

버터플라이 밸브 하류 유동의 안정화에 관한 연구

박 상 원* · 이 상 우**
(2000년 1월 22일 접수)

An Experimental Study on the Flow Stabilization in the Downstream Region of a Butterfly-Type Valve

Sang Won Park and Sang Woo Lee

Key Words: Butterfly-Type Valve (버터플라이 밸브), Flow Stabilization (유동 안정화), Disk Open Angle (디스크 회전각), Turbulence (난류), Three-Dimensional Flow (3차원 유동)

Abstract

A flow stabilizer, which is made of a honeycomb and three different mesh screens, is located downstream of a butterfly-type valve, for the reduction of flow disturbances behind the valve. Mean flow and turbulence measurements as well as flow visualizations are conducted in the downstream region of the flow stabilizer. The result shows that the honeycomb reduces the secondary flow significantly, but deepens the non-uniformity of the streamwise velocity component and turbulence. The mesh screens considerably reduce the turbulence and enhance the uniformity of mean velocities. The combination of the honeycomb and three mesh screens results in an efficient reduction in the flow disturbances. In addition, the flow stabilizer proves to have a good performance in the suppression of turbulence at a short distance.

기호설명

D : 원관 직경
 D_d : 버터플라이 밸브 디스크 직경
 Re_D : Reynolds 수 = $U_\infty D / \nu$
 u' : x -축방향 섭동성분
 v' : y -축방향 섭동성분
 U : x -축방향속도
 U_∞ : 디스크 회전각이 0도일 때, 밸브 상류의 입구 평균속도
 V : y -축방향속도
 W : z -축방향속도

x : 유동방향 좌표, Fig.1
 y : 높이방향 좌표, Fig.1
 z : 폭방향 좌표, Fig.1

그리스문자

α : 디스크 회전각
 ν : 동점성계수

1. 서 론

현재 산업체에서는 유량을 효과적으로 제어하기 위해서 여러 종류의 밸브들이 사용되고 있다. 그 중 버터플라이 밸브(butterfly-type valve)는 원관 내부에 설치된 원형 디스크를 회전시킴으로써 유량을 조절한다. 디스크 회전각이 커지면, 밸브 하류에서의 원관 유동은 크게 변형되어, 유동의

* 회원, 국립금오공과대학교 대학원 기계공학과
 ** 회원, 국립금오공과대학교 기계공학부
 Email : swlee@knut.kumoh.ac.kr
 TEL : (054)467-4209 FAX : (054)467-4050

불균일과 함께 난류성분도 크게 증가한다.⁽¹⁾ 이 버터플라이 밸브는 각종 엔진에서 흡입공기의 유량 제어뿐만 아니라 대형 건물이나 산업체의 공기조화 시스템에서 유량의 분배 및 제어에 사용된다. 화학섬유 중에 하나인 폴리에스터 원사(polyester filament)의 생산공정에서, 용융된 폴리에스터 원액이 노즐로부터 액체 상태로 빠져 나온 직후 이루어지는 냉각과정은 폴리에스터 섬유의 생산에서 매우 중요한 공정이다. 특히 이때 원사 냉각용 공기의 공급에 사용되는 냉각기(quenching chamber) 출구의 유동상태는 원사의 품질에 큰 영향을 미친다. 이 냉각기에서 공급되는 냉각공기의 온도와 유속은 공간적으로 균일하고, 시간에 따라서 변화하지 말아야 한다. 그러나 실제의 냉각기 내부의 유동은 그 상류에 설치된 유량 분배용 버터플라이 밸브에 의해 비교적 큰 스케일의 와류를 포함하는 난류유동으로 변함이 확인되었다. 본 연구에서는 버터플라이 밸브 하류에서의 유동의 교란을 효과적으로 감쇄시키기 위해, 허니컴(honeycomb)과 메쉬스크린(mesh screen)을 이용한 유동 안정장치(flow stabilizer)를 제작하고 그 성능을 평가하고자 한다. 따라서 본 연구와 관련된 연구동향은 크게 유량제어 밸브 주위의 유동 분야와 허니컴 및 메쉬스크린을 이용한 유동제어 분야로 나눌 수 있다.

지금까지 버터플라이 밸브의 유동특성에 대한 연구는 주로 밸브의 압력손실계수, 토크특성, 유량제어 특성 등에 대해서 이루어졌다. 1985년 Addy 등⁽²⁾은 압축성 유동의 제어에 사용되는 버터플라이 밸브의 성능에 대하여 연구하였다. 그들은 버터플라이 밸브에서 초크 유동의 시작점, 정체압력 손실, 정압의 회복 등에 대하여 연구하였다. Eom⁽³⁾은 구멍이 뚫린 회전판을 갖는 버터플라이 밸브의 성능에 대하여 연구하였고, 밸브 디스크의 직경이 밸브의 유량제어 특성에 미치는 영향에 대해서도 실험을 수행하였다. Morris와 Dutton⁽⁴⁾은 압축성 유동에서 작동하는 버터플라이 밸브의 토크 특성에 대하여 연구하였다. 그들은 밸브 디스크에서의 유동의 박리와 재부착 현상이 밸브의 토크 특성에 큰 영향을 준을 밝혔다. Shim과 Chang⁽⁵⁾은 유한요소 방법을 적용하여 버터플라이 밸브 하류의 3차원 유동특성을 연구한 바 있다. 최근 박상원과 이상우⁽¹⁾는 공기조화용 버터플라이 밸브의 유동제어 특성 및 그것에 의

해 야기되는 하류 유동의 교란에 대하여 연구하였다. 그들은 실제 폴리에스터 섬유 생산공정에서 사용되고 있는 버터플라이 밸브에 대하여, 디스크 회전각을 변화시키면서 그 하류에서의 유동의 가시화연구와 3차원 평균속도 및 난류강도 측정 실험을 수행하였다.

