2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고속중성자 단층촬영 검사장비용 중성자 발생장치 예비 차폐설계

A Preliminary Study on Neutron Shielding for High Energy Neutron Generator

이춘식, 신창호, 김종경
방사선안전신기술연구센터

신대용, 하달규
주식회사 하이텍홀딩스

요 약

원자력발전소 시설 가동 중 비파괴검사를 위한 고속중성자 단층촬영 검사장비 제작에 사용될 고속중성자 발생장치에 대한 예비 차폐설계를 몬테칼로 방법을 이용하여 수행하였다. 고속중성자 발생장치는 프랑스 SODERN사의 GENIE16C모델을 사용하였다. 몬테칼로코드 MCNPX2.5모사를 위한 기하학적 자료는 제작사에서 제공하는 제품안내서를 참조하였고 물질정보가 가용하지 않아 타사제품 자료를 이용하였다. 차폐물질로는 일반적인 중성자 차폐물질인 콘크리트, 그리고 고효율 저중량 차폐물질로서 TiH_2, ZrH_2를 사용하였고 콜리메이터 부위를 감싸는 원통형 차폐체를 구성하여 차폐물질 및 두께별로 차폐체 표면에서의 중성자 및 감마선량율을 계산하였다. 원자력법 고시 차폐기준인 표면선량 주당 1mSv 이하를 만족시키기 위한 차폐체 조건을 계산해낸 결과 콘크리트의 경우 3.0 cm 두께가 필요하며 TiH_2, ZrH_2에 대해서는 각각 2.4 cm, 1.6 cm두께의 차폐체가 필요하였다. 장치 주변의 중성자속 분포를 계산한 결과 콜리메이터 이외의 부분에도 추가적인 차폐가 필요함을 알게 되었다. 본 연구결과를 기초로 향후 GENIE16C모델의 정확한 물질정보를 적용하여 보다 정밀한 차폐계산을 수행하여 고속중성자 단층촬영 검사장비에 이용할 수 있을 것이다.

Abstract

This study was intended to preliminarily design the shielding material and structure with Monte Carlo method for fast neutron generator, which will be applied to non-destructive inspection of facilities in nuclear power plant. The neutron generator, GENIE16C made by SODERN in France was chosen for this study. The geometry and material data were available from the brochure provided by the manufacturer and supplemented by an information of other models. The annulus-type shields was designed with general shielding material, concrete and high efficiency materials, TiH_2 and ZrH_2 for various thickness of

shield. In order to agree with the limitation of dose rate defined by Korean Nuclear Act, 0.1mSv/week, the thicknesses of shields, 2.4 cm, 1.6 cm, 3.0 cm were required for TiH_2, ZrH_2 and concrete, respectively. It was also found through the flux profile on z=0 plane that the backward scattering of neutron should be considered for shielding additionally. The result and methodology of this study can be applied to fast neutron radiography equipment with supplement of more detailed material and geometry information of GENIE16C.

1. 서론

재료나 제품의 원형을 변화시키지 않고 조직의 이상이나 결함을 찾아내는 비파괴검사는 감마선, 엑스선, 초음파, 탐지액체, 전자전류 등을 이용하여 방사선투과검사(RT), 초음파탐상검사(UT), 자분탐상검사(MT), 액체침투탐상검사(PT), 와전류탐상검사(ECT), 육안검사(VT) 등의 종목으로 산업체 전반에 걸쳐 이루어지고 있다. 이러한 비파괴검사 중 가장 많이 사용되는 방사선투과검사의 경우 모든 재질에 적용할 수 있고 필름을 반영구적으로 보관할 수 있다는 장점이 있으나 필름판독에 시간이 걸려 즉각적인 안전조치가 어렵고 설비를 중단한 상태에서 검사를 실시함으로 경제적 손실이 발생하는 단점을 안고 있다. 따라서 시설 가동 중에 구조물을 보다 정밀하게 검사할 수 있는 장비의 개발이 필요하다.

중성자촬영은 엑스선촬영과 그 원리는 유사하나 물질과의 상호작용 방식은 근본적으로 다르다. 엑스선은 핵 주위의 전자구름과 반응하는 반면, 중성자는 핵과 반응한다. 일반적으로 원자번호가 증가하면 엑스선 감쇠계수도 증가하는 반면 중성자의 감쇠는 핵종에 따라 다양하다(그림1). 따라서 엑스선촬영에서 볼 수 없는 다양한 정보를 중성자촬영에서는 제공하므로 D-T반응에 의한 고속중성자 발생장치를 이용한 중성자단층촬영 장비의 개발이 진행중이다.

