

비화재보를 위한 X-ray tube 내 열 유동해석에 관한 연구

윤동민¹ · 전용한[†]
상지대학교 소방공학과^{1,†}

A study on thermal fluid analysis in X-ray tube for non-fire alarm

Dong-Min Yun¹ · Yong-Han Jeon[†]

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

(Received June 07, 2022 / Revised June 28, 2022 / Accepted June 30, 2022)

Abstract: Currently, Korea is an aging society, and it is expected to enter a super-aging society in about 4 years. Accordingly, many X-ray technologies are being developed. In X-rays, 99% of X-rays are converted into heat energy and 1% into light energy (X-rays). 99% of the thermal energy raises the temperature of the anode and its surroundings, and the cooling system is an important factor as overheating can affect the deterioration of X-ray quality and shortened lifespan. There is a method of forced air cooling using natural convection. Therefore, in this study, when X-rays were taken 5 times, Flow analysis was performed on heat removal according to temperature rise and cooling time for the heat generated at the anode of the X-ray tube (input power 60kW, 75kW, 90kW). Based on one-shot, the most rapid temperature rise section increased by more than 57% to 0.03 seconds, A constant temperature rises from 0.03 seconds to 0.1 seconds, It is judged that the temperature rises by about 8.2% or more at one time. After one-shot cooling, the cooling drops sharply from about 60% to 0.03 seconds, It is judged that the temperature has cooled by more than 86% compared to the temperature before shooting. One-shot is cooled by more than 86% with cooling time after 0.1 seconds. As the input power of the anode increases, the cooling temperature gradually increases. Since the tungsten of the anode target inside the X-ray tube may be damaged by thermal shock caused by a rapid temperature rise, an improvement method for removing thermal energy is required when using a high-input power supply.

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

1. 서 론

현재 우리나라는 고령화 사회로 약 4년 후 초고령화 사회에 진입할 것으로 추산되고 있다. 이에 의료산업은 지속적인 의료기술의 발달을 하고 있으며, 건강한 노후를 위해선 주기적인 건강검진을 받음으로써 건강상태를 미리 확인하고 질병을 조기진단할 수 있다. 그 중 X-ray 장비는 병원에서 조기진단에 많이 사용되고 있으며 X-ray 기술 또한 많은 개발이 진행되고 있다.

X-ray의 X선은 진공인 상태의 X-ray tube 내 음극 필라멘트(Cathode Filament)에 전압을 가하는 동시에 양극(Anode)과 고전압이 가해지며 음극 필라멘트

(Cathode Filament)의 가열된 열전자는 X-ray tube로 방출되며 고전압에 의해 가속된다. 가속된 열전자는 양극(Anode)과 충돌하면서 99%는 열에너지로, 1%는 빛에너지(X 선)로 변환된다. 99%의 열에너지는 양극 및 그 주위의 온도를 상승시키는데 과열된 경우 X-ray의 화질저하, 수명 단축에 영향을 줄 수도 있으므로 냉각시스템이 중요한 요소이며, 현재는 냉각수(절연유)를 공급한 강제냉각, 팬을 이용하여 공기를 강제냉각, 자연 대류를 이용하는 방법이 있다.

Lee는 X-ray tube의 긴 수명을 얻기 위해 방사율에 따른 열적 특성을 연구하였고¹⁾, 고진공에서 양극(Anode)의 온도를 낮추기 위한 표면적을 늘리는 연구를 하였다²⁾.

유동해석은 시뮬레이션 연구도 많이 진행되고 있다. Jeon 등은 ANSYS CFX ver. 12를 이용하여 냉이

1,† 교신저자: 상지대학교 소방공학과
E-mail: kecv76@sangji.ac.kr

온수기 냉각시스템에 관한 열유동 해석을 연구하였으며³⁾, Son 등은 FLUNT를 통해 유동해석을 통한 유체제어밸브 시스템의 내부 유동 특성 분석을 연구하였다⁴⁾.

