

X-ray tube 내 열유동 해석에 관한 연구

윤동민¹ · 서병석² · 전용한^{*}

상지대학교 소방공학과^{1,*} · 상지대학교 정보보안학과²

A study on the analysis of heat flow in X-ray tube

Dong-Min Yun¹ · Byung-Suk Seo² · Yong-Han Jeon^{*}

Department of Fire Protection Engineering, Sangji University^{1,*}

Department of Information Security, Sangji University²

(Received March 02, 2021 / Revised March 26, 2021 / Accepted March 31, 2021)

Abstract: As the aging ages, the disease also increases, and the development of AI technology and X-ray equipment used to treat patients' diseases is also progressing a lot. X-ray tube converts only 1% of electron energy into X-ray and 99% into thermal energy. Therefore, when the cooling time of the anode and the X-ray tube are frequently used in large hospitals, the amount of X-ray emission increases due to temperature rise, the image quality deteriorates due to the difference in X-ray dose, and the lifespan of the overheated X-ray tube may be shortened. Therefore, in this study, temperature rise and cooling time of 60kW, 75kW, and 90kW of X-ray tube anode input power were studied. In the X-ray Tube One shot 0.1s, the section where the temperature rises fastest is 0.03s from 0s, and it is judged that the temperature has risen by more than 50%. The section in which the temperature drop changes most rapidly at 20 seconds of cooling time for the X-ray tube is 0.1 seconds to 0.2 seconds, and it is judged that a high temperature drop of about 65% or more has occurred. After 20 seconds of cooling time from 0 seconds to 0.1 seconds of the X-ray tube, the temperature is expected to rise by more than 3.7% from the beginning. In particular, since 90kW can be damaged by thermal shock at high temperatures, it is necessary to increase the surface area of the anode or to require an efficient cooling system.

Key Words: X-ray Tube, Cooling Time, Thermal Energy

1. 서 론

세계적으로 고령화 현상이 매우 빠르게 진행됨에 따라 글로벌 의료 기기 시장 또한 가파르게 성장하고 있다. 고령화가 될수록 질병 또한 증가하고 환자의 질병 치료에 사용되는 AI 기술 및 X-ray 장비의 개발도 많이 진행되고 있다. 특히 X 선 촬영은 환자의 상태를 조기에 진단을 할 수 있고, AI 의료기기에서는 정보량이 적은 X-ray 영상으로도 정확한 판독이 가능해졌다.

X 선관은 매우 높은 에너지를 얻기 위해 전자를 가속하여 X 선을 생성한다. X 선관의 Cathode

Filament는 공급된 전원에 의해 가열되며, 에너지를 얻은 열전자는 X-ray tube로 방출된다. Filament에서 방출된 전자는 고전압에 따라 가속되며, 가속된 전자는 Anode Target과 충돌하여 X 선이 발생한다.

여기서 전자 에너지의 1%만 X 선으로 변환되고 99%는 열에너지로 변환된다. 그러므로 Anode의 Cooling time과, 대형병원 등 X 선관을 자주 사용하는 경우는 온도상승으로 인해 X 선의 방출량 증가, X 선량의 차이로 인한 화질저하, 과열된 X-ray tube의 수명이 단축될 수도 있다.

Lee는 X 선관에서 발생한 열을 효율적으로 제거 해주기 위해, 방사율에 따른 열적 특성을 분석하고 X-ray tube에서 작동하는 타겟 온도의 측정 데이터에 관한 연구를 수행하였고¹⁾, 고진공에서 열방사 효과가 클수록 Anode의 온도를 낮출 수 있으므로

^{1,*} 교신저자: 상지대학교 소방공학과
E-mail: kecv76@sangji.ac.kr

Anode의 표면적을 증가시키는 방법이 연구되었다²⁾.

연구들은 실험적인 연구도 중요하지만 시간적·경제적인 이유로 시뮬레이션 연구를 활발히 진행하고 있다. 이러한 시뮬레이션을 위해 Back 등은 유한요소해석을 이용한 백그라인딩 장비의 구조안정성 연구를 하였고³⁾, Lee 등은 유동해석을 통한 MR fluid polishing 시스템의 재료제거 특성 분석을 수행하였다⁴⁾.

