

마이크로포커스 X-선 투과 영상을 이용한 모의 TRISO 핵연료 입자 코팅 층 두께 비파괴 측정

Nondestructive Measurement of the Coating Thickness in the Simulated TRISO-Coated Fuel Particle Using Micro-Focus X-ray Radiography

김용기*[†], 이영우*, 박지연*, 박정병**, 나성웅***

Woong-Ki Kim*[†], Young-Woo Lee*, Ji-Yeon Park*, Jung-Byung Park** and Sung-Woong Ra***

초 록 차세대 원자로로 부각되고 있는 고온가스로에서는 원자로에서는 고온 안정성 및 핵분열생성물 차단 성능이 우수한 TRISO(tri-isotropic) 핵연료를 사용하고 있다. TRISO 핵연료 입자는 직경이 약 1mm인 구 형태로 입자의 중심에는 직경 0.5mm의 핵연료 커널(kernel)이 포함되어 커널 외곽을 코팅 층이 에워싸고 있다. 이 코팅 층은 완충(buffer) PyC(pyrolytic carbon)층, 내부 PyC층, SiC층, 그리고 외부 PyC층으로 구성되어 있다. 각 코팅 층의 두께는 수십~백 μm 범위이고 사양으로 정해져 있으며, 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 개발하였다. 개발된 마이크로 X-선 라디오그래피 장치를 이용하여 UO_2 핵물질 대신에 ZrO_2 를 커널로 사용한 모의 TRISO 핵연료 입자에 대한 투과 영상을 획득한 후 디지털 영상처리 기술을 이용하여 코팅 층 사이의 경계선이 구분 가능하도록 영상을 개선하고 디지털 영상처리 알고리즘을 개발하여 코팅 층의 두께를 자동으로 측정하였다.

주요어: 마이크로포커스 X-선 라디오그래피, 디지털 영상처리, 비파괴검사, TRISO(tri-isotropic), 핵연료 입자, 고온가스로, 코팅 두께 측정

Abstract TRISO(tri-isotropic)-coated fuel particle technology is utilized owing to its higher stability at a high temperature and its efficient retention capability for fission products in the HTGR(high temperature gas-cooled reactor). The typical spherical TRISO fuel particle with a diameter of about 1 mm is composed of a nuclear fuel kernel and outer coating layers. The outer coating layers consist of a buffer PyC(pyrolytic carbon) layer, inner PyC(I-PyC) layer, SiC layer, and outer PyC(O-PyC) layer. Most of the inspection items for the TRISO-coated fuel particle depend on destructive methods. The coating thickness of the TRISO fuel particle can be nondestructively measured by the X-ray radiography without generating radioactive wastes. In this study, the coating thickness for the simulated TRISO-coated fuel particle with ZrO_2 kernel instead of UO_2 kernel was measured by using micro-focus X-ray radiography with micro-focus X-ray generator and flat panel detector. The radiographic image was also enhanced by image processing technique to acquire clear boundary lines between coating layers. The coating thickness was effectively measured by applying the micro-focus X-ray radiography. The inspection process for the TRISO-coated fuel particles will be improved by the developed micro-focus X-ray radiography and digital image processing technology.

Keywords: Micro-Focus X-Ray Radiography, Digital Image Processing, Nondestructive Test, Triso(Tri-Isotropic), Nuclear Fuel Particle, High Temperature Gas Cooled Reactor, Coating Thickness Measurement

1. 서론

고효율의 차세대 원자로로 부각되고 있는 고온 가스로는 고온 안정성 및 핵분열생성물 차단 성능이 우수한 TRISO(tri-isotropic) 핵연료가 사용된다. TRISO 핵연료 입자는 직경이 약 1mm인 구 형태로 중심에 직경 0.5mm의 핵연료 커널이 포함되어 커널 외곽을 코팅 층이 에워싸고 있다. 코팅 층은 완충(buffer) PyC(pyrolytic carbon)층, 내부(inner) PyC(I-PyC)층, SiC층, 그리고 외부(outer) PyC(O-PyC)층으로 구성되어 있다[1-6]. Fig. 1은 TRISO 핵연료 입자의 단면과 구성성분을 보여준다. TRISO 핵연료 입자의 사양에 포함되어 있는 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) 또는 X-선 CT(computed tomography) 방법의 적용을 시도하고 있다[2, 7-10].

