2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

초음파 센서를 이용한 CANDU 사용후연료 수량 검증장치 개발

Development on CANDU Spent Fuel Counting System by Using the Ultrasonic Sensor

나원우, 박완수, 김선기, 최영명
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

중수형 원전의 사용후연료 수량을 효율적으로 검증하기 위해 초음파 센서를 이용한 검증장치를 개발하였다. 초음파 센서는 사용후연료 사이를 상하 등속운동하면서 신호를 보내 연료에서 반사된 신호를 수집한다. 저장조에 16 또는 19 층으로 쌓여있는 선반에서 임의로 선정된 Column 에 있는 사용후연료 수량을 확인하기 위해 이 개념이 적용되었다. IAEA 사찰관은 물자재고검사를 위해 시설측에 선반이동을 해줄 것을 요구하고 있으며, 이는 사용후연료 관리측면에서 시설측에 큰 부담으로 작용하고 있다. 장치를 설계 제작하여 월성에서 성능시험을 수행하여 시험결과를 얻었다. 이 장치는 사용후연료 수량을 확인하는 IAEA 의 검증기준을 만족시킬 수 있을 것으로 평가되었다. 원자력통제기술센터는 이를 개선하고 IAEA 에 장비 공동사용을 제안할 계획이다.

Abstract

The CANDU Spent fuel counting system by using the ultrasonic sensor was developed in order to verify the quantity of spent fuels stored into the pond. As it is moving up and down between fuel bundles, the ultrasonic sensor sends signals and receives the signal reflected from the spent fuels. In order to confirm the number of fuel bundles at any column of 16 or 19 trays stacked in the pond, this concept was applied. Agency inspector asked the operators to move the trays stacked and confirmed these for physical inventory verification. But, it is overburdening the facility on the side of fuel management. The new equipment designed for this purpose was tested in Wolsong for its performance. And it was evaluated that it is able to meet the IAEA ' s criteria to confirm the quantity of spent fuels. TCNC has the plan to improve for routine use and then propose the IAEA for its joint use.

1. 서론

1975 년에 핵비확산조약 (NPT) 당사국이 된 우리나라는 IAEA 와 체결한 안전조치 협정에 따라 1976 년부터 안전조치검사를 받기 시작하여 지금에 이르고 있다. 한편 정부는 1995 년에 개정된 원자력법과 원자력법 시행령 그리고 1996 년에 시행된 과학기술처 고시에 따라 국가 특정핵물질 계량관리검사를 수행할 수 있는 법적근거를 마련하였다. 정부는 이를 근거로 1997 년부터 국내 일부 시설에 대한 국가검사를 시작으로 1999 년엔 국내 모든 원자력시설에 대해 확대 실시하고 있다. 특히 우리나라는 1976 년에 고리 1 호기, 1983 년에 월성 1 호기를 가동한 이래로 14 기의 PWR 형 원전과 4 기의 CANDU 형 원전을 동시 보유하고 있으며, 이에 필요한 경수로와 중수로 핵연료 가공공장과 기타 연구시설 등 총 33 개 원자력시설을 보유하고 있는 원자력산업 강국이다[1].

국내의 원자력산업활동에 사용되고 있는 모든 핵물질은 우리나라의 소유지만 국제규제대상 물질이므로 국제협정에 따라 핵물질의 양과 사용용도 등에 대해 보고해야 하는 의무를 따라야 한다. 정부는 이를 보다 효과적이고 효율적으로 관리하기 위하여 해당업무를 전문기관인 원자력연구소내의 원자력통제기술센터에 위임하여 원자력산업에 대한 투명성과 신뢰성 확보를 위해 적극적으로 대처하고 있다.

