

공기조화용 버터플라이 밸브 하류에서의 3차원 유동특성

박 상 원* · 이 상 우**

(1999년 7월 26일 접수)

Three-Dimensional Flow Characteristics in the Downstream Region of a Butterfly-Type Valve Used in Air-Conditioning Systems

Sang Won Park and Sang Woo Lee

Key Words: Butterfly Valve(버터플라이 밸브), Disk Open Angle(디스크 회전각), Turbulent Intensity(난류강도), Three-Dimensional Flow(3차원 유동)

Abstract

Oil-film flow visualizations and three-dimensional flow measurements have been conducted in the downstream region of a butterfly-type valve used in air-conditioning systems, with the variation of a disk open angle. The flow visualizations in the flow symmetry plane show that there are a pair of counter-rotating separation/recirculation zones as well as two jet-like near-wall flows. These flow disturbances are strongly depends on the disk open angle. Based on the flow visualization, a qualitative flow model is suggested in the near-field and downstream region of the valve disk. For a small disk open angle, the mean velocities and turbulent intensities have relatively small values in the near-field of the valve disk, but they do not show uniform distributions even in some downstream region. With an increment of the disk open angle, mean velocity variations and turbulent intensities are greatly increased in the immediate downstream region, but uniform distributions are quickly resumed as departing from the valve disk. The mass flow rate remains nearly constant for the disk open angles less than 30 degrees, meanwhile it strongly depends on the disk open angles between 45 and 75 degrees. The pressure loss is found to be about zero for the disk open angles less than 45 degrees, but is substantially increased for those larger than 75 degrees.

기호설명

K : 압력손실계수, 식 (1) 또는 식 (2)

D : 원판 직경

D_d : 버터플라이 밸브 디스크 직경

H : 수두, 식 (1)

\dot{m} : 노즐 유량계로 측정된 유량

\dot{m}_0 : 디스크 회전각이 0도일 때 노즐유량계로 측정된 유량

P_s : 정압

P_t : 전압

Re_D : Reynolds 수 = $U_\infty D / \nu$

Ti : 대칭면에서의 난류강도

$$= (\overline{u'^2} + \overline{v'^2})^{1/2} / (U^2 + V^2)^{1/2}$$

u' : x-축방향 섭동성분

v' : y-축방향 섭동성분

U : x-축방향속도

U_∞ : 밸브 상류의 입구 유동속도

V : y-축방향속도

W : z-축방향속도

x : 유동방향 좌표, Fig. 1

y : 높이방향 좌표, Fig. 1

z : 폭방향 좌표, Fig. 1

* 회원, 국립금오공과대학교 대학원 기계공학부

** 회원, 국립금오공과대학교 기계공학부

E-mail : swlee@knut.kumoh.ac.kr

TEL : (0546)467-4209 FAX : (0546)467-4050

- α : 디스크 회전각
- ν : 동점성계수
- ρ : 밀도

1. 서 론

버터플라이(butterfly) 밸브는 대형 건물이나 산업체의 공기조화 시스템에서 유량의 분배 및 제어에 사용될 뿐만 아니라, 각종 엔진의 흡입 공기유량의 제어에도 널리 쓰이고 있다. 지금까지 버터플라이 밸브에 대한 유동특성 연구는 주로 밸브의 압력손실계수, 토크특성, 유량제어 특성 등에 대해서 이루어졌다. 1985년 Addy 등⁽¹⁾은 압축성 유동의 제어에 사용되는 버터플라이 밸브의 성능에 대하여 연구하였다. 그들은 버터플라이 밸브에서 초크 유동의 시작점, 정체압력 손실, 정압의 회복 등에 대하여 연구하였다. Eom⁽²⁾은 구멍이 뚫린 회전판을 갖는 버터플라이 밸브의 성능에 대하여 연구하였고, 밸브 디스크의 직경이 밸브의 유량제어 특성에 미치는 영향에 대해서도 실험을 수행하였다. Morris와 Dutton⁽³⁾은 압축성 유동에서 작동하는 버터플라이 밸브의 토크 특성에 대하여 연구하였다. 그들은 밸브 디스크에서의 유동의 박리와 재부착 현상이 밸브의 토크 특성에 큰 영향을 줌을 밝혔다. Shim과 Chang⁽⁴⁾은 유한요소 방법을 적용하여 밸브 디스크의 회전각도가 45도일 때 버터플라이 밸브 하류의 3차원 유동특성을 연구한 바 있다.

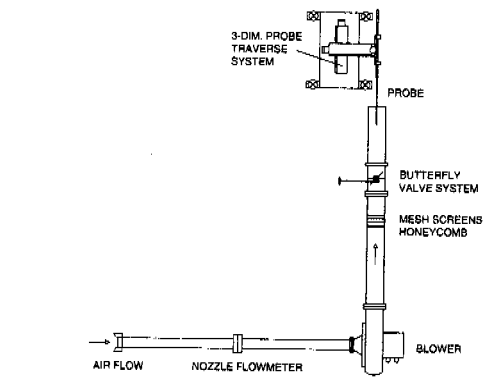
현재 많은 산업체에서 공기조화 시스템의 유량 제어용으로 버터플라이 밸브가 널리 사용되고 있다. 특히 화학섬유 등의 제조공정에서는 유량제어에 사용되는 밸브에 의해 발생하는 유동의 교란이 그 하류의 생산공정에 큰 영향을 미친다. 그러나 지금까지 이 분야에 응용되는 유량제어 밸브 하류의 유동특성에 대한 연구, 특히 디스크 회전각의 변화에 따른 밸브 하류 유동특성에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 디스크 회전각에 따른 공기조화용 버터플라이 밸브의 유동제어 특성 및 그것에 의해 야기되는 하류 유동의 교란에 대하여 연구하고자 한다. 이를 위하여 실제 산업체에서 사용되고 있는 버터플라이 밸브에 대하여, 디스크 회전각 α 를 변화시키면서 그 하류에서의 유동의 가시화연구와 3차원

평균속도 및 난류강도 측정 실험을 수행하고자 한다.