또한, X-ray tube Anode는 열이 가장 많이 발생하는 곳이다. 따라서 Anode의 텅스텐은 일정 온도에서 열충격을 받는 특성이 다를 수 있다. Lee 등은 텅스텐의 열충격 손상에 대한 초음파 특성을 평가하였다⁵⁾.

X-ray는 매우 다양한 제품들이 출시하고 있지만 X-ray tube 전체에 대한 연구는 국내에서 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 열유동 시뮬레이션인 STAR-CCM+을 사용하여 X-ray tube Anode에서 발생하는 열(입력전력)에 따라 Anode의 온도변화를 측정하고, Cooling time에서 열의 제거에 대한 유동해석을 실시하였다.

2 수치해석

2.1 프로그램 및 지배방정식

본 연구에서 X-ray tube에 대한 수치해석은 Anode의 온도변화를 해석하는 것이 목적이기 때문에 실제 모델의 크기를 바탕으로 하였으며 X-ray tube 내 Rotor, Shaft, Bracket 등의 부분은 형상을 단순화하여 모델링하였으며, 격자생성, 유동해석은 Simcenter STAR-CCM+를 사용하였다. X-ray tube Anode의 온도변화에 대하여 해석을 수행하였고 Anode의 회전운동을 고려하였다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \oint_A \rho v \cdot da = 0$$

t : time V : volume a : area vector

ρ : density v : velocity

운동량방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho v dV + \oint_A \rho v \otimes v \cdot da = - \oint_A p I \cdot da + \oint_A T \cdot da$$

p : pressure T : viscous stress tensor

비정상상태해석 :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho E dV + \oint_A \rho H v \cdot da = - \oint_A q \cdot da + \oint_A T \cdot v da + \int_V f_b \cdot v dV + \int_V S_u dV$$

E : total energy H : total enthalpy

q : heat flux

2.2. 구조설명 및 해석조건

X-ray tube내에 Anode Target에서의 발생하는 열을 제거해주는 것이 가장 중요하다. Fig. 1은 본 연구에서 해석한 X-ray tube의 내부, Glass bulb 형상을 나타낸 것이다. X-ray tube의 내부에는 Cathode가 상부에 있으며 Cathode Filament에 전압이 가해지면 전류가 흐르면서 가열되어 Anode로 Electronic beam을 방출된다. 이때 Electronic beam 즉, 전자가 고압에 따라 가속되어 X 선을 방출하는 중부에 위치한 Anode 및 Target에 충돌한다. 충돌한 전자가 가지고 있던 운동 에너지는 빛과 열에너지로 변환되며, 1%만 X선이 발생한다. 하부에는 Anode의 열에너지를 분산시키기 위해 Rotor가 Anode를 회전시킨다.

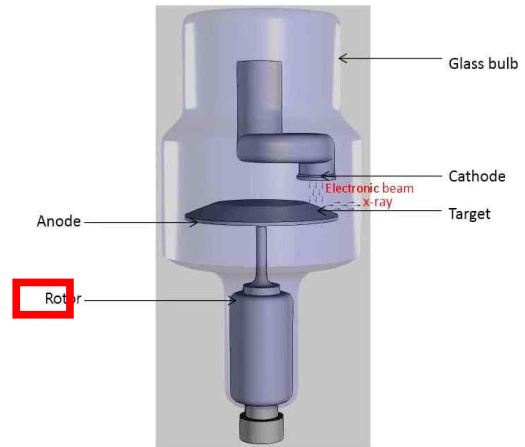


Fig. 1 Schematic diagram of X-ray insert tube

Fig. 2에 본 시설물과 시설물을 격자 형상으로 나타내었다. X-ray tube의 Anode의 온도변화의 정확한 해석을 위해서는 충분한 격자로 이루어져야 한다. 그러므로 Anode와 그 주변부는 작게 하고 Insulation oil은 비교적 크게 하였다. 격자의 종류는 신뢰도가 높은 육면체 격자로 하였고 전체 격자수는 약 1,280,000개 이다.

