

# 40kV용 투과 양극형 x-ray tube의 개발 및 특성분석

김성수<sup>1\*</sup> · 김도윤<sup>2</sup>

<sup>1</sup>목원대학교 기술마케팅학과, 대전 302-729

<sup>2</sup>(주)브이에스아이, 대전 305-811

(2008년 3월 31일 받음)

휴대용 XRF (X-Ray Fluorescence) 장치에 적용할 수 있는 40 kV용 투과 양극형 W-Target tube와 Rh-Target tube를 개발하고 특성을 조사하였다. 특성 x-ray의 에너지와 연속 x-ray의 선량특성은 알려진 결과와 잘 일치함을 확인하였고, 최대 선량을 추출하기 위한 양극금속 박막의 최적 두께는 W-target tube의 경우 약 2.6  $\mu\text{m}$ , Rh-target tube의 경우 약 2.7  $\mu\text{m}$ 임을 밝혀내었다. 또한 관전압 40 kV, 관전류 60  $\mu\text{A}$ 로 30분 동안 연속적으로 작동시켰을 때 양극에서의 온도는 50°C를 넘지 않아 휴대용 XRF장치에 적용할 수 있음을 확인하였다.

주제어: 엑스레이관, 투과양극형, 엑스레이형광, 텅스텐, 로듐, 엑스알에프

## I. 서 론

투과양극형 x-ray tube는 1977년 미국의 David J Haas에 의해 처음 개발되어[1] 1990년 후반에 low power x-ray 발생용(soft x-ray 발생용)으로 주목받기 시작하였다. 투과양극형 x-ray tube는 Be이 x-ray 투과율이 매우 높다는 특성을 이용하여 얇은 Be window에 금속을 코팅하여 양극으로 사용한 것이다[2], 이것은 양극 반사형 tube에 비해 부피가 작아 소형화시킬 수 있는 장점이 있는 반면, high power x-ray 발생용으로 사용할 경우 양극에서 발생하는 열이 문제가 된다. X-ray tube의 양극에 도달하는 전자 에너지의 대부분은 열에너지로 바뀌고, 0.1%미만의 에너지만 x-ray를 발생하는데 기여하기 때문에 양극에는 많은 열이 발생한다.[3] 그러므로 수십에서 수백 kV의 관전압을 연속적으로 사용하는 경(hard) x-ray 발생용 튜브일 경우, 양극 금속의 과열방지를 위한 냉각장치가 반드시 필요하다. 그러나 휴대용 x-ray 발생장치에 사용할 경우에는, x-ray를 연속적으로 사용하지 않고 잠깐 잠깐 사용하기 때문에 다소 높은 에너지의 전자를 사용하더라도 양극에서 발생하는 열은 문제가 되지 않을 수 있다. 현재 상용화된 휴대용 XRF 장치에서 40 kV 정도를 쓰고 있다. 본 연구진은 제진기에 적용하기 위한 10kV용 투과 양극형 W-Target tube를 개발하여 안정적인 특성을 확인한 바 있다.[4] 본 연구에서는 휴대용 XRF (X-Ray Fluorescence) 장치에 적용할 수

있는 40 kV용 투과양극형 W-Target tube와 Rh-Target tube를 개발하고 특성을 조사하였다.

## II. 40kV 투과 양극형 x-ray tube의 개발

FIG 1은 투과 양극형 x-ray tube의 개략도이고, FIG 2는 본 연구에서 개발된 40 kV 투과 양극형 x-ray tube의 사진이다. 양극으로 사용될 금속은 Be window에 코팅되어 있고, Be window는 KOVAR를 이용하여 유리관과 결합시켜 진공상태가 유지되도록 하였다. 필라멘트에서 방출된 전자는 Be window에 코팅된 양극 금속과 충돌하여 x-ray를 발생시키고, 이때 발생한 x-ray는 Be window를 투과하여 밖으로 방출된다. Be window는 x-ray의 흡수율이 매우 낮아 x-ray를 효과적으로 투과시키지만, Be window에 코팅된 금속박막의 두께가 너무 두꺼우면 금속박막의 진공 쪽 표면에서 발생한 x-ray가 금속박막을 투과하여 밖으로 방출되지 못할 수가 있다. 반면 금속박막의 두께가 너무 얇으면 전자가 금속박막에서 x-ray를 효율적으로 발생시키지 못하고 투과해 버릴 수도 있다. 따라서 효과적으로 x-ray를 발생시키기 위해서는 Be window의 두께와 증착된 양극 금속의 두께를 적절히 조절해야 한다. Be window에 증착된 금속에 의해 target이 결정되는데, 증착 두께를 결정할 때 target 금속의 질량도 고려해야 한다. 본 연구에

