기액이상류 원심분리기의 성능개선에 관한 연구

김진만†·이준희*·윤용관*·김희동**

A Study of the Performance Improvement of a Centrifugal Separator for Gas-Liquid Two-Phase Flow

Jin-Man Kim, Jun-Hee Lee, Yong-Kwan Yoon and Heuy-Dong Kim

Key Words: Centrifugal Separator(원심분리기), Centrifugal Force(원심력), Gas-Liquid Two-Phase Flow(기액이상류), Tangential Velocity(접선속도), Swirl Vane(스월베인)

Abstract

Gas-liquid separator has been designed for the sake of reducing expenses associated with production operations. To date, a number of gas-liquid separators have been installed and put to use for various applications. Despite the advantages of simple and compact configuration of separator with no moving part, its efficient operation is limited in terms of total pressure losses, separation performance and flow-induced noise and vibration, which are closely associated with the very complicated flow phenomena involved. In the present study, a gas-liquid centrifugal separator with a swirl vane is investigated for the purpose of water separation from compressed moisture air. The 3D Navier-Stokes equations are numerically solved using a fully implicit finite volume scheme. Based upon the obtained solutions, tangential velocities, centrifugal forces, vortices and total pressure losses are analyzed to find out the best design parameters. From the present study, several attempts are made to improve the performance of conventional separators of centrifugal type.

1. 서 론

일반적으로 원심분리기(centrifugal separator)는 유체에 원심력을 가하여 필요로 하는 성분을 분리하는 것으로, 유체가 기체와 액체의 혼합물로 구성되어 있는 경우 기액이상류(gas-liquid two-phase flow) 원심분리기라 하며, 액체와 고체입자의 혼합물인 경우 고액(solid-liquid) 원심분리기, 그리고 기체와 고체입자의 혼합인 경우 기고(gas-solid) 원심분리기라 한다.

† 회원, (주)대주기계 유체기계기술연구소
E-mail : jeiem79@nate.com
TEL : (054)601-7092 FAX : (054)601-7099
* 회원, (주)대주기계 유체기계기술연구소
** 회원, 안동대학교 기계공학부

원심력에 의한 분리작용은 작동유체의 형태에 무관하게 유체 질량의 경중에 의하여 원심력의 크기가 결정되므로, 질량이 상대적으로 무거운 입자들은 바깥쪽에서 회전하게 되며, 가벼운 입자들은 안쪽에서 회전하게 된다. 이러한 이상(two-phase)간의 분리작용은 대개 원심력에 크게 의존하게 되므로, 유체유동에 원심력이 가해지는 과정이 매우 중요하다.

기액이상류 원심분리기는 구조가 간단하고 비교적 소형의 장치로 대용량의 기액이상류를 분리할 수 있으므로, 기체유동으로부터 수분분리가 필요한 공정에서 널리 사용되고 있다[1]. 그러나 원심분리기의 설계는 대부분 시행착오적인 경험에 의존하고 있는 실정이다. 이것은 타의 유체기계들에 비하여 원심분리기의 내부구조가 비교적 단순한 반면, 내부에서 발생하는 유동장이 매우 복잡하여 이해하기 곤란하기 때문이다.

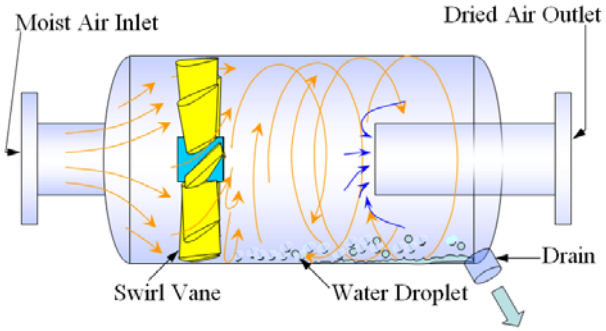
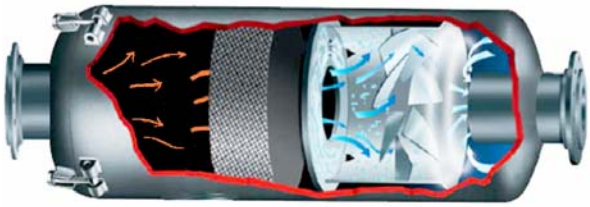


