

원형 출구 Synthetic Jet의 유동 특성 연구

Experimental Study on Flow Characteristics of Synthetic Jets with Circular Exit

이병현*, 김우례, 김종암 (서울대학교)

1. 서론

Synthetic jet은 주기적으로 Jet을 흡입/분출하는 능동 유동 제어 장치로서 경계층 제어, 유동 박리 제어 등에 활용된다. Collins와 Zelenvitz의 연구에서 주기적인 간섭이 유동 박리를 제어할 수 있음이 발견된 이후 Seifert, Wagnanski, Glezer 등 많은 학자들이 Synthetic jet의 성능을 결정하는 파라미터들을 연구하였고, 실용화를 위한 연구를 활발하게 수행하였다.¹

현재까지 연구를 살펴보면 Synthetic jet 출구 형태는 대부분 직사각형(Rectangular Slot) 또는 원형(Circular Slot)이다. 일반적으로 직사각형 출구에서는 Vortex Pair가 생성되고, 가로 세로비가 커지면 스펠 중앙에서 속도가 감소하는 특징이 있다.² 반면 원형 출구에서는 Vortex Ring이 형성되고, 동일한 출구 속도를 얻기 위한 요구 전압이 직사각형 출구 보다 낮은 특징이 있다.³ 그런데 원형 출구 한 개만으로는 영향을 미치는 범위가 작기 때문에 넓은 면적에 작용하기 위해서는 여러 개를 배열해야 한다. 이와 관련하여 3개의 원형 출구를 일직선으로 배열한 실험⁴과 9개의 원형 출구를 정사각형 형태로 배열한 실험⁵에 대한 연구가 있었지만 배열 형태에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 본 논문에서는 원형 출구 Synthetic jet의 연구 동향을 고려하여 자유류가 없는 상태에서 출구의 지름과 간격 변화에 따른 유동 특성을 파악하는 연구를 수행했고, 이를 통해 원형 출구 실용화를 위한 기초를 마련하고자 한다.

2. 본론

2.1 Synthetic jet 출구 형상

본 연구에 사용된 Synthetic jet의 구조와

기준 좌표는 그림 1과 같다. 선형모터가 라텍스(Latex) 박막과 아크릴판을 진동시켜서 밀폐된 공간의 유체가 출구를 통해 반복적으로 흡입/분출된다.

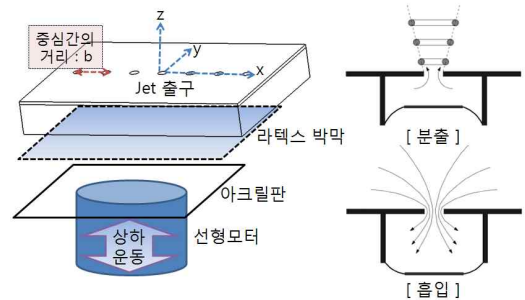


그림 1 Synthetic jet의 구조 및 원리

각 구동기별로 같은 주기(Cycle) 동안 흡입/분출되는 유량(Mass Flux)이 동일하도록 지름에 따른 출구 개수를 조정하여 각 출구 형태별로 전체 면적을 50mm^2 로 설정했다. 실험에 사용된 원형 출구의 종류는 표 1과 같다.

표 1 원형 출구의 종류

출구 종류	출구 간격	출구 형상	비고
D=1.5mm (출구 28개)	b=3mm		<ul style="list-style-type: none"> ▪D : 출구지름 ▪b : 출구간격 ▪단면적 : 50mm^2
	b=4mm		
D=2mm (출구 16개)	b=3mm		
	b=4mm		
D=3mm (출구 7개)	b=4mm		
D=3mm (출구 7개)	b=9.82mm		

2.2 x방향 속도 분포 특성

원형 출구의 지름(D)과 간격(b) 변화에 따른 x방향 속도 분포 특성을 확인하기 위한 실험을 수행했다. 주파수(f) 50Hz, 진폭(A) 1.006V의 사인파(Sine wave) 신호를 입력하여 구동기를 작동시키고, 높이(z) 3mm 지점에서 열선유속계(I-Type Hot wire anemometry)를 사용하여 z 방향 속도를 측정하였다. 원형 출구 중심을 따라 이송장치를 0.2mm 간격으로 이동시키며 Labview 프로그램을 이용하여 RMS(Root Mean Square) 속도를 측정했다.

