

유한요소법과 몬테카를로법을 이용한 X선 튜브에서 전자빔 충격에 의한 열 발생 해석

Analysis of Heat Generation Induced by Electron Impact in X-Ray Tube Using FEM and Monte Carlo Method

김홍배¹, 유태재^{1,✉}
Heungbae Kim¹ and Yoo Tae Jae^{1,✉}

¹ 동서울대학교 항공기계공학부 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Dong Seoul College)
✉ Corresponding author: yootj@dsc.ac.kr, Tel: +82-31-720-2048

Manuscript received: 2014.12.30. / Revised: 2015.3.4. / Accepted: 2015.3.17.

We analyze heat generation as well as temperature distribution induced by accelerated electron impact on a target in a closed x-ray tube. For the sake of accuracy, we use Monte carlo analysis. This method gives accurate energy deposit in a medium with additional information such as secondary and backscattered electron as well as their paths. A Tungsten coated layer is divided by small rectangular cell which accumulate energy loss of primary electron beam. The cells and their accumulated energy datum are used for the input of finite element analysis. The Maximum temperature rising and temperature distribution were analyzed by transient heat analysis. Some temperature parameters such as target size and coating thickness were varied to investigate temperature sensitivity. Temperatures were compared each other to find primary variable that affect temperature rising on the x-ray target. The results will be helpful in development high-resolution x-ray tube and related industries.

KEYWORDS: Electron beam (전자빔), Finite element method (유한요소법), Monte carlo method (몬테카를로법), Heat analysis (열해석)

1. 서론

공학에서 전자빔의 사용은 고전적으로 전자빔 용접¹을 비롯하여 X선 발생 장치,² 나노/마이크로 사이즈의 구조물을 형성하기 위한 리소그래피 (Lithography)³ 등이 있으며, 현재 다양한 응용분야로 그 적용 범위를 확대하고 있다. 이러한 응용에서 중요한 물리적 원리는 전자빔을 가속하여 모재

와 충돌하는 것이며, 특히 X선 발생 장치에서 높은 에너지로 가속된 전자빔을 모재와 충돌시켜 에너지의 일부를 X선으로 변환시킨다. 이때 발생된 X선은 입사 전자빔 에너지의 극히 일부이며(<4%), 입사 전자빔 에너지의 대부분은 모재와의 충돌로 열로 소실된다. 이러한 국부적인 열은 타겟에 손상 및 변형을 초래하며, 국부적인 타겟의 용융을 유발한다. 이러한 타겟의 손상은 X선 장치의 해

상도를 저하시키므로 발생장치 부품 중에서 가장 중요하게 관리되어야 한다. 따라서 발생된 열을 냉각시켜 줄 부수적인 장치가 필요하다.

현재 전자빔과 모재와의 충돌로 인한 열 발생에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있으나,⁴ 대부분 일정한 직경을 가지는 집속 전자빔에 의해 모재 표면에서 발생하는 열을 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 간단하게 계산하는 수준에 머무르고 있다.

그러나 전자빔이 모재와 충돌할 경우, 전자들은 모재 내부에서 연속적으로 에너지를 손실하면서 내부로 침투하며, 최종적으로 모든 에너지를 잃고 모재 내부에서 소실된다. 모재 내부에서 전자들이 상호작용하는 부피는 일반적으로 X선 발생장치에서 사용하는 빔의 직경보다 크므로 보다 정확한 열 발생 연구를 위해서는 이 부피를 계산하여 유한요소 해석에서의 열원으로 사용해야 한다. 이는 스폿(Spot) 사이즈 또는 FWHM(Full-Width at Half Maximum)으로 정의되는 빔의 직경보다 전자들이 모재 내부에서 산란(Scattering)하기 때문이다. 또한 전자들은 모재 내부에서 침투 깊이에 따라서 다른 에너지 손실을 보이므로 전자들로 인한 열 해석에서 모재 내부 각 위치에서의 정확한 에너지손실을 계산해야 한다.

