論 文

韓國非破壞檢査學會誌
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
第16號 Vol. 9, No. 2 (1989)

비파괴적인 영상재구성 방법에 의한 조사 핵연료봉 단면내 핵분열 생성물의 이차원분포 결정

박 광 준* · 노 성 기*

Determination of Two-Dimensional Distribution of Fission Products in the Irradiated Fuel Rod by Image Reconstruction Methods

K. J. Park *and* S. G. Ro

Abstract Reconstruction of the radial two-dimensional of fission products using projections obtained by nondestructive transversal direction gamma scanning was evaluated, and then compared with the destructive sectional gamma scanning results. Although the nondestructive method has a little drawback compared to the destructive method in the accuracy, the former seemed to be sufficiently applicable.

1. 서 론

조사핵연료봉내 핵분열 생성물의 분포를 측정하기 위하여 많은 연구자들은 감마스캐닝 방법을 사용해왔다. 1970년대를 전후로 하여 절단한 핵연료봉의 단면 감마스캐닝을 통해 핵분열 생성물의 이차원적 분포의 결정을 시도하였다. 1971년 미국 LANL (Los Alamos National Laboratory)의 Barne 및 Phillips[1,2] 등은 길이방향 핵연료봉의 임의의 위치에서 핵분열 생성물의 이차원 분포를 비파괴적 감마스캐닝 방법으로 결정하는 새로운 기술을 개발하였다. 이 방법은 몇개의 각도에서 직경방향으로 감마스캐닝을 수행하여 얻은 자료를 영상재구성 알고리즘에 의해 이차원분포로 환원시키는 것이다. G. T.Herman[3]은 영상재구성 알고리즘을 근본적으로 급수전개방법(series expansion methods) 및 변환방법(transform methods)으로 분류하였다. 급수전개방법에는 대수학적 영상재구성방법(Algebraic Reconstruction Technique ; ART), 반복적 최소자승방법(Iterative Least-Squares Technique ; ILST) 등이 있으며, 변환방법에는 역투영(back-projection or linear superposition), 여과 역투영(filtered back-projections or convolution techniques), RHO 여과역투영(Rho filtered back-projection), 푸리에 영상재구성(Fourier reconstruction) 방법 등이 있다.

본 연구에서는 조사핵연료봉의 비파괴적 직경방향 감마스캐닝 결과를 급수전개방법의 전산코드 ISARD[4]로 분석하고 그 결과를 단면 감마스캐닝 결과와 비교하므로서 비파괴적 감마스캐닝 방법의 효용성을 확인

* 한국에너지연구소 안전시험해석부
접수 : 1989년 5월 22일

코자 하였다.

2. 이 론

영상재구성은 Fig.1에서와 같이 서로 다른 몇개의 입사각도에서 측정한 값으로부터 연료봉 단면의 어떤 점 M(x, y)에 대한 감마 방사능을 계산하는 것이다. 면적 w의 N×N개의 작은 픽셀(pixel)로된 사각형에 대해서 감마방사능의 영상을 재구성한다. 각 픽셀의 방사능은 그 중심에 집중되는 것으로 가정한다. 이것은 스캐닝 계단경계선상에 픽셀의 중심이 있거나 또는 그렇지 않거나에 따라서 1 또는 0 과 같은 기하학적 가중치를 할당한다. 이와같이 가중치를 취하면, 스캐닝 계단경계선으로 교차하는 픽셀의 면적비를 기하학적인 가중치로 사용하는 것 보다 부정확한 결과를 주지만 쓰기에 쉽고 계산시간이 짧은 장점을 갖고 있다.

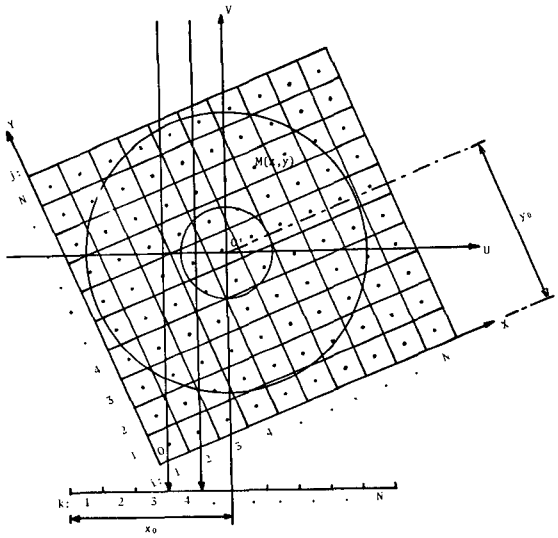


Fig. 1 Representation of reconstruction section.

어떤 입사각 θ하에서 k번째 스캐닝 계단의 이론적인 계산값은 다음과 같다.

$$R(K,\theta)=\sum_{(i,j)\in(K,\theta)} A(i,j)\cdot f^{\theta}(i,j) \quad \cdots\cdots(1)$$

여기서

A(i, j) : 픽셀 (i, j)의 방사능

$f^{\theta}(i,j)$: 입사각 θ에 비춰진 픽셀(i, j)로부터 연료체 및 구조체를 가로지르는 자체 감쇠인자

(k, θ) : 입사각 θ로 부터 스캐닝 계단 k에서 0(zero)이 아닌 기여를 하는 (i, j)의 집합

P(k, θ) : 입사각 θ에서 스캐닝 계단 k의 측정값, 즉 하나의 투영은 N개의 스캐닝 계단의 집합으로 구성된다.

n번째 반복계산에서 $A^n(i,j)$값을 알므로서 계산 및 측정값 사이의 불일치를 최소화하는 방법으로 이러한 값들을 수정하는 것이다.

