

터빈 유량계를 사용한 이상유동의 측정

심 재 우*
(98년 4월 2일 접수)

Measurement of Two-Phase Flow Using Turbine Flowmeter

W. Jaewoo Shim

Key Words : Two-Phase Flow(이상 유동), Air-Water Flow(물-공기 유동), Turbine Flowmeter(터빈 유량계), Volumetric Flow Rate(체적 유량)

Abstract

In this study turbine flowmeters were used to predict volumetric flow rate of each phase in two-phase, gas-liquid, flowing in a vertical tube. To determine volumetric flow rates of two-phase, air-water, flowing vertically upward through the polycarbonate tube(57mm ID-inside diameter), two turbine flow meters were used. For void fraction measurements, two gamma densitometers were used at each location of the turbine flow meter, one at the upstream and the other at the downstream. It was determined that the turbine flowmeter's outputs were a function of actual volumetric flow rate of each of the two phases. A two-phase flow model was developed.

1. 서론

이상유동에 있어서 유속 측정은 일반적으로 매우 어렵다고 알려져 있다(Hetsroni(1982), Reiman et al(1982) 등). 본 연구에서는 터빈 유량계를 사용하여 수직 관을 통한 기체-액체 상승류에서의 실험을 행하였다. 터빈 유량계의 출력은 터빈의 날개의 회전 속도에 비례하고 연속적인 파동(f)으로 나타난다. 단일 기체 또는 단일 액체의 유동은 유체의 부피유속(volumetric flow rate)의 선형적인 함수로 나타나기 때문에 넓은 범위의 단일 유체

유속측정에는 보통 터빈 유량계가 많이 사용된다. 즉, 액체의 부피 유속은 $Q_l = Kf$ 로 표현할 수 있다. 여기서 K는 단일 액체 유동에서 나타나는 터빈 유량계의 유동 상수이고 보정(calibration) 과정을 통해 값을 구할 수 있다.

일반적으로 이 비례상수는 유체의 고유 특성인 밀도와 점도차이 때문에 유체에 따라 각기 다르게 나타난다. 따라서 이상 유동에서는 단일 유체에서 사용되는 위식을 적용할 수가 없다. Reiman 등(1982)의 연구에 의하면 터빈 유량계를 이용한 여러 이상유동 모델(Popper, 1961; Rouhani, 1964,

* 정회원, 단국대학교 공과대학 화학공학과

Aya, 1975; Frank, 1977)은 잘 적용되지 않고 또한 이 모델들은 공극률을 필요로 하는데 공극률은 그 측정과 예측이 힘들고 사용 장비가 고가이기 때문에 이상 유동에 적용하기가 어렵다고 보고된 바가 있다. Scott(1982) 등도 터빈 유량계는 이상 유동 측정시 여러면에서 유속의 변화에 따른 빠른 응답 때문에 비록 이상적이지만 데이터가 많고 복잡하여 그 해석이 매우 어렵다고 발표한 적이 있다. 또한 터빈 유량계의 응답은 국부 흐름의 경향(local flow pattern)에 매우 의존된다고 보고된 바가 있다.

이러한 터빈 유량계는 저가이면서 응답 시간이 빠르고 사용이 간편하며 내구성이 높은 장점 때문에 이상 혼합물의 유속 측정에는 매우 유용하지만 지금까지 각 상의 유속과 유량계의 출구 진동수 사이의 정확한 관계를 나타내는 모델이 없었다. 따라서 본 연구에서는 실험적인 연구의 결과를 토대로 이들 문제를 해결하고자 하였다.

2. 실험

본 연구에서는 내경(ID)이 57mm의 수직 원형관인 폴리카보네이트 관을 통한 공기-물의 상승류에서 Magnetic pick up을 가진 두 개의 50.8mm ID Hoffer 터빈 유량계를 사용하여 실험을 행하였다.