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

하지만 X-ray 연속 촬영 시 tube 내 온도상승으로 발생하는 대류 및 복사열 해석에 관한 연구는 부족한 현실이다. 따라서 본 연구에서는 유동 시뮬레이션 프로그램 STAR-CCM+을 사용하여 X-ray를 5회 촬영(One-shot 0.1s)하였을 때 X-ray tube 내 양극(Anode)에서 발생하는 열(입력전력 60kW, 75kW, 90kW)에 대한 온도상승과 냉각시간(One-shot 0.1s 포함 20s)의 열 제거에 대한 유동해석을 실시하였다.

2. 수치해석

2.1. 프로그램 및 지배방정식

X-ray tube에 대한 수치해석은 tube 내 양극의 온도상승 및 냉각시간의 열 제거를 분석하기 위한 것이며, 실제 모델을 바탕으로 모델링하였다. 양극(Anode), 음극(Cathode), Rotor, Shaft 등 해석을 위해 단순화하여 모델링하였으며 격자생성, 유동해석은 Simcenter STAR-CCM+를 사용하였다. 유동해석을 위한 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 비정상상태해석은 각각 다음과 같다.

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 :

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

E : total energy H : total enthalpy

q : heat flux

2.2. 구조설명 및 해석조건

X-ray tube의 구조는 Fig. 1과 같이 Glass bulb, 양극(Anode), 음극(Cathode), Shaft, Rotor 등으로 되어 있으며, 고전압에 의한 온도상승을 냉각시켜주기 위해 그 외부에는 절연유(Insulation oil)로 구성된다. Glass bulb 내 상부에는 Cathode에서 고전압에 의해 가속된 열전자가 하부의 양극(Anode)으로 방출된다. 양극(Anode)에 충돌되면서 99%는 열에너지로 온도가 상승되고 1%의 빛에너지(X선)로 변환된다. 99%의 열에너지가 분산하기 위해 Shaft는 양극(Anode)을 회전시키며 Glass bulb 외부에 절연유로 냉각이 이루어진다.

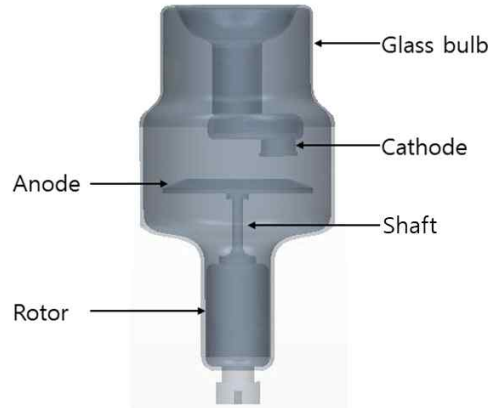


Fig. 1 Schematic diagram of X-ray insert tube

Fig. 2는 X-ray tube를 격자 형상으로 나타내었다. X-ray tube 내 온도상승 및 냉각에 의한 온도변화를 정확히 해석하기 위해서는 충분한 격자가 이루어져야 한다. 양극(Anode) 및 그 주변부의 온도변화를 정확히 해석하기 위해 절연유 부분보다 격자 크기를 작게 설정하였다. 격자는 신뢰도가 높은 육면체 격자로 설정하였고 전체 격자 수는 약 1,279,000개이다.

시뮬레이션 해석에서는 밀도, 열전도도, 비열 등의 물성치에 따라 해석 결과가 다를 수 있기 때문에

정확한 값으로 해석을 해야 한다. 물성치는 Table. 1 과 같은 값으로 설정하였다.

