 빛은 비임 분리기에서 나누어져 반은 고정된 거울로 향하고, 나머지 반은 움직이는 거울에 도달 한 후 반사되어 다시 비임 분리기를 통과한 후 두 빛은 결합된다. 이때 결합된 두 빛은 어떤 특별한 파장에서 한쪽 거울의 이동거리 때문에 형성된 광로차에 의해 보강간섭과 소멸간섭이 검출된다. 결과적으로 한쪽의 거울을 움직이면서 측정한 빛의 세기를 거리에 대하여 Fourier 변환을 하면 파수 (파장의 역수)에 대한 빛의 세기 분포인 스펙트럼을 얻게 된다. 따라서 FTIR 분광기는 전체 파장 영역의 빛을 동시에 측정하기 때문에 기존의 회절격자를 이용한 적외선 분광기 보다 높은 신호대 잡음비를 얻을 수 있다. 응용분야는 주로 고체물리 분야에서 물질의 광학상수 결정, 결정의 포논 진동모드, 초전도체의 에너지 띠 간격 결정, 태양 선택흡수막의 열복사율 결정 등에 이용된다.

2.2 UV-VIS-NIR 분광기

UV-VIS 분광기는 IR분광기와 밀접하게 관련되어 있으며 UV-VIS-NIR 분광기와 차이는 파장영역에 있다. IR 분광기는 주로 시료에서 적외선을 흡수하여 진동에너지 준위 사이의 전이가 일어나는 것에 관심이 있지만 UV-VIS 분광기는 분자의 전자에너지 준위 사이의 전이를 연구하는 데에 사용 된다. NIR 분광은 적외선 영역의 일부인 근적외선 영역(15000-3000 cm^{-1})으로 확장시킨 것이다. NIR 영역에서는 많은 재료들의 배진동 흡수(vibrational overtone absorption)가 일어나지만 기본 흡수는 적외선 영역에서 일어난다. 최근에는 NIR 분광은 고체, 액체, 기체도 연구할 수 있어 많은 관심의 대상이 되고 있다. 현재는 UV-VIS-NIR 분광기가 제작되어 상용화 되고 있으며 적분구의 부착장치를 설치하여 태양 선택흡수막의 확산 반사율을 측정하여 흡수율을 계산하는 데에 사용할 수 있으며 또한 투명한 재료의 투과율을 측정하기도 한다.

그림 1은 UV-VIS-NIR과 IR분광기를 이용한 반사율의 측정 예로써 저자가 dc(direct current) 반응성 마그네트론 스파터링으로 Al 기판 위에 제작한 서밋(cermet) 이중층의 구조를 갖는 Cr-CrO 서밋 태양 선택흡수막의 열적안정성을 측정한 결과이다.[6]제작된 Cr-CrO 서밋 태양 선택흡수막 Cr02405e 시료를 400 ^{0}C 온도에서 7시간 가열한 후 시료 Cr02405eHg를 다시 450 ^{0}C에서 33시간 가열시킨 시료 Cr02405eHk의 반사율 변화를 나타낸 것이다. 400 ^{0}C 온도에서는 안정하나 450 ^{0}C 온도에서는 적외선 반사율이 상당히 증가 된 것을 볼 수 있었다. 이 결과 역시 고온에서의 Al 기판 물질의 확산 때문인 것으로 보인다. 이 실험 결과로부터 Cr-CrO 서밋 태양 선택흡수막은 열처리온도 300 - 400 ^{0}C에서는 열적안정성이 안정하고 450 ^{0}C에서는 열적안정성이 불안정한 것을 알 수 있었다. 위 반사율로부터 계산한 선택흡수막의 흡수율과 복사율은 각각 RCr02405e시료의 경우는 $\alpha = 0.93, \epsilon = 0.09$, Cr02405eHg 시료는 $\alpha = 0.93, \epsilon = 0.11$, Cr02405eHk 시료는 $\alpha = 0.92, \epsilon = 0.23$로계산되었다.따라서 Cr02405eHk 시료는 광퇴화가 일어났음을 알 수 있었다.