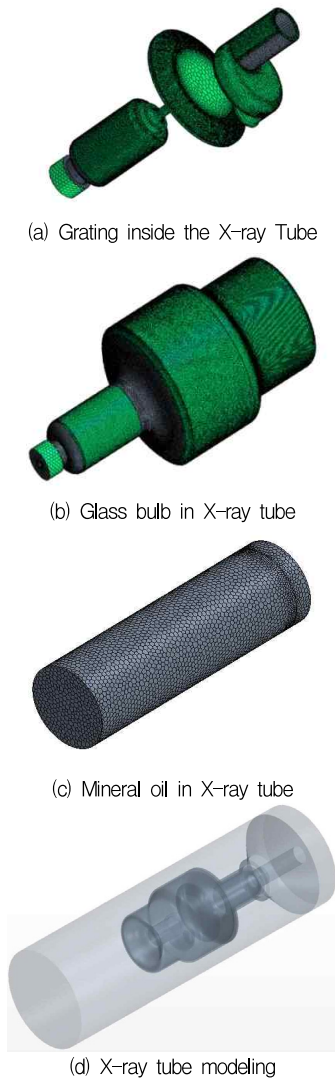


Fig. 2 X-ray tube mesh

Table 1 Properties of X-ray tube

Part	Material	Density [kg/m ³]	Thermal conductivity [W/(mK)]	Specific heat [J/(kgK)]	Emissivity
Anode	Tungsten	19400	134-171	77-89	0.1
	Molybdenum	10200	104-140	262-394	0.18
Cathode	Ni	8908	90.9	730	0.2
Rotor shaft	Molybdenum	10200	104-140	262-394	0.18
Glass bulb	Borosilicate glass	2230	1.2	830	0.07
Rotor	Cu	8810	270-322	388-477	0.2
Insulation oil	Mineral oil	800	0.16	2000	

Cathode와 Anode Target 간에 발생한 X 선의 발생효율이 1% 미만으로 매우 낮기 때문에 Target에서 발생하는 열을 제거해주기 위해 대류 조건을 5W/m²K, 25℃로 하였으며, Density, Thermal conductivity, Specific heat 및 Emissivity는 Table 1과 같은 값으로 주었다.

3. 결 과

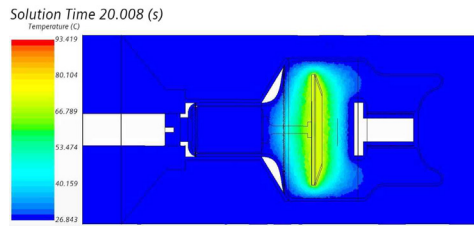
3.1. 60kW의 X-ray tube의 온도 및 냉각

Fig. 3은 One shot 0.1s에서 Cooling time 20s의 시뮬레이션에 나타난 온도변화를 나타내었으며, Fig. 4는 60kW의 X-ray tube Anode에서 발생하는 열(입력전력)이 One shot 0.1s에서 Cooling time 20s의 온도변화를 그래프로 나타내었다. 그 결과 Anode target이 One-shot은 59.2℃에서 377.9℃까지 Cooling time은 377.9℃에서 72℃까지 온도변화를 하였다.

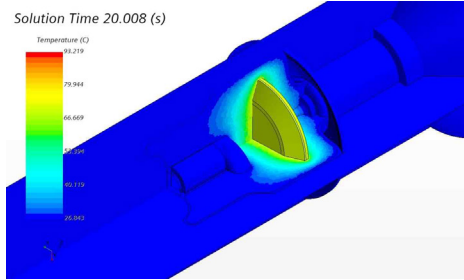
One shot 0.1s은 0s에서 0.03s 동안 55.6%의 온도 상승이 이루어졌으며 0.03s에서 0.06s까지는 22.7%, 0.06s에서 최종 0.1s까지는 21.7%의 온도 상승의 변화가 이루어졌다. 가장 급격하게 변화하는 구간은 0s에서 0.03s으로 나타났다.

