

핵연료 펠릿의 X-선 단층촬영 기반 시뮬레이션 타당성 해석

X-Ray Tomography Based Simulation Feasibility Analysis of Nuclear Fuel Pellets

김재준

Jaejoon Kim

초 록 원자력발전소에서 사용되고 있는 연료봉은 지르코늄 합금 튜브에 동봉되어 있는 이산화우라늄 펠릿으로 구성되어 있다. 펠릿 표면은 원자로를 가동시키는 동안 국부 핫스팟을 예방하기 위해 튜브로 장전된 후 작은 구멍, 균열, 칩핑 결함이 없어야 한다. 본 논문은 X-선 단층촬영 시뮬레이션을 통하여 핵 연료봉 펠릿의 표면 결함을 검출하기 위한 타당성을 조사하였다. 병렬과 팬빔 여과후 역투영 방법을 이용하여 재구성된 영상은 시뮬레이션 데이터와 MPS(missing pellet surface) 영상데이터의 접근성을 확인하였다.

주요용어: 핵연료 펠릿, 연료봉, X-선 단층촬영, 여과후 역투영

Abstract Fuel rods using in nuclear power plants consist of uranium dioxide pellets enclosed in zirconium alloy (zircaloy) tubes. It is vitally important for the pellet surface to remain free from pits, cracks and chipping defects after it is loaded into the tubes to prevent local hot spots during reactor operation. This paper investigates the feasibility study for detecting surface flaws of pellets contained within nuclear fuel rod through X-ray tomography simulation. Reconstructed images used by parallel and fan-beam filtered back projection method were presented and confirmed the accessibility between simulation data and MPS(missing pellet surface) image data.

Keywords: Nuclear Fuel Pellets, Fuel Rod, X-Ray Tomography, Filtered Back Projection

1. 서 론

핵연료는 우라늄-235의 함량이 약 2~5% 정도 되도록 농축시킨 후 이산화우라늄(UO_2) 분말을 만들고, 이를 열처리하여 핵연료 펠릿으로 가공하여 특수재질로 된 지르칼로이(zircaloy) 튜브 속에 넣어 연료봉을 만들며 이 연료봉을 정사각형으로 묶어 핵연료 집합체로 만들어서 원자로 속에 장전하여 핵분열을 일으킨다[1]. 대부분 핵연료에 사용하는 방사성 동위원소는 우라늄 ^{235}U , 우라늄 ^{238}U , 플루토늄 ^{239}Pu 가 쓰인다. 핵연료로 사용되기 위해 농축된 우라늄 핵사플루오라이드

(hexafluoride, UF_6)는 이산화우라늄(UO_2) 분말 형태로 전환되고 최종적으로 펠릿 형태로 처리된다. 이러한 연료 펠릿은 작고, 불황성이며 녹지 않는 세라믹형태의 이산화우라늄(UO_2)이다.

펠릿 표면은 원자로를 가동시키는 동안 국부 핫스팟(local hot spot)을 막기 위해 튜브로 장전된 후 작은 구멍, 균열, 칩핑(chipping) 결함이 없어야 한다. 연료 펠릿으로 구성되어 있고 결함을 가지고 있는 연료봉의 정확한 식별은 핵발전소의 안전한 운영에 중요한 요소로 작용된다. 그러나 이러한 결함을 검사하는 방법에는 여러 가지 개선해야 할 점이 있다[2-6].

저주파 전자기파를 이용한 방법으로는 고체상태의 세라믹 펠릿이 비전도성을 띠고 있기 때문에 적절한 방법이 아니다. 마이크로파 방법은 피복관(cladding)이 차폐(shield)로 작용하기 때문에 사용할 수 없고 초음파 방법은 피복관과 펠릿 사이에서 발생하는 불연속성 때문에 신호 대 잡음비가 낮음을 보여주고 있다. 튜브의 축에 따라 있는 결함은 특히 초음파 방법으로 찾기란 어렵다. 이러한 이유 때문에 X-선 단층촬영 방법은 튜브안에 포함되어 펠릿을 검사하는 방법으로 적절함을 보여주고 있다. 적당량의 X-선 에너지가 튜브의 절단면을 통과하여 전달된 에너지가 저장되고 펠릿에 존재하는 결함을 영상화하는 복원 알고리즘을 이용하여 결함을 찾는 방법이다. 일반적으로 팬빔(fan-beam) 프로젝션은 360°에 걸쳐 규칙적인 간격으로 토모그래픽 영상을 재구성하는데 사용한다. 본 논문에서는 병렬 여과후 역 프로젝션 방법과 팬빔 역 프로젝션 방법을 이용하여 시뮬레이션 데이터와 MPS 영상을 이용하여 영상을 재구성하였을 때 성능을 비교하고자 한다.

