투과 감마선 계측신호의 Cross correlation 기법 적용에 의한 다중상 유체의 유량측정

김진섭, 정성희, 김종범, 김재호, 이나영
한국원자력연구원 동위원소이용기술개발부

2007년 12월 17일 접수 / 2008년 2월 20일 채택

석유 및 정유관련 산업에서 다중상(multi-phase flow) 유체의 배관 내 흐름은 일반적인 현상의 하나이다. 그러나 각각의 상에 대한 정확한 유량측정은 항상 정확한 결과획득을 얻는데 장애의 근원으로 작용하였다. 일반 상업용 유량계는 일정 이상의 기포가 포함된 유체 흐름의 경우 유량계측에 상당한 오차를 유발한다. 본 연구에서는 γ-ray attenuation 기법을 이용하여 clamp-on 타입으로 배관 외부에서 다중상 유체흐름의 유량 측정을 수행하였다. 사용된 밀봉 감마선원으로는 ^{137}Cs 20 mCi와 17 mCi 두개의 동위원소를 사용하였으며, 감마선 검출기로는 2″×2″ NaI(Tl) 섬광계수관을 이용하였다. 방사선 검출기로부터 데이터를 수집하고 각각의 데이터에 대해 푸리에 변환과 필터링을 통해 노이즈를 최소화하였다. 복원된 신호에 대해 상호상관함수(cross correlation function)를 적용하여 두 검출기 사이의 통과시간(transit time)을 측정함으로써 유량을 산정하였다. 배관 내 기포함량 측정을 통해 유량을 보정해줌으로써 측정유량의 정확도를 높였다. 두 선원간의 거리가 4D(D; inner diameter) 분리된 실험의 측정조건(N/S: 0.12~0.15, sampling time: 4 msec) 하에서 기포량(단면적 대비 6.1 %~9.2 %) 보정을 통해 산정된 유량은 계측오차가 실제 평균유량 대비 1.7 % 이하의 정확도를 보였다. 또한 두 밀봉 감마선원 간의 거리가 가까울수록 통과시간 측정에 정확도가 향상되므로 보다 정확한 유량측정이 가능하였다. 본 연구를 통해 다중상 혼합유체의 유량을 밀봉감마선원과 상호상관 기법으로 이용하여 계측할 수 있음을 확인하였다. 방사성동위원소의 선택 및 계측시스템의 최적화 조건 등에 대한 추가 연구가 수행된다면 석유화학 산업과 같은 장치산업의 유지관리 측면에 경제적으로 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

중심어 : 밀봉감마선원, 상호상관, 다중상 배관, 푸리에 변환, 산업공정진단, 유량계 보정

1. 서론

다중상 유체(multi-phase flow)의 배관 내 흐름은 석유 및 정유 관련 산업에서 일반적인 현상의 하나로써, 각각의 상에 대한 정확한 유량측정은 공정 엔지니어에게 해결해야 하는 문제로 남아있다. 다중상 유체의 유량측정에 대한 전통적인 방법은 혼합유체를 각각으로 분리한 후 단일 상(single-phase)에 대해 유량을 측정하는 방식이다. 이의 전형적인 예가 해저 원유시추의 경우로서 배관 내에 원유-물-가스의 혼합상태로 시추되고, 이들은 각각 상분리를 거쳐 터빈유량계와 오리리스 판(orifice plate)을 이용하여 각 상에 대한 유량을 측정한다. 하지만 이와 같은 방법은 유량측정에 많은 경비가 소요되고, 시추 종료 후 유량을 측정하게 되므로 많은 시간이 소요되는 불편한 단점이 있다. 또한 석유화학 및 정유공장에서 수적으로 가장 많은 설비 중의 하나인 증류탑과 같은 공정은 분별 증류로 원유를 분리하는 시설로써, 이와 연결된 유체이송 배관은 기체상과 액체상이 동시에 유출될 확률이 높다. 하지만 control room에서의 모니터링 유량계는 유체를 위주로 측정하는 초음파 유속계를 주로 사용하므로, 생산품의 유량측정에 상당한 오차가 발생될 가능성이 있다. 이는 곧 고부가가치 생산품에 대한 부정확한 계량으로 유지관리뿐만 아니라 경제적 이익에 막대한 영향을 미치게 된다.

현재 유량을 측정하는 방법은 면적식, 차압식, 터빈식, veturi 식, magnetic 식 그리고 질량유량계식 등 다양하다. 하지만 이와 같은 타입의 유량계는 대부분 배관을 분리한 후 그 사이에 유량계를 연결하는 방식을 주로 사용한다. 한편 공정을 멈추지 않고 배관 외부에 clamp-on 타입으로 설치하고 상호상관법(cross correlation)을 이용하여 내부 유량을 산정하는 방식인 초음파 유량계의 개발을 위해 많은 연구가 수행되고 있다[1-5]. 그러나 초음파 유량계는 배관 내부에 기포가 일정량 이상 존재할 경우(multi-phase flow) 측정 정확도가 현저하게 떨어지는 경향이 있다.

석유산업에서의 다중상 유체의 유량측정은 1980년대부터 관심의 대상이 되어 많은 연구가 선진국을 중심으로 수행되었으며, 현재 산업적 환경에서 적용 가능한 3상(three phase) 측정 유량계의 개발에 근접하였다[6]. 이들 개발유량

책임저자 : 정성희, shjung3@kaeri.re.kr, 한국원자력연구원
대전 유성구 덕진동 150번지

계는 각 상에 대한 유량측정 오차가 ±5% 이하의 정확도를 보인다[7]. 그러나 유량계로서의 모든 필요조건을 충족시키고 상업적 서비스가 가능한 3상 유량계는 현재까지는 없다. 따라서 3상 유량계의 개발은 여전히 해결되어야 하는 대상이며, 영국의 경우에는 UK Measurement Foresight programe(DTI)을 통해 전략적 연구분야로 프로젝트가 추진되고 있다[8]. 다중상 유체에 대해서 각 상의 분율(volume fraction)을 측정하는 일반적인 방법으로는 γ-ray attenuation과 electrical impedance technology가 있다. 이 외에도 산업적 적용을 위해 개발된 microwave attenuation, phase shift, pulsed neutron activation(PNA), nuclear magnetic resonance(NMR) 그리고 pulsed ultrasonic 방법 등이 있다. 이 중 밀봉감마선원을 이용하는 γ-ray attenuation 방법은 배관의 분리 없이 외부에서 측정가능하며, 다중상 유체에서 각 상의 측정가능 부피 분율(void fraction)에 제한이 없고 상대적으로 다른 기술에 비해 경제적인 장점이 있어 각광을 받고 있다[8].