그림 1에서와 같이 공기는 회전 압축기로부터 세 개의 수직 로타메타 중 하나를 통과하고 vortex 유량계와 gas 터빈 유량계를 지나 혼합기에서 물

과 혼합된다. Gas 터빈 유량계는 12.7mm (1/2 inch) ID로 3.4~51 scmh(standard cubic meter per hour)의 공기의 유속을 측정하고 25.4mm ID vortex 유량계는 20~102 scmh의 공기 유속을 측정하였다. 세 개의 로타메타의 압력은 항상 650kPa로 유지시켜 12.7mm ID, 12.7mm(large float) ID, 25.4mm ID로 0~1.97scmh, 0~8.3scmh, 0~40.1 scmh를 각각 측정하였다. 모든 공기의 유속 측정은 적어도 두 개의 기구를 사용하였는데 높은 유속에서는 로타메타와 Vortex 유량계를 사용하였고 낮은 유속에서는 로타메타와 기체 유량계, 중간유속에서는 로타메타, Vortex 유량계, 기체유량계 세 개가 서로 대응이 되도록 하여 측정하였다.

물의 유동은 0.38m³ (100 gallon)의 스테인레스 탱크로부터 원심펌프와 조절밸브에 의해 일정한 유속을 가지게 한 다음 50.8mm ID Hoffer 유량계를 통하여 혼합기로 순환시켜 여기서 기체와 혼합된다. 혼합기에서 기체와 액체가 혼합되어 screen section에 들어가서 screen section에서는 큰 기포는 작은 기포로 깨져서 잘 혼합되어 test section에 들어간다. 공기-물 이상 혼합물의 온도를 균일하게 유지하기 위하여 Plate-Type의 열 교환기를 지나 다시 탱크로 돌아가서 공기는 물로부터 분리되어 탱크의 상부에서 배출되고 물을 다시 순환시킨다. 본 실험에서는 먼저 측정에 앞서서 실험 장치에 물만을 흘려주어 실험 장치를 검사하고 터빈 유량계를 보정하였다. 또한 그림 1에는 나타나지 않았지만 물의 충전과 배출을 위하여 여러 가지 수동 밸브도 사용하였다.

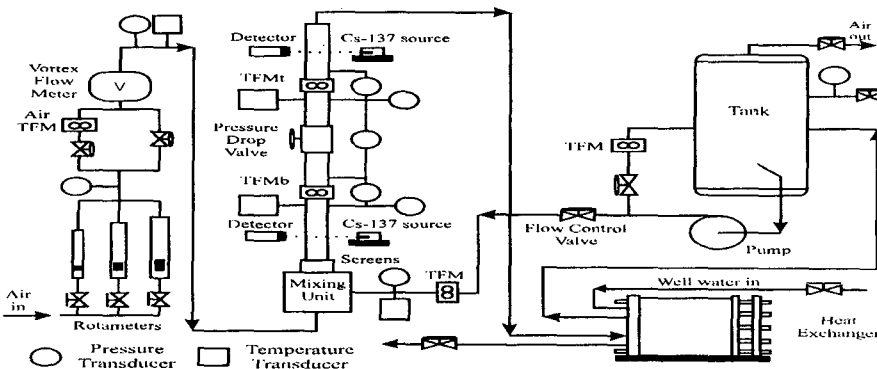


Fig. 1 Flow Loop of Experimental System

전체 test section은 길이가 2.39m로서 총 7개의 구역을 가지고 있다: 4개의 투명한 폴리카보네이트 관, 2개의 50.8mm ID 터빈 유량계, 그리고 터빈 유량계 사이의 압력 차이를 조절할 수 있는 밸브로 구성되어 있다. 관의 내경은 57mm, 관 벽의 두께는 3.175mm, 터빈 유량계 사이의 거리는 0.94m이었다.

공극률의 측정에는 두 개의 감마 농도계를 사용하였다. 하나는 출구 근처에 있고(상부에 있는 투명한 관의 중간 지점) 다른 것은 테스트 구역의 입구 근처(하부에 있는 투명한 관의 중간지점)에 설치하여 측정하였다. 또한 test section의 여러 점에서의 압력과 온도도 함께 측정하였다.

모든 측정기구의 출력은 수동으로 읽는 로타메타를 제외하고는 IBM PC와 OPTO solid state relay로 구성된 자료수집장치(data acquisition system)을 통해 신호를 초당 각 기기(Channel)에서 40번을 측정한다. 다음, 컴퓨터 소프트웨어를 사용하여 여러 가지 조건을 가지고 결과의 일부나 전체를 이진법이나 공학단위로 나타내었다. 정상 상태에 도달했을 때 500번(12.5 seconds)의 검사(scan)의 평균이 기억되어 공학 단위로 변환되고 또한 기억되었다. 모든 측정은 물의 유속을 일정하게 두고 공기의 유속을 순차적으로 최대로 증가시키고 다시 감소시켜 반복 측정한 결과를 재현성 있게 나타내었다.

