Journal of Radiation Industry 15 (2) : 117 ~ 120 (2021) https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.2.117

밀봉감마선원 기반 유량측정기술의 성능 향상을 위한 구조 최적화 연구

박장근[1] · 정성희[1,*] · 문진호[1] · 김종범[1]

[1]한국원자력연구원 동위원소응용연구부

Structural Optimization of Flow Measurement System with Sealed Gamma Sources

Jangguen Park[1], Sung-Hee Jung[1,*], Jinho Moon[1] and Jong-Bum Kim[1]

[1]*Radioisotope Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 111, Daedeok-daero 989 beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Republic of Korea*

Abstract - Various multi-phase flow system is commonly used in industrial process, and it is necessary to measure and control the flow velocity for optimizing the performance of the process. But traditional flow measurement technique by turbines, pressure gauges, voltex detection, and so on cannot be used in the multi-phase flow system. In this study, some experiments were carried out to optimize flow measurement technique based on the cross-correlation function with two sealed gamma sources for multi-phase flow system. Some air was inserted in the lab-scale flow system for making the liquid-air two-phase flow system, and the reference flow velocity was measured by radiotracer technique to compare to the results of the cross-correlation technique. The first result shows that the shorter the distance between two detectors is, the better result the technique provide because the distribution of second particle in the flow could be changed between the detectors. The second result shows that the wider width of collimator holes which is perpendicular to the flow direction provide the more accurate velocity.

Key words : Flow measurement, Multiphase flow, Cross correlation, Sealed source, Industrial process

서 론

배관을 통한 유체의 이동은 산업공정뿐만 아니라 실생활에서도 빈번하게 사용되며, 이 유체의 속도를 측정하고 제어하는 것은 공정의 성능을 최적화하는 데 필수적이다. 현재, 배관 내 유체의 속도를 측정하기 위해서 터빈 유량계(배관 내 설치되어 있는 터빈을 이용), 차압 유량계(배관 내 압력 차이를 이용), 볼텍스 유량계(배관 내 설치된 장비가 발생시키는 소용돌이를 이용) 등이 사용되고 있지만, 유체의 속도를 직접적으로 측정하는 것이 아니라 다른 장비를 통해 간접적으로 측정하는 방식이기 때문에 정기적인 장비의 교정과 점검이 요구된다. 해당 유량계를 통한 유량측정을 위하여 배관 내에 삽입된 장비는 유체의 흐름을 방해할 수 있으며, 장비와 배관이 일체형이기 때문에 공정 설계 단계부터 유량계의 설치를 고려해야 하고, 장비 교체 시에는 부분 배관을 통째로 교체해야 하기 때문에 공정을 중단해야만 한다. 또한, 산업공정에서 주로 사용되는 배관 내 다상유동의 경우에는 유량측정이 불가능하다(Worch *et al*. 1998; Schneider *et al*. 2003; Jung *et al*.

* Corresponding author: Sung-Hee Jung, Tel. +82-42-868-8057, Fax. +82-42-868-8448, E-mail. shjung3@kaeri.re.kr

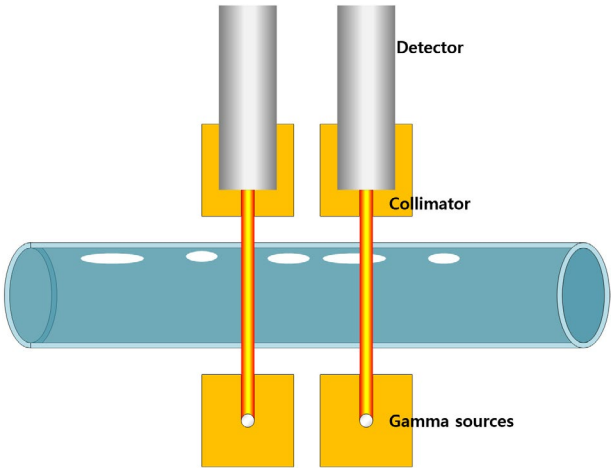

Fig. 1. Flow measurement technique with sealed gamma sources.

Fig. 2. DAQ for high-speed detection.

2009).