다중상 유체이송 배관 내 유속 및 유량을 측정하기 위해 Leszek Petryka가 밀봉감마선원과 상호상관기법을 적용한 바 있다[9, 10]. 국내에는 관련 연구가 아직 수행되지 않았으며, 다만 밀봉감마선원을 이용하여 배관 내 부식정도와 내부 침적물 유무확인을 위해 연구를 시도한 적이 있다[11, 12]. 따라서 본 연구에서는 다중상 유체 이송배관 내 유량을 측정하기 위하여, γ-ray attenuation 방법과 cross correlation을 이용하여 기포와 물이 혼재된 2상 유체(two-phase flow)에 대해 유량을 측정하였다. 또한 기포의 분율(void fraction)을 고려하여 측정유량을 보정해줌으로써 보다 정확한 유량계측이 가능하도록 하였다.

2. 재료 및 실험방법

액상/기상 혼합유체의 배관 내 흐름을 구현하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험장치를 제작하였다. 실험배관은 내부가 육안으로 구별이 가능하도록 투명한 아크릴 재질을 사용하였고(ID. 8 cm, L=3.5 m, t=10 mm), 다중상 유체이송 배관을 모사하기 위해 비활성 압축 질소가스의 연속 혹은 간헐적인 주입이 가능하도록 솔레노이드 밸브를 이용하였다. 또한 배관 내 유량공급을 위해 pump(pu-2300m)를 사용하였으며 상용유량계를 통한 유량비교를 위해 전 · 후단 5D(D; inner diameter of pipe)의 직선구간을 확보한 후, F사의 시제품 터빈유량계(KOT-F-B-T; ±0.8 %)를 설치하였다. 그리고 유량계 후단에 In-line mixer를 설치하여 기포와 유체의 균일한 혼합이 이루어지도록 하였다. 실험장치의 최 하단에는 본 실험을 통해 계산된 유량과 비교 검증을 위해 배출수를 일정량 담아 직접 유량을 측정할 수 있도록 눈금이 표시된 PVC 탱크(5m^3)를 준비하였다.

밀봉 감마선원으로는 ^{137}Cs (E=0.662 MeV, Γ factor=0.326 $R \cdot h^{-1} \cdot m^2 \cdot Ci^{-1}$) 20 mCi와 17 mCi 두개의 동위원소를 사용하였으며, 이는 각각 lead collimation depth와 aperture가 4.5cm와 5mm이었다. 감마선 검출기로는 2″×2″ NaI(Tl) 섬광계수관(Eberline, SP-3)을 이용하였고, 이 또한 lead shield depth와 aperture를 4.5 cm와 5 mm를 유지하였다. 두 선원간의 거리와 선원과 검출기 사이의 거리는 임의로 조절 가능하도록 설계하였으며, In-line mixer 후단에 추가적인 방사선 검출기를 설치함으로써 균일 혼합유체의 방사선량 계측이 가능하도록 하였다.

감마선검출기는 방사선 검출부(detector)에 고전압을 공

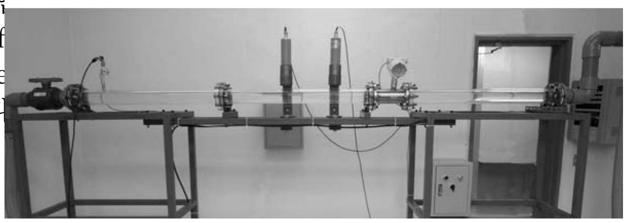


Fig. 1. Experimental set-up for sealed gamma radioisotope application to the measurements of velocity in a multi-phase flow.

급함과 동시에 검출부로부터 나온 analogue pulse를 방사선 계수기가 인식할 수 있도록 TTL Pulse로 변환시키는 회로이다. 또한 방사선계수기는 방사선 계측기에서 나온 TTL pulse를 각 채널 별로 계수하여 PC로 전송하는 기능을 하는 장치로서, 최대 24채널까지 확장될수 있는 데이터 수집장치(KTG-DL1, 한국원자력연구원)이다. 본 실험을 위해서는 이중 3개의 채널을 사용하였다. 또한 계측된 감마선량의 실시간 계수(counting)를 위해 32-Bit counter/timer(NI PXI-6602, max frequency: 80MHz)를 사용하였으며, 이의 PC 컨트롤을 위해 MXI-4 Kit(NI PXI-PCI8331)를 이용하였다.

감마선 계측신호의 고속처리를 위해 National Instrument

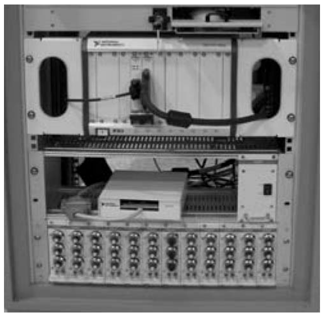
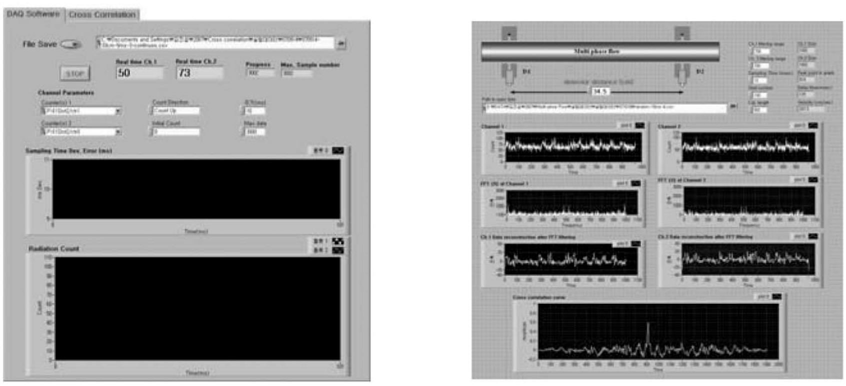


Fig. 2. Data acquisition system(max. 24ch) with 32-Bit counter/timer (NI PXI-6602, max frequency: 80MHz) and MXI-4 Kit(NI PXI-PCI8331).