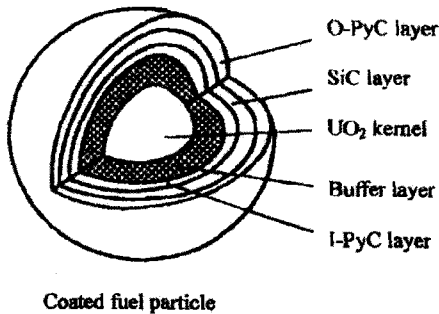


Fig. 1 Structure of a TRISO-coated fuel particle

TRISO 핵연료 입자의 코팅 층 두께를 측정하기 위해 파괴적인 방법을 사용하는 경우, 핵연료 입자를 절단하고 절단면을 연마한 후 광학현미경으로 절단면을 관찰하고 절단면에 대한 영상을 획득하여 코팅 두께를 측정한다. 이 방법을 적용할 경우에 검사의 정밀도를 향상시킬 수 있지만 검사 시편 제조 과정이 복잡하고 절단면의 위치를 제어하기 어려우며 그에 따른 측정 오차를 발생시킬 수 있다. 무엇보다도 파괴적인 방법을 적용할 경우 핵연료 시편의 활용이 불가능해지며 검사과정에서 우라늄과 코팅 구성 성분이 혼합된 다량의 방사성 폐기물이 발생하게 된다. 이와 같은 파괴적인 방법의 단

점을 개선하기 위해 비파괴적인 방법이 요구되며 TRISO 핵연료 입자의 코팅 두께를 비파괴적으로 측정하는 방법으로 X-선 라디오그래피 방법이 가장 일반적이다. 그러나 X-선 라디오그래피 방법은 X-선 진행 방향으로 투과(projection)된 정보이므로 X-선 진행 방향으로 정보가 중첩되어 표현된다. 이 투과 화면에서는 경계선이 명확하게 나타나지 않는 단점이 있다[11].

코팅 층의 두께를 정밀하게 측정하기 위해서는 경계선이 명확한 영상을 획득해야 하며 CT 방법의 경우 명확한 단층 영상을 획득할 수 있지만 장비가 고가이며 데이터 처리 시간이 많이 소요되는 단점이 있어 검사 샘플의 수가 제한적이다. 따라서 코팅 두께를 측정하여 코팅 공정을 모니터링하기 위해서는 검사 시간이 매우 적게 소요되는 X-선 라디오그래피 방법이 효과적이다. 본 연구에서는 X-선 촬영 조건을 조절하여 코팅 층 사이의 경계선 정보가 충분히 포함된 라디오그래피 영상을 획득하고 이 영상을 기반으로 영상처리 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘을 이용하여 UO₂ 핵물질 대신에 ZrO₂를 커널(kernel)로 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 핵연료 입자의 중심 면을 지나는 X-선 빔의 모양을 이차원 평면상에서 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다.

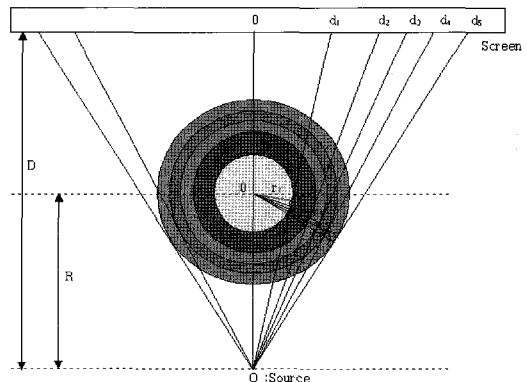


Fig. 2 X-ray beam projection for a TRISO-coated fuel particle

이 때 커널 및 각 코팅 층의 반경 $r_1 \sim r_5$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[11].