허니컴과 메쉬스크린을 이용한 난류제어에 대한 연구는 풍동의 설계와 밀접한 관련이 있으며, 이에 따라 많은 연구가 이루어졌다. 허니컴은 입구 유동의 난류강도를 감소시키지만 그 자신에 의해 난류가 발생될 수 있다. 이와 같은 허니컴 셀(cell) 유동에 대한 연구는 먼저 셀유동이 완전히 발달된 경우에 대하여 이루어졌다.⁽⁶⁻⁸⁾ Lochrke와 Nagib⁽⁹⁾은 발달되고 있는 층류 허니컴 셀 유동에 대하여 실험을 수행하였다. 그 결과 그들은 허니컴 셀의 벽면이 효과적으로 단면 2차 유동 성분을 감소시킴을 밝혔고, 셀의 선단부분 근처에서 이와같은 단면 유동들이 소멸되는 것을 확인하였다. 따라서 실제 허니컴의 설계에 있어서 셀 길이는 셀 유동이 완전히 발달되는데 필요한 길이보다 훨씬 짧아도 충분히 그 역할을 수행할 수 있다. 메쉬스크린을 통과하는 유동은 스크린 바로 하류의 난류강도에 따라 아임계(subcritical) 영역과 초임계(supercritical) 영역으로 구분된다. 아임계 영역에서는 메쉬스크린에 의해 어떠한 에디(eddy)도 감쇄되지 않으며, 입구유동보다 난류강도가 감소한다. Reynolds 수가 충분히 큰 초임계 영역에서는 스크린 하류의 난류강도가 입구유동보다 증가하나, 메쉬스크린으로부터 멀어질수록 급격히 감소하여 메쉬스크린 상류의 난류강도에 비하여 현저히 작아진다. Schubauer 등⁽¹⁰⁾은 이 두 영역을 구분하는 임계 Reynolds 수가 메쉬스크린의 solidity ratio에 크게 의존함을 입증하였다. Tan-atchat 등⁽¹¹⁾은 아임계 Reynolds 수에서는 메쉬스크린의 성능이 자유유동속도의 변화에 따라 크게 달라지며, 압력강하와 입자침착이 심해짐을 밝혔다. 임계 Reynolds 수 근처에서는 유동조건이 조금만 변해도 메쉬스크린의 댐핑(damping) 특성이 크게 변화하므로 이 영역은 피하는 것이 좋다. 실제로 풍동에서는 허니컴과 메쉬스크린이 동시에 설치되므로 이와같은 구조에 대한 연구는 매우 중요하다.^(12,13) 일반적으로 메쉬스크린이 허니컴의 하류에 위치할 때, 메쉬스크린의 난류감소 작용은 허니컴이 없

는 경우보다 개선된다. Farell과 Youssef⁽¹⁴⁾는 난류 강도가 크고 유동의 불균일이 존재하는 자유유동에 여러 종류의 허니컴과 메쉬스크린을 설치하여 허니컴/메쉬스크린 구조의 난류저감 특성에 대하여 연구하였다. 그 결과 그들은 비교적 짧은 허니컴 하류에 성긴 메쉬스크린과 조밀한 메쉬스크린을 차례로 배치하면, 효과적으로 난류레벨을 감소시킬 수 있음을 입증하였다.

버터플라이 밸브 하류의 유동은 앞에서 언급한 자유유동 난류제어의 경우와는 달리, 주유동방향 유속의 구배와 난류강도가 매우 클 뿐만 아니라 단면 2차유동도 비교적 심하므로 이에 대한 별도의 연구가 필요하다. 본 연구에서는 버터플라이 밸브의 하류 유동을 안정화하기 위해 허니컴과 메쉬스크린이 조합된 유동 안정장치를 제작하고, 이 장치에 의한 하류 난류유동의 변화에 대해 연구하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 연구의 실험장치는 크게 노즐 유량계, 터보송풍기, 입구 원관, 버터플라이 밸브, 하류 원관 등으로 구성된다. 노즐 유량계는 국제 표준규격인 ISO 5167⁽¹⁵⁾에 의거하여 제작하였고, long-radius nozzle 형상을 채택하였다. 일반적으로 노즐 유량계의 유량계수(discharge coefficient)는 Reynolds 수에 의존하므로, 반복계산으로 최종 값을 구하였다. Fig. 1은 버터플라이 밸브와 그 상류 및 하류 부분을 자세히 보여 준다. 입구 원관, 버터플라이 밸브 하류 외과의 내경 D 는 모두 203mm이다. 입구 유동을 균일하게 하기 위해 밸브 상류에 허니컴과 메쉬스크린으로 구성된 입구 유동안정기를 설치하였다. 본 연구에서 사용한

버터플라이 밸브는 폴리에스터 섬유 제조공정의 냉각기에서 사용되고 있는 것으로, 박상원과 이상우⁽¹⁾의 그것과 동일하다. 이 밸브의 디스크는 두께가 2mm인 스테인리스 스틸로 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. 1에서와 같이 정의되며, 디스크 면이 x -축과 평행할 때 그 값이 0도이다. 본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 스테인리스 스틸 원봉의 중심을 좌표계의 원점으로 설정하였고, 하류방향을 x -축, 높이방향을 y -축, 그리고 원관의 폭방향을 z -축으로 설정하였다. 프로브의 정밀한 이송을 위해 3차원 자동이송장치를 사용하였다. 이 장치는 세 축방향으로 컴퓨터에 의해 자동이송되는데, 각 이송축은 볼나사와 직선운동가이드로 이루어진 직선유니트, 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 다기능입출력보드의 12 비트 A-D변환기를 통해 컴퓨터로 전달된다. 프로브의 이송은 앞에서 언급한 3차원 자동이송장치에 의해 이루어졌고, 스테핑모터는 전용 드라이버의 펄스입력을 통해서 제어된다. 이 디지털 펄스는 다기능입출력보드로부터 공급된다. 본 연구에서는 버터플라이 밸브 하류에서의 3차원유동을 측정하기 위해 지지대 형태가 직선인 원추형 5공프로브를 사용하였다. 이 5공프로브는 미국 United Sensors 사에서 특별한

