

# 모의 TRISO 핵연료입자 코팅층 두께 비파괴 측정을 위한 X-선 영상처리기술 개발

김웅기\*, 이영우\*, 박지연\*, 나성웅\*\*  
\*한국원자력연구소 원자력수소사업추진반  
\*\*충남대학교 전자공학과  
e-mail:wkim@kaeri.re.kr

## Development of X-ray Image Processing Technology for Nondestructive Measurement of the Coating Thickness in the Simulated TRISO-coated Fuel Particle

Woong-Ki Kim\*, Young-Woo Lee\*, Ji-Yeon Park\* and  
Sung-Woong Ra\*\*

\*Nuclear Hydrogen Technology Development & Demonstration  
Project, Korea Atomic Energy Research Institute

\*\*Dept. of Electronics Engineering, Chungnam National  
University

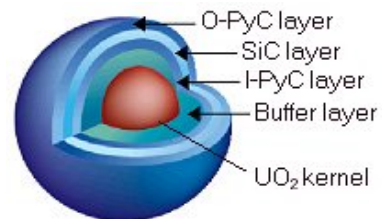
### 요 약

고온가스냉각 원자로에서는 고온 안정성 및 핵분열생성물 차단 성능이 우수한 TRISO(tri-totropic) 핵연료를 사용하고 있다. TRISO 핵연료 입자는 직경이 약 1 mm인 구 형태로 입자의 중심에는 직경 0.5 μm의 핵연료 커널(kernel)이 포함되며 커널 외곽을 코팅 층이 에워싸고 있다. 이 코팅 층은 완충(buffer) PyC(pyrolytic carbon) 층, 내부 PyC 층, SiC 층, 그리고 외부 PyC 층으로 구성되어 있다. 각 코팅 층의 두께는 수십~백 μm 범위이며, 본 연구에서는 각 코팅 층의 두께를 비파괴적으로 측정하기 위하여 마이크로포커스 X-선 발생장치와 고해상도 X-선 평판(flat panel) 검출기로 구성된 정밀한 X-선 라디오그래피 장치를 구성하고, UO<sub>2</sub> 핵물질 대신에 ZrO<sub>2</sub>를 커널로 사용한 모의 TRISO 핵연료 입자에 대한 라디오그래피 영상을 획득한 후 디지털 영상처리기술을 이용하여 코팅 층 사이의 경계선이 구분 가능하도록 영상을 개선하고 디지털 영상처리 알고리즘을 개발하여 코팅 층의 두께를 측정하였다.

### 1. 서론

고효율의 차세대 원자로로 부각되고 있는 고온가스 냉각로에는 고온 안정성 및 핵분열생성물 차단 성능이 우수한 TRISO(tri-isotropic) 핵연료가 사용된다. TRISO 핵연료 입자는 직경이 약 1 mm인 구 형태로 중심에 직경 0.5 mm의 핵연료 커널이 포함되며 커널 외곽을 코팅 층이 에워싸고 있다. 코팅 층은 그림 1에 보여진 바와 같이 완충(buffer) PyC(pyrolytic carbon) 층, 내부(inner) PyC(I-PyC) 층, SiC 층, 그리고 외부(outer) PyC(O-PyC) 층으로

구성되어 있다[1, 2].



(그림 1) TRISO 핵연료입자 구조

TRISO 핵연료 입자에 대한 다양한 검사 항목[7, 8] 중 비파괴검사가 가능한 항목은 제한적이며 아직 많은 검사 항목을 파괴적인 방법에 의존하고 있다. 그 중 코팅 층 두께를 측정하는 방법으로 기존에는 파괴적인 방법을 적용하였지만 최근에는 미국, 중국, 일본, 독일 등에서 X-선 라디오그래피(radiography) 방법의 적용을 시도하고 있다[1, 3-6].

파괴적인 방법을 적용할 경우 핵연료 시편의 활용이 불가능해지며 검사과정에서 방사성 폐기물이 발생하게 된다. 파괴적인 방법의 단점을 개선하기 위해 비파괴적인 방법이 요구되며, 이를 위해 X-선 라디오그래피(radiography) 방법이 가장 일반적이다.