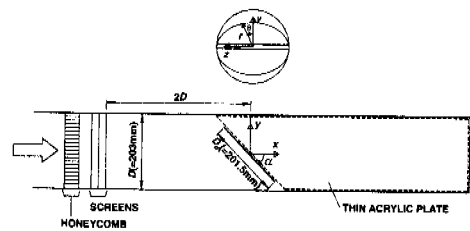
2. 실험

2.1 실험장치

본 연구의 실험장치는 Fig. 1(a)에서와 같이 크게 노즐 유량계, 터보 송풍기, 입구 원관, 입구 유동안정기, 버터플라이 밸브, 하류 원관 등으로 구성된다. 노즐 유량계는 국제 표준규격인 ISO 5167⁽⁵⁾에 의거하여 제작하였고, long-radius nozzle 형상을 채택하였다. 일반적으로 노즐 유량계의 유량계수(discharge coefficient)는 Reynolds 수에 의존하므로, 반복계산으로 최종 값을 구하였다. 터보 송풍기는 인버터에 의해 유량이 조절될 수 있으며, 입구 파이프의 내경 D 는 203mm이다. 밸브 상류에 설치된 유동안정기는 허니컴과 3개의 메쉬 스크린으로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용한 버터플라이 밸브는 화학섬유 제조공정의 공조 설비에 사용되고 있는 것과 동일하며, 그 자세한 제



(a) Overall view



(b) Detail of butterfly-type valve

Fig. 1 Experimental apparatus

원은 Fig. 1(b)와 같다. 밸브 디스크는 두께가 2mm인 스테인리스 스틸 판으로 제작되었고, 그 직경 D_d 는 201.5mm이다. 이것은 직경이 20mm인 스테인리스 스틸 원봉에 용접되어 있으며, 밸브 디스크는 이 원봉을 중심으로 회전된다. 밸브 디스크의 회전각도 α 는 Fig. 1(b)에서와 같이 정의되며, 디스크 면이 입구 유동과 평행할 때 그 값이 0도이다.

버터플라이 밸브가 입구 유동과 평행하게 배치될 때, 즉 회전각 α 가 0도일 때 입구 유동안정기 하류 원형 덕트에서의 평균유속 및 난류강도는 각각 8.0m/s와 1.0%로 일정하게 유지하였다. 본 연구에서는 Fig. 1(b)에서와 같이 스테인리스 스틸 원봉의 중심을 좌표계의 원점으로 설정하였고, 하류방향을 x -축, 높이방향을 y -축, 그리고 원관의 폭방향을 z -축으로 설정하였다. 프로우브의 정밀한 이송을 위해 3차원 자동이송장치를 사용하였다. 이 장치는 세 축방향으로 컴퓨터에 의해 자동이송되는데, 각 이송축은 볼나사와 직선운동가이드로 이루어진 직선유닛, 스테핑모터 및 스테핑모터 드라이버 등으로 구성되어 있다. 이 3차원 이송장치는 수평조절이 가능한 지지대에 탑재되어 있다.

본 연구에서는 IBM PC AT-486으로 전체 측정 시스템을 온라인화하였으며, 컴퓨터에는 다기능 입출력보드(National Instruments, AT-MIO-16D-H-9)가 내장되어 있다. 압력변환기(Furness Controls, FCO12)에 의해 변환된 압력신호는 다기능 입출력 보드의 12 비트 A-D변환기를 통해 컴퓨터로 전달된다. 프로우브의 이송은 앞에서 언급한 3차원 자동이송장치에 의해 이루어졌고, 스테핑모터는 전용 드라이버의 펄스입력을 통해서 제어된다. 이 디지털 펄스는 다기능 입출력보드로부터 공급된다. 본 연구에서는 분사구멍 하류에서의 3차원 유동 및 압력의 손실을 측정하기 위해 지지대 형태가 직선인 원추형 5공프로우브를 사용하였다. 이 5공프로우브는 미국 United Sensors사에서 특별한 사양으로 주문, 제작되었다. 이 5공프로우브의 선단 직경은 3.2mm(0.125인치)이고, 프로우브 지지대는 6.4mm(0.25인치)로 보강되어 있다. 프로우브의 총 길이는 1.12m(44인치)이며, 이중 보강되지 않은 부분의 길이는 프로우브 선단에서 0.254m(10인치) 정도이다. 본 연구에서는 Fig. 1(a)에서와 같이 이 직선형 5공프로우브를 채널 벽면

과 평행하게 배치하여 밸브 하류에서의 3차원 유동을 측정하였다. 본 실험에서는 프로우브 고정법(non-nulling method)을 적용하여 5공프로우브를 보정하였다.⁽⁶⁻⁷⁾ 5공프로우브의 보정에는 분해능(resolution)이 0.2도인 2축회전장치를 사용하였고, 피치각과 요각의 보정범위는 각각 -40도에서 40도 사이이며 5도 간격으로 보정실험이 이루어졌다. 5공프로우브의 5개의 압력을 순차적으로 측정하기 위하여 압력스캐너(Furness Controls, FC091-6)를 사용하였고, 이 압력스캐너도 다기능 입출력보드를 이용하여 제어하였다. 밸브 하류 대칭면에서의 난류강도 Ti 및 속도의 크기 $(U^2 + V^2)^{1/2}$ 을 측정하기 위해서 정온형 열선유속계(Kanomax, 1010)를 사용하였다. 이때 직경이 5 μ m인 I-형 텅스텐 열선을 이용하였다.