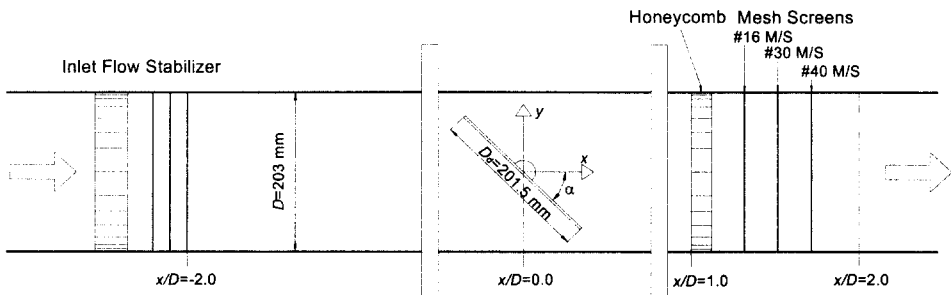


Fig. 1 Experimental apparatus

사양으로 주문, 제작되었고, 그 선단 직경은 3.2mm(0.125인치)이고, 프로브 지지대는 6.4mm(0.25인치)로 보강되어 있다. 5공프로브의 총 길이는 1.12m(44인치)이며, 이중 보강되지 않은 부분의 길이는 프로브 선단에서 0.254m(10인치) 정도이다. 본 연구에서는 이 직선형 5공프로브를 원관과 평행하게 배치하여 밸브 하류에서의 3차원 유동을 측정하였다. 본 실험에서는 프로브고정법(non-nulling method)을 적용하여 5공프로브를 고정하였다.^(16,17) 5공프로브의 보정에는 분해능(resolution)이 0.2도인 2-축 회전장치를 사용하였고, 피치각과 요각의 보정범위는 각각 -40도에서 40도 사이이며 5도 간격으로 보정실험이 이루어졌다. 5공프로브의 5개의 압력을 순차적으로 측정하기 위하여 압력스캐너(Furness Controls, FC091-6)를 사용하였고, 이 압력스캐너도 다기능 입출력보드를 이용하여 제어하였다. 밸브 하류 대칭면에서의 난류성분을 측정하기 위해서 정온형 열선유속계(Kanomax, 1010)를 사용하였다. 이때 직경이 5 μm 인 I-형 텅스텐 열선을 이용하였다.

2.2 유동 안정장치

비정상 난류유동 및 3차원 스윙을 감쇄시키는 데는 여러 가지 방법이 사용될 수 있다. 그러나 압력손실을 최소화하고, 짧은 거리 내에서 효과적으로 난류성분을 감소시키기 위해서는 허니컴과 메쉬스크린을 사용하는 것이 가장 효과적인 방법이다. 이와같은 유동 안정장치의 설계에 있어서, 허니컴의 길이와 셀의 크기뿐만 아니라 메쉬스크린의 종류, 갯수 그리고 허니컴과 메쉬스크린 사이의 간격도 매우 중요한 변수이다. 본 연구에서는 풍동 settling chamber의 표준설계법⁽¹⁸⁾을 적용하여 허니컴/메쉬스크린 안정장치를 설계하였다. 이 안정장치는 Fig. 1과 같이 밸브 디스크 하류에 설치되며, 하류방향으로 허니컴과 3개의 메쉬스크린이 차례로 배치되어 있다. 본 연구에서는 허니컴 대용으로 원형 비닐 튜브를 사용하였다. 이 원형 튜브의 직경은 실제 설계치 보다 큰 3mm로 결정하였고, 그 길이는 셀 직경의 8배인 24mm이다. 메쉬스크린의 재질은 스테인리스 스틸이며, 하류방향으로 #16, #30, #40 메쉬스크린이 차례로 배치되었다. 여기서 #40은 1 인치에 40개의 메쉬($M=0.64\text{mm}$)가 존재함을 뜻한다.

허니컴과 상류 메쉬스크린 그리고 각 메쉬스크린 사이의 간격은 모두 원관 직경(D)의 약 0.2배인 40mm이다. 짧은 거리에서 유동을 안정화시키기 위해 허니컴 상류면을 밸브 디스크 회전 중심으로부터 1.0D만큼 떨어진 곳에 배치하였다.

2.3 실험조건 및 측정오차

버터플라이 밸브가 입구 유동과 평행하게 배치될 때, 즉 회전각 α 가 0도일 때 버터플라이 밸브 상류 원관에서의 입구 평균유속(U_{∞})은 8.0m/s로 일정하게 유지하였다. 이때 U_{∞} 와 D 를 기준으로 한 Reynolds 수는 1.1×10^5 이었다. 입구 유동안정기의 설치로 밸브 상류 입구 원관에서의 난류강도는 1.0%로 비교적 낮고 균일하게 유지할 수 있었다. 본 연구의 모든 유동측정 실험은 디스크 회전각 α 가 45도에서 이루어졌다. α 가 45도일 때, 유동 안정장치가 설치되지 않은 경우의 입구 평균유속은 유동저항의 증가로 U_{∞} 의 86.2%로 나타났다. 본 연구에서 사용한 버터플라이 밸브의 디스크 회전각에 따른 유량의 변화 특성은 박상원과 이상우⁽¹⁾에 자세히 제시되어 있다. 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 5공프로브에 의한 대칭면에서의 2차원 유동 측정이 이루어졌다. 원관 단면 즉 y - z 평면에서의 3차원 유속 및 2차원유동 분포는 x/D 가 2.5인 평면에서 측정되었다. 실제 실험시 유동의 안정장치가 없는 경우뿐만 아니라, 안정장치에 허니컴만이 설치된 경우, 3개의 메쉬스크린만이 설치된 경우, 허니컴과 메쉬스크린이 모두 설치된 경우 등 모두 네 경우에 대해 측정이 이루어졌다.

