2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

DVI 실험장치 강수관 내부에서의 기포율 측정을 위한 감마선 밀도계의 적용

Application of Gamma Densitometer for Void Fraction Measurement in the Downcomer Annulus of DVI Experimental Facility

주인철, 김용균, 윤병조, 권태순, 송철화, 박종균

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

계수 모드로 운전되는 감마선 밀도계의 설계 절차를 기술하였다. 감마선 밀도계는 DVI 안전주입 성능평가 실험시 Downcomer Annulus에서의 다차원 유동 조건에 적합하도록 설계되었다. 감마선원의 종류, 선원 강도, 섬광 검출기의 종류, 그리고 신호처리부의 요건을 제시하였다. 예비 실험을 통하여 2상 유동의 밀도측정에 대한 감마선 밀도계의 적용가능성을 살펴보았으며, EGS4 simulation을 이용하여 실험 결과를 검증하였다.

Abstract

Design procedure for gamma densitometer operated in the count mode is described. The gamma densitometer is designed to be suited for multi-dimensional flow condition of DVI performance evaluation experiments. Provided are the requirements of gamma source, source activity, scintillation detector, and signal processing system. Throughout preliminary experiments, applicability of gamma densitometer for the density measurement of two phase flow has been investigated. The results are verified using ESG4 simulation.

1. 서 론

현재 국내에서 개발되고 있는 차세대 원자로(KNGR)는 표준형 원자로에 비해 용량이 증대되었을 뿐만 아니라 노심 손상확률을 줄일 수 있도록 여러 가지 안전성을 향상시킬 수 있는 조치들이 설계에 반영되어 있다. 그 중에서 비상노심냉각계통은 기존의 저온관 주입 방식과 달리, 안전주입수가 원자로용기의 downcomer에 직접 주입되는 DVI 방식을 채택하고 있다.

DVI 방식을 채택하는 KNGR은 안전주입계통의 작동시 기존의 저온관 주입 방식의 원자로와는 다른 열수력적 양상을 보일 것으로 예상된다. 하지만 기존의 안전해석 코드들은 저온관 주입 방식의 안전주입계통이 작동하는 경우에 대한 열수력적 성능이 평가, 검증되어 있다. 따라서 DVI 방식의 안전주입계통 작동시에 고유하게 나타날 수 있는 주요 열수력 현상들에 대한 기존의 안전해석 코드들의 해석 능력에 대한 평가가 필요하다.

여러 열수력 현상들 중에서 downcomer에서의 유동 양식에 대한 기존 안전해석 코드의 예측 능력의 평가와 이에 대한 개선 작업은 특히 중요하다. 본 연구의 최종 목적은 감마선 밀도계를 적용하여 기존 안전해석 코드의 열수력 모델과 상관식을 평가하고 검증하기 위한 실험 자료를 제공하는 것

이다. 국외에서는 2상유동 변수의 측정을 위하여 감마선 밀도계를 적용한 연구 결과를 쉽게 찾아볼 수 있으나[1~4], 아직까지 국내에서는 감마선 밀도계에 대한 경험이 부족한 실정이다. 본 논문에서는 DVI 안전주입 성능평가 실험에 적용될 감마선 밀도계의 설계 요건 뿐만 아니라 감마선 밀도계의 적용시 고려해야 하는 보다 일반적인 설계 요건들을 제시하였다.

2. 감마선 밀도계의 설계

2.1 감마선 밀도 측정기의 원리

감마선이 물질을 투과할 때, 감마선은 투과 물질과의 상호작용(광전효과, 쌍생성, 콤프턴 산란)을 통해 흡수■소멸되거나 에너지의 일부를 잃게 된다. 좁은 입사면적을 갖도록 조준된 단일 에너지의 감마선이 두께 x인 어떤 물질을 투과할 경우, 앞서 언급한 상호작용에 의해 투과된 즉, 매질과 상호작용을 하지 않은 감마선의 세기(intensity) 는 다음과 같이 지수함수적으로 감소하게 된다.

$$I = I_o \exp(-mx) \qquad (1)$$

여기서 I_o는 입사 감마선의 세기이고, m는 선형감쇄계수이다..
그림 1과 같이 2상 유체의 매질에 감마선을 입사한 경우, 투과된 감마선의 세기는 다음과 같다.

$$I = I_o \exp[-(2m_{wall}t_{wall} + (1-a)m_f d + a m_g d)] \qquad (2)$$

아래 첨자 f, g는 각각 액상 및 기상의 값을 나타낸다. 만약 입사된 감마선이 본질적으로 입사 면적을 갖지 않는 line beam이거나 유한한 입사 면적을 갖는 경우 입사 면적내의 기포율이 동일하면, 감마선 투과 경로에 대한 평균 기포율은 위 식으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$a = \frac{\ln(I/I_f)}{\ln(I_g/I_f)} \qquad (3)$$

2.2 기본 설계 방향

KEARI에서 수행한 물/공기 가시화 실험 결과[5]를 살펴보면 LBLOCA 재관수 기간동안 Downcomer내에서는 다차원적인 유동 분포가 형성됨을 알 수 있다. 특히, 이러한 유동은 Downcomer의 원주방향 위치 및 수직 위치에 따라서 그 유동 양식이 매우 상이하였다. 따라서 안전해석코드에 사용되는 모델 및 상관식의 평가 및 검증을 위한 유용한 실험 data를 제공하고, 재관수 기간 동안 Downcomer내에서의 유동 현상에 대한 이해를 증진하기 위해서는 여러 원주 방향 및 수직 위치에서의 기포율 측정이 요구된다.

그림 2에서 보듯이, DVI 안전주입 성능평가 실험 장치에 사용될 감마선 밀도계는 다음과 같이 측정 위치의 다양성을 추구하는 방향으로 설계하였다.

- 두 개의 독립된 감마선원을 사용한다.
- 각 감마선원의 경우 16곳의 원주방향으로 감마선을 방출하도록 collimator 및 선원 용기를 설계하며, 선원으로부터 850mm 떨어진 곳에 16개의 감마선 검출기를 감마선이 입사되는 각 위치에 설치한다.
- 아래쪽에 위치하는 감마선원 및 16개의 검출기는 고온관 하부 위치(강수부 하단에서 2850mm 떨어진 높이)에 고정되도록 설치하며, 위쪽에 설치되는 감마선원 및 16개의 검출기는 고온관 상부에서 DVI Nozzle 하부까지 약 1854mm의 거리를 상하 이동이 가능하도록 설치한다.