2. X-Ray 모델링

X-선 검사 시스템에서 개체의 투과율은 X-선 튜브에서 방출된 X-선이 테스트 샘플을 투과하여 검출기(detector)에 검출되는 시스템으로서 테스트 샘플의 밀도, 원자번호에 따라 X-선의 투과율이 달라지는 원리를 이용하는 것이다. 이상적으로, N_0 의 광자 X-선은 선 L을 따라 임의의 개체를 투과할 때 식(1)에 따라 N 광자로 감쇠된다[7]. 여기서 μ 는 개체에서 물질의 감쇠계수를 나타낸다.

$$N = N_0 \cdot e^{-\int_L \mu(l) dl} \tag{1}$$

식(1)의 양변에 자연로그함수를 취함으로써 선 적분을 식(2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\int_L \mu(l) dl = \ln \frac{N_0}{N} \tag{2}$$

선 적분 값들이 하나의 프로젝션을 형성하고 프로젝션들의 값들이 CT 영상으로 만들어진다. 결론적으로 하나의 CT 영상은 복원된 슬라이스(reconstructed slice)에서 감쇠계수 값들을 보여주

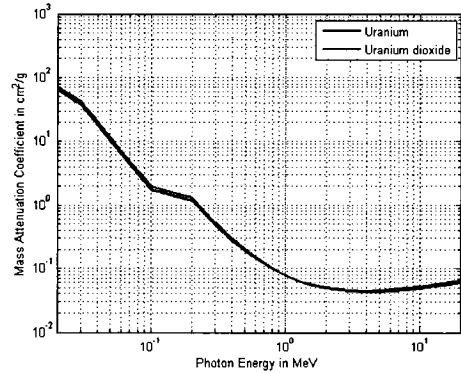


Fig. 1 Photon mass attenuation coefficients for uranium and uranium dioxide [8]

고 있다. 식(2)에서 감쇠계수(μ)란 광자(photon)가 물질을 투과하면서 단위 길이의 매질과 광전효과(photoelectric effect) 혹은 콤프턴 산란(compton scattering) 등의 반응을 일으킬 확률을 표시한 것이다. 즉, μ 값은 레일리 산란(Rayleigh scattering), 콤프턴 산란, 그리고 광전흡수(photo-electric absorption)의 서로 다른 상호작용으로 구성되어 있다. 여기서 감쇠계수는 X-선의 입사 광전자 에너지와 재료 자체에 따른 값이다. 일반적인 원소 Z=1에서 Z=92에 이르는 값은 [8]에 표로 나타나 있고 참고적으로 Fig. 1에는 우라늄과 이산화우라늄의 입사 에너지에 대한 감쇠계수 함수관계를 보여주고 있다.

3. X-Ray 단층촬영

단층촬영은 비파괴적으로 구조물 내부를 시각적으로 볼 수 있는 데이터를 얻는 방법이다. 일반적으로 회전 CT-스캐너나 시뮬레이션 프로그램 등에 의해 테스트 객체의 일정한 회전각을 이용하여 생성된 투영 영상 값들은 원객체를 복원할 수 있다. 이때, 복원 시킬 투영 영상값들은 180°회전과 전체 개체를 커버할 수 있게 한다. 2차원 슬라이스 또는 1차원 병렬 프로젝션 값들의 경우에는 위에 언급한 내용을 적용할 수 있지만 현재 CT 단층촬영은 한 점에서 발산하는 X-선을 통해 cone-beam 프로젝션의 함수를 이용한다. 만일 광선이 동일한 2차원 슬라이스 내에 투과되도록 시준(collimation)하게 되면 이는 1차원 팬빔 프로젝션 값들을 만들게 된다. 이를 통하여 2차원 콘빔(cone-beam) 프로젝션 값들은 3차원 테스트 샘플을 복원시킬 수 있다.