3. 이상 유동 모델

터빈 유량계의 회전자 속도는 액체의 부피 유속에 비례하며 그 출력은 부피 유속의 단위로서 cmh(cubic meter per hour)를 사용하여 유용하게 표현할 수 있다. 터빈 유량계의 출력은 변수 T로 표현되고 이것은 KQ 로 정의된다. K는 단일상 액체의 유동에서 나타나는 터빈 유량계의 유동 상수이다. 수직의 유로에서 이상 유동에 의한 터빈 유량계의 회전 속도는 다음과 같이 어느 측정된 점에서의 액체와 기체의 부피 유속만에 의존하게 된다.

$$T = \psi(Q_g, Q_l) \quad (1)$$

주어진 이상 유체의 유속에서 있어서 그 회전 속

도는 기체의 부피유속에 거의 선형적인 함수이다. 기체유속이 0 일 때 터빈 유량계의 출력(T)은 액체 유속으로만 나타나게 된다. 각 하부와 상부 터빈 유량계의 출력 대 기체의 scmh 유속(standard cubic meter per hour)을 그림 2에서 나타내었다. 커브의 겹침을 피하기 위하여 물 유속 10개중 단지 4개만을 나타내었으며 (b)와 (t)는 하부와 상부에서의 터빈 유량계를 나타낸다. 일반적으로 어느 주어진 물의 유속에서의 T는 기체의 부피 유속에 대하여 다음과 같이 선형적인 관계를 갖는다.

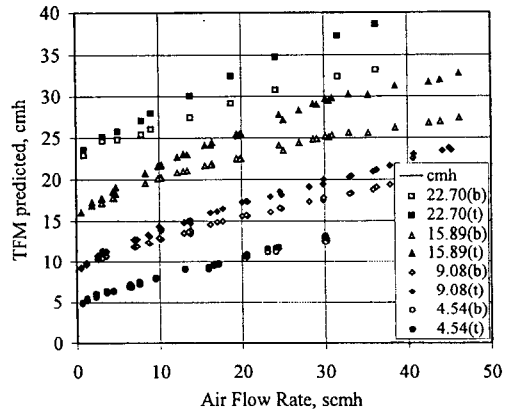


Fig. 2 TFM Output vs. scmh Air

$$T = k_1 + k_2 Q_g \quad (2)$$

Q_g 는 standard condition에서 기체의 부피유속이고 k_1, k_2 는 물의 유속에 의존하는 상수이다. 정상상태에서는 기체와 물의 질량속도는 두 개의 터빈에서 동일하다 따라서 두 개의 터빈을 통한 기체의 유속(scmh로 표현되며)이 역시 같아진다. 그러나 실제 부피유속(acmh)은 두 터빈의 151kPa 만큼의 압력 차이 때문에 달라지게 되는데 그림 3에서 보면 기체의 부피 유속은 각 터빈 유량계의 위치에 대항하는 온도와 압력에서 기체의 실제 부피 유속을 보여 준다. 반면에 기체의 부피 유속(그림 2의 실험 데이터)이 각 터빈 유량계 위치에서의 실제 단위 시간당의 부피에 대응시키면 터빈 유량계의 출력 값(T)은 기체 유속에 선형적인 관계로 근접함을 알 수 있다. 또한 상부와 하부의 터빈 유

량계의 출력 값은 주어진 액체의 유속에서 하나로 선형화 된다.

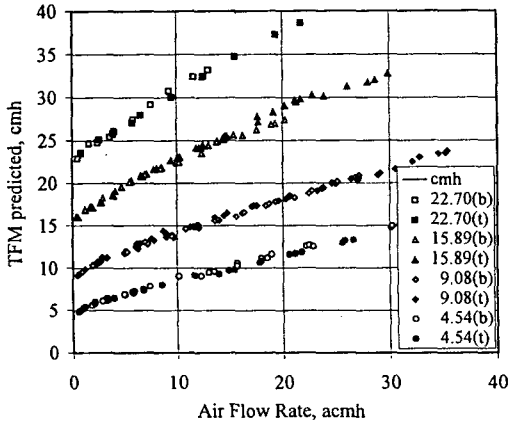


Fig. 3 TFM Output vs. acmh Air

$$T = k_1 + k_2 Q_{g,acmh} \quad (3)$$

여기서 $Q_{g,acmh}$ 는 실제 기체의 유속이고 k_2 는 액체 유속의 선형화 함수이다.

