

수직동심환상관에서 반경방향 보이드율의 변동특성

Fluctuation Characteristics of Radial Void Fraction in Vertical Concentric Annuli

손 병 진* ; 김 인 석** ; 김 문 철***
B. J. Son , I. S. Kim , M. C. Kim

Abstract

This paper presents experimental data of fluctuation characteristics of local void fraction of air-water two-phase flow which are associated with the flow pattern, annular gap size and radial location in vertical concentric annuli with coefficient of skewness and kurtosis.

The annular gap widths are 13mm, 11mm, and 9mm for a 38mm inner diameter as the lucite outer tube. A electrical conductivity probe was used to measure the local void fraction and traversed diametrically from inner wall to outer wall using radial increments of 2mm.

It was shown that distribution of the coefficient of skewness and kurtosis, which is related that the one is the asymmetry and the other peakness of local void fraction distribution was influenced by flow pattern, annular gap size and radial location.

1. 서 론

기-액 2상유동계에서 관내의 보이드율이 유동양식, 압력강하, 대류 열전달에 직접적인 영향을 미친다는 사실은 이미 잘 알려져 있는데 보이드율분포는 계의 기하학적 조건, 가열과 비가열, 유동방향 및 유동양식에 따라 그 특성을 달리한다.

보이드율분포에 관한 연구결과들을 종합적으로 검토하여 보면 관직경이 2.0~3.0 cm인 경우, 기포류에서는 관중상부보다 관벽근처에서 보이드율이 높게 나타나고 최대 보이드율은 무차원 반경비가 0.65~0.8 되는 위치에

분포한다.⁽¹⁾ 한편 관직경이 5.0~6.0 cm인 경우 최대보이드율은 관직경의 0.9배 되는 위치에서 발생한다.^{(2),(3)} 일반적으로 관직경이 큰 경우는 보이드율이 관중상부에서 거의 균일하게 분포하는 반면에, 관직경이 작은 경우는 오목한 포물선 형태로 분포한다. 이러한 사실은 최대보이드율의 발생위치에 영향을 주는 인자가 유로직경과 기포직경이라는 것을 시사한다. 슬러그류에서는 보이드율이 관중상부 영역에서 상당히 높은 값을 지니며 이 때의 보이드율 분포곡선은 관중상부에서 포물선 형태를 보이나 관벽부근에서는 정점이 개재된 형태로 나타난다.⁽⁴⁾

* 한양대 공대 기계공학과

** 명지대 공대 기계공학과

*** 인화공업전문대 기계과

이상의 연구들은 유로가 단순한 형상인 원관의 경우이며, 동심환상유로에 대한 경우는 가압수형 원자로의 다운커머에서 발생하는 관수현상을 해석하기 위한 연구^{(5)~(7)}가 대부분으로써 환상간극내의 보이드율 분포에 관한 연구^{(8)~(10)}는 별로 없는 실정에 있다. 이들 연구들은 동심환상유로내의 국부보이드율을 반경방향에 따라 계속하여 그 분포특성을 유동양식별로 해석하였다. 그러나 주어진 위치에서 계속한 보이드율은 어디까지나 평균국부보이드율로서 상당히 랜덤하게 변화하므로 이들로서는 동일위치에서의 보이드율의 변동성분을 알 수 없기 때문에, 관내 보이드율 분포구조를 해석하기 위해서는 보이드율의 변동성분을 통계적인 방법으로 구명할 필요성이 있는데 이에 관한 연구가 없다.

따라서 본 연구는 동심환상관에서 기-액 2상류가 상향유동을 하는 경우 형성되는 유동양식과 환상간극, 간극의 반경방향 위치에 따르는 국부보이드율을 분석한 기수행된 연구⁽⁹⁾를 토대로 하여 국부보이드율 변동특성을 통계량과 관련된 비례칭도계수와 침도 계수로서 분석하는데 목적이 있다.

환상유로에서 보이드율분포의 변동정도는 각종 2상류 열전달기구 뿐 아니라, 특히 원자로에서 냉각재의 상실사고시 연료봉으로부터 열을 효율적으로 방출하기 위한 기포의 거동을 해석하는데 중요한 목적이 있다.

2. 실험

2-1. 상유동 실험장치

본 연구에 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같이 공기와 물이 동시에 상향 또는 하향유동을 하도록 순환회로를 공기압축기, 공기분출기, 기-수 혼합부, 동심환상유로 시험부, 기-수 분리탱크, 순환수 저장탱크, 원심펌프, 기-수 유량계측부로 구성하였다. 공기와 순환수 유량은 시험부에서 기포류, 슬러그류, 환상유, 침이유동양식이 발생하도록 관로에 설치한 글로

우브벨브로써 조절하였다. 각상의 유량은 침단오리피스를 써서 계측하였다. 순환수는 오리피스를 지나 공기분출기에서 분출된 공기와 기-수 혼합부에서 혼합되어 시험부에 유입하여 상향유동을 한다.