이번 연구에서는 우선 전자빔과 모재의 상호작용을 정성, 정량적으로 계산하기 위해 몬테카를로(Monte Carlo) 해석을 수행하였다. 몬테카를로 해석을 통해 모재 내부의 미소체적에서 전자들에 의한 에너지 손실을 계산하였다. 일정량 이상의 전자들이 모재 내부에서 잃는 에너지를 미소 셀을 이용하여 누적하는 방법을 사용하였다.

몬테카를로 방법을 이용하여 계산된 내부 에너지 손실 데이터를 유한요소법의 내부열원으로 입력하여 모재의 온도 상승을 계산하였다. 비교 연구를 위하여 일정 체적에 전자빔 에너지가 전달된다는 단순 가정된 열 해석을 우선 수행하였다. 이를 몬테카를로 해석을 이용해 정밀하게 구해진 데이터를 이용한 열 해석결과와 비교하였다. X선 타겟의 형상 변수 및 코팅의 두께 등을 변경하여 변수의 변화에 따른 열 발생 차이를 비교하였다.

이번 연구의 목적은 아래와 같다.

1. 몬테카를로 해석을 통한 전자빔의 모재 내부에서의 정밀한 에너지 손실 계산
2. 정밀하게 구해진 모재 내부에서의 전자빔의 에

너지 손실 데이터와 유한요소법을 이용하여 타겟의 열 발생 해석법 확립

3. 코팅의 두께 및 사이즈와 같은 타겟의 조건에 따른 온도 발생 경향 분석

국내에서도 X선 발생장치 및 이를 이용한 비파괴 검사 장비 개발에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있으므로, 관련 장비 개발에 중요한 연구자료가 될 것이라고 생각한다.^{5,6} 현재 국내 X선 튜브제작은 설계 및 해석이라는 단계 없이 외국제품을 모방하는 단계이므로 관련 설계 및 해석 기술의 확립이 필요하다, 또한 최근 이루어지고 있는 전자빔 가속기(Accelerator) 관련 연구에서도 고에너지 전자빔에 의한 타겟의 손상을 연구하는데 도움이 되리라 판단한다.

2. 연구 방법

2.1 몬테카를로 시뮬레이션

비파괴 검사용으로 사용되는 X선 발생장치는 전자빔 소스에서 발생된 전자들을 가속하고, 전자기 렌즈를 이용하여 일정한 직경의 빔으로 집속하여 타겟에 충돌시켜 X선을 발생시킨다. Fig. 1에서 보이는 것과 같이, 전자빔에 의한 열 발생은 모재의 표면에서만 발생하는 것이 아니라 모재 내부에서도 발생하며, 앞장에서 언급한 바와 같이 일반

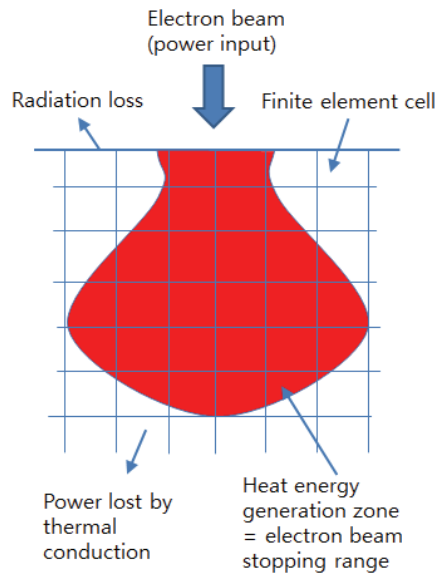


Fig. 1 Schematic illustration of electron-solid interactions

적으로 빔은 모재 내부에서의 산란(Scattering)으로 집속된 전자빔 직경보다 큰 모재 내부에서의 이동경로를 가지므로, 모재 내부에서의 열 발생 범위는 빔의 직경보다 크게 된다. 나아가 에너지를 가지고 입사된 전자들의 일부는 모재와의 충돌 후 에너지를 거의 잃지 않고 모재 외부로 탈출하는 후방산란(Backscattering) 전자가 되므로 이러한 전자들에 의한 열 발생은 계산 전에 미리 제외되어야 한다. 이를 위하여 몬테카를로 시뮬레이션 중에 외부로 탈출하는 이차전자와 후방산란전자들의 에너지를 계산하여 전체에너지에서 차감하였다. 또한 일부의 전자들은 모재와의 상호작용으로 이차전자(Secondary electron)를 발생시키는데, 이차전자의 특징은 작은 에너지를 가지고 생성되므로 열 해석에서 제외하였다.