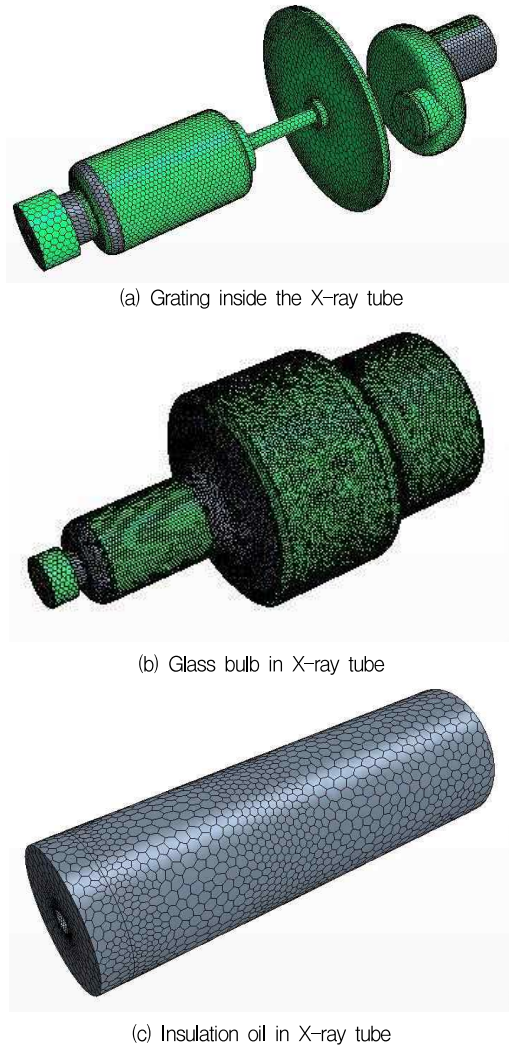


Fig. 2 X-ray tube mesh

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	

3. 결 과

3.1. 60kW X-ray tube 온도변화

Fig. 3은 X-ray를 5회 촬영(1회 촬영 기준 One-shot 0.1s, 냉각시간 19.9s), 100s일 때의 온도변화를 나타낸 것이며 Fig. 4는 5회 촬영의 온도상승과 냉각시간일 때의 온도변화를 그래프로 나타낸 것이다. 그 결과 X-ray를 촬영하였을 때 온도변화는 0.1s, 388.27℃에서 80.1s, 547.08℃로 온도가 상승하였고, 냉각하였을 때 온도변화는 0s, 59.22℃에서 100s, 242.68℃로 온도가 하강하는 것으로 분석된다.

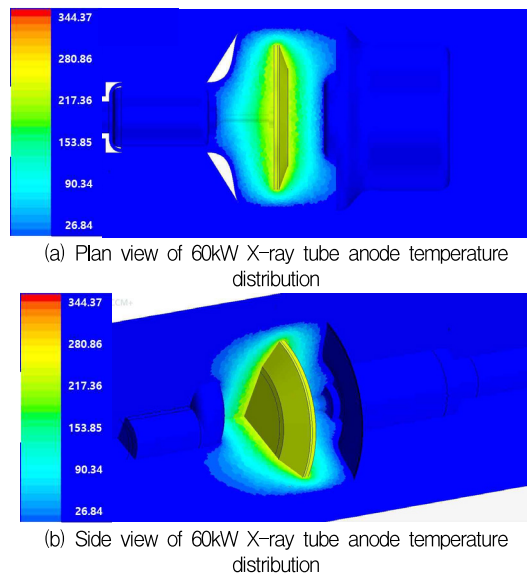


Fig. 3 60kW X-ray tube anode temperature distribution simulation view

1회 촬영 기준 One-shot 0.1s의 가장 급격한 온도 상승 구간은 0.03s까지 약 57% 상승하였으며 0.03s에서 0.1s까지는 비례하게 온도가 상승하였다.

1~2회 촬영 구간에서 온도상승은 13.58℃로 미미한 상승을 보인 반면 그 이후 촬영 구간은 약 45℃씩 상승, 약 9% 증가 된 것으로 분석된다.

1회 촬영 기준 One-shot 0.1s 이후 가장 급격한 냉각 구간은 0.3s까지 약 62% 하강하였으며 10s일 때 약 86%, 20s까지 약 87% 온도가 하강하는 것으로 나타났다. 1회 촬영 이후 0s와 20s의 온도변화는 약 12.78℃이지만 2회 촬영부터 약 40℃ 차이이며 약 11.5%씩 증가하는 것으로 분석된다.