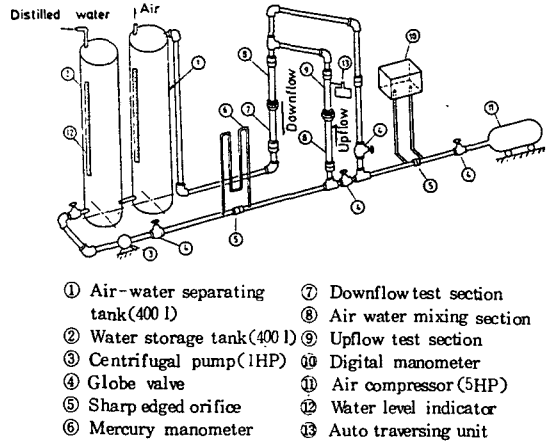


Fig. 1 Schematic diagram of the air-water two phase flow facility

Fig. 2는 기-수 혼합부를 도시한 것으로 공기분출기는 내경 28 mm, 길이 230 mm인 황동관 원주에 10 mm의 일정간격으로 직경을 0.5 mm로하여 120 개 뚫어서 제작하였다.

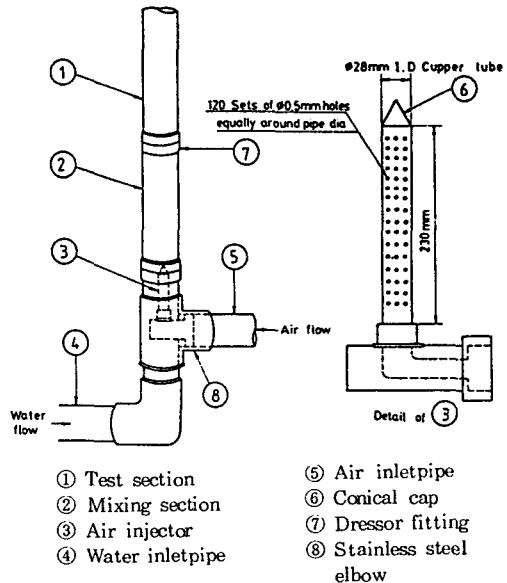


Fig. 2 Two phase mixture injector

기-수 2상류는 내경 38 mm, 길이 1.140 mm인 루사이트 혼합관을 지나 내경 38 mm, 길이 530 mm인 동심환상유로 시험부로 유입한다. 시간평균 국부보이드율(이하 보이드율로 표기)을 계측하기 위하여 2상류가 정상상태로 충분히 발달되는 거리를 감안하여 시험부 출구 단으로부터 325 mm 하부의 위치에 계측공을 뚫어서 프로우브를 장착하였다.

2-2. 동심환상유로 시험부

Fig. 3은 시험부와 내관봉 지지부로서 시험부는 육안관찰을 목적으로 루사이트 재질의 내경 38 mm인 외관에 직경 12 mm, 16 mm, 20 mm인 스테인레스 내관봉을 동심으로 끼워서 동심환상유로를 형성하였다. 동심을 정확하게 유지하고 내관봉의 진동을 방지하기 위해 유동에 영향을 주지 않는 위치에 내관봉지지용 핀 3개를 동일원주상에 120°각도로 장착하고, 내관봉 상하단에는 내관봉 지지용 후랜지 2개를 설치하였다.

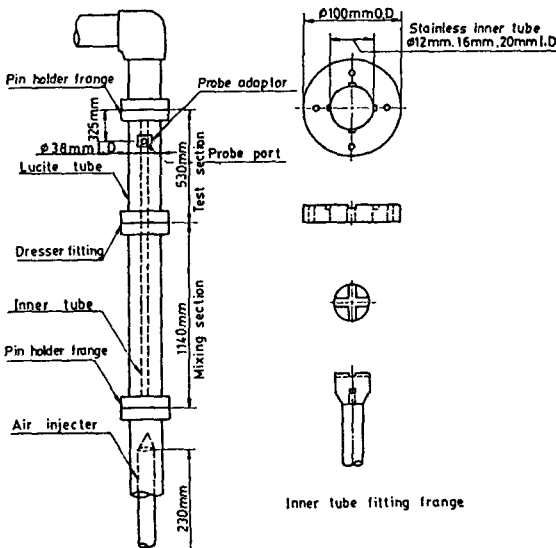


Fig. 3 Test section and inner tube fitting frange

2-3. 계측기기 및 자료처리

본 실험에 사용한 보이드율 계측용 프로우브는 전기전도 프로우브로 보이드율 계측에

간섭을 주지 않도록 Fig. 4와 같이 “L”자형을 자체제작하여 사용하였다. 실험에서 계측한 보이드율을 분석하기 위하여 프로우브 출력신호를 보이드율 계측기에서 보이드율로 검출하여 디지털 저장오실도스코우프에 입력시켰다. 또한 계측한 보이드율에 대한 통계적 해석을 목적으로 FFT를 사용하였다.