연구를 위해 몬테카를로 해석은 기 개발된 eMC^{7,8} 프로그램을 이용하여 수행하였으며, 해석 조건은 100 keV의 에너지와 5 um의 빔 직경을 사용하였다. 빔 직경은 spot size 5 um를 FWHM(Full-Width at Half Maximum) 값으로 인식하여 계산하였다. 전체 만개의 전자를 이용하여 계산하였으며, Fig. 1과 같이 모재를 1um 단위의 셀(cell)로 나누고 각 셀에서 전자들의 에너지 손실을 누적하여 계산하였다. 실제 X선 튜브의 타깃은 5um 정도의 텅스텐 코팅 층이 존재하는데, 실제 몬테카를로 해석에서 텅스텐 물성치(Material property)를 입력하여 해석을 수행하였다.

2.2 유한요소해석

X선 발생에서 타깃(target) 모재는 Fig. 2 및 3에서와 같이 같이 일반적으로 열전도도가 높은 다이아몬드(Diamond)와 같은 재질로 이루어진 베이스 위에 텅스텐(Tungsten)을 진공 증착 방식으로 제작한다. 텅스텐 증착 두께는 전자빔의 에너지에 의한 침투 깊이와 전자빔에 의한 발열을 고려하여 계산되어 증착되어 있다. 또한 필요에 따라 수냉 및 공냉을 통한 강제냉각방식이 이루어진다. 이번 연구에서는 전자빔에 의해 타깃에서 발생하는 발열 현상을 해석하는 방법을 확립하는데 목적이 있으므로 수냉 및 공냉과 같은 강제 냉각에 대한 조건은 무시하기로 한다.

X선 튜브는 진공형성 후 밀봉하는 close tube와 진공펌프를 연결하여 사용하는 open tube 로 나뉘인다. 타깃은 발생한 X선이 외부로 전달되는 방법에 따라 분류되는데, 발생한 X선이 타깃을 통하여

방출되는 투과형(Transmission)과 전자빔의 방향과 다른 방향으로 전달되는 반사형(Reflection)이 있다. 이번 연구에서는 투과형 고정 타깃에 대하여 연구를 수행하였으며, Fig. 2에는 일반적인 고정 타깃을 사용하는 투과형 X선 튜브가 보여지고 있다.

상단에 고정된 필라멘트에서 발생된 전자들은 그리드(Grid)에 인가된 전압에 의해 일정한 속력으로 가속되어 인출된다. 가속된 전자들은 마그네틱(Magnetic) 렌즈에 의해 고정형 X선 타깃에 미소직경을 가지는 빔으로 집속된다. 전자현미경과 같은 구조를 가지지만 디플렉터(Deflector)에 의해 일정한 영역을 스캔(Scan)하는 전자현미경과는 달리 X선 발생장치에서는 스캔 없이 디플렉터에 의해 빔의 미소 위치조정을 하게 된다.

일정한 직경으로 집속된 빔은 타깃에 충돌하고, 타깃에 증착된 텅스텐 모재 속으로 에너지를 잃으며 그 입사 에너지 대부분을 열로 전환시키고 일부를 X선으로 전환한다.

Fig. 2에서 보여지는 것과 같이 고정형 타깃은 발생장치의 하단에 고정되어 있으며, 발생장치 하우징(Housing)에 고정되어 있다. 따라서 발생한 열은 하우징을 통하여 전도되는데, 이번 연구에서는 하우징에 의한 전도 효과를 무시하기로 한다.