본 연구에 사용된 3차원 자동이송장치의 이송 오차는 $\pm 0.05\text{mm}$ 이내이며, 분사공기 유량측정에 사용된 오리피스측의 측정오차는 ISO 5167⁽¹⁵⁾에서 제시된 오차해석 방법으로 계산하였다. 그 결과 측정유량의 오차는 각 측정 유량상태에서 총 유량의 $\pm 0.5\%$ 이내로 주어졌다. Abernethy 등⁽¹⁹⁾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. 5공프로브를 이용한 유동 측정시, 벽면근접에 의한 오차를 방지하기 위해서 항상 벽면으로부터 적어도 6mm 이상 떨어진 곳에서 측정이 이루어졌다.⁽²⁰⁾

3. 결과 및 검토

3.1 버터플라이 밸브 주위에서의 일반적인 유동특성

Fig. 2에 유동의 대칭면에서 버터플라이 밸브 주위의 정성적인 유동특성을 제시하였다. 이것은 박상원과 이상우⁽¹⁾의 유동가시화 결과($\alpha = 45$ 도)를 바탕으로 정성적으로 그린 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 더 윗쪽에 위치하며, 이 상류 정체점을 기준으로 윗쪽으로 분리된 유동은 디스크 상단을 돌아 하류로 이동한다. 반면에 이 상류 정체점의 아래쪽 유동은 경사진 디스크의 상류면을 따라 가속되면서 디스크와 원관 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 끝단으로부터 박리되면서 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

본 연구에서는 z 가 0인 x - y 평면 즉 유동의 대칭면에서는 z -축 방향의 평균 유속이 0인 점에 유의하여 박상원과 이상우⁽¹⁾와 동일한 방법으로 유동의 가시화 실험을 수행하였다. 이 방법은 대칭면에 두께가 매우 얇은 아크릴 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. 본 연구에서는 대칭면 유동의 가시화를 위해 흑연분말과 등유의 혼합물을 이용한 유막법(oil-film method)을 적용하였다.

Fig. 3은 디스크 회전각이 45도일 때 유동 대칭면에서의 유적 가시화 결과이다. 유동 안정장치가 설치되지 않은 경우(Fig. 3(a))에는 디스크 하류의 유동장이 크게 변형되어 있다. 특히 원관 중심부에서 유적이 명확하게 나타나고, 그 유적선

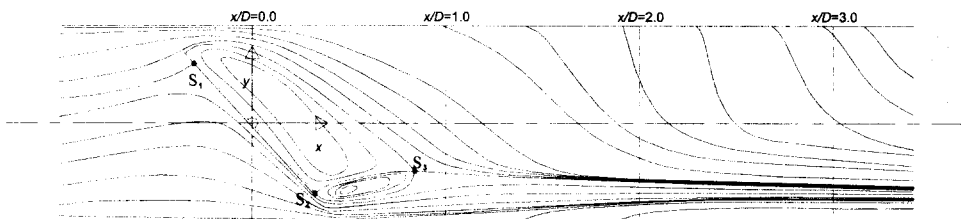


Fig. 2 Qualitative sketch of the flowfield downstream of a butterfly valve for $\alpha = 45$ deg

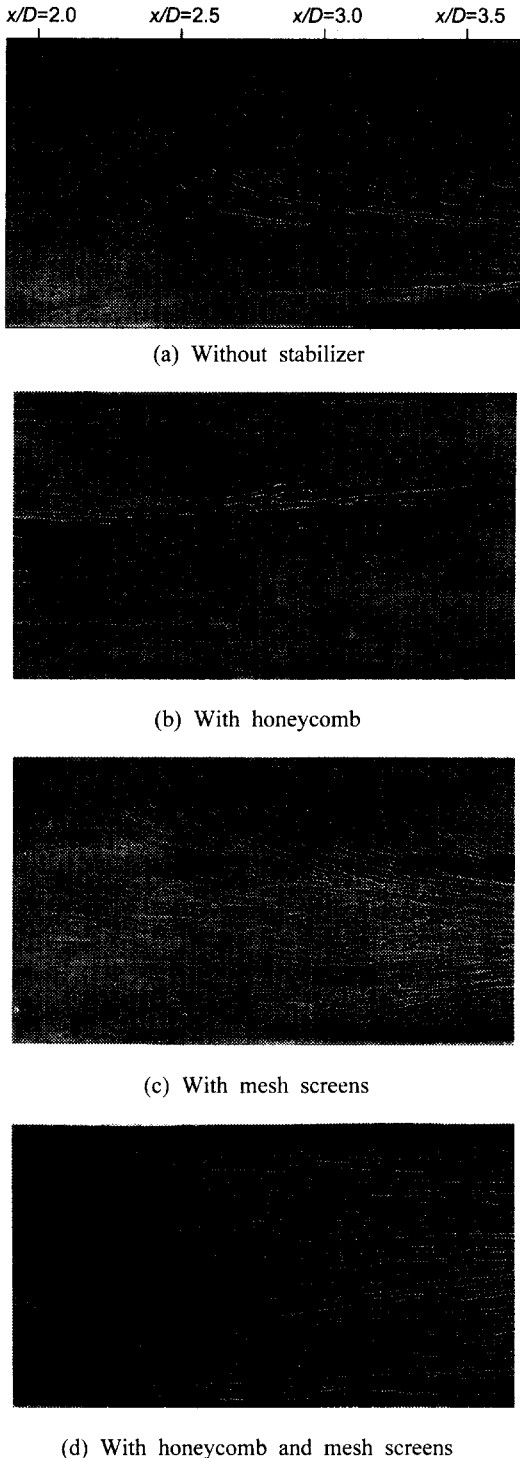


Fig. 3 Oil-film flow visualizations in the symmetry plane for $\alpha = 45$ deg

의 곡률도 가장 크게 나타났다. Fig. 3(a)에서 유적이 비교적 적게 분포하는 아랫쪽 부분에서 유속이 가장 크고, 유적이 가장 선명한 중심부의 유속이 가장 작을 것이다. Fig. 3(b)와 같이 허니컴만이 설치되면, 원관 중심부의 유선도 원관 벽면과 거의 평행해짐을 알 수 있다. 이 경우에도 유적의 양이 중심부에 가장 많이 분포하므로 중심부의 유속이 가장 작을 것이다. 3개의 메쉬스크린만이 설치된 경우(Fig. 3(c))를 보면 유적의 분포가 비교적 균일하지만, Fig. 3(b)와 비교해 볼 때 하류영역에서 유선이 조금 더 변형된 상태로 남아 있다. 마지막으로 유동 안정장치에 허니컴과 메쉬스크린이 모두 설치된 경우, 대부분의 유선이 벽면과 평행하고 유적도 균일하게 분포하였다.