반경 방향의 보이드율 확률밀도함수와 관련된 모우먼트들은 원점에 대한 1차, 2차모우먼트, 평균에 대한 분산도, 비대칭도, 첨도로써 계산에 사용한 식들은 다음과 같다.

$$M_n = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha)^n P_i \dots\dots\dots(1)$$

여기서 P_i 와 α_i 는 각각 i 번째의 확률밀도함수와 보이드율, M_n 은 n 번째의 모우먼트를 의미한다. 즉, $n=2$ 는 평균에 대한 분포를 나타내는 분산도 M_2 , $n=3$ 은 보이드율에 해당하는 확률밀도함수 분포의 비대칭성을 나타내는 비대칭도 M_3 , $n=4$ 는 분포의 최대발생빈도의 정도를 나타내는 첨도 M_4 이다. α 는 평균국부보이드율로 다음과 같다.

$$\alpha = \sum_{i=1}^N \alpha_i P_i \dots\dots\dots(2)$$

M_3 와 M_4 를 정규화시킨 비대칭도계수 CM_3 와 첨도계수 CM_4 는 다음과 같다.

$$CM_3 = M_3/M_2^{1.5} \dots\dots\dots(3)$$

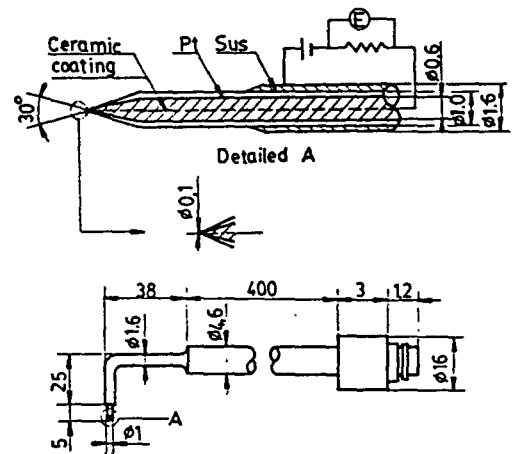


Fig.4 Structure of the electrical conductivity probe

$$CM_4 = M_4 / M_2^2 \dots\dots\dots(4)$$

2-4. 실험방법

본 실험은 결보기 물의 평균속도 J_{SL} 를 0.25 m/s로 일정하게 유지하고 결보기 공기평균속도 J_{SA} 를 0.018 ~ 6.12 m/s까지 10종으로 변화시켜서 각 유동조건에서 소정유동양식이 발생하도록 하였다. 공기와 물의 차압은 각각 수은액주계와 미세전자마노미터로써 측정하였다.

실험은 내관봉 직경 D_i 를 12mm, 16mm, 20mm로 변화시켜 각 경우에 대하여 프로우브를 2mm 간격으로 내관봉 벽면으로부터 외관벽까지 반경방향으로 이송한 후 각점에서 보이드율을 측정하였다.

3. 실험결과 및 검토

본 연구는 보이드율에 상응하는 확률밀도 함수 분포와 관련된 통계량인 비대칭도계수 CM_3 (Fig. 5 ~ Fig. 9)와 첨도계수 CM_4 (Fig. 10 ~ Fig. 14)로써 환상유로의 간극과 간극의 반경 방향 위치에 따르는 보이드율 변동특성을 다음과 같이 구명하였다. 유동양식의 판별은 기수행한 연구결과⁽⁴⁾를 이용하였다. 그림들에서 R_1 , R_2 는 내관봉과 외관의 반경, r 는 내관봉 벽으로부터 측정점까지의 거리를 표시한다.