Cooling time 20s은 0.1s에서 0.2s까지 66.6%의 급격한 온도 하강이 이루어졌고, 3.0s까지 약 89.64%, 12s까지 95.61%, 20s까지는 약 95.98%의 온도 하강이 이루어졌다. 12s에 와서 Cooling이 거의 다 이루어졌으며, 최종적으로 One-shot 0s에서 20s까지 약 4.02%의 온도가 상승했다.

따라서 0s 때의 약 온도 59.2℃에서 One shot 0.1s ~ Cooling time 20s 동안의 약 온도 72℃로 약 12.8℃ 온도가 상승했다.



(a) Plan view of 60kW X-ray tube anode temperature distribution



(b) Side view of 60kW X-ray tube anode temperature distribution

Fig. 3 60kW X-ray tube anode temperature distribution simulation view

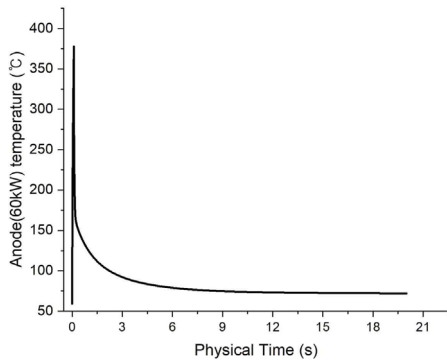


Fig. 4 60kW the anode maximum temperature change during 20s

3.2. 75kW의 X-ray tube의 온도 및 냉각

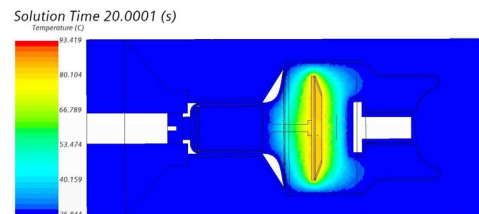
Fig. 5는 One shot 0.1s에서 Cooling time 20s의 시뮬레이션에 나타난 온도변화를 나타내었으며, Fig. 6는 75kW의 X-ray tube Anode에서 발생하는 열(입력전력)이 One shot 0.1s에서 Cooling time 20s의 온도변화를 그래프로 나타내었다. 그 결과 Anode target이 One-shot 동안 67.3℃에서 465.6℃까지 Cooling time은 465.6℃에서 82.23℃까지 온도변화를 하였다.

One shot 0.1s은 0s에서 0.03s 동안 55.7%의 온도 상승이 이루어졌으며 0.03s에서 0.06s까지는 22.6%,

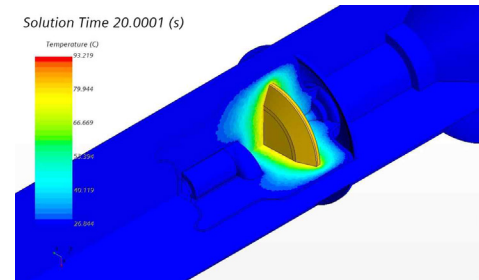
0.06s에서 최종 0.1s까지는 21.7%의 온도 상승의 변화가 이루어졌다. 가장 급격하게 변화하는 구간은 0s에서 0.03s으로 나타났다.

Cooling time 20s은 0.1s에서 0.2s까지 66.7%의 급격한 온도 하강이 이루어졌고, 3.0s까지 약 90.09%, 12s까지 95.89%, 20s까지는 약 96.25%의 온도 하강이 이루어졌다. 12s에 와서 Cooling이 거의 다 이루어졌으며, 최종적으로 One-shot 0s에서 20s까지 약 3.75%의 온도가 상승했다.

따라서 0s 때의 약 온도 67.3℃에서 One shot 0.1s ~ Cooling time 20s 동안의 약 온도 82.23℃로 약 14.93℃ 온도가 상승했다.



