

필름 두께 측정용 투과 양극형 x-ray tube의 개발 및 특성

김성수·김도윤

목원 대학교 기술마케팅학과, 대전 302-318

(주)브이에스아이, 대전 305-811

(2008년 4월 24일 받음)

수십에서 수백 μm 영역의 필름 두께 측정에 적용하기 위한 Ag-target 투과양극형 x-ray tube를 개발하고 특성을 조사하였다. 10kV 부근의 관전압에서 x-ray 에너지의 분포 및 선량특성을 조사하고 W-target tube와 비교하여 논의하였다. 또한 Ag-target tube와 W-target tube를 이용하여 Ny film과 PP film의 두께변화에 따른 x-ray의 투과 특성으로 조사하였고, 그 결과 개발된 x-ray tube는 필름두께 측정용으로 적용할 수 있을 만큼 충분히 좋은 특성을 나타내었다.

주제어 : x-선 튜브, 투과양극형, Ag-표적, W-표적, 박막, 두께측정

I. 서 론

필름 생산 공정에서 필름 두께의 자동 측정 및 제어는 제품의 원가 경쟁력과 직결되기 때문에, In-Line 두께 측정·제어 설비는 필수적이다. 필름 두께 측정에 사용되는 선원은 주로 방사성 물질(감마선, 혹은 베타선)을 사용하여 왔지만, 최근에는 soft x-ray를 이용한 두께 측정이 주목 받고 있다. 방사선원인 경우 선원이 대단히 안정되어 있지만, 고가의 초기설치비용, 높은 유지비용, 인체의 유해성 등의 문제가 있다. 반면 soft x-ray를 이용한 경우, 선원의 안정성은 다소 떨어지지만 방사선원의 문제점을 대부분 보완할 수 있는 장점이 있다.

투과양극 x-ray는 1977년 미국의 David J Haas에 의해 처음 개발되었다[1]. 투과양극 x-ray tube는 Be이 x-ray 투과율이 매우 높다는 특성을 이용하여 얇은 Be window에 금속을 코팅하여 양극으로 사용한 것으로[2], 양극 반사형 tube에 비해 부피가 작다는 장점이 있다. 수십에서 수백 kV의 관전압을 사용하는 경(hard) x-ray tube의 경우 양극에서 매우 높은 열이 발생하지만[3], 10 keV 내외의 soft x-ray용은 양극에서의 열은 전혀 문제가 되지 않기 때문에 투과양극 x-ray tube는 1990년 후반부터 soft x-ray 발생용으로 주목받고 있다. 투과 양극형 x-ray tube는 튜브 자

체를 작게 제작할 수 있고, soft x-ray 발생용으로 사용할 경우 냉각장치가 필요 없기 때문에 power supply를 포함한 x-ray generator의 전체 부피를 소형화시킬 수 있다. X-ray generator를 소형화할 경우, 휴대용 x-ray 발생장치, 휴대용 XRF(X-Ray Fluorescence) 장치, 정전기 제거 장치, 필름두께 측정장치 등에 적용할 수 있어 활용범위가 매우 넓다.

본 연구에서는 In-Line 필름두께 측정에 적용하기 위한 투과양극형 Ag-target tube를 개발하여 특성을 조사하였다. 필름두께 측정을 위해서는 10 keV 이내의 x-ray를 사용하기 때문에 10 keV용으로 개발하였고, 먼저 개발된 W-target tube[4]와 비교 분석하였다. 아울러 Ny film과 PP film을 이용하여 두께에 따른 필름 투과 특성을 조사하였다.

