



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년04월26일

(11) 등록번호 10-2244806

(24) 등록일자 2021년04월21일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
**G21C 17/06** (2006.01) **G01T 1/00** (2006.01)  
**G06N 3/02** (2019.01)

(52) CPC특허분류  
**G21C 17/06** (2013.01)  
**G01T 1/00** (2013.01)

(21) 출원번호 10-2019-0148900

(22) 출원일자 2019년11월19일

심사청구일자 2019년11월19일

(56) 선행기술조사문헌

KR1020190106049 A\*

US20190130569 A1\*

Rasmus B., et al., Simultaneous  
 Reconstruction of Emission and Attenuation in  
 Passive Gamma Emission Tomography of Spent  
 Nuclear Fuel, Instrumentation and Detectors  
 (2019.07.17.). 1부.\*

US20180293762 A1

\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

연세대학교 원주산학협력단

강원도 원주시 흥업면 연세대길 1

(72) 발명자

민철희

강원도 원주시 혁신로 400 푸른숨엘에이치11단지  
1102동 1203호

정용현

강원도 원주시 개운로 30 휴먼시아원주개운1단지  
102동 904호

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

오영진

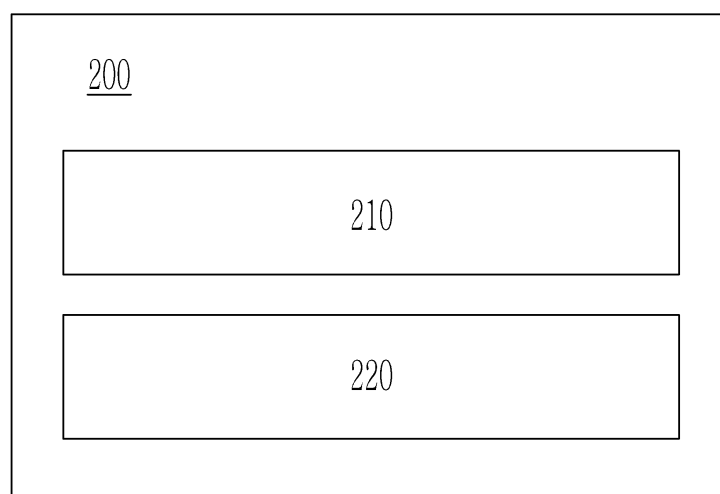
전체 청구항 수 : 총 3 항

심사관 : 이용호

(54) 발명의 명칭 핵연료집합체의 방출단층영상 재구성장치

**(57) 요약**

본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층영상 재구성장치는 사용후 핵연료집합체에서 방사되는 감마선을 검출하는 감마선 검출모듈의 검출값에 기초하여 사용후 핵연료집합체의 단층영상을 생성 및 재구성하는 핵연료집합체의 방출단층영상 재구성장치에 관한 것으로, 몬테칼로 전산모사 방법을 이용하여 제1 및 제2 감마선 검출모듈의 검출결과로부터 상기 사용후 핵연료집합체의 제1 단층영상을 생성하는 제1 단층영상 생성유닛; 및 신경망 네트워크로 구성된 딥러닝 알고리즘을 통하여 상기 제1 단층영상을 재구성하여 제2 단층영상을 생성하는 제2 단층영상 생성유닛;을 포함한다.

**대표도** - 도13

(52) CPC특허분류

G06N 3/02 (2019.01)

(72) 발명자

**안재준**

서울특별시 동작구 보라매로5가길 7 캐릭터그린빌  
1903호

**박성중**

경기도 고양시 일산동구 산두로 180 밤가시마을건  
영빌라7단지 706동 101호

**최세환**

서울특별시 동대문구 한천로8가길 17-1

**임진영**

강원도 원주시 흥업면 북원로 1412-11 휴먼스빌  
305호

**최현준**

강원도 원주시 흥업면 세동길 13 현대아파트 103동  
908호

**장지원**

강원도 원주시 흥업면 연세대길 1 연세대학교  
매지3학사

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1803027

부처명 원자력안전위원회

과제관리(전문)기관명 한국방사선안전재단

연구사업명 원자력안전연구사업

연구과제명 단층촬영기법을 활용한 핵연료집합체 구조적 건정성 확인 기법 개발

기 여 율 1/1

과제수행기관명 연세대학교 원주 산학협력단

연구기간 2018.04.01 ~ 2018.12.31

공지예외적용 : 있음

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

사용후 핵연료집합체에서 방사되는 감마선을 검출하는 감마선 검출모듈의 검출값에 기초하여 사용후 핵연료집합체의 단층영상을 생성 및 재구성하는 핵연료집합체의 방출단층영상 재구성장치에 있어서,

몬테칼로 전산모사 방법을 이용하여 제1 및 제2 감마선 검출모듈의 검출결과로부터 상기 사용후 핵연료집합체의 제1 단층영상을 생성하는 제1 단층영상 생성유닛; 및

신경망 네트워크로 구성된 딥러닝 알고리즘을 통하여 상기 제1 단층영상을 재구성하여 제2 단층영상을 생성하는 제2 단층영상 생성유닛;을 포함하고,

상기 딥러닝 알고리즘은 컨벌루션 오토인코더(Convolutional Auto Encoder: CAE) 알고리즘이며,

상기 신경망 네트워크는,

상기 제1 단층영상을 입력받는 입력층;

상기 입력층으로부터 데이터를 전달받되, 복수 개의 노드를 포함하도록 구성된 적어도 하나의 은닉층; 및

상기 은닉층의 연산 결과에 기초하여 상기 제2 단층영상을 출력하는 출력층;을 포함하고,

상기 노드에는 상기 노드로 전달되는 입력인자 및 상기 노드에서 출력되는 출력인자 간의 상관관계인 함수가 정의되고, 상기 함수는 가중치 및 바이어스를 포함하며,

상기 은닉층은,

제1 컨벌루션 레이어, 제1 맥스풀링 레이어, 제2 컨벌루션 레이어 및 제2 맥스풀링 레이어가 순차적으로 배치되는 인코더 레이어군; 및

상기 제2 맥스풀링 레이어로부터 데이터를 전달받는 제3 컨벌루션 레이어, 제1 업샘플링 레이어, 제4 컨벌루션 레이어 및 제2 업샘플링 레이어가 순차적으로 배치되는 디코더 레이어군;을 포함하는 핵연료집합체의 방출단층영상 재구성장치

#### 청구항 2

삭제

#### 청구항 3

삭제

#### 청구항 4

청구항 1에 있어서,

복수 개의 상기 제1 단층영상 및 상기 제1 단층영상과 대응되는 복수 개의 실제영상을 포함하는 트레이닝 데이터 세트를 구비하고,

상기 가중치 및 바이어스는 상기 트레이닝 데이터 세트를 상기 신경망 네트워크 상에서 학습하여 결정되는 핵연료집합체의 방출단층영상 재구성장치.

#### 청구항 5

청구항 4에 있어서,

상기 트레이닝 데이터 세트를 활용한 신경망 네트워크의 학습시 적용되는 손실함수는 평균제곱오차(Mean

Squared Error)인 핵연료집합체의 방출단층영상 재구성장치.

## 발명의 설명

### 기술 분야

- [0001] 본 발명은 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치 및 이에 의하여 획득한 방출단층영상의 재구성 장치에 관한 것으로, 구체적으로는 핵연료집합체의 구조적 건전성 확인을 위한 고해상도 및 고민감도 방출단층촬영을 위한 장치 및 영상 재구성 장치에 관한 것이다.

### 배경 기술

- [0003] 사용후핵연료는 상업용 또는 연구용 원자로에서 연료로 사용된 핵연료 물질 또는 기타의 방법으로 핵분열시킨 핵연료 물질이다.
- [0004] 사용전핵연료와 외관상으로 차이는 없으나 원자로 내에서 일어나는 방사선 조사와 핵분열 연쇄 반응 등을 통해 물질 구성이 달라지고, 방사선과 높은 열을 방출한다.
- [0005] 이러한 사용후핵연료는 재처리나 처분 또는 임시보관하는 방식으로 처리하고 있는 상황인데, 이 경우 사용후핵연료의 상태에 대하여 정확하게 검증 및 모니터링할 필요가 있다.
- [0006] 국제원자력기구에서 공인한 체렌코프 방사선 검사 장비, 감마선 에너지스펙트럼 분석 장비, 총 중성자 및 감마선 검사 장비 등 140종류 이상의 사용후핵연료 검증기술은 제한된 조건에서만 사용가능하거나 또는 오차율이 크다는 문제점이 있어서 방출단층촬영 기술을 이용하여 사용후핵연료를 검증하는 기술이 제안되고 있다.
- [0007] 이러한 방출단층촬영 기술은 직접적으로 사용후 핵연료집합체의 단층을 영상화할 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이지만, 공간분해능과 민감도는 상호 반비례 관계에 있기 때문에 이에 대한 최적화가 요구되는 상황이다.
- [0008] 한편, 하기 선행기술문헌에는 중수로 사용후핵연료 결함여부를 검사하는 시스템에 대한 기술이 개시되어 있으며, 본 발명의 기술적 요지는 개시하고 있지 않다.

### 선행기술문헌

#### 특허문헌

- [0010] (특허문헌 0001) 대한민국 공개특허공보 10-2011-0007760호

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

- [0011] 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치 및 핵연료집합체의 방출단층영상 재구성장치는 몬테칼로 전산모사 기반 핵연료집합체 단층촬영시스템의 설계 최적화를 통하여 사용후핵연료의 장기 건정성 검증에 효율적으로 활용할 수 있는 장치를 제공하는 것이다.
- [0012] 아울러 공간분해능 및 민감도 측면에서 모두 탁월한 기능을 수행할 수 있는 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치를 제공하는 것이다.
- [0013] 본 발명의 해결과제는 이상에서 언급된 것들에 한정되지 않으며, 언급되지 아니한 다른 해결과제들은 아래의 기재로부터 당해 기술분야에 있어서의 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해되어 질 수 있을 것이다.