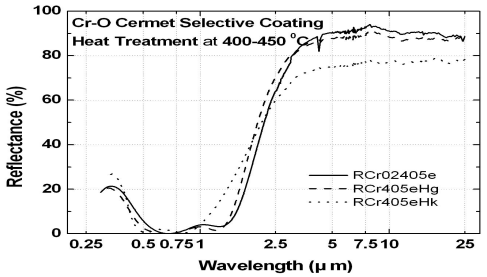

그림 1. 열처리온도에 따른 반사율변화

3. 표면형상의 관찰

3.1 AFM

AFM을 이용하여 시료 표면형상은 분석할 표면과 캔틸레버(cantilever) 사이의 힘을 조정하여 얻을 수 있다. 캔틸레버의 탐침(tip)과 표면사이 거리가 충분히 가까워져 있으면 상호작용(인력과 척력)의 세기가 변화함에 따라 캔틸레버가 휘게 되는데 이때 시료 표면 위 높이의 함수로써 휘어지는 정도를 측정하여 표면 이미지는 분해능 1 nm 보다 더 좋게 얻을 수 있다. 측정방법으로는 척력모드(repulsive mode)와 인력모드(attractive mode)가 있다. 척력모드(repulsive mode), 즉 접촉모드(contact mode)에서는 탐침이 표면과 물리적으로 접촉하고 있는 상태로 2차원적인 표면 주사가 이루어지고 직류전압이 압전 재료로 만들어진 스캐너를 제어하기 위해 인가 된다. 비접촉모드 혹은 인력모드(attractive mode)에서는 캔틸레버의 위치가 공진주파수에 가까운 주기로 진동하면서 2차원적인 표면 주사가 이루어진다. 원리적으로 볼 때 비접촉모드는 매우 약하게 표면에 구속되어 있는 흡착층이나 부드러운 재료들의 가시적 관측에 더 적합할 것으로 판단된다. AFM은 진공 혹은 대기압의 환경에서도 측정이 가능하며 또한 도체 혹은 부도체도 측정이 가능하므로 STM 보다 용도가 더 다양하다.

그림 2는 AFM의 측정 예로써 저자의 실험실에서 전기도금법으로 Ni이 도금된 구리기판 위에 제작한 black Cr 태양 선택흡수막의 표면형상을 나타낸 것 이다. rms(root-mean-square)는 55.83 nm, 결정낱알의 크기는 396.3 nm 였으며 반사율로부터 각각 $\alpha = 0.80$, $\epsilon = 0.03$ 가 계산되었다. 표면에 V자 형태의 구조로 된 것을 볼 수 있는 데 이것은 다중반사의 효과에 의해 입사광을 포획하여 흡수가 증가한 것으로 보여진다.[4)]

3.2 STM

표면형상은 나노미터 이하의 높이 제어가 가능한 압전 재료에 부착되어 있는 표면 위

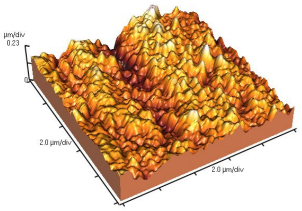

그림 2. Black Cr 태양 선택흡수막의 AFM 표면형상

를 스캐닝하는 날카로운 금속 탐침과 표면 사이의 거리가 매우 근접 되었을때 터널전류를 측정하여 얻을 수 있다. 이때 일정한 터널전류를 생성하도록 탐침의 높이를 제어하는 동작방식(constant current mode)과 금속 탐침의 높이를 일정하게 유지하면서 시료와 탐침사이에 터널전류 변화를 측정하면서 주사하는 동작(constant height mode)방식이 있다. 상의 분해능은 1 nm보다 좋으며 개개의 원자 수준의 상을 얻을 수 있다. 시료는 도체 혹은 반도체가 되어야 측정 가능하다. STM도 진공 조건에서 혹은 대기압의 환경에서도 측정이 가능하다. 따라서 시료의 초기 단계의 퇴화과정 연구는 탐침과 시료사이에 턴널전류가 흐르는 것을 방해하는 퇴화 부산물이 생성되는 것을 막기 위해 진공조건에서의 연구를 하기 위한 특징도 갖고 있다.

