2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 이상 유동 연구를 위한 중성자 래디오그래피 실험과 MCNP를 이용한 모의 계산

Neutron Radiography Experiments for the Two Phase Flow Research and MCNP Simulation

서철교, 임인철, 김헌일

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

## 요약

중성자 래디오그래피 장치를 이용한 이상 유동 실험의 분석을 위해서는 중성자의 투과 깊이에 따른 중성자의 감쇄 정도를 나타내는 특성 곡선이 필요하다. 하나로의 중성자 래디오그래피 장치를 이용하여 특성 곡선을 얻기 위한 몇 가지 실험을 수행하고 몬테 카를로 방법으로 모의 계산을 수행하였으며 그 결과를 비교하여 보았다. 실험과 모의 계산은 슬릿과 관 형상을 한 표적에 대하여 수행되었고 유체로는 경수와 중수가 사용되었다. 비교 평가로 계산은 실험을 잘 모의하며 계산이 특성 곡선을 구하는데 유용한 것으로 나타났다. 관에 경수를 채운 경우에는 경수의 두께가 11 mm 이상으로 두꺼울 때에는 계산과 실험의 차이가 발생하였다. 이는 중성자의 투과율이 낮은 영역에서는 분석에 사용한 필름의 감도가 비선형성을 가지고 있기 때문인 것으로 추정된다.

## Abstract

*In analysis of two phase flow experiment using neutron radiography, the characteristic curve describing the change of neutron intensity as penetration depth is required. Using the HANARO neutron radiography facility, several experiments and simulations using the Monte Carlo method were performed to obtain the characteristic curve and their results were compared. Two types of test sections - slit and tube type - were employed for the experiments, and light water and heavy water were used as the test liquids. The simulation results agreed well with the experiment results and it is found that the simulation is very useful to obtain the calibration curve. In the case of the tube filled with light water whose thickness is thicker than 11 mm, the differences between the experimental results and the simulation were noticeable. It is believed that this difference comes*

*from the non-linearity in the sensitivity of the film used as the neutron detector in neutron radiography.*

## 1. 서론

중성자 래디오그래피(neutron radiography)를 이용한 분석 기술은 크게 정적 현상 분석과 동적 현상 분석 기술로 나눌 수 있다. 정적 현상 분석 기술은 주로 비파괴 검사에 활용되며, 동적 현상 분석 기술은 이상 유동(two phase flow)의 연구에 많이 활용되고 있다. 중성자 래디오그래피를 이용하여 이상 유동 실험을 수행하기 위해서는 중성자가 일정 두께의 액체(path length)를 지나면서 감쇄하는 특성을 나타내는 특성 곡선(calibration curve)이 있어야 한다. 일반적으로 이 특성 곡선은 이상 유동 실험에 사용할 유체를 대상으로 실험적으로 구하여 사용하고 있다. 본 연구에서는 여러 가지 두께의 틈 간격(gap size)을 갖는 슬릿(slit) 및 관(tube)에 대하여, 래디오그래피 방법으로 빔의 투과율을 실험적으로 구하고 이를 모의 계산하여 비교하여 보았다. 실험은 하나로의 NR(Neutron Radiography) 조사실에서 수행하였으며 모의 계산에는 몬테 카를로(Monte Carlo) 방법을 이용하는 MCNP 전산 코드를 사용하였다.

## 2. 실험

여러 가지 두께의 슬릿과 관의 표적에 경수 또는 중수를 넣고 중성자 조사를 한 후 필름법으로 얻은 이미지를 분석하였다. 조사는 그림 1에 나타낸 하나로 NR 조사장치의 제 2 조사실에서 수행되었다.