### 과제의 해결 수단

- [0015] 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치 및 핵연료집합체의 방출단층영상 재구성장치는 미리 설정된 간격으로 배열된 복수 개의 연료봉을 수용하는 사용후 핵연료 집합체의 단층영상을 획득하기 위한 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치에 관한 것으로, 상기 사용후 핵연료집합체가 안착되는 안착부; 상기 안착부를 중심으로 상호 대향되도록 이격 배치되되, 상기 사용후 핵연료집합체에서 방사되는 감마선을 검출하는 제1

및 제2 감마선 검출모듈; 및 상기 제1 및 제2 감마선 검출모듈 중 적어도 하나의 검출값에 기초하여 상기 사용 후 핵연료집합체의 단층영상을 생성하는 단층영상 생성모듈;을 포함하고, 상기 제1 및 제2 감마선 검출모듈은 상기 사용 후 핵연료집합체의 중심을 회전축으로 하여 회전하면서 상기 핵연료집합체로부터 방사되는 감마선을 검출하고, 상기 단층영상 생성모듈은 상기 제1 및 제2 감마선 검출모듈의 회전 각도에 따른 상기 감마선의 1차원 투사영상에 기초하여 상기 사용 후 핵연료집합체의 단층영상을 획득한다.

[0016] 상기 제1 및 제2 감마선 검출모듈은, 미리 설정된 간격으로 이격되어 배치되는 복수 개의 격벽을 포함하는 콜리메이터; 상기 콜리메이터를 통과한 감마선을 입사받아 가시광선을 방출하는 복수 개의 단위 섬광체를 포함하는 섬광 조립체; 및 상기 단위 섬광체에서 각각 검출한 가시광선을 검출하는 복수 개의 광센서;를 포함하는 것이 바람직하다.

[0017] 상기 콜리메이터의 격벽과 격벽 사이의 이격공간은 상기 핵연료집합체로부터 방사되는 감마선의 입사경로로 정의되고, 상기 단위 섬광체는 상기 입사경로를 통과한 감마선의 에너지를 흡수할 수 있도록 일측은 상기 콜리메이터와 맞닿도록 배치되고, 상기 광센서는 상기 단위 섬광체의 타측에 배치되는 것이 바람직하다.

[0018] 상기 격벽의 최소두께는 상기 격벽 사이의 이격거리, 상기 감마선 에너지에 대한 상기 콜리메이터 물질의 선형감약계수 및 상기 입사경로의 거리에 기초하여 결정되는 것이 바람직하다.

[0019] 상기 격벽의 최소두께는 하기 식에 의하여 도출되는 것이 바람직하다.

$$t = \frac{6 * d / \mu}{1 - (3 / \mu)}$$

[0021] 상기 식에서 t는 격벽의 최소두께, d는 격벽 사이의 이격거리,  $\mu$ 는 목적 감마선 에너지에 대한 콜리메이터 물질의 선형감약계수, l은 격벽의 길이로 정의됨

[0022] 상기 단위 섬광체의 일측 두께는 상기 격벽 사이의 이격거리보다 크도록 형성되는 것이 바람직하다.

[0023] 상기 단위 섬광체의 타측 높이는 상기 섬광체의 일측 높이보다 작도록 형성되는 것이 바람직하다.

[0024] 상기 단위 섬광체의 단면은 사다리꼴인 것이 바람직하다.

[0025] 상기 제1 및 제2 감마선 검출모듈 중 적어도 하나는 상기 제1 및 제2 감마선 검출모듈의 회전축 방향으로 선형이동 가능하도록 배치되는 것이 바람직하다.

[0026] 상기 안착부는 상기 제1 및 제2 감마선 검출모듈의 회전축 방향으로 선형이동 가능하도록 형성되는 것이 바람직하다.

[0027] 상기 단층영상 생성모듈은, 몬테칼로 전산모사 방법을 이용하여 제1 및 제2 감마선 검출모듈의 검출결과로부터 상기 사용 후 핵연료집합체의 제1 단층영상을 생성하는 제1 단층영상 생성유닛; 신경망 네트워크로 구성된 딥러닝 알고리즘을 통하여 상기 제1 단층영상을 재구성하여 제2 단층영상을 생성하는 제2 단층영상 생성유닛;을 포함하는 것이 바람직하다.

[0028] 상기 딥러닝 알고리즘은 컨벌루션 오토인코더(Convolutional Auto Encoder: CAE) 알고리즘이며, 상기 신경망 네트워크는, 상기 제1 단층영상을 입력받는 입력층; 상기 입력층으로부터 데이터를 전달받되, 복수 개의 노드를 포함하도록 구성된 적어도 하나의 은닉층; 및 상기 은닉층의 연산 결과에 기초하여 상기 제2 단층영상을 출력하는 출력층;을 포함하고, 상기 노드에는 상기 노드로 전달되는 입력인자 및 상기 노드에서 출력되는 출력인자 간의 상관관계인 함수가 정의되고, 상기 함수는 가중치 및 바이어스를 포함하는 것이 바람직하다.

[0029] 상기 은닉층은, 제1 컨벌루션 레이어, 제1 맥스풀링 레이어, 제2 컨벌루션 레이어 및 제2 맥스풀링 레이어가 순차적으로 배치되는 인코더 레이어군; 및 상기 제2 맥스풀링 레이어로부터 데이터를 전달받는 제3 컨벌루션 레이어, 제1 업샘플링 레이어, 제4 컨벌루션 레이어 및 제2 업샘플링 레이어가 순차적으로 배치되는 디코더 레이어군;을 포함하는 것이 바람직하다.

[0030] 복수 개의 상기 제1 단층영상 및 상기 제1 단층영상과 대응되는 복수 개의 실제영상을 포함하는 트레이닝 데이터 세트를 구비하고, 상기 가중치 및 바이어스는 상기 트레이닝 데이터 세트를 상기 신경망 네트워크 상에서 학습하여 결정되는 것이 바람직하다.

[0031] 상기 트레이닝 데이터 세트를 활용한 신경망 네트워크의 학습시 적용되는 손실함수는 평균제곱오차(Mean

Squared Error)인 것이 바람직하다.

### 발명의 효과

- [0033] 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치 및 핵연료집합체의 방출단층영상 재구성장치는 콜리메이터의 구조, 섬광체의 구조 등의 최적화를 통하여 민감도와 영상의 공간분해능을 적절히 조절하여 두가지 인자를 동시에 높일 수 있는 효과를 기대할 수 있다.
- [0034] 또한, 딥러닝 기반의 영상재구성 알고리즘을 적용함으로써 공간분해능을 더욱 향상시킬 수 있는 효과를 기대할 수 있다.
- [0035] 본 발명의 효과는 이상에서 언급된 것들에 한정되지 않으며, 언급되지 아니한 다른 효과들은 아래의 기재로부터 당해 기술분야에 있어서의 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해되어질 수 있을 것이다.

### 도면의 간단한 설명

- [0037] 도 1은 핵연료집합체의 단면을 간략히 도시한 도면이다.
- 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치의 사시도이다.
- 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치의 상면도이다.
- 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치를 통해 검출된 검출기 회전각도에 따른 1차원 투사영상의 2차원 데이터(사이노그램)이다.
- 도 5는 도 4를 영상 재구성 알고리즘을 적용하여 획득한 단층영상이다.
- 도 6 및 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치의 제1 및 제2 감마선 검출모듈의 간략 사시도 및 단면도이다.
- 도 8은 콜리메이터의 격벽 길이에 따른 검출모듈의 민감도를 도시한 그래프이다.
- 도 9는 콜리메이터의 격벽 간 이격공간의 넓이에 따른 검출모듈의 민감도를 도시한 그래프이다.
- 도 10은 단위 섬광체의 길이에 따른 검출기 민감도를 도시한 그래프이다.
- 도 11은 단위 섬광체 단면의 다양한 구현예를 도시한 단면도이다.
- 도 12는 도 11의 단위 섬광체 단면에 따른 빛 수집효율을 도시한 그래프이다.
- 도 13은 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치의 단층영상 생성모듈의 세부 구성을 나타낸 블록도이다.
- 도 14는 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치 중 제2 단층영상 생성유닛의 신경망 네트워크를 설명하기 위한 도면이다.
- 도 15는 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치에 적용되는 컨벌루션 오토인코더 알고리즘의 다이어그램이다.
- 도 16은 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치의 학습시 적용되는 에포크 증가에 따른 손실함수의 변화를 도시한 그래프이다.
- 도 17은 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치에서 실제영상, 입력영상 및 출력영상의 비교결과를 도시한 도면이다.
- 도 18은 도 17의 세가지 이미지 샘플 패턴에 대한 감산 이미지를 비교한 도면이다.
- 도 19는 종래의 방출단층 촬영장치와 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치의 최종 출력 결과물을 비교하기 위한 도면이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0038] 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 바람직한 실시예를 상세히 설명하되, 도면 부호에 관계없이 동일하거나 유사한 구성 요소는 동일한 참조 번호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다.