2.2 유동의 가시화 방법

일반적으로 본 연구에서와 같이 비교적 Reynolds 수가 큰 난류 유동에 대한 유동의 가시화는 그다지 용이하지 않다. 본 연구에서는 z 가 0인 x - y 평면 즉 유동의 대칭면에서는 z -축 방향의 평균 유속이 0인 점에 착안하여 새로운 유동의 가시화 기법을 개발하였다. 이 방법은 이 대칭면에 두께가 매우 얇은 판을 설치하고 그 평면 위에서 벽면 유동 가시화를 수행하는 것이다. 이 경우 벽면의 존재로 인한 추가적인 마찰의 증가로 실제 유동에 변화를 줄 수 있지만, 유동의 평균 궤적을 정성적으로 파악하는 데는 크게 문제가 되지 않을 것이다. 이 아크릴 판에 의한 면적 차폐율(blockage ratio)은 1.25%에 불과하였고, 그 선단부를 날카롭게 가공하여 유동의 교란을 최소화하였다. 또한 중력에 의한 유선의 변형을 없애기 위해 이 판을 중력에 대해 수직으로 배치하였다. 일반적으로 벽면에서의 유선을 가시화하는 기법에는 유적법(oil-dot method), 유막법(oil-film method) 등이 있는데, 이것들은 사용하는 기름 및 궤적 표시용 분말의 종류에 따라 다시 여러가지 종류로 구분된다. 본 연구에서는 대칭면 유동의 가시화를 위해 흑연분말(carbon black)과 등유(kerosene)의 혼합물을 이용한 유막법을 적용하였다. 등유는 적당한 증발성을 가지고 있으므로 실험이 끝난 뒤 윤활유와 같이 흘러 내리지 않으면서 흑연가루의 궤적을 잘 나타내 준다. 흑연분말과 등유의 혼합비는 실험할 유동조건에 따라 크

게 달라지므로 그 비율을 잘 결정해야 한다. 실험 전에 대칭면에 설치될 두께 2mm의 아크릴 판에 흰색 점착지(contact paper)를 부착하고, 이 표면에 적당히 배합된 흑연분말과 등유의 혼합물을 부드러운 붓을 이용하여 균일하게 바른다. 이때 송풍기를 가동시키면 흑연가루가 유동을 따라 벽면 위를 이동하고, 이 과정에서 등유가 서서히 증발한다. 등유가 완전히 증발한 뒤 조심스럽게 점착지를 벽면으로부터 분리하여 두터운 흰색 종이에 붙이고, 투명 페인트로 코팅하면 가시화 실험이 완료된다. 이렇게 처리된 가시화 궤적은 접촉에 의해 훼손되지 않고 영구보존이 가능하며, 사진을 찍지 않고 스캐너를 이용하거나 칼라복사로 바로 재생할 수 있다.

2.3 실험조건 및 측정오차

본 실험에서는 정상적인 유동패턴과 역류 및 재순환 영역의 범위를 파악하기 위하여 유동의 대칭면에서 가시화 연구를 수행하였다. 이때 디스크 회전각 α 가 0도일 때 U_∞ 를 8.0m/s로 일정하게 유지한 상태에서 디스크를 30도, 45도, 60도 등으로 회전시켰다. 이 U_∞ 와 D 를 기준으로 한 Reynolds 수는 1.1×10^5 이었다. 대칭면에서의 난류강도 및 유속 크기의 측정은 x/D 가 2.0에서 4.0의 범위에서 x -축 방향으로 0.2D 간격으로 총 11 위치에서 측정이 이루어졌고, y -축 방향으로 0.1D 간격으로 9 곳과 추가로 벽 근처에서 0.05D 간격으로 2 곳 등 총 11 위치에서 실험이 진행되었다. 이 난류유동 측정실험과 동일한 장소에서 5공프로우브에 의한 대칭면에서의 2차원 유동 측정이 이루어졌다. 이와같은 열선유속계와 5공프로우브를 이용한 유동 측정시 디스크 회전각은 15도, 30도, 45도, 60도, 75도 등으로 변화시켰다. 파이프 단면 즉 $y-z$ 평면에서의 유속 및 2차유동 분포를 측정하기 위해서 x/D 가 1.5와 3.0인 두 평면에서 디스크 회전각을 15도, 30도, 45

도, 60도 75도 등으로 변화시키며 실험을 수행하였다. 그러나 디스크 회전각이 45도보다 클 경우 유동각이 본 연구의 보정범위를 초과하여 모든 측정각에 대하여 3차원유동 데이터를 제시할 수 없었다.

본 연구에 사용된 3차원 자동이송장치의 이송 오차는 $\pm 0.05\text{mm}$ 이내이며, 분사공기 유량측정에 사용된 오리피스의 측정오차는 ISO 5167⁽⁹⁾에서 제시된 오차해석 방법으로 계산하였다. 그 결과 측정유량의 오차는 각 측정 유량상태에서 총 유량의 $\pm 0.5\%$ 이내로 주어졌다. Abernethy 등⁽⁸⁾의 방법을 적용한 불확실성 해석(uncertainty analysis) 결과, 압력측정의 오차는 자유유동 동압의 $\pm 0.7\%$, 흐름각의 오차범위는 ± 1.2 도, 속도의 크기의 오차범위는 $\pm 1.6\%$ 로 나타났다. 5공프로우브를 이용한 유동 측정시, 벽면근접에 의한 오차를 방지하기 위해서 항상 벽면으로부터 적어도 6mm 이상 떨어진 곳에서 측정이 이루어졌다.⁽⁹⁾

3. 결과 및 검토

3.1 버터플라이 밸브 주위에서의 일반적인 유동 특성

Fig. 2에 유동의 대칭면에서 버터플라이 밸브 주위의 정상적인 유동특성을 제시하였다. 이것은 본 연구의 유동가시화 결과($\alpha = 60$ 도)를 바탕으로 얻어진 것이다. 일반적으로 버터플라이 밸브로 접근하는 유동은 디스크 상류면에 존재하는 상류 정체점(upstream stagnation point) S_1 을 기준으로 상하로 분리되어 디스크와 원관 사이에 존재하는 틈새 공간을 통해 밸브 하류로 이동된다. S_1 은 디스크의 중심보다 조금 더 윗쪽에 위치하며, 이 상류 정체점을 기준으로 윗쪽으로 분리된 유동은 디스크 상단을 돌아 하류로 이동한다. 반면에 이 상류 정체점의 아랫쪽 유동은 경사진 디스크의 상류면을 따라 가속되면서 디스크와 원관

