

고에너지 X-선 영상검출을 위한 CdWO₄ 섬광체 두께와 반사체의 반사율 변화에 따른 광 수집량의 변화

임창휘¹ · 박종원^{2*} · 이정희³

The Change of Collected Light According to Changing of Reflectance and Thickness of CdWO₄ Scintillator for High Energy X-ray Imaging Detection

Chang HwY Lim¹ · Jong-Won Park^{2*} · Junghee Lee³

¹Principal Researcher, M1 International, Daejeon, 34326 Korea

^{2*}Principal Researcher, Ocean System Engineering Research Division, KRISO, Daejeon, 34103 Korea

³Junior Engineer, Ocean System Engineering Research Division, KRISO, Daejeon, 34103 Korea

요 약

컨테이너 검색을 위해 사용되는 고에너지 X-선 영상획득용 검출기는 입사되는 고에너지 X-선을 효과적으로 획득하기 위하여 MeV X-선 수집이 충분히 수행될 수 있는 두께의 섬광체를 사용한다. 컨테이너 검색기에서는 섬광체에 입사되는 X-선의 에너지는 일반적으로 최대 9MeV의 X-선이 사용된다. 그러므로 고에너지 X-선 광자를 효과적으로 수집하기 위해서는 수 cm 두께의 섬광체가 이용되어야 하며 섬광체의 두께는 신호의 수집효율에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 컨테이너 검색에 사용되는 CdWO₄ 섬광체와 소면적의 센서를 활용한 영상검출기의 설계조건에 대한 연구를 기술하고 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 섬광체의 적절한 두께와 섬광체 표면의 반사율에 따른 빛 수집효율을 계산하기 위하여 MCNP6와 DETECT2000을 활용하여 다양한 조건에서 X-선 거동과 빛의 거동에 대한 모사를 수행하였다. 빛 수집효율 계산결과 섬광체 표면의 반사율이 낮은 경우 대략 15~20mm 두께의 섬광체를 선정하는 것이 적합하였으나 반사율이 높아짐에 따라 대략 25~30mm 두께의 CdWO₄ 섬광체를 선정하는 것이 적합한 것으로 확인되었다.

ABSTRACT

The high-energy X-ray imaging detector used for container inspection uses a thick scintillator to effectively acquire X-rays. X-ray incident on the scintillator is generally up to 9MeV. Therefore, to effectively collect X-ray, it is necessary to use a thick scintillator. To collect the light generated by the reaction between X-ray and scintillator, an optical-sensor must be combined with the scintillator. In this study, a study on the design conditions of the detector using a CdWO₄ and a small sensor is described. To calculate the collected light according to the change of the scintillator thickness and the reflectance of surface, MCNP6 and DETECT2000 were used. As a result of calculating, it was confirmed that when the reflectance of the surface was low, it was appropriate to select a scintillator with a thickness of 15 to 20-mm, but as the reflectance increased, it was confirmed that it was appropriate to select a CdWO₄ with a thickness of 25 to 30-mm.

키워드 : CdWO₄, MCNP6, DETECT2000, 컨테이너 검색 시스템, X-선

Keywords : CdWO₄, MCNP6, DETECT2000, Container Inspection System, X-ray

Received 28 October 2020, Revised 10 November 2020, Accepted 19 November 2020

*Corresponding Author Jong-Won Park(E-mail:poetwon@kriso.re.kr, Tel:+82-42-866-3831)

Principal Researcher, Ocean System Engineering Research Division, KRISO, Daejeon, 34103 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.12.1704>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