Fig. 1 Schematic diagram of gas-liquid two-phase centrifugal separator

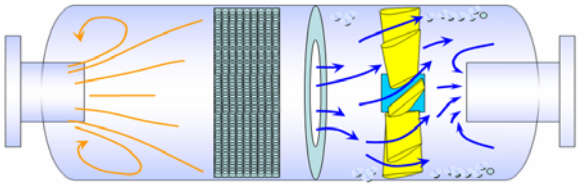
Fig. 1은 기액이상류 원심분리기의 작동원리를 도식적으로 나타낸다. 수분을 포함한 고속유동이 원심분리기의 입구로 유입되고, 스월베인(swirl vane)에 의하여 유동에 접선방향의 속도가 주어지면 원심력에 의하여 액적이 석출되기 시작하며, 기체는 선회류의 중심으로 이동하여 원심분리기 출구로 방출된다. 이때 원심력을 받은 액적은 선회류의 바깥방향으로 이동하면서 질량과 크기가 증가하여, 원심분리기의 벽면에 설치된 드레인 포트를 통하여 배출된다[2,3].

현재 상용화된 제품은 Fig. 2(a)에 모식적으로 나타낸 바와 같이, 원심분리기 입구에서 기액이상류가 유입하면 급확대 유로를 거쳐 원심분리기로 유동하게 된다. 원심분리기 상류에는 제습망이 설치되어 있어 제습망에서 유동에 포함된 수분을 석출하도록 설계되어 있으며, 제습망을 통과한 기액이상유동은 스월베인을 통과하면서 원심력을 얻게 된다. 이때 원심분리기 내부에서는 매우 강한 와류가 형성되며, 이 과정에서 원심분리기 외벽쪽으로 수분이 유동하여 벽면 하부에 설치한 드레인을 통하여 수분이 배출된다. 그러나 Fig.2(b)의 내부유동 모식도에 나타낸 바와 같이, 원심분리기 입구에는 급확대로 인하여 유동의 재순환영역이 발생하고, 이는 상당한 유동손실을 야기한다. 또 제습망은 유속이 비교적 작은 경우에 어느정도 제습효과를 나타내지만, 유속이 빠른 경우에는 유동의 손실과 난류성분을 증가시키며, 스월베인은 원심분리기의 출구관과 가깝게 설치되어 있어, 수분석출에 요구되는 충분한 길이의 선회류를 형성하지 못한다.

현재 국내 대부분의 압축기 시스템에 사용되고 있는 원심분리기는 수분 분리성능이 저조하여,



(a) Outlook of conventional centrifugal separator



(b) Sketch of internal flow

Fig. 2 Conventional centrifugal separator

실제 산업현장에 심각한 문제를 야기하고 있을 뿐만 아니라 원심분리기 내부에서 큰 압력손실이 발생하여 대량의 구동에너지를 소비하는 주원인으로 작용하고 있다. 이것은 기액이상류 원심분리기가 종래 물과 고체입자를 분리하기 위한 고액이상류의 원심분리기의 설계자료에 근거하여 제조되었기 때문이다.

기액이상류 원심분리기의 성능은 원심분리기 내부에서 발생하는 복잡한 유동장과 관련되므로, 기존 원심분리기의 성능향상을 위해서는 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 일반적으로 원심분리기의 성능은 원심력의 크기, 원심분리 과정에서 발생하는 전압력 손실, 원심분리기 출구의 동압 등으로 설명할 수 있으나, 이와 같은 성능인자들은 원심분리기의 직경, 길이, 원심력을 발생시키는 유체장치 등의 기하학적인 변수에 의하여 영향을 받을 뿐만 아니라, 원심분리기 입구에

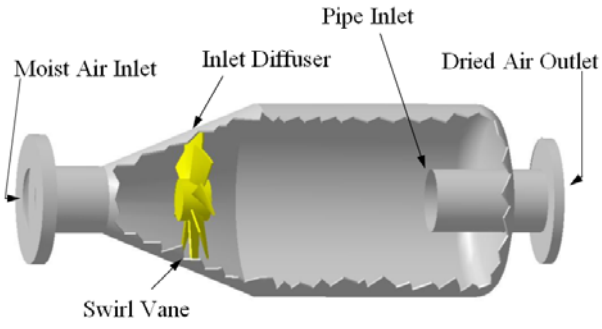


Fig. 3 Outlook of the present centrifugal separator

서 발생하는 유속의 크기와 분포, 난류강도, 유량 등의 유체역학적 인자들에 의하여도 상당부분 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 원심분리기 입구에 제습망을 없애고 입구디퓨저를 설치하여 입구디퓨저 중간 부분에 스월베인을 위치시킨 형상의 원심분리기에 대하여 수치해석을 수행하였고, 원심분리기 내부의 유동특성을 상세하게 조사하였다.