고정형 타깃의 경우 타깃 손상에 의한 X선 선명도에 문제가 있으므로 타깃에 부여할 수 있는 최대 에너지를 와트로 정하여 사용한다. 또한 발생한 열은 타깃에 크래터(Crater) 발생과 같은 국부

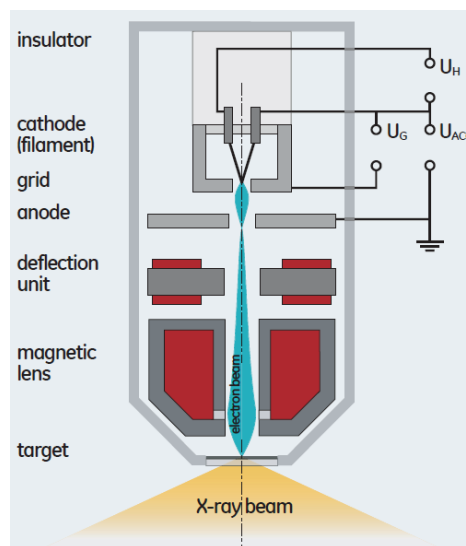


Fig. 2 Schematic illustration of x-ray tube⁹

적인 손상을 야기하므로 X선 발생장치의 수명과도 직접적인 연관관계가 있다. 이를 위하여 코팅두께 및 다이아몬드 베이스의 두께 등의 정확한 계산을 위해 열 발생 연구가 필수적이다.

기 개발된 전자빔 몬테카를로 해석코드를 이용하여 텅스텐 코팅 층 내부 미소 체적에서의 에너지 손실을 계산하였다. Fig. 3에서 보여지는 것과 같이 각각의 미소체적은 유한요소법의 3차원 6면체 요소에 일대일로 대응하여 각 미소체적에서 내부 열 발생 조건으로 변환하여 모재 전체의 열 발생 경향을 파악하였다. 내부 열 발생 조건을 부여할 때 전자빔 에너지 손실 영역을 구형의 셀로 나누어 각각의 셀에 손실된 에너지를 셀 체적당의 내부에너지로 계산하여 입력하였다. 이때 전자빔이 열을 전달하는 영역을 단일 입방체적으로 단순 가정하여 계산하거나 몬테카를로 방법으로 구해진 정확한 영역을 이용하는 방법으로 비교해석을 수행하였다.

유한요소해석은 상용 유한요소 코드 Ansys¹⁰를 사용하였다. 기본 텅스텐 코팅 두께는 5 μ m, 다이아몬드 베이스는 0.5mm로 계산하였다. 원형 타겟의 지름은 기본으로 5mm를 사용하였으며 비교연구를 위하여 10mm로 그 사이즈를 변경하여 사용하였다. Table 1은 해석에 사용한 텅스텐 및 다이아몬드의 물성치(Material properties)를 보여주고 있다.

구속조건으로는 Fig. 1에서 보여주는 것과 같이

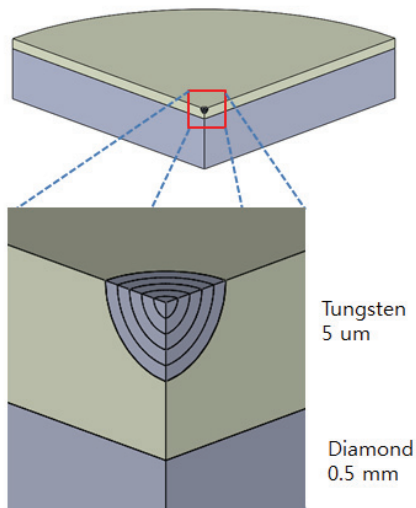


Fig. 3 Schematic illustration of 3D model of x-ray target. The wall is subjected by heat radiation condition

진공에서의 복사(Radiation)에 의한 열손실과 다이아몬드 베이스를 통한 열전도 등을 부여하였고 초기 온도는 22 $^{\circ}$ C로 하였다. 타겟의 외벽은 진공에서의 복사 경계조건을 부여하였다. 해석은 충분한 시간 경과를 가지는 정상상태(Steady state) 과도열해석(Transient thermal)으로 하였으며, 전자빔에 약 6초 정도에서 정상상태에 도달하는 것으로 해석결과를 통해 확인하였다. 타겟 모재는 원형이므로 대칭 경계조건을 부여하여 1/4만을 해석하였다. 식(1)은 해석을 위한 지배 전도방정식을 나타내고 있다.

$$\kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q + \rho C_p U \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 q는 전자빔에 의한 3차원 열원, T는 타겟의 온도, 그리고 k, ρ , C_p 는 열전도율, 밀도, 비열을 각각 의미한다.