3-1. 비대칭도계수에 의한 보이드율분포 변동특성 분석

Fig. 5는 기포류인 경우로 환상간극에 관계없이 CM_3 는 양의 큰 값을 지니고 있다. 따라서 각 내관경에 해당하는 보이드율은 저보이드율 영역에서 우측으로 편중하여 분포한다는 사실을 알 수 있다. $D_i = 12mm$ 인 경우 CM_3 는 내관벽쪽에서 큰 값으로 급격히 감소하다가 외관으로 갈수록 증가하는 경향을 보이며 다른 내관경에 비하여 변동성분이 크다. CM_3 의 증가는 아주 낮은 보이드율이 저보이드율 영역에 분포한다는 것을 의미하고, CM_3 의 감소는 보이드율분포의 확장을 의미한다. 환상간극 중앙부 영역에서는 비교적 CM_3 의 변동이 적으므로 보이드율이 거의 균일하게 분포

한다. $D_i = 16mm$ 와 $20mm$ 인 경우는 CM_3 가 내관쪽에서 약간 감소하다가 관중양부부터 증가한 후 다시 외관벽 근처에서 감소하는 경향을 보이나 그 변동은 비교적 적은 편이다. 그러므로 환상간극의 위치에 관계없이 보이드율 변동성분은 거의 동일한 분포가 된다는 사실을 알 수 있다.

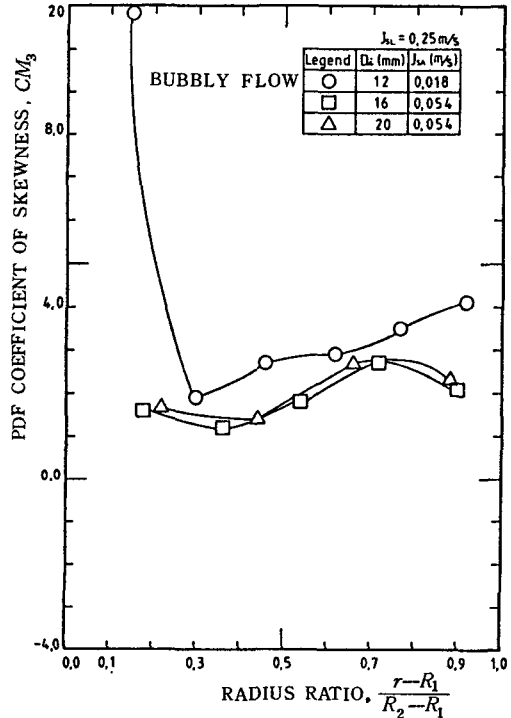


Fig.5 Fluctuations of coefficient of skewness in the annuli for bubbly flow

Fig. 6은 기포류에서 슬러그류로 천이하는 경우로 환상간극과 간극위치에 관계없이 CM_3 는 기포류보다 작은 양의 값을 지니므로, 보이드율 변동성분이 대칭분포에 가까워짐을 알 수 있다. 또한 기포슬러그와 기포간에 합체현상으로 인하여 보이드율이 증가하기 때문에 보이드율 분포는 고보이드율 영역쪽으로 확장분포한다. $D_i = 12mm$ 인 경우 내관벽 근처를 제외하고 각 내관경과 간극위치에 관계없이 CM_3 는 거의 일정하므로 보이드율 변동분포는 거의 같다.