물류이송을 위해 사용되는 컨테이너의 내부검사는 X-선을 이용하여 수행하게 된다. 하지만 X-선을 이용한 컨테이너 내부검사는 두꺼운 컨테이너 외벽을 투과하여 내부의 화물을 검사하기 때문에 일반적으로 MeV 크기의 고에너지의 X-선을 이용한다[1]. 그러므로 X-선을 이용한 컨테이너 화물검색 시스템에서 사용되는 X-선 검출기는 고에너지 X-선을 효과적으로 수집할 수 있는 검출센서를 사용하여야 하며 이를 위해서 주로 사용되는 검출기의 X-선 센서는 X-선에 대한 높은 반응효율과 생성되는 빛의 수율(light yield)이 높은 CdWO₄가 일반적으로 사용된다[2]. 일반적으로 X-선 영상검출기의 영상화질은 입사되는 X-선의 선질과 산란 X-선의 입사정도에 따라 영상의 화질이 영향을 받으며 이는 시스템의 최적화와 검출기의 반산란격자의 적절한 활용을 통해 극복이 가능하다[3]. 그리고 X-선이 검출기로 입사한 이후의 영상의 화질은 검출기 센서의 구성과 물질선정에 크게 영향을 받게 된다. 검출기 내부의 섬광체에서 생성되는 빛은 광 수집 센서에서 수집되게 되는데 이때 생성되는 빛들의 손실이 최소화될 수 있는 구조로 검출기가 설계되어야 한다. 광 수집센서로 빛이 전달되는 과정에서 중요한 요소는 섬광체의 종류뿐만 아니라 섬광체의 두께, 반사체의 종류 등 빛 전달과정에서 영향을 미칠 수 있는 모든 요소들이 최적으로 설계되어야 한다. 이중 섬광체의 두께는 빛의 발생과 수집에 영향을 미칠 수 있는 요소로 두께가 너무 얇으면 X-선과 반응할 확률이 낮아져 충분한 신호를 획득하지 못하게 되고 반대로 너무 두꺼우면 많은 수의 빛이 발생되지만 광 수집센서로 도달하는 빛의 수가 적어지게 되기 때문에 섬광체의 두께는 영상의 질에 많은 영향을 미치게 된다. 그러므로 섬광체의 두께가 두꺼울수록 빛 수집효율이 선형적으로 증가하는 것이 아니라 일정한 두께 이상이 되면 수집되는 빛의 수는 오히려 감소하게 된다[4,5]. 이러한 현상으로 인해 섬광체의 두께 선정은 좋은 영상을 획득하는데 있어서 중요한 요소가 되며 결과적으로 영상의 대비도와 해상도에 영향을 미칠 수 있다.

픽셀 형태의 검출기에서 섬광체가 픽셀 어레이 구조로 구성되었을 때 발생하는 빛이 섬광체 내부에서 이동하지 않고 외부로 이탈할 가능성이 있다. 이렇게 이탈한 빛들은 검출기 외부로 이동하여 사라지기도 하지만 인

근 섬광체 혹은 픽셀에 영향을 미칠 수 있다[6]. 이러한 현상으로 인해 획득되는 영상의 해상도가 낮아질 수도 있다[7]. 그러므로 픽셀 형태로 섬광체들로 구성된 형태의 검출기는 각 픽셀의 표면에 반사체가 부착되어야 한다[8]. 반사체는 내부에서 발생하는 빛의 이탈을 막아주기 때문에 각 픽셀의 신호크기를 증가시키고 높은 해상도의 영상을 획득할 수 있도록 한다. 섬광체 두께 선정을 위해서 미리 수행할 수 있는 연구 중 하나는 계산을 이용하여 검출기의 효율을 예측하는 방법이 있다. 하지만 신뢰성 있는 계산 결과를 도출하기 위해서는 입사되거나 발생하는 방사선 혹은 빛들의 거동을 실제와 유사하게 모사하여 이를 기반으로 계산이 이루어져야 한다. 그러므로 단순히 수치적 계산만을 이용하여 결과를 도출하는 것이 아닌 확률론적 방법을 포함한 계산을 수행하여야 한다. 이러한 과정은 몬테카를로(Monte Carlo) 기법을 이용하여 주로 수행된다.