2.3 감마선원 종류

감마선을 방출하는 방사성 동위원소는 여러 종류가 있다. 이 중 주어진 실험 조건에 적합한 감마

선원을 결정하는 데 있어서는, 감마선원이 다음과 같은 사항을 얼마나 만족하는지 고려하여야 한다.

(1) 유로 벽에 대한 감마선 투과율이 높아야 한다.

(2) 유로 내부의 물의 용적에 대한 민감도가 높아야 한다.

(3) 감마선원의 반감기가 길어야 한다.

(4) 원하는 에너지의 감마선에 대한 방출율이 높아야 한다.

(5) 가격이 저렴해야 하며 쉽게 구입할 수 있어야 한다.

방출되는 감마선의 에너지가 낮을 수록 유로 벽의 투과율은 낮은 반면 물에 대한 민감도는 높다. 따라서 유로 벽이 두껍고 감마선이 유로 내부를 투과하는 거리가 큰 경우에는 비교적 높은 에너지의 감마선을 선택하는 것이 바람직하고, 감마선의 유로 투과거리가 작은 소규모 실험 장치에서는 낮은 에너저의 감마선을 선택하는 것이 실험 비용 및 실험 data의 건전성 측면에서 바람직하다. 또한 원하는 감마선의 방출비가 낮을 수록 선원 강도는 증가하여야 하고, 이에 따라 제작 비용 및 차폐 요건이 강화되기 때문에 원하는 감마선의 방출비는 높을 수록 좋다.

일반적으로 많이 사용되는 감마선원에 대한 특성을 표 1에 제시하였다. DVI 안전주입 성능평가 실험 장치의 경우, 스테인레스 스틸 재질인 Downcomer 벽면은 두께는 32mm이며 Downcomer Annulus의 gap size는 51.5mm로써 유로 벽 두께 및 감마선의 유로내부 투과거리가 크다. 따라서 DVI 안전주입 성능평가 실험 장치의 감마선 밀도계의 경우, 수백 keV정도 에너지의 감마선을 방출하는 선원을 사용하는 것이 바람직하다. 감마선원의 우선도는 방출되는 감마선 에너지만을 고려하면 Barium-133, Cesuim-137, Cobalt-60의 순서가 되지만, 방출비율 및 국내 제작 가능성을 고려하여 Cobalt-60을 감마선 밀도계에 사용되는 감마선원으로 결정하였다.

감마선의 물에 대한 민감도는 다음과 같이 정의되며, Cobalt-60을 사용할 경우 약 0.3의 민감도를 얻을 수 있다. 참고로 Chan & Banerjee[1]는 외경이 19.05mm이고 두께가 0.864mm인 Zircaloy-2 튜브에서의 기포율을 측정하기 위하여 Cobalt-57 감마선원을 사용하였으며, 이 때 물에 대한 민감도는 약 0.24였다.

$$S = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{(I_{\max} + I_{\min})/2} \qquad (4)$$

여기서 I는 검출기에 입사되는 감마선의 세기(intensity)이고, 아래 첨자 max와 min은 각각 기포율이 최소인 조건과 최고인 조건을 나타낸다.

표 1 감마선원 별 특성

Isotope	Half-life	Principal Photon Energy (keV)	Emission Rate (%)
Americium-241	433 yr	59.5	35.3
Barium-133	10.8 yr	356.0	61.5
Cesium-137	30.1 yr	662.0	85.1
Cobalt-57	270.5 d	122.0	85.2
Cobalt-60	5.27 yr	1173.0 1333.0	99.86 99.98

2.4 감마선원 강도(Activity)

식 (3)에서 보듯이 Downcomer Annulus내부의 기포율은 검출기에 입사된 감마선 세기의 변화비로부터 결정되며, 입사 감마선의 세기는 주어진 시간동안 검출기에서 계수된 감마선의 갯수로부터 얻게된다. 감마선 계측실험에서 불확실도 전파에 의한 식 (3)의 기포율의 통계적 오차는 다음과 같다[6].

$$\Delta a = \left[\left(\frac{\partial a}{\partial I} \right)^2 (\Delta I)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial I_g} \right)^2 (\Delta I_g)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial I_f} \right)^2 (\Delta I_f)^2 \right]^{0.5}$$

$$= \frac{\Delta I / I}{\ln(I_g / I_f)} \{1 + (a-1)^2 + a^2\}^{0.5} \quad (5)$$

$$= \frac{\{1 + (a-1)^2 + a^2\}^{0.5}}{(m_f - m_g) d \sqrt{N}}$$

측정된 기포율의 통계적 오차를 최소화하기 위해서는 검출기에서 계수되는 감마선의 갯수를 최대화하여야 한다. 검출기에서 계수되는 감마선의 갯수는 (1) 검출기에 입사되는 감마선의 세기, (2) 감마선의 검출기 입사면적, (3) 계측 시간, 그리고 (4) 검출기의 감마선 계측효율과 같은 인자들에 의해 결정된다. 이 중 검출기의 계측 효율은 검출기 종류 및 제작사에 의해 결정되는 값이기 때문에, 감마선 세기는 기포율 측정시 요구되는 통계적 오차의 정도, 감마선 입사면적, 그리고 계측 시간에 의해 결정된다. 감마선 입사 면적 및 계측 시간은 감마선 밀도계의 공간적, 시간적 분해능을 결정하는 인자이기 때문에 실험의 목적에 맞도록 결정하여야 한다. 이와 같은 과정에 의해 요구되는 기포율 측정오차를 만족하기 위한 입사 감마선의 세기(I)가 결정되면, 이에 필요한 선원 강도(Activity)는 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$S = \frac{4\pi L^2}{3.7 \times 10^{10} h_s} I \exp\{\alpha m_g d + (1-\alpha) m_f d + 2 m_{wall} t_{wall}\} \quad (6)$$

여기서 감마선원 강도의 단위는 Ci이고, L과 h_s 는 각각 감마선원과 검출기간 거리와 선원의 감마선 방출 효율이다. 감마선원 강도계산을 위한 실험 조건을 표 2에 제시하였다. 표 2의 조건을 바탕으로 식 (5), (6)으로부터 구한 감마선원의 강도는 0.4 Ci였다. 표 3과 그림 3은 감마선 밀도계를 이용시 예상되는 기포율의 통계적 계측오차를 보여 준다.