본 연구에서는 밀봉감마선원을 이용한 교차 상호상관 기법 기반 공정유량측정기술을 개발하고 구조 최적화 연구를 수행하였다. 교차 상호상관 기법은 두 개 이상의 서로 다른 데이터 사이의 상관관계를 분석하는 신호처리방법으로, 신호의 지연시간을 계산한다. 즉, 두 개의 계측기로 계측한 배관 내 미세한 기포 혹은 2차 유체로부터 발생하는 계측 신호를 비교하여 지연시간을 획득하고, 두 개 계측기 간의 거리를 고려하여 유속을 측정하는 기술이다(Petryka *et al*. 1993; Jung *et al*. 2009; Hanus *et al*. 2014; Zych *et al*. 2014; Hanus *et al*. 2015). 이는 Fig. 1처럼 단순히 배관 주변에 두 개의 밀봉선원, 두 개의 계측기, 네 개의 콜리메이터만으로 구현이 가능한 기술로, 기존의 유량측정기술과 달리 배관 내부에 장비를 설치하지 않아 유체의 흐름을 방해하지 않으며, 공정 가동 중에 기 설치된 배관에 대해서도 기술 적용을 할 수 있고, 내부 유체의 속도를 직접적으로 측정하기 때문에 정기적인 장비의 교정이나 점검이 필요 없다. 기술 실시를 위해서는 원리상 배관 내부에 유체와 함께 흐르는 미세한 기포 혹은 2차 유체가 필요하기 때문에 여러 종류의 유체가 함께 흐르는 다상유동 배관에 기술 적용이 가능하며, 한 가지 유체만 흐르는 배관에 대해서는 임의로 미세한 기포를 주입하여 유량측정이 가능하다. 구조 최적화 연구는 기술의 성능 향상을 위하여 수행되었으며, 계측기 간 거리와 콜리메이터 홀 크기를 변경하며 기술의 정확성을 평가하였다.

재료 및 방법

1. 감마선 고속측정용 데이터 수집장치 개발

밀봉감마선원 기반 공정유량측정기술에 적합한 최소 계측시간 10 ms의 감마선 연속측정용 Data acquisition system (DAQ)을 구성하기 위하여 Fig. 2와 같이 Nuclear Instrumentation Module (NIM)과 National Instruments (NI) 카운터를 사용하였다(Knoll 2011). NIM은 내부에 장착된 Canberra사의 High voltage supplyer 31020, Amplifier 2022, SCA 2030를 통해 방사선 계측기(Amcrys사 3 inch NaI (Tl))와 voltage divider (Nucare사)에 고전압을 제공하고, 방사선 계측기로부터 발생하는 신호 중 Single channel analyzer (SCA)에서 설정한 에너지 창 내에 해당하는 신호만을 출력해 준다. NIM에서 출력된 감마선 신호의 개수는 NI 9402 카운터와 LabVIEW 프로그램을 통하여 기록된다. 또한, 공정모사장치나 그 외 장비로부터의 노이즈 제거를 위하여 12 V 차량용 납배터리(Delkor DC31)와 220 V 인버터를 통해 DAQ 독립전원을 구성하였다.

2. 교차 상호상관 신호처리 기반의 유량측정 프로그램 제작

교차 상호상관(cross-correlation) 기법은 두 신호 간의 유사성을 판별하는 방법으로 식 1처럼 표현이 가능하다. τ는 지연 값, x와 y는 각각의 신호를 의미한다(Petryka *et al*. 1993; Jung *et al*. 2009; Bendat *et al*. 2010).

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n+\tau) \quad (1)$$

유량측정 시에는 교차 상호상관 기법을 적용하여 두 개의 계측기에서부터 발생한 신호의 유사성을 확인하고, 이 유사성이 최대가 되는 지체 값을 유체가 계측기 사이를 이동한 시간으로 결정하였다. 교차 상호상관 신호처리 프로그램은 LabVIEW 2018로 제작되었으며, 고속처리 프로그램을 통해 획득한 데이터, 계측기 간 거리, 파이프 직경, 계측시간 등을 입력받아 신호처리를 수행하도록 하였다. 신호처리 시에는 고속푸리에변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 수행하고 고주파 및 저주파의 노이즈를 제거하여 정확성을 향상시켰다.

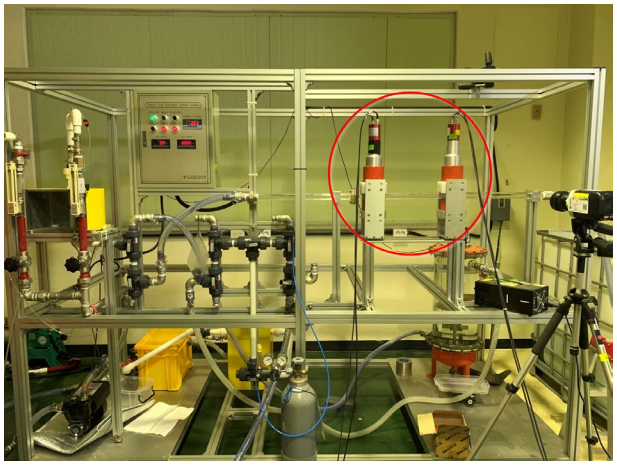

Fig. 3. Flow system and experimental set-up for flow measurement technique.