IAEA 는 2002 년 한해동안 국내의 33 개 시설에 대한 122 회의 안전조치 검사에서 총 310 PDIs (Person Day Inspection) 검사활동을 수행하였다. 국가는 IAEA 와 동시검사를 수행하면서 총 477 PDIs (검사관 : 163 PDIs, 검사원 : 314 PDIs) 검사활동을 수행하였다[1]. 국가검사를 IAEA 검사와 병행하여 수행함으로써 검사 현장에서의 업무협조가 원만히 이루어질 수 있었고, 특히 IAEA 의 무리한 요구사항 등이 사전에 해결될 수 있었다.

IAEA 는 월성원전의 물자재고검사에서 사용후연료를 검증할 수 있는 장비가 개발되지 않아 시설측에 사용후연료 선반이동을 요구하고 이를 검증하고 있다. 그러나 사용후연료 선반이동은 핵연료 관리측면에서 안전상 큰 부담으로 작용하고 있으며 시설측은 제 11 차 한-IAEA 안전조치 평가회의를 통해 선반이동의 문제점을 강력히 제기하고 있다[2]. IAEA 는 우리측 의견에 동감하고 있으며 원자력통제기술센터가 이를 해결할 수 있는 장치를 개발하여 지원하길 요청하고 있다. 본 논문은 이를 해결할 수 있는 장치의 개념과 성능시험 결과 등을 소개한다.

2. OLR 사용후연료의 안전조치 기준

IAEA 는 혹시 있을지 모를 핵물질 전용을 적시에 탐지하기 위해 전용에 필요한 기간을 고려하여 OLR 원전에서 년간 4 회의 정기검사를 시행하고 있다. 이 가운데 1 회는 물자재고검사 활동으로 수행된다. OLR(On-Load Reactor)인 CANDU 원전에서 핵연료의 장전/방출 작업이 수시로 이루어지기 때문에 IAEA 는 이를 감시하기 위해 방사능 감시장치인 VIFM(VIX Integrated Fuel Monitor, 구성 : Core Discharge Monitor 2 대 + Bundle Counter 2 대 + Y/N monitor 4 대)과 14 대의 감시용 카메라로 구성된 MUX 혹

은 DMOS 를 설치하여 운영하고 있다. IAEA 는 물자재고검사를 위해 아래의 안전조치기준(Safeguards Criteria)[3]을 마련하고 이에 따른 검사활동을 하고 있다.

2. 물자재고검증 (PIV)

2.1 각 연년 (calendar year) 에 시설자에 의한 물자재고조사 (PIT)의 물자재고검사를 1 회 실시하고 그 기간에 2.2~2.5 의 활동을 수행함.

2.4 사용후연료는 봉인/감시 하에 유지되고 (a) ~ (c) 까지의 적절한 항에 따라 검증함.

(a) 이중의 봉인/감시 하에 있는 사용후연료의 부분에 대하여는 양쪽의 봉인/감시 시스템을 평가함. 봉인은 저탐지 확률로 검증함..

더욱이, 전회의 물자재고검사 이후 다음의 경우에 있어서는 사용후연료를 품목별로 계산을 하던가 또는 사용후연료 재고검사를 수행함.

(i) 반출되어진 모든 사용후연료 Cask 의 용량이 적어도 3.2(b)(i)에 정해진 범위내의 어느 하나에 의해 품목별로 계산이 행하여지지 아니한 경우, 또는

(ii) 감시하고 있는 구역의 외부로 이전된 사용후연료 (빈 캐스크 포함)를 0.3 SQ 또는 그 이상 이동하는데 적절한 용기의 용량이 3.2(b)(ii)에 의하여 확인되어지지 아니한 경우, 또는

(iii) 이중 봉인/감시 시스템이 수용된 봉인/감시 (이중 또는 단일, 부록 C 참조)에 의거 사찰기간 중에 평가되지 아니한 경우

(b) 감시한 단일 봉인/감시 하에 있는 사용후연료의 부분에 대하여는 film/tape 를 평가하고 사용후연료는 품목별로 계산을 하거나 사용후연료 재고검사를 수행함.

더욱이, 그 사용후연료는 전회의 물자재고검사 이후 다음의 경우는 대량결손에 대하여 중탐지 확률로 검증함.