이와같이 고에너지 X-선 영상검출기에서 섬광체의 크기와 표면조건은 영상의 화질에 영향을 미칠 수 있으므로 높은 성능의 영상검출기를 설계하기 위해서는 섬광체 표면처리상태에 따른 크기의 선정의 최적화가 필요하다. 또한 본 논문에서는 빛을 수집면을 기존 섬광체의 옆면에 위치하는 형태(픽셀크기×섬광체 두께)와 달리 입사되는 X-선 반대편에 위치시킴으로써 작은 면적(픽셀크기×픽셀크기)의 빛 수집면을 가지는 섬광체에 대해서 기술하고 있다. 빛을 수집하기 위한 센서의 크기가 작을수록 센서에 의한 노이즈가 줄어드는 장점이 있지만 섬광체의 두께에 의한 빛의 수집효율 영향은 더 크게 받게 된다. 이러한 이유로 본 논문에서는 컨테이너 내부검사를 위해 사용되는 영상검출기의 X-선 검출센서인 섬광체의 최적두께와 표면상태에 따른 최적두께의 변화에 대한 연구에 대한 수행함으로써 컨테이너 검색에 적합한 고효율의 고에너지(최대 6MVp와 9MVp) X-선 영상검출기를 설계 및 제작하기 위한 섬광체의 표면상태 변화에 따른 섬광체의 최적 크기의 변화 데이터를 제시하고자 한다.

본 연구에서는 고에너지 X-선 영상획득을 위해 주로 사용되는 CdWO₄의 두께 변화에 따른 신호발생변화에 대한 연구를 몬테카를로 기법을 이용하여 수행하였다. 또한 추가적으로 섬광체 외부의 반사체의 반사율에 따른 신호발생변화에 대한 결과를 도출하였다. 본 연구에서는 방사선의 거동은 MCNP6(version 1.0, Oak Ridge,

TN, USA)를 이용하였고 빛의 거동을 모사하기 위해 DETECT2000 (Laval University, Quebec, Canada)을 이용하였다. 본 논문은 고에너지 X-선을 이용한 컨테이너 검색기의 X-선 영상획득을 위하여 사용되는 섬광체인 CdWO₄의 두께별로 수집되는 빛의 개수변화에 대한 연구결과를 기술하였다.

II. 본 론

섬광체 표면상태와 크기의 변화에 따른 방사선 및 빛의 거동 및 최종 빛의 수집과정을 모사하기 위하여 앞서 기술한 것과 같이 몬테카를로 전산모사 기법을 활용하여 계산을 수행하였다. 2.1, 2.2, 2.3은 이와같은 각 과정을 설명하고 있다. 2.1에서는 전산모사 수행을 위하여 물질정보, 기하학적인형태 등이 포함된 전산모사 모델에 대하여 기술하고 있으며 2.2에서는 섬광체 내에서 X-선 거동 모사하기 위하여 섬광체로 입사되는 X-선의 정보와 생성과정을 기술하고 있다. 그리고 2.3은 빛의 생성과 수집 및 섬광체내에서 X-선에 의해 전달된 에너지와 빛의 수집효율을 기반으로 생성되는 빛의 개수를 계산하는 과정을 기술하고 있다.

2.1. 몬테카를로 전산모사 모델

X-선 영상검출기 내의 섬광체로 입사하는 X-선 광자는 섬광체와 반응하여 산란되거나 섬광체 내부에 흡수되어 에너지를 전달하게 되며 흡수된 에너지가 일정한 크기를 넘게 되면 섬광체를 이온화시켜 빛을 생성시킨다. 이렇게 생성된 빛은 섬광체 내부에서 이동하며 산란, 흡수, 굴절, 반사되게 되며 이중 일부는 검출센서에 의해 수집되어 영상을 위한 신호로 전달된다.