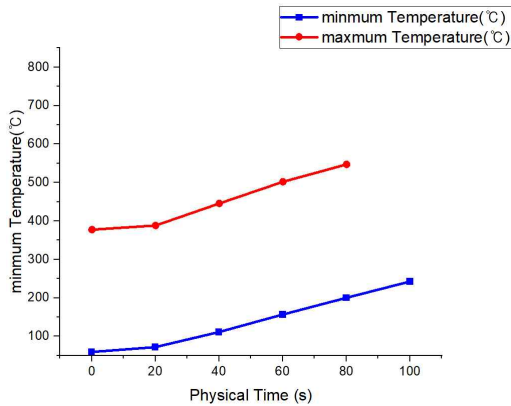


Fig. 4 60kW Anode Temperature change during 100s

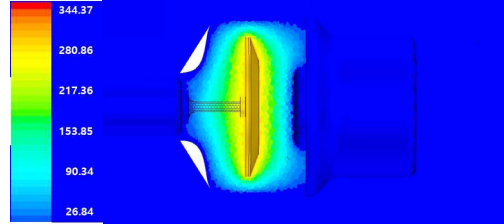
3.2. 75kW X-ray tube 온도변화

Fig. 5는 X-ray를 5회 촬영(1회 촬영 기준 One-shot 0.1s, 냉각시간 19.9s), 100s일 때의 온도변화를 나타낸 것이며 Fig. 6는 5회 촬영의 온도상승과 냉각시간일 때의 온도변화를 그래프로 나타낸 것이다. 그 결과 X-ray를 촬영하였을 때 온도변화는 0.1s, 474.52℃에서 80.1s, 684.3℃로 온도가 상승하였고, 냉각하였을 때 온도변화는 0s, 81.99℃에서 100s, 288.97℃로 온도가 하강하는 것으로 분석된다.

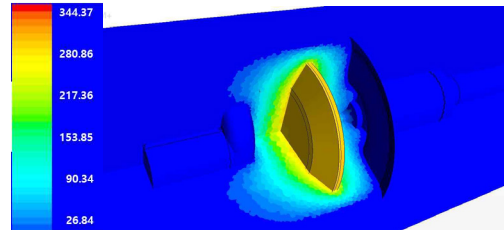
1회 촬영 기준으로 One-shot 0.1s의 가장 급격한 온도상승 구간은 0.03s까지 약 59% 상승하였으며 0.03s에서 0.1s까지는 비례하게 온도가 상승하였다. 온도상승은 약 52℃씩 상승, 약 8.2% 증가 된 것으로 분석된다.

One-shot 이후 가장 급격한 냉각 구간은 0.3s까지 약 65% 하강하였으며 10s일 때 약 87%, 20s까지 약 89% 온도가 하강하는 것으로 나타났다. 1회 촬영 이후 0s와 20s의 온도변화는 약 0.13℃로 거의 같은 온도이지만 2회 촬영부터 약 51℃ 차이이며 약 11.8%씩 증가하는 것으로 분석된다.

60kW X-ray tube와 비교하였을 때 급격한 온도상승 및 냉각 구간은 유사하게 나타났으며 촬영 구간 온도상승은 60kW보다 약 11℃ 증가한 것으로 분석된다.



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



(b) Side view of 75kW X-ray tube anode temperature distribution

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

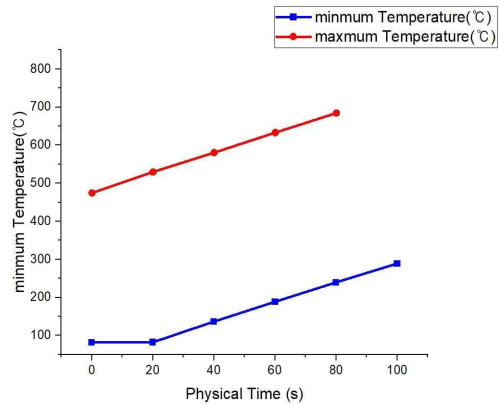
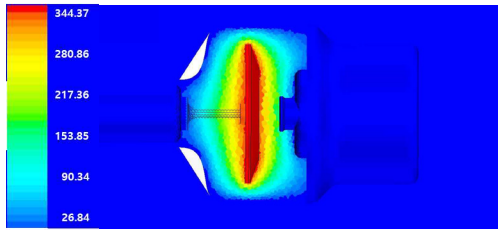