사의 그래픽 언어인 LabVIEW 8을 사용하여 전용 데이터 수집 software(Fig. 3(a))를 작성하였다. 또한 획득한 데이터에 상호상관함수(cross correlation function)와 푸리에변환(Fourier transform) 그리고 필터를 적용하여 배관 내 유속을 측정하기 위해 velocity measurement software(Fig. 3(b))를 작성하였다. 이는 일정 시간 동안 데이터를 수집한 후 종료 시점과 동시에 상호상관에 의해 유속을 측정할 수 있는 특징을 가지고 있다.



(a) (b)

Fig. 3. LabVIEW application software for (a) Radiation data measurement and acquisition in the multi-phase flow pipe inspection (b) Calculation of multi-phase flow rate with the cross-correlation algorithm and FFT signal filtering.

실험은 두개의 방사선 검출기로부터 데이터를 수집하고 각각의 데이터에 대해 푸리에 변환을 한 후, Low-pass filter를 통해 필터링을 함으로써 신호에 대한 노이즈의 영향을 최소화하였다. 또한 필터링된 데이터에 대해 푸리에 역변환을 시킴으로써 신호를 복원하고, 이에 상호상관기법을 적용함으로써 두 검출기 사이의 통과시간을 측정하였다. 이후 계산된 통과시간을 이용하여 다중상 유체의 유속과 유량을 산정하고, 배관 내 기포량 측정(void fraction)을 통해 유량을 보정함으로써 보다 정확한 유량측정이 가능하도록 하였다.

방사성동위원소에 의한 방사선 피폭을 최소화하기 위해 차폐성능이 우수한 방사선실험실에서 실험을 수행하였으며, 차폐성능이 우수한 텅스텐을 이용하여 산란감마선을 차폐하였다. 또한 데이터 수집을 위한 industrial PC의 조작은 실험장치가 설치되어 있는 실험실 외부에서 수행함으로써 방사선 피폭을 최소화하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 분석 원리

3.1.1 다중상 유체의 통과시간 측정 (Transit time measurement)

방사선 검출기를 통해 측정한 감마선원의 신호는 일정 시간 동안 계수한 방사선량에 해당하며, 이 값에는 자연방사선량(background counts)과 노이즈에 대한 영향이 포함되어 있다. 따라서 이를 보정하기 위하여 자연방사선량 보정(background correction)을 수행하였다. 이를 선형 시불변 시스템(linear time invariant) 조건 하에서 이산 푸리에변환(Discrete Fourier Transform)을 통해 신호를 시간영역에서 주파수 영역으로 변환하고 저주파통과 필터(Low-pass Filter)를 적용하여 노이즈에 의한 영향을 최소화한 후, 역 이산 푸리에 변환(Inverse Discrete Fourier Transform)을 통해 신호를 복원하였다. N개의 이산신호 x_n(n=0,1,……,N-1)이 주어질 때 x_n의 이산 푸리에 변환과 역 이산 푸리에변환은 다음과 같이 정의된다[13].

Fourier Transform $$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (1)$$

Inverse Transform $$x_k = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} X_k e^{j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (2)$$

여기서 x_n은 시간영역에서의 n번째의 신호를 의미하며, X_k은 주파수 영역에서 k번째 신호를 나타낸다. 또한 N은 이산 신호의 총 개수를, $j=\sqrt{-1}$를 각각 의미한다. 역 이산 푸리에 변환을 통해 복원된 신호는 두 검출기 사이의 통과시간 측정을 위해 상호상관 함수의 계산에 이용된다. 상관(correlation)은 두 신호 사이의 유사성을 측정하는 수단으로써, x(t)와 y(t)의 신호가 존재한다면 두 신호의 상호상관 함수는 다음과 같이 정의되어 나타낼 수 있다.

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t-\tau)dt \quad (3)$$

이때 x와 y가 같으면 자기상관(auto correlation)이며 다르면 상호상관(cross correlation)에 해당한다. 또한 상호상관과 자기상관의 상대적인 크기는 상관계수(correlation coefficient)로 특징지워질 수 있다[14].

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{R_{xy}(\tau)}{\sqrt{R_{xx}(0)R_{yy}(0)}} \quad (4)$$

ρ_{xy}는 상관계수, R_{xy}는 신호 x와 y의 상호상관 그리고 R_{xx}, R_{yy}는 각 신호에 대한 자기상관을 나타내며, τ는 상호상관 함수의 최대값에 해당되는 시간을 의미한다. 즉 식 (4)는 두개의 서로 다른 신호에서 상관계수가 가장 큰 값에 해당되는 τ시간만큼 한 신호에 시간지연(time delay)이 발생할 경우 서로가 가장 유사하게 됨을 의미한다. 만약 상관계수가 양의

값(ρ_{xy}>0)을 가진다면 신호 x(t)와 y(t)는 양의 상관관계(위상이 점차 같아짐)에 있다고 할 수 있고, 음의 값 (ρ_{xy}<0)을 가진다면 음의 상관관계(위상이 점차 틀려짐)에 있다고 할 수 있다. 또한 ρ_{xy}=0이면 신호 x(t)와 y(t)는 서로 관련이 없는 신호임을 나타낸다. 신호에 대한 상호상관 기법(cross correlation technique)은 다중상 유체의 유속측정에 자주 사용되었다[5]. 상관기법을 이용한 유속측정 원리를 아래 Fig. 4에 나타내었다. 두 개의 방사선검출기는 각각의 밀봉 감마선원의 배관을 투과한 후의 방사선량을 측정하기 위해 배관 위에 설치된다. 신호 x(t)와 y(t) 사이의 시간 지연(time delay)은 두 신호의 상호상관 함수(cross correlation fuction)를 계산함으로써 측정될 수 있다.