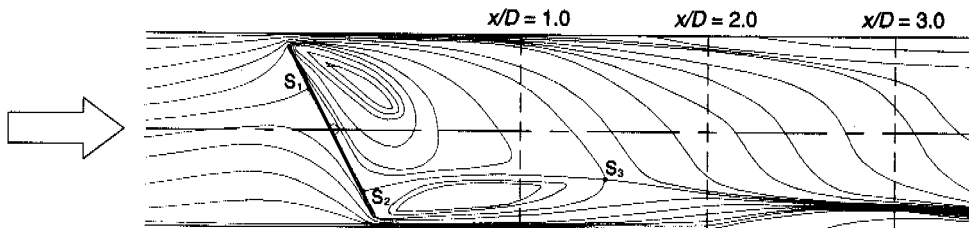


Fig. 2 Qualitative flowfield of a partially open butterfly-type valve

아랫면 사이의 공간을 통과하여 하류로 이동한다. 일반적으로 밸브 디스크 하류에는 넓은 박리영역(separation zone)이 존재한다. 이 박리영역 중심부에서는 전체 흐름에 거슬러 디스크 뒷면을 향해 상류로 이동하는 유동이 존재하며, 이 유동은 디스크 뒷면에 존재하는 하류 정체점(downstream stagnation point) S_2 에서 상하로 분리되어, 각각 상부 박리영역과 하부 박리영역으로 합류된다. 일반적으로 상부에 위치하는 박리영역이 하부에 존재하는 박리영역에 비하여 그 면적이 더 넓고, 상부 재순환 유동은 시계방향으로 회전하는 반면에 하부의 재순환 유동은 반시계 방향으로 회전한다. 밸브 디스크 상류에서 디스크로 접근하는 유동은 디스크의 양 끝단으로부터 박리 되면서 벽면제트(wall jet) 형태의 유동으로 변화되며, 윗쪽 제트유동은 벽면과 상부 박리영역 사이에 존재하고 아랫쪽 제트유동은 아래 벽면과 하부 박리영역 사이에 존재한다.

유동의 대칭면에서 윗쪽과 아랫쪽에 존재하는

벽면제트들은 하류로 이동함에 따라 그 영역이 원관 중심 쪽으로 확장되는 경향을 보이는데 상부 벽면제트의 확대가 하부 제트에 비해 훨씬 심하다. 박리영역이 끝나는 점, 즉 Fig. 2의 점 S_3 는 밸브 디스크에 의해 발생한 유동의 역류가 끝나는 곳이며, 이 점에서는 상하로 분리되었던 두 유동이 서로 만나게 된다.

3.2 대칭면 유동의 가시화

Fig. 3은 유동 대칭면에서의 유적 가시화 결과이다. 일반적으로 디스크 회전각이 증가할수록 밸브 디스크에 의한 유동의 차단효과가 커지므로 디스크 하류에서 발생하는 유동의 박리영역이 크게 확장될 뿐만 아니라, 유선의 곡률도 크게 나타난다. 회전각이 30도일 때에는(Fig. 3(a)), 디스크 하류 박리영역의 범위는 매우 좁고, 반시계 방향으로 회전하는 하부 재순환 유동은 거의 관찰되지 않는다. 특히 S_3 가 디스크에 매우 근접해 있다. 박리영역 근처 및 그 하류에서의 유적들을