II. 실험방법

Ag-target tube는 이전에 보고한 W-target tube[4]와 동일한 방법과 동일한 규격으로 개발하였고, 양극물질만 W 대신 Ag를 증착하여 제작하였다. X-ray tube를 구동하기 위한 power supply는 자체개발하여 사용하였다. X-ray

* [전자우편] sskim@mokwon.ac.kr

의 에너지 분포는 AMTEK(미국)사의 XR-100CR (25 mm² × 500 μm) Si-PIN detector, MCA8000A 및 PX4 power supply를 사용하여 측정하였고, x-ray의 선량 (dose)은 S.E.International(독일)사의 'X-ray-Gamma-Dosimeter type 27091'를 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. X-ray의 에너지 분포 측정

FIG 1은 Ag-target tube의 관전류(tube current)를 160μA로 고정하고 관전압(tube voltage)을 변화시키면서 측정한 에너지 분포이다. 여기서 관전압은 필라멘트와 양극 사이에 인가된 전압이고, 관전류는 양극에 도달하는 전자에 의한 전류이다. 3 keV 근처에 나타난 강한 peak는 Ag L-line($L_{\alpha 1}=2.984$ keV, $L_{\alpha 2}=2.978$ keV, $L_{\beta 1}=3.151$ keV, $L_{\beta 2}=3.347$ eV)으로, 두 개의 peak이 겹쳐서 나타나 있다. 첫 번째 나타난 큰 peak은 L_{α} -line과, 작은 peak은 L_{β} -line과 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. L-line이 강하게 나타나긴 했지만 연속 x-ray에 비해 상대적으로 그리 크지 않은데, 이것은 대기 중에서 측정했기 때문이다. X-ray의 에너지가 낮아 질수록 대기기체분자에 의해 더 쉽게 흡수되는데, FIG 1에서 2.5keV이하의 에너지는 전혀 검출되지 않음을 볼 수 있고, 따라서 3keV 근처의 x-ray도 상당부분 흡수될 수 있음을 예상할 수 있다. 이 예상은 진공 중에서 측정한 결과로부터 확인하였다. 10⁻⁵ torr 정도의 진공도에서 측정한 결과 Ag L-line은 4배 이상 증가하였고, 대기 중에서는 전혀 검출되지 않는 Al K-line(1.486 keV)까지도 강하게 측정되었다. 이 결과는 다음 논문에서 보고할 예정이다. 5 keV와 6keV 사이에 나타난 작은 peak는 Cr K-line($K_{\alpha 1}=5.415$ keV, $K_{\alpha 2}=5.406$ keV, $K_{\beta 1}=5.947$ keV)과 거의 일치하기 때문에 Cr에 의한 것으로 생각된다. 투과양극형 x-ray tube는 Be window에 target 물질을 증착하여 제작하는데, Cr 증착을 한 이력이 있는 chamber에서 Ag를 증착함으로써 잔류 Cr이 일부 포함되었을 것으로 생각된다.

FIG 2는 관전압을 10 kV로 고정시키고, 관전류를 80 μA에서 160 μA까지 20 μA간격으로 변화시키면서 측정한 x-ray 에너지 분포이다. Target 물질에 도달하는 전자가

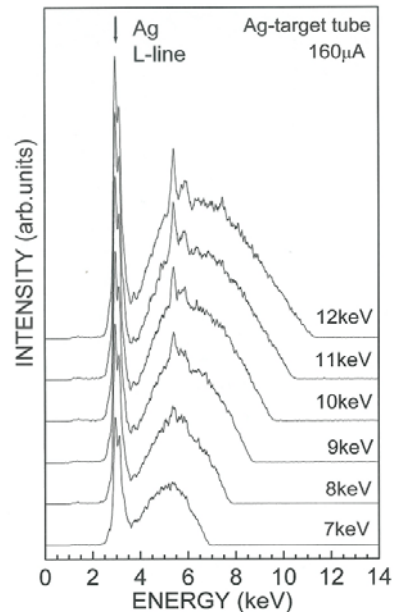


FIG 1 Energy distribution of x-ray with various tube voltage at the tube current of 160 μA.