\* [전자우편] sskim@mokwon.ac.kr

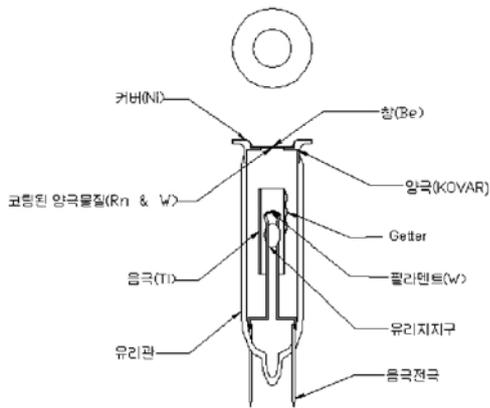


FIG 1 Diagram of x-ray transmission tube

서는 W과 Rh을 증착하여 W-target x-ray tube와 Rh-target x-ray tube, 두 가지 종류를 개발하였다. 금속 박막의 두께는 몬테카를로 시뮬레이션 결과를 바탕으로 하여, 2.2  $\mu\text{m}$ 에서 3.2  $\mu\text{m}$ 까지 0.2  $\mu\text{m}$  간격으로 5가지 종류의 tube를 제작하였고, W과 Rh 박막은 arc sputter deposition 방법으로 증착하였다. 개발된 x-ray tube의 유리관 직경은 15 mm이고, 양극 금속판의 직경은 21 mm, 핀을 포함한 tube의 총길이는 70 mm이다.

### III. 실험 방법

X-ray tube를 구동하기 위한 power supply는 자체개발 하여 사용하였고, X-ray 에너지 분포의 측정은 AMTEK(미국)사의 XR-100CR (25 mm<sup>2</sup> × 500  $\mu\text{m}$ ) Si-PIN detector, MCA8000A 및 PX4 power supply를 사용하였다. X-ray의 선량(dose) 측정은 S.E.International(독일)사의 'X-ray -Gamma-Dosimeter type 27091'를 사용하였다. 선량 측정은 상대적 비교가 중요하기 때문에 x-ray tube와 Dosimeter 사이의 거리를 15 cm로 고정시켜 측정하였고, 다른 곳에서 산란되어 검출되는 photon을 차단하기 위하여 1 mm 두께의 납으로 차폐하였다.

