

W-target 투과 양극형 Soft x-ray tube의 개발 및 특성분석

김성수¹ · 김도윤²

¹목원대학교 기술마케팅학과, 대전 302-729

²(주)브이에스아이, 대전 305-811

(2007년 7월 2일 받음)

W-target 투과양극형 x-ray tube를 개발하고, 특성을 조사하였다. 관전압이 12kV이하에서는 연속 x-ray만 방출되었고, 12kV 이상에서부터 특성 x-ray가 관측되었다. 연속 x-ray와 특성 x-ray의 에너지 분포 및 선량 특성을 조사한 결과 알려진 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 상용화된 제품과의 비교에서, 기존 제품 이상의 성능을 가질 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 x-ray tube는 상용화할 수 있을 만큼 충분히 우수한 특성을 가지고 있음을 확인하였다.

주제어 : 연 x-선, W-표적, x-선 튜브, 투과양극형, 제전기

I. 서 론

X-ray는 의료용뿐만 아니라, 비파괴검사 등 물체의 거시적 성질을 탐지할 수 있고, 원자 수준에서의 미시적인 구조를 규명하는 데에도 중요한 수단이 되고 있다. 현재 의료용 혹은 산업용으로 사용되고 있는 대부분의 x-ray tube는 양극 반사형이다. X-ray tube의 양극에 도달하는 전자 에너지의 대부분은 열에너지로 바뀌고, 0.1%미만의 에너지만 x-ray를 발생하는데 기여하기 때문에 양극에는 많은 열이 발생한다 [1]. 특히 수십에서 수백 kV의 관전압을 사용하는 경(hard) x-ray 발생용 양극반사형 튜브일 경우, 양극 금속의 과열방지를 위한 냉각장치가 반드시 필요하다.

투과양극 x-ray는 1977년 미국의 David J Haas에 의해 처음 개발되었다 [2]. 투과양극 x-ray tube는 Be이 x-ray 투과율이 매우 높다는 특성을 이용하여 얇은 Be window에 금속을 코팅하여 양극으로 사용한 것으로, 양극 반사형 tube에 비해 부피가 작다는 장점이 있다 [3]. 그러나 높은 에너지의 전자가 양극에 조사될 때 양극이 쉽게 가열되기 때문에 의료용 혹은 산업용으로 사용할 수가 없어 거의 잊혀졌다가, 1990년 후반에 전자의 에너지가 비교적 낮은 soft x-ray 발생용으로 다시 주목받기 시작하였다. 투과 양극형 x-ray tube는 튜브 자체를 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 소

형화할 경우, 휴대용 x-ray 발생장치, 휴대용 XRF (X-Ray Fluorescence) 장치, 정전기 제거장치, 필름두께 측정 장치 등에 적용할 수 있어 활용범위가 매우 넓다.

LCD 및 반도체 제조공정에서 정전기의 제거는 대단히 중요하다. 과거에는 코로나 방전이나 기타 방법으로 정전기를 제거했지만, soft x-ray를 이용한 제전기가 여러 가지 장점이 있어 최근에는 이 방법이 공정에 적용되고 있다. 본 연구에서는, 정전기 제거장치에 적용하기 위하여 W-target 투과양극형 초소형 x-ray tube를 개발하고 x-ray 방출 특성을 조사하였다.

II. 투과양극형 W-target soft x-ray tube의 개발

그림 1은 본 연구에서 개발된 투과양극형 soft 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 발생된 x-ray는 Be window를 투과하여 밖으로 방출된다. Be window는 x-ray의 흡수율이 매우 낮아 x-ray를 효과적으로 투과시키지만, 최대의 투과율을 얻기 위해서는 Be window의 두께와 코팅된 양극 금속의 두께가 적절히 조절되어야 한다. 본 연구에서는 W이

* [전자우편] sskim@mokwon.ac.kr,

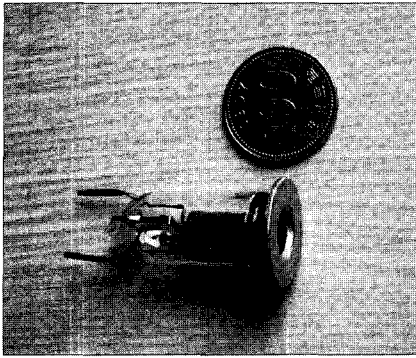


그림 1. 개발된 투과양극형 x-ray tube의 사진.