이와 같은 현상을 모사한 결과를 활용하여 앞서 서론에서 기술한 것과 같이 X-선 영상검출용 섬광체의 크기와 표면상태에 대한 변화에 따른 수집효율을 계산하기 위하여 섬광체내에서의 X선과 빛의 거동을 모사를 위한 몬테카를로 기반의 MCNP6와 DETECT2000코드를 이용하였다. 방사선 수송해석을 모사할 수 있는 MCNP6 코드는 매질내에서 광자(photon), 중성자(neutron), 전자(electron) 등 다양한 방사선과 입자의 거동의 모사가 가능한 코드로 다양한 종류의 방사선과 입자의 매질내 반응 및 생성 확률의 라이브러리를 기반으로 몬테카를로

기법을 활용한 거동을 모사할 수 있는 코드이다. 또한, DETECT2000 코드는 굴절계수, 평균이동/흡수 거리, 표면반사율 등의 조건이 포함된 매질내에서 빛의 이동, 반사, 굴절 등의 전반적인 과정을 몬테카를로 기법을 활용하여 모사할 수 있는 코드이다.

그림 1은 X-선이 섬광체와 반응하여 빛을 발생시키고 섬광체에서 발생된 빛이 광 수집센서로 전달되는 과정을 나타내고 있다. 이러한 일련의 과정들을 모사하기 위한 X-선 광자와 전자의 거동에 의한 섬광체내에서의 에너지 전달과정을 먼저 모사한 후 섬광체로 전달된 에너지에 의해 발생하는 빛의 거동을 모사하는 과정으로 진행하였다. 이를 통해 획득한 두 결과물들을 이용하여 최종 광 수집센서로 도달하는 빛의 수를 계산하였다. 본 연구에서 사용된 섬광체는 앞서 설명한 것과 같이 GdWO₄로 모델을 이용하였다. 그리고 크기는 4×4 mm² 크기로 설정하고 두께는 다양하게(5 ~ 40 mm) 구성하였다. 섬광체의 밀도는 7.9g/cm³이며 섬광체의 굴절계수는 2.3으로 설정하였다[3]. 섬광체의 표면은 섬광체 바닥면을 제외한 모든 면을 반사체로 설정하였으며 모든 면은 METAL로 설정하여 도달한 빛은 반사만 가능하며 굴절되지는 않도록 하였다. 그리고 각 면의 반사율은 0.9 ~ 1.0 로 다양하게 설정하였다.

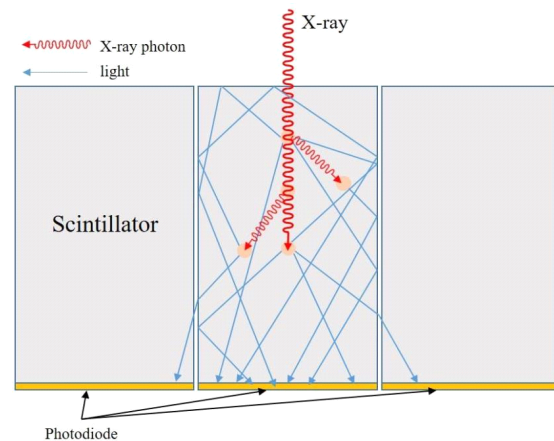


Fig. 1 Movement process of incident X-ray and generated light in the pixelated scintillator

2.2. X-선원

시뮬레이션 수행을 위해 사용된 X-선은 1 ~ 9 MeV의 단일에너지 X-선과 최대값 6과 9 MeV의 에너지를 가지는 X-선 스펙트럼 선원을 이용하였다. X-선원은 MCNP6

코드를 이용하여 생성하였으며 3mm 두께에 텅스텐에 6과 9 MeV의 전자를 충돌시켜 획득하였다. 그림 2는 이와같은 과정으로 생성한 X-선원의 에너지별 크기를 나타내고 있다.