(a) Plan view of 75kW X-ray tube anode temperature distribution



(b) Side view of 60kW X-ray tube anode temperature distribution

Fig. 5 75kW X-ray tube simulation anode temperature distribution simulation view

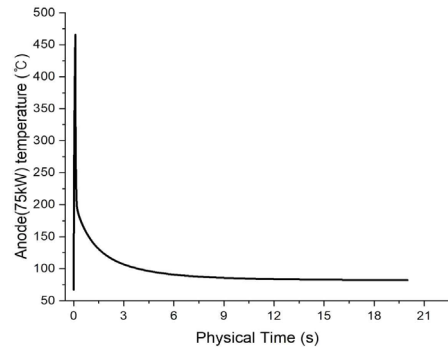


Fig. 6 75kW the anode maximum temperature change during 20s

3.3. 90kW의 X-ray tube의 온도 및 냉각

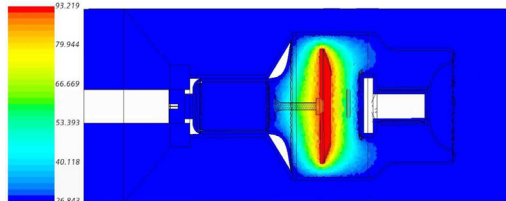
Fig. 7는 One shot 0.1s에서 Cooling time 20s의 시물레이션에 나타난 온도변화를 나타내었으며, Fig. 8는 75kW의 X-ray tube Anode에서 발생하는 열(입력전력)이 One shot 0.1s에서 Cooling time 20s의 온도변화를 그래프로 나타내었다. 그 결과 Anode target이 One-shot 동안 93℃에서 567℃까지 Cooling time은 567℃에서 110.21℃까지 온도변화를 하였다.

One shot 0.1s은 0s에서 0.03s 동안 54.9%의 온도 상승이 이루어졌으며 0.03s에서 0.06s까지는 23.4%, 0.06s에서 최종 0.1s까지는 21.7%의 온도 상승의 변화가 이루어졌다. 가장 급격하게 변화하는 구간은 0s에서 0.03s으로 나타났다.

Cooling time 20s은 0.1s에서 0.2s까지 67.68%의 급격한 온도 하강이 이루어졌고, 3.0s까지 약 90.17%, 12s까지 96.01%, 20s까지는 약 96.15%의 온도 하강이 이루어졌다. 12s에 와서 Cooling이 거의 다 이루어졌으며, 최종적으로 One-shot 0s에서 20s까지 약 3.85%의 온도가 상승했다.

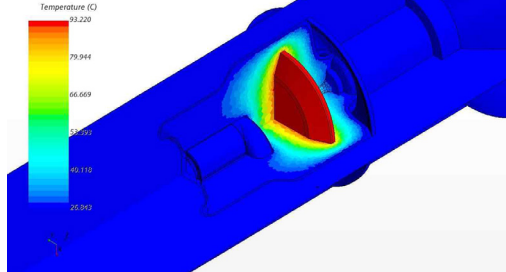
따라서 0s 때의 약 온도 93℃에서 One shot 0.1s ~ Cooling time 20s 동안의 약 온도 110.21℃로 약 17.21℃ 온도가 상승했다.

Solution Time 20 (s)



(a) Plan view of 75kW X-ray tube anode temperature distribution

Solution Time 20 (s)