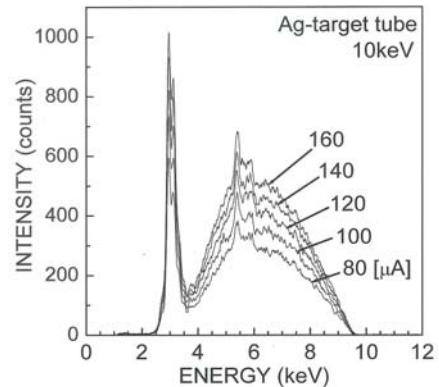


FIG 2 Energy distribution of x-ray with various tube current at the tube voltage of 10 kV.

단 한 번의 충돌로 전자의 전 에너지를 잃어버릴 때 에너지가 최대인 x-ray가 방출된다. 관전압이 일정하면 관전류를 변화시키더라도 tube로부터 방출되는 x-ray 에너지의 최대값은 변하지 않는다. 반면 관전류를 증가시켰을 때 양극에 충돌하는 전자의 양이 증가하기 때문에 양극에서 방출되는 x-ray의 양은 증가해야 한다. FIG 2에서 보는 바와 같이, 관전류가 변해도 x-ray 에너지의 최대값 위치는 변하지 않고, 관전류가 증가함에 따라 x-ray의 강도는 증가함을 볼 수 있어 예상과 일치함을 알 수 있다. 관전압이 10 kV이기 때문에 양극에 도달하는 전자의 에너지가 10 keV이고 따라서 x-ray 에너지의 최대값도 약 10 keV로 측정되어야 한다. 그러나 에너지 분포 상에서는 약 9.5 keV

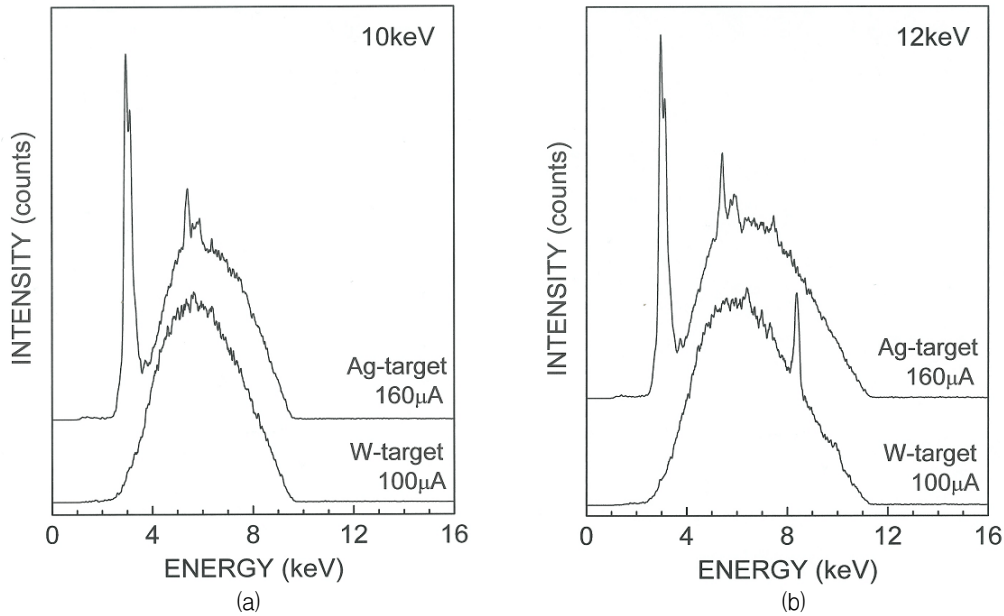


FIG 3 Energy distribution of x-ray from the Ag-target tube at the tube current of 160 μ A and the W-target tube at the tube current of 100 μ A. (a) when the tube voltage is 10 kV, (b) when the tube voltage is 12 kV.

에서부터 측정되었다. 이것은 단 한 번의 충돌로 전자의 전 에너지를 전달해 줄 수 있는 확률이 매우 낮기 때문에 그렇게 나타난 것으로 보인다.