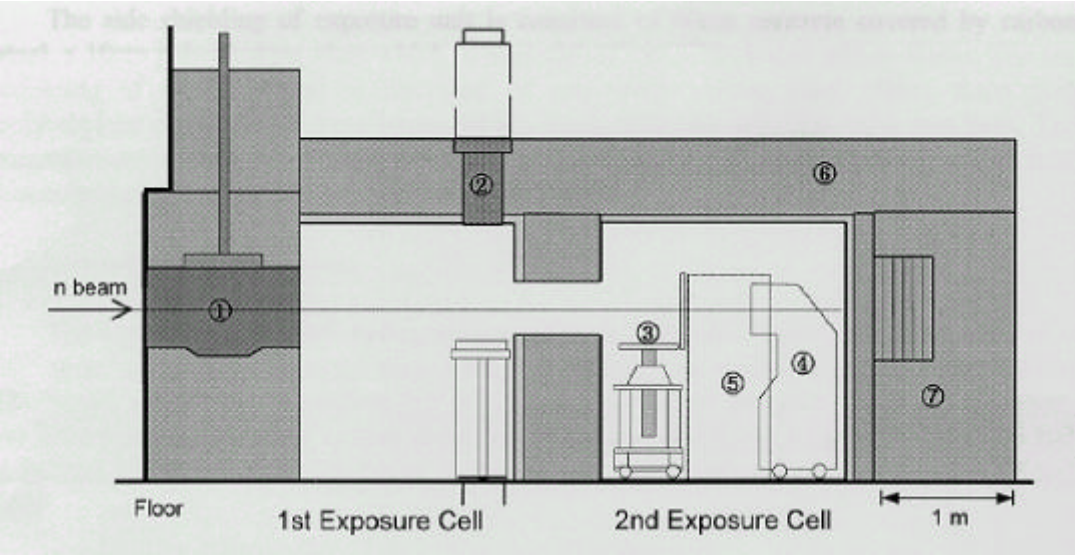
슬릿 또는 관 형상을 한 조사 대상을 제 1 조사실과 제 2 조사실 사이의 빔 창으로부터 108.5 cm 떨어져 있는 조사대(sample table)에 장착하였으며 Gd 전환막이 장착된 필름판을 슬릿 및 관에 밀착시켰다. 그림 2에 있는 필름판은 미국 Aerotest Operations 사의 것이며, 필름은 Kodak SR 5 x-ray 필름이다. 필름 카세트를 구성하고 있는 필름이 Gd(Gadolinium) 전환막에서 핵반응에 의하여 발생하는 감마선에 의하여 감광되는데, 실험물마다 중성자가 흡수되는 정도가 다르므로 발생하는 감마선에 차이가 생기고 이 차이가 감광의 정도에 차이를 만든다. 조사는 원자로 출력이 24 MW인 상태에서 10분간 수행되었다. 각 조사물에 경수 또는 중수를 채운 경우와 비운 경우에 대해 조사시키고, 액체를 채운 경우에 대한 필름, 비운 경우에 대한 필름 및 빈 필름을 같이 현상하였다. 이는 현상 과정에서 오는 차이를 최소화하기 위한 것이었다. 현상 후에는 필름을 조도계(photo densitometer)에 놓고 투과되는 조도를 읽었다. 읽은 조도로부터 투과율은 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$\text{투과율} = \frac{I_f - I_d}{I_e - I_d}, \qquad (1)$$

$I_f$ : **실험물에 물 또는 중수를 넣고 찍은 사진에서 읽은** intensity,

$I_e$ : **실험물 만을 찍은 사진에서 읽은** intensity,

$I_d$ : **조사시키지 않은 필름에서 읽은** intensity.