따라서 식 3 우변의 두 번째 항은 다음과 같이 기체-액체 상호관계로 표현된다.

$$k_2 = k_3 + k_4 Q, \quad (4)$$

여기서 k_3, k_4 는 상수이다.

위 두 식들을 합하면, 출력 값 T는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = k_1 + (k_3 + k_4 Q_i) Q_{g,acmh} \quad (5)$$

식 5 에서 기체의 유속이 0 일 때 k_1 은 Q_i 로 바뀐다.

상태 식에서 보면

$$Q_{acmh} = \frac{P_{STP}}{t_{STP}} \frac{t}{P} Q_{g,scmh} = 0.02775 \frac{t}{P} Q_{g,scmh} \quad (6)$$

P_{stp}, t_{stp} 는 정상상태에서의 압력과 온도(정상상태는 1 atm, 21.1°C)이다.

식 (4)에 식 (5)과 식 (6)을 대입하면 다음과 같

다.

$$T = Q_i + 0.02775 (k_3 + k_4 Q_i) \frac{t}{P} Q_g \quad (7)$$

식 (7) 는 이상유동의 수직 상승류에서의 일반식이므로 온도와 압력을 보정시킨다면 하부와 상부의 터빈 유량계에 응용할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 터빈의 압력 범위를 95kPa ~ 287kPa, Q_i 는 2.3acmh ~ 22.9acmh, Q_g 는 0.0acmh ~ 35.4acmh 기체의 질량 분율은 0.000 ~ 0.017 범위로 하였으며 온도는 25°C로 유지시켰다.

그림 3 에 나타난 바와 같이 주어진 단일 액체 유속에서의 터빈의 출력은 전 기체 유속의 범위가 거의 직선에 근접함을 알수가 있다. 직선의 기울기와 절편은 최소 제곱법에 의해 구하고 물의 유속에 선형적으로 의존하며 절편은 물의 유속과 거의 같아진다.

두 개의 터빈 유량계의 데이터는 식 (5)의 최소 제곱법(least square fit)에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$T = 1.05099 Q_i + 0.0352 Q_i Q_{g,acmh} + 0.2487 \quad (std=0.561) \quad (8)$$

여기서 std는 표준편차를 나타낸다. 그림 4 은 식 (8)에 의해 계산된 상부(top) 터빈 유량계의 예측 값과 실제 실험 값을 나타내었다.

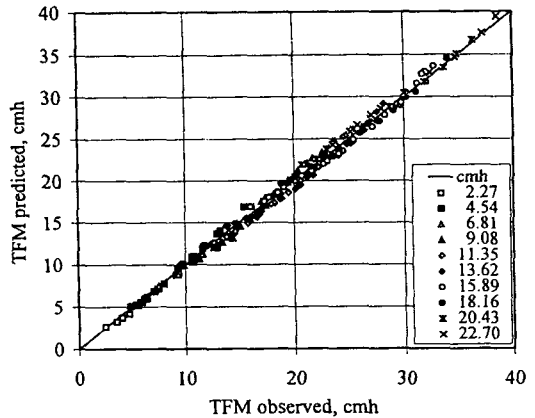


Fig. 4 Top TFM Predicted vs. Actual Data

4. Popper 공극률 모델과의 비교

부피유속 Q_g 는 기체상의 속도와 기체가 흐르는 면적의 곱으로 나타낼 수 있다. 즉 $Q_g = v_g \times A_g$ 공극률은 $\epsilon = A_g / (A_g + A_l)$ 로 정의된다. 기체의 밀도는 액체의 밀도에 비교해 매우 작다. 반면 부피 비율은 $Y = Q_g / (Q_l + Q_g)$ 로서 0부터 0.93까지 변화 한다. 이상유동에서는 기체상의 속도와 액체상의 속도는 보통 다르기 때문에 부피비와 감마농도계에 의해 측정된 공극률은 같지 않을 수 있다.