Fig. 7은 슬러그류인 경우로 환상간극과 간극위치에 관계없이 CM_3 는 비교적 0에 근접

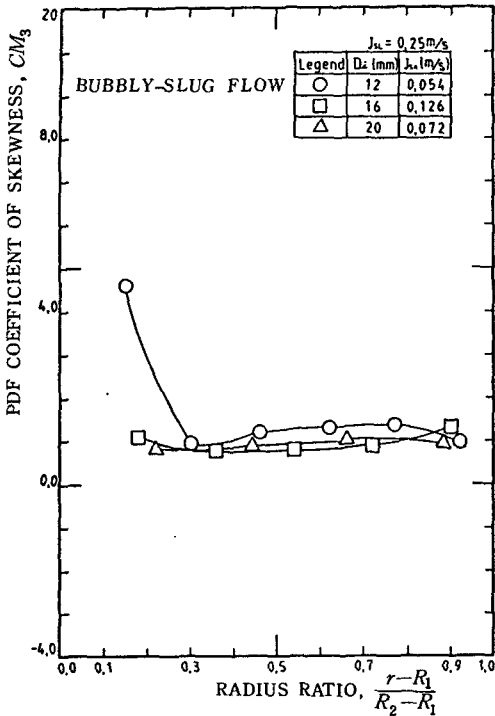


Fig.6 Fluctuations of coefficient of skewness in the annuli for bubbly-slug flow

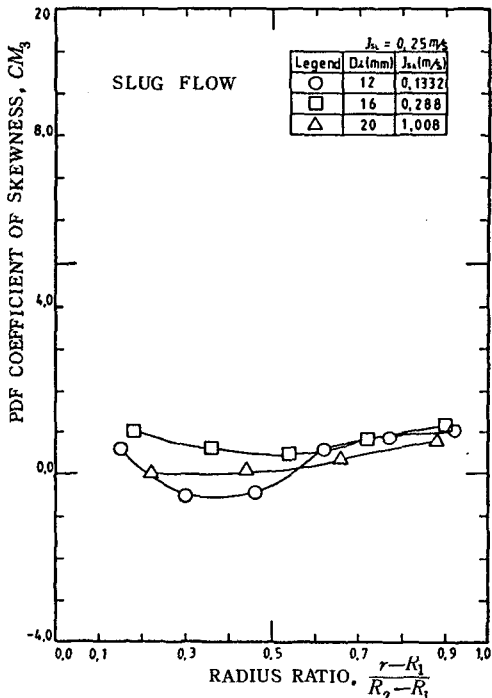


Fig.7 Fluctuations of coefficient of skewness in the annuli for slug flow

한 값을 지니므로 기포류에서 슬러그류로 천이하는 경우보다도 보이드울분포가 고보이드울 영역으로 더욱 확장되면서 저보이드울 영역에는 액체슬러그가, 고보이드울 영역에는 기포슬러그가 지배적으로 거의 대칭분포한다.

$D_i = 12 \text{ mm}$ 인 경우 CM_3 는 내관쪽에서 감소하다 외관쪽으로 갈수록 증가하고 있으므로 보이드울분포가 반경방향에 따라 달라지고 있다.

Fig. 8은 슬러그류에서 환상류로 천이하는 경우로 $D_i = 12 \text{ mm}$ 에서 내관벽면 근처를 제외하고 모든 환상간극과 간극위치의 증가에 따라서 CM_3 는 음의 값에서 0에 가까운 값을 지닌다. 그러므로 내관보다 외관쪽의 보이드울분포가 거의 대칭에 가까워짐을 알 수 있는데 이는 내관쪽에서 보이드울이 고보이드울 영역에서 좌측으로 편중하여 분포하고, 외관쪽으로 갈수록 기상이 감소하여 그 분포가 저보이드울 영역으로 확장됨을 의미한다.

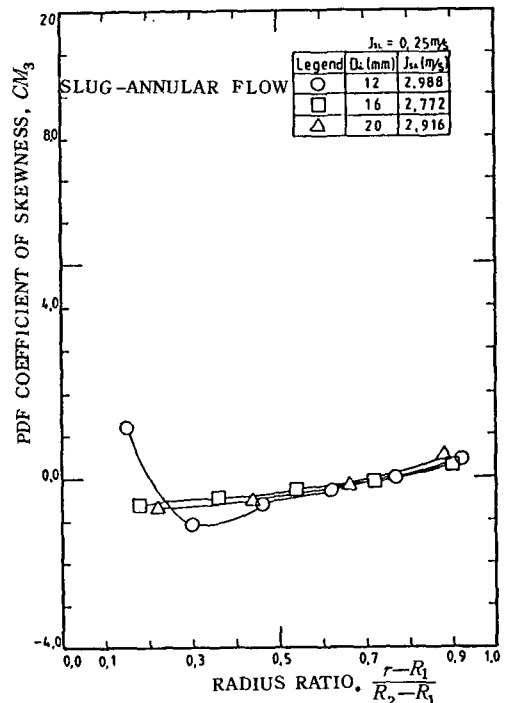


Fig.8 Fluctuations of coefficient of skewness in the annuli for Slug-annular flow

Fig. 9는 환상류인 경우로 환상간극과 간극 위치에 관계없이 CM_3 는 음의 최소치를 지니며 내관에서 외관으로 갈수록 증가하고 있다. 따

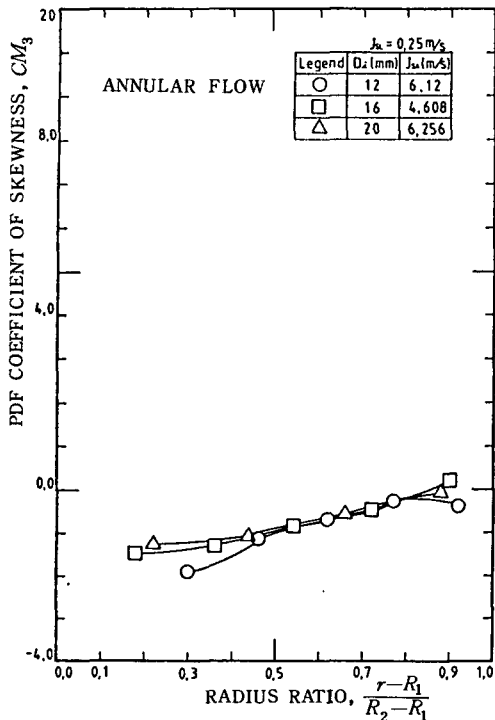


Fig. 9 Fluctuations of coefficient of skewness in the annuli for annular flow

라서 내관쪽의 보이드울은 고보이드울 영역에서 협소한 분포로 나타나고 외관쪽으로 갈수록 보이드울은 저보이드울 영역으로 확장분포하므로 외관벽 근처에서는 액상이 내관쪽보다 더 지배적으로 분포함을 알 수 있다. 그러므로 외관벽 근처에서의 보이드울은 저보이드울과 고보이드울 영역 전반에 걸쳐 대칭적으로 분포한다.