(i) 반출되어진 모든 사용후연료 Cask 의 용량이 적어도 3.2(b)(i)에 정해진 범위내의 어느 하나에 의해 품목별로 계산이 행하여지지 아니한 경우, 또는

(ii) 노심반출 감시기/Bundle 계수기가 고장으로 시설자의 기록을 확인 할 수 없는 경우, 또는

(iii) 감시 하에 있는 구역의 외부로 이전된 사용후연료 (빈 Cask 포함)를 0.3 SQ 또는 그 이상 이동하는데 적절한 용기의 용량이 3.2(b)(ii)에 의하여 확인되어지지 아니한 경우

(c) 봉인을 사용한 단일 봉인/감시 하에 있는 사용후연료의 부분에 대하여는 봉인을 저탐지 확률로 검증하고, 봉인 검증을 위하여 선정된 Stack 에서의 사용후연료는 품목별로 계산을 하거나 또는 사용후연료 재고검사를 수행함.

(d) 봉인/감시 하에 있지 않는 어떤 사용후연료는 품목별로 계산을 하거나 또는 사용후연료 재고검사를 수행하고, 대량결손에 대하여는 중탐지 확률로 검증함.

월성원전에서는 앞서 언급한 IAEA 감시장치(1 호기 : DMOS, 2,3,4 호기 :MUX)가 운영되고 있으므로 IAEA 는 물자재고검사를 위해 기준 2.4 의 (b)를 적용하고 있다. 이 기준에 의하면 감시장치의 결과를 분석하고 이상이 없다면 사용후연료 수량을 검증하는 것을 요구한다. 그러나 만일 (i)~(iii) 사항이 감시장치 분석결과에서 발견되거나 분석결과가 기준을 만족시키지 못할 경우에 이 기준은 대량결손(Gross Defect)에 대해 중탐지 확률(Random Medium)로 사용후연료를 비파괴 검증(Method H)하도록 한다.

3. 장치 개발

3.1 개발 배경

원자력통제기술센터는 1997 년부터 시행된 특정핵물질에 대한 국가 특정핵물질 계량관리검사의 일환으로 월성원전의 사용후연료에 대한 검사를 IAEA 와 동시에 수행하고 있다. IAEA 는 감시장치 분석결과에 의해 수중내방사선카메라를 사용하여 사용후연료 수량을 파악하는 방법(Method K)[4]과 사용후연료에서 방출되는 Cs-137 감마선(662keV)을 측정하여 사용후연료의 진위여부 및 수량을 검증하는 비파괴 검증방법(Method H)[5]을 선별 적용한다. IAEA 는 위의 검증방법을 적용하여 사용후연료 재고량을 검증하고 있지만 다음의 제한조건에 직면해 있다. 월성원전의 저장조 바닥 구조물에는 초음파봉인(Ultrasonic Bolt Seal)을 설치하기 위한 깔때기형 지지대가 IAEA 요구에 의해 모든 호기에 이미 설치되었다. IAEA 는 방출된 사용후연료들을 모두 검증하여 이를 담은 선반을 16~19 층으로 쌓은 후에 초음파봉인을 하여 저장조에 있는 동안 이를 재검증 하지 않는 방안을 CANDU 운전 초기에 캐나다에서 추진하였다. IAEA 는 경제성 측면과 시설운영자의 사용후연료 관리 측면에서 문제점이 있다고 판단하여 현재 이를 적용하지 않고 있다. 그러나 이런 용도의 깔때기형 지지대가 월성원전 모든 호기에 이미 설치되어 있어서 안전조치검사 시에 문제점으로 작용하고 있는 것이다.