### IV. 결과 및 고찰

#### 1. X-ray 에너지 분포 측정



FIG 2 Picture of the developed x-ray transmission tube

FIG 3은 양극 금속박막의 두께가 2.6  $\mu\text{m}$ 인 Rh-target tube의 관전압에 따른 x-ray 에너지 분포를 측정한 것이다. 관전압에 의해 가속된 전자가 금속박막의 원자핵과 충돌할 때, 단 한 번의 충돌로 전자의 모든 에너지를 잃어버릴 수 있고, 이때 가장 큰 에너지의 photon이 방출된다. 이 photon의 에너지의 크기는 인가된 관전압의 크기와 같아야 한다. FIG 3에서 관전압이 15 kV일 때 측정된 가장 큰 photon 에너지는 약 15keV로써 이 예상과 잘 일치하고 있고, 관전압이 20 kV일 때도 마찬가지이다. Rh 원자의 K shell 에너지 준위가 23.216 keV이므로 이 크기 이상의 관전압을 인가해야 K-line이 관측된다. 따라서 FIG 3에서 관전압이 25 kV일 때도 K-line이 관측되어야 하지만 강도가 약해 거의 나타나지 않는 것으로 보인다. 그러나 30 kV 이상에서는 K-line이 강하게 나타남을 볼 수 있다. Rh 원자의 K-line 에너지는 각각  $K_{\alpha 1}=20.216$  keV,  $K_{\alpha 2}=20.073$  keV,  $K_{\beta 1}=22.723$  keV로 알려져 있고, FIG 3에서 나타난 결과와 잘 일치하고 있다. FIG 4는 동일한 두께로 증착된 W-target tube의 x-ray 에너지 분포를 측정한 것이다. W 원자의 K-line 에너지는 60 keV 근처이므로 40 kV이하의 관전압으로는 관측할 수 없다. 반면 L-line 에너지는 각각  $L_{\alpha 1}=8.398$  keV,  $L_{\alpha 2}=8.335$  keV,  $L_{\beta 1}=9.672$  keV,  $L_{\beta 2}=9.962$  keV,  $L_{\eta 2}=11.286$  keV 로 알려져 있고, FIG 4에서 보는 바와 같이 각각의 특성이 잘 나타나 있다. 즉, 가장 강하게 나타난 peak은  $L_{\alpha 1}$ 과  $L_{\alpha 2}$ -line이 겹쳐서 나타난 것이고, 약간의 에너지차를 가진  $L_{\beta 1}$ 과  $L_{\beta 2}$ -line은 분리되어 나타나 있고,  $L_{\eta 2}$ -line까지도 뚜렷이 나타남을 볼 수 있다.

$L_{\alpha}$ -line의 왼쪽에 나타난 작은 peak은 Ni  $K_{\alpha}$ -line(7.47 keV)으로 판단되며, 이것은 유리관과 Be window를 접합시킬 때 사용한 KOVAR에 포함되어 있는 물질로 보인다.

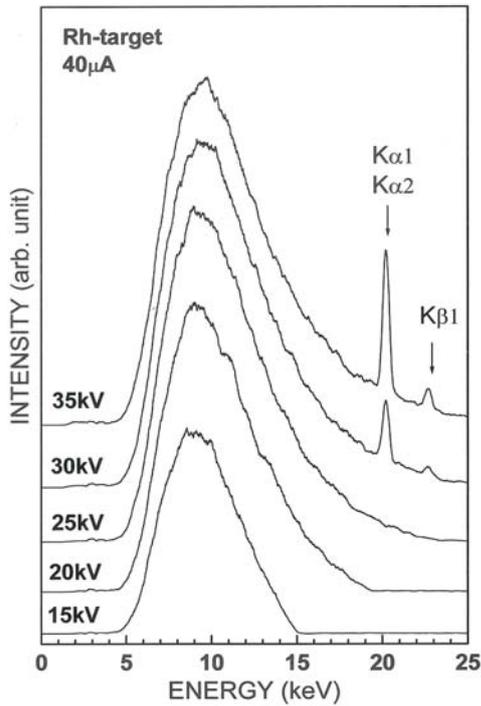


FIG 3 Energy distribution of x-ray with various tube voltages. Thickness of Rh film deposited on Be window is 2.6  $\mu\text{m}$ .

KOVAR는 Fe base에서 Ni(29%), Co(17%), Mn(0.5%)의 합금이다.

## 2. X-ray의 선량(DOSE) 측정

X-ray tube를 XRF에 적용하기 위해서는 충분한 선량을 확보하는 것이 중요하다. 그러므로 본 절에서는 개발된 x-ray tube의 선량 특성을 조사하였다. FIG 5는 금속박막의 두께가 2.6  $\mu\text{m}$ 인 Rh-target tube를 이용하여 관전류의 변화에 따른 선량(위)과 관전압에 따른 선량(아래)를 측정된 것이다. 선량은 단위시간당 방사선량(mSv/h)으로 표시하였고, 1Sv(시버트)는 100 rem에 해당된다. FIG 5에서 보는 바와 같이 선량은 관전류에 비례하고 관전압에 따라서는 2차함수적으로 변함을 알 수 있다. 이 결과는 FIG 3에서 본 바와 같이 Rh-target tube 선량의 대부분이 연속 x-ray이기 때문에 나타난 것이다. 즉, 연속 x-ray의 강도는 (1)식과 같이 관전류와 target 물질의 원자번호에 비례하고, 관전압의 제곱에 비례하는 것으로 알려져 있기 때문이다.[5]