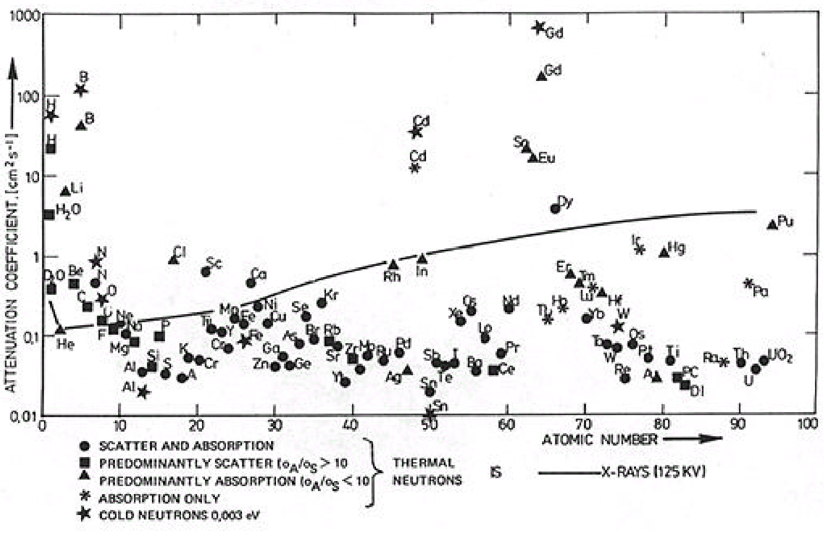


그림1. 엑스선과 중성자의 원소에 따른 질량감쇠계수

본 연구에서는 고속중성자 발생장치를 이용한 중성자단층촬영 장비 개발의 초기단계로서 다양한 차폐물질을 Monte Carlo 방식으로 모사하여 중성자발생장치 자체에 대한 예비 차폐계산을 수행하였다.

2. 재료 및 방법

고속중성자 발생장치로는 D-T반응을 이용한 프랑스 SODERN사의 GENIE16C모델을 선정하였다. GENIE16C는 D-T반응에 의해 14 MeV의 중성자를 초당 2×10^8개의 수율로 발생시키며 4000시간의 수명을 가지고 있다. Monte Carlo 모사를 위한 기하학적 자료는 제작사에서 제공하는 제품안내서를 일부 참조하였으나 세부적인 구조와 물질에 대한 정보는 부족하였다. 본 연구의 목적이 예비 차폐계산이므로 부족한 정보에 대해서는 타사 제품의 정보를 참고하였다. 장치 내부의 세부장치들은 단순화하여 중성자가 발생하는 지점인 표적부분과 외장만 모사하였다. 그림2는 GENIE16C의 실물 사진과 MCNPX2.5에서 모사된 것을 Sabrina로 그려낸 그림이다. 그림2에서 우측 그림은 콜리메이터를 2 cm 두께의 차폐체로 감싼 모습을 보여준다.

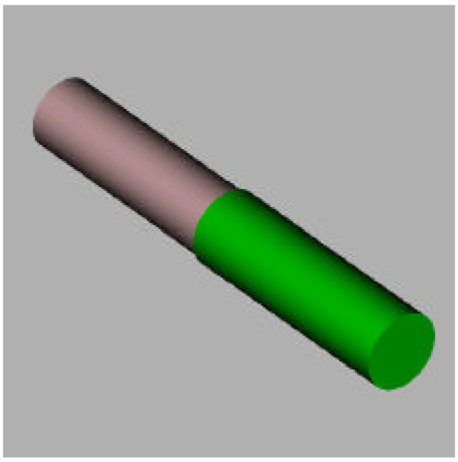



그림2. SODERN사의 고속중성자 발생장치 GENIE16C 실물(좌)과 MCNPX2.5에 의해 모사된 모습(우).

차폐물질로는 일반적인 중성자차폐에 사용되는 일반적인 콘크리트(Ordinary NBS03)와 더불어 고효율 저중량 차폐체로 최근 연구가 되고 있는 TiH_2와 ZrH_2를 선정했다[1]. 차폐체는 중성자 콜리메이터를 감싸는 고리형태로 모사하였다.