3. 기술 성능 향상을 위한 구조 최적화 연구

밀봉감마선원 기반 유량측정기술은 배관 내부에서 유체와 함께 흐르는 2차 입자가 각 계측기에 전달하는 신호의 시간 차이를 이용하여 유체의 속도를 산출한다. 기술 성능 향상을 위해서는 구조 최적화 연구가 필수적이기 때문에 공정모사 장치(Fig. 3)에 ^{137}Cs 선원 두 개(15.3 mCi, 13.7 mCi), 3 inch NaI (Tl) 계측기 두 개와 기체 주입을 위한 압력용기를 설치하고 다양한 조건에 대하여 실험을 수행하였다.

우선, 두 개의 계측기 간 거리 및 배관과 콜리메이터 간 거리에 따른 기술 정확성 평가를 위하여 계측기 간 거리를 130, 200, 300, 400 mm로 변화하며 기술 성능을 평가하였다(Fig. 4). 또한, 콜리메이터 홀 너비에 따른 기술 정확성 평가를 위하여 유체 이동방향과 수직한 콜리메이터 홀 너비를 10, 20, 30 mm로 변화시켰다(Fig. 5). 기술 특성상 유체 이동방향의 콜리메이터 홀 너비는 좁을수록 정확성이 향상되기 때문에 3 mm로 고정하였다.

구조 최적화를 통해 획득된 유속은 방사성추적자 기반 유속 실측기술 실험을 통해 획득된 기준 유속과 비교되었다. 방사성추적자 기반 유속 실측기술은 배관 내부에 유체와 함께 흘러가는 방사성추적자를 주입하고 위치가 서로 다른 두 개 이상의 방사선 계측기로 이를 계측하여 유체의 속도를 측정하는 기술로 직접 측정방식의 유속 실측기술이기 때문에 정확성이 매우 높다(Shin *et al*. 2003; Jung *et al*. 2020). 방사선 계측기와 데이터 수집장치는 밀봉감마선원 기반 유량측정장비를 활용하였으며, 정확성 향상을 위하여 계측기 간 거리를 최대한 떨어지도록 408 mm로 설정하였다. 방사성추적자는 ^{68}Ge/^{68}Ga Generator (iTG GaG-13-078)로부터 10 μCi의 ^{68}Ga (양전자 방출 후 511 keV 감마선 생성, 반감기 68분)만을 용출하여 배관 내부에 주입하였다. 계측시간은 방사성추적자의 방사능을 고려하여 100 ms로 설정하였으며, 방사성추적자

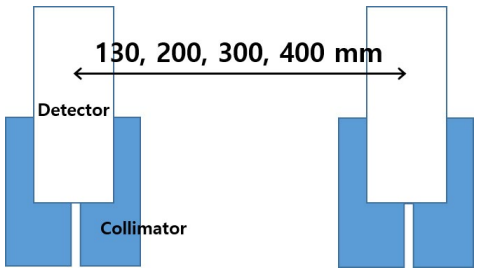

Fig. 4. Structural optimization of distance between detectors.

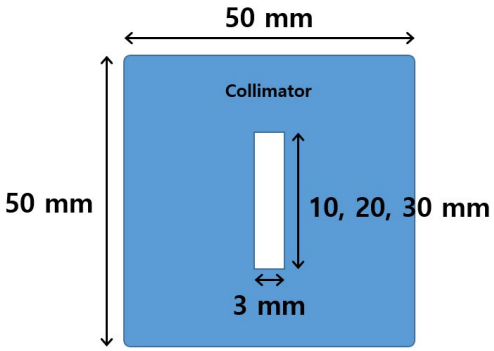

Fig. 5. Structural optimization of collimator hole width.

가 이동하는 시간은 두 개의 계측기로부터 획득한 계측 데이터의 질량중심(Center of Mass)을 비교하여 획득하였다.

결과 및 고찰

구조 최적화 연구의 신뢰성을 향상시키기 위하여 고려된 구조마다 5번의 실험을 수행하고, 이의 평균과 표준편차, 오차를 비교하였다. 기준유속은 방사성추적자 기반 유속 실측실험을 통해 획득되었다. 방사성추적자로부터 획득된 두 방사선 계측기 신호의 질량중심 시간 차이는 0.523 s로 나타났으며, 계측기 간 거리인 408 mm를 고려하여 배관 내 기준유속은 0.78 m·s^{-1}로 확인되었다.

밀봉감마선원 기반 유량측정기술은 계측기 간 거리가 짧을수록 정확성이 향상하고 표준편차가 감소되었다. 교차 상호상관 기법은 두 개 신호 간의 유사관계를 파악하는 방법으로 기체가 배관을 지나가면서 발생시키는 감마선의 신호 패턴을 비교하게 된다. 하지만 계측기가 서로 멀어질수록 그 사이에서 기체가 여러 개로 나뉘거나, 서로 합쳐지는 등 형태가 변하기 때문에 기체로 인한 신호 패턴이 서로 다르게 나타나게 되며, 이로 인해 성능이 저하된 것으로 확인되었다(Table 1).