1. Main beam shutter
2. High-radioactive material access plug
3. Sample table
4. Image processing TV camera box
5. Entrance door
6, 7. Shielding (polyethylene, steel and concrete)

**그림 1. 하나로 NR 설비 개략도**

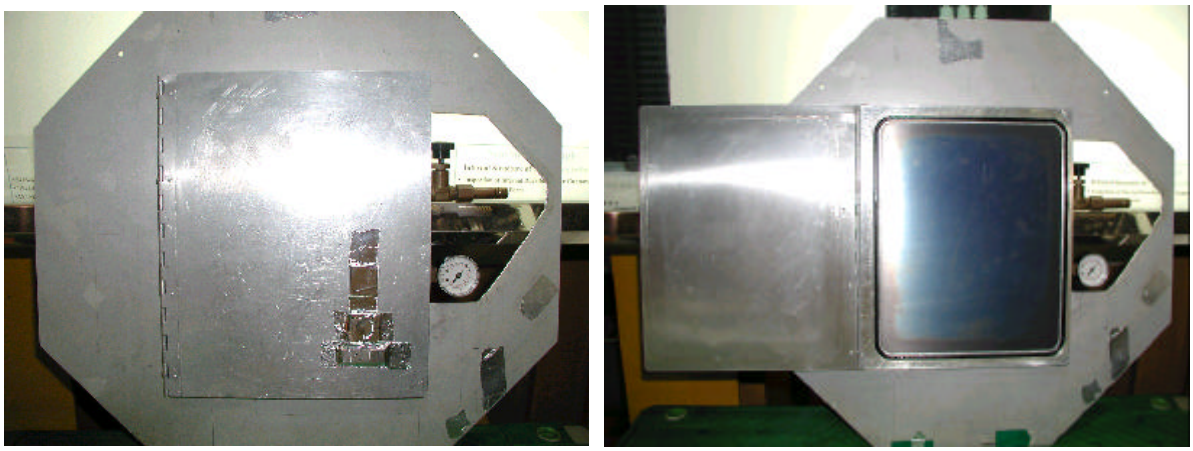


**그림 2. 실험에 사용한 필름 카세트**

3. 모의 계산

모의 계산에서는 실제 실험으로 하기 어려운 여러 가지 상황을 모의하는 것이 용이하므로 실험의 효율을 높이고 이론적인 문제점을 연구해 볼 수 있는 장점이 있다. 모의 계산을 정확하게 하기 위하여 몬테 카를로 방법을 이용하는 MCNP[1]를 사용하였다. NR 설비의 조사대의 위치는 중성자원인 원자로에서 많이 떨어져 있기 때문에 중성자는 거의 평형 선원(parallel source)이다. NR 표적 부분에서의 중성자는 매우 작은 방향성을 가지지만 화상의 선명도에 영향을 주므로 중요한 관심 대상이며 실험으로 평가된다. 하나로 NR에서 측정한 L/D는 265.63으로 평가되었으므로[2] 계산도 중성자의 방향성을 그대로 모의하도록 하였다. MCNP에서 가능한 선원의 방향성은 단방향(mono-directional) 또는 등방(isotropic) 선원이다. 즉 작은 방향성을 갖는 선원을 직접 모의할 수 없기 때문에 측정된 L/D와 같은 성질을 갖도록 하기 위해서는 등방 선원을 표적에서 적절한 거리에 위치하도록 한다. 실제 NR 실험 위치에서의 중성자 빔이 거의 평형인 것은 노심에서 NR까지의 거리가 멀기 때문에 방향성이 큰 중성자는 도달하지 않고 거의 평형 성분의 중성자만 도달하기 때문이다. 등방 선원을 그대로 모의하여 모든 방향으로 중성자 선원을 생성시키면 계산 시간이 길어져 현실적으로 계산이 불가능하다. 계산 시간을 줄이기 위해서는 적절한 variance reduction 방법을 사용해야 한다. 등방 선원이더라도 발생되는 중성자의 일부분만 표적으로 향하므로 표적 방향으로만 중성자 선원을 생성시키는 'cone directional biasing' 방법[1]을 사용하여 계산 시간 문제를 극복하도록 하였다.