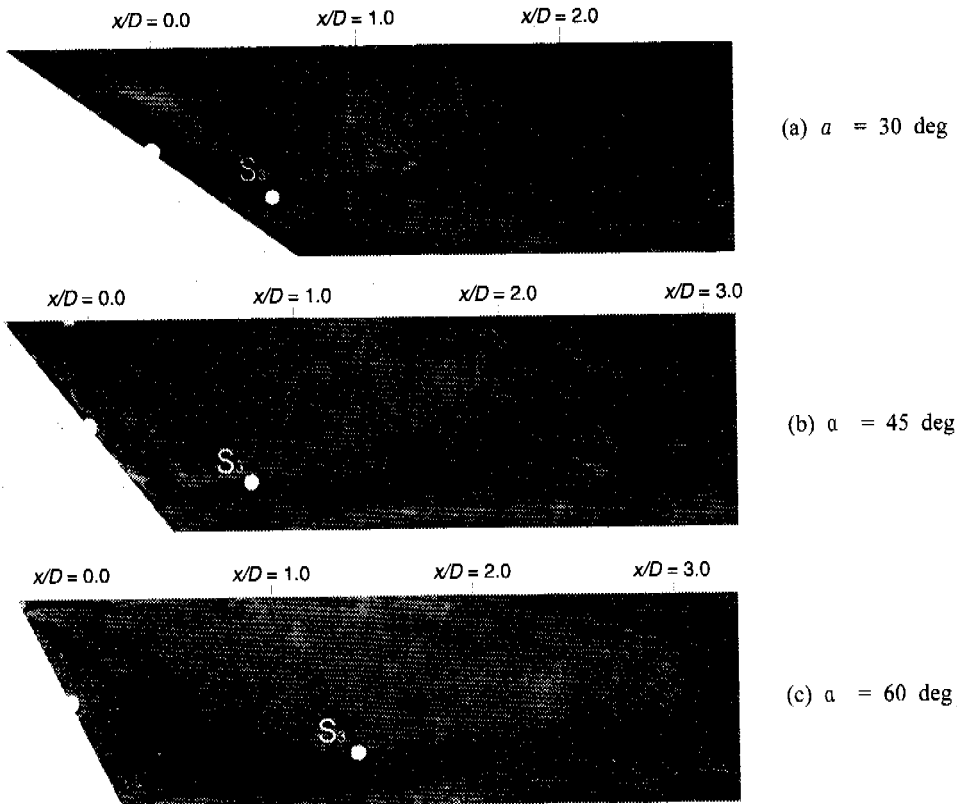


Fig. 3 Oil-film flow visualization in the symmetry plane

살펴보면, 케적들의 기울기가 매우 완만함을 확인할 수 있다. 회전각이 45도로 증가하면 하류 박리영역의 범위가 조금 넓어지고 S₃의 위치도 약간 하류로 이동한다. 그러나 회전각이 30도인 경우와 비교할 때 큰 변화는 관찰되지 않는다. 디스크 회전각이 60도로 증가하면 하류 유동은 비교적 큰 폭으로 변화된다. 먼저 디스크 하류의 박리영역은 크게 확장되고 상부의 시계방향 재순환 영역과 하부의 반시계방향 재순환 영역이 확연히 구분되며, S₃의 위치도 하류방향으로 비교적 멀리까지 이동하였다. 회전각이 30도에서 45로 변화할 때보다 45도에서 60도로 변화할 때 정성적인 유동패턴의 변화가 심한 사실은 회전한 각도가 동일하여도 후자의 경우에 버터플라이 밸브의 유량제어 특성이 더 크게 변화함을 암시한다.

3.3 3차원 유동특성

Fig. 4는 I-형 열선으로 측정된 대칭면에서의 유속의 크기 $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_\infty$ 의 분포를 그린 것이다. 이때 I-형 열선은 z-축과 평행하게 배치되어야 한다. 이 속도의 크기는 각 회전각에서의 입구 유속으로 무차원화된 것이 아니라, 회전각이 0도 일 때 측정된 밸브 상류에서의 유속(U_∞)으로 무차원화 되었음을 유의해야 한다. 회전각이 15도 일 경우 유속의 크기는 윗벽 근처에서 가장 작고, 중간에 큰 속도구배를 가진 뒤 아랫벽 부근에서 가장 큰 값을 갖는다. 특히 중간부 전단층에서의 속도구배는 하류 영역에서도 그 특징을 그대로 유지하고 있다. 이것은 회전각이 작을 경우에는 디스크에 의한 유동의 교란이 원관 전체에 걸쳐 강하게 나타나지는 않지만 국소적으로 집중되고, 이 교란이 다른 곳으로 잘 확산되지 않음을 의미한다. 회전각이 30도로 증가하면 유속은 윗벽 근처에서는 조금 감소하는 반면에 아랫쪽 벽면 근처에서는 조금 증가한다. 그러나 전체적으로 아랫벽 근처에서 x-축방향 속도구배가 비교적 크게 나타난다. 이러한 경향은 회전각이 45도로 증가하면 더 심화되었다. 회전각이 60도가 되면 상하 유동이 거의 대칭적으로 변화하고 원관 중심 부분에 유속의 크기가 매우 작은 영역이 넓게 관찰된다. 특히 이 경우 x/D가 3.0보다 큰 하류 영역에서는 무차원 속도의 크기가 0.5와 0.6 사이에서 매우 균일하였다.

Fig. 5는 대칭면에서 측정된 난류강도

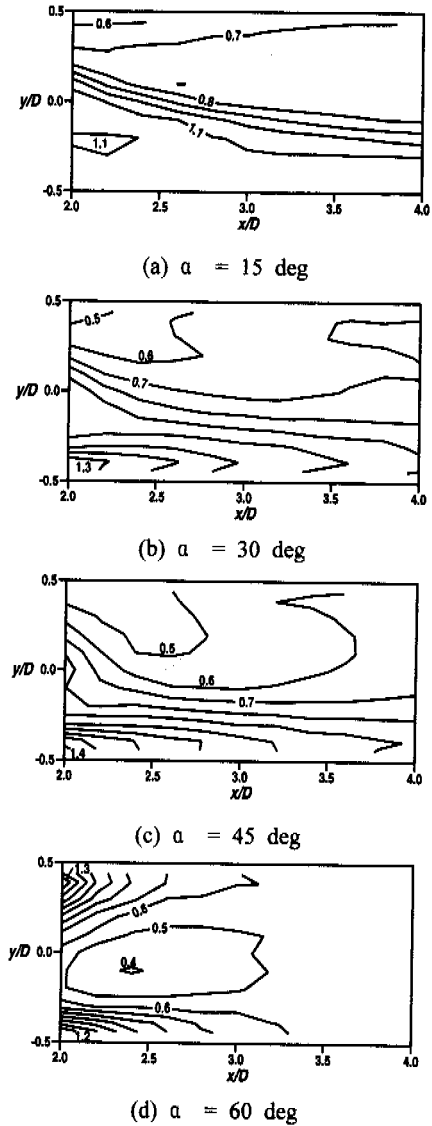


Fig. 4 Contours of velocity magnitude, $(U^2 + V^2)^{1/2}/U_\infty$, in the symmetry plane

$Ti (= (\overline{u'^2} + \overline{v'^2})^{1/2} / (U^2 + V^2)^{1/2})$ 의 분포이다. 이때 각 측정점에서의 난류강도는 그 위치에서의 유속크기로 무차원화되었다. 따라서 이 난류강도의 변화는 절대적인 난류성분의 변화뿐만 아니라 평균유속의 크기 변화와도 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 버터플라이 밸브 하류의 난류강도는 회전각에 따라 크게 달라지며, 회전각이 클수록 그 값이 급격히 증가하고 유동방향 즉 x-축방향의 변화가 두드러지게 나타난다. 또한 밸브 디스