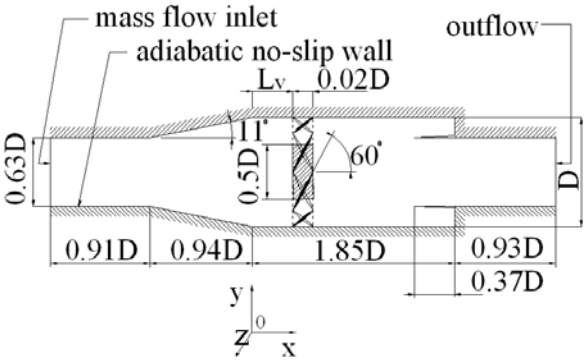
2. 수치해석

Fig. 4는 기액이상류 원심분리기의 계산 영역 및 경계조건을 나타낸다. 원심분리기통의 직경은 D=539.8mm, 길이 1.85D이며, 전단에는 0.94D의 길이와 확대반각 11.1°의 입구디퓨저가 직경 0.63D 및 길이 0.91D의 관과 연결되어 있다. 또 후단에는 직경 0.63D 및 길이 1.3D의 관이 0.37D의 길이만큼 원심분리기통 내부로 삽입되어 있다. 원심분리기 입구로부터 유입된 작동기체(공기, γ=1.4)는 스월베인을 지나며 선회유동으로 변화한다. 이때 스월베인의 전단은 원심분리기통과의 거리가 L_v=-0.37D~1.11D의 위치에서 변화하며, 직경 0.5D 및 길이 0.02D의 코어(core)에 설치된 8개의 베인은 유동과 60°의 각도를 이룬다.

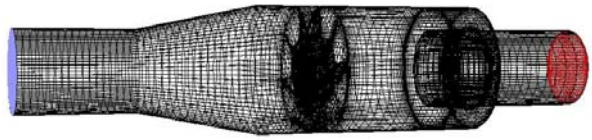
수치계산에는 3차원 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하였다. 수치계산에 사용된 적분방적식의 형태는 문헌(4)의 경우와 동일하다. 지배방정식에서 대류항은 upwind scheme, 시간항의 적분은 4 단계 Runge-Kutta법을 적용하였고, 스월베인 벽 근처의 유동을 적절히 모사하기 위하여, standard k-ε RNG 난류모델과 standard wall function을 적용하였다.

본 수치계산에 적용된 경계조건으로는 원심분리기 입구에서 mass flow inlet 조건, 출구의 계산경계에는 outflow 조건을 적용하였으며, 원심분리기 내부를 구성하는 모든 벽면에는 단열 no-slip 조건이 적용되었다. 수치계산에서는 입구의 압력, 온도 및 질량유량을 각각 835kPa, 279.15K, 58.304kg/s로 고정하였으며, 출구에 flow rate weighting을 1로 하여 계산을 수행하였다. 수치계산에는 약 300,000점의 정렬격자가 사용되었다.

3. 결과 및 고찰



(a) Computational domain



(b) Grid representation

Fig. 4 Computational domain and grid representation of the present centrifugal separator