유한요소해석을 위해 Fig. 4와 같이 타겟의 1/4에서 전자빔에 의해 열이 발생하는 타겟의 중앙 지점에 집중적으로 많은 유한요소들을 생성하였으며, 텅스텐과 다이아몬드 경계에서는 접촉 조건(contact condition)을 부여 하여 다이아몬드 베이스에 의해 열 전달 및 복사 효과를 포함하였다.

3. 해석결과

Table 1 List of tungsten and diamond properties of materials

	Tungsten	Diamond
Thermal conductivity [W/m·K]	174	2000
Density[kg/m ³]	19300	3513
Specific heat [J/kg·K]	132	472

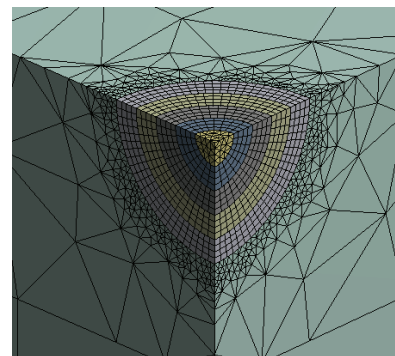


Fig. 4 Mesh model of x-ray target

3.1 몬테카를로 해석

몬테카를로 해석을 통하여 전자빔의 최대 침투 깊이가 50um를 초과하지 않음을 확인하였고 해석은 50um 로 코팅 된 텅스텐 층에서만 이루어졌다. Fig. 5에서 보여지는 것과 같이 전체 만개의 전자들의 경로를 포함하여 부가적으로 이차 전자 및 후방산란 전자들의 경로를 구하였다. 후방산란 전자들은 대부분 그 에너지를 그대로 가지고 외부로 탈출하는데 몬테카를로 해석 결과 전체 입사 에너지 중에서 약 2% 정도의 에너지를 전자들이 가지고 후방산란 되는 것으로 나왔다. 이차전자의 경우 기존의 입사전자들에 의해 자극 된 모재의 원자들에서 생성되며, 대부분 작은 에너지를 가지므로 이번 해석에서는 그 영향을 고려하지 않았다.

해석 후에 유한요소법의 입력 열원의 정확한 분포를 구하기 위해 Fig. 5에서 보여지는 것과 같이 50um×50um 크기의 영역을 정사각형의 1um 길이의 셀로 분할 한 후에 각각의 셀에 전자들의 상대적인 에너지 손실을 누적하여 데이터를 얻었다. 절대적인 에너지 손실을 구하기 위해 전체 입사 에너지를 이용하여 각각의 셀에 누적된 상대적 에너지의 양을 정규화 하고, 이 값을 유한요소해석에서 내부 열원으로 입력하였다. 이때 텅스텐에서 전자들의 에너지 손실 분포는 회전대칭이라는 가정을 사용하였으며, 실제로 진공 증착 된 텅스텐 내부에서 전자들의 에너지 손실 분포가 회전대칭이라는 것을 해석을 통하여 확인하였다. 또한 후방산란(2% 정도)에 의한 에너지 손실과 X선으로 전환되는 에너지(<4%)를 유한요소 해석에 고려하

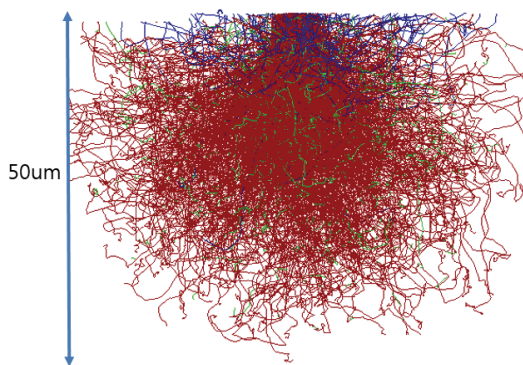


Fig. 5 Monte carlo simulation result (red lines represent primary electron beam path, green and blue lines represent secondary electron and backscattered electron paths, respectively)

기 위해 전체에너지에서 약 5% 정도의 에너지를 감하여 계산하였다.