- [0039] 또한, 본 발명을 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다. 또한, 첨부된 도면은 본 발명의 사상을 쉽게 이해할 수 있도록 하기 위한 것일 뿐, 첨부된 도면에 의해 본 발명의 사상이 제한되는 것으로 해석되어서는 아니 됨을 유의해야 한다.
- [0041] 이하, 도 1 내지 도 19를 참조하여 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치 및 핵연료집합체의 방출단층영상 재구성장치에 대하여 설명하도록 한다.
- [0042] 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치는 미리 설정된 간격으로 배열된 복수 개의 연료봉(11)을 수용하는 사용후 핵연료 집합체의 단층영상을 획득하기 위한 핵연료집합체(10)의 방출단층 촬영장치이다.
- [0043] 핵연료집합체(10)는 구체적으로 도 1에 도시된 바와 같이 도 1에 도시된 바와 같이 UO<sub>2</sub> 핵연료 물질(Fuel rod), 피복(Cladding) 물질, 핵연료 물질과 피복 물질 사이의 He 물질로 구성된 연료봉(11)과, 그 밖에 가이드 튜브(Guide Tube) 물질 및 물의 총 5가지 물질로 구성되어 있다.
- [0044] 이러한 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치는 도 2 및 도 3에 도시된 바와 같이 안착부, 제1 감마선 검출모듈(100a), 제2 감마선 검출모듈(100b), 단층영상 생성모듈을 포함하도록 구성된다.
- [0045] 안착부는 사용후 핵연료집합체(10)가 안착되는 구성이고, 감마선 검출모듈(100)은 사용후 핵연료집합체(10)에서 방사되는 감마선을 검출하는 기능을 수행하는 구성이다.
- [0046] 특히 감마선 검출모듈(100)인 제1 감마선 검출모듈(100a) 및 제2 감마선 검출모듈(100b)은 안착부를 중심으로 상호 대향되도록 배치되되, 상술한 사용후 핵연료집합체의 중심을 회전축(C)으로 하여 미리 설정된 일정한 속도로 회전하면서 핵연료집합체로부터 방사되는 감마선을 검출한다.
- [0047] 상술한 감마선 검출모듈(100)의 회전에 의하여 후술할 단층영상 생성모듈(200)은 도 4에 도시된 1차원 투사 영상의 2차원 데이터인 사이노그램을 획득할 수 있으며, 나아가 영상 재구성 알고리즘을 통하여 도 5에 도시된 사용후 핵연료집합체의 단층영상을 획득할 수 있게 된다.
- [0048] 한편, 감마선 검출모듈(100)을 회전축 방향으로 선형 이동 가능하도록 형성되거나 또는 안착부를 회전축 방향으로 선형 이동 가능하도록 형성할 경우 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치는 나선형 궤적으로 투영영상을 획득할 수도 있을 것이다.
- [0049] 특히 감마선 검출모듈(100), 즉 제1 감마선 검출모듈(100a) 및 제2 감마선 검출모듈(100b)은 콜리메이터(110), 섬광 조립체(120), 광센서(130) 및 프레임(140)을 포함하도록 구성된다.
- [0050] 콜리메이터(110)는 텅스텐 물질로 구성된 평행다공형 구조를 취하고 있으며, 따라서 일정한 간격으로 이격되어 배치되는 복수 개의 격벽(111)을 포함하도록 구성된다.
- [0051] 섬광 조립체(120)는 콜리메이터(110)를 통과한 감마선을 입사받아 가시광선을 방출하는 복수 개의 단위 섬광체(121)를 포함하도록 구성되고, 광센서(130)는 상술한 단위 섬광체에서 각각 검출한 가시광선을 검출하는 기능을 수행한다.
- [0052] 이하에서는 상술한 콜리메이터(110), 섬광 조립체(120) 및 광센서(130)의 구체적인 최적 설계 구현예에 대하여 설명하도록 한다.
- [0053] 콜리메이터(110)는 평행구멍으로 설계되어 있으며 핵연료봉(11)에서 방출되는 감마선 중 콜리메이터(110) 격벽(111)의 길이방향과 같은 방향의 감마선만을 통과시키고 다른 방향에서 오는 감마선은 차단하는 기능을 수행한다.
- [0054] 즉, 콜리메이터(110)는 무작위 방향으로 방출되는 감마선을 기하학적으로 제한하여 필요한 영역에서 방출되는 감마선만이 섬광체(120)에 입사하도록 하는 구성이라고 할 수 있다.
- [0055] 한편, 도 7에 도시된 바와 같이 콜리메이터(110)의 격벽(111) 두께는 비스듬히 입사하는 감마선을 차폐하는 능력과 관계가 있으며 격벽(111)의 두께가 너무 얇으면 무작위 방향으로 입사하는 감마선이 투과할 확률이 증가하므로 감마선 검출모듈(100)에 도달하는 감마선의 절대량은 증가하나, 선원의 공간적 분별력은 감소하는 특징이 있다.
- [0056] 상술한 특징을 고려하여 콜리메이터(110) 격벽(111)의 두께를 결정하는 것이 요구되며, 결국 하기 수학적 1과



같이 콜리메이터(110) 격벽(111)의 두께를 결정하는 것이 바람직하다.

### 수학식 1

$$t = \frac{6 * d / \mu}{l - (3 / \mu)}$$

[0057]

[0058]

상기 수학식 1에서, t는 격벽(111)의 최소두께, d는 격벽(111) 사이의 이격거리,  $\mu$ 는 목적 감마선 에너지에 대한 콜리메이터 물질의 선형감약계수, l은 격벽의 길이로 정의된다.

[0059]

정해진 격벽(111) 간 간격에서 격벽(111)의 두께가 증가할수록 감마선 검출모듈(100)의 민감도는 감소하기 때문에 적절한 두께를 찾는 것이 중요하며, 결국 최적화 연구를 통해 격벽(111) 간 구멍의 너비와 격벽(111) 길이가 결정된다면 격벽(111) 두께는 상기 수학식 1에 의하여 도출할 수 있게 되는 것이다.

[0060]

이하에서는 콜리메이터(110)의 격벽(111) 간 간격과 격벽(111) 길이에 따른 공간분해능 변화 경향에 대하여 설명하도록 한다.

[0061]

본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치와 같이 평행다공형 구조의 콜리메이터(110)를 사용할 경우, 검출효율 즉, 민감도와 영상의 공간분해능 간의 관계는 반비례 관계이므로 민감도와 공간분해능을 적절하게 조절하여 두 가지 인자를 동시에 높일 수 있는 최적의 구조를 결정하는 것이 중요하다.

[0062]

콜리메이터(110) 격벽(111)의 두께가 목적 에너지의 감마선을 차폐하기에 충분하다면 격벽(111) 길이가 증가하면 섬광체(120)까지 바로 도달할 수 있는 감마선 입사 방향의 범위가 줄어들기 때문에 민감도가 감소하고 이에 반하여 공간분해능은 향상되는 특징이 있으며, 이와 유사한 특징을 보이는 경우가 동일한 격벽(111) 길이 조건에서 격벽(111) 두께가 증가하는 경우이다.

[0063]

이하에서는 특정 광센서(130)를 기준으로 섬광체(120)의 길이 및 형태에 따른 감마선 검출모듈(100)의 민감도 변화 경향 및 섬광체(120) 내에서 발생된 빛의 수집효율 변화 경향에 대하여 설명하도록 한다.

[0064]

동일한 감마선의 에너지를 기준으로 섬광체(120)는 길이가 길수록 반응확률이 높아지기 때문에 빛의 생성율이 높아 적은 양의 감마선에 대해서도 민감하게 반응한다.

[0065]

그러나, 섬광체(120)의 길이가 길어질수록 섬광체(120) 내의 특정 위치에서 발생한 빛이 전기적 신호로 변환되기 위해 광센서(130)까지 도달하는 경로가 증가하고, 이에 따라 빛이 소실될 확률이 증가하게 된다.

[0066]

예를 들어, 100 keV 에너지가 섬광체(120)에 전달되면 1000개의 빛이 생성되고 50 mm와 100 mm 길이의 섬광체(120) 내 특정 위치에서 해당 빛이 생성되면 각각 광센서(130)에 도달하는 빛의 양이 500개, 250개라고 가정하였을 때, 섬광체(120)에 80 keV 에너지가 전달되면 800개의 빛이 생성되고 각각의 섬광체(120)에서 광센서(130)에 도달하는 빛의 양은 400개, 200개가 될 것이다.

[0067]

즉, 전달된 에너지가 20 keV 정도 변하면 50 mm 길이의 섬광체(120)는 100개의 빛의 양이 변하는 반면 100 mm 길이의 섬광체(120)는 50개의 빛의 양이 변한 것으로 전달된 에너지의 변화량이 작을수록 50 mm 길이의 섬광체(120)의 에너지 분별력이 상대적으로 우수하다는 것을 예측할 수 있다.

[0068]

따라서 에너지 분별력 고려하면 섬광체(120)의 길이는 짧을수록 유리하지만, 감마선 검출효율을 고려하면 섬광체(120)의 길이는 길수록 유리하다.

[0069]

감마선이 섬광체(120)와 반응했을 때 무작위 방향으로 발생하는 빛이 광센서(130)까지 잘 도달할 수 있게 섬광체(120) 바깥면에는 빛을 반사시킬 수 있는 반사체가 부착되어야 한다.

[0070]

이 때, 빛이 반사되는 경향은 섬광체(120)의 면처리 기술, 반사체 종류, 섬광체 길이 등 다양한 요인에 의해 달라질 수 있으며, 섬광체(120) 내에서 발생된 빛 중 최대한 많은 양의 빛을 전기적인 신호로 변환시키기 위해서는 많은 수의 광센서(130)를 섬광체(120)에 부착하여야 한다.

[0071]

그러나 수십, 수백 개의 단위 섬광체(121)마다 많은 수의 광센서(130)를 부착하는 것은 시스템 구축 시 비용적인 측면에서 한계가 있기 때문에 최소한의 광센서(130)를 사용하여 최대한의 빛 수집효율을 증가시킬 수 있는 최적의 섬광체(130) 구조에 관한 연구가 필요하다.