2-1. 대수학적인 영상 재구성 기술

간단한 연산방식은 모든 영상재구성 요소 A(i, j)에 대하여 어떤 값을 어림해서 스캐닝 계단을 따라 측정값 P(k, θ)와 계산값 R(k, θ)사이의 불일치를 보상하는 것이다.

$$A^{n+1}(i,j)=A^n(i,j)\cdot\frac{P(K,\theta)}{R(K,\theta)} \quad \cdots\cdots(2)$$

이것은 다음과 같은 방법으로 n번째 반복계산에서 얻은 방사능을 수정하는 것이다. 즉, 주어진 한 입사각 θ에 대해서 스캐닝 계단선상의 모든 값들을 계산한다.

$$R^n(K,\theta_0)=\sum_{(i,j)\in(K,\theta_0)} A(i,j)\cdot f^{\theta_0}(i,j) \quad \cdots\cdots(3)$$

그 다음, 각각의 값 $A^n(i,j)$에 $P(k,\theta_0)/R^n(k,\theta_0)$의 비를 곱하여 각 픽셀의 방사능을 수정하며, 이러한 과정을 각 투영에 대해서 다시 시작한다[R(k, θ)의 계산 및 A(i, j)의 수정].

2-2. 반복적 최소자승 기술

이것은 계산 및 측정값 사이의 차이를 최소화하기 위해 각 픽셀의 방사능을 최소자승 방법으로 결정하는 것이다. n번째 반복계산 후, 우리는 각 픽셀(i, j)에 대하여 다음 양들을 계산한다.

– 부분 편차(partial deviation)

$$QP_{ij}^n=\sum_{\theta}\frac{[P(K,\theta)-R^n(K,\theta)]}{\sigma^2(K,\theta)} \quad \cdots\cdots(4)$$

전체편차(Tatal Deviation)

$$QT^n=\sum_k\sum_\theta\frac{[P(K,\theta)-R^n(K,\theta)]}{\sigma^2(K,\theta)} \quad \cdots\cdots(5)$$

n+1 번째 반복계산에서 각 픽셀의 방사능을 다음과 같은 식으로 구하게 된다.

$$A^{n+1}(i,j)=A^n(i,j)+\Delta A^n(i,j)\cdot\delta^n \quad \cdots\cdots(6)$$

$\Delta A^n(i,j)$는 부분편차를 각 픽셀의 방사능 값으로 미분한 후, 그 값을 영으로 놓으므로서 구할 수 있다.

$$\frac{dQP^n_{ij}}{dA^n(i,j)}=0$$

$$\Delta A^n(i,j)=\frac{\sum_\theta f^\theta(i,j)\left[\frac{P(K,\theta)-R^n(K,\theta)}{\sigma^2(K,\theta)}\right]}{\sum_\theta\frac{[f^\theta(i,j)]^2}{\sigma^2(K,\theta)}} \quad \cdots\cdots(7)$$

또한 δ^n는 전체 편차를 δ^n에 대하여 미분한 후 그 값을 영으로 놓고 정리하여 결정한다.

$$\frac{dQT^n}{d\delta^n}=0,$$

$$\delta^n=\frac{\sum_\theta\sum_k[P(k,\theta)-R^n(k,\theta)]\left[\sum_{(i,j)\in(k,\theta)}f^\theta(i,j)\,\Delta An(i,j)\right]}{\sum_\theta\sum_k\frac{\left[\sum_{(i,j)\in(k,\theta)}f^\theta(i,j)\,\Delta A^n(i,j)\right]^2}{\sigma^2(k,\theta)}} \quad \cdots\cdots(8)$$

여기서 $\Delta A^n(i,j)$는 모든 픽셀들이 일정한 방사능을 갖는 것으로 가정하여 n번째 반복계산 후의 필요로 하는 조정이며, δ^n는 각 픽셀값의 요동을 막기위해 고려한 완충인자(damping factor)이다. 만일 각 픽셀의 방사능을 교정하기 위해서 $\Delta A^n(i,j)$를 사용한다면 방사능값들은 수렴하지 않고 요동할 것이다. 왜냐하면 $\Delta A^n(i,j)$는 먼저번 계산값 $R^n(k,\theta)$에 근거하여 $A^n(i,j)$를 교정하였기 때문이다.

2-3. 초기 방사능 계산

반복 계산을 수행하기 위해서, 각 픽셀의 방사능에 대한 초기분포 $A^0(i,j)$를 도입하는 것이 필요하다. 두 가지 모델, 즉 균일모델 및 회전대칭 모델을 사용한다.