Fig. 6에서 보여지는 것과 같이 텅스텐 타겟에서 100keV의 에너지를 가지고 입사한 전자들의 에너지 손실은 표면에서 약 5um 부근에서 발생하였다. 또한 최대 표면에서 30um까지 에너지를 전달하며 전체적으로 50um까지 소량의 에너지를 전달하는 것으로 나타났다.

유한요소해석을 위해 전자들의 입사 위치를 기준으로 3차원 구형의 셀로 치환하여 에너지 손실을 계산하였다. 반경을 기준으로 10um, 20um, 30um, 40um, 50um 의 구형 셀에는 각각 10%, 27%, 30%, 23%, 10% 정도의 에너지 손실 발생함을 알 수 있었다. 최대 에너지 손실이 표면에서 5um임에도 불구하고 체적을 고려하면 30um 부근에서 최대의 에너지 손실이 발생하는 이유는 체적을 고려하였기 때문이다. 실제 30um 부근에서 프로젝션 범위 (Projection range)⁹가 형성되며, 물리적 의미는 다수의 전자들이 프로젝션 범위에서 최대의 에너지를 손실한다는 것이다. 이 데이터를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다.

3.2 유한요소해석

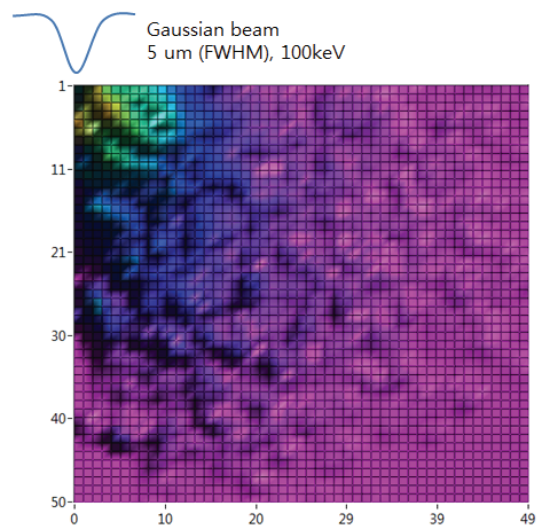


Fig. 6 Mapped Monte Carlo simulation result. Color represents energy density of electron in the medium. Higher and lower dose represented by red and violet, respectively. Unit in the figure is in um

우선 비교해석을 위하여 한 변의 길이가 50um 인 정육면체에 전체에너지가 소모된다고 가정하여 초기 해석을 수행하였다. 최대 온도분포는 Fig. 7에서 보여지는 것과 같이 중앙에서 3600℃ 정도이며 다이아몬드 베이스의 온도는 약 2300℃ 정도로 나타났다. 증착 된 텅스텐의 녹는점이 3400℃ 정도 임을 감안하면 타킷에 손상을 입힐 수 있음을 알 수 있다. 비교연구를 위하여 기본 5mm인 타킷의 직경을 10mm로 하였을 경우 중심에서의 최대 온도는 2940℃로 해석되었다. 따라서 기본적으로 타킷의 온도를 녹는점 이하로 낮추기 위해서는 다이아몬드베이스를 포함한 타킷의 크기를 변경하는 것이 중요하다고 하겠다.

코팅의 두께에 따른 온도 분포의 변화를 알아보기 위해 기본 5um인 코팅의 두께를 100um를 변경하여 해석을 수행하면 중앙에서의 최대 온도는 약 3879℃로 100℃ 정도 높은 온도 분포를 보였다. 또한 코팅의 두께를 0.5mm까지 변화시키면 중앙에서의 온도는 3969℃로 온도가 조금 더 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 대부분의 열이 다이아몬드 베이스에 의해서 전도되는데 코팅의 두께가 두꺼우면 열 전달이 제대로 이루어지지 않기 때문에 판단된다. 다이아몬드 베이스의 열전도율은 텅스텐 코팅보다 약 100배 이상이므로 가능한 코팅의 두께를 작게 하여 많은 열이 다이아몬드 베이스를 통하여 전도 되도록 하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다. 그러나 텅스텐 코팅은 X선이 발생하는 가장 중요한 부분이므로 입사 에너지에 따른 전자들의 침투 깊이를 몬테카를로 방법을 이용