- [0072] 이하에서는 감마선 검출모듈(100)의 콜리메이터(110) 구조변화에 따른 공간분해능과 민감도 변화 경향에 대하여 설명하도록 한다.
- [0073] 콜리메이터(110)의 공간분해능( $R_c$ )은 격벽(111) 간 구멍의 너비( $d$ )가 작을수록, 격벽(111) 유효 길이( $l_{eff}$ )가 길수록, 콜리메이터(110)와 선원 간 거리가 짧을수록 향상된다.
- [0074] 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치는 최적의 콜리메이터(110) 구조를 결정하기 위하여 핵연료집합체 구조와 검출모듈의 회전경로를 고려하여 최대한 원점(C)과 가까운 위치인 220 mm에 콜리메이터(110)를 고정시킨 후, 격벽(111) 간 구멍 너비( $d$ )와 격벽(111) 길이( $l$ ) 변화에 따른 공간분해능과 민감도 변화를 평가하였다.
- [0075] 먼저 30 mm부터 70 mm까지 10 mm 간격으로 다섯 종류의 격벽 길이( $l$ )에 대해 각각 0.5 mm부터 3.5 mm까지 0.5 mm 간격으로 격벽 간 구멍 너비( $d$ ) 변화에 따른 공간분해능과 민감도 변화를 평가하였으며, 평가 결과, 다섯 종류의 격벽 길이( $l$ )에 관해 모두 격벽 간 구멍 너비( $d$ )가 2 mm 정도일 때 공간분해능(하락)과 민감도(상승) 변화 경향이 교차되는 결과를 확인하였다.
- [0076] 특히 격벽 길이( $l$ )가 50mm일때의 상기 결과는 도 9에 도시되어 있으며, 이에 기초하여 최적의 격벽 간 구멍 너비( $d$ )를 2 mm로 결정하였다.
- [0077] 또한 0.5 mm부터 3.5 mm까지 0.5 mm 간격으로 일곱 종류의 격벽 간 구멍 너비( $d$ )에 대해 각각 30 mm부터 70 mm까지 10 mm 간격으로 격벽 길이( $l$ ) 변화에 따른 공간분해능과 민감도 변화 결과를 검토하였다.
- [0078] 상대적으로 도 9와 같은 평가 결과보다는 공간분해능과 민감도 간 변화 차이가 덜 두드러지지만, 일곱 종류의 격벽 간 구멍 너비( $d$ )에 관해 모두 격벽 길이( $l$ )가 50 mm 정도일 때 공간분해능과 민감도 변화 경향이 교차되는 것이 확인되었다.
- [0079] 특히 격벽 간 구멍 너비( $d$ )가 2 mm일때의 상기 결과는 도 8에 도시되어 있으며, 상기 결과를 토대로 최적의 격벽 길이( $l$ )는 50 mm로 결정하였다.
- [0080] 상기 결과 및 수학적 식 1을 고려하여 격벽 두께( $t$ )를 결정해보면, 사용후핵연료 집합체에서 방출되는 주요 감마 에너지인 662 keV를 대상으로 텅스텐 물질의 선형감약계수( $\mu$ )를 사용하여 계산하면 1.9 mm 이상이 되어야 하며 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치에서의 콜리메이터(110)의 최적의 격벽(111) 두께( $t$ )는 2 mm로 결정되었다.
- [0081] 이하에서는 동일한 양의 감마선 방출 조건에서 섬광체 길이 변화에 따른 민감도 변화 경향에 대하여 설명하도록 한다.
- [0082] 상술한 바와 같이, 에너지 분별력을 고려하면 섬광체의 길이는 짧을수록 유리하지만, 감마선 검출효율을 고려하면 섬광체의 길이는 길수록 유리한데, 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치는 고민감도 방출단층촬영시스템 기반기술 기술이므로 에너지 분별력보다 감마선 검출효율에 치중하여 섬광체의 길이를 최적화하는 것이 필요하다.
- [0083] 도 10은 10 mm부터 70 mm까지 10 mm 간격으로 일곱 종류의 섬광체 길이( $l_d$ ) 변화에 따른 공간분해능과 민감도 변화 결과를 보여주는데, 평가 결과 섬광체 길이( $l_d$ ) 증가에 따른 공간분해능 변화는 미미하며 민감도 변화는 로그함수 경향인 것으로 확인된다.
- [0084] 국제원자력기구를 통해 개발되고 있는 HGET 장비의 섬광체 구조의 경우, 검출모듈의 민감도는 최대 민감도(70 mm)의 90% 보다 낮은 것으로 평가되었으며, 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치에서는 민감도 측면에서 기존 장비보다 향상되고 최대 민감도의 90% 이상의 민감도를 보이는 40 mm를 최적의 섬광체 길이( $l_d$ )로 결정하였다.
- [0085] 이하에서는 동일한 양의 감마선 방출 조건에서  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  크기의 SiPM 광센서와 결합되는 경우, 다양한 섬광체 형태에 따른 섬광체 내에서 발생된 빛의 수집효율 변화 경향에 대하여 설명하도록 한다.
- [0086] 상술한 바와 같이, 최소한의 광센서를 사용하여 최대한의 빛 수집효율을 증가시킬 수 있는 최적의 섬광체 구조를 파악할 필요가 있다.
- [0087] 가장 보편적으로 사용되는 광센서는 광증배관(photomultiplier tube, PMT)으로서 빛을 전류로 변환시킨 뒤 해당 전류를 증폭시키는 정도가  $10^6$  내지  $10^7$ 으로 반도체 소자 검출기인 CZT 또는 avalanche photodiode (APD) 보다

약  $10^4$  정도 높고 비용이 저렴하다는 장점이 있으나 광센서 자체 크기가 너무 크기때문에 소형의 시스템 제작에 어려움이 따른다.

[0088] 이러한 한계점을 극복할 수 있는 반도체 소자 기반 광센서로서 silicon photo-multiplier(SiPM)이 사용될 수 있는데, SiPM은 전류 증폭도가 PMT와 유사한  $10^5$  내지  $10^6$  정도이며 CZT 또는 APD 보다 저렴하고 소형이라는 장점이 있기 때문에 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치에 포함되는 광센서(130)는 SiPM 광센서를 사용하는 것이 바람직하다.

[0089] 한편, 섬광체(120)의 너비는 격벽(111) 간 구멍 너비가 2 mm로 결정된 점을 고려하여 3 mm로 결정되었으며, 해당 크기에 부합되는 SiPM의 크기는  $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 이다.

[0090] 한 개의  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  SiPM이 섬광체(120)의 한 면에 결합되는 경우 세 가지 형태(사각 기둥, 사다리꼴 기둥, 사각+사다리꼴 기둥)의 섬광체 높이를 30 mm부터 70 mm까지 10 mm 간격으로 변화시키면서 섬광체에서 발생된 빛 수집효율을 검토하였다.

[0091] 도 11은 반사체로 둘러싸인 BGO 섬광체 내에서 발생된 빛의 수집효율을 평가하기 위한 DETECT 2000 몬테칼로 전산모사 조건을 보여주고 있는데, 도 11(a)는 사각 단면이고, 도 11(b)는 사다리꼴 단면이고, 도 11(c)는 사각+사다리꼴 단면이다.

[0092] 총 세 가지의 섬광체 형태에 대해 각각 5개의 동일한 위치를 선정한 후 각 위치에서 5400개의 빛을 500번씩 발생시켜 수집되는 빛의 양을 계수하는 전산모사가 수행되었다.

[0093] 도 12는 도 11에 도시된 세 가지 형태의 섬광체의 높이 변화에 따른 섬광체에서 발생된 빛 수집효율 평가 결과를 보여주고 있는데, 사다리꼴 기둥 형태의 섬광체가 사각 기둥과 사각+사다리꼴 기둥 형태에 비해 각각 약 100%, 40% 빛 수집효율이 향상된 것이 확인된다.

[0094] 종래의 검출모듈(HGET)과 상기와 같은 구조가 적용된 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치(YSET)의 감마선 검출모듈(100)에 의하여 각각 재구성된 선원의 공간적 분포 영상의 비교평가 결과는 도 19와 같다.

[0095] 평가 결과, 본 연구를 통해 최적화된 YSET 검출모듈을 사용하였을 때 영상의 공간분해능은 HGET에 비해 약 8% 낮은 성능을 보여주나 민감도 측면에서 약 26% 향상된 성능을 보여주고 있다.

[0096] 따라서 사용후핵연료 집합체의 검사속도를 향상시키기 위해서는 높은 민감도의 검출모듈이 요구되며 공간분해능의 경우 딥러닝 기반의 기존보다 향상된 영상재구성 알고리즘을 통해 개선하는 것이 바람직하다.

[0097] 이를 위하여 이하에서는 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층영상 재구성장치에 대하여 설명하도록 한다.

[0098] 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층영상 재구성장치는 상술한 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치의 단층영상 생성모듈(200)이며, 이러한 단층영상 생성모듈(200)은 제1 및 제2 감마선 검출모듈(100a, 100b)의 검출값에 기초하여 사용후 핵연료집합체의 단층영상을 생성하되, 구체적으로 도 13에 도시된 바와 같이 제1 단층영상 생성유닛(210) 및 제2 단층영상 생성유닛(220)으로 세분화할 수 있다.

[0099] 제1 단층영상 생성유닛(210)은 몬테칼로 전산모사 방법을 이용하여 제1 감마선 검출모듈(100a) 및 제2 감마선 검출모듈(100b)의 검출결과로부터 사용후 핵연료집합체의 제1 단층영상을 생성하는 기능을 수행한다.

[0100] 제2 단층영상 생성유닛(220)은 신경망 네트워크(20)로 구성된 딥러닝 알고리즘을 통하여 제1 단층영상을 재구성하여 제2 단층영상을 생성하는 기능을 수행한다.

[0101] 딥러닝은 생물의 신경계를 모방한 인공신경망(artificial neural network)의 하나로서 기존의 인공신경망 모델이 얇은 층의 뉴런 모델들의 연결로 구성되어 있다면, 딥러닝은 뉴런 모델의 층을 깊게 쌓아올림으로써 신경망의 학습능력을 높이는 모델이라고 할 수 있다.

[0102] 인공신경망의 학습은 기본적으로 상술한 신경망 네트워크(20) 상에서 수행되는데, 이러한 신경망 네트워크(20)는 도 14에 도시된 바와 같이 입력층(300), 은닉층(400) 및 출력층(500)으로 구성되며, 특히 은닉층(400)은 복수 개가 구비되는 것이 바람직하다.

[0103] 특히 은닉층(400)은 도 14에 도시된 바와 같이 복수 개의 노드(Node)를 포함하도록 구성되며, 이러한 노드에는

노드에는 상기 노드로 전달되는 입력인자 및 상기 노드에서 출력되는 출력인자 간의 상관관계인 함수가 정의되고, 상기 함수는 가중치 및 바이어스를 포함하도록 구성된다.