2-3-1. 균일모델

어느 하나의 투영만을 선택한다 ($\theta=\theta_0$). 이것은 스캐닝 계단경계선의 길이에 따라 일정한 A(i, j)를 가정해서 측정값 $P(k,\theta_0)$를 계산값에 부여하는 것이다.

$$A^0(i,j)=\frac{P(k,\theta_0)}{\sum_{(i,j)\in(k,\theta_0)}f^{\theta_0}(i,j)} \quad \cdots\cdots(9)$$

이 모델은 신속하게 계산결과를 주지만 각 픽셀의 불균일한 방사능값을 평평하게 하는 결과를 준다.

2-3-2. 회전대칭모델

이것은 하나의 유일한 투영값으로 부터 환형에 의한 반회전대칭으로 방사능분포를 가정해서 연료봉의 바깥쪽으로 부터 중심쪽으로 연속적인 동심환에 대하여 방사능을 결정한다. 계산원리는 Fig.2의 기하학적인 구조로 부터 다음 절차를 이용해서 각 동심환의 초기 방사능 분포를 구한다.

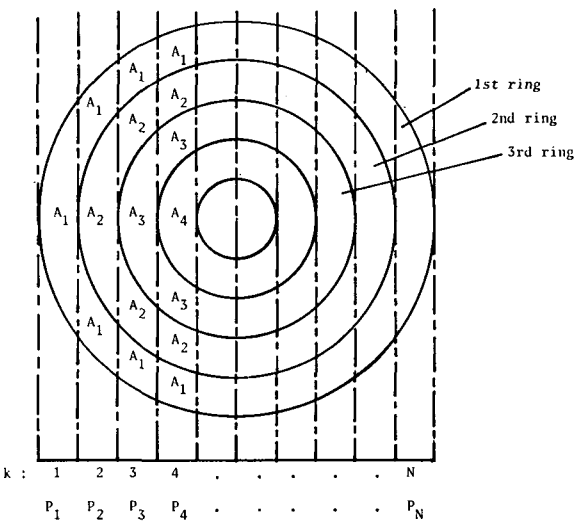


Fig. 2 Plane geometry for calculation of initial activities.

k=1의 스캐닝 위치에서, 교차표면상에 균일한 동위원소분포를 가정하여 방사능 A1을 계산한다. 즉,

$$A_1=\frac{P_1}{F_{1,1}S_{1,1}}$$

여기서

P_1 : 스캐닝 위치 1에서 측정한 투영값

$F_{1,1}$: 첫번째 스캐닝 위치에서 첫번째 환의 자체 흡수인자

$S_{1,1}$: 첫번째 환과 첫번째 스캐닝 계단선상의 교차에 의해서 분할된 면적

k=2의 스캐닝 위치에서, 투영값은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$P_2=A_1S_{1,2}F_{1,2}+A_2S_{2,2}F_{2,2}$$

윗식을 A2에 대해서 전개하면 다음과 같다.

$$A_2=\frac{P_2-A_1S_{1,2}F_{1,2}}{S_{2,2}F_{2,2}}$$

여기서

P_2 : 스캐닝 위치 2에서 측정한 투영값

$F_{1,2}$: 스캐닝 위치 2에서 첫번째 환의 자체흡수인자

$S_{1,2}$: 첫번째 환과 두번째 스캐닝 계단선상의 교차에 의해 분할된 면적

$S_{2,2}$: 두번째 환과 두번째 계단선상의 교차에 의해 분할된 면적

k=k0 스캐닝 위치에서, 방사능 Ak0는 다음과 같은 식을 써서 결정할 수 있다.

$$A_{k0}=\frac{P_{k0}-\sum_{I=1}^{k0-1}A_IS_{I,k0}F_{I,k0}}{S_{k0,k0}F_{k0,k0}} \quad \cdots\cdots (10)$$

여기서

$F_{1,k0}$: 스캐닝 위치 k0에서 1번째 환의 자체흡수인자

$S_{1,k0}$: I번째 환과 스캐닝 계단 k0의 교차에 의해 분할된 면적

3. 실 험

실험용 고속로 PHENIX에서 시험대상 핵연료봉을 718 EFPD(Effective Full Power Days)로 중성자에 조사하였으며, 약 4년간의 냉각기간을 거친 후 몇 가지 시험을 수행하였다. 편의상 시험대상시료에 적절한 명칭을 부여하였다. 즉, 61개 핵연료봉으로 구성된 핵연료 집합체는 FEF105로써 시험대상 핵연료봉은 A1이고 핵연료봉시편은 N5(165mm)이다. 그리고 단면 감마스캐닝용 시편을 n2라 하고 금속현미경 사진촬영 및 미세시료채취용 시편을 n1이라 명명하였다.

시험하기 전후에, 직경방향 및 단면 감마스캐닝 결과를 비교할때 동일한 기준 좌표를 필요로 하기 때문에 가늘고 긴 홈을 시험대상 핵연료봉시편(N5)의 축방향 표면상에 표시하였다.

3-1. 길이방향 감마스캐닝(axial gamma scanning)

전에너지 구간의 총 계수만을 고려하는 전계수 감마스캐닝(gross gamma scanning)을 연료봉시편(N5) 전체 길이에 대해서 수행하였는데 그 결과는 Fig.3과 같다. 이 결과로부터 길이 방향에 대하여 방사능 변화가 비교적 적은 부분에서 직경방향 및 단면 감마스캐닝을 수행하기 위한 시료를 선택하였다.