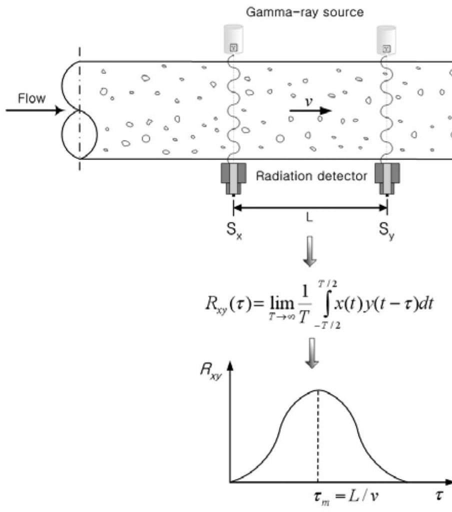


Fig. 4. The cross correlation principle of component velocity measurement in a multi-phase flow.

3.1.2 다중상 유체의 구성비율 측정(Component fraction measurement)

다중상 유체(multi-pahse flow)의 각 요소별 분율(component fraction)을 측정하기 위하여 감마선의 선형 감쇠계수(linear attenuation coefficient)를 이용하였다. 배관 내 유체가 균일하게 혼합되어 있다는 가정 하에, 혼합 선형 감쇠계수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mu_{mix} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \mu_i = \alpha_1\mu_1 + \alpha_2\mu_2 + \alpha_3\mu_3 + \ldots + \alpha_n\mu_n \quad (5)$$

배관 내 유체가 기포와 액체 두개의 요소로 혼합되어 있을 경우에는 위의 식은 다음과 같다.

$$\mu_{mix} = \mu_g\alpha_g + \mu_l\alpha_l \quad (6)$$

여기서 μ_{mix}은 혼합 유체의 선형 감쇠계수이며, μ_g과 μ_l은 기체와 액체의 선형 감쇠계수, α_g과 α_l은 기체와 액체의 각각의 부피 분율(volume fraction)을 의미한다. α_g+α_l=1과 배관 내부가 기체와 액체만으로 채워져 있을 경우 각각 α_l=0, α_g=0인 관계를 이용하면, 액체만으로 배관이 채워져 있을 경우의 투과 감마선량(I_l)과 기체배관의 투과 감마선량(I_g) 그리고 혼합유체의 투과 감마선량(I_{mix}) 측정값을 통해 배관 내 기포 분율을 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\alpha_g = \frac{\mu_{mix}-\mu_l}{\mu_g-\mu_l} = \frac{\ln\left[\frac{I_{mix}}{B_{mix}I_E}\right] - \ln\left[\frac{I_l}{B_lI_E}\right]}{\ln\left[\frac{I_g}{B_gI_E}\right] - \ln\left[\frac{I_l}{B_lI_l}\right]} \approx \frac{\ln(I_{mix})-\ln(I_l)}{\ln(I_g)-\ln(I_l)} = \ln\left[\frac{\frac{I_{mix}}{I_l}}{\frac{I_g}{I_l}}\right] \quad (7)$$

여기서 d는 배관의 내경을 의미하고, I_E는 빈 배관의 투과 감마선량을 나타낸다. 또한 B_{mix}와 B_l, B_g은 혼합유체와 액체 그리고 기체가 각각 채워져 있는 배관의 재생계수(build-up factor)을 의미한다. 위의 식들은 계측지점의 배관 두께와 투과거리가 동일하기 때문에 성립하는 식이다.

위의 식 (7)과 같은 결과는 기포 분율을 계산할 때, 각각의 재생계수가 거의 비슷한 값을 가질 것으로 가정한다. 이 같은 가정은 감마선원과 방사선 검출기의 조준(collimation)을 세밀하게 해주고 동일한 geometry를 유지하고 있기 때문에 가능하다. 위의 식은 고체/고체, 고체/기체, 액체/액체, 그리고 액체/기체의 혼합 시스템에도 적용가능하며, 기체/액체/고체가 공존하는 혼합유체의 경우에도 추가적인 하나의 투과 감마선량을 측정한다면 앞의 식 (7)은 3상(three pahse)로 쉽게 확장될 수 있다[15]. 본 연구에서는 균일한 혼합 조건에서의 I_{mix}을 산정하기 위하여 실험배관 하단부에 In-line mixer을 삽입하여 그 후단에서 혼합 배관 내 투과 감마선량을 측정하였다.

3.2 상호상관을 이용한 배관 내 유량측정

배관 내 기포의 존재유무가 유량계의 측정값에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보기 위하여, 배관 내부가 유체만 흐를 경우와 기포와 함께 다중상으로 흐를 경우인 두 가지 조건에 대해 각각 유량측정 실험을 수행하였다. 유량계는 상용 터빈 유량계(측정범위: 10~100 m^3/h, 측정오차: 0.8 %)를 사용하였으며, 실제 유량과 비교측정을 하기 위해서 배관 연결부 하단부에서 PVC 탱크를 이용해 실제 배출된 유체의 체적을 실측하였다. 기포와 혼합된 유량을 측정할 때는 배관 단면적 대비 약 10 %에 해당되는 공기량을 일정하게 유지하며 동시에 주입하였다. 기포가 없는 배관 내 유량값과 기포가 공존하는 유량측정값을 아래의 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다. 그래프에서 y축은 배관 하단부에서 실측한 유체의 체적이며, x축은 실험배관 상에 설치된 유량계 값을 읽은 수치이다. 또한 그래프 상의 오차 막대(error bar)는 유량계 값과 실측 값과의 차이를 단위 m^3/hr로 나타낸 결과이다.