일반목적의 MCNPX2.5코드는 몬테칼로 계산기법을 사용하는 대표적인 방사선수송코드로서 광자 및 중성자 이외에도 다양한 방사선에 대한 계산을 수행할 수 있다[2]. 본 연구에서는 14 MeV의 등방성 중성자선원을 모사하였고 차폐체 표면에서의 선량율 계산을 위해 *F2 tally*를 이용

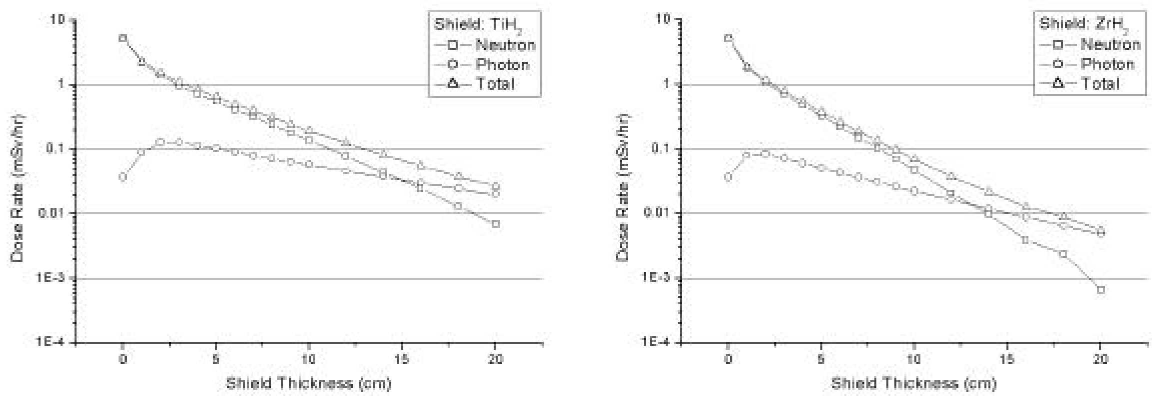
하여 플루언스(n/ s · cm^2)를 계산한 뒤 DE/ DF카드를 사용하여 선량율(mSv/ hr)로 환산하였다. 표 1은 계산에 사용된 중성자 발생장치와 차폐체의 물질정보를 보여준다. 계산을 위해 WindowXP로로 운영되는 CPU 2.4GHz, RAM 512MB가 장착된 개인용 컴퓨터를 사용하였으며 상대오차 1% 이내의 결과를 얻기 위해 50,000개의 히스토리를 각각 사용하였다.

표1. 몬테칼로 모사에 사용된 물질과 밀도

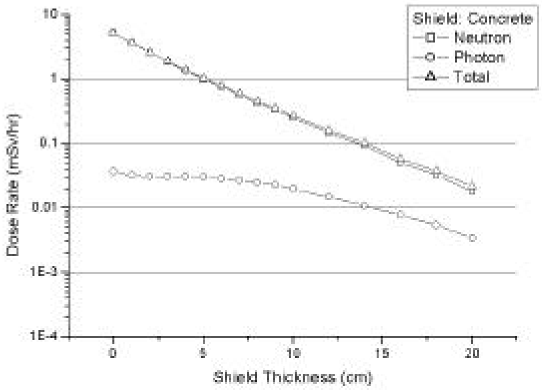
	Neutron Generator		Shielding Material		
	Housing	Target			
Element	Stainless steel	Titanium	TiH_2	ZrH_2	Concrete (Ordinary NBS03)
Density (g/ cm3)	8.02	3.76	3.76	5.40	2.35

3. 결과 및 토의

먼저 3가지 차폐물질로 환형 차폐체를 구성했을 때 두께별로 차폐체 표면에서의 중성자 및 감마 선량율을 계산하여 그림3에 나타내었다. 감마선에 대한 차폐효율은 콘크리트가 더 좋았고 중성자에 대한 차폐효율은 TiH_2와 ZrH_2가 더 좋았고 그 중 ZrH_2의 경우 TiH_2보다 나은 차폐효율을 보였다. 장치에 대한 인허가를 고려하여 주당 사용시간을 10시간으로 가정하여 선량율을 환산했을 때 원자력법 고시 기준치인 주당 0.1mSv이하를 만족시키기 위해서 TiH_2, ZrH_2 및 콘크리트 각각 2.4 cm, 1.6 cm, 3.0 cm 두께로 제작되어야 한다. 따라서 장치의 휴대성을 감안할 때 ZrH_2가 최적의 차폐물질임을 알 수 있다.