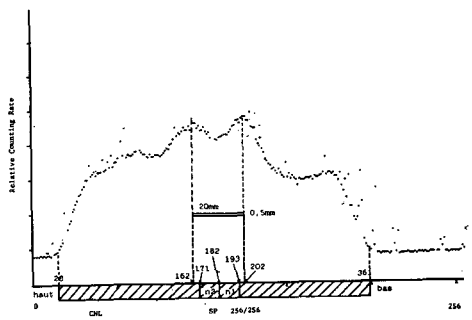


Fig. 3 Gross gamma scanning result in axial direction of fuel rod.

3-2. 직경방향 감마스캐닝(transversal gamma scanning)

직경방향 감마스캐닝은 Fig.1에서와 같이 몇 개의 투영과 각 투영당 적절한 스캐닝계단에 대하여 수행하였다.

3-2-1. 측 정

연료봉시편 N5는 그 중심축을 회전시킬 수 있으며 또한 시준기 슬릿 앞에서 직경방향으로 이동시킬 수 있는 스캐닝 지지대상에 그것을 고정하였다. 그 다음, 스캐닝 장치의 회전축을 연료봉시편 중심축과 일치시

켰다. 이때 핵연료봉과 검출기간의 거리, 시준기 크기, 스캐닝계단, 투영당 스캐닝 수, 투영수 및 스캐닝 당 측정시간을 각각 500mm, 0.5mm×20mm, 0.5mm, 32, 12 (매 15^0 각도 간격으로 165^0까지) 및 1,800초로 하였다.

3-3. 단면 감마스캐닝(section gamma scanning)

3-3-1. 시험위치 선정

단면 감마스캐닝을 수행할 위치는 나중에 비파괴적인 직경방향 감마스캐닝 결과와 비교할 수 있도록 직경방향 감마스캐닝을 수행한 연료봉길이 내에서 선택하였다.

3-3-2. 레진주입 및 절단

시험핵연료봉시편(N5)내 레진(resin)주입은 레진주입 장치를 약17시간 진공시킨 후 수행하였으며, 하루동안 고화시켰다. 두개의 디스크형 시편을 N5의 하단부 93mm되는 지점부터 시작해서 5mm두께로 절단하였다. 하나의 시편(n1)은 금속 현미경 사진촬영 및 미세시료 채취용이며, 다른 시편(n2)은 단면 감마스캐닝용이다. n1 및 n2 시편의 외경은 14.1mm, 소결체의 직경은 12.7 mm 및 피복관의 두께는 0.6mm이다.

3-3-3. 측 정

디스크형태로 만든 핵연료봉 시편은 Fig.4와 같은 단면을 갖는다. x, y 방향에 대한 전계수 감마스캐닝을 수행하여 시편의 중심으로 찾아냄으로서 기준좌표를 정하였다. 이때 시편과 검출기간 거리, 시준기 크기, 스캐닝 계단거리, 측정점(스캐닝수) 및 측정점당 측정시간을 각각 500mm, 1mm×1mm, 1mm, 289 (x=17, y=17) 및 3,600초로 하였다.

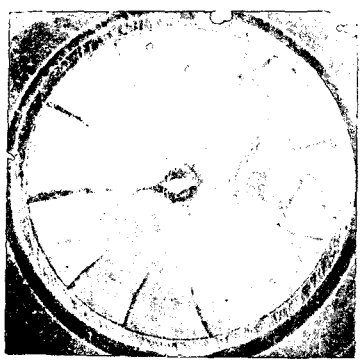
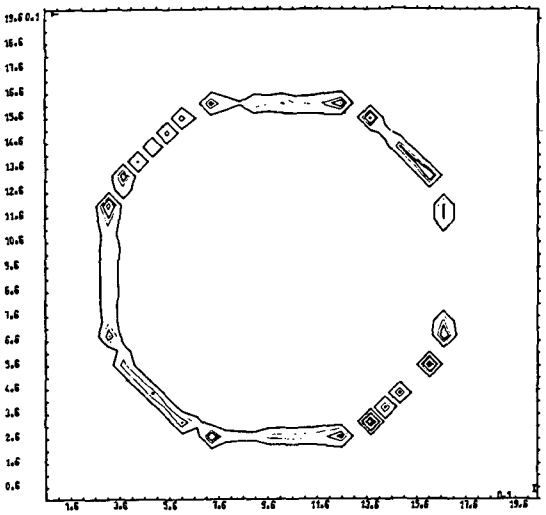


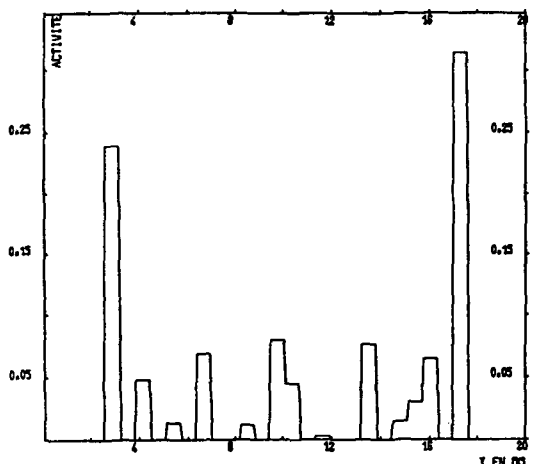
Fig. 4 Photograph of cross ection (n2).