표 2 감마선원 강도계산을 위한 실험 조건

감마선원	Co-60
감마선원 효율	2.0
입사 감마선에 대한 검출기 효율	0.75
검출기 직경	3 inch
검출기의 감마선 입사 면적	960.2 mm2
최소 계측 시간	1 sec
Downcomer Gap Size (d)	51.5 mm
Total Downcomer Wall Thichness	32.0 mm
감마선원과 검출기간 거리 (L)	850.0 mm
감마선원 사용 기간	5 yr
기포율의 최대 통계적 절대 측정 오차	0.008
기포율의 최대 통계적 상대 측정 오차	4% (above α>0.2)
감마선원 강도	0.4 Ci

표 3 기포율에 따른 통계적 상대 측정 오차

기포율	현재 0.4Ci	1년 후 0.35Ci	2년 후 0.31Ci	3년 후 0.27Ci	4년 후 0.24Ci	5년 후 0.21Ci
0.1	6.13	6.55	6.99	7.47	7.98	8.52
0.2	2.90	3.09	3.30	3.53	3.77	4.02

0.3	1.84	1.97	2.10	2.24	2.40	2.56
0.4	1.33	1.42	1.52	1.62	1.73	1.85
0.5	1.04	1.11	1.19	1.27	1.35	1.45
0.6	0.86	0.92	0.98	1.05	1.12	1.19
0.7	0.74	0.79	0.84	0.90	0.96	1.03
0.8	0.66	0.70	0.75	0.80	0.85	0.91
0.9	0.60	0.64	0.68	0.73	0.78	0.83
1.0	0.55	0.59	0.63	0.67	0.72	0.77

2.5 섬광 검출기

방사선이 입사되어 섬광 물질에 흡수되면 아주 짧은 시간 (약 1 μsec 이하)동안 섬광을 발생시킨다. 발생된 섬광은 광증배관(Photo Multiplier Tube; PMT)을 통하여 전기적인 신호로 변환되어 입사된 감마선을 계수하게 된다.

검출기에 사용되는 섬광체의 선택은 감마선 밀도계의 구성에 있어서 또 하나의 중요한 단계이다. 고려해야 할 가장 중요한 변수는 입사된 감마선에 대한 검출 효율과 감마선 검출시 발생되는 섬광의 decay 상수이다. 섬광체의 검출 효율이 높을 수록 요구되는 선원 강도 및 차폐 요건을 감소시킬 수 있기 때문에 바람직하며, 입사 감마선이 많은 경우 검출기를 통해 생성되는 펄스의 중첩을 방지하기 위해서는 decay 상수가 짧은 것이 바람직하다.

표 4에 많이 사용되고 있는 섬광체의 주요 특성을 요약하였다. 이 중 검출 효율은 Radiation Length가 짧을 수록 좋아지며, 전자회로의 신호 처리를 쉽게 하기 위해서는 Photons/MeV의 값이 클수록 유리하다. Decay 상수는 GSO, NaI(Tl), BGO, BaF2의 순서이며, 검출 효율은 GSO, BGO, BaF_2, NaI(Tl)의 순서로 좋은 특성을 나타내고 있다. GSO의 경우 다른 섬광체에 비하여 구입 가격이 수십배 이상 비싸기 때문에 32개의 검출기를 구성하는 데는 적합하지 않았다. DVI 안전주입 성능 평가 실험의 경우 단위 시간당 10^6에 가까운 감마선이 검출기에 입사하는 이유로 decay 상수 특성이 검출 효율 특성에 우선하는 변수가 된다. 이러한 점과 비용적인 측면을 고려하여 NaI(Tl) 검출기를 사용하기로 결정하였다. NaI(Tl) 검출기의 섬광체 결정은 직경 3", 두께 3"의 실린더 형태이며 감마선 입사면의 반대편에 직경 3"의 PMT가 부착되어 있고 외부는 Al housing되어있다. 제작사는 미국의 BICRON이다. 감마선 검출시 PMT에서 발생되는 신호는 rise time이 2.1nsec, 펄스 폭(FWHM)이 3.2nsec, transit time이 38nsec로써 NaI(Tl) 섬광체를 사용한 감마선 계측에 우수한 특성을 보인다.

표 4 섬광체의 주요 특성 비교

섬광체	NaI(Tl)	CsI(Tl)	BGO	CdWO4	BaF2	GSO
밀도 (g/cm^3)	3.67	4.51	7.13	7.90	4.89	6.71
decay 상수 (nsec)	230	900	300	20000	630	60
Photons/MeV	40000	52000	8500	13000	12000	10000
Radiation Length (cm)	2.59	1.86	1.13	1.00	2.06	1.39

2.6 신호처리부

섬광 검출기에서 발생된 개개의 펄스는 pre-amplifier에서 증폭된 후 Discriminator(SCA)를 거쳐 계수기(counter)로 입력된다. Discirminator는 일정 level 이상의 원하는 감마선 신호만을 걸러내어 NIM logic 신호로 바꾸어 준다. DVI 실험에 사용되는 감마선 밀도계의 경우 검출기에 입사하는 감마선의 수가 매우 많기 때문에, 100MHz로 4 채널의 동시 계수가 가능하고 펄스의 분리인식 정확도가 10nsec 이하인 정밀한 계수기를 사용하도록 하였다.

3. 감마선 밀도계의 기본 성능 평가

3.1 모의 증기발생기 내의 2상 유체 밀도 측정 실험

DVI 안전 주입 성능평가 실험을 위한 감마선 밀도 측정기를 제작하기 전에 그 성능을 평가하기 위하여 기존의 감마선 계측장비를 이용한 2상 유체의 밀도 측정시험을 수행하였다.

3.1.1 실험 조건

Void Fraction 측정 실험을 수행하는 장치로는 한국원자력연구소 MMIS팀에서 운영하고 있는 가압 경수로형 원전의 증기발생기 내부의 Water level의 Swell 및 Shrinkage 현상 분석을 위한 Westinghouse 900MWe plant의 1/10 축소 모형 증기 발생기를 사용하였다. 원래 이 장치는 증기발생기의 증기덤프밸브의 개폐에 따라 Vessel 내부의 수위가 변하는 현상을 실험하기 위한 것으로서 초기 압력 25기압까지 가열이 가능하다.

밀도측정기는 Co-60 2mCi 선원, 3"×3" BGO 검출기, Amp, Counter로 구성하였으며 모델 증기발생기의 중간 높이에 설치하였다. 감마선이 지나가는 경로에는 1.75cm 두께의 철판으로 된 내경 62.54cm Container에 물과 증기로 된 2상 유체가 존재하게 되며, Container 외부는 보온재로 싸여있다. 철판의 두께가 상당하고 선원-검출기간의 거리가 약 90cm 가량 되므로 2mCi의 60Co 선원으로 측정할 수 있는 최대 정밀도는 1초간 측정의 경우 약 5% 이내로 추정할 수 있다.

