

Filtered Backprojection에 의해 복원된 TRISO 핵연료입자 단층 영상을 이용한 코팅 두께 측정 시뮬레이션

김웅기*, 이영우*, 박지연*, 나성웅**

*한국원자력연구소 원자력수소사업추진반 기술총괄팀

**충남대학교 전자공학과

e-mail:wkkim@kaeri.re.kr

Simulation of the Coating Thickness Measurement in the TRISO-coated Fuel Particle Image Reconstruction by the Filtered Backprojection

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

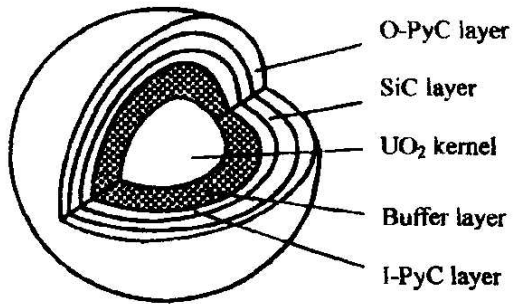
차세대 원자로로 부각되고 있는 고온가스냉각 원자로에서는 고온 안정성 및 핵분열생성물 차단 성능이 우수한 TRISO(Tri-Isotropic) 핵연료를 사용하고 있다. TRISO 핵연료 입자는 직경이 약 1 mm인 구 형태로 입자의 중심에는 직경 0.35~0.6 μm 의 핵연료 입자가 포함되며 입자 외곽을 코팅 층이 에워싸고 있다. 이 코팅층은 완충(buffer) PyC 층, 내부 PyC 층, SiC 층, 외부 PyC 층으로 구성되어 있다. 각 코팅 층의 두께는 수십~백 μm 범위이며 사양으로 정해져 있어 핵연료 입자 제조 후 사양을 만족하는지를 검사해야 한다. 본 연구에서는 TRISO 핵연료 입자 정보를 컴퓨터로 생성하고 가상의 X-선 래디오그래피 방법을 이용하여 투시 영상을 구성한 후 Filtered Backprojection 기법을 이용하여 단면 영상을 재구성하고 이 단면 영상을 이용하여 코팅 층의 두께를 정밀하게 측정하기 위한 모의 실험을 수행하였다. 경계선이 불명확한 투시영상이 아닌 경계선이 명확한 재구성 단면 영상을 이용하여 코팅 층의 두께를 약 2.3% 이내의 오차율로 정밀하게 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 0.35~0.6 mm의 핵연료 입자가 포함되며 핵연료 입자 외곽을 코팅 층이 에워싸고 있다. 코팅층은 완충(buffer) PyC(pyrolytic carbon) 층, 내부(inner) PyC(I-PyC) 층, SiC 층, 그리고 외부(outer) PyC(O-PyC) 층으로 구성되어 있

다.[1~6] 그림 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 래디오그래피 또는 X-선 CT(computed tomography) 방법의 적용을 시도하고 있다.[2, 7~10]



Coated fuel particle

(그림 1) TRISO 핵연료 입자 구조

TRISO 핵연료 입자의 코팅 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 방사성 폐기물이 발생하게 된다.

이와 같은 파괴적인 방법의 단점을 개선하기 위해 비파괴적인 방법이 요구되며 TRISO 핵연료 입자의 코팅 두께를 비파괴적으로 측정하는 방법으로 X-선 라디오그래피(radiography) 방법이 가장 일반적이다. 그러나 X-선 라디오그래피 방법은 X-선 진행 방향으로 투사(projection)된 정보이므로 X-선 진행 방향으로 정보가 중첩되어 표현된다. 이 투사 화면에서는 경계선이 명확하게 나타나지 않는 단점이 있다.

코팅 층의 두께를 정밀하게 측정하기 위해서는 경계선이 명확한 영상을 획득해야 하며 2차원 영역에서 phase contrast 영상으로 경계선이 강조된 투사 영상을 획득하는 방법과[11] 3차원 밀도 분포를 복원하는 CT 방법을 고려할 수 있다. CT 방법의 경우 데이터 처리 시간이 많이 소요되는 단점이 있지만 경계선이 명확한 단층 영상을 획득할 수 있다. 본 연구에서는 단층영상 복원 능력이 우수한 FBP(filtered backprojection) 알고리즘을 이용한 CT 방법을 적용하여 경계선 구분이 용이한 단층 영상을 복원하고 이 영상을 기반으로 TRISO 핵연료 입자

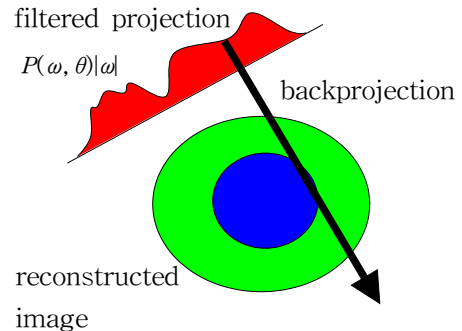
의 코팅 층 두께를 측정하기 위한 모의 실험을 수행하였다.