코팅된 W-target x-ray tube를 개발하였고, 몬테카를로 시뮬레이션 결과를 바탕으로 하여 Be window 및 코팅 금속의 최적 두께를 결정하였다. 개발된 x-ray tube의 유리관 직경은 15mm, 양극 금속 디스크의 직경은 20mm이고, 양극과 유리관을 포함한 총길이는 35mm로써 초소형이다.

III. 실험 방법

X-ray tube를 구동하기 위한 power supply는 자체개발하여 사용하였다. AMTEK(미국)사의 XR-100CR(25mm² 500μm)Si-PIN detector, MCA8000A 및 PX4 power supply를 사용하여 x-ray의 에너지 분포를 측정하였고, S.E.International(독일)사의 'X-ray-Gamma-Dosimeter type 27091'를 사용하여 x-ray의 선량(dose)을 측정하였다. 선량 측정은 상대적 비교가 중요하기 때문에 x-ray tube와 dosimeter 사이의 거리를 14cm로 고정시켜 측정하였고, 다른 곳에서 산란되어 검출되는 photon을 차단하기 위하여 1mm 두께의 납으로 차폐하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. X-ray의 에너지 분포 측정

그림 2는 관전류를 100μA로 고정하고 관전압을 8.0kV에서 12kV까지 변화시키면서 x-ray 에너지 분포를 측정한 것이다. 관전압이 증가할수록 연속 x-ray의 강도가 점점 증가함을 볼 수 있다.

연속 x-ray는 제동복사에 의해 발생하는 것으로, 표적

에 입사한 전자의 에너지는 핵과 여러 번의 충돌과정을 통하여 에너지를 잃게 되고 충돌 때마다 다른 에너지의 photon을 방출한다. 관전압이 곧 전자가 얻는 에너지이고, 전자의 에너지가 증가할수록 핵과 충돌하는 회수가 증가하여 방출되는 photon의 양이 증가하기 때문에, 관전압이 증가할수록 연속 x-ray의 강도는 증가한다.

에너지 스펙트럼 상에서 높은 에너지 쪽의 x-ray 강도가 0이 되는 지점은 단파장단(Short Wavelength Limit)에 해당되는 에너지이다. 입사전자가 원자핵과 단 한 번의 충돌로 전자의 모든 에너지를 잃어버릴 때 가장 큰 에너지를 가진 photon이 방출되고, 이 photon의 파장이 가장 짧기 때문에 단파장단이라고 한다. 단파장단의 파장은 관전압만 주어지면 다음 식에 의하여 계산할 수 있다.

$$\lambda_{swl} = \frac{12.40 \times 10^{-6}}{V} [m] \quad (1)$$

이다. 여기서 V [volt]는 관전압이다.

관전압이 곧 입사전자가 얻는 에너지이기 때문에, 단파장단의 위치도 관전압에 비례하여 변해야 한다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 관전압이 증가함에 따라 단파장단의 위치가 일정하게 증가함을 확인할 수 있다.

관전압이 11kV 이하에서는 연속 x-ray만 나타지만, 12kV가 되면 특성 x-ray L_{α} -line이 뚜렷이 나타남을 볼 수 있고 L_{β} -line의 흔적도 볼 수 있다. L -line은 입사전자의 충돌에 의해 L shell에 있던 궤도 전자가 방출되었을 때 나타난다. L shell의 에너지 준위가 각각 $L_I = 12.1keV$, $L_{II} = 11.54keV$, $L_{III} = 10.21keV$ 이기 때문에 입사전자의 에너지가 11keV 이상이 되어야 L shell의 전자를 방출시킬 수 있다. 따라서 위의 결과는 예상과 일치한다.

그림 3은 관전류를 100μA로 고정하고 관전압을 12kV에서 20kV까지 변화시켰을 때의 x-ray 에너지 분포이다. 관전압이 증가함에 따라 특성 x-ray의 강도가 강하게 증가함을 볼 수 있다. 가장 강하게 나타난 peak은 $L_{\alpha 1}$ 과 $L_{\alpha 2}$ line이 겹쳐서 나타난 것이고, 높은 에너지 쪽으로 $L_{\beta 1}$ 과 $L_{\beta 2}$ 및 $L_{\eta 2}$ -line까지 뚜렷이 나타남을 볼 수 있다. 이 특성 peak들의 에너지는 알려져 있는 W 원자의 L-line 에너지 ($L_{\alpha 1} = 8.398keV$, $L_{\alpha 2} = 8.335keV$, $L_{\beta 1} = 9.672keV$, $L_{\beta 2} = 9.962eV$, $L_{\eta 2} = 11.286keV$)들과 거의 정확히 일치한다.