중성자의 에너지에 따라 반응 핵 단면적이 다르므로 발생되는 중성자 선원은 적절한 에너지를 갖도록 해야 한다. 중성자 빔의 전체 에너지 영역에 대한 중성자 스펙트럼은 측정으로 구해진 것이 없으나 고속 및 1/v 영역의 중성자는 매우 적을 것으로 추정되기 때문에 중성자 빔의 스펙트럼은 아래 식과 같은 Maxwell 분포(Maxwellian distribution)를 갖는다고 가정할 수 있다.

$$N(E) = \frac{2\pi N}{(\pi k T)^{3/2}} E^{1/2} e^{-E/kT}, \qquad (2)$$

$k$ : 볼쯔만(Boltzmann) 상수 ($8.6170 \times 10^{-5}$ eV/K).

Maxwell 분포의 중성자 스펙트럼은 식 (2)와 같이 온도에 의해 결정된다. 충분히 감속된 중성자는 반사체 온도 조건의 Maxwell 분포를 갖는다고 볼 수 있다. 따라서 계산에서 중성자 선원은 반사체 온도(약 40 °C)의 Maxwell 분포를 갖도록 하였다.

측정은 카세트를 구성하고 있는 x-ray 필름에 감마선이 감광되는 차이를 판독하는 것이다. 측정되는 감마선은 카세트 내에 x-ray 필름에 인접하고 있는 Gd의 $(n,\gamma)$ 반응에 의하여 생성되는 것이므로 계산은 Gd의 $(n,\gamma)$ 반응률 $R_\gamma$을 다음 식과 같이 이루어지도록 하였다.

$$R_\gamma = \sum_{i=1}^{Gd} \int N_i \phi(E)\, \sigma_r^i(E)\, dE ,$$

$\phi(E)$ : 중성자속, (3)

$\sigma_r^i(E)$ : $i$ 번째 Gd 동위원소의(n, $\gamma$) 반응 단면적.

MCNP는 몬테 카를로 방법을 사용하기 때문에 계산값에 오차가 있다. 계산값의 오차는 선원의 수를 증가시키면 줄어들지만 계산 시간이 늘어나기 때문에 계산값의 표준 편차가 1% 미만이 되는 정도로 중성자 선원의 수를 설정하였다.

## 3. 결과 및 토의

슬릿에 경수를 채웠을 때의 결과는 그림 3과 같으며 중수를 채웠을 때의 결과는 그림 4와 같다. 이 그림에 제시된 투과율은 빔 중심으로부터 아래로 0.9 mm 떨어져 있고 서로간의 거리가 약 0.76 mm인 네 곳에 대하여 구한 값을 평균한 값이다. 이 비교 분석을 통하여, 실험을 하지 않더라도 코드 계산을 통하여 특성 곡선을 얻을 수 있는 가능성을 확인하였다. 이는 프레온과 같이 다루기 어려운 유체를 실험에 사용하는 경우에 실험 기획의 단계에서 코드 계산을 통하여 특성 곡선을 얻고 이를 test section의 설계에 활용함으로써 test section의 설계와 test matrix의 구성을 용이하게 수행할 수 있음을 시사한다.

외경 25 mm 관에서 빔 path length에 따른 빔의 투과 정도도 실험적인 방법과 코드 계산을 통하여 구하고 비교하였는데 그 결과는 그림 5와 같다. 이 그림에서 측정점은 빔 중심으로부터 21 mm 위쪽에 위치하였다. 중수를 채운 경우에는 슬릿의 경우와 마찬가지로 실험 결과와 해석 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 그러나, 경수를 채운 경우에는 실험값과 계산값이 차이를 보였다. 이런 차이가 나는 경우에 식 (1)로 계산한 빔의 투과 정도는 0.2 미만이다. X-ray 필름의 경우에 조사량에 따라 필름에서 읽은 조도가 달라지는데 조사량이 매우 낮거나 높을 경우에는 조사량과 필름 조도 사이에 비선형성이 발생한다[3]. 중성자의 투과율 즉 조사량이 낮은 경우에는 실험에서 얻어지는 투과율은 실제 보다 높게 나타난다.