2. Filtered Backprojection(FBP) 알고리즘

FBP 알고리즘은 투사된 영상을 이용하여 단층 영상을 복원하는 강력한 툴로 사용되고 있다. 본 연구에서는 부채꼴 형태의 fan beam으로 주사된 X-선 투사 영상에 대해 단층영상을 복원하기 위해 FBP 알고리즘을 적용하였다. FBP 알고리즘을 수식으로 표현하면 식 (1)과 같다[12].

$$f(x, y) = \int_0^\pi d\theta \int_{-\infty}^\infty P(\omega, \theta) |\omega| e^{j2\pi\omega(x\cos\theta + y\sin\theta)} d\omega \quad (\text{식 1})$$

여기서 $f(x, y)$ 는 복원된 영상이며 $P(\omega, \theta)$ 는 투사된 영상을 나타낸다. $P(\omega, \theta)|\omega|$ 는 투사된 영상에 주파수 성분이 곱해져 고역 통과 필터링된 filtered projection이며 이 데이터를 물체의 영상면에 역방향으로 투사(backprojection)함으로써 그림 2에 보여진 바와 같이 단층 영상을 얻게 된다.



(그림 2) Filtered backprojection에 의한 영상 복원

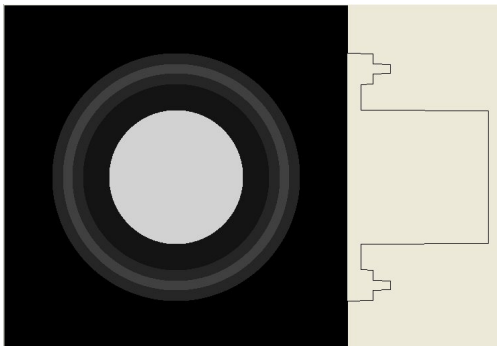
3. 단층 영상 복원 모의 실험

TRISO 핵연료 입자의 사양과 모의 실험 파라메타는 표 1에 나타낸 바와 같다. TRISO 핵연료 입자의 사양은 중국 HTR-10 원자로용 핵연료 사양을 참조하였다[8]. 영상 화면 구성은 512x512 화소, 256 단계 밝기 분포(256 gray level ; 8 비트 분해능)로 설정하였다. 그림 3은 모의 실험 변수를 적용하여 구성된 TRISO 핵연료 입자의 가상 단면과 중심선상의 밀도 분포 곡선을 나타내고, 그림 4는 부채꼴형 빔(fan beam)에 의한 라디오그래피 영상과 중심선상의 강도 분포곡선을 나타낸다. 밀도 차이에 의해 경계선이 명확한 단면 영상에 비해 라디오그래피 영상은 경계선이 불분명하게 확장되었음을

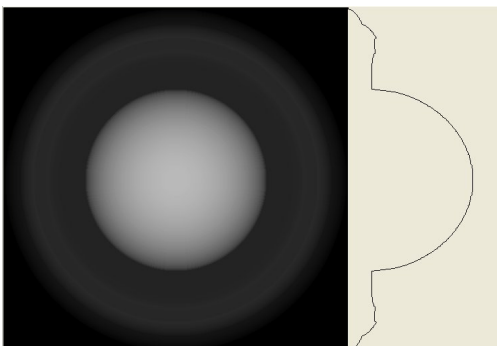
보여준다. 실제 X-선 라디오그래피 영상은 X-선 발생 장치의 초점크기의 영향과 노이즈 등으로 모의 실험에서 구한 영상보다 화질이 떨어질 뿐만 아니라 경계선이 매우 불분명해 경계선을 구분하기 곤란할 것으로 사료된다.

<표 1> TRISO 핵연료입자 사양 및 모의실험 변수

		사양	실험 변수
UO ₂ 커널	직경	500 μm	200 pixels
	밀도	10.5 g/cm ³	210 gray level
코팅 층 두께	Buffer	95 μm	38 pixels
	IPYC	40 μm	16 pixels
	SiC	35 μm	14 pixels
	OPYC	40 μm	16 pixels
코팅 층 밀도	Buffer	≤1.10 g/cm ³	20 gray level
	IPYC	1.9±0.1 g/cm ³	38 gray level
	SiC	≥3.18 g/cm ³	64 gray level
	OPYC	1.9±0.1 g/cm ³	38 gray level
코팅된 핵연료 입자	직경	920 μm	368 pixels
	진원도	<1.2	1