3.3 대칭면 평균속도

Fig. 4는 5공프로브로 측정된 대칭면에서의 속도벡터를 나타낸다. Fig. 4(a)에서 x/D 가 2.0인 위치의 속도벡터를 살펴보면, 원관 상부의 유속은 매우 작고 유동이 거의 $-y$ -축 방향으로 향할 만큼 변형이 심하였다. 반면에 원관의 하단 근처에서는 속도의 크기가 매우 크고 유동이 벽면과 거의 평행하였다. 이와같은 경향은 하류로 이동할수록 완화되어 유속 벡터가 점차 원관 벽면과 평행해지지만, x/D 가 4.0에서도 여전히 유속 크기의 불균일은 존재하였다. 유동의 안정장치에 허니컴만이 설치된 경우의 측정결과(Fig. 4(b))를 보면, Fig. 4(a)와 큰 대조를 이룬다. 허니컴만이 설치된 경우 전체적으로 유속벡터의 방향은 측정위치에 관계없이 원관의 벽면과 거의 평행하게 나타났지만, 유속의 불균일은 크게 심화되었다. 유속의 크기는 원관의 상단과 하단 근처에서 매우 크게 나타났고 y/D 가 -0.2 근처에서 유속의 크기가 가장 작았다. 이것은 유속의 크기가 y/D 가 0.4 근처에서 가장 작은 Fig. 4(a)의 결과와 매우 다른 것이다. 또한 y/D 가 4.0인 하류에서도 Fig. 4(a)와 비교하여 유속의 불균일이 매우 크게 나타났다. 3개의 메쉬스크린만이 유동 안정장치에 설치된 경우의 결과(Fig. 4(c))를 보면, 허니컴이나 메쉬스크린이 전혀 설치되어 있지 않은 경우(Fig. 4(a))에 비하여 유속의 불균일이 크게 감소하였다. 그러나 Fig. 4(b)와는 달리 원관 벽면과 평행하지 않는 속도벡터가 여전히 관찰된다. 허니컴과 메쉬스크린이 모두 설치된 경우(Fig. 4(d)), 유속벡터는 거의 원관 벽면과 평행하였고 유속도 상당히 균일함을 확인할 수 있다. 이와같은 결과는 앞에서 논의한

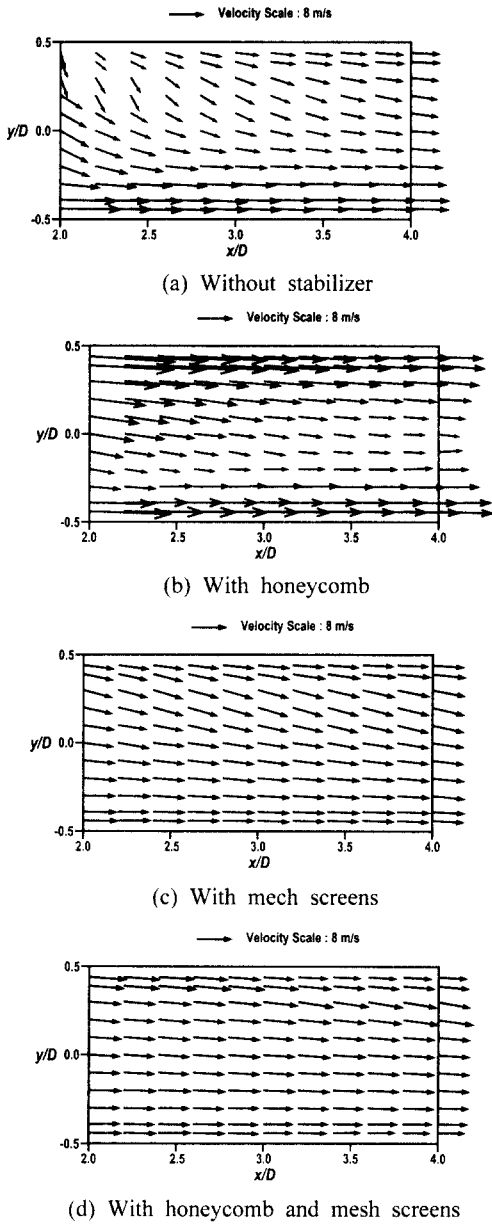


Fig. 4 Velocity vectors in the symmetry plane for $\alpha = 45$ deg

유동의 가시화 결과와도 잘 일치하는 것이다. 일반적으로 허니컴은 2차유동을 감소시켜 유동의 방향을 원관 벽면과 평행하게 하고, 메쉬스크린은 주로 원관 단면에 걸쳐 유속의 크기를 균일하게 만들었다.