실험결과 배관 내 기포가 없는 흐름의 경우 유량계의 측정오차가 실측값에 비해 최대 5.2 %이었으며(Fig. 5), 기포와 혼합된 다중상 흐름의 경우에는 최대오차가 22.9 %에 달했다

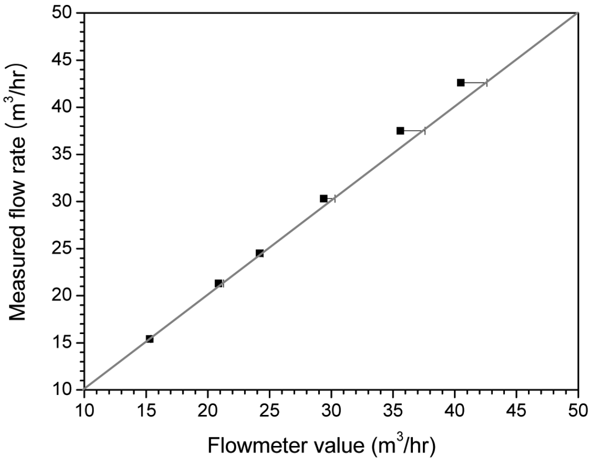


Fig. 5. Comparison of real flow rates measured at the end of pipeline using PVC tank with flowmeter values installed at the midway pipeline under the condition of single phase flow; only water

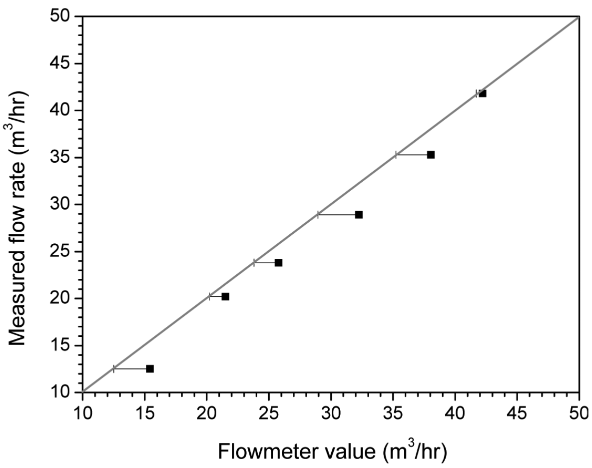


Fig. 6. Comparison of real flow rates measured at the end of pipeline using PVC tank with flowmeter values installed at the midway pipeline under the condition of two phase flow; water plus gas.

(Fig. 6). 또한 기포와 혼합된 배관흐름의 경우 유량계는 전 구간에 걸쳐 실제 유량보다 과대하게 산정하는 경향을 보였다. 이는 기포에 해당되는 양을 유량으로 산정하기 때문에 발생하는 현상으로, 일반유량계를 다중상 유체에 적용할 경우 배관 내 유량측정에 상당한 오차를 유발시키고 경제적으로도 큰 손실을 초래할 수 있음을 알 수 있다.

본 연구의 목적에 따라 다중상 배관의 기포분율을 고려하여 유량계측을 하기 위해 밀봉동위원소를 이용한 유량측정 실험을 수행하였다. 실험장치를 Fig. 1과 같이 설치하고 두 선원 간의 거리는 L=4D(4×8 cm)를 유지하였다. 또한 신호수집을 위한 sampling time은 4 msec으로 총 17 sec 동안 4,250개의 데이터를 매 실험 마다 수집하였으며, 본 실험조건에서 신호의 N/S 비(Noise/Signal ratio)는 0.12~0.15의 상태를 유지하였다. 방사선검출기 위치 X와 Y에서 각각 수집된 신호 S_x와 S_y에 대해 상호상관함수를 적용한 결과 중 한 예를 아래의 Fig.7에 나타내었다. 두개의 방사선검출기로부터 신호 S_x와 S_y를 일정 시간 차이로 각각 얻었다(Fig. 7(a)). 이에 대해 필터링을 한 후 상호상관함수를 적용하여 두 신호간의 시간적 위상차(delay time, τ_m)가 0.204 sec으로 계산되었으며 (Fig. 7(b)), 이 값을 신호 S_y에 적용하여 동일 시간대에 두 신호를 겹쳐서 Fig. 7(c)에 표시하였다. 본 실험조건에서 다중상 배관 내 유체의 유속은 4D/τ_m으로 156.9 cm/sec의 결과를 얻었으며, 배관 단면적을 고려하여 유량으로 환산하였다. 추가적으로 동일한 실험조건에서 6회 반복실험을 하여 아래의 Table 1에 나타내었다.