- [0104] 상술한 가중치는 입력된 학습 데이터로부터 인공신경망이 생성하는 출력값이 학습 데이터의 정답과 유사해지는 방향으로 조절하게 되며, 여기서 출력값은 입력층의 뉴런에 입력되는 값과 해당 시냅스에서의 가중치를 곱한 것을 모두 합한 선형모델 수치를 임계값(threshold) 기반의 활성화함수(activation function)를 거쳐 뉴런의 활성화를 결정하게 된다.
- [0105] 한편 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치의 제2 단층영상 생성유닛(220)에서 적용되는 딥러닝 알고리즘은 컨벌루션 오토인코더(Convolutional Auto Encoder: CAE)가 적용될 수 있다.
- [0106] 이하에서는 본 발명의 일 실시예에 따른 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치에서 신경망의 학습 및 학습된 신경망을 이용하여 사용후 핵연료집합체의 방출단층 영상의 재구성 결과에 대하여 설명하도록 한다.
- [0107] 해당 학습을 위한 이미지 데이터 세트(Image Data Set)의 획득을 위하여 핵연료집합체의 방출단층 촬영장치의 감마선 검출모듈(100)과 사용후 핵연료집합체(10)는 GATE(v.8.1) 몬테칼로 시뮬레이션 프로그램에 의하여 모델링되며, 투영화상의 검출면적은  $25.6 \times 4 \text{ cm}^2$ 이고, 핵연료집합체의 중심으로부터 감마선 검출모듈(100)까지의 거리는 22 cm로 설정하였다.
- [0108] 감마선 검출모듈(100)은  $0.3 \times 4 \times 4$ (전면) 및  $0.3$ (후면)  $\text{cm}^3$ 의 사다리꼴 BGO 섬광체(120)와  $0.2 \times 5 \times 4 \text{ cm}^3$ 의 슬릿(Slit)으로 구성되며, 슬릿은 각각의 섬광체(120) 앞에서 텅스텐 재료로 둘러쌓이도록 형성되어 있다.
- [0109] 테스트를 위한 핵연료집합체(10)는  $3 \times 3$ 의 연료봉(11) 어레이로 구성되며, 1.269 cm 간격마다 배치되고, 상기 연료봉(11)의 직경은 0.994 cm이다.
- [0110] 각 연료봉(11) source activity는 600 KBq로 설정되며, 각각의 시뮬레이션에 대하여 360도 회전하는 동안 400개의 투영 데이터를 수집하였다.
- [0111] 상기 핵연료집합체(10)의 기하학 정보에 기초하여 누락된 연료봉(11) 패턴의 총 511개의 그라운드 트루(Ground True: GT) 이미지가 생성되었으며, 동일한 패턴에 대하여 GATE에 의해 시뮬레이션된 이미지는 FBP 알고리즘에 의하여 재구성되었다.
- [0112] 상기와 같이 획득한 이미지 세트는 CAE를 사용하여 딥러닝 기반의 이미 재구성 알고리즘을 트레이닝하는데 사용되었다.
- [0113] 본 발명에 적용되는 CAE 모델은 도 15에 도시된 바와 같이 인코더 레이어군(410) 및 디코더 레이어군(420)으로 구성된다.
- [0114] 인코더 레이어군(410)은 2개의 컨벌루션 레이어와 2개의 맥스풀링 레이어를 포함하도록 구성되며, 구체적으로 제1 컨벌루션 레이어(411), 제1 맥스풀링 레이어(412), 제2 컨벌루션 레이어(413) 및 제2 맥스풀링 레이어(414)가 순차적으로 배치된다.
- [0115] 여기에서 제1 컨벌루션 레이어(411) 및 제2 컨벌루션 레이어(413)의 필터는  $3 \times 3$ 의 크기를 갖고, 수는 32에서 64로 설정되는 것이 바람직하다.
- [0116] 디코더 레이어군(420)은 2개의 컨벌루션 레이어와 2개의 업샘플링 레이어를 포함하여, 구체적으로 제3 컨벌루션 레이어(421), 제1 업샘플링 레이어(422), 제4 컨벌루션 레이어(423) 및 제2 업샘플링 레이어(424)가 순차적으로 배치되도록 구성된다.
- [0117] 여기에서 제3 컨벌루션 레이어(421) 및 제4 컨벌루션 레이어(423)의 필터는  $3 \times 3$ 의 크기를 갖으며, 수는 64에서 32로 설정되는 것이 바람직하다.
- [0118] 한편, CAE를 통한 트레이닝 과정에서 활용된 손실함수(Cost Function)는 평균제곱오차(Mean Squared Error)이며, 도 16은 훈련 에포크(epoch) 수의 증가에 따른 평균제곱오차의 감소 경향을 도시한 그래프로, 이를 통하여 CAE 모델이 성공적으로 트레이닝 되었음을 확인할 수 있다.
- [0119] 도 17은 CAE에 의한 GT 이미지, FBP 이미지(입력 이미지) 및 예측 이미지(출력 이미지)의 3개의 샘플을 도시하고 있다.
- [0120] CAE 학습을 위하여 총 511개의 GT 이미지 및 FBP 이미지 세트가 각각 대상 이미지 및 입력 이미지로

사용되었다.

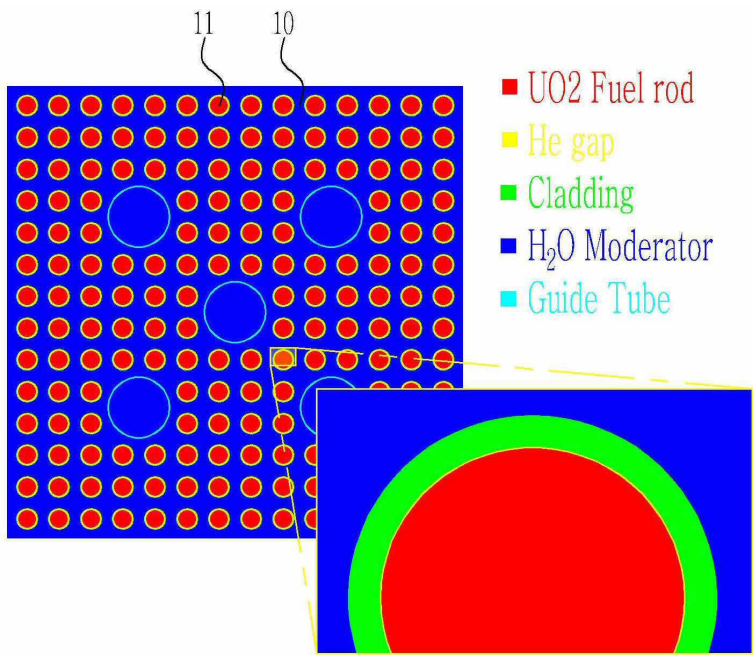
- [0121] 트레이닝된 CAE를 사용하여 도 17에 도시된 바와 같이 누락된 연료봉의 3가지 샘플 패턴의 예측 데이터를 획득하였다.
- [0122] FBP 이미지는 검출기의 공간 분해능이 낮기 때문에 연속적으로 배치된 연료봉의 식별이 어렵고 투사 이미지 수가 충분하지 않기 때문에 ring artifact가 있다는 문제점이 있다.
- [0123] 그러나 예측된 이미지는 FBT 이미지에서 노이즈를 성공적으로 제거한 것으로 확인되며, 기준 이미지인 GT 이미지와 매우 유사한 것으로 확인된다.
- [0124] 도 18은 GT 이미지와 FBP 이미지 사이의 픽셀 단위 감산 이미지 및 GT 이미지와 예측 이미지의 픽셀 단위 감산 이미지를 도시하고 있다.
- [0125] 노란색 박스로 표시된 관심영역에서, 감산된 이미지의 픽셀값을 평균화하여 재구성된 이미지가 GT 이미지와 얼마나 다른지 정량적으로 평가하였다.
- [0126] 평가결과, Sample 1, 2 및 3에 대한 픽셀값의 평균 차이는 FBP 이미지의 경우 7.7%, 28.0% 및 44.7%, 예측된 이미지의 경우 0.5%, 1.4% 및 1.9%인 것으로 확인되며, 이로 인하여 CAE 알고리즘을 사용하여 이미지 품질이 크게 향상되었음을 파악할 수 있다.
- [0128] 본 명세서에서 설명되는 실시예와 첨부된 도면은 본 발명에 포함되는 기술적 사상의 일부를 예시적으로 설명하는 것에 불과하다. 따라서 본 명세서에 개시된 실시예들은 본 발명의 기술적 사상을 한정하기 위한 것이 아니라 설명하기 위한 것이므로, 이러한 실시예에 의하여 본 발명의 기술 사상의 범위가 한정되는 것이 아님은 자명하다. 본 발명의 명세서 및 도면에 포함된 기술적 사상의 범위 내에서 당해 기술분야에 있어서의 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 유추할 수 있는 변형 예와 구체적인 실시예는 모두 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