본 연구에서는 X-선 촬영 조건을 조절하여 코팅 층 사이의 경계선 정보가 충분히 담긴 라디오그래피 영상을 획득하고 이 영상을 기반으로 영상처리 알고리즘을 개발하여  $UO_2$  핵물질 대신에  $ZrO_2$ 를 커널로 사용한 모의 TRISO 핵연료 입자의 코팅 층 두께를 측정하였다.

## 2. 코팅 층 두께 측정

원추형 콘 빔(cone beam) 형태의 X-선이 핵연료 입자를 투과할 때 X-선 빔의 중심이 핵연료 입자의 중심을 지나고 검출기 화면의 중심에 입사한다고 가정하면, 커널 및 각 코팅 층의 반경  $r_1 \sim r_5$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$r_n = \frac{d_n}{\sqrt{D^2 + d_n^2}} R, \quad n = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (1)$$

여기서,

$D$  : X-선원과 검출기 사이의 거리,

$R$  : X-선원과 핵연료 입자 중심과의 거리,

$r_1$  : 커널 반경,

$r_2 \sim r_5$ : 버퍼 PyC, I-PyC, SiC, O-PyC 층 반경,

$d_1$  : 커널 반경에 대한 검출기상의 거리,

$d_2 \sim d_5$ : 버퍼 PyC, I-PyC, SiC, O-PyC 층 반경에 대한 검출기상의 거리이다. X-선원과 검출기 사이의 거리 및 선원과 핵연료 입자 사이의 거리가 충분히 클 경우에 식 (1)은 다음 식 (2)와 같이 단순화시킬 수 있다.

$$r_n = kd_n, \quad n = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (2)$$

여기서  $k$ 는  $R/D$ 이며 확대에 따른 비율을 나타낸다.

## 3. X-선 검사 시스템

TRISO 핵연료 입자의 직경이 1 mm 이하로 매우 작고 코팅 층의 두께는 수십~백  $\mu m$  범위이기 때문에 코팅 두께를 정밀하게 측정하기 위해서는 초점 크기가 작은 마이크로포커스 X-선 발생장치와 고해상도 X-선 검출기가 요구된다. 본 연구에서는 (주)디알젬에서 개발한 마이크로포커스 X-선 검사 장치 Harmony 130을 이용하였다. Harmony 130 시스템에서 사용된 X-선 발생장치의 최대 관전압/관전류는 130 kV/400  $\mu A$ 이며 초점 크기는 5  $\mu m$ 이다. X-선 평판(flat panel) 검출기는 1024x1024 화소로 구성되어 있다. 한 화소의 크기는 48  $\mu m$ 이며 검출 해상도는 12비트(4096 gray levels)이다. 본 실험에서 사용된 X-선 발생장치의 관전압/관전류는 40 kV/100  $\mu A$ 이다. X-선 소스와 검출기 사이의 거리는 397 mm, X-선 소스와 핵연료 입자 사이의 거리는 10~50 mm로 조절하였다.

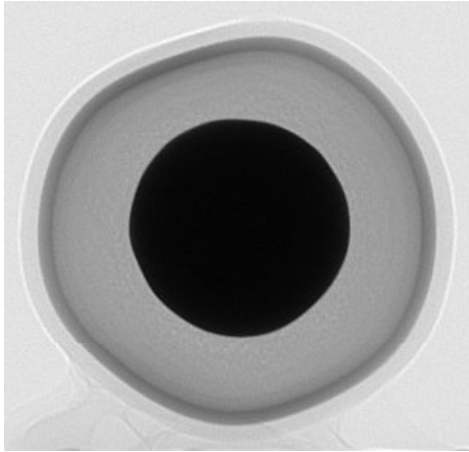
## 4. X-선 영상 처리

실험에 사용된 TRISO 핵연료 입자는 중국 HTR-10 고온 가스 원자로용 TRISO 핵연료 입자의 사양을 참조하여  $UO_2$  커널 대신에  $ZrO_2$  커널을 사용한 모의 TRISO 핵연료 입자이다[8]. 이와 같이 TRISO 핵연료 입자 코팅 공정에 의해 제조된 모의 TRISO 핵연료 입자에 대해 X-선 영상장치를 이용하여 X-선 라디오그래피 영상을 획득하였다. 획득된 영상 구성은 1024x1024 화소, 4096 단계 밝기 분포(12 비트 분해능)로 구성되었지만 디지털 영상처리를 위해 영상 구성을 512x512 화소, 256 단계 밝기 분포(8 비트 분해능)로 조절하였다.