그림 3은 온도 4.7 K에서 Zn 받게 불순물을 도핑 시킨 GaAs(110) 표면의 전류일정 모드에서의 STM 표면형상 이다. 그림에서 Zn 받게 불순물은 삼각형 형태로 나타난 것을 볼 수 있다. Ga(light blue to yellow)과 As (dark blue) 원자도 관찰 되었다.[14)]

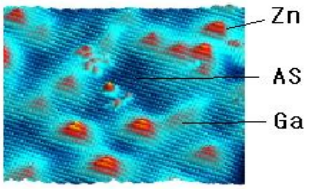

그림 3. Zn 이 도핑된 GaAs 표면의 STM 표면형상

4. 표면분석을 위한 전자 분광기술

AES와 XPS는 가장 광범위 하게 사용되는 표면분석 기술이다. 두 기술은 상호보완적이며 표면조성 분석에 사용된다. 흔히 함께 다루어지며 관련되는 기기에도 두 기능이 함께 들어 있는 경우가 많다. 그러나 XPS는 가전자상태의 결합에너지의 화학적 변화(chemical shift)때문에 시료 표면에서 화학 결합상태를 알 수 있게 해 준다. AES가 XPS 보다 약 100배 정도의 공간 분해능이 우수하고 또한 시료의 깊이에 따른 조성분석이 빠른 시간 내에 가능하기 때문에 선택흡수막의 스퍼터 depth profile을 수행하는 데에 많이 사용된다. AES와 XPS 분광기술은 표면에서 방출되는 전자의 에너지 분석에 기초를 두고 있기 때문에 전자에너지 분석기가 중요한 부품이다 가장 일반적으로 많이 사용되는 분석기는 CMA(Cylindical Mirror Analyzer)와 CHA(Concentric Hemispherical Analyzer)이다.

4.1 AES

Auger 전자분광법에서 Auger 효과는 비복사과정에 의한 원자의 비여기(deexcitation)다. 높은 전자에너지를 시료의 원자 내부 전자궤도에 충돌시키면 원자의 전자궤도에서 전자가 방출되면서 그 자리에 구멍(vacancy)이 생성된다. 이 구멍은 바깥의 높은 전자궤도에 있는 전자로부터 곧 채워진다. 이때 방출된 에너지는 바깥 전자궤도에 있는 전자가 이 구멍으로 전이되는 동안에 X-선을 방출(가능성이 낮다)하거나 혹은 다른 궤도에 있는 다른 전자에 에너지를 전달(가능성이 높다)하여 이 에너지를 획득한 전자가 원자에서 진공중으로 탈출된다. 이 전자가 각 원소의 특성 에너지를 갖고 있는 Auger 전자이다. 응집물질에서는 충돌 단면적 때문에 전자의 에너지 손실이 크므로 표면 근처에 있는 전자만 에너지의 손실이 거의 없이 표면에서 방출되므로 에너지 분석기로 원자에서 방출된 Auger전자의 특성 에너지를 측정하면 시료 표면에 있는 원소의 농도를 쉽게 알아내는 데에 대단히 편리하다. 전자에너지 60 eV 영역에서는 Auger 전자의 탈출 깊이는 보통 2-3 원자층의 깊이다. 방출된 Auger 전자의 최대 에너지 3 keV인 경우 탈출 깊이는 약 10 원자층에 해당된다. 그러나 Auger 전자 피크는 매우 약하다. 여러 자료에서 볼 수 있는 Auger 스펙트럼은 XPS의 광전자 스펙트럼과 비교할 때 매우 다르게 보이는데 가장 뚜렷한 차이는 Auger 피크들이 양의 피크와 음의 피크로 구성되어 있는 것이다. 이는 Auger 전자 분광법에서 주로 쓰이는 들뜸 원(excitation source)이 전자 비임인 것에 기인한다. 전자 비임이 시료 표면에 충돌하면 표면으로부터 후방 산란된 운동에너지가 낮은 이차 전자(secondary electron)들이 넓은 에너지 구간에 분포되어 다량으로 방출되며 Auger 전자들은 이차 전자들의 바탕 위로 약간씩 나타나는 조그만 피크를 형성하게 된다. 그러므로 전자의 계수율을 운동 에너지에 대하여 한 번 미분하면 흔히 볼 수 있는 평평한 바탕에 양의 피크와 음의 피크가 두드러지게 나타나는 미분 스펙트럼이 얻어진다. 관습상 음의 피크의 에너지를 Auger 에너지로 취한다. 최근 AES 장비의 공간 분해능은 10 nm 까지 가능하다. 주사 Auger 현미경법(Scanning Auger Microscopy, SAM)을 행하려면 전자살을 시료의 표면에 주사해야 하므로 이 때에는 주사 기능이 갖추어진 전자총을 쏘아 표면 원소의 mapping이 가능하다. 스퍼터 depth profile은 박막에서의 깊이에 따른 조성 변화를 분석 할 수 있는 편리한 방법을 제공하기 때문에 가장 중요한 응용분야 중의 하나이다. 스퍼터링 율은 이온 비임의 세기와 에너지 및 표면 특성에 의해 결정되지만 전자 비임은 표면에 약간 손