### 부호의 설명

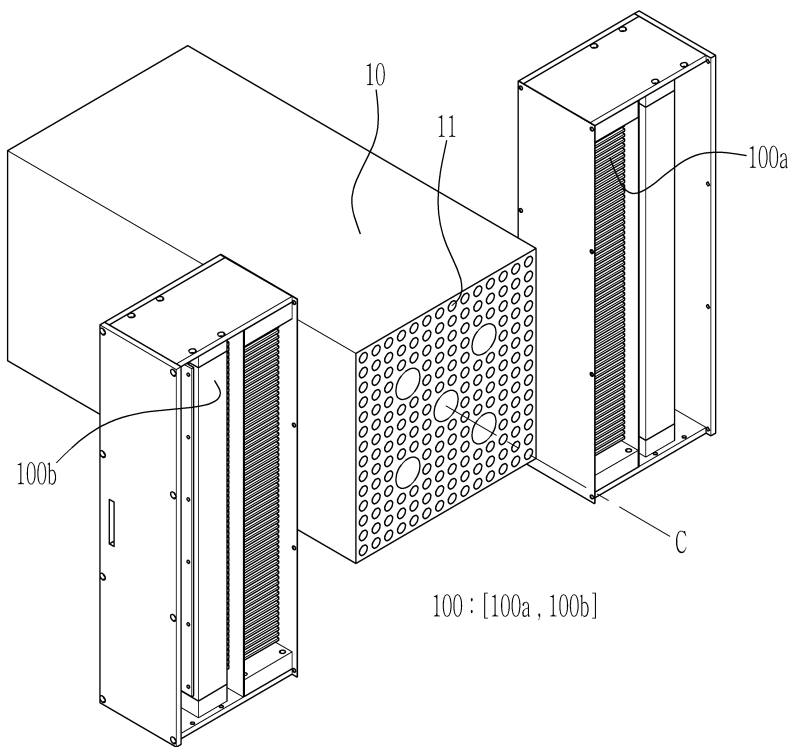
- [0130] 10: 핵연료 집합체
- 11: 연료봉
- 100: 감마선 검출모듈
- 110: 콜리메이터
- 120: 섬광 조립체
- 130: 광센서
- 200: 단층영상 생성모듈
- 210: 제1 단층영상 생성유닛
- 220: 제2 단층영상 생성유닛

도면

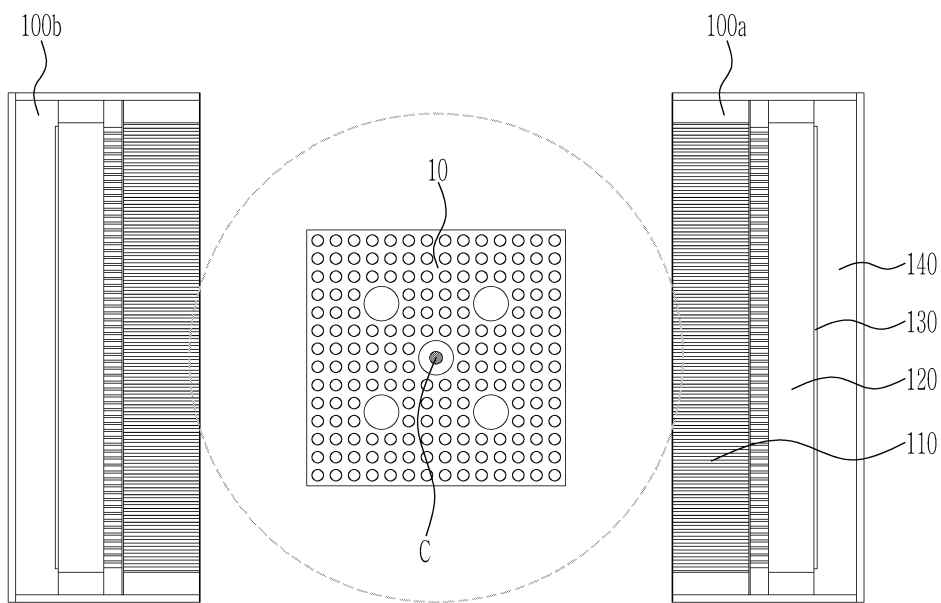
도면1



도면2



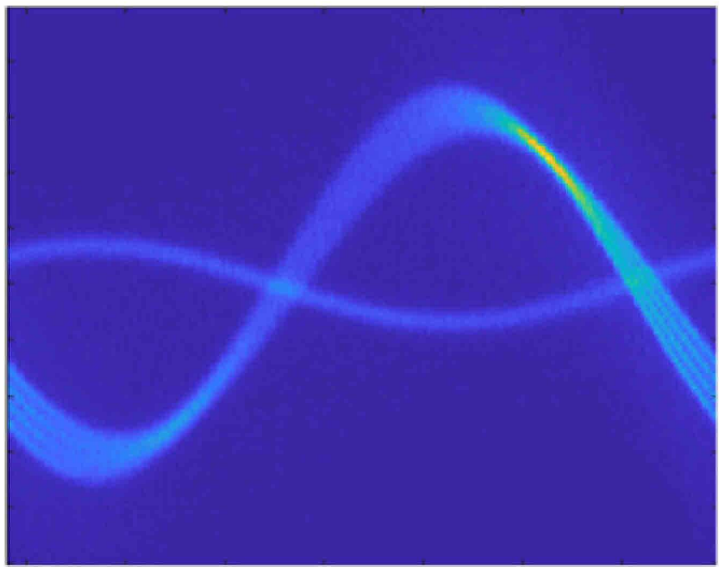
도면3



도면4

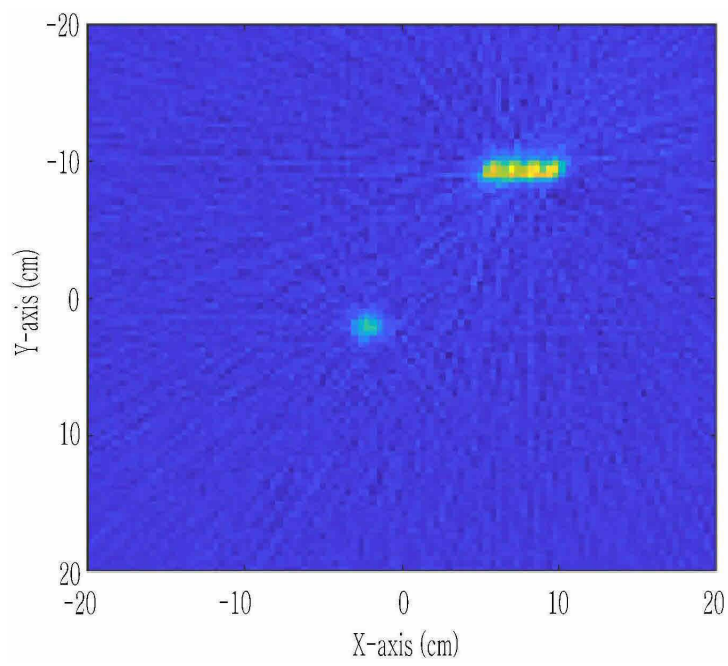
검출기 회전 각도( $\theta$ )