X-선 영상 장치를 이용하여 획득된 원 영상에 코팅 층 사이의 경계선 정보가 충실하게 확보될 수 있도록 X-선 관전압과 관전류를 최소로 조절하였기 때문에 신호레벨이 매우 미약하다. 따라서 노출을 보정하기 위하여 대상 물체에 대해 다수의 영상을 획득하고 이를 누적하였다.

획득된 X-선 영상의 밝기(brightness)와 대비(contrast)를 개선하기 위하여 히스토그램 이퀄라이즈(equalize) 기법을 적용하였다. 이 기법을 적용하면 히스토그램이 전 밝기 영역에 고르게 분포하게 됨에 따라 밝기와 대비가 모두 개선되는 효과를 얻

을 수 있다. 이와 같이 개선된 영상은 그림 2와 같다. 커널뿐만 아니라 4 개의 코팅 층의 존재를 확인할 수 있을 정도로 개선된 영상을 얻을 수 있었다.



(그림 2) X-선 영상 개선

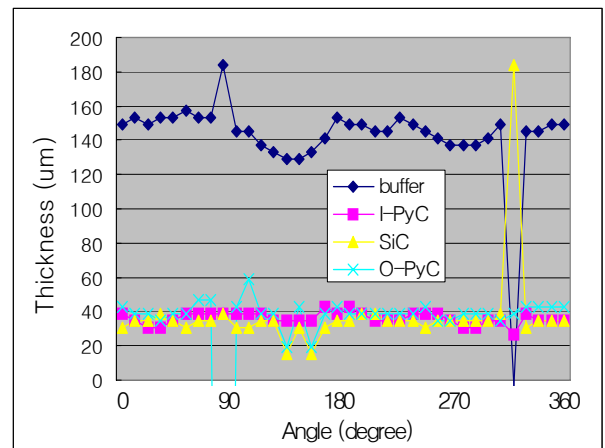
개선된 영상에 대해 핵연료 입자의 중심 좌표를 계산하였다. 중심점의 좌표는 모멘트를 이용하여 무게중심을 구하는 원리를 적용하였다[8, 9].

개선된 영상에 대해 3x3 메디안 필터를 적용하여 가능한 원래의 데이터를 유지하면서 고주파수 노이즈를 일부 제거하였다. 그리고 경계선 영역을 추출하기 위해 Sobel 연산자(operator)를 적용하였다[8, 10]. 경계선을 추출한 후 메디안 필터를 다시 적용하여 경계선 추출 과정에서 발생한 노이즈 피크를 일부 제거하고, 커널과 버퍼 층 사이, 버퍼 층과 I-PyC 층 사이, I-PyC 층과 SiC 층 사이, SiC 층과 O-PyC 층 사이, O-PyC 층과 외부 공기 층 사이의 경계선을 추출하였다.

이와 같이 추출된 중심점과 경계선 데이터를 이용하여 코팅 층의 두께를 측정하였다. 360 도 방향에 대해 10 도 구간 내에서 평균하여 각각의 반경을 36 번 측정하고 코팅 두께를 계산하였다. 그림 3은 각도에 따라 측정된 코팅 두께 분포를 보여주고 있다.

모의 TRISO 핵연료 입자에 대한 각 코팅 층의 두께를 측정하고 평균값과 표준편차를 계산한 결과는 표 1과 같다. 36개의 측정 점 중 4 개 지점에서 비정상적인 피크값을 나타내, 통계에는 32 개의 측정 점이 활용되었다. 측정 결과, 버퍼 층의 두께는 129~157  $\mu\text{m}$  범위를 나타냈으며 평균값은 146  $\mu\text{m}$ , 표준편차는 6.6  $\mu\text{m}$ 를 나타냈다. I-PyC 층의 두께는 31~43  $\mu\text{m}$  범위를, 평균값은 37  $\mu\text{m}$ , 표준편차는