상을 줄 수 있다. 시간, 스파터링율, 깊이 분해능 등을 고려하면 실제적인 스퍼터링 깊이는 수 μm이내로 제한된다. Auger 전자 분광법은 금속, 부식현상, 반도체 재료표면 등에 광범위하게 응용되는 강력한 분석 기술이다. 특히 태양 선택흡수막의 광퇴화, 선택흡수성 기구(mechanism), 얇은 금속과 산화물 박막 등에 많이 사용된다. 시료 표면에서의 charging 효과가 일어나면 절연체의 분석은 불가능하다. 표면 민감도는 0.1-1 atom % 이다.

그림 4는 저자의 실험실에서 전기도금법으로 Cu기판 위에 제작한 black Cr 선택흡수막을 제작한 후 450 ^{0}C에서 24 시간 열처리 전과 후의 AES depth profile을 수행한 결과의 예를 나타낸 것이다.[4] 그림에서 볼 수 있듯이 열처리 전 보다 열처리 후에는 기판물질 Cu가 표면쪽으로의 확산이 일어나 표면은 상당히 많은 Cu 양이 포함된 것을 볼 수 있으며 산소양도 크게 증가하였다. 열처리에 의한 광퇴화의 주 원인은 기판물질이 표면에 확산되어 산소와 반응하여 CuO 층이 형성이 된 데에 그 원인이 있는 것으로 사료된다.

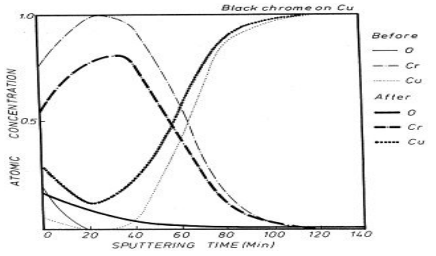

그림 4. 열처리전과 후의 black Cr 태양 선택흡수막의 AES depth profile.

따라서 열처리전 시료의 흡수율 $\alpha = 0.91$에서 열처리 후에는 $\alpha = 0.70$으로 감소한 이유를 알 수 있었다.

4.2 XPS

현재 표면분석 장비로 많이 사용되는 XPS는 ESCA(Electron Spectroscopy for Chemical Analysis)로 알려져 있다. 단색광인 X선을 고체 시료에 입사시키면 광전효과를 일으켜서 고체원자를 이온화시키고 광전자를 발생시킨다. 이때 광전자는 시료에서 방출된 광전자의 에너지 스펙트럼을 측정함으써 검출된다. 원자내 전자궤도에는 결합과 관련된 가전자 외에 내각 전자 (수소제외)를 가지고 있으며 속박되어 있는 내각전자의 결합에너지 E_b는 각 원자의 특성이다. XPS 장비를 사용해서 고 진공하에 (Ultra High Vacuum, UHV)시료 표면에 1253.6 eV 혹은 1486.6 eV X-선 비임을 입사시키면 아인쉬타인 관계식 $E_k = h\nu - E_b - \Phi$에 의해 방출된 광전자는 입사된 X-선의 에너지($h\nu$)와 전자의 결합에너지(E_b)에 의해서 정해지는 특정한 운동에너지(E_k)를 가지고 방출한다. 이때 광전자 방출은 전자의 운동에너지가 충분히 커서 표면의 일 함수 장벽 Φ를 극복하기에 충분한 경우에 발생된다. 이러한 과정을 광전효과라 부른다. 원자내 전자의 에너지 준위는 양자화 되어 있기 때문에 광전자는 불연속 밴드로 구성된 운동에너지 분포를 갖는다. 방출된 광전자의 세기는 전자 운동에너지의 함수로 조정된다. 2 keV 이하의 운동에너지를 가진 전자는 0.5-3 nm 깊이에서 방출된 것이며 이것은 고체 시료 표면의 1-5 단원자층에 해당된다. 왜냐하면 각 원소는 방출된 전자의 특성 스펙트럼을 갖기 때문에 전체의 스펙트럼은 시료 표면에서 수소를 제외한 모든 원소 분석이 가능하다. 또한 원소들의 조성비를 정량적으로 분석하기도 한다. XPS에서는 원소내 내각준위 전자의 결합에너지는 외부의 화학적 환경에 의해 영향을 받기 때문에 측정된 광전자의 화학적 변화가 관측된다. 따라서 고체 시료의 산화상태나 이온화 등을 분석할 수 있다. 시료의 측정되는 면적은 보통 수 $\sim mm^2$이다.