그림 5는 실험에서 측정된 증기밸브 개폐 시의 압력 및 수위 변화이다. 증기밸브는 30초 주기로 개폐를 반복하였으며, 최초 4초간 완전히 닫힌 상태에서 대기한 후 14초 동안 2초 간격으로 15%씩 단계적으로 열어서 100%까지 열었다. 그 후 4초 동안 완전 개방한 후 나머지 6초 동안 밸브를 완전히 닫도록 하였다.

최초 조건은 압력 24기압의 포화수 상태로서 밀도는 약 0.82 g/cm3이다. 포화수 상태에서 증기밸브가 열리면 증기발생기 내부의 물에서는 Bulk Boiling 현상이 발생하여 2상 유체가 되며 밀도가 급격히 감소하므로 이 현상을 측정하는데 감마선 밀도측정기를 적용하여 실험을 수행하였다. 그림 6은 전술한 실험 조건에서의 감마선 밀도 측정 시험의 결과이다. 같은 시간에 측정된 수위와 감마선 계수값의 변화를 비교하면 예측한 바와 같이 강한 상관관계를 가짐을 알 수 있다. 감마선 계수값은 변환함수를 이용하여 밀도로 환산되며 그 결과는 다음 부분에서 설명하겠다.

3.1.2 실험 결과 및 평가

측정된 감마선 계수값을 밀도로 환산하기 위한 함수를 결정하기 위하여 알려진 밀도에서 측정을 수행하였다. 증기발생기 내부의 포화수는 상온 1기압에서의 밀도 0.99g/cm3에서 시작하여 24기압 220℃에서 0.841g/cm3까지 변화가 가능하므로 이 구간에서 측정값을 Reference로 하고, EGS4를 이용한 Simulation을 수행하여 변환함수를 얻었다. 그림 7은 위와 같은 방법으로 얻은 변환 함수를 그래프로 나타낸 것이며, 이를 이용하여 앞의 실험 결과를 밀도로 환산한 그래프를 그림 6에 나타내었다. 측정된 밀도 값의 오차는 5% 이내로 분석되었으며, 밀도 변화 측정치로부터 계산된 수위의 변화량이 측정된 수위의 변화량과 일치됨을 확인하였다.

실험의 결과는 방사선원의 강도가 최적값에 비하여 상당히 적음에도 불구하고 밀도측정기가 신뢰성이 있음을 보여 준다. 그러나 변환함수를 정확히 결정하기 위해서는 밀도 0-1g/cm3 전체 영역에서의 실험적 보정이 필수적이며, DVI 장치의 밀도측정기는 표준 시측 물체를 이용하여 전체 밀도 영역의 Calibration을 수행하여야 한다.

3.2 EGS4를 이용한 밀도 측정 Simulation

밀도 측정기 설계를 위한 준비 작업으로 고온 고압에서 물의 밀도 변화를 측정하는 실험을 수행하였으며 그 결과는 위에서 기술한 바와 같다. 이 절에서는 이 실험 결과를 검증하고 Simulation에 필요한 Geometry 프로그램의 정확도를 확인하기 위하여 EGS4를 사용한 Simulation을 수행한 결과에 대하여 기술한다. 그림 8은 실제 실험에 사용한 것과 동일한 용기의 일부분으로 EGS4 모의실험에 사용한 기하학적 구조를 나타내고 있다. 원통형 용기는 두께가 17.5mm의 철제 용기로서 내경이 62.5cm

이다. 방사선원은 2mCi 60Co을 사용하였으며 검출기는 직경과 높이가 각각 7.5cm인 BGO검출기를 사용하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 모두 8개의 영역으로 나누었으며 원통의 길이와 두 평면의 길이는 무한한 것으로 가정하였다.

방사선원으로부터 검출기로 향하는 방향을 z-축으로 하고 x-축은 종이의 상단에서 하단으로 향하는 방향을 취했으며 원점은 방사선원의 위치로 두었다. 따라서, y-축은 원점으로부터 종이 밑으로 향하는 방향이 된다. 방사선원의 차폐체는 반경이 10cm 이고 높이가 약 20cm인 원통형으로 납을 사용하여 제작한 것이다. 선원은 원통형 용기의 중심부에 위치하며 Collimator창은 두께가 6mm 이고 원점으로부터 양의 z-축, 원점으로부터 z-축과 30 ° 를 이루는 선분, 및 원통형 경계에서 내린 수직선분으로 둘러 쌓인 직각 삼각형이다.

증기발생기를 가열하여 물의 온도가 섭씨 230 ° 까지 되도록 한 다음 증기를 순간적으로 덤프하면 이 때 발생하는 Bulk Boiling에 의하여 생성되는 증기로 인하여 물의 밀도가 강하하게 된다. 이 같은 실험에 대한 Simulation으로 물의 밀도가 1.0, 0.95, 0.90, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70이 될 때의 각각에 대한 감마선 입자 500만개를 투과 시켰을 때 검출기에 도달한 입자의 수는 다음 표 5와 같다. 표 5의 결과는 실험결과와 유사한 값을 보이며, 최초 발생 입자의 수가 많을수록 정확한 예측을 보이게 된다.

표 5 EGS4를 이용한 감마선 밀도계의 simulation 결과

물의 밀도	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70
검출기에 도달한 입자의 수	1934	2178	2573	2935	3439	4113	4845