3.1  $\mu\text{m}$ 를 나타냈다. SiC 층의 두께는 31~39  $\mu\text{m}$  범위를, 평균값은 35  $\mu\text{m}$ , 표준편차는 2.4  $\mu\text{m}$ 를 나타냈다. O-PyC 층의 두께는 35~59  $\mu\text{m}$  범위를, 평균값은 41  $\mu\text{m}$ , 표준편차는 4.5  $\mu\text{m}$ 를 각각 나타냈다. 버퍼 층의 두께는 기준값보다 30 % 이상 큰 값을 나타냈으며, I-PyC, SiC, O-PyC 층의 두께는 기준값과 유사한 결과를 나타냈다. 이와 같이 X-선 라디오그래피 기술과 영상처리기술을 적용하여 모의 TRISO 핵연료 입자의 코팅 층 두께를 비파괴적으로 측정할 수 있음을 확인하였다.



(그림 3) 모의 TRISO 핵연료 입자 코팅 두께 측정

<표 1> 코팅 두께 측정

	기준값, $\mu\text{m}$	측정값, $\mu\text{m}$		
		측정범위	평균	표준편차
buffer	95	129 ~ 157	146	6.6
I-PyC	40	31 ~ 43	37	3.1
SiC	35	31 ~ 39	35	2.4
O-PyC	40	31 ~ 59	41	4.5

### 5. 결론

본 연구에서는 TRISO 핵연료 입자의 코팅 층 두께를 비파괴적으로 측정하기 위해 마이크로 X-선 라디오그래피 기술과 영상처리기술을 개발하였다. 제조공정에서 채취한 모의 TRISO 핵연료 입자에 대한 측정 결과, 버퍼 층의 두께는 기준값보다 30 % 이상 큰 값을 나타냈으며, I-PyC, SiC, O-PyC 층의 두께는 기준값과 유사한 결과를 나타냈다. 이와 같이 마이크로 X-선 라디오그래피 기술과 영상처리 알고리즘을 적용하여 모의 TRISO 핵연료 입자의 코팅 층 두께를 비파괴적으로 측정하는데 성공하였다. 앞으로 파괴 검사와의 비교 실험을 수행하

고 자동 측정 알고리즘의 안정성을 향상시켜 측정 정밀도와 신뢰도를 확보할 계획이다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

[1] K. Sawa, S. Suzuki and S. Shiozawa, "Safety Criteria and Quality Control of HTTR fuel," Nuclear Engineering and Design 208, pp.305-313, (2001)

[2] X. Fu, M. Takahashi, S. Ueta and K. Sawa, "Comparison of HTGR Fuel Design, Manufacture and Quality Control Methods between Japan and China," JAERI-Tech, 2002-049, (2002)

[3] C. Tang, Y. Tang, J. Zhu, X. Qiu, J. Li and S. Xu, "Research and Development of Fuel Element for Chinese 10MW High Temperature Gas-cooled Reactor," Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.37, No.9, pp.802-806, (2000)

[4] C. Tang, Y. Tang, J. Zhu, Y. Zou, J. Li, X. Ni, "Design and manufacture of the fuel element for the 10 MW high temperature gas-cooled reactor," Nuclear Engineering and Design 218, pp.91-102, (2002)

[5] John Hunn, "Coated Particle Fuel Characterization Lab for the Advanced Gas Reactor Fuel Development and Qualification Program," ANS/GLOBAL (2003)

[6] Ronald L. Hockey, Leonard J. Bond, and Charles R. Batishko, Joseph N. Gray, John J. Saurwein, Richard A. Lowden, "Advances in Automated QA/QC for TRISO Fuel Particle Production," Proceedings of ICAPP 2004, (2004)

[7] W. K. Kim, Y. W. Lee, J. Y. Park and S. W. Ra, "Simulation of an X-ray Radiography for the Coating Thickness Measurement in the TRISO-coated Fuel Particle," 한국원자력학회 추계 학술발표회 논문집, (2005)

[8] W. K. Kim, Y. W. Lee and S. W. Ra, "Simulation of the Digital Image Processing Algorithm for the Coating Thickness Automatic Measurement of the TRISO-coated Fuel Particle," International Journal of Information Processing System, Vol. 1, No. 1, pp.36-40 (2005).

[9] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods, "Digital Image Processing," Addison Wesley, pp.514-518, (1992)

[10] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods, "Digital Image Processing," Addison Wesley, pp.189-201, (1992)