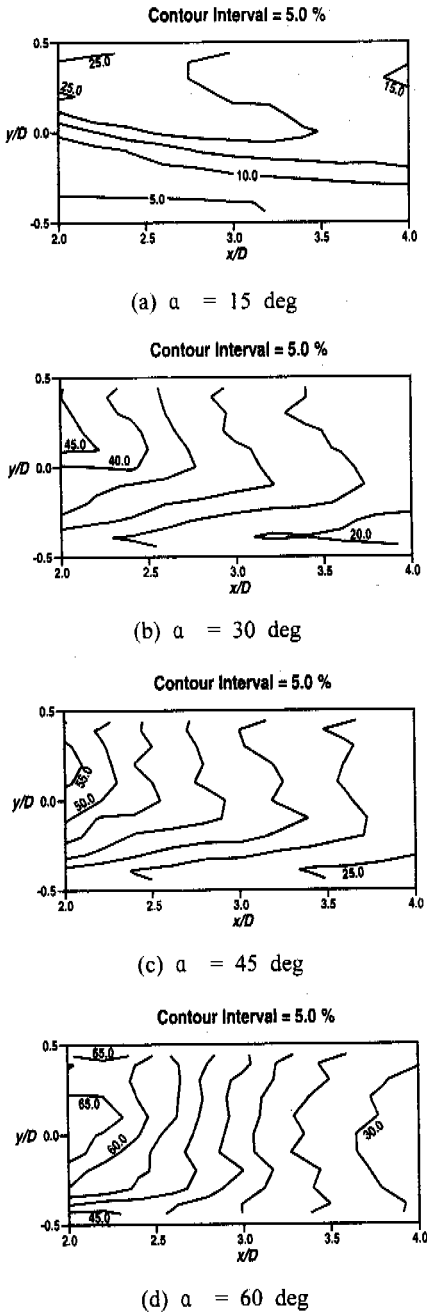


Fig. 5 Contours of local turbulent intensity, T_i , in the symmetry plane

크와 가까운 x/D 가 2.0인 곳에서는 회전각에 상관없이 윗벽 근처의 난류강도가 아랫벽 근처의 난류강도보다 더 크게 나타났다. 회전각이 15도 일 경우 난류강도는 대략 25% 이내의 값을 가지

며, x -축보다는 y -축방향으로의 변화가 두드러진다. 반면에 회전각이 증가하여 60도가 되면 난류강도는 30%에서 65% 정도의 범위에서 변화하며, 하류로 이동할수록 난류강도가 급격히 감소하였다. x/D 가 4.0인 곳에서는 난류강도가 거의 균일하게 나타났지만, 그 절대치는 대략 30% 정도로 여전히 큰 값을 알 수 있다.

Fig. 6은 5공프로우브로 측정된 대칭면에서의 속도벡터를 나타낸다. Fig. 6 (c)와 (d)에서 동그라미로 표시된 곳들은 본 연구에서 사용한 5공프로우브의 보정범위를 초과한 측정 위치를 나타낸다. 이들 측정 위치에서의 속도벡터는 유동의 가시화 궤적으로부터 흐름각을 정확히 측정하고, 이 흐름각과 I-형 열선으로 측정된 속도의 크기를 이용하여 구한 것이다. 회전각이 15도일 경우에는 y/D 가 0보다 큰 영역에서의 유동방향 변화가 두드러지게 관찰된다. 반면에 y/D 가 0보다 작은 측정 위치나 벽 근처에서는 속도벡터가 x -축과 거의 평행하게 나타났다. 회전각이 30도로 증가해도 이와같은 유동특성은 크게 변화하지 않으나, 회전각이 15도인 경우와 비교할 때 x/D 가 2.0에서는 유동각의 변화가 더 큰 반면 x/D 가 4.0에서는 유동각 및 그 크기의 변화가 더 작았다. 회전각이 45도로 증가하면 아랫벽 근처를 제외한 대부분의 영역에서 속도벡터가 x -축과 평행하지 않았으며 특히 x/D 가 2.0과 2.5 사이의 윗벽 근처에서 유동각의 변화가 두드러지게 관찰되었다. 이와같은 현상은 Fig. 3(b)에서도 나타난다. 회전각이 60도로 증가하면 유동각이 큰 영역은 $-y$ -축방향으로 더 이동하고 그 범위도 크게 넓어진다. 그러나 x/D 가 3.0 근처부터 y -축방향 속도성분은 거의 없어지고, 속도벡터가 x -축과 평행하게 나타났다.

본 연구에서는 5공프로우브를 이용하여 x/D 가 1.5와 3.0인 곳에서 원판 단면에 걸쳐 3차원 유동을 측정하였다. 그러나 불행히도 디스크 회전각이 45도보다 클 경우 본 연구의 보정범위를 벗어난 유동이 존재하였다. Fig. 7은 회전각이 15도 일 때 $y-z$ 평면에서 측정된 x -축방향 속도 U/U_∞ 의 분포를 나타낸다. 이 x -축방향 속도는 원판 중심부와 아래쪽에서는 비교적 그 변화가 작은 반면, 윗쪽 영역에서는 속도구배가 매우 크지만 그 절대값은 비교적 작음을 알 수 있다. 하류로 이동하면 윗쪽의 속도는 증가하면서 속도구배가 작