Fig. 6 75kW Anode Temperature change during 100s

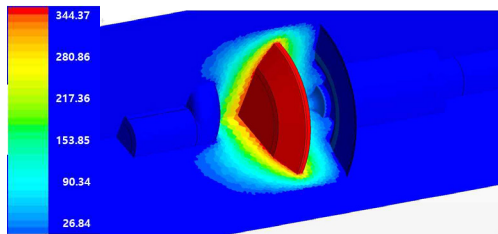
3.3. 90kW X-ray tube 온도변화

Fig. 7은 X-ray를 5회 촬영(1회 촬영 기준 One-shot 0.1s, 냉각시간 19.9s), 100s일 때의 온도변화를 나타낸 것이며 Fig. 8는 5회 촬영의 온도상승과 냉각시간일 때의 온도변화를 그래프로 나타낸 것이다. 그 결과 X-ray를 촬영하였을 때 온도변화는 0.1s, 474.52℃에서 80.1s, 684.3℃로 온도가 상승하

였고, 냉각하였을 때 온도변화는 0s, 81.99℃에서 100s, 288.97℃로 온도가 하강하는 것으로 분석된다.



(a) Plan view of 90kW X-ray tube anode temperature distribution



(b) Side view of 90kW X-ray tube anode temperature distribution

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

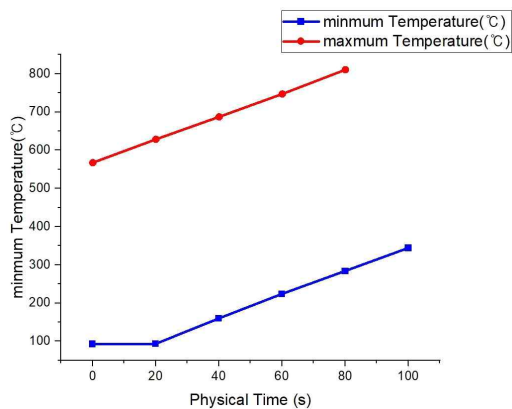


Fig. 8 90kW Anode Temperature change during 100s

1회 촬영 기준으로 One-shot 0.1s의 가장 급격한 온도상승 구간은 0.03s까지 약 60% 상승하였으며 0.03s에서 0.1s까지는 비례하게 온도가 상승하였다. 온도상승은 약 61℃씩 상승, 약 10.7% 증가 된 것으로 분석된다.

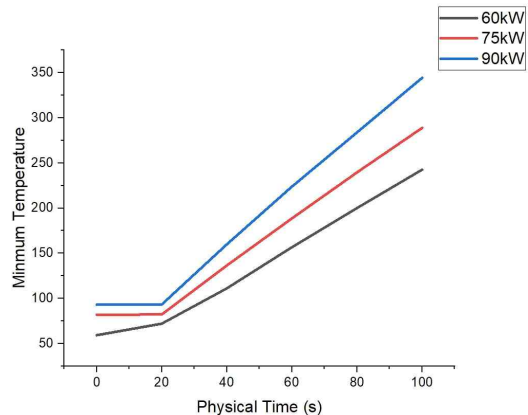
One-shot 이후 가장 급격한 냉각 구간은 0.3s까지 약 64% 하강하였으며 10s일 때 약 87%, 20s까지 약 88% 온도가 하강하는 것으로 나타났다. 1회 촬영 이후 0s와 20s의 온도변화는 약 0.21℃로 거의 같은 온도이지만 2회 촬영부터 약 63℃ 차이이며 약

13.4%씩 증가하는 것으로 분석된다.