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

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 거리

이다. 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. 식 (2)의 경우 콘 빔이나 부채꼴 형태의 팬 빔(fan beam)의 주사각이 작은 경우에 대해 적용 가능하다. 이 식을 적용한 경우에는 주사각이 커질수록 측정 오차가 증가한다. 근사적으로 구한 값의 오차율을 주사각의 변화를 의미하는 d_n/D 의 변화에 대해 나타내면 Fig. 3과 같다.

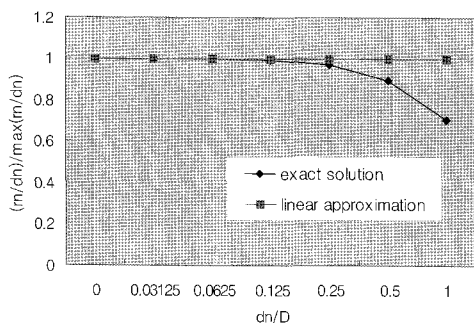


Fig. 3 Error of the approximated solution

d_n/D 의 증가는 주사각의 증가를 의미하며 d_n/D 이 1에 이르면 비례 계수 사이에 약 30%의 차이를 보여주고 있다. d_n/D 이 0.125 이하에서는 오차가 1% 이하를 나타내며, 본 실험에서 d_n/D 이 0.1 이하가 되도록 설정하였으므로 근사식 (2)를 사용해도 오차가 거의 없음을 알 수 있다. 그러나 확대율이 큰 경우에는 오차 발생에 유의해야 한다.

3. X-선 검사 시스템

TRISO 핵연료 입자의 직경이 1mm 이하로 매우 작고 코팅 층의 두께는 수십~백 μm 범위이기 때문에 코팅 두께를 정밀하게 측정하기 위해서는 초점 크기가 작은 마이크로포커스 X-선 발생장치와 고해상도 X-선 검출기가 요구된다. 본 연구에서는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 (주)디알랩에서 개발한 마이크로포커스 X-선 검사장치 Harmony 130을 이용하였다.

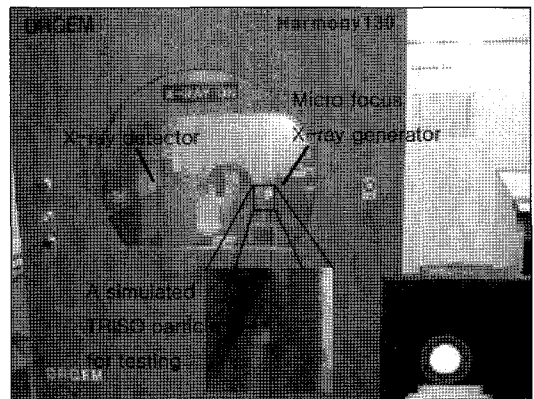


Fig. 4 Micro-focus X-ray imaging system, Harmony 130

Harmony 130 시스템에서 사용된 X-선 발생장치의 최대 관전압/관전류는 130kV/400 μA 이며 초점 크기는 5 μm 이다. X-선 평판(flat panel) 검출기는 1024x1024 화소(pixel ; picture element)로 구성되어 있다. 한 화소의 크기는 48x48 μm^2 이며 검출 해상도는 12비트(4096 gray levels)이다. X-선 평판 검출기는 신틸레이터(scintillator)와 Si 광다이오드(photodiode)를 평판형으로 집적하여 제조되었으며, 감도와 해상도가 우수하고 획득된 신호의 디지털화가 용이하여 응용 범위가 확대되고 있다. 본 실험에서 적용된 X-선 발생장치의 관전압/관전류는

40kV/100 μ A이다. X-선 소스와 검출기 사이의 거리는 397mm, X-선 소스와 핵연료 입자 사이의 거리는 10~50mm로 조절하였다. X-선 노출 시간은 경계선 정보가 충분히 포함된 영상 데이터가 획득되도록 조절되었다.