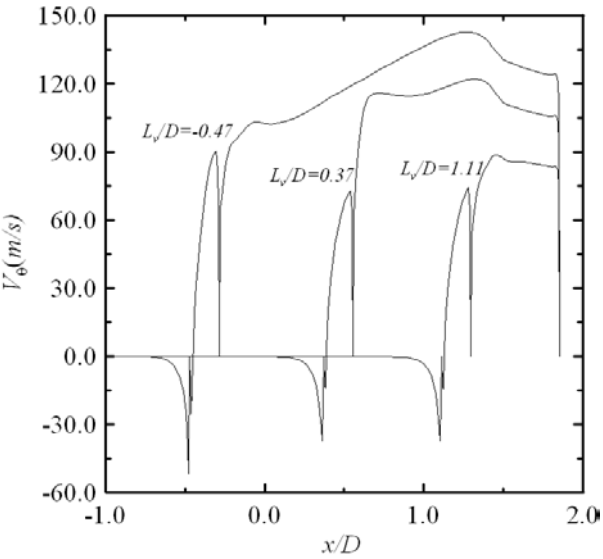


Fig. 5 Tangential velocity distributions along the separator at y/D=0.9 and z=0

Fig. 5는 원심분리기 내부의 벽면 부근의 위치 y/D=0.9, z=0인 지점을 지나는 유동의 접선방향 속도 V_θ를 나타내며, 그림에서 x/D=0.0인 지점이 원심분리기의 평행부가 시작되는 지점이다. 스월베인이 원심분리기의 입구디퓨저 내부에 위치하여 스월베인의 전단이 L_v/D=-0.47에 위치하는 경

우, 접선방향의 속도는 x/D<-0.7에서 0이지만 x/D>-0.7에서 스월베인에 의해 접선방향의 속도성분이 증가하다가 x/D=-0.47을 지나서 회전방향이 바뀌어서 접선방향의 속도가 증가한다. 증가하는 접선방향의 속도는 스월베인의 후단에서 감소하다가 다시 원심분리기의 길이방향으로 증가하여 최고값을 가진후, 다시 감소하여 원심분리기의 끝단에서 0으로 된다. 스월베인의 위치가 원심분리기의 평행부로 이동하여 스월베인의 전단이 L_v/D=0.37에 위치하는 경우, 접선방향의 속도는 스월베인이 입구디퓨저내에 있는 경우에 비해서 감소한다. 이러한 경향은 스월베인의 위치가 입구디퓨저 내부로 이동하여 선회류의 길이가 증가하면 접선방향의 최대속도가 증가하고, 스월베인의 위치가 원심분리기 하류부에 위치할수록 접선방향의 최대속도가 감소한다. 원심분리기의 유동에서 임의의 수분입자가 받는 원심력은 유동 중심축의 거리에 반비례하고 접선방향의 속도의 제곱에 비례하므로, Fig. 5에서 원심분리기 길이에 대한 접선방향의 속도는 실제 수분입자에 작용하는 원심력의 크기에 비례한다. 이때 실제의 유동에서 일정크기 이상의 접선방향 속도가 주어지면 수분이 석출되기 시작하며, 이때 석출되는 수분의 량은 일정크기 이상의 접선방향 속도와 이 속도가 유지되는 원심분리기의 길이에 비례한다.

Fig. 6은 원심분리기 출구관이 위치하는 Lv/D=1.48의 단면에서 직경방향의 접선속도분포를 나타낸다. 그림의 횡축은 반경방향의 길이 r을 원심분리기의 직경으로 무차원화 하였고, r/D=0.31의 위치에 출구관의 끝단이 위치한다. 그림으로부터 접선방향의 속도는 유동의 중심에서 V_θ=0.0이지만, 반경방향의 길이가 증가할수록 증가하여 출구관이 위치하는 지점에서 접선방향 속도는 0이 되고 다시 출구관과 원심분리기의 벽면 사이의 공간에서 일정한 접선방향의 속도를 유지한다. 따라서 스월베인을 지나서 접선방향의 속도를 얻게된 유동은 원심분리기 벽면과 출구관 사이의 공간에서도 유동의 접선방향의 속도를 유지한다. 구체적으로 스월베인의 전단이 Lv/D=-0.47에 위치하는 경우에 출구관 내부의 속도보다 출구관과 원심분리기벽 사이의 공간에 위치하는 접선방향 속도가 더 높게 나타나며, 스월베인의 위치가 원심분리기 평행부내로 이동하여 Lv/D가 증가하면 출구관 내부의 접선방향 속도가