1차원 투사 영상

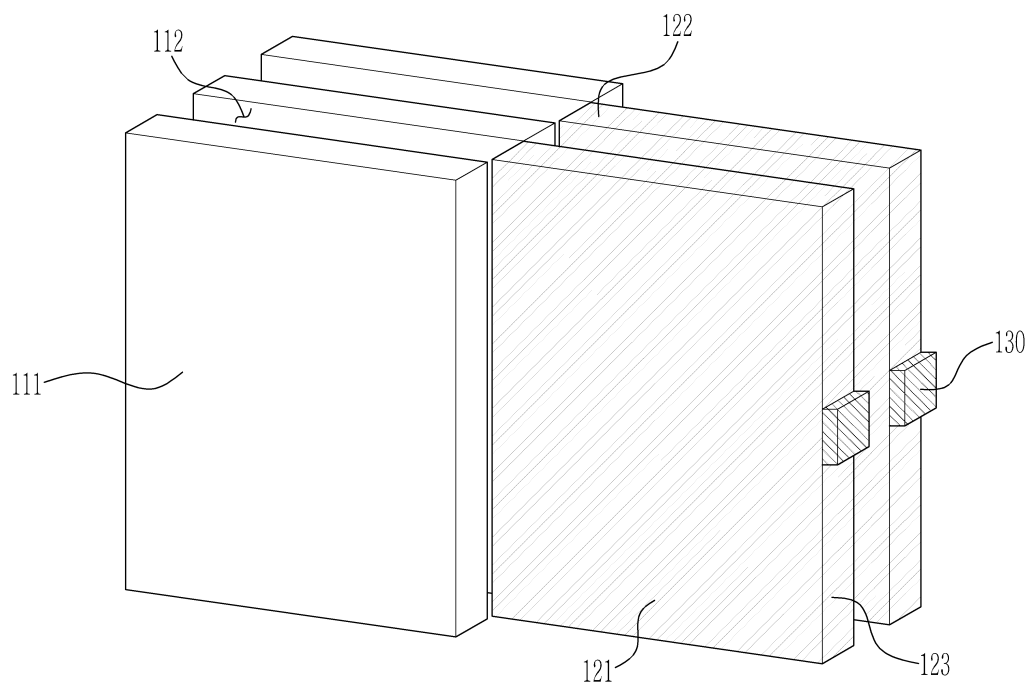




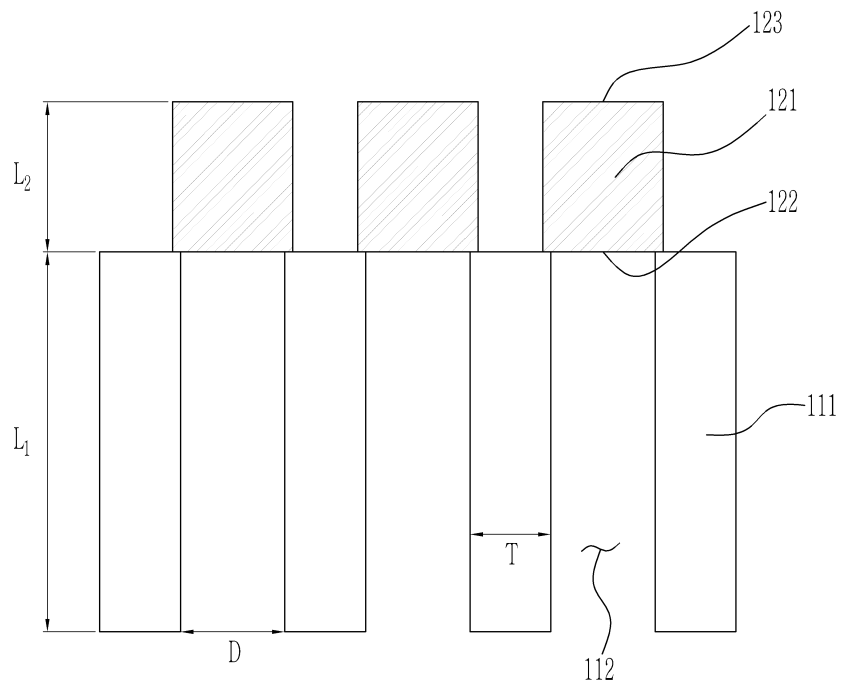
도면5



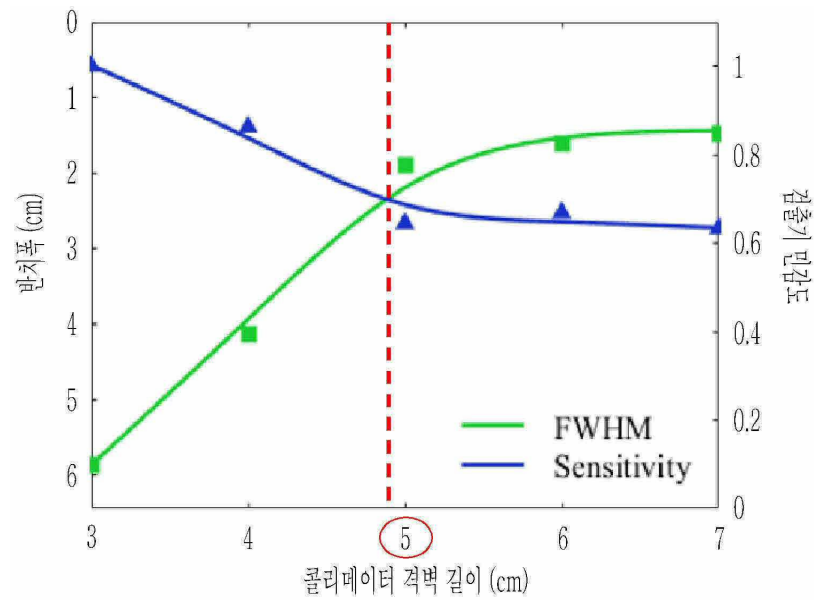
도면6



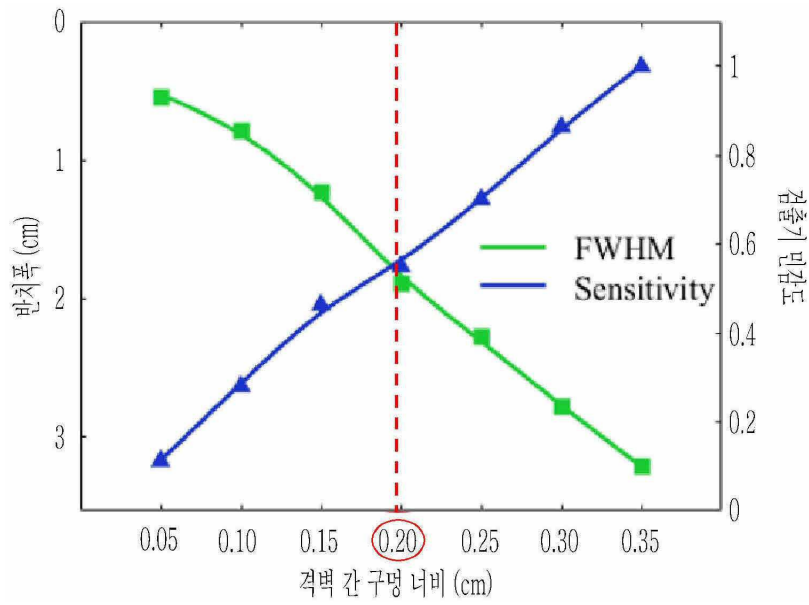
도면7



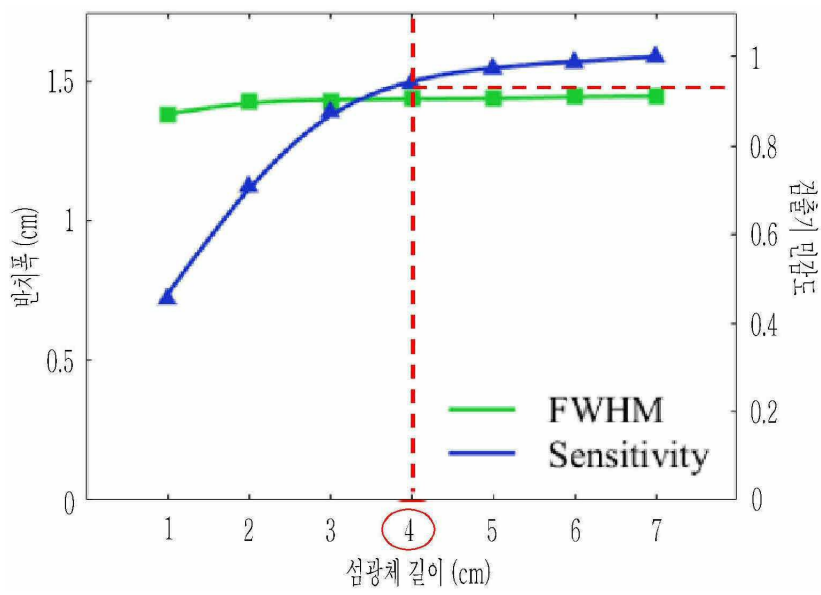
도면8



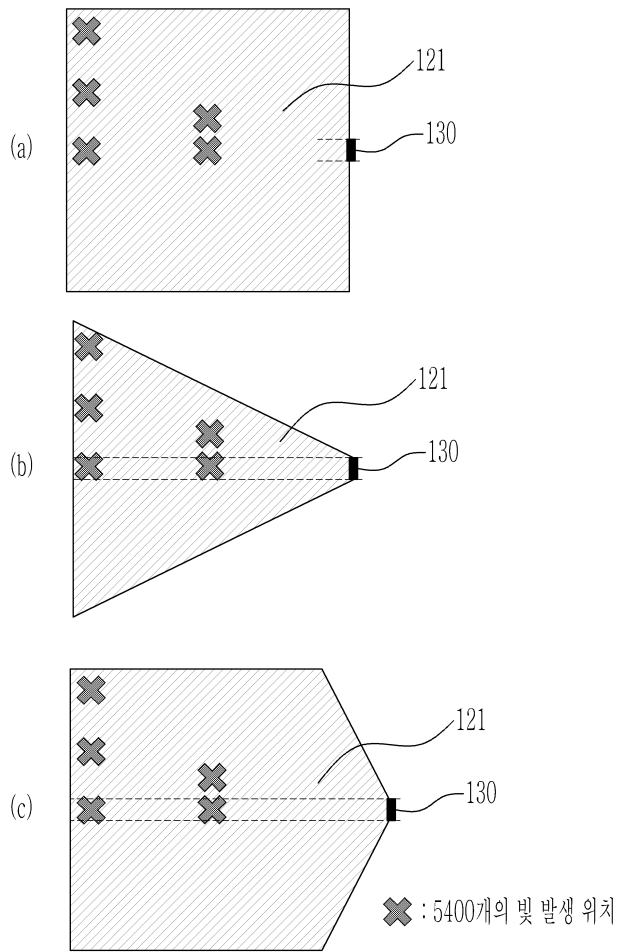
도면9



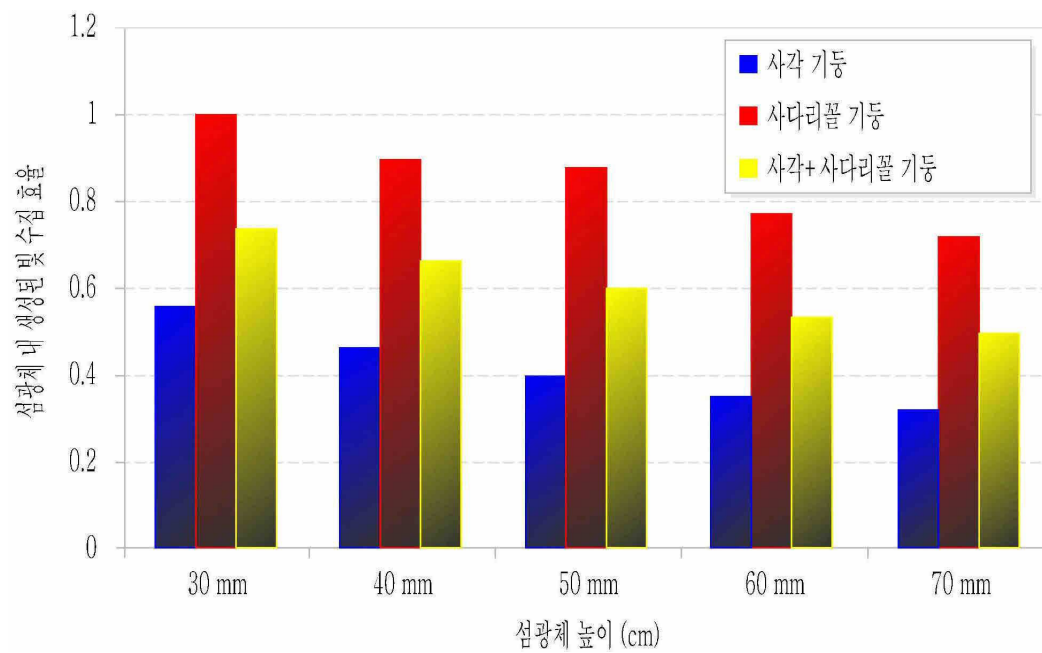