그림 6에는 관과 슬릿에 물 또는 중수를 채웠을 때 path length에 따른 빔의 투과 정도를 슬릿에서의 투과 정도와 같이 나타내었다. 슬릿의 경우에 path length가 가장 긴 것은 11 mm이고 관에 대한 측정점 중 가장 path length가 짧은 것은 11.4 mm 이다. 관의 경우 path length가 최소인 측정점은 관의 중심에서 반경 방향으로 10 mm 떨어져 있는 곳이었다. 관의 내경이 23 mm임을 고려하면 이곳은 관의 최외곽에 매우 근접한 곳이다. 측정 지점에서 중심 방향으로는 물의 두께가 두꺼워지고 외곽 방향으로는 물의 두께가 얇아져서 1.5 mm만 더 지나면 공기가 존재하여 산란된 중성자가 외곽으로 유출되는 경향이 많은 곳이다. 이러한 edge 효과에 의하여 그림 6에 있는 바와 같이 11 mm 근방에서 슬릿과 관 사이의 급격한 변화가 발생한다고 판단된다. 이 결과로부터 관을 이용한 실험에서는 슬릿에 대하여 구한 특성 곡선을 같이 사

용할 수 없음을 발견하였다.

## 4. 결론

위와 같은 실험과 모의 계산 및 비교 평가를 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 이상 유동 실험에 필요한 특성 곡선을 얻은데 있어 MCNP 코드 계산 결과를 매우 유용하게 활용할 수 있음을 확인하였다. 이는 프레온과 같이 다루기 어려운 유체를 실험에 사용하는 경우에 실험 기획의 단계에서 코드 계산을 통하여 특성 곡선을 얻고 이를 test section의 설계에 활용함으로써 test section의 설계와 test matrix의 구성을 용이하게 수행할 수 있음을 뜻한다.

(2) 필름을 중성자 검출기로 사용하고 경수를 유체로 사용하는 경우에는 유체층의 두께가 11 mm 이상이 되면 중성자 투과율이 매우 낮아져 필름의 광도와 투과율 사이의 선형적인 관계가 더 이상 유지되지 않는다. 이 경우 조도계로 읽어 얻은 중성자 투과율은 코드로 계산한 투과율 보다 높다.

(3) 튜브의 경우에는 중성자 산란에 의한 edge 효과가 발생하므로 슬릿에 대하여 얻은 특성 곡선을 같이 사용할 수 없다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

## 참고 문헌

1. J. F. Briesmeister (Editor), "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," LA-12625-M, Los Alamos National Lab., 1993.
2. 남기용, “L/D 측정 결과,” 한국원자력연구소 내부문서, 2000. 11.21.
3. J.C. Domanus (Editor), "Practical Neutron Radiography," Commission of the European Communities, Neutron Radiography Working Group, Kluwer Academic Publishers, 1992.