(b) Side view of 60kW X-ray tube anode temperature distribution

Fig. 7 90kW X-ray tube simulation anode temperature distribution simulation view

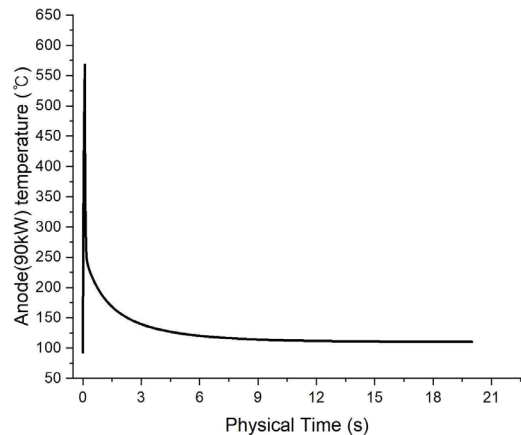


Fig. 8 90kW the anode maximum temperature change during 20s

4. 결 론

본 연구에서는 동일한 시간에서 X-ray tube Anode에서 발생하는 열(입력전력)을 60kW, 75kW, 90kW의 변화를 주었을 때 Simcenter STAR-CCM+으로 유동해석을 통하여 온도의 변화를 측정할 수 있었다.

연구의 결론은 다음과 같이 요약 할 수 있다

1) Simcenter STAR-CCM+를 사용한 유동해석을 통해 X-ray Tube Anode에서 발생하는 열의 분포를 분석하였다.

2) X-ray tube One shot 0.1s의 가장 급격하게 온도 상승의 변화가 있는 구간은 0s에서 0.03s 동안이며, 약 50% 이상의 온도 상승이 이루어지는 것으로 판단된다.

3) X-ray tube Cooling time 20s의 가장 급격하게 온도하강의 변화가 있는 구간은 0.1s에서 0.2s 동안이며, 약 65% 이상의 높은 온도의 하강이 이루어지는 것으로 판단된다.

4) X-ray tube 0s에서 One shot 0.1s 이후 Cooling time 20s이 끝난 시점에서 처음보다 3.7% 이상의 온도 상승된 것으로 예측된다.

5) 텅스텐은 높은 용점과 탄성률도 매우 높고 아주 무거운 금속 중 하나이나 높은 온도에서 열충격은 손상을 가져올 수도 있다. 90kW의 X-ray tube 일 때 One shot 0.1s의 온도는 약 567℃의 높은 온도가 나타남으로 Anode의 표면적을 증가시키거나 효율적인 Cooling system 등이 필요하다.

후기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 광역협력권산업육성사업(P0014699)으로 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

- 1) Lee, S.M. "Thermal Characteristics of Rotating Anode X-ray Tube with Emissivity in Aging", Process for Digital Radiography, Applied Science and Convergence Technology, Vol. 24, pp. 125-131, 2015.
- 2) Lee, S.M. "Compact Anode Design with the Heat Capacity Performance in Rotating Anode X-ray Tube for Digital Radiography", Applied Science and Convergence Technology, Vol. 24, pp. 136-141, 2015.
- 3) Wi, E.W., Ko, M.S., Kim, S.C., Lee, S.H., Back, S.H. "A study on structural stability of Backgrinding equipment using finite element analysis", J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol. 14, No. 4, 2020.
- 4) Sin, B.C., Lim, D.W., Lee, J.W. "A study on material removal characteristics of MR fluid jet polishing system through flow analysis", J. Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol. 13, No. 3, 2019.
- 5) Lee, J.Y., Lee, S.P., Kim, S.W., Bae, D.S., Lee, J.K. "Characteristics of Ultrasonic Wave on Thermal Shock Damage of Tungsten", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 5-10, 2018.

저자 소개

윤 동 민(Dong-Min Yun)

[학생회원]



- 2020년 2월 : 상지영서대학교 소방공학과 (학사)
- 2021년 8월~현재 : 상지대학교 산학협력지원부 연구원

< 관심분야 >
열전달 유동해석

서 병 석(Byung-Suk Seo)

[정회원]



- 2011년 8월 : 연세대학교 전산학과 (박사수료)
- 2012년 4월~2020년 2월 : 상지영서대학교 국방정보통신과 조교수
- 2020년 3월~현재: 상지대학교 정보보안학과 조교수 재직

< 관심분야 >
컴퓨터시뮬레이션, 수치해석, 컴퓨터시스템

전 용 한(Yong-Han Jeon)

[정회원]



- 2008년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2009년 4월~현재 : 상지대학교 소방공학과 교수 재직

< 관심분야 >
열전달 유동해석