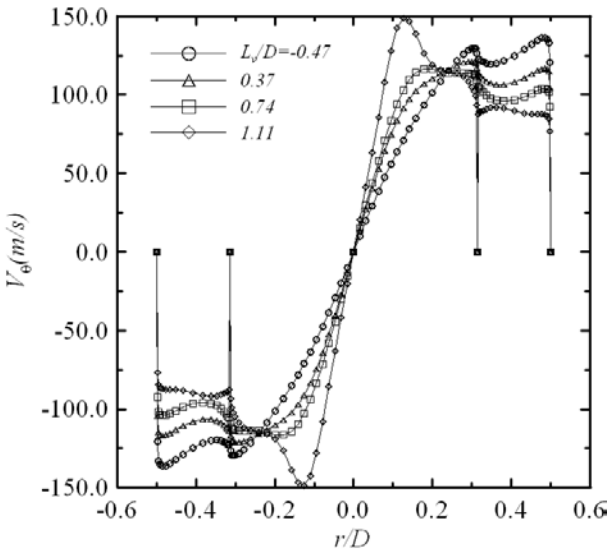
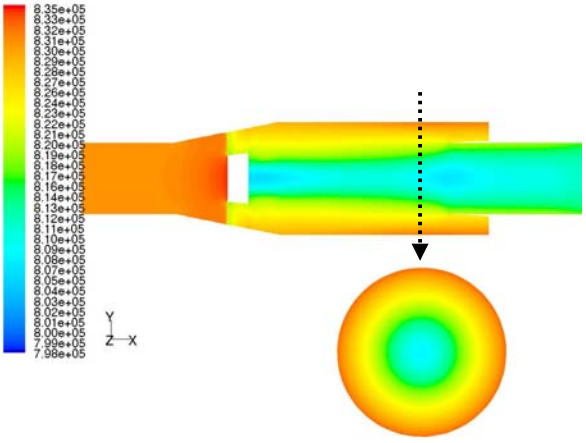


Fig. 6 Tangential velocity distributions along sectional diameter at L_v/D=1.48

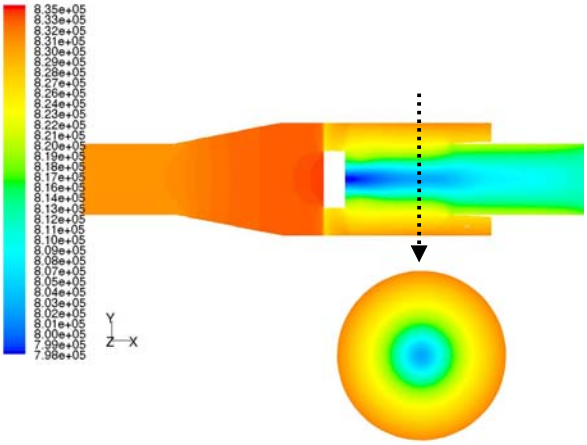
출구관 외부의 속도보다 높게 나타난다. 실제의 유동에서 Lv/D=1.11의 경우와 같이 출구관 내부의 접선방향 속도가 출구관 외부보다 높은 경우, 수분이 석출되지 못하거나 석출된 수분이 비산되어 출구관으로 배출되는 경우가 발생한다.

Fig. 7은 스월베인이 입구디퓨저에 위치하는 경우(Lv/D=-0.47)와 원심분리기 평행부에 위치하는 경우(Lv/D=0.37), z=0인 유동중심축의 단면과 x/D=1.30의 지점에서의 단면 정압분포를 나타낸다. 그림으로부터 정압은 벽면에서 유동의 중심쪽으로 이동할수록 감소하며, 저압부인 유동중심에는 강제와가 존재한다. 스월베인이 원심분리기의 입구디퓨저 내부에 위치하는 경우, 스월베인의 코어(core) 뒤에 발생하는 압력강하는 스월베인이 원심분리기의 평행부에 위치하는 경우에 비하여 작으며, 원심분리기 벽면에서의 압력이 훨씬 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 실제의 유동에서 스월베인이 입구디퓨저에 설치되었을 경우, 원심분리기 평행부에 설치하는 경우에 비하여 벽면쪽에 더욱 큰 밀도분포를 형성할 수 있고, 더욱 효과적으로 수분을 석출할 수 있음을 나타낸다.

Fig. 8은 스월베인의 설치위치가 변하는 경우 원심분리기 내부의 유적선(pathline) 분포를 나타낸다. Lv/D=-0.47인 경우, 유적선은 유동방향으로 평행하게 흐르다가 스월베인을 지나서 접선방향으로 선회유동한다. 스월베인을 통과한 유동은