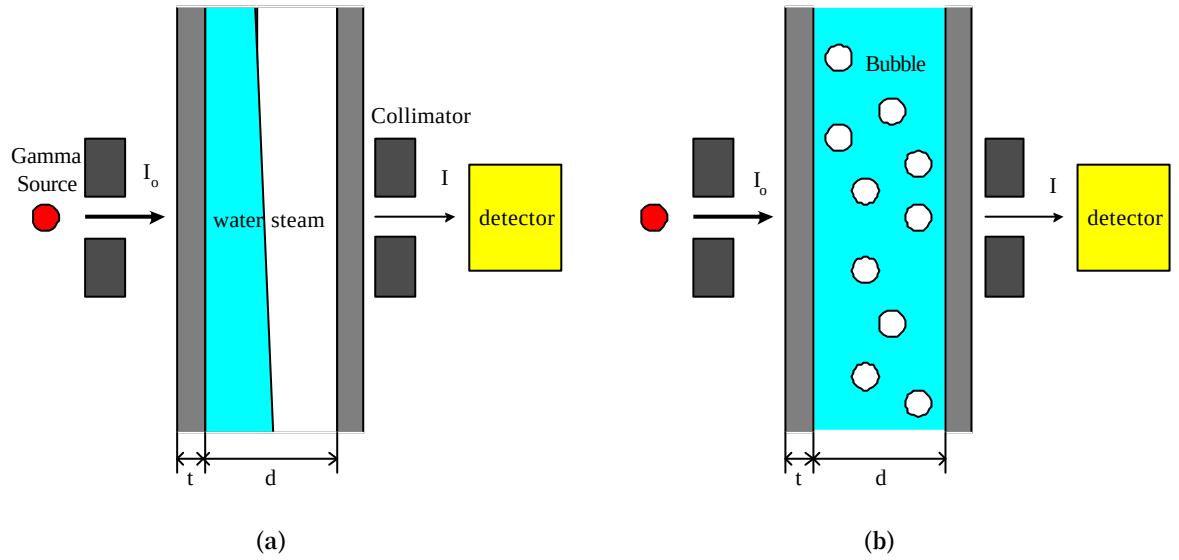
4. 결론 및 향후 추진계획

DVI 안전주입 성능평가 실험시 Downcomer Annulus에서의 유동 양식 해석을 위한 감마선 밀도계의 설계를 완료하였다. 32개의 감마선 검출기에 대한 신호 처리 계통과 자료 수집 및 제어 프로그램을 개발하였다. DVI 안전주입 성능평가 실험에 대한 감마선 밀도계의 적용 가능성을 살펴보기 위한 예비 실험을 수행하였으며, 실험 결과는 EGS4 코드를 이용한 simulation 결과와 잘 일치하였다.

실제적으로 감마선 밀도계를 DVI 안전주입 성능평가 실험에 적용하여 Downcomer에서의 유동 양식에 대한 실험 자료를 얻기 위해서는, DVI 안전주입 성능평가 실험 장치의 제작이 완료된 후 감마선 계수율 대 기포율의 변환을 위한 교정 절차를 실제 실험 환경에서 수행해야 한다.

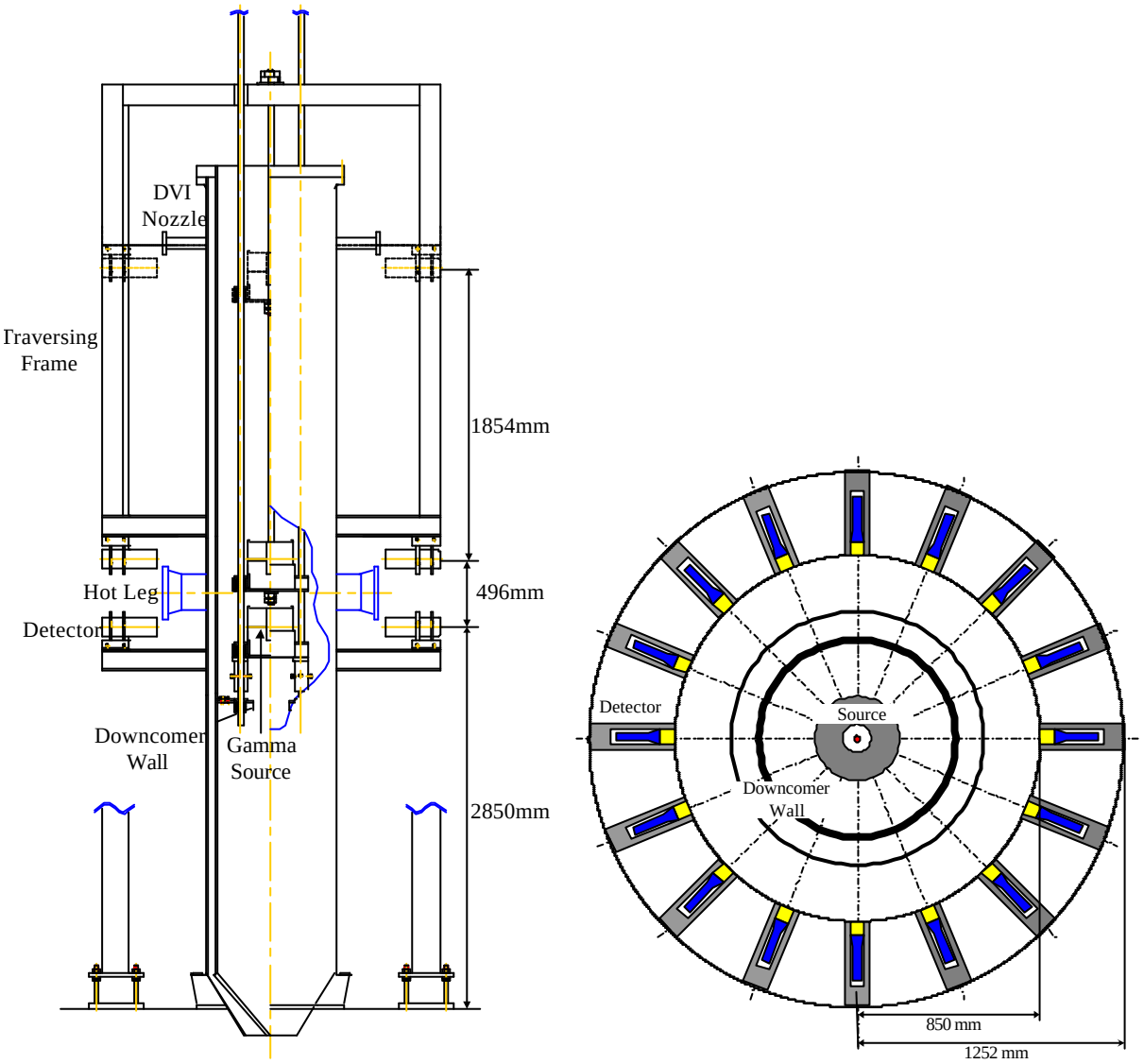
참고 문헌

1. A.M.C Chan and S. Banerjee, “Design apsects of gamma densitiometers for void fraction measurements in small scale two-phase flows,” *Nuclear Instruments and Methods*, vol.190, pp.135-148, 1981.
2. A.A. Kendoush, “A comparative study of the various nuclear radiations used for void fraction measurements,” *Nuclear Engineering and Design*, vol.137, pp.249-257, 1992.
3. T.K. Thiyagarajan, et al., “Gamma-ray attenuation method for void fraction measurement in fluctuating two-phase liquid metal flows,” *Meas. Sci. Technol*., vol.2, pp.69-74, 1991.
4. Y. Jiang and K.S. Rezkallah, “An experimental study of the suitability of using a gamma densitometer for void fraction measurements in gas-liquid flow in a small diameter tube,” *Meas. Sci. Technol*., vol.4, pp.496-505, 1993.
5. B.J. Yun, et al., “**차세대원자로 대형냉각재 손실사고 발생시 재관수기간동안 강수부내 수력현상에 관한 실험적 고찰**,” 2000 **춘계학술발표회 논문집한국원자력학회**, **고리**, 2000.
6. S. Banerjee and R.T. Lahey, Jr., in: Advances in Nuclear Science and Technology, Edited by J. Lewins and M. Bechker, Plenum press, New York, vol.13, p.227, 1981.