가장 일반적으로 사용되고 있는 복원 알고리즘은 여과후 역투영 방법이다. 이 방법은 광선 기하학적 구조에 따라 평면(flat) 검출기를 이용한 팬빔 광선 구조와 평면(flat) 또는 곡면(curved) 형태의 검출기(detector)를 이용한 팬빔 검출기로 구분할 수 있다. 다음 두 절에서는 실험에서 사용된 위의 두 가지 방법에 대해 논하고자 한다. 이외에 복원과정에서 팬빔 광선을 병렬 광선으로 레비닝(rebinning) 하는 방법도 있다[9].

3.1. 병렬 여과후 역투영법(Parallel Filtered Back-Projection Method)

X-선 CT의 역투영 방법은 다른 영상 재구성 방법과 달리 상대적으로 선호하는 방법으로 영상 재구성시 발생하는 블러링(blurring)의 영향으로 필터링의 과정을 통해 단점을 극복할 수 있다[10]. 병렬 CT의 개략적인 과정을 Fig. 2에 도식화하였으며 일반적으로 병렬 프로젝션 생성, 램프 필터링(ramp-filtering)과 역 프로젝션(back-projection)의 단계를 거친다. 특히, 램프 필터링과 역투영 단계를 이용한 방법을 병렬 여과후 역투영 방법이라 한다.

3.2. 팬빔 필터 보정 역투영법(Fan-Beam Filtered Back-Projection Method)

커브형태의 검출기를 이용한 팬빔 CT의 전반적인 처리 과정은 Fig. 3에서 설명되어 있다. 이 처리 과정의 개략적인 각 단계는 팬빔 프로젝션 생성, 수정된 램프필터를 이용한 사전 가중치 처리, 그리고 가중치 역투영(weighted back-projection) 으로

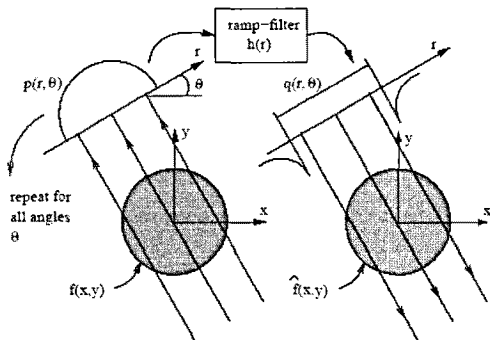


Fig. 2 Parallel beam computed tomography [11]

실행된다. 마지막 세 단계는 팬빔 필터 보정 역투영으로 구성된다.

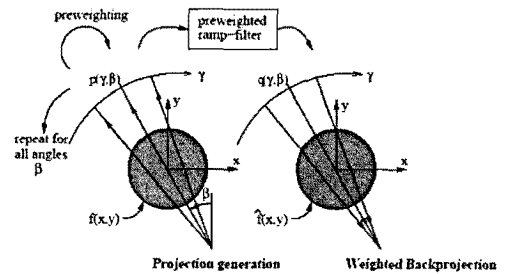


Fig. 3 Fan-beam computed tomography [11]

4. 실험 및 결과 고찰

4.1. 실험 데이터

Fig. 4에서 보여준 실험 시뮬레이션 샘플 연료봉의 내 외부 반경은 각각 0.38"와 0.44"로 구성되었고 결함(notch defect)은 $UO_2/zircaloy$ 접경에 크기 0.04" x 0.02"로 모델링하였다. 전체 영상은 0.504" x 0.504"의 크기의 영역으로 구성했다.