그림 5는 $NiCl \cdot H_2O$, $NaCl$ 의 전해질을 사용하여 전기도금법으로 Cu와 Al기판 위에 제작한 black Ni 태양 선택흡수막의 화학조성을 분석한 XPS 스펙트럼이다.[12] 최적화된 이 시료의 $\alpha = 0.96, \epsilon = 0.1$ 였다. 그림에서 보는 것처럼 $2p^{3/2}$ 준위에서 3개의 피크를 볼 수 있다.

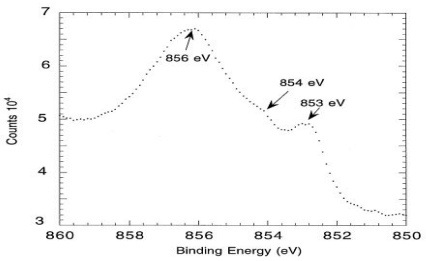

그림 5. black Ni 선택흡수막의 XPS 스펙트럼

856 eV에서 강한 피크는 Ni_2O_3 혹은 $Ni(OH)_2$인 것으로 확인되었다. 853 eV에서 약한 피크는 금속 Ni 때문이고 854 eV에서의 아주 약한 피크는 NiO에 의한 피크다. 따라서 Cl, Na이 포함된 화합물이 검출되지 않았음을 알 수 있다.

5. 결 론

태양에너지 박막의 광퇴화 현상을 연구 할 수 있는 표면 분석기술과 그 예를 들어 분석하였다. 분석 결과 (1) 태양에너지 박막에 초기 투자하여 표면 분석 기술을 이용하여 성능과 내구성이 강한 선택흡수막을 개발함으로써 국가적인 차원에서 에너지 절감 효과를 가져 올 수 있을 뿐만 아니라 산업체에 응용효과도 얻을 수 있음을 알 수 있었다. (2) 태양에너지 박막 제작기술과 분석기법은 신소재 연구를 위한 첨단기술 축적의 한 부분으로 간주 할 수 있으며 국제화 시대를 맞아 세계를 향한 신재생 에너지 수출에 반드시 필요함을 알 수 있었다. 이는 부가가치가 높은 기술창출이 되기 때문이다.

참 고 문 헌

1. O. P. Agnihotri and B. K. Gupta, Solar Selective Surfaces, 1st ed. (Wiley-Interscience Publication, New York, 1981), Chapter. 5.
2. G. B. Smith, A. Ignatiev and G. Zajac, J. Appl. Phys. 51, 4186 (1980).
3 T. Bostrom, J. Jensen, S. Valizadeh, G. Westin, E. Wackelgard, Sol. Energy Mater. & Sol. Cells 92, 1177 (2008).
4. K. D. Lee, Korean Phy. Soc. 51 135 (2007).
5. M. R. Bayati, M. H. Shariat and K. Janghorban, Renewable Energy 30, 2163 (2005).
6. K. D. Lee, Korean Phy. Soc. 49, 187 (2006).
7. K. Durose, S. E. Asher, W. Jaegermann, D. Levi, B. E. McCandless, W. Metzger, H. Moutinho, P. D. Paulson, C. Perkins, J. R. Sites, G. Teeter and M. Terheggen, Prog. Photovolt: Res. Appl. 12, 177 (2004).
8. A. Avila, E. Barrera, L. Huerta and S. Muhl, Sol. Energy Mater. & Sol. Cells 82, 269 (2004).
9. G. B. Smith, G. Zajac, A. Ignatiev and J. W. Rabalais, Sur. Sci. 114, 614 (1981).
10. A. R. Shashikala, A. K. Sharma, D. R. Bhandari, Sol. Energy Mater. & Sol. Cells 91, 629 (2007).
11. D. Bacon and A. Ignatiev, Sol. Energy Mater. 9, 3 (1983).
12. E. Wackelgard, Sol. Energy Mater. & Sol. Cells 56, 35 (1998).
13. M. Kohl, B. Carlsson, G. J. Jorgensen, A. W. Czanderna, Edited, Performance and Durability Assessment (Elsevier Publication, San Diego, 2004), Chapter. 4. 8.
14. http://www.omicron.de/index2. html?/rom/constant_current_stm_image_of_a_gaas_110_surface/index.html~Omicron