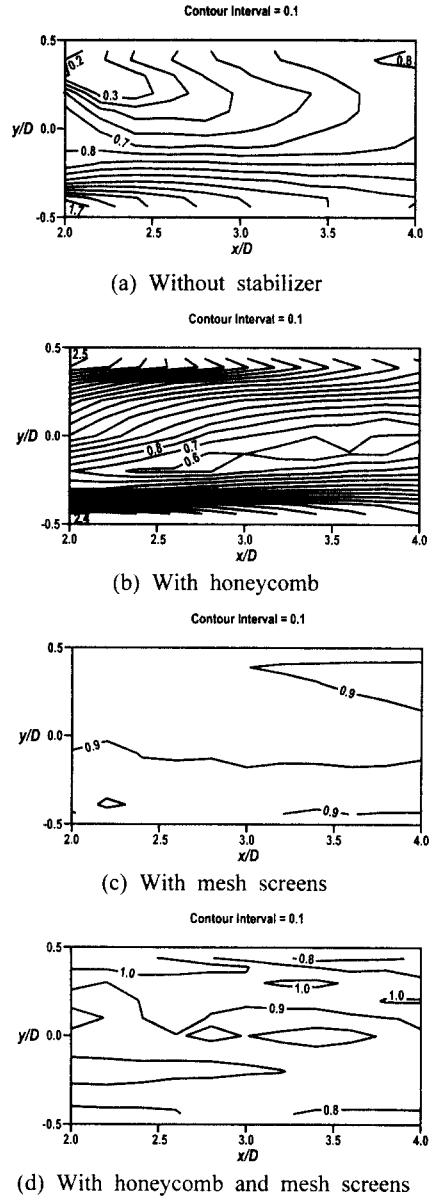
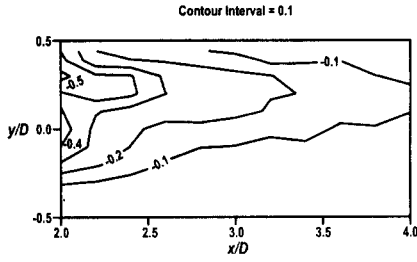
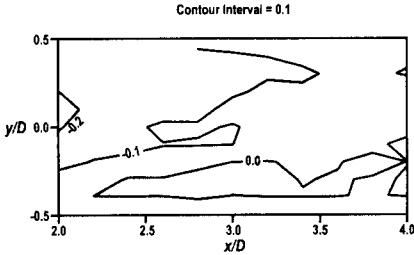


Fig. 5 Contours of x -directional velocity, U/U_{∞} , in the symmetry plane for $\alpha = 45$ deg

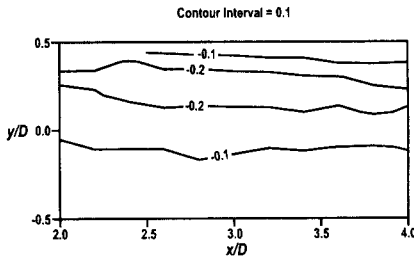
Fig. 5는 대칭면에서 5공프로브로 측정된 x -축방향속도 U/U_{∞} 의 분포를 나타낸다. Fig. 5(a)와 비교하면, 허니컴의 존재는 U/U_{∞} 의 구배를 크게 심화시키고(Fig. 5(b)), 메쉬스크린의 설치는 U/U_{∞} 를 대칭면 전체에 걸쳐 균일하게 만들음을 확인할



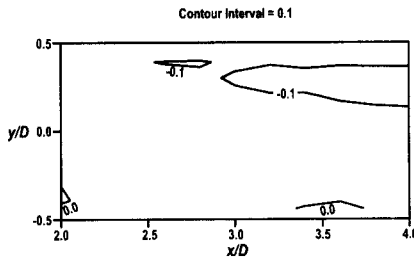
(a) Without stabilizer



(b) With honeycomb



(c) With mesh screens

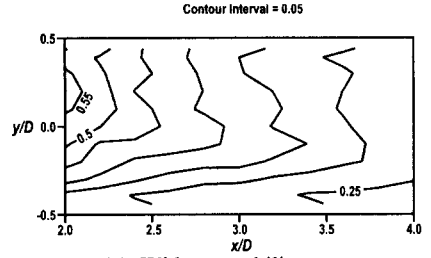


(d) With honeycomb and mesh screens

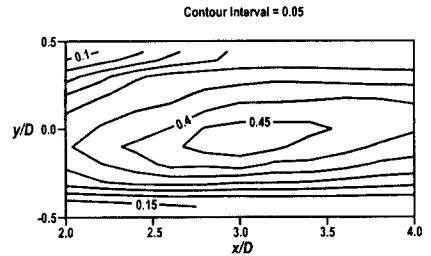
Fig. 6 Contours of y -directional velocity, V/U_∞ , in the symmetry plane for $\alpha = 45$ deg

수 있다(Fig. 5(c)). 허니컴과 메쉬스크린이 동시에 설치된 경우(Fig. 5(d)), U/U_∞ 의 불균일이 Fig. 5(c)에 비해 조금은 더 심해져 보인다.

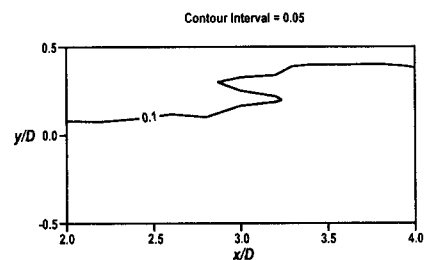
Fig. 6은 대칭면에서 5공프로브로 측정된 y -축방향 속도 V/U_∞ 의 분포를 나타낸다. Fig. 6(a)와 비교할 때, 허니컴의 존재는 V/U_∞ 의 절대치를 크게 감소시키지만(Fig. 6(b)), 메쉬스크린의 설치



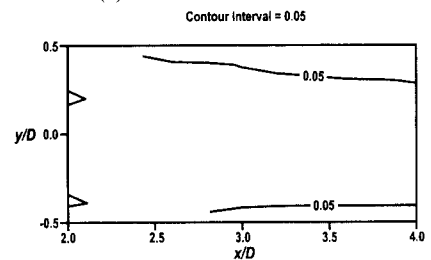
(a) Without stabilizer



(b) With honeycomb



(c) With mesh screens



(d) With honeycomb and mesh screens

Fig. 7 Contours of $(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})^{1/2} / (U^2 + V^2)^{1/2}$ in the symmetry plane for $\alpha = 45$ deg

V/U_∞ 를 허니컴이 설치된 경우만큼 감소시키지는 못한다(Fig. 6(d)). 마지막으로 허니컴과 메쉬스크린이 동시에 설치된 경우(Fig. 6(d)), V/U_∞ 의 절대값이 가장 작게 나타났다.