4. 디지털 라디오그래피 영상 처리

실험에 사용된 TRISO 핵연료 입자는 Table 1과 같은 중국 HTR-10 고온가스로용 TRISO 핵연료 입자의 사양을 참조하여 UO₂ 커널 대신에 ZrO₂ 커널을 사용한 모의 TRISO 핵연료 입자이다[8]. TRISO 핵연료 입자 코팅 공정에 의해 제조된 모의 TRISO 핵연료 입자에 대해 마이크로포커스 X-선 검사장치를 이용하여 X-선 라디오그래피 영상을 획득하였다. 획득된 영상은 1024x1024 화소, 4096 단계 밝기 분포(4096 gray levels; 12 비트 분해능)로 구성되었지만 디지털 영상 처리를 위해 영상 구성을 512x512 화소, 256 단계 밝기 분포(256 gray levels; 8 비트 분해능)로 조절하였다.

Table 1 Specification of TRISO-coated fuel particle

		사양
UO ₂ 커널	직경	500 μ m
	밀도	10.5 g/cm ³
코팅 층 두께	Buffer	95 μ m
	I-PyC	40 μ m
	SiC	35 μ m
	O-PyC	40 μ m
코팅 층 밀도	Buffer	≤ 1.10 g/cm ³
	I-PyC	1.9 \pm 0.1 g/cm ³
	SiC	≥ 3.18 g/cm ³
	O-PyC	1.9 \pm 0.1 g/cm ³
코팅된 핵연료 입자	직경	920 μ m
	진원도	<1.2

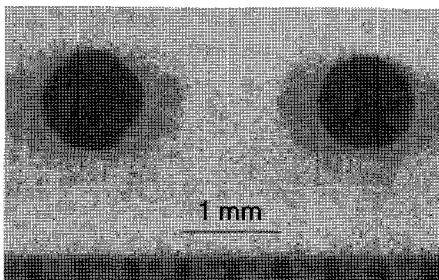


Fig. 5 The simulated TRISO-coated fuel particles

마이크로포커스 X-선 촬영장치를 이용하여 획득된 원영상에 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. 영상을 누적할 경우 영상 획득 시간이 다소 증가하지만 노출을 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 랜덤(random) 노이즈를 제거하는 장점을 얻을 수 있다. 20장 이하의 영상을 누적한 경우 노출이 부족하고 랜덤 노이즈 제거 효과도 떨어졌으며, 20장 이상의 많은 영상을 누적하면 데이터 처리 시간이 증가하는 반면 효과는 크게 증가하지 않기 때문에 본 실험에서는 20장의 영상을 누적하여 Fig. 6에 나타낸 바와 같은 원 영상을 획득하였다. 획득된 원 영상에 대한 히스토그램(histogram)은 Fig. 7과 같다. 히스토그램에서 볼 수 있는 바와 같이 획득된 영상은 여전히 노출이 부족하여 어렵게 표현되어 있다.