FIG 3은 Ag-target tube의 에너지 분포 특성을 확인 하기 위하여 W-target tube의 것과 비교하여 나타내 보인 것이다. FIG 3에서 비교한 W-target tube의 특 성에 관한 것은 이전 논문[4]에 자세히 설명되어 있다. FIG 3(a)는 관전압을 10 kV로 두고, Ag-target tube 와 W-target tube의 관전류를 각각 160 μ A와 100 μ A 로 하여 측정한 결과를 비교한 것이다. Ag-target tube와 W-target tube의 관전류를 다르게 하여 측정한 것은 연속 x-ray의 강도를 비교하기 위한 것이다. 2절에서 기술하겠지만 연속 x-ray의 선량은 관전류와 target 물질의 원자번호에 비례한다. 따라서 W과 Ag의 원자번호 비가 $74/45=1.64$ 이기 때문에, Ag-target tube와 W-target tube의 관전류 비를 1.64배로 하면 연속 x-ray의 강도가 비슷하게 측정되어야 한다. 이 예상을 확인하기 위하여 보인 것이 FIG 3으로써, 관전류가 160 μ A인 Ag-target tube와 100 μ A인 W-target tube의 연속 x-ray가 비슷한 강도로 측정되었음을 확인할 수 있다. 또한 두 tube에서 x-ray 에너지의 최대값 위치는 동일하게 측정되었음을 알 수 있다. 따라서 Ag-target

tube의 에너지 분포 특성이 예상과 잘 일치함을 확인할 수 있다. FIG 3(b)는 관전압이 12kV일 때를 비교한 것이다. Ag-target tube의 경우 관전압을 12 kV로 변화시켰을 때 강도가 증가한 것 외에 스펙트럼의 변화는 없지만, W-target tube의 경우 관전압이 12 kV가 되었을 때 L-line($L_{\alpha 1}=8.398$ keV, $L_{\alpha 2}=8.335$ keV, $L_{\beta 1}=9.672$ keV)이 나타나기 시작함을 볼 수 있다.

2. X-ray의 선량(DOSE) 측정

FIG 4는 Ag-target tube와 W-target tube의 선량 을 비교한 것으로, (a)는 관전압에 따른 선량을, (b)는 관전류에 따른 선량을 보인 것이다. 연속 x-ray의 강도 는 다음과 같이 관전류와 target 물질의 원자번호에 비례 하고, 관전압의 제곱에 비례한다.[5]

$$I_c = AiZV^m \dots\dots\dots (1)$$

여기서, i 는 관전류, Z 는 원자번호, V 는 관전압, m 은 상수이며 약 2이고, A 는 비례상수이다.

관전압이 12 kV 이하일 때 W-target tube의 선량은 순수하게 연속 x-ray에 의한 것이므로 선량은 (1)식

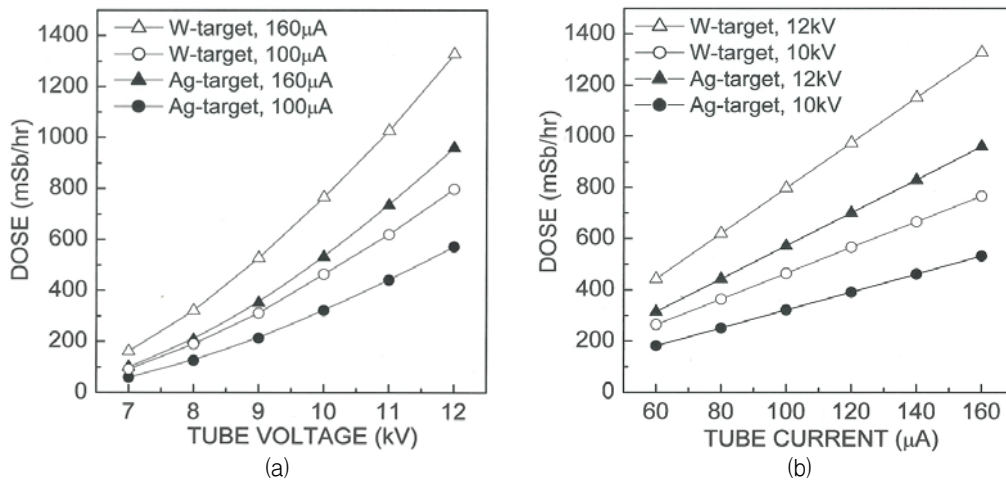


FIG 4 Dose of x-ray from the Ag-target tube and the W-target tube (a) with various tube voltage, and (b) with various tube current.