L_{α} 의 왼쪽에 나타난 작은 peak은 Ni K_{α} -line(7.47keV)

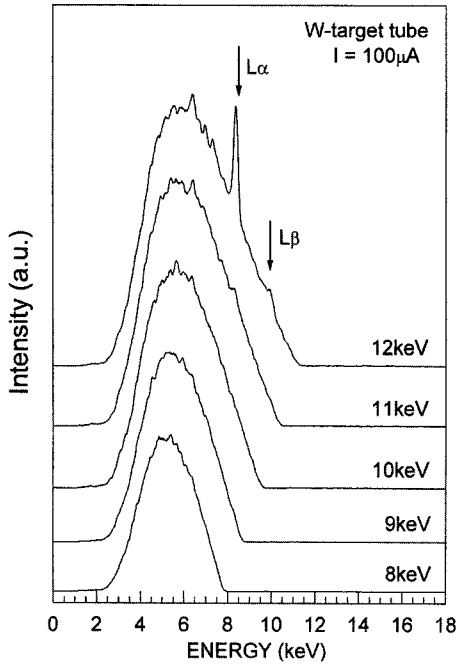


그림 2. 관전압이 100 μ A일 때, 관전압의 변화에 따른 x-ray 에너지 분포.

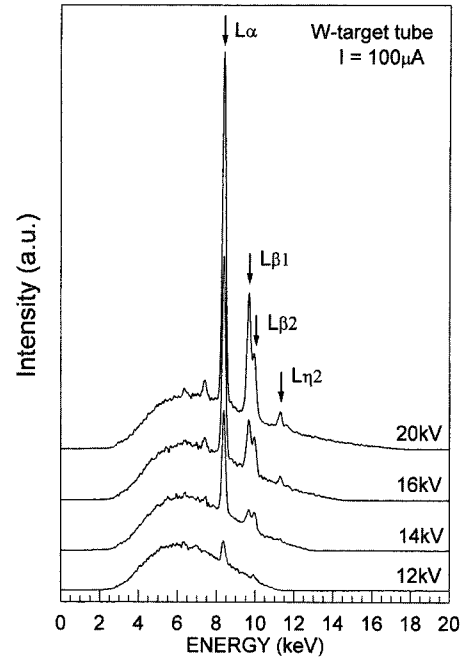


그림 3. 관전압이 100 μ A일 때, 관전압의 변화에 따른 x-ray 에너지 분포.

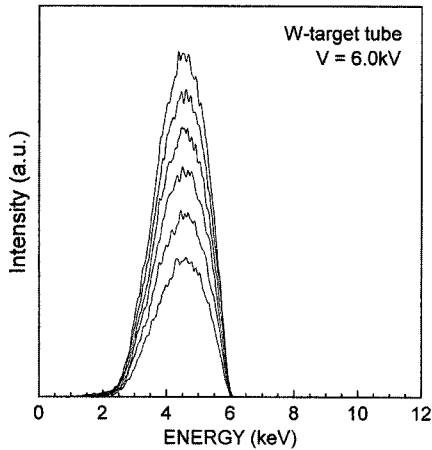


그림 4. 관전압이 6kV일 때 관전류의 변화에 따른 에너지 스펙트럼. 아래쪽부터 관전류가 각각 60, 80, 100, 120, 140, 160 μ A일 때.

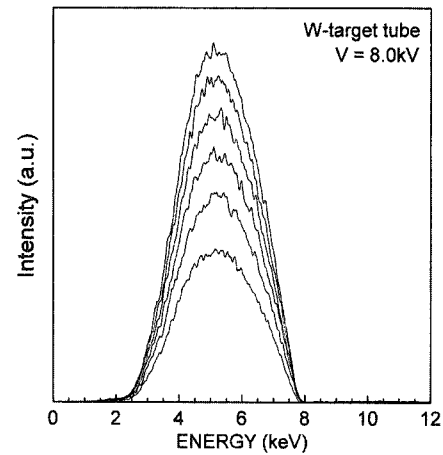


그림 5. 관전압이 8kV일 때 관전류의 변화에 따른 에너지 스펙트럼. 아래쪽부터 관전류가 각각 60, 80, 100, 120, 140, 160 μ A일 때.