식(1)과 Fig. 4의 샘플 데이터를 이용하여 투과된 에너지를 구할 수 있다. 본 논문에서 사용된 입사 X-선 에너지 200 KeV를 이용하였으며 소스와 테스트 영상 중심의 최적의 거리는 $D = \sqrt{2}N$ (N 은 전체 영상의 크기)로 적용하였다. 시뮬레이션 데이터

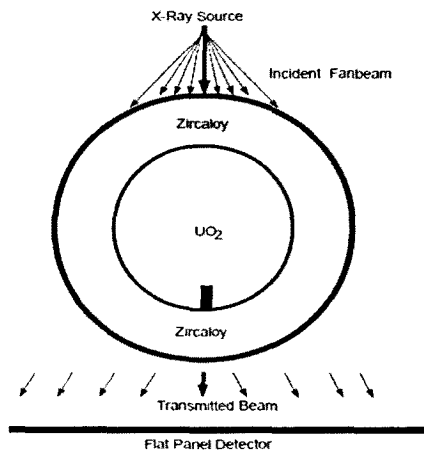


Fig. 4 Cross-section of sample showing defect profile

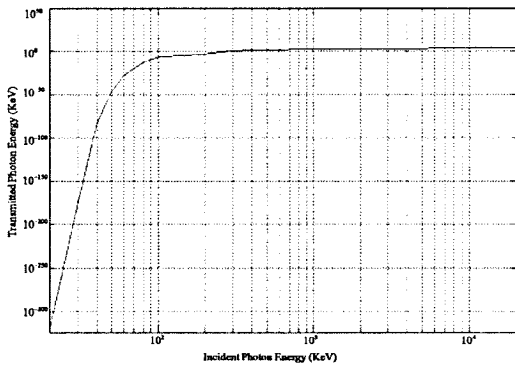


Fig. 5 Transmitted photon energy vs. incident photon energy

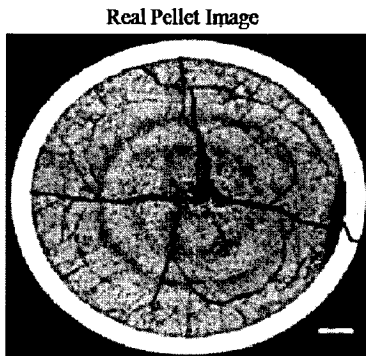


Fig. 6 Through-wall crack image of a real pellet

의 200 KeV 에너지 레벨 및 모델링 사양을 적용하였을 때 투과된 에너지 분포를 Fig. 5에 설명하고 있다.

펠릿-피복 상호작용(pellet-cladding interaction)으로 인한 커다란 MPS(missing pellet surface)는 핵연료로 사용할 수 없는 결과를 초래하기도 한다 [12,13]. Fig. 6은 본 실험에서 적용된 LaSalle 연료봉의 MPS와 벽면을 통과한 균열(through-wall crack)의 영상을 보여주고 있다[14]. 시뮬레이션에서 설정한 결함(notch defect)은 MPS 종류의 결함의 형태를 모델링하여 3장에서 설명한 두 가지 방법의 결과를 비교하고자 한다.

4.2. FBP와 팬빔 CT 복원

X-선 단층촬영 실험에서는 일반적으로 X-선 소스를 투과하여 샘플의 재질의 특성에 따라 투과된 에

너지를 측정함으로써 최종 영상을 복원할 수 있다. 이 과정에서 생성된 사이노그램(sinogram)은 역 라돈(inverse radon) 함수를 이용하여 결과 영상을 복원하기 위해 이용된다. 3장에서 기술된 것처럼 FBP 알고리즘은 투영된 값은 블러링을 없애기 위해 필터링의 기본 절차를 거친다. 이때 많이 사용하는 필터를 살펴보면 Ram-Lak, Shepp-Logan, Hamming, Hanning 등이 있다. 이러한 필터는 속도와 효율적인 측면에서 선택할 수 있다. 필터링된 투영 값들은 복원을 하기 위해 역투영과 선형 보간(linear interpolation)의 과정을 거쳐 이루어진다. 유사한 과정을 거치지만 팬빔 필터 보정 역투영 알고리즘은 역 라돈 기능의 함수를 적용하기 위해 팬빔으로 측정된 데이터를 전환하기 위해 병렬 빔 기하학적 형태로 전환한 뒤 복원시킨다.