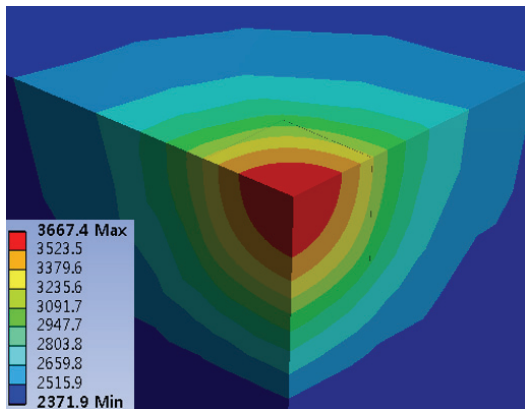
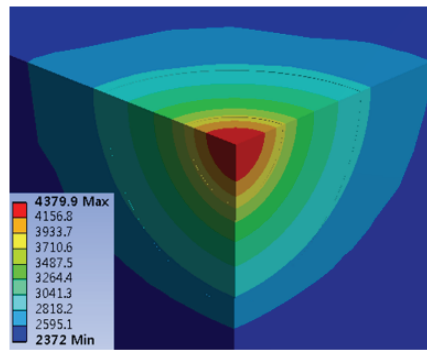


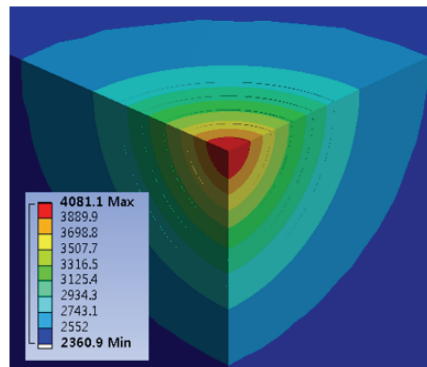
Fig. 7 Graphical FEM simulation result. The results were obtained under assumption that all the input energy concentrated a regular

하여 미리 계산하고, 이 값을 기준으로 최적의 코팅 층 계산하는 것이 유리하다. 즉 코팅 두께가 작을 경우 전자들이 다이아몬드 베이스 속으로 침투하여 파장이 다른 X선을 발생 시키거나 충분한 X선을 생성할 수 없다.

코팅두께와 다이아몬드베이스의 크기 등이 온도변화에 주요한 변수라고 해석할 수 있다. 그러나 타킷의 온도 변화에 보다 중요하고 설계 시에 변화 가능한 변수는 코팅의 두께 보다는 다이아몬드 베이스를 포함하는 타킷의 크기라고 해석할 수 있다. 코팅 두께의 경우 온도의 변화에 민감하다기 보다는 X선 발생이 텅스텐 층에서 이루어지므로 입사에너지에 따른 전자들의 침투 깊이, 즉 X선 발생 깊이와 발생된 X선의 투과 깊이 정도를 계산할 때 중요하다고 판단된다. 코팅의 두께가 두꺼울수록 발생된 X선이 투과 할 경우 그 광학적인 해상도를 상실하므로 코팅 두께의 중요성이 있



(a)



(b)

Fig. 8 Graphical FEM simulation results: The results were obtained with two (a) and five (b) sphere shells. Energy inputs were calculated with Monte-Carlo simulation

다. 따라서 코팅의 두께는 타깃의 설계 시 그 두께를 조절할 수 있는 량이 작다.

몬테카를로 해석을 수행한 후 얻어진 데이터를 이용하여 정확한 유한요소해석을 수행하였다. 3차원 구형 셀을 각각 2개와 5개를 가진 경우로 나누어서 해석을 수행하였다. 일반적으로 셀의 수를 늘리면 몬테카를로 해석으로 얻어진 결과를 더 정확하게 유한요소해석에 적용할 수 있다. Fig. 8에는 그 결과가 보여지고 있는데, Fig. 8(a)에는 2개의 셀로 나누어서 해석할 경우 중심에서 최대 4300℃ 임을 나타내고 있다. 6개의 셀을 이용하여 해석할 경우 Fig. 8(b)에서와 같이 중심에서 최대 4081℃ 임을 알 수 있다. 2개의 구형 셀을 이용할 때 보다 약 300℃ 정도 온도가 낮은 것으로 나타났다. 텅스텐의 녹는 점이 3400℃ 임을 감안하면 국부적으로 용융이 발생하지만 실제 발생장치에서는 강제 냉각이 이루어지거나 장치 하우징에 의해 열 전달이 이루어진다.