3-2. 침도계수에 의한 보이드울분포 변동특성 분석

Fig. 10은 기포류인 경우로 환상간극에 관계없이 CM_4 는 3보다 큰값을 지니는데 이는 정규분포보다 보이드울분포의 정점이 예리하다는 것을 의미하므로 보이드울은 저보이드울 영역에서 협소하게 분포하여 보이드울의 변동은 거의 없음을 알 수 있다. 또한 어느 환상간극에서나 CM_4 는 무차원 반경비가 증가함에 따라 감소하다가 증가한 후 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 지배적으로 나타나는 보이드울의 발생빈도가 달라짐을 의미하는데 보이드

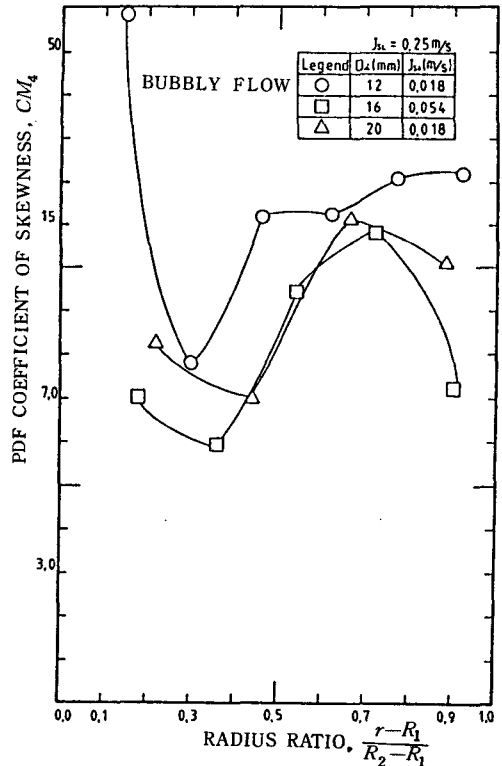


Fig. 10 Fluctuations of coefficient of kurtosis in the annuli for bubbly flow

울분포상에 나타나는 정점은 CM_4 가 큰 경우에 저보이드울 영역에서 예리하게 발생하고, 작은 경우는 약간 증가한 보이드울에서 발생한다.

Fig. 11은 기포류에서 슬러그류로 천이하는 경우로 $D_i=12\text{mm}$ 의 내관벽과 외관벽 근처를 제외하고 환상간극과 간극위치에 관계없이 CM_4 는 3에 가까운 정규분포에 근접하며 거의 일정한 값을 지닌다. 따라서 보이드울분포의 정점은 기포류인 경우보다 감소하고, 기포류보다 높은 보이드울에서 정점이 거의 동일하게 나타난다. $D_i=12\text{mm}$ 인 경우 내관벽 근처에서 CM_4 가 가장 큰 값을 지니므로 가장 낮은 보이드울에서 정점이 발생함을 알 수 있다. 또한 무차원 반경비가 0.3되는 곳까지 CM_4 가 급격히 감소하는데 이는 보이드울이 약간 높은 곳으로 정점이 천이하면서 발생함을 의미한다.

Fig. 12는 슬러그류인 경우로 내관벽과 외관벽 부근을 제외하고 환상간극에 관계없이 CM_4 는 일반적으로 3보다 작은 값을 지니기 때문

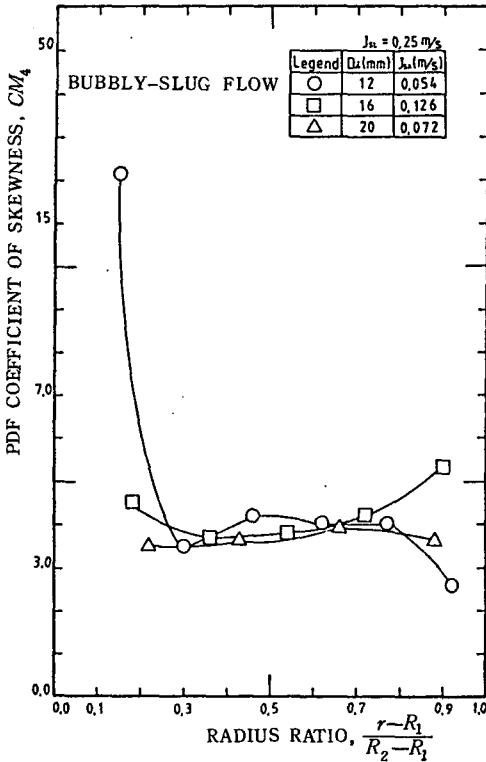


Fig. 11 Fluctuations of coefficient of kurtosis in the annuli for bubbly-slug flow