으로 판단되며, 이것은 유리관과 Be window를 접합시킬 때 사용한 KOVAR에 포함되어 있는 물질로 보인다. KOVAR는 Fe base에서 Ni(29%) Co(17%), Mn(0.5%)의 합금이다.

그림 4는 관전압을 6kV로 고정시키고, 관전류를 60 μ A에서 160 μ A까지 20 μ A간격으로 변화시키면서 측정한 x-ray 에너지 분포이다. 관전압이 일정하면 target에 충돌하는 전자의 에너지가 일정하기 때문에, 관전류가 변하더라도

단파장단의 위치는 변하지 않는다. 그리고 관전류를 증가시키면 양극에 충돌하는 전자의 양이 증가하기 때문에 양극에서 방출되는 x-ray의 양은 증가해야 한다. 그림 4에서 보는 바와 같이, 관전류가 변해도 단파장단의 에너지는 변하지 않고, 관전류가 증가함에 따라 x-ray의 강도는 증가함을 볼 수 있어 예상과 일치함을 알 수 있다. 그림 5는 관전압을 8kV로 고정하고 그림 4에서와 같은 조건으로 측정한 결과이다. 관전압이 8kV이기 때문에 단파장단에 해

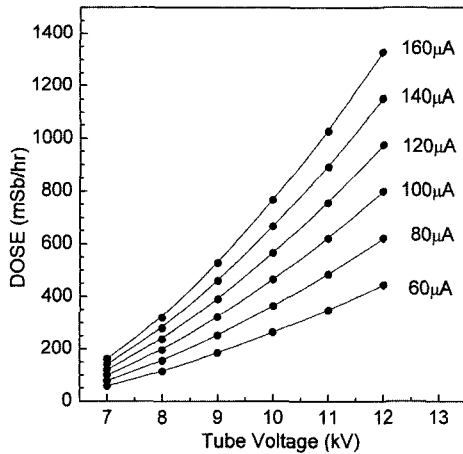


그림 6. 관전류를 고정하고 관전압을 변화시키면서 측정한 x-ray 선량.

당하는 photon의 에너지가 8keV로 변한 것 외는 그림 5의 결과와 일치한다.

4.2. X-ray의 선량(DOSE) 측정

Soft x-ray를 이용하여 정전기를 제거하기 위해서는, 충분한 양의 기체를 이온화시킬 수 있어야 하기 때문에 x-ray의 선량 특성도 매우 중요하다. 그러므로 이 절에서는, 개발된 x-ray tube의 선량 특성을 조사하였다.

그림 6은 관전류를 고정시키고 관전압을 12kV까지 증가시키면서 선량을 측정한 결과이다. 관전압이 증가함에 따라 선량이 2차함수적으로 증가함을 알 수 있다. 그림 7은 관전압을 고정하고 관전류를 변화시키면서 선량을 측정한 것으로, 관류가 증가함에 따라 선량은 1차함수적으로 증가함을 볼 수 있다. 그림 2에서 본 바와 같이, 특성 x-ray는 관전압이 12kV이상에서 나타나기 시작하기 때문에, 그림 6과 그림 7의 결과는 전부 연속 x-ray에 의한 선량으로 볼 수 있다.

연속 x-ray의 강도는 다음과 같이 관전류와 target 물질의 원자번호에 비례하고, 관전압의 제곱에 비례하는 것으로 알려져 있다.[4]

$$I_c = A_i Z V^m \tag{2}$$

여기서, i 는 관전류, Z 는 원자번호, V 는 관전압, m 은 상수이며 약 2이고, A 는 비례상수이다. 그러므로 그림 6과 그림 7의 결과는 알려진 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

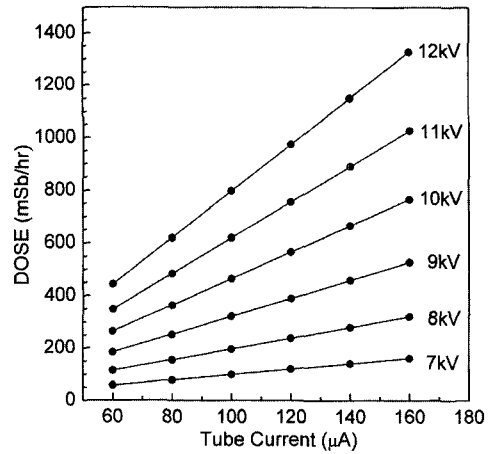


그림 7. 관전압을 고정하고 관전류를 변화시키면서 측정한 x-ray 선량.