Fig. 9에는 해석 결과가 해석 조건과 함께 그래프 형태로 보여지고 있다.

4. 결론

이번 연구를 통하여 아래와 같은 연구 결과를 얻었다.

- 1) X선 발생장치에서 전자들에 의해 발생하는 타깃에서의 열 발생을 몬테카를로 방법과 유한요소법을 이용하여 확립하였다
- 2) 기존의 단순가정에 의한 해석은 전자들의 침투에 의해 발생하는 정밀한 열원데이터를 얻을 수 없었으므로 몬테카를로 방법을 이용하여 정확한 입력 열원 데이터를 획득하였다
- 3) 미소 셀을 이용하여 얻어진 열원 데이터를 유

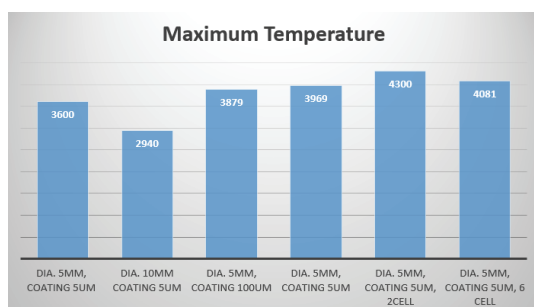


Fig. 9 Comparison of simulation results under various simulation conditions

한요소 입력데이터로 사용하는 방법을 사용하여 최대 온도와 온도 분포를 계산하였다.

- 4) X선 튜브에서 타깃의 사이즈와 코팅 층의 두께 등의 변수를 변경하고 온도분포를 해석하여 온도제어에 민감한 변수들에 대해 연구하였다.
- 5) 전자빔에 의해 타깃에 발생된 온도는 베이스로 사용되는 다이아몬드 의해 대부분의 열이 전도된다.
- 6) 타깃의 사이즈가 커질수록 진공 및 외부에서의 복사와 전도가 유리하므로 타깃의 사이즈를 키우면 온도 발생을 쉽게 제어할 수 있다.

후 기

이 논문은 2014년도 동서울대학교 산업기술연구소의 지원에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

1. Sun, Z. and Karppi, R., "The Application of Electron Beam Welding for the Joining of Dissimilar Metals: An Overview," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 59, No. 3, pp. 257-267, 1996.
2. Hanke, R., Fuchs, T., and Uhlmann, N., "X-Ray Based Methods for Non-Destructive Testing and Material Characterization," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 591, No. 1, pp. 14-18, 2008.
3. Silverman, J. P., "X-Ray Lithography: Status, Challenges, and Outlook for 0.13um," Journal of Vacuum Science & Technology B, Vol. 15, No. 6, pp. 2117-2124, 1997.
4. Tian, Y., Wang, C., Zhu, D., and Zhou, Y., "Finite Element Modeling of Electron Beam Welding of a Large Complex Al Alloy Structure by Parallel Computations," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 199, No. 1-3, pp. 41-48, 2008.
5. Xavis Co. Ltd., "Xavis X-ray Device," http://www.xavis.co.kr/04customer/sub04_3.asp (Accessed 23 March 2015)
6. Techvalley Co. Ltd., "Techvalley X-ray Device," <http://www.techvalley.co.kr/products/normal-ct/> (Accessed 23 March 2015)
7. Kim, H. B., "Development of Ion Beam Monte Carlo

- Simulation and Analysis of Focused Ion Beam Processing,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 29, No. 4, pp. 479-486, 2012.
8. Kim, H. B., “Development of Electron Beam Monte Carlo Simulation and Analysis of SEM Imaging Characteristics,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 29, No. 5, pp. 554-562, 2012.
 9. GE Co., “Inspection & NDT,” <http://www.gemcs.com/en/phoenix-xray.html> (Accessed 23 March 2015)
 10. Ansys Inc., “Ansys Multiphysics Solution,” <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Multiphysics> (Accessed 23 March 2015)