(a) (b)

그림 1 감마선 감쇄에 의한 2상 유동 기포율 측정 방법의 개략도



(a) **정면도** (b) **평면도**

그림 2 강수부 주변 감마선원 및 검출기 설치 개략도

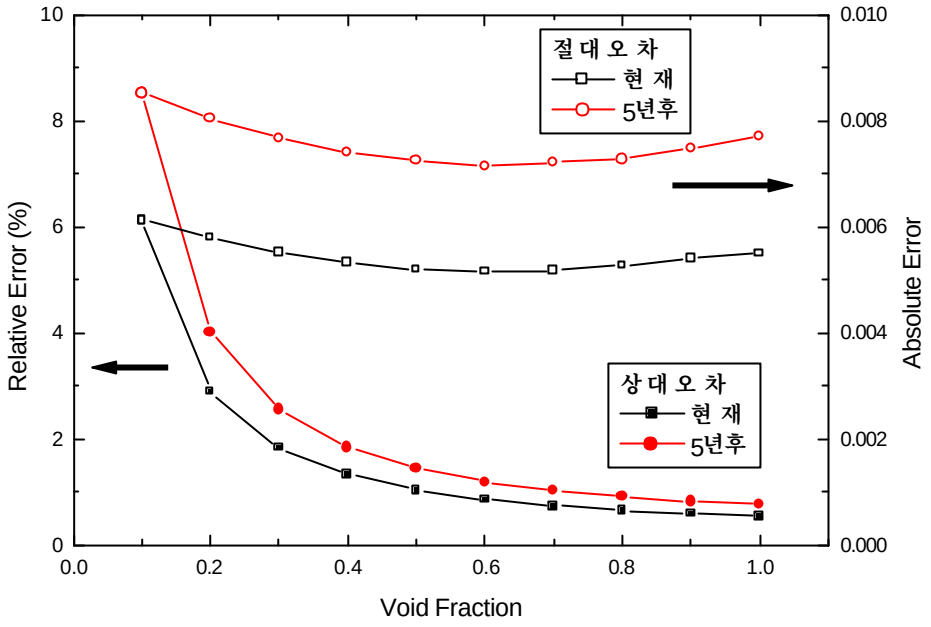


그림 3 예상되는 기포율 측정 오차

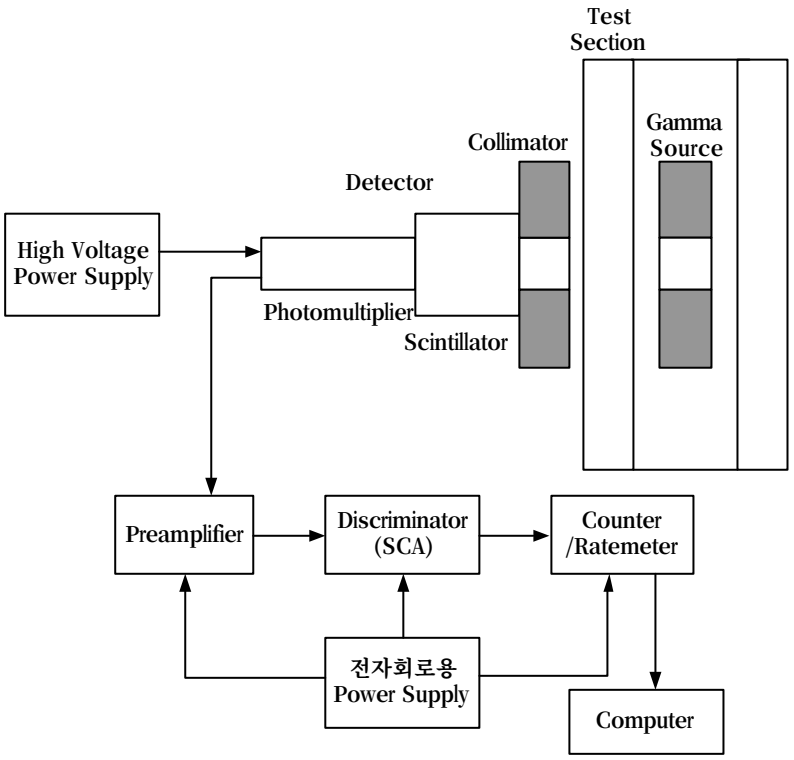