(a) (b)



(c)

그림3. (a) TiH_2, (b) ZrH_2, (c) Concrete 두께별 선량율(mSv/hr)

콜리메이터를 환형 차폐체로 감싸는 차폐설계에 대한 검증을 위해 중성자발생장치 주변의 중성자속 분포를 계산해보았다. 그림4는 MCNPX2.5의 *meshtally*를 이용하여 그려낸 z=0평면에서의 중성자속(n/cm^2)분포이다. 콜리메이터 주위가 분명하게 차폐된 것을 볼 수 있으며 아래쪽으로 중성자가 집중적으로 방출됨을 알 수 있으나 장치 뒤쪽으로 방출되는 중성자속도 관찰되어 이 부분에 대한 차폐도 재고되어야함을 알 수 있다.

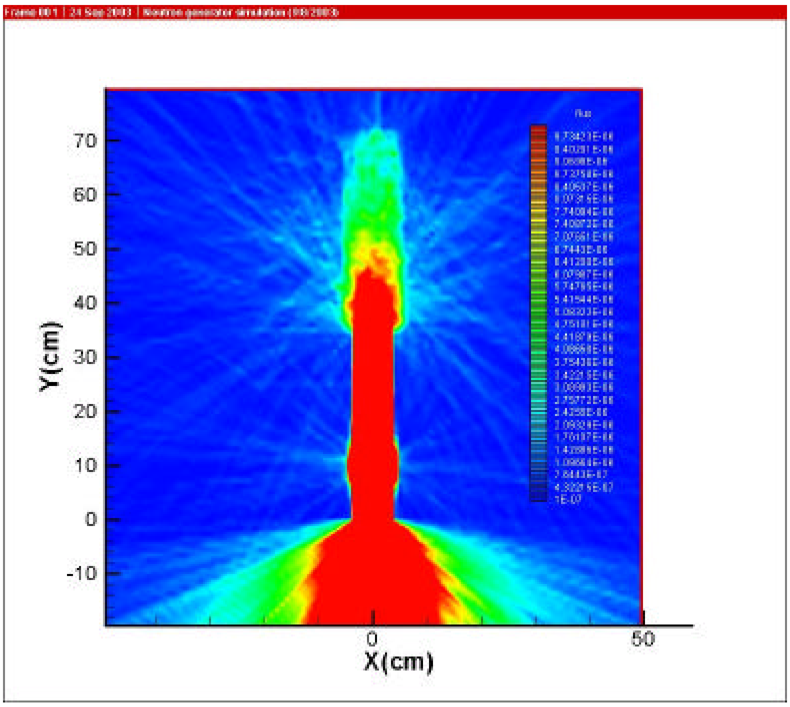


그림4. 중성자발생장치 주위 z=0평면에서의 중성자속분포(n/cm^2)

4. 결론

원자력발전소 시설 가동 중 비파괴검사를 위한 고속중성자 단층촬영 검사장비 제작에 사용될 고속중성자 발생장치 GENIE16C**모델(프랑스** SODERN**사)에 대한 예비 차폐설계를 몬테칼로 코드** MCNPX2.5**를 이용하여 수행하였다. 콜리메이터를 감싸는 환형 차폐체를 구성하고 차폐물질로 고려된 콘크리트**, TiH_2, ZrH_2**의** 3**가지 물질에 대해 차폐체 두께별로 차폐체 표면에서의 중성자 및 감마선량율을 계산하였다. 원자력법 고시 차폐기준인 표면선량 주당** 1mSv **이하를 만족시키기 위한 차폐체 조건을 계산해낸 결과 콘크리트**, TiH_2, ZrH_2 3**가지 물질에 대해 각각** 2.4 cm, 1.6 cm, 3.0 cm **두께의 차폐체가 필요하였다. 장치 주변의 중성자속 분포를 계산한 결과 콜리메이터 이외의 부분에도 추가적인 차폐가 필요함을 알게 되었다. 본 연구결과를 기초로 향후** GENIE16C**모델의 정확한 물질정보를 적용하여 보다 정밀한 차폐계산을 수행하여 고속중성자 단층촬영 검사장비에 이용할 수 있을 것이다.**

5. 참고문헌

1) T.Iida, H.Taniuchi and K.Fujisawa, Highly effective neutron shielding for transport/storage packaging, Int. J. Radioact. Mat. Transp. 2(1-3) (1991).
2) Laurie S. Waters, Editor, "MCNPX users manual, version 2.3.0," Los Alamos National Laboratory report LA-UR-02-2607 (2000).