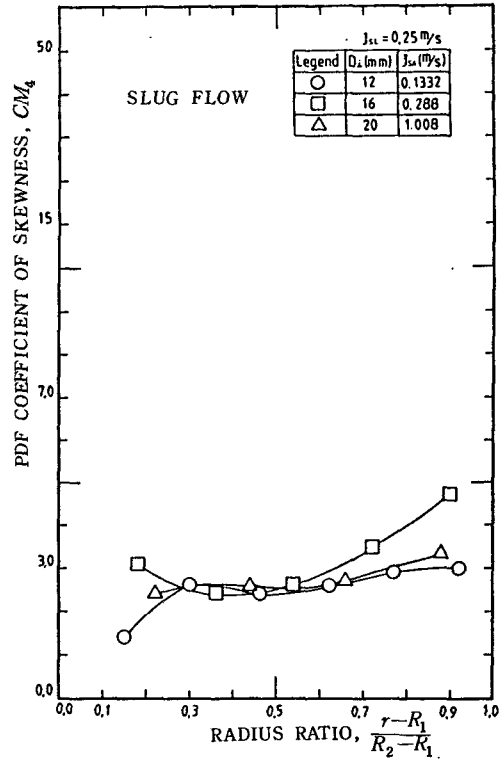


Fig. 12 Fluctuations of coefficient of kurtosis in the annuli for slug flow

에 정규분포보다 평탄한 보이드유펙도가 되며 거의 일정한 정점을 지닌다. 따라서 저보이드유펙과 고보이드유펙 영역에 걸쳐서 분포하는 보이드유펙들이 발생하는 빈도수는 비교적 같다.

Fig. 13은 슬러그류에서 환상류로 전이하는 경우로 $D_i=12\text{ mm}$ 의 내관쪽을 제외하고 환상간극에 관계없이 CM_4 는 3에 가까운 정규분포에 근접하며 거의 일정한 값을 지니므로 정점은 같다. 그러나 환상간극 위치가 증가함에 따라 CM_4 는 약간 감소하므로 정점은 고보이드유펙 영역에서 저보이드유펙 영역으로 천이가 발생한다.

Fig. 14은 환상류인 경우로 환상간극에 관계없이 CM_4 는 3보다 큰 값을 지니므로 보이드유펙의 정점은 슬러그류에서 기포류로 천이하는 경우보다도 더 예리하게 나타난다. 한편 내관에서 외관으로 갈수록 모든 환상간극에서 CM_4 는 급격히 감소하고 있는데 이는 보이드유펙 분포의 정점이 내관에서 외관쪽으로 갈수록 저보이드유펙 영역으로 천이하는 동시에 감소함을 알 수 있다.

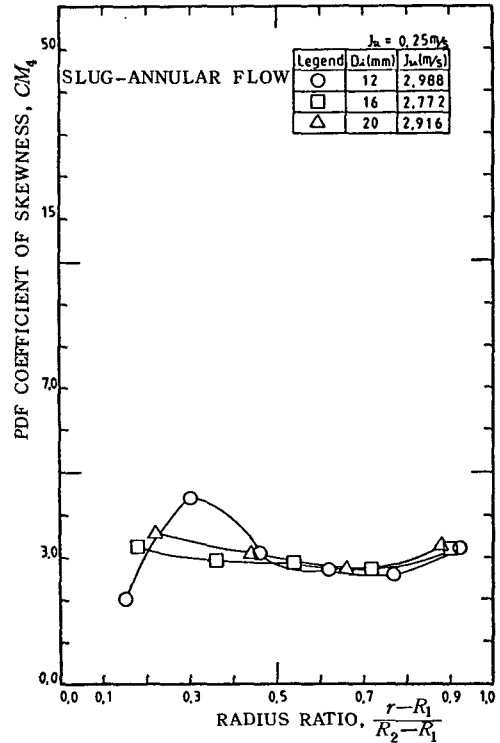


Fig. 13 Fluctuations of coefficient of kurtosis in the annuli for slug-annular flow