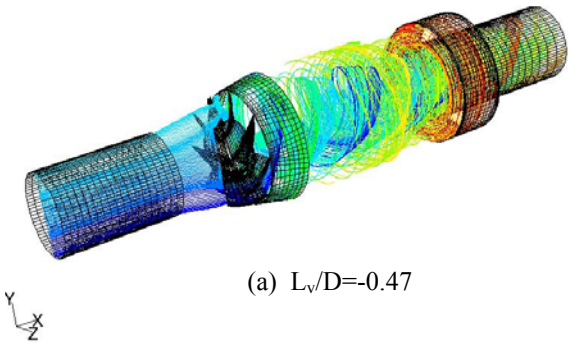


(a) L_v=-0.47D

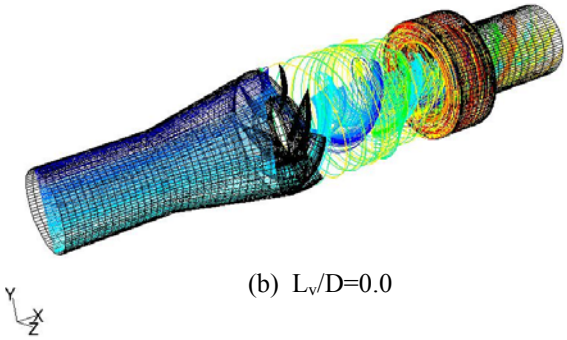


(b) L_v=0.37D

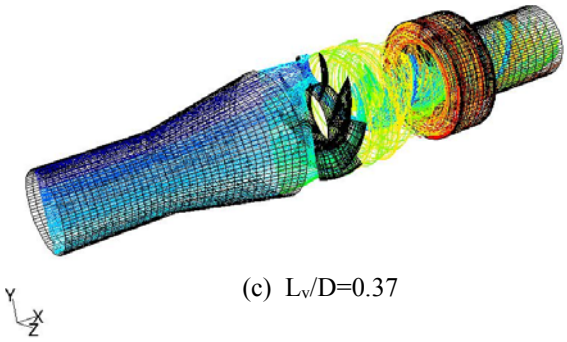
Fig. 7 Contour of static pressure



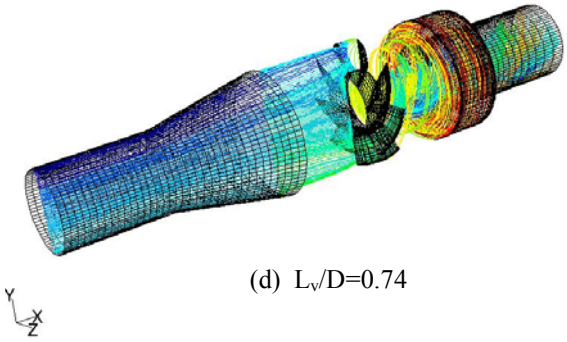
(a) L_v/D=-0.47



(b) L_v/D=0.0



(c) L_v/D=0.37



(d) L_v/D=0.74

Fig. 8 Pathline distributions inside centrifugal separator

유동의 중심부분에 형성되는 강제와와 원심분리기 벽면 근처에 형성되는 자유와의 성분으로 나뉘게 되며, 강제와 성분은 출구관을 통하여 배출되고 자유와 성분은 원심분리기의 평행부를 따라 선회유동하면서 출구관 외부와 원심분리기 벽면 사이의 공간에서 선회유동을 한 후, 출구관을 통하여 배출된다. 그림으로부터 스월베인이 원심분리기의 입구디퓨저 내부에 위치하는 경우, 자유와 성분이 우세하지만 원심분리기의 평행부에 위치하여 Lv/D이 증가하는 경우, 강제와 성분이 강해지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 사실로부터 실제의 기액이상류 유동에서 스월베인이 원심분리기 입구디퓨저 내부에 위치하는 경우가 원심분리기 평행부에 위치하는 경우에 비하여 효과적으로 수분석출 및 분리를 할 수 있는 것을 알 수

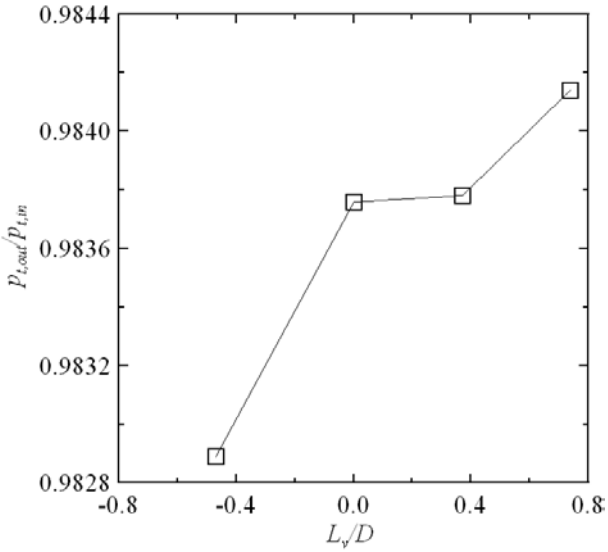


Fig. 9 Effect of swirl vane location on total pressure loss

있다.