Reiman 등(1982)은 터빈 유량계를 이용한 여러 이상유동의 모델을 검토하였는데 그 중 널리 알려진 모델은 다음과 같이 터빈의 날개에서 힘의 평형식을 사용하여 유도된 Popper(1961) 식이다.

$$AG = K \rho_m l \tag{9}$$

위 식에서 G= 질량속도, A=Channel 면적, ρ_m 은 Popper가 정의한 운동량 밀도이다.

$$\rho_m = \left(\frac{(1-X)^2}{(1-\epsilon)\rho_l} + \frac{X^2}{\epsilon\rho_g} \right)^{-1} \tag{10}$$

여기서 ϵ 는 공극률, 그리고 X는 기체의 질량비이다. 이외에도 많은 연구자들에 의해(Rouhani ; 1964, Aya ; 1975, Frank ; 1977) 비슷한 모델을 개발하였으나 터빈 유량계를 사용하여 이상의 유동을 정확하게 묘사한 것은 아니었다. Popper의 모델을 간단히 표현하면 다음과 같다.

$$T = A[(1-X)v_l + Xv_g] \tag{11}$$

이 식에서 A = 면적, v_g, v_l 는 기체와 액체의 속도이다. 이 모델은 운동량 모델이라고도 부르는데 터빈의 출력은 이상유동의 총 운동량에 비례한다. 각 상의 연속식을 사용하고 공극률을 정의하여 식 (11)을 식 (9)과 (10)를 사용하여 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$T = AG \left(\frac{(1-X)^2}{(1-\epsilon)\rho_l} + \frac{X^2}{\epsilon\rho_g} \right) = \frac{AG}{\rho_m} \tag{12}$$

그림 5은 상부(top) 터빈 유량계에서 측정된 공극률 대 부피비를 보여 준다. 그림 6은 공극률을

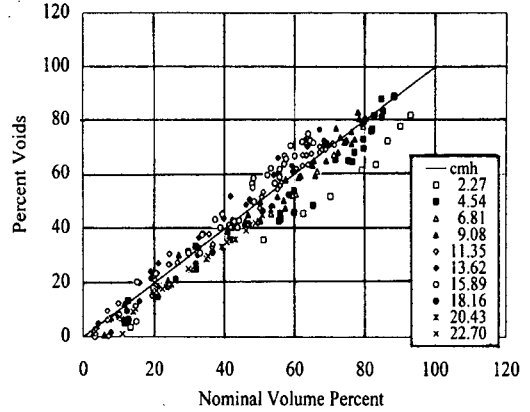


Fig. 5 % Void at Top vs. % Volume

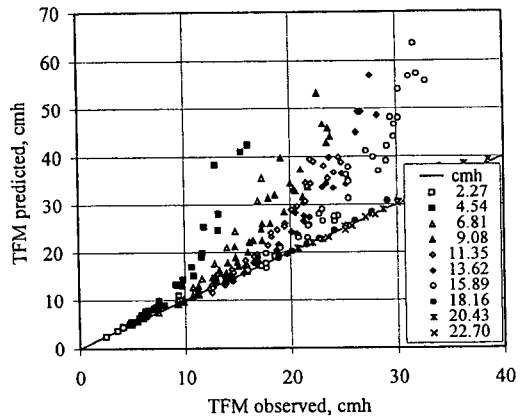


Fig. 6 Top TFM Predicted by Popper vs. Actual Data

사용한 Popper 모델에 의해 상부(top) 터빈 유량계의 출력을 예측하여 나타내었다. 이 모델에 의하여 예측된 값은 높은 유속의 물을 제외하고는 측정된 값과 잘 맞지 않음을 알 수 있었다. 즉 Popper 모델은 높은 유속의 기체에서나 낮은 유속의 물에서 매우 과대 평가 되어 있다. 그림 7은 상부(top) 공극률을 부피 비율로 대신하여 변형된 Popper 모델을 보여 주는 것인데 공극률이 아닌 부피비에 의존한 관계임을 보여 준다. 그러므로 터빈의 응답은 공극률보다 부피비가 더 밀접하게 관계함을 알수가 있다. 이것은 두 상의 유동이 순수한 액체 상이나 기체

상으로 보는 모델이 비합리적이고 작은 물방울을 포함한 액상이나 비말 동반된 액체가 작은 비말을 포함한 기체 상으로 이상 유동을 나타내는 것이 더 합리적임을 보여주는 것이다. 일반적으로 적당한 상태에서 기체상은 그들이 가진 질량보다 몇 배 많은 분자의 질량을 운반하고 기포류(bubble flow region)에서는 기체 기포의 부피가 25%(Taitel et al, 1980)까지 존재하는 것으로 알려져 있다.