3.4 대칭면에서의 난류유동 성분

Fig. 7은 원관의 대칭면에서 열선유속계의 I-형

열선을 z-축과 평행하게 배치하고 측정한 $(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})^{1/2} / (U^2 + V^2)^{1/2}$ 의 분포이다. 유동 안정장치가 없는 경우(Fig. 7(a)), 측정 영역에서 유동의 불안정성(unsteadiness)을 나타내는 값인 $(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})^{1/2} / (U^2 + V^2)^{1/2}$ 은 55%에서 25% 정도 까지 큰 폭으로 변화한다. 이 값은 특히 대각선 방향으로 급격히 감소하고, 원판 상부의 값이 하단보다 훨씬 크다. 허니컴만이 설치된 경우(Fig.7(b)), 이 값의 분포는 전혀 다른 양상을 보이게 된다. 이 경우 x/D 가 2.0에서 3.0으로 이동할 때 그 값이 증가하여 45% 정도의 최대치를 갖고, 이후 하류방향으로 다시 감소하는 경향을 보인다. 그리고 원판의 벽면 근처에서는 이 값이 비교적 작은 반면, 원판의 중심선을 따라 유동의 불안정성이 가장 크게 나타났다. x/D 가 4.0인 곳에서 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)를 비교하면, 원판 중심부에서는 허니컴이 설치된 경우의 $(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})^{1/2} / (U^2 + V^2)^{1/2}$ 이 더 크게 나타났고, 벽면 근처에서는 더 작게 나타났다. 이에 따라 이 값의 구배는 허니컴만이 설치된 경우가 훨씬 크게 나타났다. 메쉬스크린만이 설치된 경우(Fig. 7(c)), 이 값은 측정평면 전체에 걸쳐 10% 내외의 값을 유지하고 있으며, 그 값이 매우 균일하였다. 허니컴과 메쉬스크린이 동시에 설치된 경우, Fig. 7(c)보다 더 감소하여 5% 전후로 나타났다.

3.5 3차원 유동

Fig. 8은 x/D 가 2.5인 $y-z$ 평면에서 5공프로브로 측정된 x-축방향 속도 U/U_∞ 의 분포를 나타낸다. 허니컴만이 설치된 경우, y 와 z 가 0보다 큰 영역의 대각선 벽 근처에서 5공프로브의 측정영역을 벗어나는 측정점이 다수 발생하여 이 경우의 데이터를 제시하지 못했다. 유동의 안정장치가 설치되지 않은 경우(Fig. 8(a)), x-축방향 속도는 0.4에서 1.4까지 매우 큰 폭으로 변화하고, 그 구배도 크게 나타났다. 그러나 메쉬스크린이 설치된 경우(Fig. 8(b)), U/U_∞ 는 거의 1.0 전후의 값을 유지하며, 속도 구배도 현저히 감소함을 알 수 있다. 허니컴과 메쉬스크린이 동시에 설치되면(Fig. 8(c)), 유속은 더욱 균일해진다.

Fig. 9는 x/D 가 2.5인 $y-z$ 평면에서 5공프로브

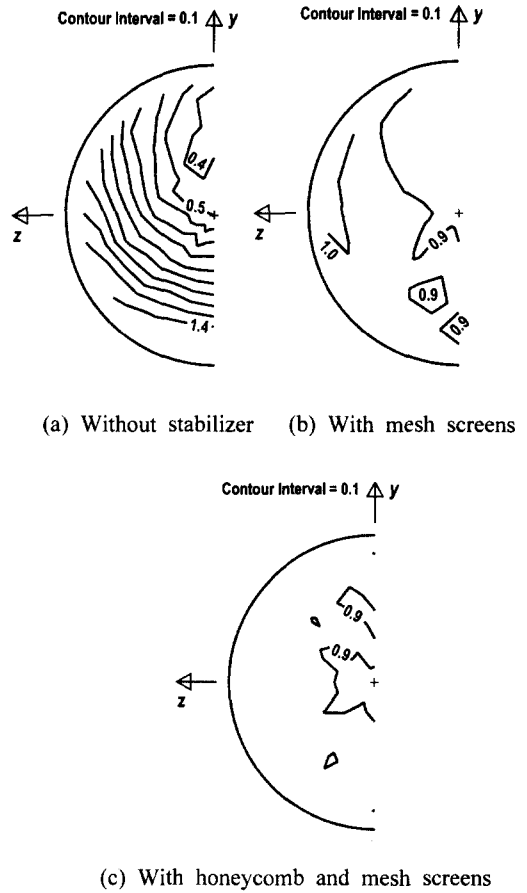


Fig. 8 Contours of x-directional velocity, U/U_∞ , in the $y-z$ plane at $x/D = 2.5$ for $\alpha = 45$ deg

로 측정된 2차유동의 속도 벡터를 나타낸다. 버터플라이 밸브 하류 유동은 난류강도가 매우 큰 비정상 난류유동이므로⁽¹⁾ 5공프로브로 측정된 속도벡터들이 그다지 매끄럽게 측정되지 못하였다. 유동 안정장치가 설치되지 않은 경우(Fig.9(a)), $y-z$ 단면의 유동은 비교적 큰 2차유동 성분을 가지고 있다. 그러나 메쉬스크린이 설치되면(Fig.9(b)), 2차유동의 전체적인 유동패턴은 동일하지만, 그 크기가 절반이하로 감소하였음을 알 수 있다. 허니컴과 메쉬스크린이 동시에 설치된 경우(Fig.9(c)), 2차유동의 크기는 무시할 정도로 작아졌다.