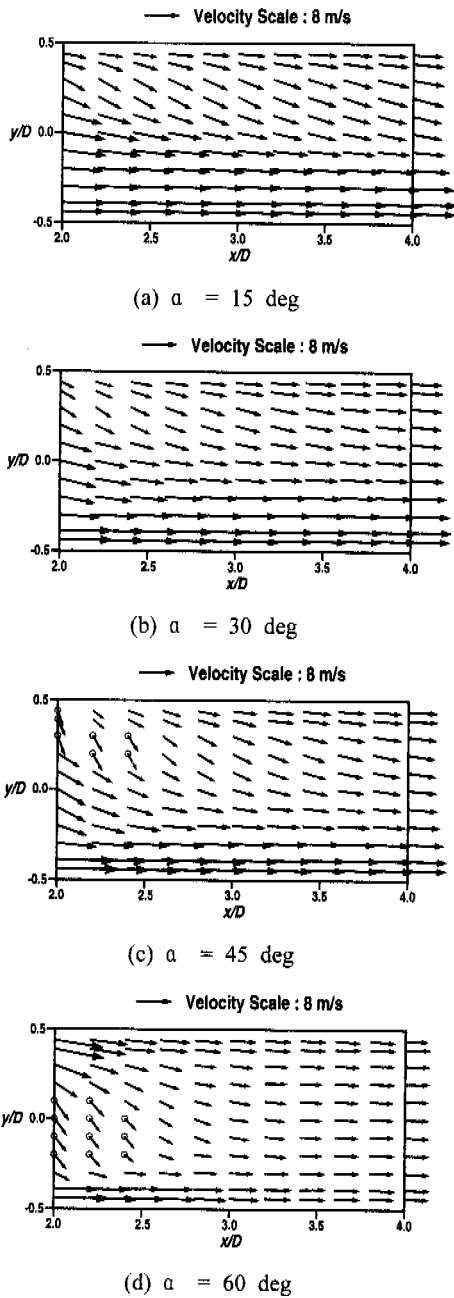


Fig. 6 Velocity vectors in the symmetry plane

아지지만 아랫쪽의 유속은 거의 변화하지 않는다. Fig. 8은 $y-z$ 평면에서의 2차유동을 나타낸다. 대체로 원관 아랫쪽에서는 2차유동의 크기가 거의 0에 가깝지만, 뒷쪽에서는 2차유동이 비교적

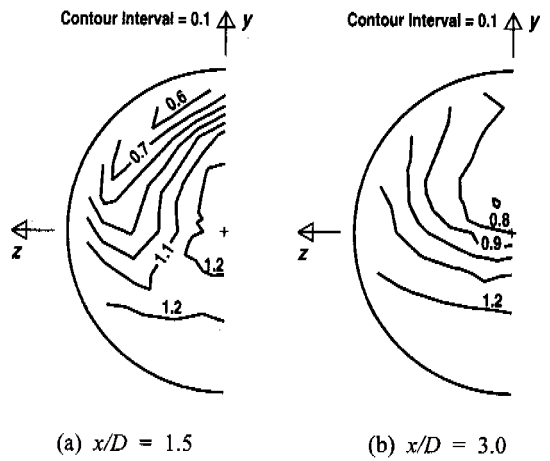


Fig. 7 Contours of x-directional velocity, U/U_∞ , in $y-z$ plane for $\alpha = 15$ deg.

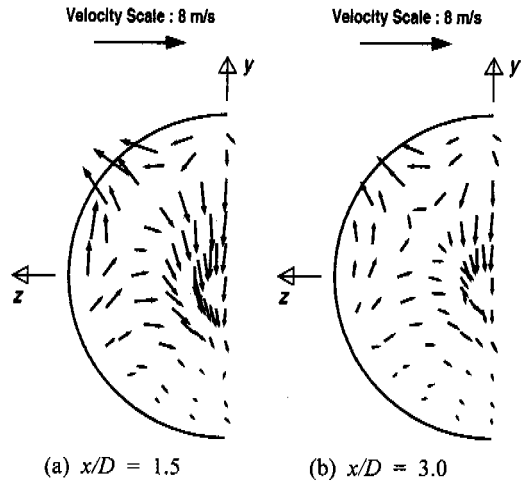


Fig. 8 Projections of velocity vectors on $y-z$ plane for $\alpha = 15$ deg

크게 나타났다. 대칭면 근처에서는 $-y$ -축 방향으로 향하는 유동이 항상 존재하였다. 그런데 2차 유동이 가장 강한 곳은 이 대칭면 근처가 아니라 중심에서 반시계 방향으로 45도인 위쪽 벽 근처였고 θ 가 45도인 벽 근처였고, 그 방향은 벽 쪽으로 향하고 있다. 이와같은 2차유동 패턴은 x/D 가 3.0에서도 그대로 유지되지만 2차유동의 크기가 많이 감소된다. Fig. 9는 회전각이 45도일 때 x/D 가 3.0인 $y-z$ 평면에서 측정된 3차원 유속

데이터이다. 이 결과를 Fig. 7(b) 및 Fig. 8(b)와 비교해 보면, 회전각이 변화하여도 정성적인 유동패턴은 거의 같음을 확인할 수 있다. 5공프로 우브의 측정 한계 때문에 회전각이 60도보다 더 클 경우에는 국소적으로 측정이 불가능한 곳이 존재하였다. 그러나 유동각이 큰 경우에서도 Fig. 9의 정성적인 유동패턴은 그대로 유지됨을 확인할 수 있었다.

3.4 압력손실 및 유량제어 특성

일반적으로 밸브의 압력손실계수는 근사적으로 다음의 식으로 정의된다.

$$K = \frac{\Delta H}{\frac{U^2}{2g}} = \frac{\Delta P_t}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (1)$$

만약 밸브의 상류와 하류의 두 측정 위치에서 그 원형단면 전체에 걸쳐 2차유동이 없고 x-축 방향 유속이 y-z 단면에 걸쳐 균일하다면 식 (1)은 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$K = \frac{P_{s,2} - P_{s,1}}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2)$$

여기서 $P_{s,1}$ 은 밸브 상류에서 측정된 정압이고, $P_{s,2}$ 는 밸브 하류에서 측정된 정압을 나타낸다 Fig. 10은 디스크 회전각의 변화에 따라 오리피스에서 측정된 유량과 식 (2)로 정의된 압력손실계