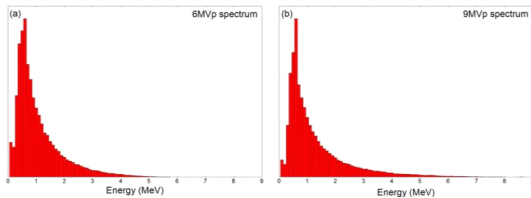


Fig. 2 6MVp(a) and 9MVp(b) x-ray spectra generated using MCNP code

2.3. 광센서에 의해 수집되는 빛의 양

입사되는 X-선은 섬광체 표면에서 섬광체 내부로 들어갈수록 반응할 확률이 감소하게 된다. 그러므로 전산 모사를 이용하여 수집된 빛의 개수를 계산하기 위해서는 섬광체의 깊이 방향으로 일정한 간격으로 각 구간에서 흡수되는 에너지와 각 구간에서 발생하는 빛이 광수집센서에 도달할 확률을 이용하여 계산할 수 있다. 만일 깊이 방향으로 구간을 나누지 않으면 계산된 결과는 깊이 방향으로 각 위치에서 X-선의 반응확률과 발생된 빛의 수집효율을 고려되지 않은 결과가 된다. 그림 3은 이와 같은 일련의 과정들을 도식적으로 나타내고 있다. 그

림의 왼쪽은 X-선이 섬광체로 입사되면서 에너지를 전달하는 과정을 나타내고 있고 오른쪽은 특정위치에서 발생된 빛이 섬광체 내부에서 이동 및 수집되는 과정을 나타내고 있다. 그림에서 섬광체는 $d_1 \sim d_n$ 으로 일정한 크기로 구역이 나뉘어져 있다. 그림에서 기술하고 있는 것과 같이 섬광체 내부로 입사되는 X-선과 섬광체의 반응과정에서 각 구역에 전달되는 에너지는 각각 $E_1 \sim E_n$ 으로 나타내어 질 수 있다. 각 위치에서 흡수되는 X-선 에너지는 MCNP를 이용하여 계산되어진다. 그리고 빛의 수집효율의 계산은 그림 3의 오른쪽에 나타내고 있는 것과 같이 섬광체 내부의 각 층에서 동일한 숫자로 빛을 각각 생성시킨 후 빛 수집면(Light Collection Plane)에서 빛의 수집효율을 계산하는 과정으로 계산하였다. 이와같은 방법을 통해 계산된 각층에 흡수된 X-선 에너지와 각층에서 생성된 빛의 수집효율을 곱하고 섬광체 내부에서 흡수된 에너지에 의해 생성되는 빛의 수를 나타내기 위하여 1개 빛이 생성되기 위해 필요한 에너지(이온화에너지, w-value)를 나누어주게 되면 1개의 X-선이 섬광체로 입사될 때 수집되는 빛의 양을 계산할 수 있게 된다.

III. 결과 및 논의

3.1. 반사체가 없는 섬광체의 빛 수집개수

3.1.1. 단일 에너지 X-선

측면과 윗면에 반사체가 설정되지 않은 섬광체 모델에서 1 ~ 9 MeV 범위의 단일에너지 X-선을 50 ~ 400 mm 두께의 섬광체에 입사시켰을 때 생성되는 빛수집개수의 변화는 그림 4에서 나타난 것과 같다. 그림에서 나타내고 있는 것과 같이 수집되는 빛의 수는 X-선의 에너지와 섬광체의 두께와 밀접한 관련이 있는 것을 알 수 있다. 에너지가 높을수록 획득되는 빛의 수는 높아지지만 섬광체가 두꺼울수록 수집되는 빛의 수가 증가하지는 않았으며 각 에너지의 X-선에 따라 수집되는 빛의 양이 최대가 되는 섬광체의 두께는 각기 달랐다. 낮은 에너지의 경우 상대적으로 얇은 섬광체에서 수집되는 빛의 개수가 최대가 되었고 에너지가 높을수록 수집되는 빛의 수가 최대가 되는 두께가 두꺼워졌다. 1 MeV의 경우 1 ~ 1.5 cm 두께의 섬광체에서 빛의 수를 가장 많이 수집하였고 9 MeV의 경우 대략 2 cm 두께의 섬광체에