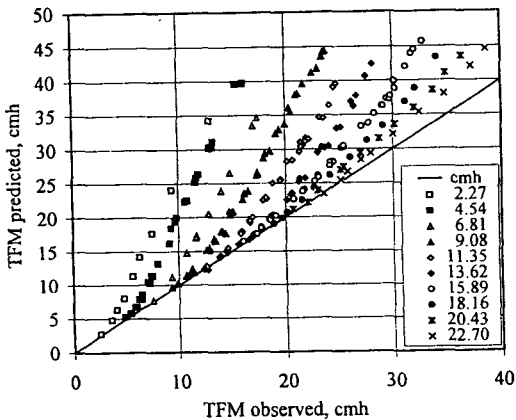


Fig. 7 Top TFM Predicted by Modified Popper vs. Actual Data

5. 결론

터빈 유량계는 기체 또는 액체의 부피유속 측정에 널리 사용된다. 그러나 이상 유동의 측정에서는 각 상의 유속과 터빈 유량계의 출력 사이의 정확한 관계를 알지 못했기 때문에 기체와 액체의 혼합물의 유속을 측정하는데는 현재까지 사용되지 못했다.

따라서 본 연구에서는 공기- 물의 이상 유동에서 각각의 부피 유속과 터빈 유량계의 출력 진동수의 관계를 단순하고도 정확하게 나타내었는데 이 관계식의 특징은 터빈 유량계의 출력 진동수는 공극률이 아닌 부피 유속에 의존한다는 것이다. 그리고 이상 유동 모델을 조사하였고 이상의 유속 측정 방법을 제시하였다. 비록 이론적인 기초가 약간은 부족하지만 부피 유속과 터빈 유량계의 응답 사이에 밀접한 함수의 관계를 나타냄으로서 이상 유동에서 각 상의 유속을 보다 정확하게 측정할 수 있었다.

감사

본 연구는 1998년도 단국대학교의 대학 연구비에 의한 것으로 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) Aya, I., "A model to calculate mass flow rate and other quantities of two-phase flow in a pipe with a densitometer, a drag disk, and a turbine meter". ORNL-TM-4759 (1975).
- 2) Barnea, D., Shaham, O., and Taitel, Y., Flow pattern characterization in two phase flow by electrical conductance probe, Int. J. Multiphase Flow Vol. 6, 387-397 (1980).
- 3) Frank, R., Mazars, J., and Ricque, R., "Determination of mass flow rate and quality using a turbine flow meter and a venturi". Heat and Fluid Flow in Water Reactor Safety, The Institution of Mech. Engrs. London, 63-68 (1977).
- 4) Popper, G. F., "In-core instrumentation for the measurement of hydrodynamic parameters in water-cooled reactors", Advanced course in in-core instrumentation for water-cooled reactors at Institutt for Atomenergi, Kjeller, Norway, 1, Section V.IV.B, 32-39 (1961).
- 5) Reiman, J., John, H., and Muller, U., Measurements of two-phase mass flow rate: a comparison of different techniques, Int. J. Multiphase Flow, vol. 8, no. 1, 33-46 (1982).
- 6) Rouhani, S. Z., "Application of the turbine type flowmeters in the measurement of steam quality and void", Symposium on in-core instrumentation, Oslo, June 1964, USAEC-CONF-640607 (1964).
- 7) Scott, R. W. W., Developments in Flow Measurements-1", Applied Science Publishers, London and New Jersey, 193 - 205 (1982).
- 8) Taitel, Y., Barnea, D., and Dukler, A. E., Modelling Flow Pattern Transition for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes. AIChE Journal Vol. 26, 345-354 (1980).