16 혹은 19 층의 선반 사이로 상하 수직운동하는 기존 검증장치의 센서(수중카메라, 감마선 검출기)는 2 층의 선반 높이까지 솟아올라온 깔때기형 지지대로 인해 이곳까지 접근하지 못한다. IAEA 는 이를 검증하기 위해 사용후연료 재고를 2 개의 Stratum 으로 분류하여 다음과 같이 검증할 시료수량을 결정하여 검증하고 검증되지 않는 부분에 대해 시설운영자에게 선반을 이동하도록 요청하여 이를 확인하고 있다.

$$n = N\,(1 - b^{(X/M)}) \qquad \text{----------} \qquad (1)$$

여기에서,

n : 검증할 총 표본 수 (검증할 Stacked Bundle 의 Column 수)

N : 모집단수 (검증대상 Stacked Bundle 의 Column 수)

b : Non-Detection Probability (1- Detection Probability)

M : 1 SQ (Significant Quantity) = 120 다발

X : 단위당 사용후연료 다발 (16 층인 경우에 16 다발)

저장조에 16 층의 80 stacks 이 저장되어 있다면

$n_1 = (80 \times 24\text{columns}) \times (1 - 0.9^{(16/120)}) = 27\ \text{columns}$

$n_2 = (80 \times 8\ \text{bundles}) \times (1 - 0.9^{(8/120)}) = 4.4\ \text{bundles}$

검사관은 상기 계산식에 의해 27columns 에 대해 사용후연료 수량을 검증하고, 검증

되지 않는 Stratum 으로 분류된 사용후연료를 검증하기 위해서 4.4 개 연료에 대해 선반이동을 요구한다. 이는 1 개 Stack 당 8 다발에 대해 센서가 접근하지 못하므로 기준에 의해 1 개 Stack 을 이동하면서 이를 검증하는 것이다. 그 동안, 시설측은 물자재고검사 기간에 IAEA 요청을 받아들여 선반이동을 지원하고 있으나 사용후연료 관리측면에서 안전상의 심각한 문제 등이 제기될 수 있다는 판단아래 IAEA 측에 이를 해결할 수 있는 방안을 준비하여 검사활동을 수행할 것을 강력히 요구하고 있다. 2002 년 제 11 차 한-IAEA 안전조치 평가회의에서 IAEA 측이 이를 해결할 수 있는 장치개발을 요청해옴에 따라 원자력통제기술센터는 이를 해결하기 위한 방안으로 이를 추진하고 있다[2].

3.2 장치 설계

가. 계측 원리

사람들이 들을 수 있는 약 20Hz~20KHz 범위의 주파수를 갖는 음파보다 더 높은 주파수를 가진 음파를 초음파라 한다. 초음파는 낮은 주파수의 음파보다도 에너지를 많이 가지고 있어서 더 멀리까지 전달되며 감쇠가 더 적은 물리적 성질을 가진다. 따라서 이 성질을 이용해서 물체의 유무나 물체까지의 거리를 재는 계측원리[6]를 장치개발에 적용하고 있다. 초음파를 발생시키고 이를 검출하는 것은 전자유도현상, 자왜현상, 압전현상에 의한 진동효과를 이용하는 것이다.

본 장치에 적용한 원리는 압전효과를 이용한 압전 진동자로서, 두 매의 압전소자를 맞붙여 양쪽에 걸리는 전압이 매번 바뀜에 따라 한쪽이 늘어나면 다른 쪽이 줄어드는 방식으로 진동시키는 것이다. 이것이 송신기이며 역으로 음압이 가해지면 기전력을 발생시키는 것이 수신기이다. 검출방식에는 송수신기를 서로 마주보게 배치하는 대향형과 반사형 및 송수파 겸용 반사형이 있다. 여기 적용된 반사형의 경우 근거리를 측정할 때 식(2)에 의해 거리를 알아낼 수 있는데 송수신기와 물체 사이의 각도의 반각에 의한 오차를 주의해야 한다. 물체와의 거리를 D 라 하고 음파의 속도를 V 라 하며 초음파가 발사되어 돌아오기까지의 시간을 T 라 하면,

$$D = \frac{T \cdot V \cdot \cos\theta}{2} \qquad \text{----------} \quad (2)$$

단 음파의 속도 V 는 331.5+0.607t (m/s) 이다. 여기서 t 는 공기중의 온도이다. 또한 매질이 공기가 아니라면 매질에 따라 속도는 달라진다. 본 장치에 적용된 계측원리는 센서에 초음파 신호를 보내 연료표면에서 반사되어 돌아온 신호를 수집하여 센서와 물체간의 거리정보를 이용해 측정된 물체의 외형을 시뮬레이션 하는 것이다.