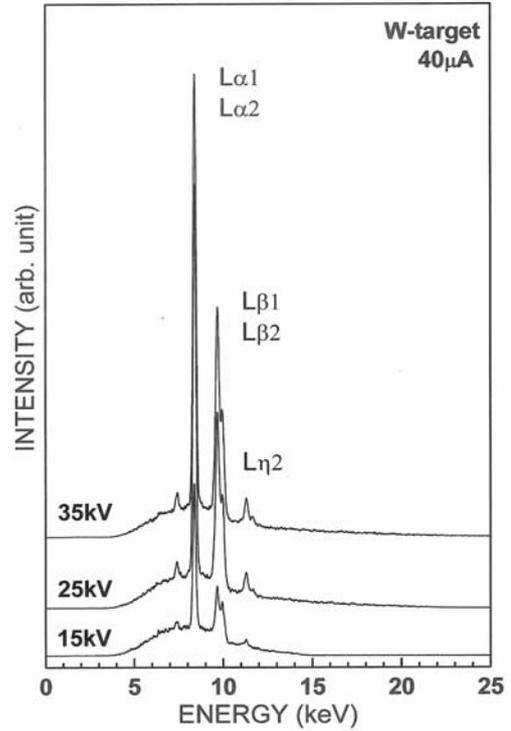


FIG 4 Energy distribution of x-ray with various tube voltages. Thickness of W film deposited on Be window is 2.6  $\mu\text{m}$ .

$$I_c = A_i Z V^m \dots\dots\dots (1)$$

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

FIG 6은 동일한 두께의 W-target tube를 이용하여 관전류의 변화에 따른 선량(위)과 관전압에 따른 선량(아래)를 측정된 것이다. W-target tube의 경우는 (1)식을 따르지 않는데 이것은 FIG 4에서 본 바와 같이 W-target tube의 경우는 특성 x-ray의 영향을 받았기 때문으로 생각된다. 반면에 선량은 Rh-target tube에 비해 월등히 많이 측정됨을 볼 수 있다. 선량에 관해서는 4절에서 다시 설명할 것이다.

## 3. 양극박막의 두께에 따른 선량 비교

FIG 7은 양극 금속박막의 두께를 2.2  $\mu\text{m}$ 에서 3.2  $\mu\text{m}$ 까지 0.2  $\mu\text{m}$  간격으로 증착하여 두께에 따른 선량을 측정된 결과이다. X-ray가 물질 내부를 통과할 때 x-ray 강도

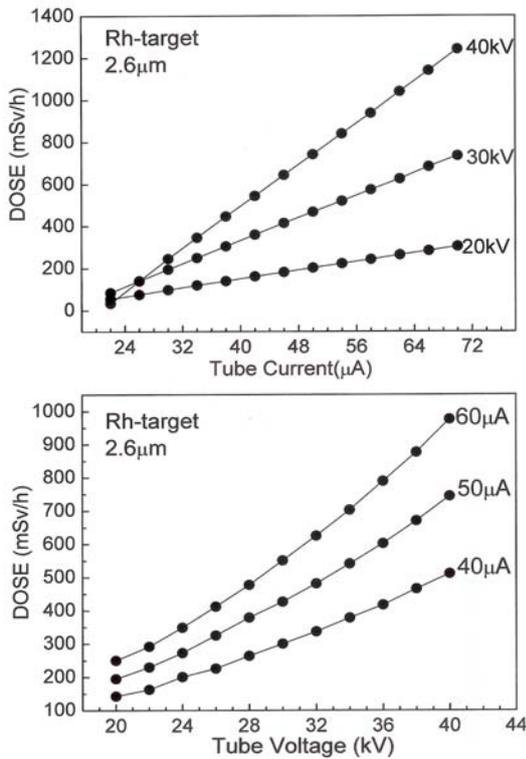


FIG 5 Dose of x-ray with various tube voltages(upper) and with various tube currents(lower). Thickness of Rh film deposited on Be window is 2.6 μm.