Fig. 7에서 보여 지고 있는 결과를 살펴보면 (a)는 시뮬레이션 512 x 512 크기의 데이터 영상이고 (b)와 (d)는 병렬 FBP로 재구성한 결과 영상이다. 이 경우 (b)에 나타난 부채살 모양은 영상을 재구성할 때 10° 증가시켰을 때 나타난 현상이다. 그러나 (d)의 경우처럼 투영의 증가를 1°씩 하였을 때

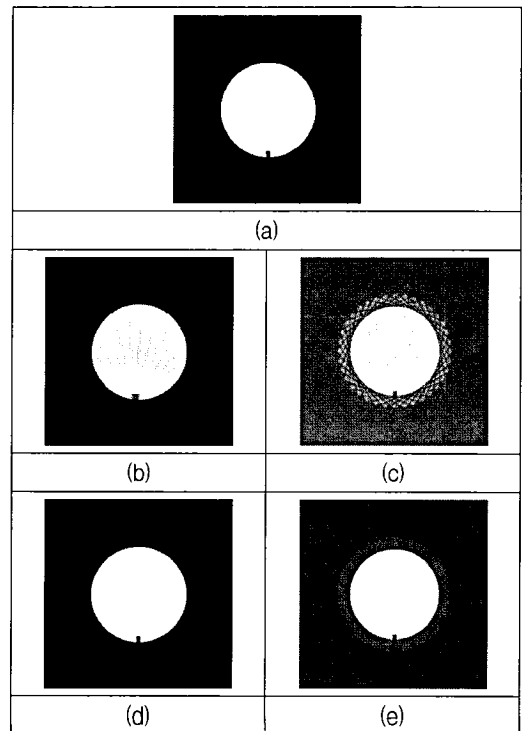


Fig. 7 Reconstruction images through parallel FBP and fan-beam FBP with simulated data

재구성된 결과 영상은 입력 영상과 유사함을 알 수 있다. (c) 와 (e)의 결과 영상은 팬빔 FBP를 이용하여 각각 10° 와 1° 씩 증가시킨 영상을 재구성 한 것이다. 시뮬레이션에서 사용한 필터는 Ram-Lak 필터이고 관심영역 이외의 외부영역은 0의 값으로 처리하였다.

Fig. 8의 (a)는 512×512 크기의 MPS 영상이고 (b)와 (d)는 병렬 FBP로 재구성한 결과 영상으로 각각 10° 와 1° 씩 증가시켰다. 비슷한 방법으로 (c)와 (e)의 결과 영상은 팬빔 FBP를 이용하여 10° 와 1° 씩 증가시킨 영상을 재구성 한 것이다. Fig. 8의 (c)와 (e)의 경우는 해상도 비교를 위해 히스토그램 평활화(histogram equalization) 과정을 거친 결과 영상이다. 특히, (b)의 경우에서 나타난 결과 영상 처럼 10° 씩 증가, 즉, 투영 각을 증가시킴으로써 나타나는 블러링 효과를 사이노그램의 보간 또는 평활화를 이용하여 해상도를 향상시킬 수 있음을 보여주고 있다.

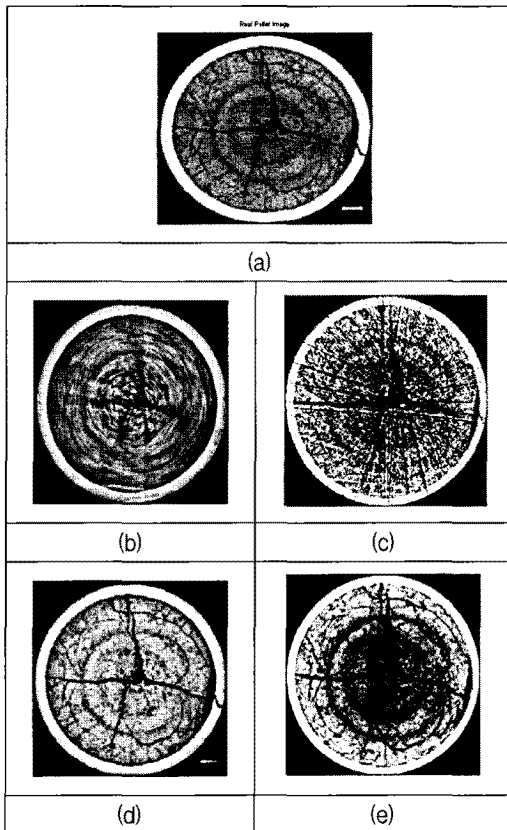


Fig. 8 Reconstruction images through parallel FBP and fan-beam FBP with MPS data

5. 결론

본 논문의 주요 목표는 원자력 발전소에서 사용되고 있는 핵연료 펠릿에 존재하는 결함을 찾는 것이다. 고전적이지만 간결하고 뛰어난 성능을 보여주고 있는 병렬 FBP와 팬빔 FBP를 이용하여 각도의 변화에 따른 영상을 재구성하는 방법으로 시뮬레이션 데이터와 MPS 영상데이터의 접근성을 확인할 수 있었다.