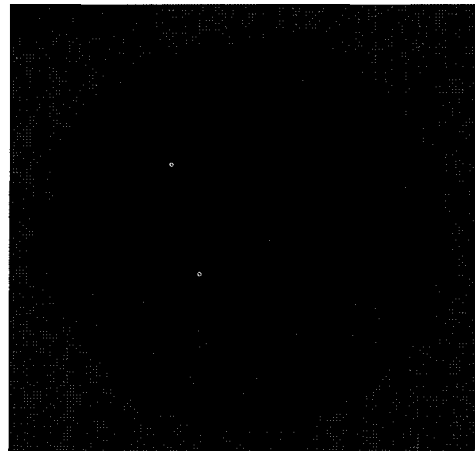


Fig. 6 X-ray radiographic image for a simulated TRISO fuel particle

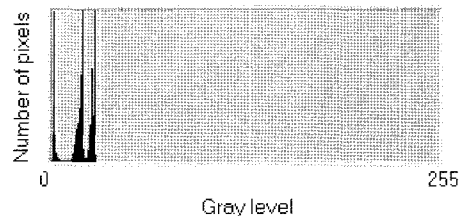


Fig. 7 The histogram of the X-ray radiographic image

획득된 X-선 라디오그래피 영상의 밝기 (brightness)와 대비(contrast)를 개선하기 위하여 히스토그램을 조정하였다. 히스토그램에서 어두운 영역에 집중된 밝기 분포를 전 밝기 영역에 고르게 분포하도록 조절함으로써 밝기와 대비가 모두 개선되는 효과를 얻을 수 있다. 이와 같이 개선된 영상은 Fig. 8과 같다. 커널뿐만 아니라 4개의 코팅 층의 존재를 확인할 수 있을 정도로 개선된 영상을 얻을 수 있었다. 히스토그램이 조정된 영상의 히스토그램은 Fig. 9와 같다. 밝기 분포가 전 영역에 분포함을 확인할 수 있다.

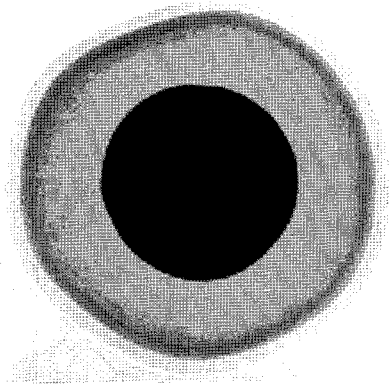


Fig. 8 A histogram adjusted image

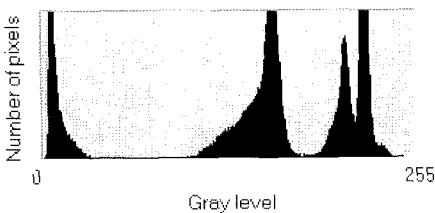


Fig. 9 The histogram of the histogram adjusted image

히스토그램이 개선된 영상에서 4개 코팅 층을 모두 확인할 수 있었지만 자동으로 코팅 층 사이의 경계선을 추출하기 위해서는 경계선이 더욱 선명할 필요가 있다. 특히 버퍼 층과 I-PyC층 사이의 경계선이 더욱 명확해야 경계선을 정확하게 추출하여 측정 오차를 줄일 수 있다. 고주파수 성분으로 구성된 경계선을 강조할 경우에, 역시 고주파수 성분으로 구성된 랜덤 피크(peak) 노이즈도 강조되어 고주파 노이즈가 동시에 증가할 수 있기 때문에 주의해야 한다. 이를 방지하기 위해 경계선을 강조하

기 전에 메디안 필터를 이용하여 랜덤 피크 노이즈를 억제하였다. Fig. 10은 경계선이 강조된 영상을 보여준다. 그림 8에 비해 버퍼 층과 I-PyC 층 사이의 경계선을 보다 쉽게 식별할 수 있다.

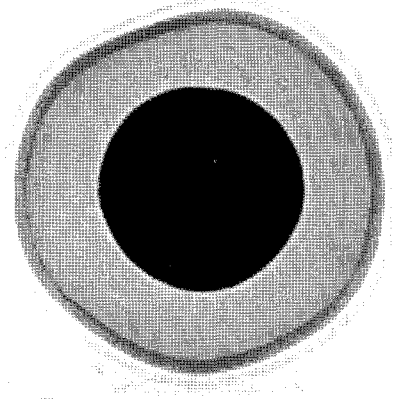


Fig. 10 The enhanced image with the intensified boundaries

데이터 처리를 용이하게 수행하기 위해 영상 데이터의 화소 밝기 값을 반전하여 Fig. 11과 같이 표현할 수 있다. 이 경우에 밀도가 높은 영역이 높은 밝기 값을 나타내 밀도와 밝기 값이 비례적으로 표현되어 밀도와 밝기 값의 상호 관계에 대한 이해가 용이하다.