는 물질의 밀도나 두께에 따라 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 후의 photon 강도이고,  $\mu$ 는 질량흡수계수(Mass absorption coefficient  $cm^2/g$ )이고,  $\rho$ 는 흡수층 물질의 밀도( $g/cm^3$ )이고,  $d$ 는 흡수층의 두께이다. 양극 금속박막이 너무 얇으면 전자의 모든 에너지가 x-ray를 발생시키는 데 사용되지 못하고 박막을 투과할 수 있기 때문에 선량이 전체적으로 감소할 수 있다. 반면에 양극 금속박막이 너무 두꺼우면, (2)식에서 본 바와 같이 x-ray 강도가 흡수층의 밀도나 질량흡수계수에 민감하기 때문에, 박막의 진공 쪽 표면에서 발생한 x-ray가 금속박막을 투과하여 밖으로 방출되지 못할 수가 있어 역시 선량이 감소할 수 있다. 이러한 특성은 FIG 7에 잘 나타나 있다. W-target tube의 경우는 대략 2.6 μm 근처에서, Rh-target tube의 경우는 2.7 μm 근처에서 선량이 최대가 되는 최적 두께임을 알 수

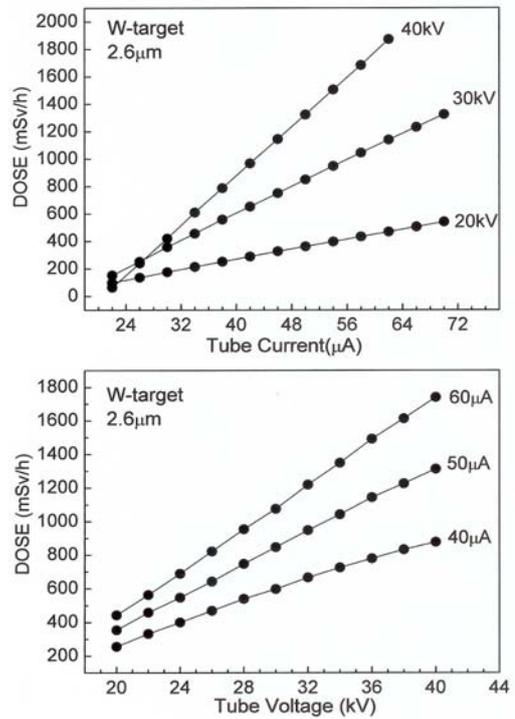


FIG 6 Dose of x-ray with various tube voltages (upper) and with various tube currents(lower). Thickness of W film deposited on Be window is 2.6 μm.

있다. FIG 7은 관전압이 40 kV일 때 측정한 결과이고, 관전압이 달라지면 이 두께는 달라질 수 있다. 또 W-target tube에 비해 Rh-target tube의 최적 두께가 약간 더 두껍게 나타났는데, 이것은 질량이 클수록 x-ray 흡수계수가 커지기 때문에 질량이 큰 W 금속박막의 두께가 더 얇아야 한다는 예상과 일치한다. 따라서 관전압이 40 kV일 때 최대선량을 얻기 위한 금속박막의 최적 두께는, W-target tube는 약 2.6 μm, Rh-target tube는 약 2.7 μm임을 확인할 수 있었다.

#### 4. Rh-target tube와 W-target tube의 선량비(Dose Ratio)

FIG 8은 Rh-target tube의 선량에 대한 W-target tube의 선량비(Dose Ratio)를 계산한 결과이다. 양극 금속박막의 두께가 두꺼워질수록 선량비가 감소하는 경향을 보이고 있지만, 선량비는 대략 1.8 근처임을 알 수 있다. (1)식에서 본 바와 같이, 연속 x-ray의 선량은 원자번호에 비

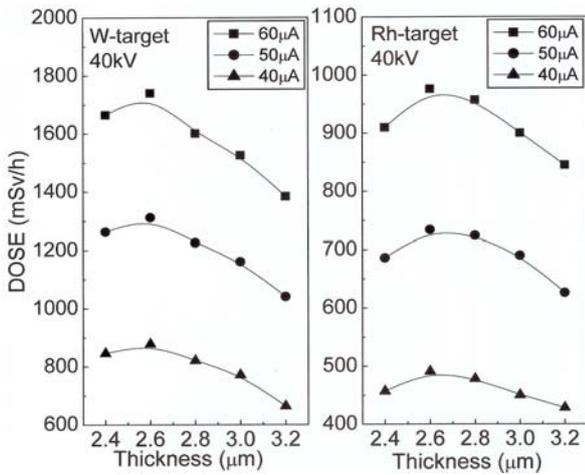


FIG 7 Dose of X-ray with various thicknesses of the W film(left) and the Rh film(right)