특히, 대용량 데이터 처리 및 고속 연산으로 구현이 가능해짐으로써 영상 재구성 시 투영 각도의 증가, 감소로 인하여 나타나는 계산속도, 판별능력의 트레이드오프는 향후 연구에 좋은 주제를 제시하고 있다.

참고문헌

- [1] J. L chelle, P. Bleuet, P. Martin, E. Girard, F. Bruguier, M. A. Martinez, A. Somogyi, A. Simionovici, M. Ripert, F. Valdivieso and P. Goeuriot, "Micro-XANES and X-ray microtomography study of oxidation state, morphology, and chemistry evolution during nuclear fuel sintering," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 51, No. 4, pp. 1657-1661 (2004)
- [2] J. D. Landry, F. C. Schoenig, L. N. Grossman, H. Bernatowicz and I. S. Jacobs, "Superconducting magnetometer for quality control of nuclear fuel rods," Journal of Applied Physics, Vol. 53, Issue 11, pp. 8260-8262 (1982)
- [3] N. Saratchandran, S. V. Swamy, R. K. Srivastava, B. Lakshminarayana and M. Suryaprakash, "Role of nondestructive testing during manufacture of zircaloy structurals and nuclear fuel for power reactors in India," Proceeding of 15th World Conference on Nondestructive Testing, Rome, Italy (2000)
- [4] L. Fillatre, I. Nikiforov and F. Reiraunt, " -optimal non-bayesian anomaly detection for parametric tomography," IEEE Transactions

- on Image Processing, Vol. 17, Issue 11, pp. 1985-1999 (2008)
- [5] Young-Kil Shin, "Design of encircling remote field eddy-current probe," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, Issue 2, pp. 1273-1276 (2002)
- [6] J. M. Seixas, F. P. Freeland and W. Soares-Filho, "Matched filters for identifying failed fuel rods in nuclear reactors," Electronics, Circuits and Systems, 2001. ICECS 2001. The 8th IEEE International Conference on, Vol. 2, pp. 643-646 (2001)
- [7] John V. Gilfrich, I. Cev Noyan, Ron Jenkins, Ting C. Huang, Robert L. Snyder, Deane K. Smith, Mary Ann Zaitz and Paul K. Predecki, Advances in X-Ray Analysis, Vol. 39, Kluwer Academic Pub., Netherlands (1998)
- [8] J. H. Hubbell and S. M. Seltzer, "Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements $Z = 1$ to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest," National Institute of Standards and Technology (1996)
- [9] F. Natterer, The Mathematics of Computerized Tomography, John Wiley & Sons, Chichester and New York (1986)
- [10] A. Malusek, Maria Magnusson Seger, Michael Sandborg and Gudrun Alm Carlsson, "Effect of scatter on reconstructed image quality in cone beam CT: evaluation of a scatter-reduction optimization function," Radiation Protection Dosimetry, Vol. 114, pp. 337-340 (2005)
- [11] A. C. Kak and M. Slaney, Principles of Computerized Tomographic Imaging, Society of Industrial and Applied Mathematics (2001)
- [12] B. Cox, "Pellet-clad interaction(PCI) failures of zirconium alloy fuel cladding: a review," Journal of Nuclear Materials, Vol. 172 (3), p. 249 (1990)
- [13] J. S. Lee, J. S. Yoo, H. K. Kim, D. Mitchell and Y. Aleshin, "The mechanical behavior of pellet-cladding with the missing chip under PCMI loadings during power ramp," Proceedings of International LWR Fuel Performance Meeting, San Francisco, California, USA (2007)
- [14] G. Selby, Nondestructive Evaluation: 16th Annual EPRI NDE Issues Meeting Notes, California, USA (2006)