그림 6과 그림 7의 실험 결과로부터, 관전류와 관전압만 주어지면 선량을 예측할 수 있는 fitting 함수를 유도할 수 있다. 우선 그림 7에서의 각 직선들을 1차함수로 fitting하면 각각의 관전압에서 기울기와 절편값들을 구할 수 있다. 기울기와 절편값들은 관전압이 증가함에 따라 각각 2차함수적으로 증가하고, 이들을 2차함수로 fitting하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다.

$$Dose = (a_0 + a_1 V + a_2 V^2) + (b_0 + b_1 I + b_2 I^2) I \tag{3}$$

여기서 V 와 I 는 각각 관전압과 관전류이고, 상수값들은 각각 $a_0 = -110.113$, $a_1 = 33.37415$, $a_2 = -2.61769$, $b_0 = 0.06193$, $b_1 = -0.69583$, $b_2 = 0.11895$ 이다. 따라서 (3)식을 이용하면 관전압과 관전류가 주어졌을 때 선량을 바로 예측할 수 있다.

(3)식은 x-ray tube와 dosimeter사이의 거리가 14cm일 때 측정한 선량을 이용하여 유도된 식이기 때문에, 거리가 달라지면 다시 fitting 함수를 구해야 한다. 그렇지만 관전압과 관전류에 따른 x-ray의 선량을 한 개의 fitting 함수로 표현할 수 있다는 것은 중요한 의미를 가진다. 투과양극형 x-ray tube는 W이 증착된 Be window를 양극으로 사용한다. W 박막에 전자가 충돌하면 x-ray가 발생하고 이 x-ray는 Be window를 투과하여 밖으로 방출된다. 따라서 Be window의 두께와 코팅된 W 박막의 두께는 x-ray의 방출 특성을 좌우하는 중요한 요소로서, 이 두께들이 적절하지 않으면 (2)식을 따르는 선량을 얻을 수 없다. 따라서 (3)식의 결과는 개발된 x-ray tube가 최적의 방출특성을 가지고

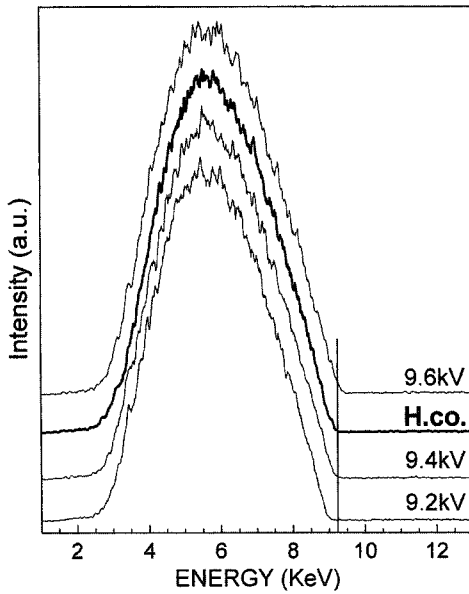


그림 8. H사 Photoionizer의 x-ray 에너지 분포 (H. co.)와 본 연구에서 개발한 x-ray tube의 관전압을 9.2, 9.4, 9.6kV로 변화시키면서 측정된 에너지 분포.

있음을 의미한다. 아울러 관전압과 관전류만으로 선량을 예측할 수 있기 때문에, 사용상의 편의성뿐만 아니라 자동제어가 가능하여 활용 폭이 넓어진다는 것에 의미가 있다.

4.3. 상용화된 제품과의 비교

투과양극형 x-ray tube는 상용화를 목표로 개발한 것이기 때문에 기존 상용화된 제품과 특성 비교가 필요하다. X-ray tube를 1차적으로 적용할 제품이 제전기이기 때문에, 제전기로 시판되고 있는 일본 H사의 Photoionizer와 특성을 비교하였다.