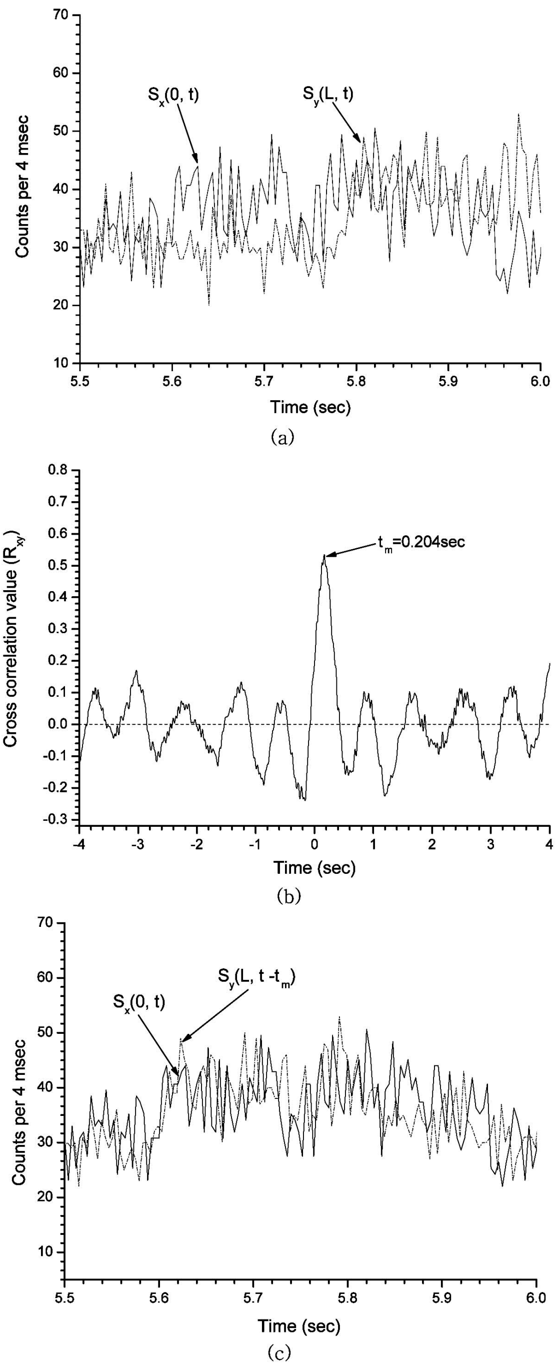


Fig. 7. (a) Example of radiation signals S_x, S_y received by NaI detector (1) and (2), respectively, during 17 sec; (b) Cross-correlation fuction R_{xy} formed with the two siganls S_x, S_y; (c) Superposition of the two signals S_x, S_y after shifting S_y by τ_m=0.204 sec;

다중상 배관 내 기포의 함량을 고려하기 위하여 유체가 없는 빈 배관과 유체만으로 채워져 있을 때의 방사선 투과량을 각각 측정하였다. 그리고 기포와 혼합된 유체에 대해 투과선량을 측정하기 위하여 In-line mixer 후단에서 추가측정을 하였다. 측정 데이터에 위의 식 (7)을 적용하여 각각의 기포분율(gas volume fraction)을 계산하였으며, 이를 아래의 Table 2에 나타내었다.

질소 가스의 배관 내 기포분율은 실험과정에서 약 6~8 %의 값을 보였다. 따라서 배관 내 유체의 유량을 상호상관을 이용하여 산정한 후, 이 값에 기포분율을 적용하여 수정하였으며 그 결과를 위의 Table 1에 표시하였다. 또한 실험결과와 실제 유량과의 상대오차를 측정하였다. 비교결과 두 방사선 검출기 사이의 거리 4D와 sampling time 4 msec인 조건에서 상대오차가 1.7 % 이하의 오차범위를 나타내었다. Table 1의 측정 유속값은 배관 내 기포의 흐름 속도를 가리키며, 유체와 기포 사이에 slip factor가 존재하지 않는다고 가정하였다. 또한 배관의 기하학적인 형상에 따른 유속분포를 직선으로 가정하여 평균유속(volumetric average velocity)을 산정하였다. 이는 배관을 매끄러운 재질의 아크릴을 사용하고, Reynold 수가 10,000이 넘는 완전 난류(fully developed turbulent flow) 실험조건이기 때문에 타당한 가정이다[16].

3.3 두 선원 간 거리별 유량측정

밀봉감마선원을 이용한 배관 내 유량측정 시 배관 위에 위치한 두 밀봉선원의 간격이 유량측정 값에 어떠한 영향을 미치는지 평가하기 위하여 두 선원의 간격을 거리 별로 변화시켜 유량측정 실험을 반복하였다. 실험을 수행하는 과정에서 측정된 유량과 공기량 그리고 실제 유량과의 상대오차를 아래의 Fig. 8에 표시하였다. 이때 실험과정에서의 기포량은 6.5 %~9.9 %의 변화를 보였다. 거리 별 유량측정 결과, 두 선원 간의 거리가 가까울수록 측정된 유량이 실제 유량에 보다 가까운 결과를 얻었다. 본 실험조건에서 선원간 거리가 6D까지는 상대 측정오차가 1.8 % 이하의 정확도를 보였으며, 거리가 증가할수록 오차율은 점차 증가하는 패턴을 보이다가 14D의 경우에는 최대 3.2 %의 오차를 나타냈다. 하지만 배관 하단부에서 실측된 유량을 실제 유량으로 간주하고 전 실험기간 동안에 동일한 값(29.2 m^3/h)을 적용하여 상대오차를 평가하였는데, 이는 일정 구간에서의 평균값으로 계측 정확도를 저하시키는 요인이 된다. 따라서 실시간으로 배관 하단부에서의 유량 실측이 가능하다면 상호상관법을 이용한 유량측정값의 상대오차가 현재 보다 줄어들 것으로 예상된다.

밀봉동위원소를 이용한 유량측정 시, 데이터를 얻는 sampling time은 실험결과에 큰 영향을 미친다. 일반적으로

Table 1. Measurements of multi-phase flow rate by application of cross-correlation function to radiation counts produced by two sealed gamma radioisotopes (^{137}Cs) with a distance of 4D(D=8 cm) and samping time 4 msec(Reynold number: 107,100).

No.	Distance	Transit time (ms)	Velocity (cm/sec)	Measured flow rate (m^3/h)	Gas content	Corrected flow rate (m^3/h)	Real flow rate (m^3/h)	Rel. error(%)
1	4D	0.204	156.9	28.4	8.2%	26.1	26.5	-1.7
2	4D	0.200	160.0	29.0	7.8%	26.7	26.5	0.7
3	4D	0.204	160.0	29.0	9.2%	26.3	26.5	-0.8
4	4D	0.204	156.9	28.4	7.2%	26.3	26.5	-0.6
5	4D	0.208	153.8	27.8	6.1%	26.1	26.5	-1.4
6	4D	0.200	160.0	29.0	8.1%	26.6	26.5	0.4

Table 2. Measurements of gas content in a multi-phase pipe; all counts are averaged values for every 4 msec and the counts of multi-phase flow pipe were measured downstream from the in-line mixer; gas contents means the cross sectional area occupied with N_2 gas in the pipe.