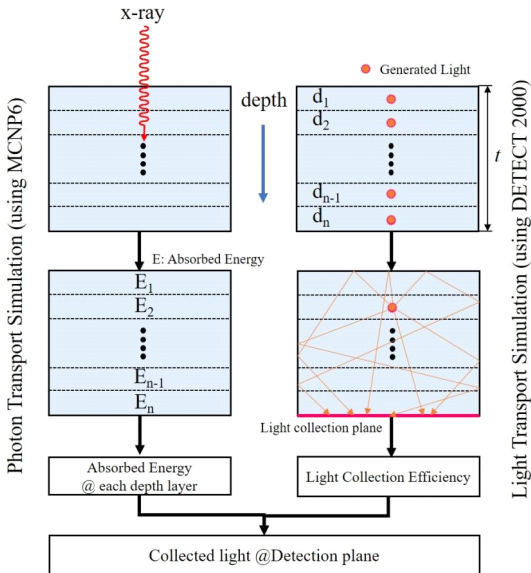


Fig. 3 The process for calculating the number of light collected by the light collector

서 빛의 수를 가장 많이 수집하였다.

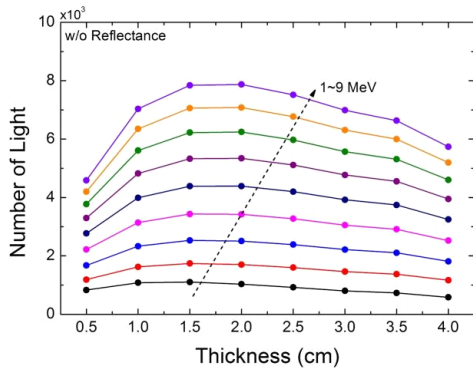


Fig. 4 The curve of change in the number of collected lights according to the thickness of the scintillator not being combined with the reflector when a mono-energy x-ray of 1 ~ 9 MeV is incident.

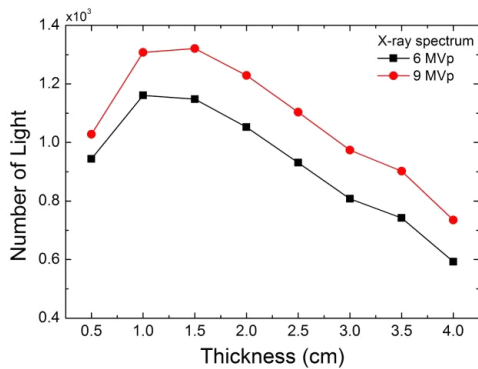


Fig. 5 The curve of change in the number of collected lights according to the thickness of the scintillator not being combined with the reflector when a poly-energy x-ray of 6, 9 MV is incident.

3.1.2. X-선 스펙트럼

입사되는 X-선이 스펙트럼인 경우 그림 5에서 나타난 것과 같이 최대에너지가 6 MeV인 스펙트럼인 경우 1 cm가 최적의 두께였고 9 MeV인 경우 1.5 cm가 최적의 두께로 나타났다. 그리고 섬광체가 두꺼울수록 수집되는 빛의 개수는 급속히 낮아지기 시작하였다. 이러한 이유는 그림 2에서 나타내고 있는 것과 같이 X-선 스펙트럼의 에너지 분포가 1 MeV 영역에서 대부분 분포되어 있기 때문으로 판단된다.

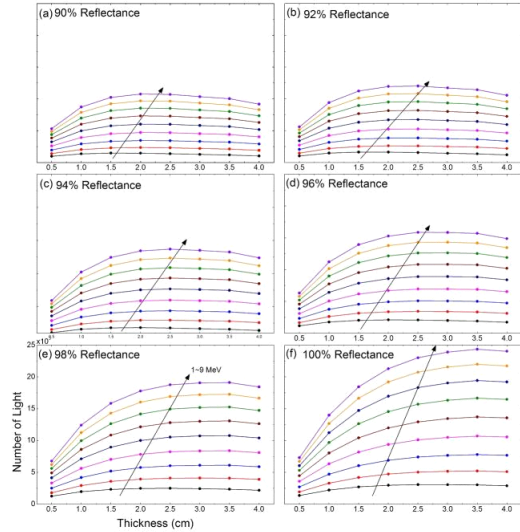


Fig. 6 The curve of change in the number of collected lights according to the thickness of the scintillator with side surface of 90~100% reflectance when a mono-energy x-ray is incident