도면10



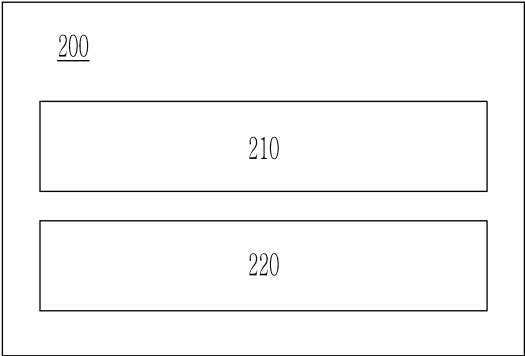
도면11



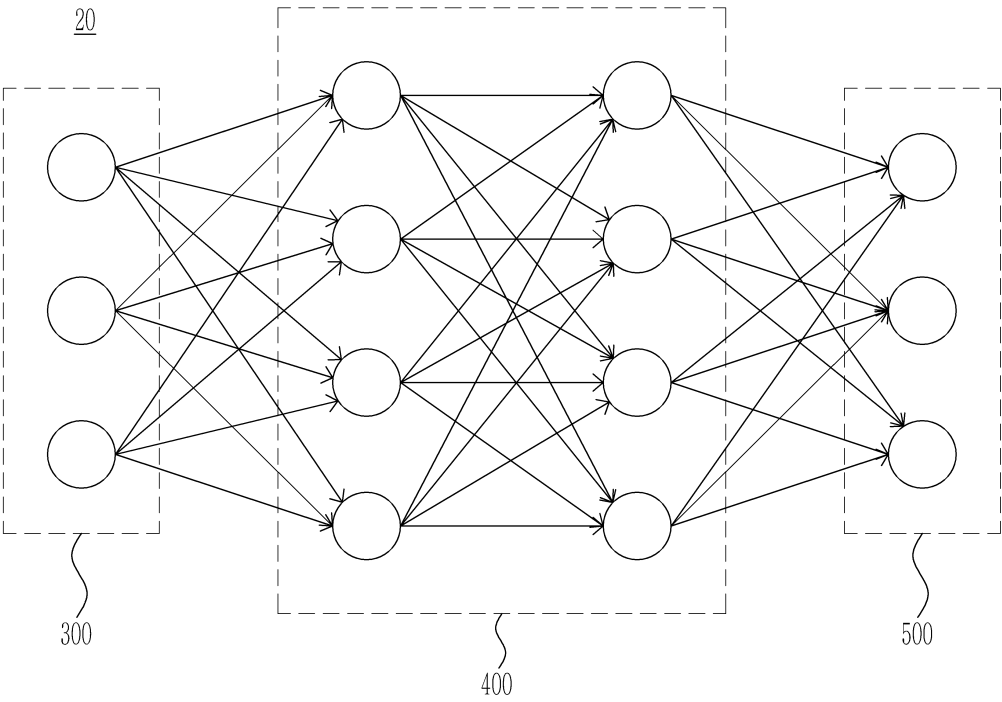
도면12



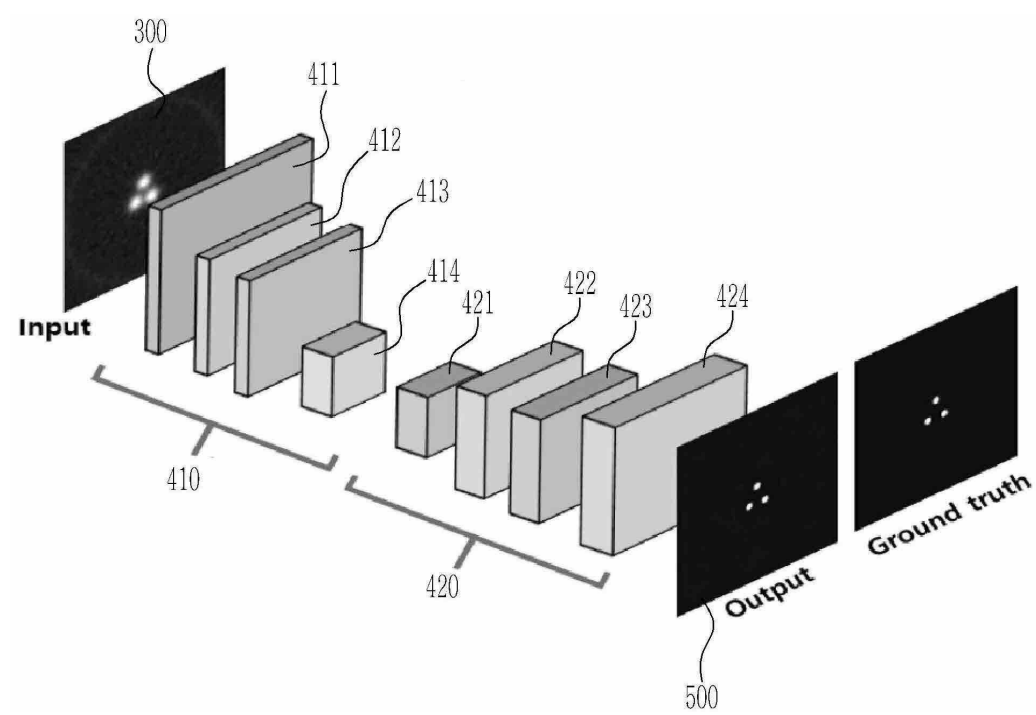
도면13



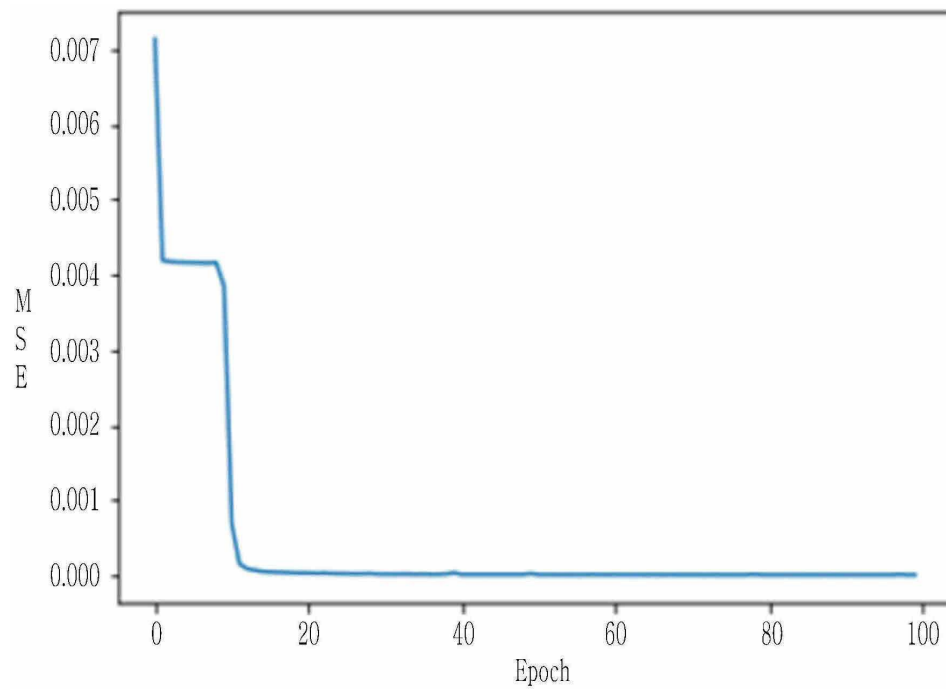
도면14



도면15

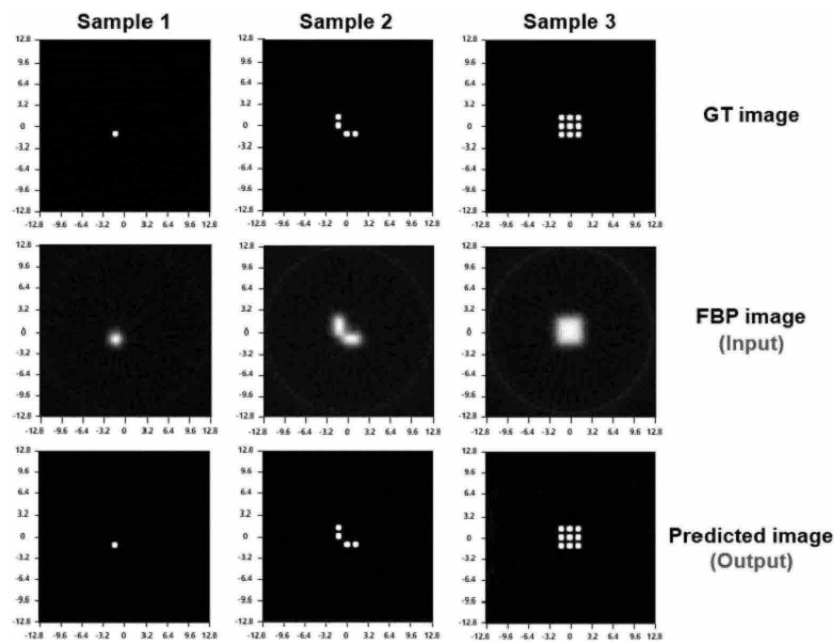


도면16

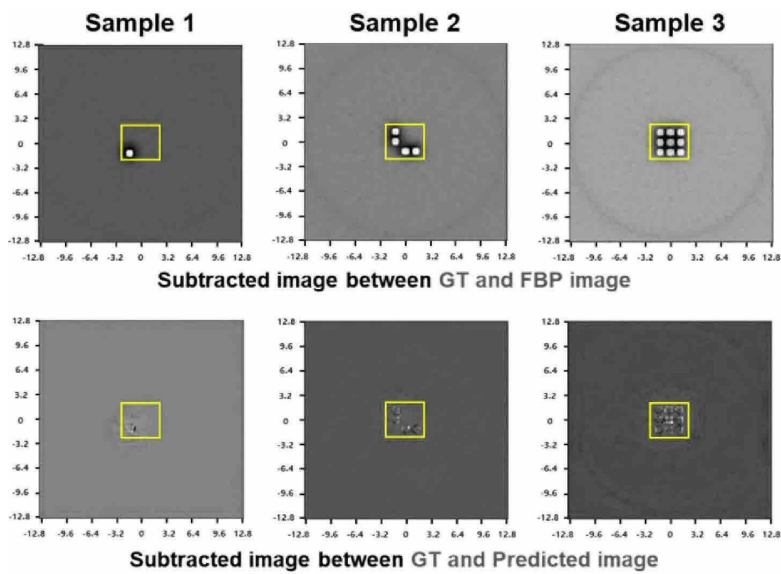




도면17



도면18



도면19