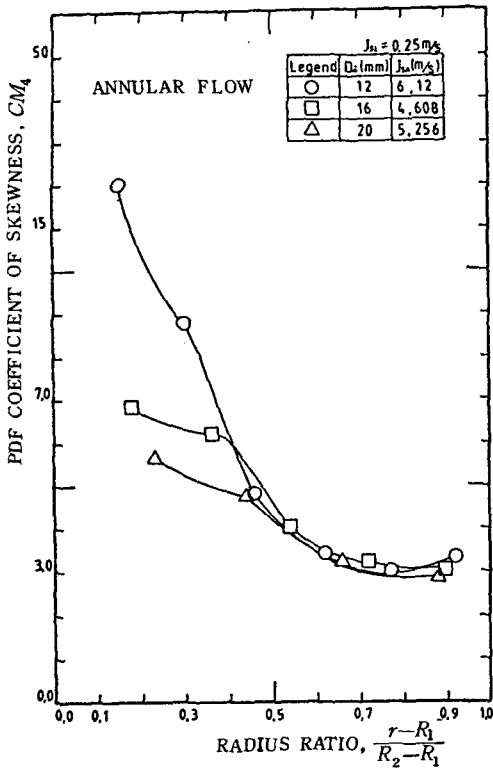


Fig.14 Fluctuations of coefficient of kurtosis in the annuli for annular flow

4. 결 론

기포류인 경우 환상간극에 관계없이 보이드율은 저보이드율 영역에서 예리한 정점으로 비대칭적으로 분포하며 간극의 위치에 따라 보이드율 분포의 대칭성과 정점이 달라진다.

기포류-슬러그류 천이의 경우 내관경이 12mm 하의 내관근방을 제외하고 환상간극과 간극의 위치에 관계없이 보이드율 분포 변동성분과 간극 중앙부 영역에서의 정점은 거의 동일하다.

슬러그류인 경우 환상간극에 관계없이 보이드율은 대칭분포가 되며 간극 중앙부 영역에서는 정점이 거의 같다.

슬러그류-환상류 천이의 경우 환상간극에 관계없이 내관보다 외관쪽의 보이드율 분포가 대칭에 가까와지나 정점은 비교적 같다.

환상류인 경우 환상간극에 관계없이 내관에

서 외관으로 갈수록 보이드율은 고보이드율 영역에서 대칭적으로 분포하며 정점은 저보이드율 영역으로 천이하면서 감소한다.

후 기

본 연구는 1986년도 한국 과학재단의 연구비 지원에 의하여 수행되었기에 이에 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Kazin, I.V., 1964, "Radial Distribution of Stream in Rising Turbulent Steam-Water Flow," Teloenergetika, Vol.11, No.1, pp. 40-43.
2. Ibragimov, M. Kh., Bobkov, V.P. and Tychinskii, N.A., 1974, "Investigation of the Behavior of the Gas Phase in a Turbulent Flow of a Water-Gas Mixture in Channels," High Temperature, Vol.11, pp.535-544.
3. Rouhani, Z., 1976, "Effect of Wall Friction and Vortex Generation on the Radial Distribution of Different Phases," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 3, pp.35-50.
4. Serizawa, A., Kataoka, I. and Michiyoshi, I., 1975, "Turbulence Structure of Air-Water Bubbly Flow-III. Transport Properties," Int. J. Multiphase Flow, Vol.2, pp.247-259.
5. Richter, H.J. and Murphy, S.L., 1979, "Effect of Scale on Two-Phase Counter-current Flow Flooding in Annuli," NUREG/CR - 0312.
6. Crowley, C.J., Block, J.A. and Rothe, P.H., 1976, "An Evaluation of ECC Penetration Data using Two Scaling Parameters," CREATE TN- 233.
7. Richter, H.J., 1981, "Flooding in Tubes and Annuli," Int. J. Multiphase Flow, Vol.7, No.6, pp.647-658.

8. Sekoguchi, K. and Furukawa, T., 1986, "Phase Distribution for Air-Water Two-Phase Flow in Annuli," Bull. of JSME, Vol.29, No.255, pp.3007-3014.
9. 손병진, 김인석, 김문철, 1987, "수직상향이상류에서 동심원관 간극이 유동양식과 보이드분포에 미치는 영향," 공기조화·냉동공학회지, 제 16 권, 제 4 호, pp. 383 - 391.
10. Semenenko, V.F., Korotaev, Y.P. and Nignatulin, B.I., 1986, "True Gas Content of Gas-Liquid Flows in Annular Channels," Teloenergetika, Vol.33, No.1, pp. 65-67.
11. 손병진, 김인석, 김문철, 1987, "수직이상류에서 유동방향과 동심원관 간극이 유동양식과 보이드분포에 미치는 영향—제 1 보 : 상향유동인 경우," 대한기계학회 논문집, 제 11 권, 제 5 호, pp. 856-866.