최종적으로 Fig. 11과 같이 개선된 영상에 대해 핵연료 입자외의 영역을 제외하고 주로 핵연료 입자 정보로 구성된 관심 영역(AOI; area of interest)을 지정하고 관심 영역내에서 경계선 측정의 기준이 되는 중심점의 좌표를 계산하였다.

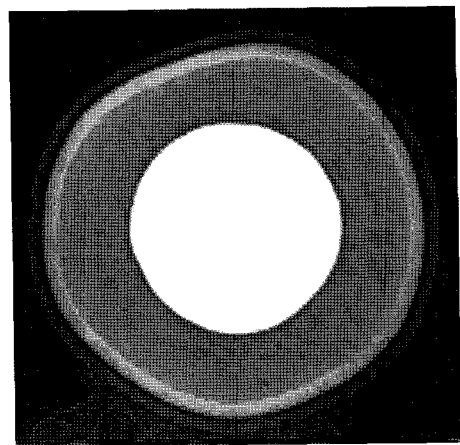


Fig. 11 The image with the inverted brightness

중심점의 좌표는 식 (3)과 같이 모멘트를 이용하여 무게중심을 구하는 원리를 적용하였다[12,13].

$$x_a = \frac{m_{10}}{m_{00}}, y_a = \frac{m_{01}}{m_{00}}, \quad (3)$$

여기서,

x_a : 중심점의 x 좌표,

y_a : 중심점의 y 좌표,

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x,y) dx dy, \quad p, q = 0, 1, 2, ,$$

$f(x,y)$: 좌표 (x, y)에 위치한 화소의 밝기 값 (gray level ; 0~255사이의 값을 가짐)

이다.

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 [12,14]. 미분 개념을 적용한 Sobel 연산자는 Fig. 12와 같이 수평 연산자와 수직 연산자로 구분되며 이 연산자를 적용하면 영상내에 존재하는 모든 방향의 경계선을 추출할 수 있다.

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

(a)

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

(b)

Fig. 12 (a) The horizontal sobel operator, (b) The vertical sobel operator

경계선을 추출한 후 메디안 필터를 다시 적용하여 경계선 추출 과정에서 발생한 노이즈 피크를 일부 제거하였다. Fig. 13은 추출된 경계선 영역과 중심 선상의 단면 프로파일들을 보여준다. 경계선 영상의 단면 프로파일을 살펴보면, 커널과 버퍼 층 사이, I-PyC층과 SiC층 사이, SiC층과 O-PyC층 사이, O-PyC층과 외부 공기층 사이의 경계선 데이터는 큰 피크를 나타내 추출이 용이하지만 버퍼 층과 I-PyC층 사이의 경계선 데이터는 작은 피크를 나타내 추출이 용이하지 않다. 따라서 경계선을 두 단계로 나누어 추출하였다. 1 단계로 문턱치를 설정하여

4 개의 경계선 영역을 추출하였으며 2 단계에서는 I-PyC층과 SiC층 사이의 경계선을 기준으로 I-PyC 영역과 버퍼 영역 사이에 존재하는 피크를 구하여 버퍼 층과 I-PyC층 사이의 경계선을 추출하였다.

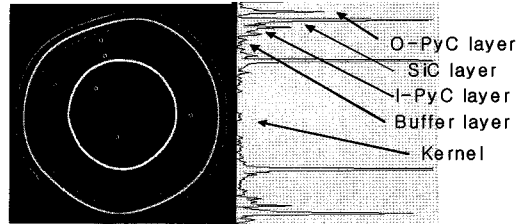


Fig. 13 The extracted boundaries between the coating layers

이와 같이 추출된 중심점과 경계선 데이터를 이용하여 코팅 층의 두께를 자동으로 측정할 수 있었다. 측정 과정을 표현한 알고리즘은 Fig. 14와 같다.

360도 방향에 대해 10도 구간 내에서 평균하여 각각의 반경을 36번 측정하고 코팅 층 두께를 계산하였다. Fig. 15는 각도에 따라 측정된 반경 데이터를 이용하여 계산된 코팅 두께 분포를 보여주고 있다.