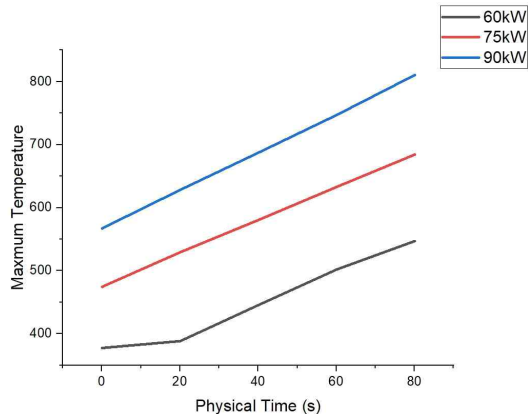
60kW, 75kW X-ray tube와 비교하였을 때 급격한 온도상승 및 냉각 구간이 유사하게 나타났다. 촬영 구간 온도상승은 60kW보다 약 23℃ 증가하였고, 75kW보다 12℃ 증가한 것으로 분석된다.

3.4. 온도변화 비교분석

Fig. 8은 X-ray를 5회 촬영하였을 때 One-shot 0.1s의 온도상승과 냉각시간의 온도변화를 그래프로 나타낸 것이다. 최저온도(냉각시간) 온도변화는 0s에서 20s까지 변화가 적으나 그 이후 온도상승은 비례하게 증가하는 것으로 나타난다. One-shot일 때는 60kW는 2회 촬영 이후 비례하게 증가하며, 75kW, 90kW는 1회 촬영부터 비례하게 증가하는 것으로 분석된다.



(a) Lowest temperature value for 100s of X-ray tube



(b) Highest temperature value for 100s of X-ray tube

Fig. 9 Comparative graph of heat generated from the anode of X-ray tube (input power 60kW, 75kW, 90kW)

4. 결 론

본 연구에서는 유동 시뮬레이션 프로그램인 Simcenter STAR-CCM+로 X-ray를 5회 촬영(One-shot 0.1s)하였을 때 X-ray tube 내 양극(Anode)에서 발생하는 열(입력전력 60kW, 75kW, 90kW)의 온도상승 및 냉각시간을 때 온도변화를 분석할 수 있었다. 연구의 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 1회 촬영 기준 가장 급격한 온도상승 구간은 0.03s까지 약 57% 이상 증가하였으며, 0.03s에서 0.1s까지는 일정한 온도가 상승하고 1회당 약 8.2% 이상 온도상승을 하는 것으로 판단된다.
- 2) 1회 촬영 이후 냉각은 0.03s까지 약 60% 급격히 하강하며, 촬영 이전의 온도와 비교하였을 때 86% 이상 냉각되는 것으로 판단된다.
- 3) One-shot 0.1초 이후 냉각시간으로 86% 이상 냉각되지만, 양극의 입력전력이 높을수록 냉각되는 온도는 점점 증가한다.
- 4) X-ray tube 내 양극(Anode) Target의 텅스텐은 급격한 온도상승의 열충격에 의해 손상이 갈 수도 있으므로 높은 입력전력 사용 시 열에너지의 제거를 위한 개선방안이 필요하다.

후기

이 논문은 2020년도 상지대학교 교내 연구비 지원에 의한 것임.

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, No. 5, pp. 125-131, September 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, No. 5, pp. 136-141, September 2015.

- 3) Jeon, S. O., Lee, S. J., Lee, J. C., Kim, Y. J., “Thermal-flow Analysis of the Cooling System in the Medicated Water Electrolysis Apparatus”, Journal of fluid machinery, Vol. 14, No. 3, pp. 33-38, 2011.
- 4) Son, C. W., Seo, T. I., Kim, K. H., Lee, S. R., “Numerical Analysis of Flow Characteristics inside inner part of Fluid Control Valve System”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol. 19, No. 6, pp. 160-166, 2018.
- 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)

[정회원]



- 2020년 2월~현재: 상지대학교 소방방재학과 석사과정
- 2021년 8월~현재: 상지대학교 산학협력지원부 연구원

< 관심분야 >
열전달 유동해석

전 용 한(Yong-Han Jeon)

[정회원]



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

< 관심분야 >
열전달 유동해석