나. 장치 구성

그림 1 은 가압중수로형 사용후연료 수량 검증장치를 저장조의 시설 구조물(Gantry bar)에 설치한 도식적 배치 상태를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 본 장치는

초음파 센서로 구성된 검출부, 검출부의 상하 등속운동을 구동하는 구동부와 반사된 초음파 신호를 수집하여 처리하는 제어부로 구성된다. 검출부의 초음파 센서는 8m 수심에서 동작하며 최근 방출된 사용후연료의 고 방사능에 대한 내방사성을 갖는다. 핵연료 사이의 좁은 공간(16mm)에서 초음파 센서의 상하 등속운동을 용이하게 하기 위해 센서의 상하에 여러 개의 작은 판(높이 2.5mm)을 구부러질 수 있도록 이어 부드럽게 들어갈 수 있도록 검출부를 설계하였다. 구동부는 장치를 안전하게 구조물에 고정시킬 수 있도록 하는 지지대와 검출부의 상하 등속운동을 하게 하는 소형모터와 콘트롤러로 구성되었다. 제어부는 초음파 센서로 하여금 초음파 신호를 보내 연료에서 반사되어 돌아오는 신호를 수집하는 신호수집기와 수집된 신호를 스캔 모드로 시뮬레이션하고 측정된 자료를 관리하는 컴퓨터로 구성되었다. 그림 2 는 이렇게 제작된 장치의 각 부분을 보여주고 있다.