일반적으로 허니컴을 통과하는 유동은 허니컴의 내벽에 의해 스윙 등의 단면 2차유동이 구조

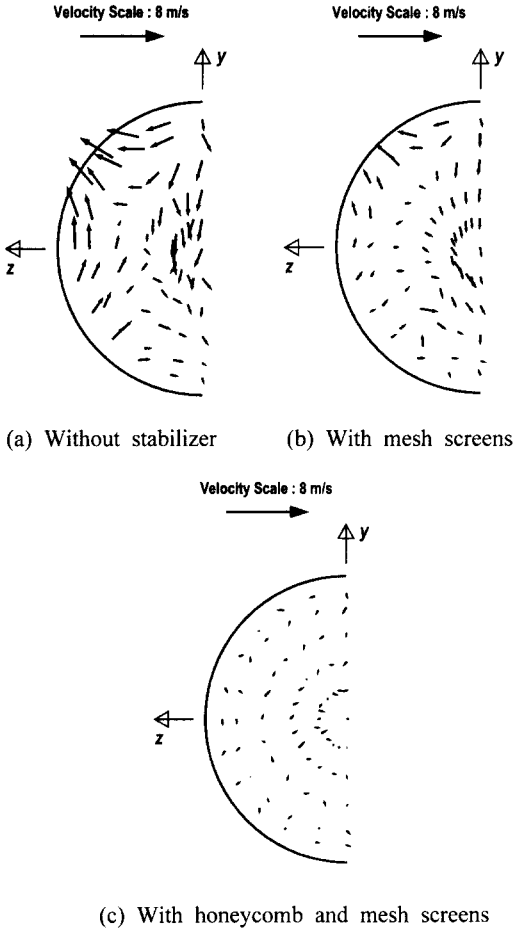


Fig. 9 Projections of velocity vectors on the y - z plane at $x/D = 2.5$ for $\alpha = 45$ deg

적으로 제한되므로 유동방향에 대해 직각인 속도 성분이 효과적으로 제거될 수 있다. 그러나 허니컴을 통과하면서 인접 유동 사이의 전단작용 (shearing)이 감소하므로 허니컴이 없는 경우에 비하여 x -축 방향 유동의 불균일이 심화된다. 반면에 메쉬스크린은 유속의 제곱에 비례하는 압력강하를 통하여 유동 단면에 걸쳐 난류강도를 크게 감소시키는 역할을 한다. 메쉬스크린은 입사유동을 메쉬스크린의 수직 방향으로 굴절시켜 2차유동의 크기를 감소시키는 기능도 하지만,⁽¹⁸⁾ 본 연구의 결과에 의하면 그 작용이 허니컴만큼 충분하지는 못함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 버터플라이 밸브 하류 유동을 안정화하기 위해 허니컴과 메쉬스크린이 조합된 유동 안정장치를 제작 설치하고, 이 장치에 의한 하류 난류유동의 감쇄에 대하여 연구하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

(1) 유동 안정장치에 설치된 허니컴은 원관 단면에서의 2차유동을 크게 감소시키는 역할을 하였으나, 주유동방향 유속의 불균일을 심화시켰다. 그리고 허니컴의 설치는 하류의 난류 성분을 증가시키는 결과를 가져 왔다.

(2) 메쉬스크린은 평균속도의 불균일을 크게 감소시키는 역할을 하였으며, 난류성분도 크게 저감시켰다. 그러나 2차유동을 감소시키는 역할은 그다지 크지 못했다.

(3) 허니컴과 그 하류 메쉬스크린을 동시에 설치하였을 경우, 평균속도 구배, 2차유동, 난류 성분 등이 효과적으로 감소되었다. 그리고 본 연구에서 설계한 유동 안정장치를 이용하면 짧은 거리 내에서 난류 유동을 효과적으로 감쇄시킬 수 있음이 확인되었다.

후 기

이 연구는 국립금오공과대학교의 교내 연구비 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 박상원, 이상우, 2000, "공기조화용 버터플라이 밸브 하류에서의 3차원 유동특성," 대한기계학회논문집 (B), 제24권, 제2호, pp. 260~269.
- (2) 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.
- (3) Eom, K., 1988, "Performance of Butterfly Valves as a Flow Controller," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 110, pp. 16~19.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Lumley, J.L., 1964, "Passage of a Turbulent Stream Through Honeycomb of Large Length-to-Diameter Ratio," *ASME Journal of Basic Engineering*, Vol. 86, pp. 218 ~ 220.
- (7) Lumley, J.L. and McMahon, J.F., 1967, "Reducing Water Tunnel Turbulence by Means of Honeycomb," *ASME Journal of Basic Engineering*, Vol. 89, pp. 764 ~ 770.
- (8) Ribbins, B.E., 1978, "Water Tunnel Turbulence Measurements Behind a Honeycomb," *Journal of Hydronautics*, Vol. 12, pp. 122 ~ 128.
- (9) Loehrke, R.I. and Nagib, H.M., 1976, "Control of Freestream Turbulence by Means of Honeycombs: A Balance Between Suppression and Generation," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 98, pp. 342 ~ 353.
- (10) Schubauer, G.B., Spngenberg, W.G. and Klebanoff, P.S., 1950, "Aerodynamic Characteristics of Damping Screens," NACA TN 2001.
- (11) Tan-atchat, J., Nagib, H.M., and Loehrke, R. L., 1982, "Interaction of Free Stream Turbulence with Screens and Grids: A Balance Between Turbulence Scales," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 114, pp. 501 ~ 528.
- (12) Scheiman, J. and Brooks, J.D., 1981, "Comparison of Experimental and Theoretical Turbulence Reduction from Screens, Honeycomb, and Honeycomb-Screen Combinations," *Journal of Aircraft*, Vol. 18, pp. 638 ~ 643.
- (13) Xia, L., Farrell, C. and Kavanagh, P., 1990, "Experimental Investigation of the Unsteady Flow Behind Screens and Honeycombs," *Proceedings, 36th International Instrumentation Symposium*, Instrument Society of America, pp. 367~376.
- (14) Farrell, C. and Youssef, S., 1996, "Experiments on Turbulence Management Using Screens and Honeycombs," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 118 pp. 26~32.
- (15) 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.
- (16) Treaster, A. L. and Yocum, A. M., 1979, "The Calibration and Application of Five-Hole Probes," *ISA Transactions*, Vol. 18, pp. 23~34.
- (17) 이상우, 윤태진, 1997, "5공프로브의 보정에 영향을 주는 유동변수들에 대한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 (B), 제21권, pp. 637~649.
- (18) Meta, R.D. and Brdshaw, P., 1979, "Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnel," *Aeronautical Journal*, Nov., pp. 443- 449.
- (19) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and Dowdell, R. B., 1985, "ASME Measurement Uncertainty," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.
- (20) 이상우, 윤태진, 1996, "벽면근접거리가 소형 원추형 5공프로브의 보정에 미치는 영향," 대한기계학회논문집 (B), 제20권, pp. 2693~2706.