레하는 것으로 알려져 있고, Rh 과 W 원자의 원자번호 비는  $N_W/N_{Rh} = 74/45 \approx 1.64$  이다. W-target tube에 포함된 특성 x-ray에 의한 선량을 감안하면 FIG 8의 결과는 알려진 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

### V. 요약

40kV 투과양극형 W-target x-ray tube 및 Rh-target x-ray tube를 개발하고 특성을 조사하였다. 관전압과 관전류에 따른 연속 x-ray의 선량 특성, 특성 x-ray의 에너지, 그리고 Rh-target tube에 대한 W-target tube의 선량 비 등을 측정하고 알려진 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 특히 최대 선량을 추출하기 위한 양극 금속박막의 최적 두께는 W-target tube의 경우 약  $2.6 \mu m$ , Rh-target tube의 경우는 약  $2.7 \mu m$ 임을 밝혀내었다. 관전압 40 kV, 관전류  $60 \mu A$ 로 30분 동안 연속적으로 동작시켰을 때 양극에서의 온도는  $50 \text{ }^\circ C$ 를 넘지 않음을 확인하였다. 결론적으로, 본 연구를 통하여 개발된 40 kV용 투과양극형 W 및 Rh-target x-ray tube의 특성은 알려진 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었고, 선량특성 및 양극에서의 온도특성을 평가한 결과 휴대용 XRF장치에 적용할 수 있음을 확인하였다.

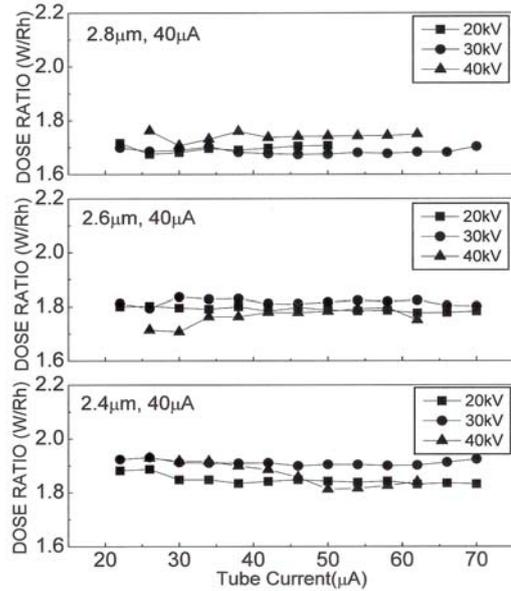


FIG 8 Dose ratio of the W-target tube to the Rh-target tube

### 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** (4), 305 (2007).
- [5] Analytical chemistry H. A. Liebhafsky 1972 WILEY INTERSCIENCE p16.

## Development and its Characteristics of the 40kV x-ray transmission anode target tube

Sung-Soo Kim<sup>1</sup>, Do-yun Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Dept. of Techno-marketing, Mokwon Univ. Daejeon, 302-729*

<sup>2</sup>*VSI CO. LTD., Daejeon, 305-811*

(Received March 31, 2008)

Tungsten and rhodium target tube for a 40 kV x-ray transmission anode was developed to apply to the hand-held XRF(X-Ray Fluorescence) apparatus and its characteristics were evaluated. From the measurement of the energy distribution and dose of x-ray, it was confirmed that our results were good agreements with the known ones. The optimum thickness of metal film deposited on Be window to extract the maximum dose were 2.6  $\mu m$  and 2.7  $\mu m$  in case of W-target tube and Rh-target tube, respectively. When it was continuously worked during 30 min. at 40 kV in tube voltage and at 60  $\mu A$  in tube current, the temperature at target did not exceed 50 °C. Our results reveals that the 40 kV x-ray transmission anode tube can be applied to the hand-held XRF apparatus.

Keywords: x-ray tube, transmission anode, x-ray fluorescence, Tungsten, Rhodium, XRF

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