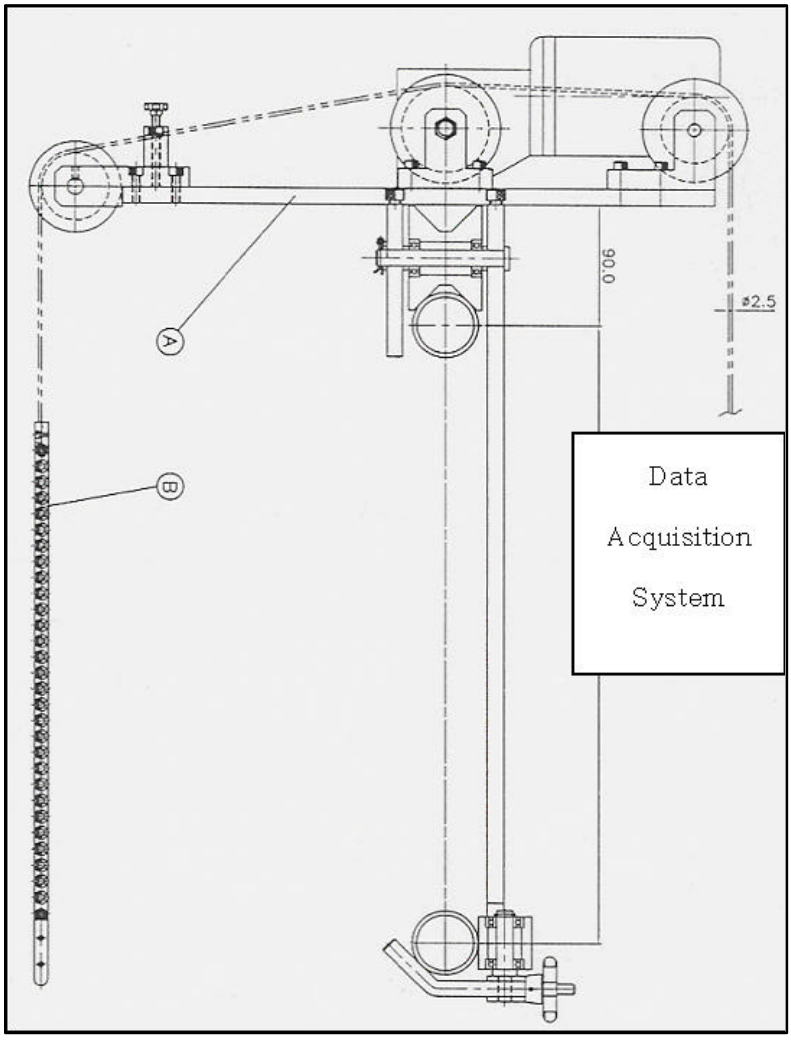

그림 1. 구조물에 설치될 장치의 도식적 배치도

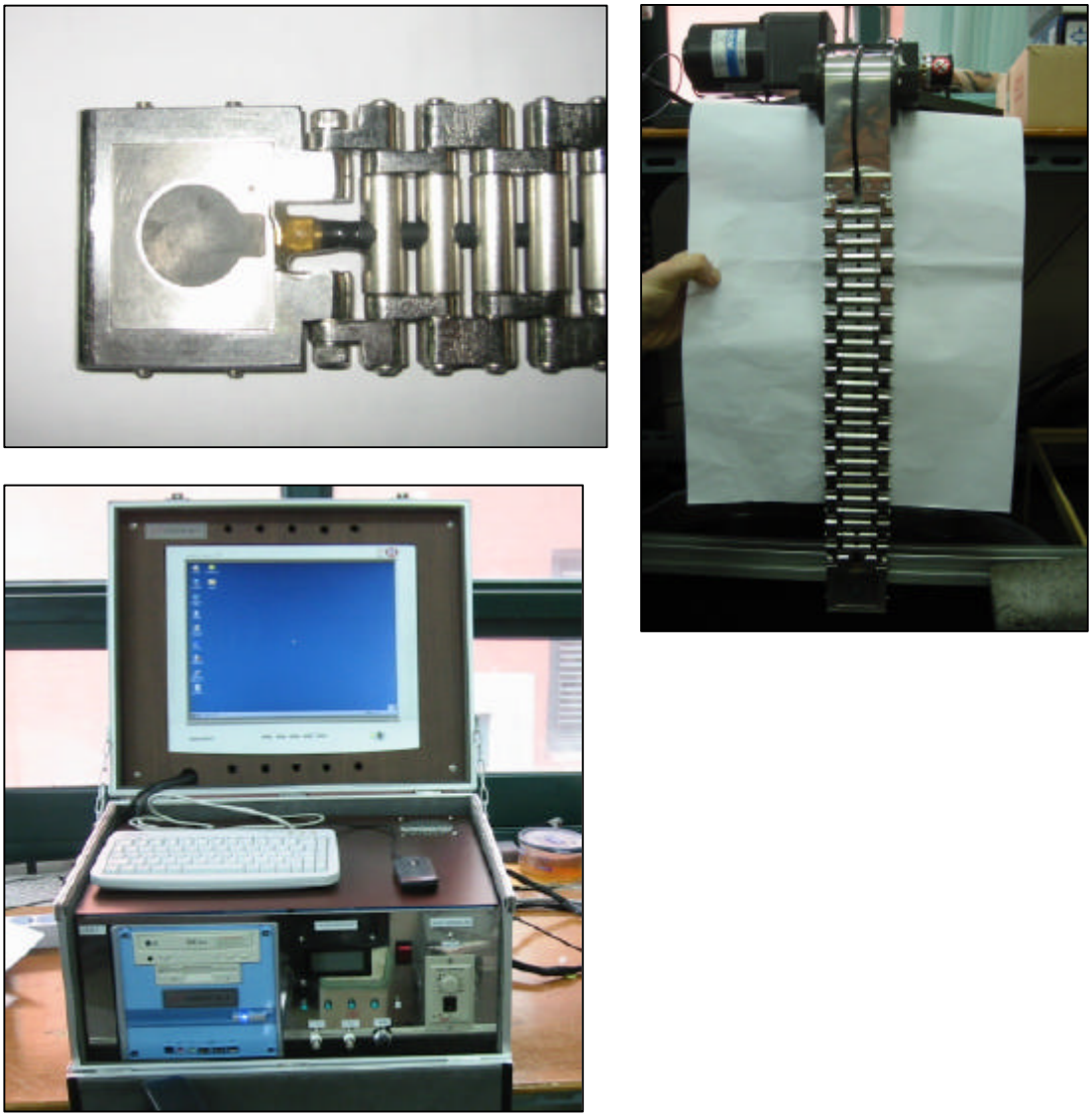

그림 2. 사용후연료 수량 검증장치의 검출부, 구동부 및 제어부

4. 시험 결과

본 장치를 월성원전 4 호기의 사용후연료 저장조에 그림 3 과 같이 설치하여 성능시험을 수행하였다. 본 시험은 검출부가 핵연료 손상 없이 구동할 수 있는지를 파악하는 것과 초음파 센서가 고 방사능에 영향을 받지 않고 측정결과를 생성할 수 있는지에 대해 수행되었다. 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 10mm 두께로 제작된 검출부는 핵연료 다발 사이 좁은 공간(16mm)에서 원활히 운동하는 것으로 평가되었다.

나. 검출부를 상하 등속운동 하도록 가이드 하는 평 강선은 모터 축에 잘 감기고 상하 수직운동에 적합한 것으로 평가되었다.

다. 검출부의 초음파 센서는 최근 방출된 사용후연료의 고 방사능에 대한 내방사성을 갖고 있는 것으로 확인되었으나 이 부분에 대해 정량적인 평가가 있어야 한다.

라. 초음파 신호를 처리하는 제어부는 수집된 신호를 컴퓨터 모니터에 실시간으로 보여주고 이를 저장 관리하는 기능을 제대로 수행하고 있으나 사용자측면에서 프로그램의 몇 가지 사항이 개선되어야 한다.

마. 초음파 센서가 선반의 상하단 사이 빈 공간에서 발생되는 물 흐름과 상하운동에 의해 센서의 각도 흔들림이 발생하고 있으며, 이런 영향으로 수집된 신호가 일정치 않은 점은 개선되어야 한다.

바. 본 장치가 현장에서 보다 안전하게 사용되기 위해서는 장치의 구조물의 몇 가지 사항에 대해 설계변경이 있어야 한다.

그림 4 의 시험결과를 검토한 결과 해결할 수 있는 사항이라 판단하고 있으며, 이런 개선사항을 반영한다면 장치의 개발목적을 만족시킬 수 있다고 평가하고 있다.