모의 TRISO 핵연료 입자에 대한 각 코팅 층의 두께를 측정하고 평균값과 표준편차를 계산한 결과는 Table 2와 같다. 경계선을 정확히 인식하지 못하여 비정상적으로 측정된 값은 실험결과에서 제외하였다. Fig. 15에서 살펴보면 36개의 측정점 중 4개 지점에서 비정상적인 피크값을 나타내 통계에는 32개의 측정 지점이 활용되었다. 측정 결과, 버퍼층의 두께는 기준값보다 30% 이상 큰 값을 나타냈으며, I-PyC, SiC, O-PyC층의 두께는 기준값과 유사한 결과를 나타냈다. 이와 같이 마이크로포커스 X-선 라디오그래피 기술과 디지털 영상처리 알고리즘을 적용하여 모의 TRISO 핵연료 입자의 코팅 층 두께를 비파괴적으로 측정할 수 있음을 확인하였다.

Table 2 Coating thickness of a simulated TRISO-coated fuel particle

	기준값, μm	측정값, μm		
		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

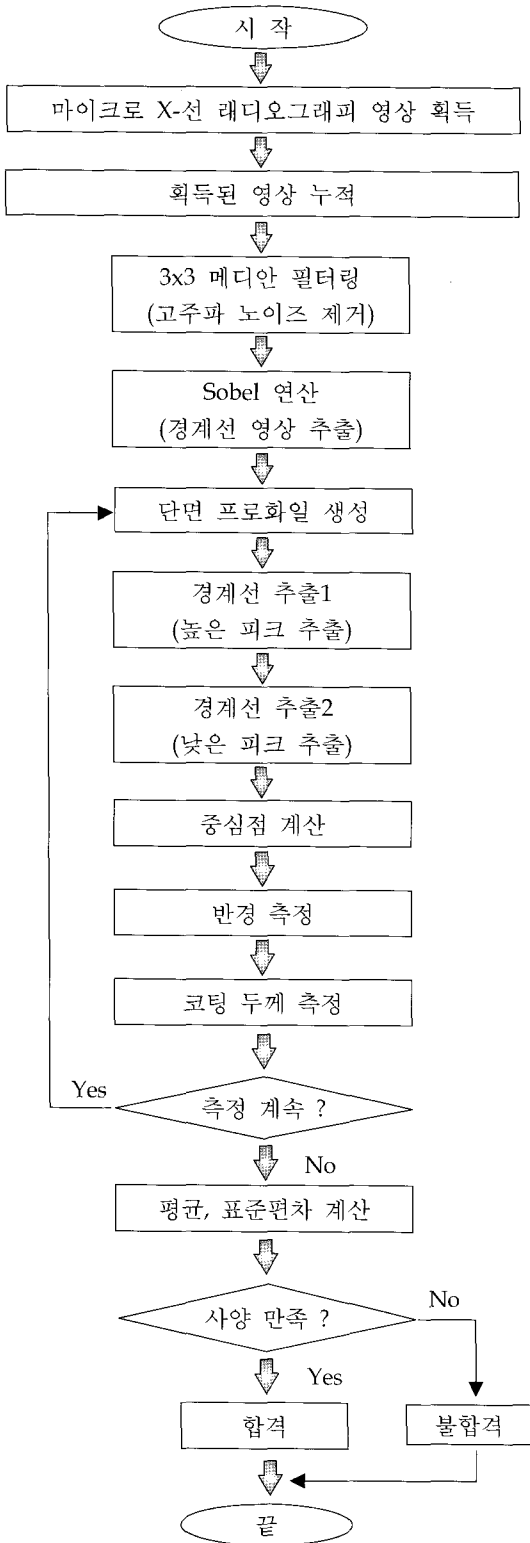


Fig. 14 Algorithm for the measurement of the coating thickness

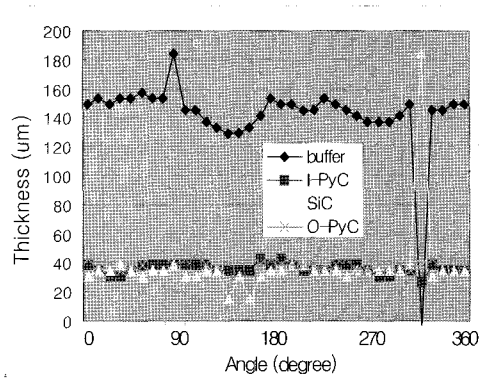


Fig. 15 The coating thickness of a simulated TRISO-coated fuel particle

5. 결론

본 연구에서는 TRISO 핵연료 입자의 코팅 층 두께를 비파괴적으로 측정하기 위해 마이크로 X-선 라디오그래피 기술과 영상처리 알고리즘을 개발하였다. 제조 공정에서 채취한 모의 TRISO 핵연료 입자에 대한 측정 결과, 버퍼층의 두께는 기준값보다 30% 이상 큰 값을 나타냈으며, I-PyC, SiC, O-PyC 층의 두께는 기준값과 유사한 결과를 나타냈다. 현재, 기준값과 큰 차이를 나타낸 코팅 공정을 중심으로 TRISO 핵연료 입자 제조 공정을 개선하고 있다. 이와 같이 마이크로포커스 X-선 라디오그래피 기술과 자동화 알고리즘을 적용하여 모의 TRISO 핵연료 입자의 코팅 층 두께를 비파괴적으로 측정하는데 성공하였으며 제조 공정 개선에 활용하고 있다. 앞으로 파괴 검사와의 비교 실험을 수행하고 자동 측정 알고리즘의 안정성을 향상시켜 측정 정밀도와 신뢰도를 확보할 계획이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 박지연, 김원주, 이영우, 장중화, "고온가스로 핵연료의 TRISO 코팅 공정 개발," KAERI/AR-652/2002, (2002)
 [2] Kazuhiro Sawa, Shuichi Suzuki and Shusaku

- Shiozawa, "Safety criteria and quality control of HTTR fuel," *Nuclear Engineering and Design* 208, pp. 305-313, (2001)
- [3] Guenter Lohnert, "Topical issue on Japan's HTTR," *Nuclear Engineering and Design*, 233, pp. 1-3, (2004)