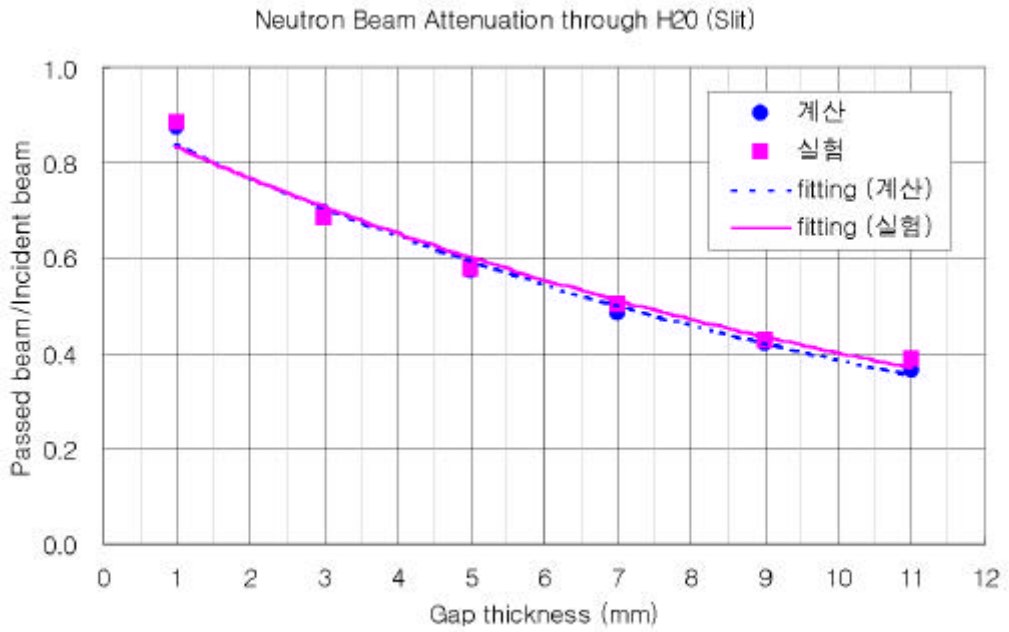



그림 3. 슬릿의 gap 두께 변화에 따른 중성자빔의 감쇄 - 경수

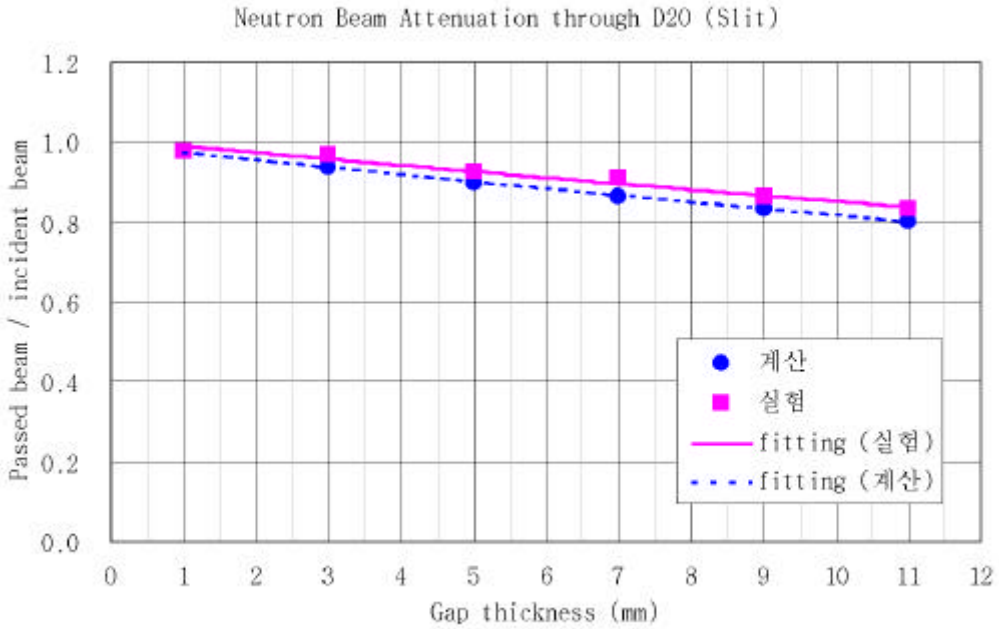



그림 4. 슬릿의 gap 두께 변화에 따른 중성자 빔의 감쇄 - 중수