4. 결과 및 고찰

핵연료봉 시편내 6개 핵분열 생성물(Cs-137, Cs-134, Eu-154, Ru-106, Ce-144 및 Sb125)과 2개 방사화 생성물(Co-60 및 Mn-54)의 방사능 분포를 비파괴적인 직경방향 감마스캐닝 방법에 의하여 결정하였다. 이것을 연료봉을 파괴하여 수행한 단면 감마스캐닝 결과와 비교하였다.



CS137 12 PROJ. DON.CORR.



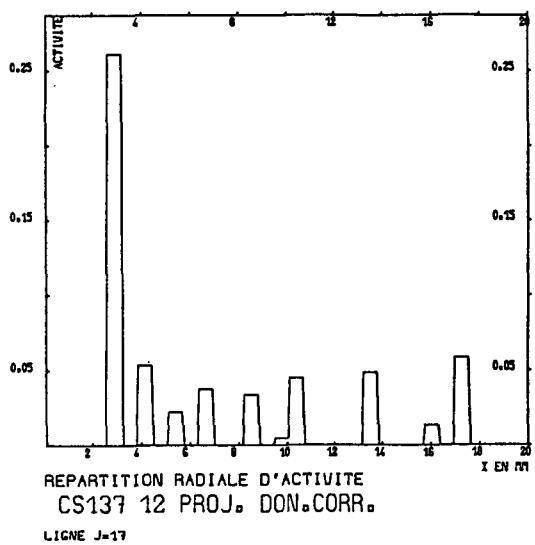
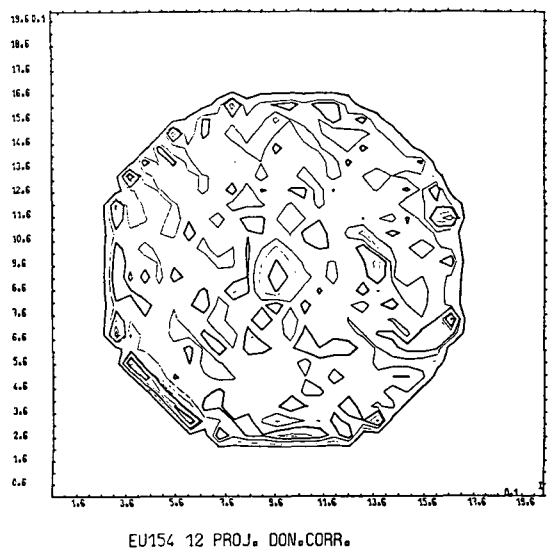
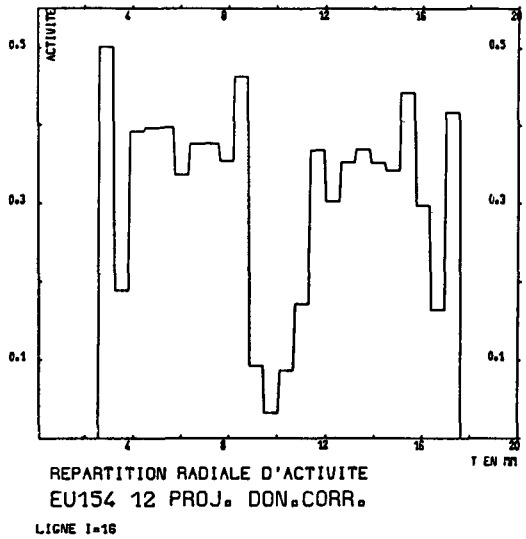


Fig. 5 Two－dimensional distribution of Cs－137 calculated by ISARD.

12개 각도의 매 32개 지점에서 스캐닝하여 획득한 384개 감마선 스펙트럼 자료를 스펙트럼 분석용 전산코드를 사용하여 분석하였다. 이 결과를 근거로 하여 시험핵연료봉 시편 N5 단면내 핵분열 생성물의 이차원 분포를 전산코드 ISARD(Iterative least Square and Algebraic Reconstruction Diconvolution)로 영상재구성하였다.





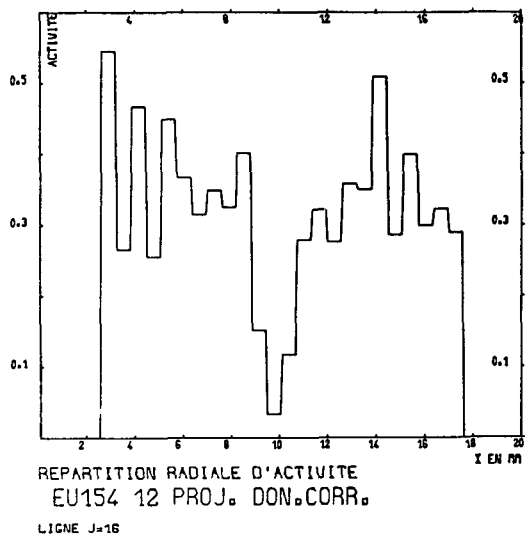
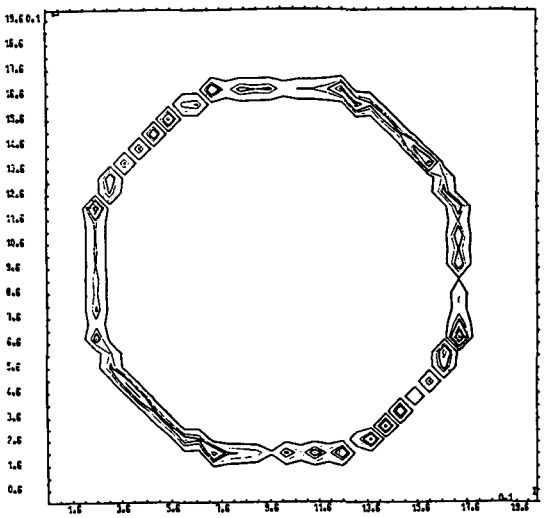


Fig. 6 Two－dimensional distribution of Eu－154 calculated by ISARD.