과 같이 나타내 질 수 있다. FIG 4에서 W-target tube의 선량은 관전류에 비례하고 관전압에 대해서는 2차 함수적으로 변하므로 (1)식과 잘 일치함을 알 수 있다. 반면에 Ag-target tube의 경우 3 keV 근처에서 특성 peak이 나타나기 때문에, 선량은 (1)식을 따르지 않을 것으로 예상된다. 그러나 FIG 4에서 보는 바와 같이 Ag-target tube의 선량은 연속 x-ray의 특성을 보인다. 이 이유는 FIG 1에서 설명한 바와 같이 3 keV 근처의 특성 x-ray가 높은 비율로 대기 중에 흡수되어, 특성 x-ray가 전체 강도에 미치는 영향이 크지 않기 때문에 연속 x-ray의 특성과 비슷한 경향을 보인 것으로 생각된다.

(1)식에 의하면, W와 Ag의 원자번호 비(W/Ag)가 $74/45=1.64$ 이기 때문에 동일한 관전압과 관전류에서 W와 Ag-target tube의 선량비도 1.64배가 되어야 한다. FIG 3과 4로부터 계산한 선량비(W/Ag)는 1.35~1.55로써, 원자번호 비보다 다소 적다. 그러나 Ag-target tube의 선량에 특성 x-ray에 의한 선량이 일부 포함되어 있기 때문에, 연속 x-ray만 고려한 선량비는 원자번호 비와 잘 일치하는 것으로 볼 수 있다.

이상의 결과들을 종합하면, W-target tube와 비교한 Ag-target tube의 에너지 분포 및 선량 특성은 예상된 결과와 잘 일치하고 있다. W-target tube의 특성이 검증되어 있기 때문에[4], 개발된 Ag-target tube는 정상적인 특성을 가지고 있음을 확인하였다.

3. X-ray의 투과실험

X-ray tube의 필름 투과 특성을 조사하기 위하여 두께가 각각 60 µm와 80 µm인 Ny film과 PP film을 사용하였다. Film의 두께는 film을 여러 장 겹쳐서 조절하였다. FIG 5는 W-target tube를 이용하여 Ny film의 두께를 각각 60, 180, 300 µm로 변화시키면서 film을 통과한 후의 에너지 분포를 측정하고, FIG 6은 같은 조건에서 Ag-target tube를 이용하여 측정하는 것이다. 두 경우 모두에서 약 8 keV 이상에서는 film의 두께에 상관없이 거의 대부분 투과하지만, 8 keV 이하에서는 두께가 증가함에 따라 일정한 간격으로 강도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 에너지가 낮을수록 투과율은 두께에 더 민감하게 변함을 알 수 있고, 특히 FIG 6에서 Ag L-line의 강도는 두께에 따라 급격히 변함을 볼 수 있다. 두께에 따른 강도변화가 클수록 두께를 더 정확히 측정할 수 있기 때문에, Ag-target tube가 두께 측정에는 적합할 것이라고 예상할 수 있다.