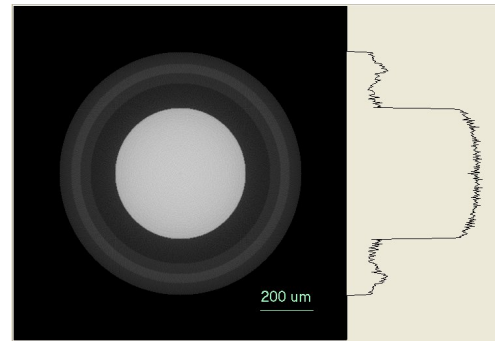


(그림 3) 모의 TRISO 핵연료 입자 단면



(그림 4) 모의 TRISO 핵연료 입자에 대한 가상의 X-선 라디오그래피 영상

그림 4에 나타난 라디오그래피 영상을 360도 방향에 대해 1도 간격으로 구하고 이 영상을 이용하여 filtered backprojection 알고리즘에 의해 복원된 단층 영상은 그림 5와 같다. 원래의 영상인 그림 3에 비해 노이즈가 포함되었고 화질이 다소 떨어지지만 복원된 단층 영상에서 코팅 층 사이의 경계선이 명확하게 표현된 것을 확인할 수 있다.



(그림 5) 복원된 TRISO 핵연료 입자 단층 영상

4. 코팅 층 두께 측정

복원된 단층 영상에서 각 코팅 층의 두께는 식 (2)에서 쉽게 구할 수 있다.

$$r_n = kd_n, \quad n=1, 2, 3, 4, 5 \quad (\text{식 2})$$

여기서,

k : 보정 계수,

$r_1 \sim r_5$: 커널, 버퍼, I-PyC, SiC, O-PyC 층의 반경에 대한 보정된 측정값

$d_1 \sim d_5$: 커널, 버퍼, I-PyC, SiC, O-PyC 층의 반경에 대한 측정값

이다.

식 (2)를 이용하여 복원된 단층 영상에 대해 각 코팅 층의 두께를 측정된 결과는 표 2와 같다. 본 실험에서 이용된 보정 계수는 8.89 μm/mm이다. 측정 결과, 커널 직경에 대한 측정 오차 및 오차율은 각각 -6.6 μm, -1.3%를 나타냈다. 코팅 층 두께 측정 오차는 -0.8 ~ +0.9 μm 범위를 나타냈으며 측정 오차율은 -1.0 ~ +2.3 % 범위를 나타냈다. 라디오그래피 영상을 이용하여 실험한 결과 약 6%의 측정 오차율을 나타냈지만[13] 복원된 단층 영상을 이용한 결과 2.3% 이내의 측정 오차가 발생하였다. 따라서 단층 영상을 복원하여 TRISO 핵연료 입자의 코팅 층 두께를 측정할 경우 측정 정밀도를 향상시

킬 수 있을 것으로 기대된다.

<표 2> 모의 TRISO 핵연료 입자 커널 직경 및 코팅 층 두께 측정

	기준값	측정값	오차	
	μm	μm	μm	%
kernel 직경	500	493.4	-6.6	-1.3
buffer 반경	95	94.2	-0.8	-1.0
I-PyC 반경	40	40.0	0.0	0.0
SiC 반경	35	34.7	-0.3	-0.9
O-PyC 반경	40	40.9	+0.9	+2.3

5. 결론

본 연구에서는 TRISO 핵연료 입자의 코팅 층 두께를 비파괴적으로 측정하기 위해 filtered backprojection 알고리즘을 이용한 X-선 CT 방법을 적용하여 모의 실험을 통해 단층 영상을 복원하였으며 복원된 영상을 이용하여 코팅 층의 두께를 2.3% 이내의 오차율로 정밀하게 측정할 수 있었다. 일반적인 X-선 라디오그래피 영상을 이용하여 실험한 결과 약 6%의 측정 오차가 발생한 바 있어 CT 방법으로 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

CT 방법을 적용하면 물체의 3차원 밀도 분포함수를 획득할 수 있기 때문에 코팅 두께 측정과 더불어 밀도의 비파괴 측정 및 미세결함 검사에도 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 박지연, 김원주, 이영우, 장종화 "고온가스로 핵연료의 TRISO 코팅 공정 개발" KAERI/AR-652/2002, 2002. 12
- [2] Kazuhiro Sawa, Shuichi Suzuki, 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, Tetsuo Nishihara "Present status of energy in Japan and HTTR project" Nuclear Engineering and Design, 233, pp.5-10,

2004

[5] Kazuhiro Sawa, Shohei Ueta "Research and Development on HTGR fuel in the HTTR project" Nuclear Engineering and Design 233, pp.163-172, 2004

[6] Xioming 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, September 2000

[8] Chunhe Tang, Yaping Tang, Junguo Zhu, Yanwen Zou, Jihong Li, 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. 11

[10] 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, June 2004

[11] S. W. Wilkins, T. E. Gureyev, D. Gao, A. Pogany and A. W. Stevenson "Phase-contrast imaging using polychromatic hard X-rays" Letters to Nature, 1995

[12] Jiang Hsieh "Computed Tomography" SPIE Press, 2003

[13] 김용기, 이영우, 박지연, 나성용 "Simulation of an X-ray Radiography for the Coating Thickness Measurement in the TRISO-coated Fuel Particle" 한국원자력학회 추계학술발표회 논문집, 2005(발간 예정)