유체 이동방향으로부터 수직한 콜리메이터의 홀 너비는 넓을수록 정확성이 향상하고 표준편차가 감소하였다. 이는 홀 너비가 넓을수록 배관 내 넓은 영역의 기체의 패턴을 효과적

Table 1. Measurements of flow velocity with various distances between detectors

Distance bet. detectors (mm)	Measured flow velocity ($m \cdot s^{-1}$)	Standard deviation ($m \cdot s^{-1}$)	Error (%)
130	0.77	0.02	2.33
200	0.70	0.02	10.17
300	0.63	0.03	19.63
400	0.55	0.12	30.39

Table 2. Measured flow velocity with collimator hole width

Width of collimator hole (mm)	Measured flow velocity ($m \cdot s^{-1}$)	Standard deviation ($m \cdot s^{-1}$)	Error (%)
10	0.74	0.05	5.20
20	0.76	0.04	2.54
30	0.77	0.02	2.33

으로 계측하여 기술의 성능이 향상되는 것으로 확인되었다 (Table 2).

결 론

본 연구는 밀봉감마선원을 이용한 교차 상호상관 기법 기반 유량측정기술의 최적화 연구를 위하여 수행되었으며, 이를 위하여 감마선 고속측정장치, 교차 상호상관 기법 기반 유량측정 프로그램을 개발하고 다양한 구조에 따른 기술 정확성을 평가하였다. 유량측정기술의 정확성은 계측기 간의 거리가 짧을수록, 유체 이동방향과 수직한 방향의 콜리메이터 홀 너비가 넓을수록 성능이 향상되었다. 이는 계측기가 서로 멀어질수록 그 사이에서 변화한 기체의 패턴이 계측 신호에 서로 다른 영향을 미칠 수 있기 때문이며, 콜리메이터 홀 너비가 넓을수록 계측 영역이 넓어져 배관 내 기포의 패턴을 효과적으로 감지할 수 있기 때문이다. 본 연구 결과는 밀봉감마선원 유량측정기술의 정확성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 예상되며, 밀봉감마선원 기반 유량측정기술의 기체 분율에 따른 기술 성능 평가 시 실험 구조에 반영될 예정이다.

사 사

본 연구는 미래창조과학부 재원의 방사선기술개발사업 (NRF-2018M2A2B3A01072184)과 한국원자력연구원 주요사업(방사성동위원소 응용 표준화기술 개발, 524440-21)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

Bendat JS and Piersol AG. 2010. Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Fourth Edition. pp. 109-138. John Wiley & Sons, Inc. New York.

Hanus R, Petryka L and Zych M. 2014. Velocity measurement of the liquid-solid flow in a vertical pipeline using gamma-ray absorption and weighted cross-correlation. *Flow Meas. Instrum.* **40**:58-63.

Hanus R. 2015. Application of the Hilbert Transform to measurements of liquid-gas flow using gamma ray densitometry. *Int. J. Multiphase Flow* **72**:210-217.

Jung SH, Kim JS, Kim JB and Kim TY. 2009. Flow-rate measurements of a dual-phase pipe flow by cross-correlation technique of transmitted radiation signals. *Appl. Radiat. Isot.* **67**:1254-1258.

Jung SH, Moon J, Park J and Lim JC. 2020. Study on visualization of water mixing flows in a digester equipped with a vertical impeller by using radiotracers. *Nucl. Eng. Technol.* **52**:170-177.

Knoll GF. 2011. Radiation Detection and Measurement. Fourth Edition. pp. 595-704. John Wiley & Sons, Inc. New York.

Petryka L and Oszajec J. 1993. The cross-correlation method of sold particle velocity measurements in industry. *Nucl. Geophys.* **7**(2):323-333.

Shin S, Kim J, Jung S and Jin J. 2003. The RTD Measurement on a Submerged Bio-Reactor using a Radioisotope Tracer and the RTD Analysis. *IJCAS* **1**:210-214.

Shneider F, Peters F and Merzkirch W. 2003. Quantitative analysis of the cross-corrleation ultrasonic flow meter by means of system theory. *Meas. Sci. Technol.* **14**:573-582.

Worch A. 1998. A clamp-on ultrasonic cross-correlation flow meter for one-phase flow. *Meas. Sci. Technol.* **9**:193-202.

Zych M, Petryka L, Kepinski J, Hanus R, Bujak T and Puskarczyk E. 2014. Radioisotope investigation of compound two-phase flows in an open channel. *Flow Meas. Instrum.* **35**:11-15.

Received: 3 May 2021
Revised: 19 May 2021
Revision accepted: 28 May 2021