FIG 7은 W-target tube와 Ag-target tube를 이용하여 필름의 두께에 따른 투과율을 측정하는 결과이다. X-ray가 물질 내부를 통과할 때 x-ray 강도는 다음과 같이 지수함수적으로 감소한다.

$$I = I_0 \exp(-\mu\rho d) \dots\dots\dots (2)$$

여기서, I_0 와 I 는 각각 흡수층을 통과하기 전과 통과한

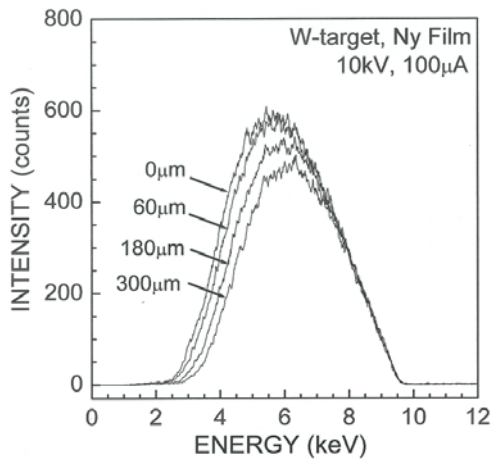


FIG 5 Energy distribution of transmitted x-ray with various thickness of Ny film. W-target tube.

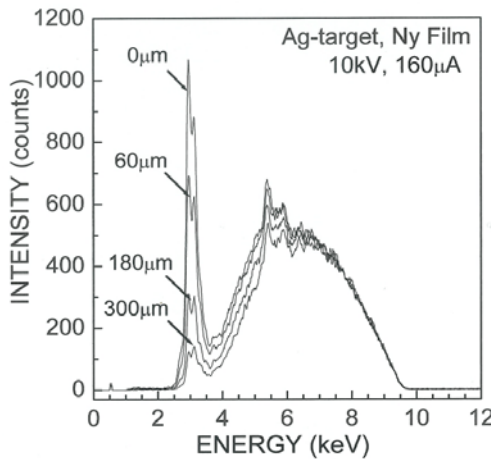


FIG 6 Energy distribution of transmitted x-ray with various thickness of Ny film. Ag-target tube.

후의 x-ray 강도이고, μ 는 질량흡수계수(Mass absorption coefficient cm^2/g)이고, ρ 는 흡수층 물질의 밀도(g/cm^3)이고, d 는 흡수층의 두께이다. FIG 7은 필름을 투과하기 전의 선량(I_0)과 투과한 후의 선량(I)을 측정하여 투과율($I/I_0 \times 100$)로 표시한 것이다. 두 tube 모두 예상대로 필름 두께에 대하여 지수함수적으로 변하고 있음을 확인할 수 있다. 또 W-target tube보다는 Ag-target tube의 투과율이 필름의 두께 변화에 더 민감함을 볼 수 있는데, 이것은 FIG 6에서 보인 것과 같이 3 keV 근처의 특성 x-ray 강도가 film의 두께에 따라 급격하게 변하기 때문에 나타난 것이다. 에너지가 낮을수록 투과율이 두께에 더욱 민감하게 변함을 알 수 있는데, 이것은 x-ray의 에너지가 낮을수록 물질에 잘 흡수되기 때문이다. 또 Ny 필름이 PP 필름보다 x-ray가 더 많이 흡수되는 것으로 관측되었다.

종합하면, 두 가지 tube 모두 수십에서 수백 μm 의 필름 두께 측정에 적용할 수 있음을 확인하였다. 실제로 현장에서 필름두께를 측정할 때는 필름의 특성과 두께를 고려하여 적절한 선량과 에너지를 선택하여야 한다. W-target tube는 동일한 관전압과 관전류에서 선량이 충분하기 때문에 다소 두꺼운 필름 혹은 흡수율이 높은 필름의 측정에 유리한 반면, Ag-target tube의 경우 선량은 다소 적지만 투과율이 두께에 민감하기 때문에, 얇은 필름 혹은 흡수율이 낮은 필름의 측정에 더 유리함을 알 수 있었다.