그림 4 감마선 밀도계의 신호 처리

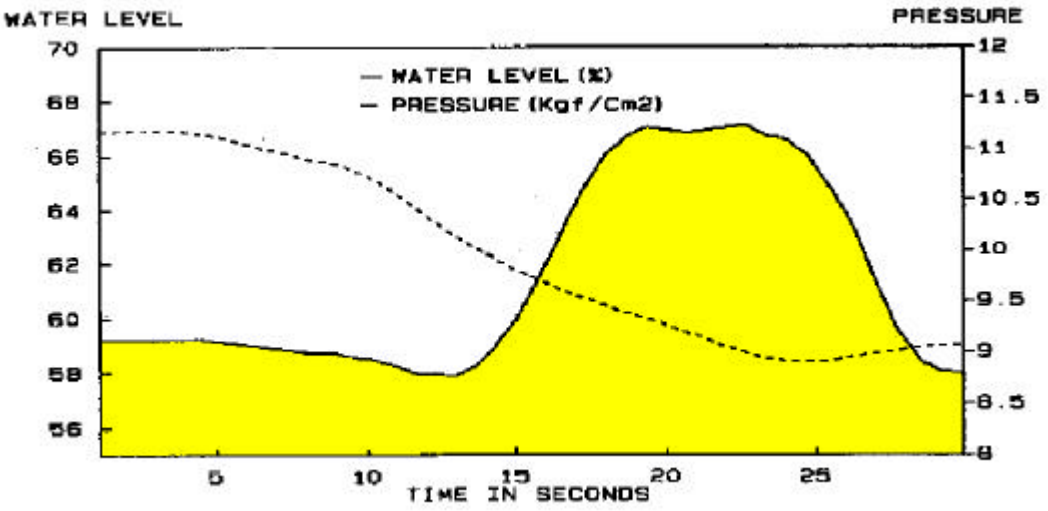


그림 5 증기 밸브의 개폐에 따른 압력 및 수위 변화

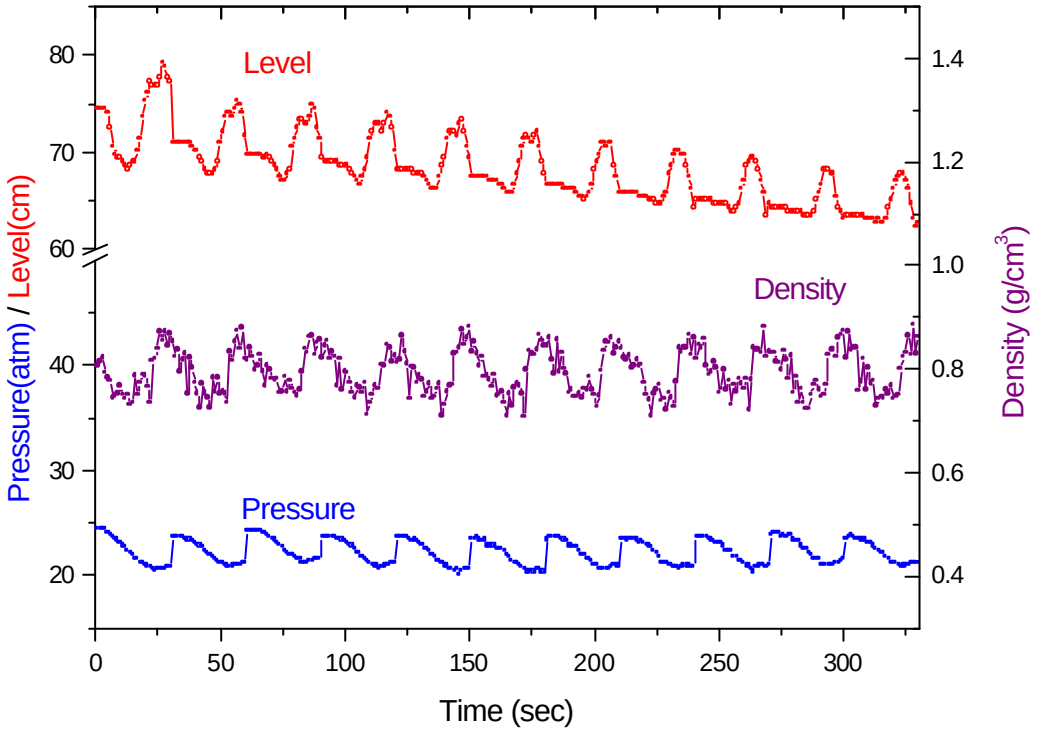


그림 6 증기발생기 내부의 수위 및 밀도 변화

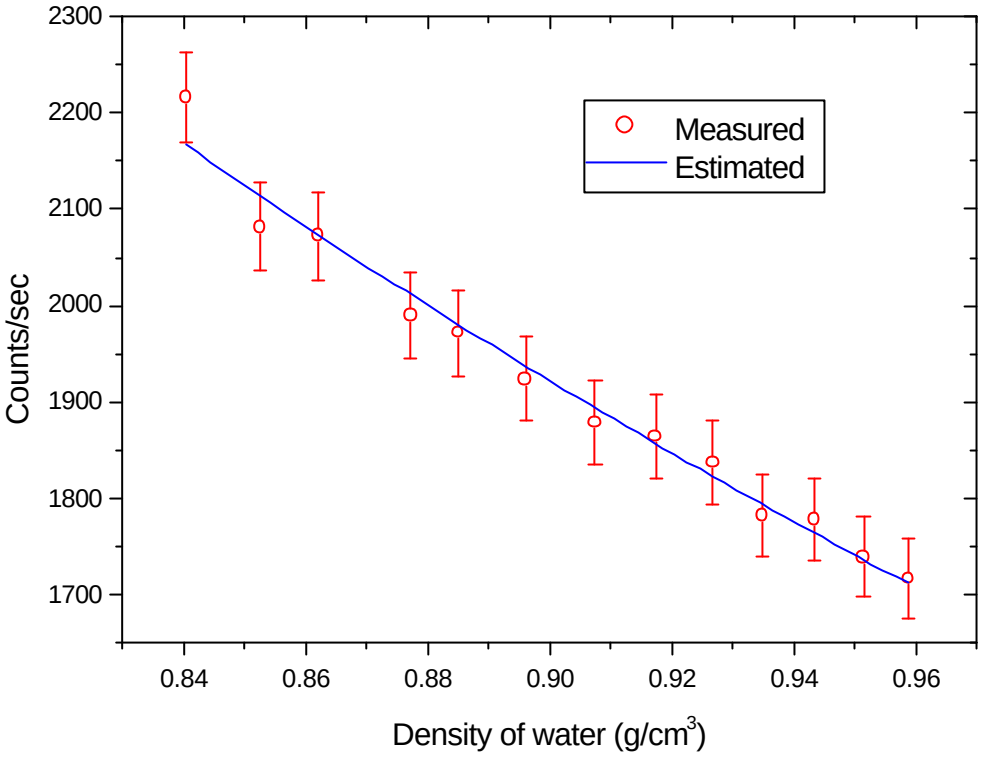


그림 7 감마선 측정값 대 2상 유동 밀도값의 변환