No.	Counts in an empty pipe(A)	Counts in a pipe full of water(B)	Counts in multi-phase pipe(C)	Gas content (ln(C/B)/ln(A/B))
1	41.8	30.4	31.2	8.2%
2	41.8	30.5	31.3	7.8%
3	41.8	30.5	31.4	9.2%
4	41.8	30.5	31.2	7.2%
5	41.9	30.5	31.1	6.1%
6	41.9	30.4	31.2	8.1%

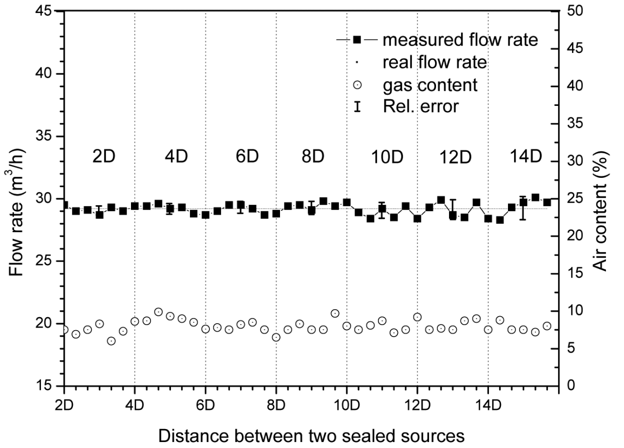


Fig. 8. Relative variations of flow rates calculated with cross correlation method by using a sealed radioisotope as a function of the distance between two sealed gamma sources; real flow rate measured at the end of the pipeline was 29.2 m^3/h(Reynold number: 118,000)

sampling time(Δt)이 작으면 데이터를 얻는데 유리하다. 왜냐하면 sampling time이 작을수록 초당 획득할 수 있는 데이터의 수가 늘어나므로 보다 정확한 transit time(τ_m)을 측정할 수 있기 때문이다. 하지만 sampling time이 너무 작으면 검출되는 방사선량 역시 감소하게 되므로 N/S 비(Noise/Signal ratio)가 커지게 되어 신호에 대한 노이즈의 영향이 증가하게 된다. 또한 상호상관함수의 그래프 상에서 최대 피크점을 가리키는 포이트 수가 현저히 증가하여($\tau_m \gg \Delta t$) 최대값을 얻는데 오차가 발생할 가능성이 높다. 따라서 이는 유량측정의 정확도를 떨어뜨리는 요인이 된다. 반면에 sampling time을 일정 값 이상으로 증가시키면($\tau_m > \Delta t$), 신호에 대한 노이즈의 영향은 줄어들고 최대 피크점을 가리키는 포인트 수가 적어져 최대값을 읽는데 유리해진다. 그러나 최대값에 해당되는 포인트를 읽는데 있어서 데이터 편차에 의한 한 포인트의 영향이 유속을 계산하는데 큰 변화를 유발하는 경향이 있다. 따라서 실험조건에 맞는 최적의 sampling time 설정은 유량측정에 있어 중요한 변수가 된다. 또한 본 연구는 국한된 유량조건(Re. number: 107,100)에서 수행된 결과로서 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 다양한 유량조건에서 추가실험을 수행할 필요가 있다. 이와 관련하여 Reynolds 수가 증가해 난류영역으로 이동할 때는 유량측정의 상대오차가 낮으나, 층류영역으로 확대되어 감에 따라 배관 내 기포층(vapor layer)이 우세하게 형성됨으로써 측정오차 또한 점차 증가될 것으로 예상된다.

본 실험을 통하여 밀봉감마선원을 이용한 배관 내 혼합유체의 유량측정이 가능함을 확인하였다. 상호상관기법을 이용한 유량측정의 정확도를 높이고 산업적 활용을 위해서는 적용대상 유체 이송배관의 기하학적인 특성에 맞는 선원의 종류와 세기, 상호상관함수 적용을 위한 효율적인 노이즈 제거방법 그리고 multiple energy gamma-ray 이용 등 실험조건 최적화에 대한 지속적인 연구가 필요하다[17-22]. 이 같은 추가적인 연구가 수행된다면 이는 다양한 산업공정에 존재하는 다중상 유체의 유동을 측정하는데 매우 유용한 기술을 제공할 것으로 예상된다.