3.2. 반사체가 포함된 섬광체의 빔 수집개수

3.2.1. 단일 에너지 X-선

그림 6은 반사체가 포함된 섬광체 모델에서 입사되는 X-선이 1~9 MeV의 단일에너지인 경우 수집되는 빛의 개수를 나타내고 있다. 섬광체 반사체의 반사율의 변화에 따라 가장 많은 빛이 수집되는 섬광체의 두께는 그림에서 나타내고 있는 것과 같이 반사율이 높을수록 최적 두께는 두꺼워짐을 알 수 있다. 반사율이 90%이고 입사되는 X-선 에너지가 9 MeV인 경우 가장 많은 빛을 수집하는 섬광체의 두께는 2 cm인 반면 반사율이 100%인 경우에는 3.5 cm 였다. 즉 반사율이 높을수록 외부로 이탈되는 빛의 수가 적어지기 때문에 생성된 빛이 빛 수집면으로 도달할 수 있는 확률이 높아지게 된다. 그러므로 X-선의 종류와 반사율에 따라 최적의 섬광체 두께는 달라지게 된다.

3.2.2. X-선 스펙트럼

X-선 스펙트럼이 섬광체로 입사되었을 때 섬광체 두께에 따라 수집되는 빛의 개수의 변화는 그림 7에서 나타난 것과 같다. 앞서 단일에너지 X-선원의 경우와 마찬가지로 반사체 반사율이 증가함에 따라 빛을 수집효율

이 가장 높은 섬광체의 두께가 두꺼워졌다. 그림 7(a)는 X-선원이 6 MVp의 스펙트럼인 경우 반사율 변화에 따른 섬광체의 두께별 수집되는 빛의 개수를 나타내고 있다. 그림에서 나타내고 있는 것과 같이 반사율이 90%인 경우 섬광체의 최적 두께는 대략 1.5 cm인 반면 100%인 경우 2.5 cm 두께의 섬광체인 경우 가장 수집되는 빛의 개수가 많음을 알 수 있다. 그리고 그림 7(b)에 나타난 것과 같이 9 MVp X-선 스펙트럼의 경우 반사율이 90%인 경우 1.5 cm 두께의 섬광체가 가장 많은 빛을 수집하는 것으로 나타났고 100%인 경우 3 cm 두께의 섬광체인 경우 가장 수집되는 빛의 양이 많은 것으로 나타났다.

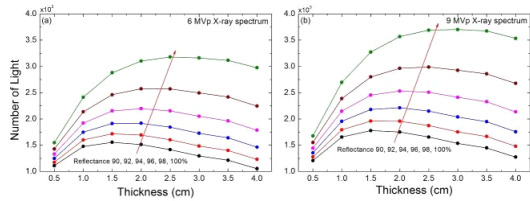


Fig. 7 The curve of change in the number of collected lights according to the thickness of the scintillator with side surface of 90~100% reflectance when a poly-energy x-ray of 6, 9 MV is incident.

IV. 결 론

섬광체의 두께는 입사되는 X-선의 종류에 따라 적절하게 선정되어야 한다. 본 연구에서는 고에너지 X-선 영상검출기에 사용되는 CdWO₄ 섬광체의 두께별 수집되는 빛의 개수에 대한 연구를 몬테카를로 기법을 이용하는 코드를 이용하여 수행하였다. 수행결과 섬광체의 두께와 입사되는 X-선의 에너지는 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다. 일반적으로 컨테이너 검색을 위해 사용되는 X-선 에너지는 6 혹은 9 MVp의 연속스펙트럼 에너지 영역의 에너지를 포함하는 X-선 발생장치를 이용하게 된다. 이러한 X-선 스펙트럼의 에너지 분포는 대부분 1 MeV 영역에 분포되어 있으며 최대에너지 영역에서는 X-선 분포는 상대적으로 아주 낮다. 그러므로 신호수집효율을 최대한으로 높이기 위해서는 적절한 두께의 섬광체를 사용하여야 한다. 일반적으로 반사체의 반사율이 95% 이상으로 제작된다면 대략 2~3 cm 두께의 섬광체를 사용하는 것이 적합하다고 할 수 있다. 하지만 밀도가 높고 두꺼운 물질들을 투과하고 검출기로