- [4] Masuro Ogawa and Tetsuo Nishihara, "Present status of energy in Japan and HTTR project," *Nuclear Engineering and Design*, 233, pp. 5-10, (2004)
- [5] Kazuhiro Sawa and Shohei Ueta, "Research and development on HTGR fuel in the HTTR project," *Nuclear Engineering and Design* 233, pp. 163-172, (2004)
- [6] Xiomg Fu, Masashi Takahashi, Shouhei Ueta and Kazuhiro Sawa, "Comparison of HTGR fuel design, manufacture and quality control methods between Japan and China," *JAERI-Tech*, 2002-049, (2002)
- [7] Chunhe Tang, Yaping Tang, Junguo Zhu, Xueliang Qiu, Jihong Li and Shijiang 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)
- [8] Chunhe Tang, Yaping Tang, Junguo Zhu, Yanwen Zou, Jihong Li and Xiaojun 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)
- [9] John Hunn, "Coated particle fuel characterization lab for the advanced gas reactor fuel development and qualification program," *ANS/GLOBAL* (2003)
- [10] Ronald L. Hockey, Leonard J. Bond, Charles R. Batishko, Joseph N. Gray, John J. Saurwein and Richard A. Lowden, "Advances in automated QA/QC for TRISO fuel particle production," *Proceedings of ICAPP 2004*, (2004)
- [11] 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 추계학술발표회 논문집*, (2005)
- [12] 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).
- [13] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods, "Digital image processing," Addison Wesley, pp. 514-518, (1992)
- [14] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods, "Digital image processing," Addison Wesley, pp. 189-201, (1992)