4. 결론

밀봉 감마선원을 이용하여 다중상 배관 내 유체의 유량을 상호상관 기법을 적용하여 성공적으로 측정하였으며, 추가적으로 배관 내 기포분율 측정을 통한 유량보정을 통해 보다 정확한 유량계측이 가능하였다. 본 실험조건에서(N/S: 0.12~0.15, Δt: 4msec) 두 선원간의 거리가 4D인 경우에 유량을 계측하였으며, 측정된 기포량(단면적 대비 6.1 %~9.2 %)을 이용하여 유량을 보정해줌으로써 측정오차가 1.7 % 이하인 정확도를 보였다. 또한 두 선원간 거리가 가까울수록 유량측정의 정확도가 증가하였다. 후속적으로 배관의 직경과 내부 유체의 밀도에 따른 동위원소의 선택 그리고 선원의 세기와 방사선검출기 설치 위치 등 실험조건 최적화에 대한 후속 연구가 수반된다면 석유화학 산업과 같은 장치산업의 유지관리 측면에 경제적으로 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단을 통하여 과학기술부가 시행한 원자력연구개발사업 연구비지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Schneider F, Peters F, Merzkirch W. Quantitative analysis of the cross-correlation ultrasonic flow meter by means of system theory. Meas. Sci. Technol. 2003;14:573-582.
2. Worch A. A clamp-on ultrasonic cross correlation flow meter for one-phase flow. Meas. Sci. Technol. 1998;9:622-630.
3. Xu LA, Green RG, Plaskowski A, Beck MS. The pulsed ultrasonic cross-correlation flowmeter for two-phase flow measurement. J. Phys. E: Sci. Instrum. 1998;21:406-414.
4. Beck MS. Correlation in instruments: cross correlation flowmeters. J. Phys. E: Sci. Instrum. 1981;14:7-19.
5. Beck MS, Plaskowski A. Cross Correlation Flowmeters-Their Design and Application. Bristol: Adam Hilger, 1987.
6. Mackley IG. Multiphase metering past, present and future. Proc. Sem. Multiphase Meters and their Subsea Applications, London, 1993.
7. Slijkerman WFJ, Jamieson AW, Priddy WJ, Okland O, Moestue H. Oil companies' needs in multiphase flow metering. Proc. 13th North Seas Flow Measurement Workshop, Lillehammer, Norway, 1995.
8. Thorn R, Johansen GA, Hammer EA. Review article on recent developments in three-phase flow measurement. Meas. Sci. Technol. 1997;8:691-701.
9. Leszek Petryka. Radiometric cross-correlation techniques for flow rate measurement in multi-phase system. International atomic energy agency consultants' meeting, Krakow, Poland, 2001; 22-26 Oct.
10. Petryka L. Precise velocity measurements in two phase flow by means of sealed radioactive sources. The End-of-Mission Report to Kuala Lumpur, IAEA, RAS/8/078-06, 1998.
11. 김진섭, 정성희, 김종범. 밀봉감마선원(^{60}Co)을 이용한 석유화학산업의 유체이송배관 내 가동 중 이상 진단기술. 한국공업화학회, 2005;16(6):794-799.
12. Kim JS, Jung SH, Kim JB. In-service identification of the heterogeneous zone in petrochemical pipelines by using sealed gamma-ray sources(^{60}Co, ^{137}Cs). J. the Korea society for nondestructive testing, 2006;26(3) :169-173.
13. Avinash C. Kak, Malcolm Slaney. Principles of computerized

tomographic imaging. IEEE, New York. 1999:5-47.
14. Fred J. Taylor. Principles of signals and systems, McGraw-Hill, Singapore, 1994:506-528.
15. Geir Anton Johansen, Peter Jackson. Radioisotope gauges for industrial process measurments, John Wiley & Sons, 2004:215-221.
16. Robert P. Benedict. Fundamental of pipe flow, John Wiley & Sons, 1980:178-227.
17. Jenkins DM, Lysak PD, Capone DE, Brown WL, Askari V. Ultrasonic cross-correlation flow measurement: Theory, noise, contamination mechanisms, and a noise mitigation technique. Proc. 14th International conference on nuclear engineering(ICONE), July 17-20, Miami, Florida, USA.
18. Scheers AM, Letton W. An oil/water/gas composition meter based on multiple energy gamma ray absorption (MEGRA) measurement. Proc. 14th North Sea Flow Measurement Workshop, Peebles, Scotland, 1996.
19. Van Santen H, Kolar ZI, Scheers AM. Photon energy selection for dual energy γ-and/or X-ray absorption composition measurements in oil-water-gas mixtures. Nucl. Geophys. 1995;9:193-202.
20. Hewitt GF, Harrison PS, Parry SJ, Shires GL. Development and testing of the 'Mixmeter' multiphase flow meter. Proc. 13th North Sea Flow Measurement Workshop, Lillehammer, Norway, 1995.
21. Tjugum SA, Hjertaker BT, Johansen GA. Multiphase flow regime identification by multibeam gamma-ray densitometry. Meas. Sci. Technol. 2002; 13:1319-1326.
22. Roach GJ, Watt JS, Zastawny HW, Hartley PE, Ellis WK. Multiphase flow meter for oil, water and gas in pipelines based on gamma-ray transmission techniques. Nucl. Geophys. 1994;8:225-242.

The Flow-rate Measurements in a Multi-phase Flow Pipeline by Using a Clamp-on Sealed Radioisotope Cross Correlation Flowmeter

Jin Seop Kim, Sung Hee Jung, Jong Bum Kim, Jae Ho Kim, Na Young Lee
Korea Atomic Energy Research Institute, Radioisotope Research Division

Abstract - The flow rate measurements in a multi-phase flow pipeline were evaluated quantitatively by means of a clamp-on sealed radioisotope based on a cross correlation signal processing technique. The flow rates were calculated by a determination of the transit time between two sealed gamma sources by using a cross correlation function following FFT filtering, then corrected with vapor fraction in the pipeline which was measured by the γ-ray attenuation method. The pipeline model was manufactured by acrylic resin(ID. 8 cm, L=3.5 m, t=10 mm), and the multi-phase flow patterns were realized by an injection of compressed N_2 gas. Two sealed gamma sources of ^{137}Cs (E=0.662 MeV, Γ factor=0.326 $R \cdot h^{-1} \cdot m^2 \cdot Ci^{-1}$) of 20 mCi and 17 mCi, and radiation detectors of 2″×2″ NaI(Tl) scintillation counter (Eberline, SP-3) were used for this study. Under the given conditions(the distance between two sources: 4D(D; inner diameter), N/S ratio: 0.12~0.15, sampling time Δt: 4msec), the measured flow rates showed the maximum. relative error of 1.7 % when compared to the real ones through the vapor content corrections(6.1 %~9.2 %). From a subsequent experiment, it was proven that the closer the distance between the two sealed sources is, the more precise the measured flow rates are. Provided additional studies related to the selection of radioisotopes their activity, and an optimization of the experimental geometry are carried out, it is anticipated that a radioisotope application for flow rate measurements can be used as an important tool for monitoring multi-phase facilities belonging to petrochemical and refinery industries and contributes economically in the light of maintenance and control of them.

Keywords : Sealed gamma-ray source, Cross correlation, Multi-phase flow pipe, Fourier transform, NaI(Tl) scintillation counter, Flowmeter, Industrial process diagnosis