그림 8은 본 연구에서 개발된 x-ray tube의 관전압을 각각 9.2, 9.4, 9.6kV으로 변화시키면서 측정된 에너지 분포를 H 사의 것과 비교한 것이다. 그림 8에서 보는 바와 같이, 관전압이 9.4kV일 때 H사 Photoionizer와 가장 일치함을 알 수 있다. 따라서 H사 Photoionizer의 관전압은 9.4kV를 사용하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 6의 data를 측정할 때와 동일한 조건으로, H사 Photoionizer의 선량을 측정된 결과 선량은 약 803mSv/h였다. (3)식을 이용하면, 관전압이 9.4kV이고 선량이 803mSv/h 일 때의 관전류를 계산할 수 있고, 계산된 관전류는 208μA였다. 이 값은 H사의 것과 동일한 선량(803mSv/h)을 얻기 위하여 본 연구에서 개발한 tube에 인가해 주어야 할 전류

이다. 실제로, 본 연구에서 개발한 x-ray tube에 9.4kV의 관전압과 208μA의 관전류를 인가했을 때 800mSv/h 근처의 선량을 얻을 수 있었다. 또한 관전류를 증가시키면 더 많은 선량을 얻을 수도 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 x-ray tube의 에너지 분포와 선량 특성은, 상용화된 제품에 비해 전혀 손색이 없음을 확인하였다.

V. 요약

투과양극형 x-ray tube를 개발하고 특성을 조사하였다. 관전압이 12kV 이하에서는 연속 x-ray만 관찰되었고, 12kV 이상에서부터 특성 x-ray가 방출되기 시작하였다. 연속 x-ray의 선량은 관전류에 비례하고 관전압의 제곱에 비례하는 것으로 알려져 있고, 본 실험의 결과는 이와 잘 일치함을 확인하였다. 관전압과 관전류에 따른 x-ray의 에너지 분포 및 강도, 그리고 관전압에 따른 단파장단의 변화도 알려진 결과와 잘 일치하였다. 또한 선량 측정 결과로부터, 관전류와 관전압의 함수로 선량을 예측할 수 있는 식을 찾아낼 수 있었다. 특성 x-ray는 관전압이 12kV에서부터 W L_{α} 및 L_{β} -line이 관찰되었고, 16kV에서부터는 L_{γ} -line까지 관찰되었다. 각 emission line의 에너지는 알려진 값과 잘 일치하였다. 상용화된 H사의 photoionizer와 비교한 결과, H사 photoionizer의 관전압이 9.4kV임을 알아낼 수 있었고, 선량은 H사의 것보다 더 많이 방출시킬 수도 있음을 확인하였다. 이상의 결과로부터, 본 연구에서 개발된 x-ray tube는 상용화할 수 있을 만큼 충분히 우수한 특성을 가지고 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] X-rays in Theory and Experiment. Arthur H. Compton 1967 D.VAN NOSTRAND COMPANY, INC. p89
- [2] United States Patent 4,034,251 July 5, 1977.
- [3] Comprehensive Analytical Chemistry Volume XXIV G.Svehla 1989 ELSEVIER p70.
- [4] Analytical chemistry H. A. Liebhafsky 1972 WILEY INTERSCIENCE p16.

Development and Characteristics of the Soft x-ray transmission W-target tube

Sung-Soo Kim¹ and Do-Yun Kim²

¹*Dept. of Techno-marketing, Mokwon Univ. 800 Doan-Dong Seo-Gu Daejeon 302-729*

²*VSI CO. LTD 461-34 Jeonmin-Dong Yuseong-Gu Daejeon 305-811*

(Received July 5, 2007)

The x-ray transmission W-target tube was developed and its characteristics were evaluated. The continuous x-ray was emitted at the tube voltage less than 12kV, and the characteristic x-ray was emitted more than 12kV. From the measurement of the energy distribution and dose of x-ray, it was confirmed that our results are a good agreement with the known ones. Moreover, in comparison with commercial x-ray tube, it was also found that the characteristics of our x-ray tube is better than the commercial one. Therefore we confirmed that the x-ray tube developed in this study is so good that it can be commercialized.

Keywords : soft x-ray, W-target, x-ray tube, transmission target tube,
electrostatic neutralizer

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