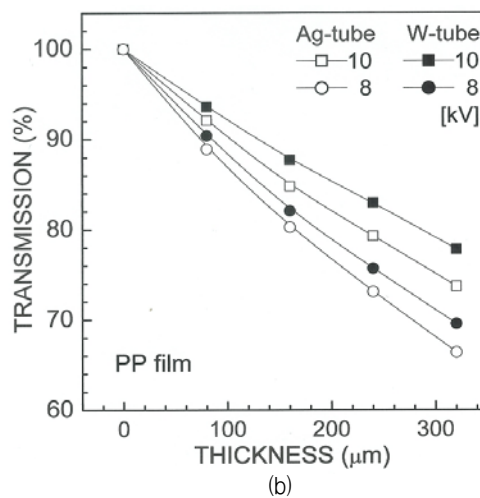
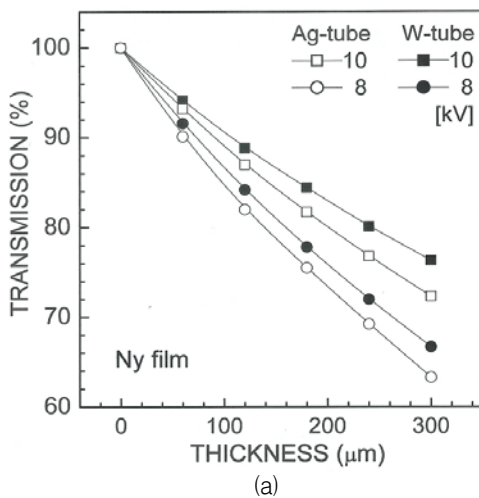


FIG 7 Transmission of x-ray with various thickness of (a) Ny film and (b) PP film.

IV. 요약

수십에서 수백 μm 영역의 필름 두께 측정에 적용하기 위한 Ag-target 투과양극형 x-ray tube를 개발하고 특성을 조사하였다. 10 kV 부근의 관전압에서 Ag-target tube의 연속 x-ray와 특성 x-ray의 에너지 분포 및 선량특성은 알려진 결과와 잘 일치하였고, 먼저 개발되었던 W-target tube와 비교한 결과 예상과 잘 일치하였다. Ny film과 PP film을 이용한 필름 투과실험 결과, Ag-target tube와 W-target tube 둘 다 필름의 두께 측정에 적용할 수 있을 만큼 안정된 특성을 보여 주었다. Ag-target tube의 경우, 3 keV 근처의 Ag L-line 때문에 W-target tube에 비해 필름의 두께변화에 대하여 선량이 더 민감하게 변화하였다. 이 결과로부터 상대적으로 얇은 필름 혹은 흡수율이 낮은 필름의 두께 측정에는 Ag-target tube가 더 유리함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2006년 산업자원부 공통핵심기술개발사업[과제번호:10026293]에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] United States Patent 4,034,251 July 5, 1977.
- [2] Comprehensive Analytical Chemistry Volume XXIV G.Svehla 1989 ELSEVIER p70.
- [3] X-rays in Theory and Experiment. Arthur H. Compton 1967 D.VAN NOSTRAND COMPANY, INC. p89
- [4] S. S. Kim, D. Y. Kim, J. Kor. Vac. Soc. **16**, 305 (2007).
- [5] Analytical chemistry H. A. Liebhafsky 1972 WILEY INTERSCIENCE p16.

Development and Characteristics of the x-ray transmission anode tube for the thickness measurement of film

Sung-Soo Kim, Do-Yun Kim

*Dept. of Techno-marketing, Mokwon Univ. Daejeon 302-729
VSI CO. LTD., Daejeon 305-811*

(Received April 24, 2008)

The x-ray transmission anode Ag-target tube was developed to apply for the thickness measurement of film in the thickness range of several tens~several hundreds μm and its characteristics were evaluated. The energy distribution and dose of x-ray from Ag-target tube was investigated at the tube voltage near 10 kV, and discussed in comparison with that from W-target tube. The energy distribution and dose of x-rays passing through film were measured with various thickness of Ny and PP film. From these results, it was confirmed that our x-ray tube can be applied for the thickness measurement of film.

Keywords : x-ray tube, transmission anode target tube, Ag-target, W-target, thin film, thickness measurement

* [E-mail] sskim@mokwon.ac.kr