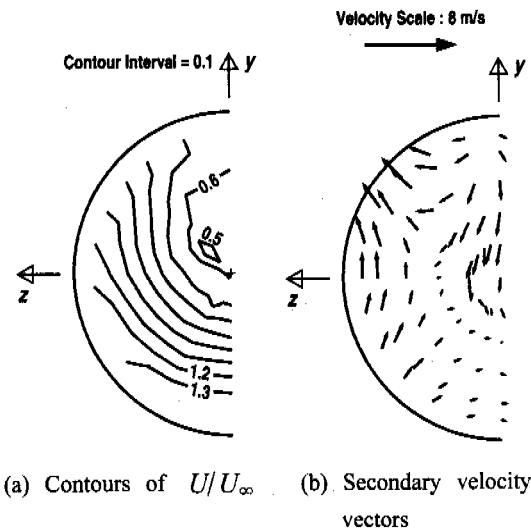


Fig. 9 Three-dimensional flow data in y-z plane at $x/D = 3.0$ for $\alpha = 45$ deg

수가 어떻게 변화하는지를 보여 준다. 이 압력손실계수를 구하기 위해 Eom⁽²⁾과 같이 x/D 가 -2.0과 4.0인 두 곳에서 정압이 측정되었다. 먼저 유량제어 특성을 보면, 회전각이 30도까지는 유량의 변화가 거의 없으나, 회전각이 45도부터 75도까지 변화하면 유량이 급속히 감소함을 알 수 있다. 이에 반해 압력손실계수는 회전각이 45도보다 작을 경우에는 거의 0이었지만, 회전각이 60도보다 커지면 급격히 증가함을 알 수 있다. 따라서 압력손실을 고려해 볼 때, 본 논문에서 연구한 버터플라이 밸브는 회전각이 대략 45도부터 75도 범위에서 사용하는 것이 바람직할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 디스크 회전각에 따른 공기조화용 버터플라이 밸브의 유동제어 특성 및 그것에 의해 야기되는 하류 유동의 교란에 대하여 연구하였다. 실제 산업체에서 사용되고 있는 버터플라이 밸브에 대하여, 디스크 회전각을 변화시키면서 그 하류에서의 유동의 가시화연구와 3차원 평균속도 및 난류강도 측정 실험을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 유동의 가시화로부터 밸브 디스크 하류의 복잡한 유동 패턴을 자세히 이해할 수 있었다. 회전각의 변화에 따른 디스크 하류에서의 평균 유동패턴, 박리 및 재순환 영역의 범위 등이 상세히 파악되었고, 이와같은 자료들 근거로 대칭면의 정성적인 유동모델이 제시되었다.
2. 회전각이 작을 경우, 밸브 디스크 하류에서의 평균유속의 변화는 비교적 작았지만, 그 영향이 하류방향으로 먼 곳까지 영향을 주었다. 그러

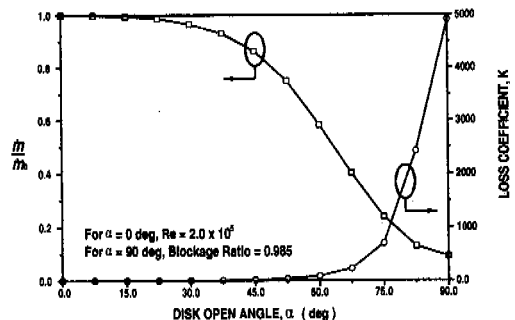


Fig. 10 Loss coefficient and mass flow rate versus disk open angle

나 회전각이 클수록 디스크 근처 평균유동의 변화는 매우 심하지만, 그 변화는 하류로 이동함에 따라 급속히 감소하여 균일유동으로 쉽게 회복되었다.

3. 회전각이 작을 경우, 밸브 디스크 하류에서 유동의 난류성분이 비교적 작았지만, 하류방향으로 먼 곳까지 난류강도의 국소적 변화가 나타났다. 회전각이 클 경우 난류강도는 급격히 증가하였지만, 하류로 이동함에 따라 난류강도의 변화가 급속히 감소하였다. 하류 영역에서 난류강도 값은 회전각에 비례하여 증가하는 경향을 보이지만, 회전각이 클수록 원관의 각 단면에서 난류강도의 분포가 더 균일해짐을 확인할 수 있었다.

4. 회전각이 0도에서 30도까지는 유량의 변화가 거의 없었으나, 회전각이 45도부터 75도까지 변화할 때 유량은 근사적으로 회전각에 비례하여 변화하였다. 압력손실계수는 회전각이 0도에서 45도까지는 거의 0에 가까웠고, 75도보다 커지면 급격히 증가하는 경향을 보여 주었다.

참고문헌

(1) Addy, A.L., Morris, M.J. and Dutton, J.C., 1985, "An Investigation of Compressible Flow Characteristics of Butterfly Valves," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 512~517.
 (2) Eom, K., 1988, "Performance of Butterfly Valves as a Flow Controller," *ASME Journal of*

Fluids Engineering, Vol. 110, pp. 16~19.
 (3) Morris, M.J. and Dutton, J.C., 1989, "Aerodynamics Torque Characteristics of Butterfly Valves in Compressible Flow," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 111, pp. 392~399.
 (4) Shim, E.B. and Chang, K.S., 1994, "Three-Dimensional Vortex Flow Past a Tilting Disc Valve Using a Segregated Finite Element scheme," *Computational Fluid Dynamics Journal*, Vol. 3, pp. 205~222.
 (5) ISO 5167-1:1991(E), 1991, "Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices - Part 1: Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes Inserted in Circular Cross-Section Conduits Running Full," International Organization for Standardization.
 (6) Treaster, A. L. and Yocum, A. M., 1979, "The Calibration and Application of Five-Hole Probes," *ISA Transactions*, Vol. 18, pp. 23~34.
 (7) 이상우, 윤태진, 1997, "5공프로우브의 보정에 영향을 주는 유동변수들에 대한 실험적 연구," *대한기계학회논문집 (B)*, 제21권, pp. 637~649.
 (8) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and Dowdell, R. B., 1985, "ASME Measurement Uncertainty," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.
 (9) 이상우, 윤태진, 1996, "벽면근접거리가 소형 원추형 5공프로우브의 보정에 미치는 영향," *대한기계학회논문집 (B)*, 제20권, pp. 2693~2706.