그림 3. 월성 4 호기에 설치된 사용후연료 수량 검증장치의 현황

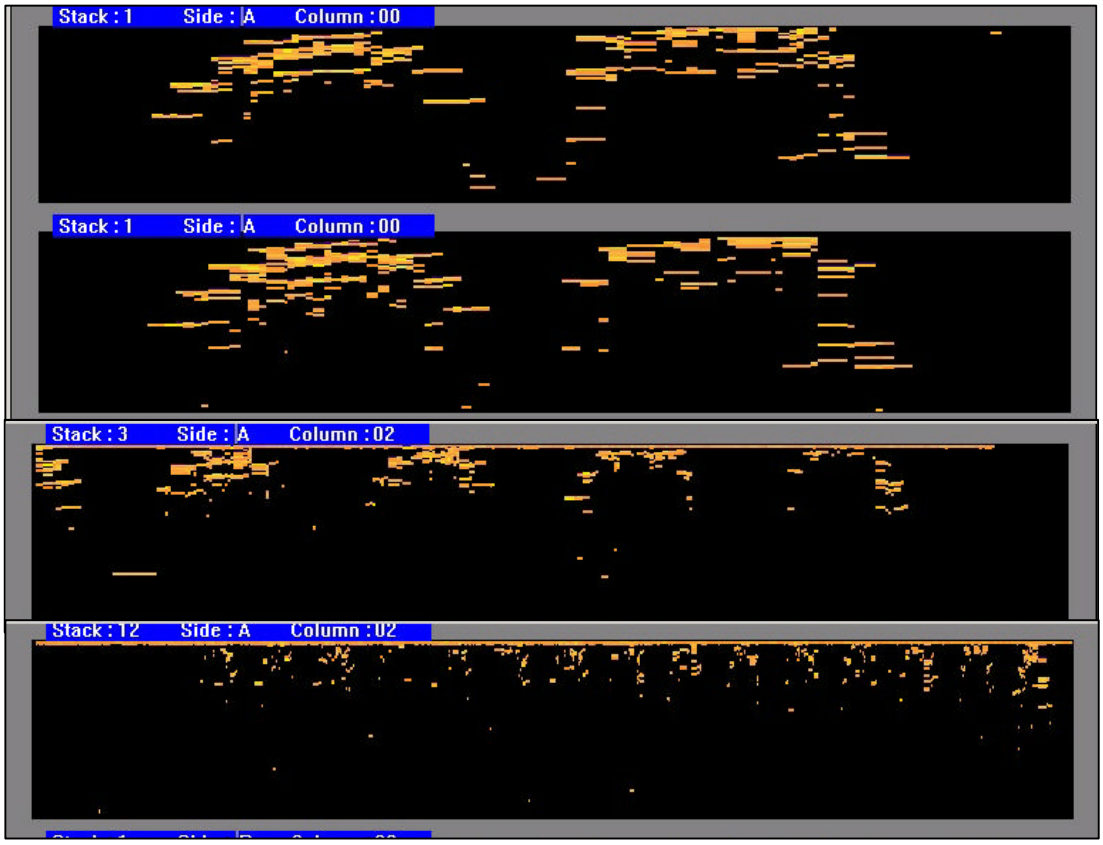

그림 4. 사용후연료 수량 검증장치의 성능시험결과

5. 결론

월성원전의 사용후연료 검증활동에 본 장치를 적용하게 되면 지금과 같은 선반 이동에 의한 검증활동이 필요치 않게 된다. 핵연료 선반 이동은 IAEA 와 시설측 모두에게 부담이 되는 사항이므로 반듯이 해결되어야 할 사항이다. 원자력통제기술센터는 본 장치의 성능시험결과를 반영하여 사용후연료 다발 수량을 확인하고자 하는 IAEA 안전조치 기준을 만족시킬 수 있다고 보고 이를 추진하고 있다. 향후, 이 장치개발이 성공적으로 수행되어 현장에서 적용될 경우 사용후연료 검증을 위한 검증시간을 절반가량 줄일 수 있을 것이며, 선반이동에 필요했던 인력지원을 필요 없게 하는 경제적 효과를 낳을 것으로 평가하고 있다.

향후, 원자력통제기술센터는 성능시험결과를 장치개발에 반영하여 최종 성능시험을 수행할 예정이다. 그리고 그 결과를 근거로 IAEA 와 장치를 공동으로 사용하는 방안 등에 대해 협의하고 이를 위해 필요하다면 IAEA 의 장비 인증(Authentication) 절차를 따를 계획이다.

참고문헌

1. 최영명 외 “원자력통제기술센터 2002년도 운영보고서”, KAERI/MR-391/2002
2. 과학기술부, “제 11 차 한·IAEA 안전조치 평가회의”(2002)
3. IAEA, "Safeguards Criteria "(2000)
4. IAEA, "The CANDU Course (Session 10 : Verification of Irradiated CANDU Fuel Bundles (Method K)"(1993)
5. W.W.Na, “Development of Safeguards Equipments for Wolsong Reactors”, INMM 40th Annual Meeting Proceedings(1999)
6. 황철규 외, “경수로 파손 핵연료 검출계통개발”, 한국에너지연구소(1987).