ISARD의 결과를 Fig5～7과 같이 등고선 형태 및 횡단면 형태로 나타냈다. 그림6에서 핵연료봉 중심에 하나의 구멍(hole)이 존재한다는 것을 보여준다. 그리고 Fig.5상에서 Cs－137의 분포가 공간분해능 0.5 mm이내로 핵연료 소결체의 외각에 집중된 것으로 나타났다. 피복관내에 형성된 Co－60에 관한 Fig.7은 이 영상재구성 방법에 대한 정확도의 한계를 보여준다. 계산결과, 피복관 구역내에 Co－60이 대부분 존재하는

것을 보여주지만 소결체내에도 일부 존재함을 보여주고 있으며 방사능값의 변화도 피복관내 여러곳에서 보여주고 있다. 이러한 현상은 불충분한 계수(counts) 및 프로그램내 잘못된 좌표변환 (등고선 분포가 원형이 아니라 8각형으로 나타났기때문)에 그 원인이 있는 것으로 믿어진다.



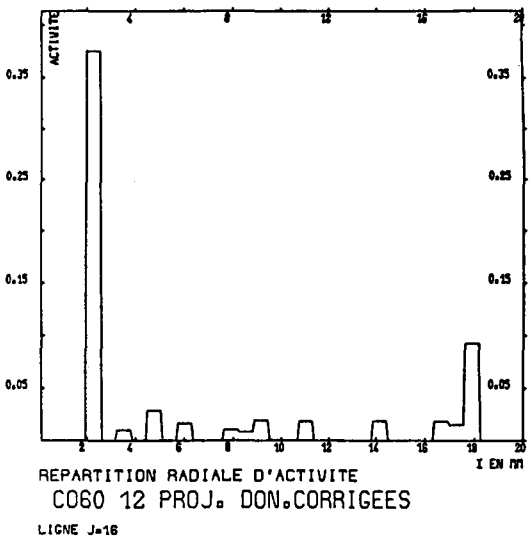
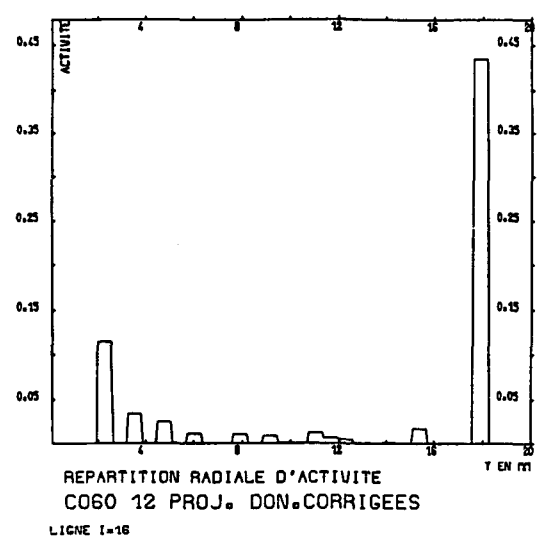
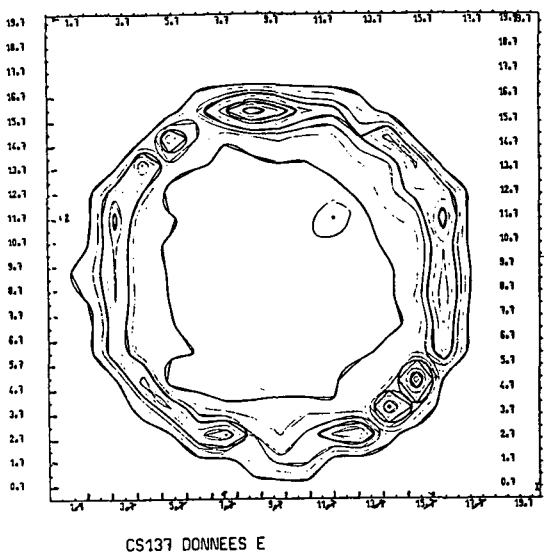


Fig. 7 Two-dimensional distribution of Cs-60 calculated by ISARD.