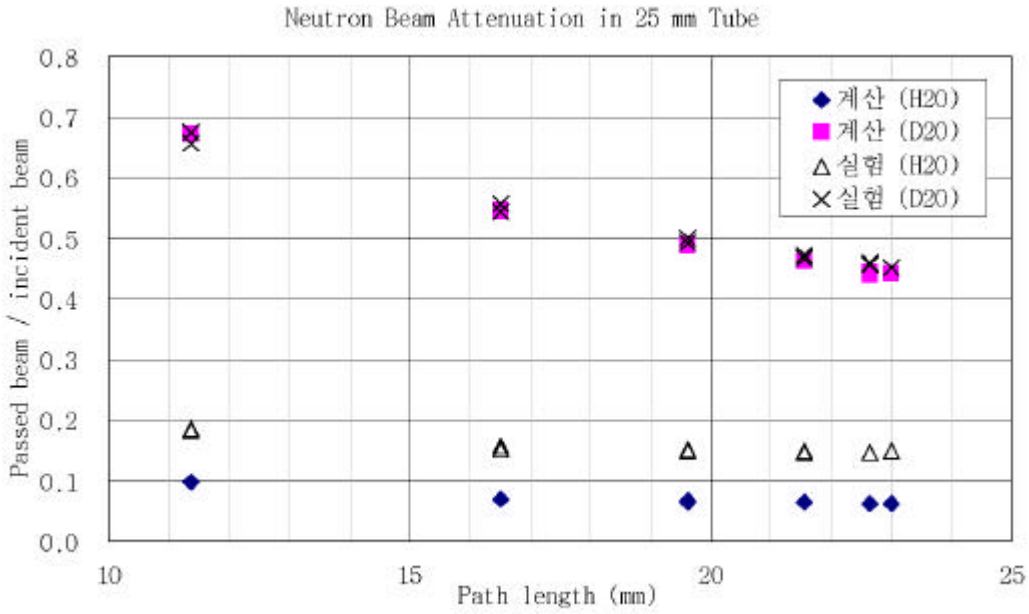



**그림 5. 직경 25 mm 관에서 path length에 따른 중성자 빔의 감쇄**

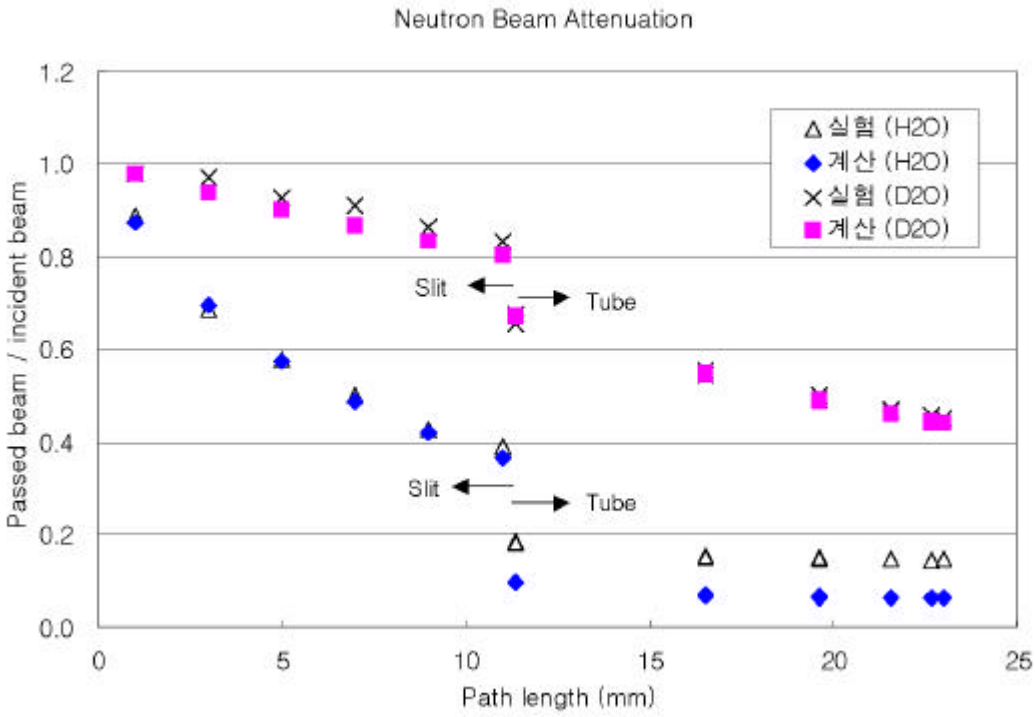



**그림 6. 관과 슬릿에서의 실험 및 계산 자료 비교**