도달할 수 있는 X-선 에너지는 낮은 에너지 보다는 대부분이 높은 에너지일 것이다. 그러므로 컨테이너 검색 시스템에 사용되는 검출기의 경우 섬광체의 두께는 낮은 에너지 영역에 맞추기 보다는 높은 에너지 영역에 맞추어 사용될 필요가 있을 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant from National R&D Project of “Development of automatic screening and hybrid detection system for hazardous material detecting in port container” funded by Korea Institute of Marine Science and Technology Promotion (PMS4520)

REFERENCES

- [1] G. Chen, “Understanding X-ray cargo imaging,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, vol. 241, pp. 810-815, Aug. 2005.
- [2] C. Michail, V. Koukou, N. Martini, G. Saatsakis, N. Kalyvas, A. Bakas, I. Kandarakis, G. Fountos, G. Panayiotakis, and I. Valais, “Luminescence efficiency of cadmium tungstate (CdWO₄) single crystal for medical imaging applications,” *Crystals*, vol. 10, no. 429, pp. 1-16, May. 2020.
- [3] J. Lee, C. H. Lim, J. Park, I. Kim, M. K. Moon, and Y. Lim, “The effect of grid ratio and material of anti-scatter grid on the scatter-to-primary ratio and the signal-to-noise ratio improvement factor in container scanner x-ray imaging,” *Radiation Protection and Research*, vol. 42, no. 4, pp. 197-204, Oct. 2017.
- [4] T. T. Monajemi, S. Steciw, B. G. Fallone, and S. Rathee, “Modeling scintillator-photodiodes as detectors for megavoltage CT,” *Medical Physics*, vol. 31, no. 5, pp. 1225-1234, May. 2004.
- [5] A. Badano, R. M. Gagne, B. D. Gallas, R. J. Jennings, J. S. Boswell, and K. J. Myers, “Lubberts effect in columnar phosphors,” *Medical Physics*, vol. 31, no. 11, pp. 3122-3131, Nov. 2004.
- [6] P. M. Evans, M. A. Mosleh-Shirazi, E. J. Harris, and J. Seco, “Monte Carlo and Lambertian light guide models of the light output from scintillation crystals at megavoltage energies,” *Medical Physics*, vol. 33, no. 6, pp. 1797-1809, May. 2006.

- [7] D. Sharma, C. Sze, H. Bhandari, V. Nagarkar, and A. Badano, "Depth-of-interaction estimates in pixelated scintillator sensors using Monte Carlo techniques," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 841, pp. 117-123, 2017.
- [8] P. Ghorbani, D. Sardari, R. Azimiradb, and M. Hosntalab, "Assessment of optical photon collection in a large plastic scintillator using Geant4-Gate code," *Optik*, vol. 158, pp. 305-311, 2018.



임창휘(Chang Hwye Lim)

2012년 8월 부산대학교 기계공학부 제어자동화시스템전공 공학박사
2020년 6월 ~ 현재 ㈜엠플인터내셔널 책임연구원
※ 관심분야 : 항만보안검색, 방사선영상검출기, 방사선영상분석, 방사선계측기



박종원(Jong-Won Park)

2006년 2월 아주대학교 전자공학과 공학박사
1997년 3월 ~ 현재 선박해양플랜트연구소 해양시스템연구본부 책임연구원
※ 관심분야 : 항만보안검색, 수중통신, 항만IoT, 선박 · 함정 시스템



이정희(Junghee Lee)

2011년 2월 호서대학교 정보통신공학과 공학석사
2011년 3월 ~ 현재 선박해양플랜트연구소 해양시스템연구본부 시험기술원
※ 관심분야 : 항만보안검색, 항만IoT, 수중통신