289개 감마선 스펙트럼을 분석하여 4개의 핵분열 생성물 및 방사화 생성물(Cs-137, Ru-106, Eu-154 및 Co-60)에서 얻은 피이크의 면적을 Fig8~10에서처럼 등고선 및 횡단면도로 나타냈다. 여기에서 Cs-137이 공간분해능 약1mm로 연료 소결체외곽에 집중되며, Fig.9에서 소결체 중심에 하나의 구멍이 존재한다는 것을 볼 수 있다. 또한 여기에서 두가지 지적을





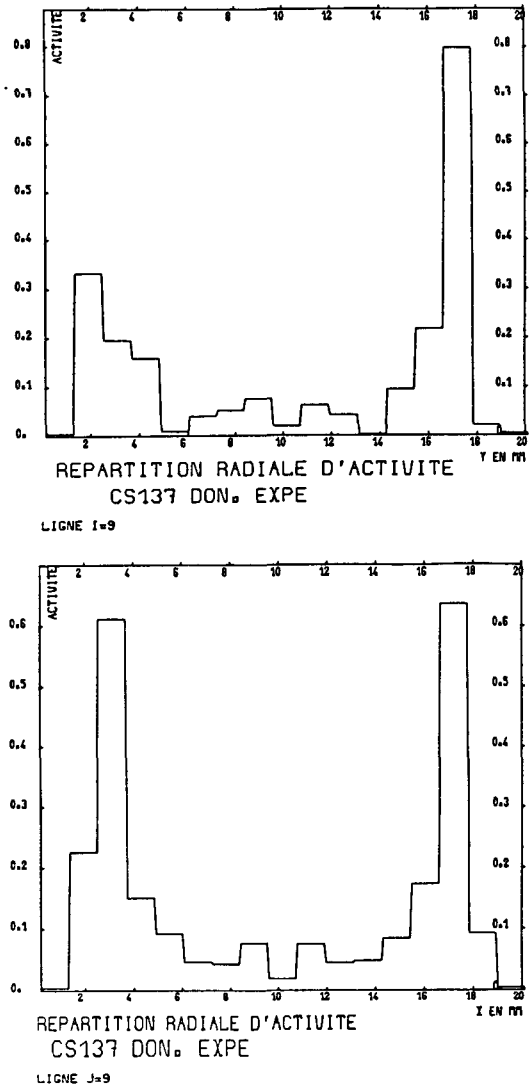
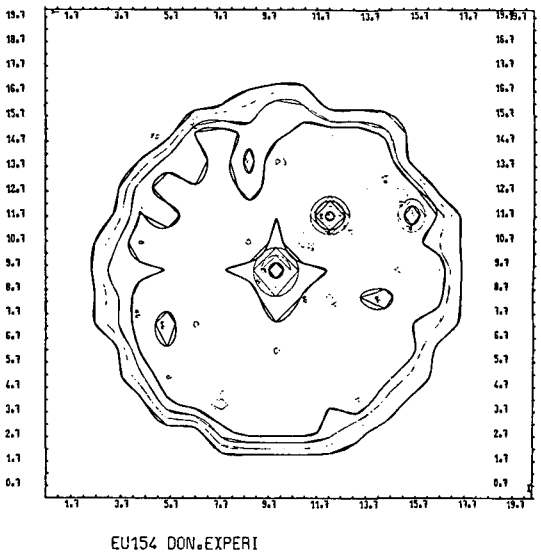


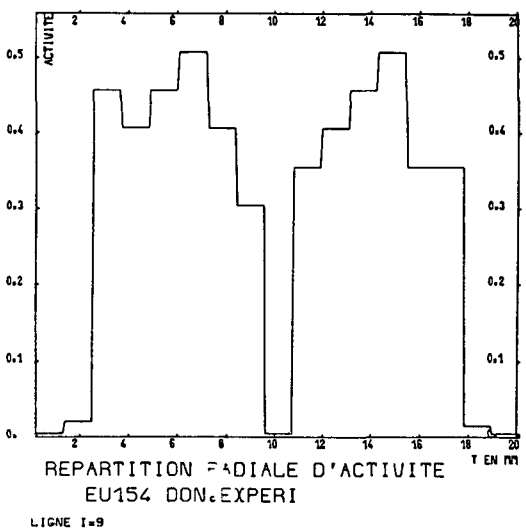
Fig. 8　Two－dimensional distribution of Cs－137 measured by DT method.

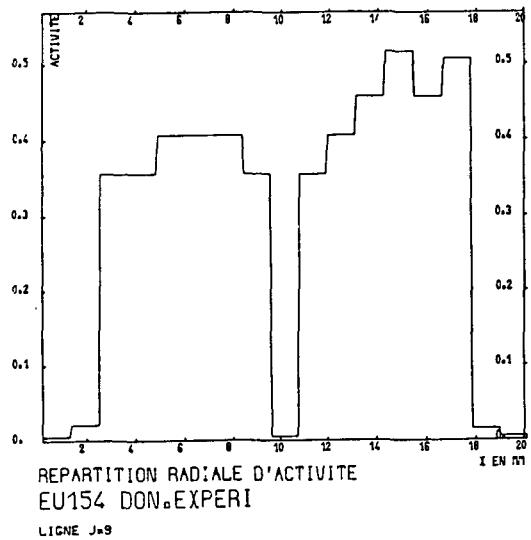
할 수 있다. 하나는 소결체 내에 Co－60의 방사능이 존재하였다는 점이고, 다른 하나는 불충분한 공간분해능이 Co－60의 분포를 폭 2mm 정도의 환으로 나타나게 했다는 점이다.