Fig. 9는 스월베인이 Lv/D=-0.47, 0.0, 0.37 및 0.74의 지점에 위치하는 경우, 원심분리기 출구와 입구의 전압비를 비교하였다. 종축은 원심분리기 출구의 전압을 입구의 전압으로 무차원화 하였다. Lv/D=-0.47인 경우, 원심분리기 출구에서의 전압손실이 가장 크며, 스월베인의 위치가 원심분리기 평행부로 이동하여 Lv/D가 증가하는 경우, 전압손실은 작게 나타난다. 그러나 원심분리기 출구에서의 전압손실은 입구의 전압에 비해서

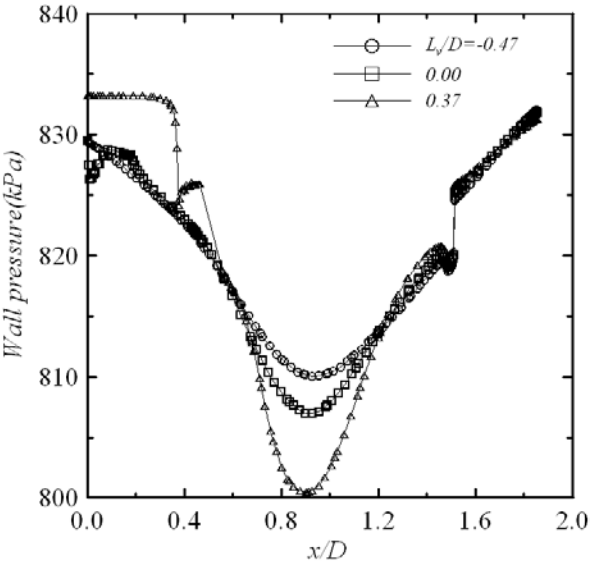


Fig. 10 Static pressure distributions along the centrifugal separator wall

1.56～1.72% 정도이므로, 스월베인의 위치는 단순히 원심분리기에서 발생하는 전압손실에 큰 영향을 미치지 않는다.

Fig. 10은 원심분리기 평행부 벽면의 정압분포를 나타낸다. 실제의 기액이상류 원심분리기에서 수분 배출관의 위치는 원심분리기 벽면의 압력이 가장 높은곳에 위치할 경우, 분리된 수분을 효과적으로 배출할 수 있다. 그림에서 원심분리기 벽면의 압력은 평행부로부터 감소하기 시작하여 원심분리기의 중간 지점에서 가장 낮은 압력분포를 보인다. 이후 벽면의 정압은 원심분리기의 끝단으로 이동하면서 증가하여, 출구관이 위치하는 L_v/D=1.48에서 급격하게 증가하고 원심분리기의 끝단에서 벽면정압이 가장 크다.

4. 결 론

본 연구는 기액이상류 원심분리기 내부의 유동특성을 수치해석적으로 조사하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 기액이상류 원심분리기에서 석출되는 수분의 량은 일정크기 이상의 접선방향 속도와 이 속도가 유지되는 원심분리기의 길이에 비례한다.

(2) 스월베인의 위치가 원심분리기의 입구디퓨저에 위치하는 경우, 원심분리기의 평행부에 위치하는 경우에 비하여 강제와의 발생이 감소하며, 원심분리기 벽면 부근의 압력이 높아진다.

(3) 원심분리기 벽면의 압력은 원심분리기의 중간 지점에서 가장 낮으며, 원심분리기의 끝단에서 가장 높다.

참고문헌

(1) Coker, A. K., 1993, "Understanding Cyclone Design," *Chemical Engineering Progress*, Vol. 89, pp. 51~55.

(2) Seinfeld, J. H., 1975, "Air Pollution: Physical and Chemical Fundamentals," McGraw Hill, Inc. USA.

(3) Svarovsky, L., 1984, "Hydrocyclones," Technomic Publishing Co., Inc., New York.

(4) Kim, H. D., Kim. J. H. and Park, K. A., 2003, "Study for the Gas Flow through a Critical Nozzle," Proceedings of 4th ASME-JSME Fluids Engineering Conference, FEDSM2003-45593.