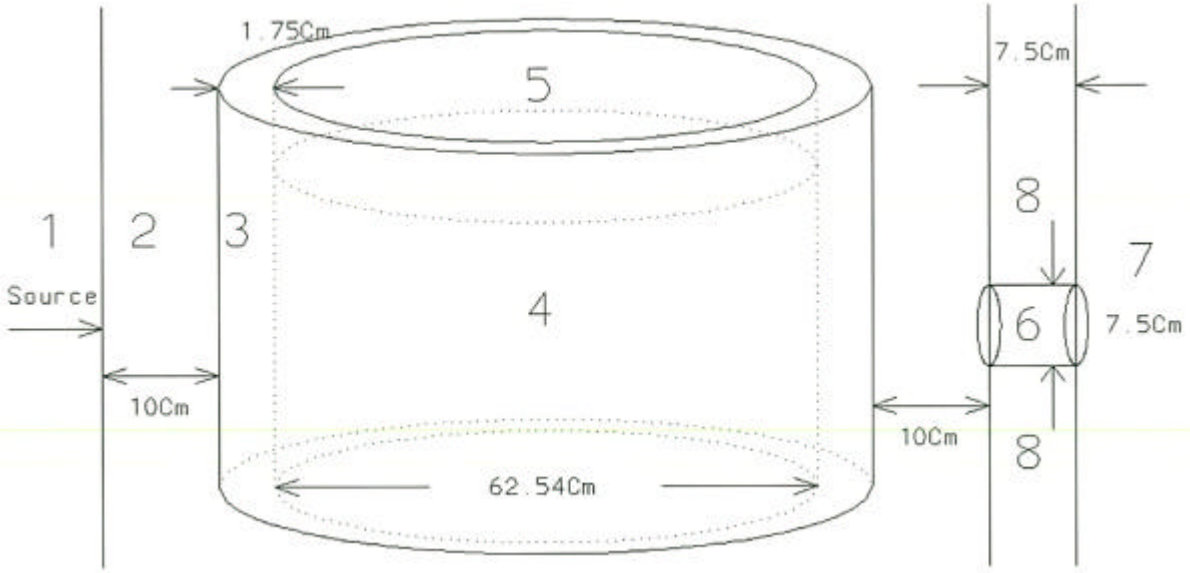


그림 8 EGS4를 이용한 밀도 측정 Simulation

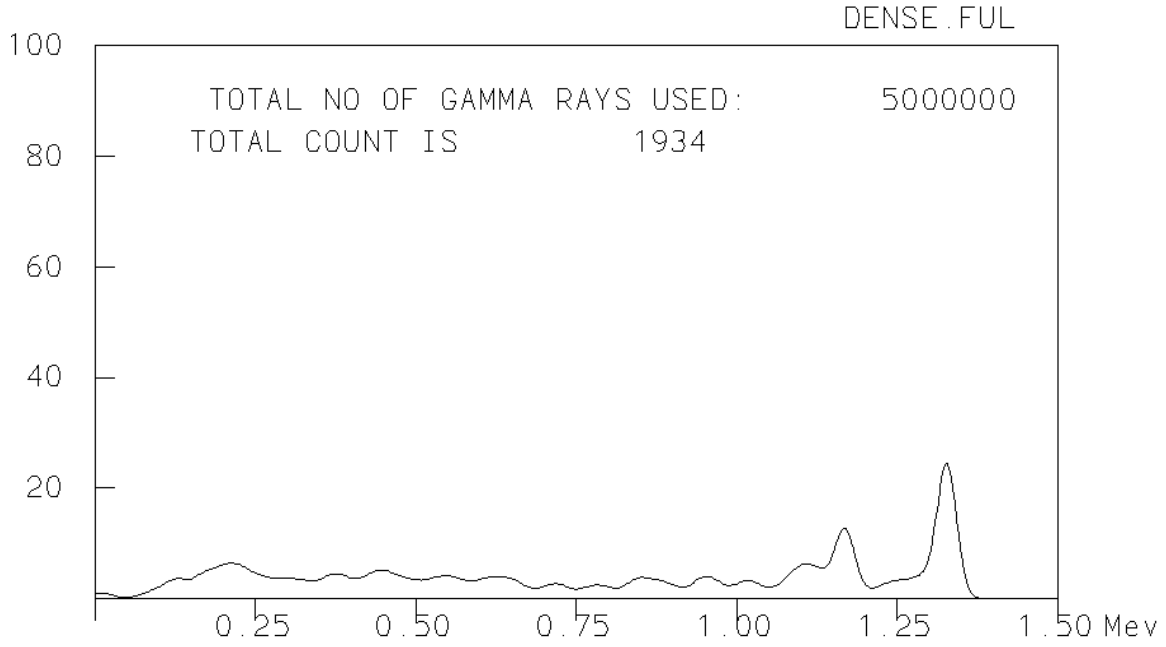


그림 9 물의 밀도 1.0에서의 감마선 투과량

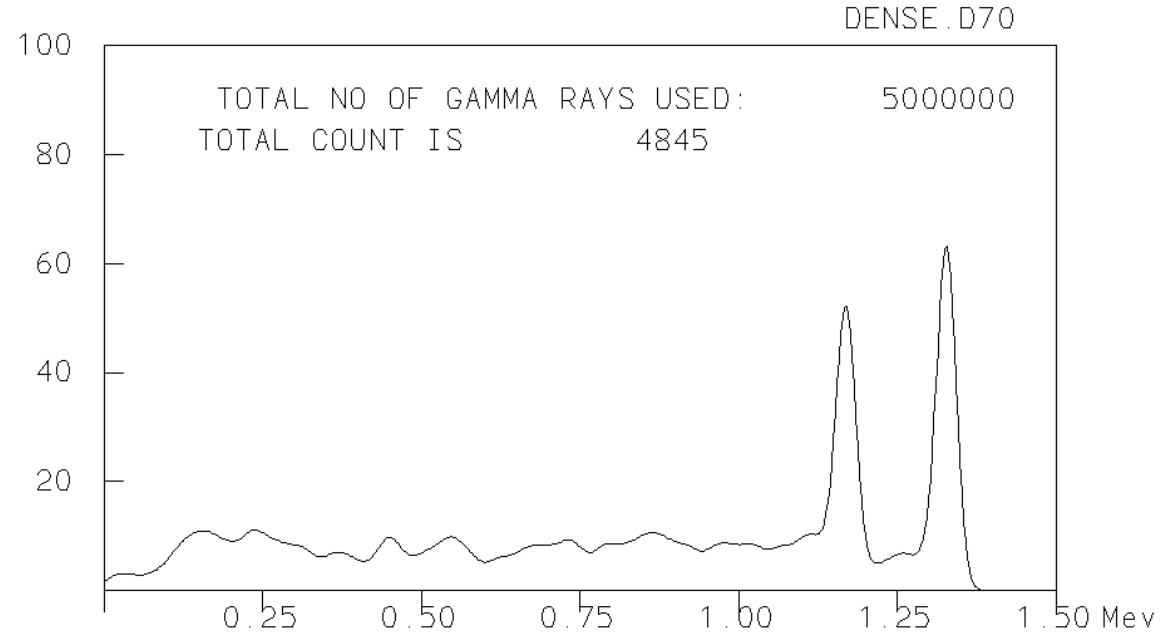


그림 10 물의 밀도 0.7에서의 감마선 투과량