핵연료봉 시편에 대한 비파괴적인 직경방향 감마스캐닝 결과와 파괴적인 단면 감마스캐닝시험 결과를 비교해 보면 이들 양자간에 다소의 차이를 보여주고는 있으나 비교적 잘 일치 (예 ; 연료 소결체 중심의 구멍 생성, Cs－137의 연료 소결체 외곽분포, Co－60의 피복관내 분포 등)하는 것을 알 수 있다. 이것은 앞으로 많은 실험경험을 통하여 연료봉을 손상시키지 않고 비파괴적인 방법으로 이차원 동위원소분포를 결정할 수 있는 가능성을 보여준 것이라 할 수 있다.

단면 감마스캐닝을 수행하기 위해서는, 연료봉을







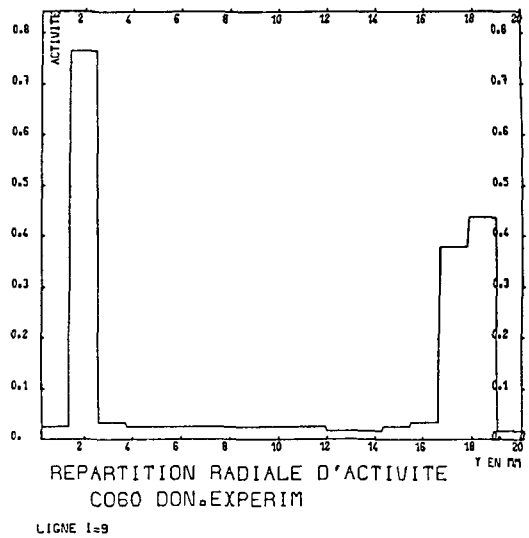
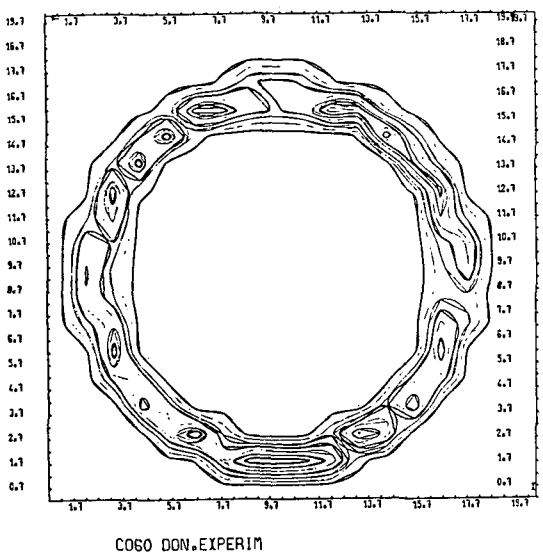


Fig. 9 Two－dimensional distribution of Eu－154 measured by DT method.

파괴하여 많은 시간과 인력을 들여 시편을 준비하여야 하기 때문에 비경제적인 반면 직경방향 감마스캐닝에서는 이러한 문제점이 배제되고 또한 한번 시험을 수행한 후 다시 시험핵연료봉을 원자로에 조사시켜 운전조건에 따른 핵분열 생성물의 거동을 살필 수 있는 이점을 갖고 있다.



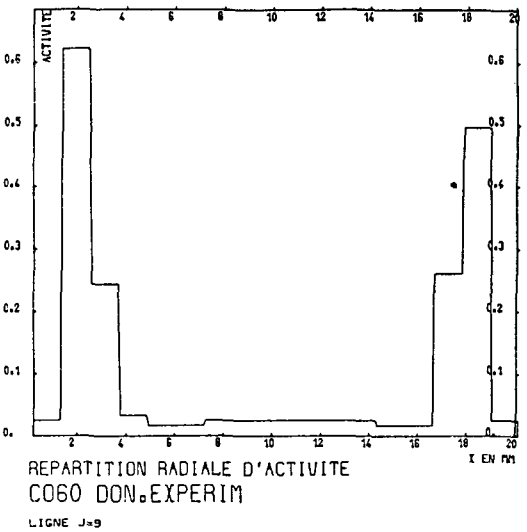


Fig. 10 Two－dimensional distribution of Co－60 measured by DT method.

5. 결 론

본 연구를 통해 핵연료봉 단면내 핵분열 생성물의 분포를 결정하는데 있어서 비파괴적 직경방향 감마스캐닝 방법(토모그라피 방법)의 효용성을 확인하였다. 그리고 이 방법을 앞으로 기술발전에 따라 연료봉을

파괴한 후 수행하는 감마스캐닝방법에 근접하는 결과를 줄 수도 있다는 것을 보여줬다.

References

1. B. K. Barne, J. R. Phillips, "TWODIM : A Computer Code for Unfolding Diametral Gamma-Ray Scans of Reactor Fuel Elements", Los Alamos Scientific Laboratory Report LA-4676, 1971.
2. J. R. Phillips, "Improved Nondestructive Determination of two-Dimensional Radial Isotopic Distribution in Irradiated Fuel Pins", Nucl, Technol., Vol. 28, 282-290 1976.
3. G. T. Herman, "Image Reconstruction from Projections", Academic Press, New York, pp90 1980.
4. G. Ducro, Determination Tomographique de la Distribution des Emetteurs Gamma dans un Crayon Combustible (Programme ISARD), PI/SEREG 920-333/81-C.E.A.-C.E.N.G. 1981.