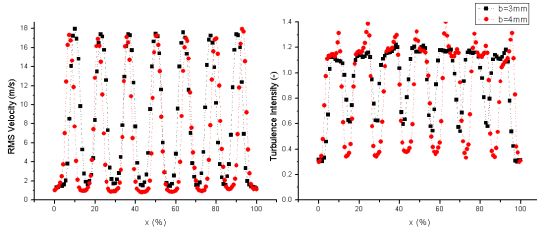


그림 2 D=1.5mm, RMS 속도 및 난류도

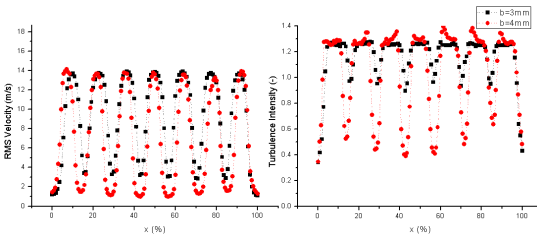


그림 3 D=2mm, RMS 속도 및 난류도

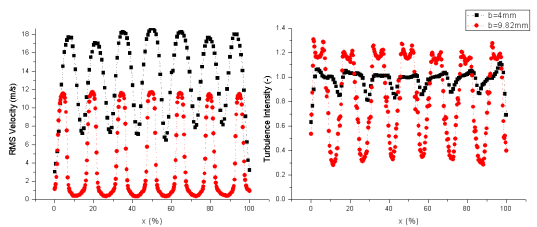


그림 4 D=3mm, RMS 속도 및 난류도

그림 2, 그림 3의 RMS 속도 분포를 보면 각 원형 출구는 x방향으로 일정한 분포 형태를 나타내고 있다. 두 경우 모두 원형 출구 중앙에서 최고속도가 측정되었는데 D=1.5mm인 경우 최고 속도가 더 컸다. 그림 4와 같이 b=9.82mm로 출구 간격이 더욱 넓어진 경우에도 x방향으로 일정한 속도 분포를 보였다.

그림 3의 b=3mm 경우와 그림 4의 b=4mm

경우에는 원형 출구 사이 지점의 속도가 확연하게 증가한 반면 그림 2의 b=3mm 경우에는 속도 증가량이 작다. 또한 그림 2와 그림 3에서는 원형 출구 사이 지점의 속도는 증가했지만 출구 중앙의 속도 변화량은 매우 작다. 그림 4에서는 원형 출구 사이 지점뿐만 아니라 원형 출구 중앙의 속도도 크게 증가했다.

그림 2, 그림 3의 난류도(Turbulence Intensity)를 보면 x방향으로 일정한 형태로 분포하고 있다. 출구의 간격이 감소하면 출구 사이 지점의 난류도는 증가했으나, 출구 중앙의 난류도는 감소했다. 특히 그림 4를 보면 원형 출구 지름에 비해 출구 간격이 크게 좁아질 때 속도는 전체적으로 증가했지만 난류도는 현저하게 감소했다는 것을 알 수 있다. 각 출구에서 발생하는 Vortex Ring의 간섭 정도에 따라 출구 사이 지점의 속도와 난류도가 결정되는 것으로 판단된다.

2.3 y방향 속도 분포 특성

각 출구 형태별로 원형 출구에서 발생하는 Vortex Ring이 영향을 미치는 범위를 확인하기 위한 실험을 수행했다. 2.2절의 실험과 동일한 조건의 신호를 입력하고 z=3mm 높이에서 원형 출구 중심선을 따라 y방향으로 0.1mm씩 이동하며 RMS 속도를 측정했다. 원형 출구에서 나온 유동이 영향을 미치는 범위를 비교하기 위해 Amit Agrawal의 연구 등 여러 논문에서 사용된 바 있는 Jet Width를 비교했다.⁶

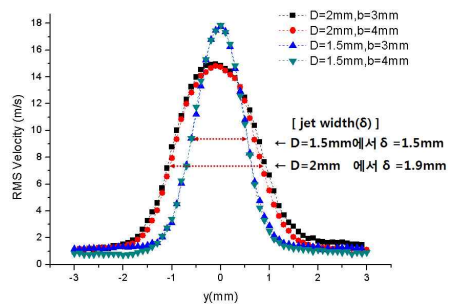


그림 5 D=1.5mm, D=2mm RMS 속도

그림 5를 보면 출구 중앙의 속도는 D=1.5mm인 경우가 더 크지만 Jet Width(δ)는 D=2mm인 경우가 더 크다. 2.2절에서 언급되었던 x축 속도 분포 특성과 비교하면 출구 간격(b)

이 좁아질 때 출구 사이 지점의 속도는 증가했으나, y축 방향 Jet Width는 변화가 없다. 그림 4와 그림 6을 보면 D=3mm, b=4mm인 경우에 출구 중앙과 출구 사이 지점의 속도는 크게 증가했지만 Jet Width 변화량은 매우 작다.

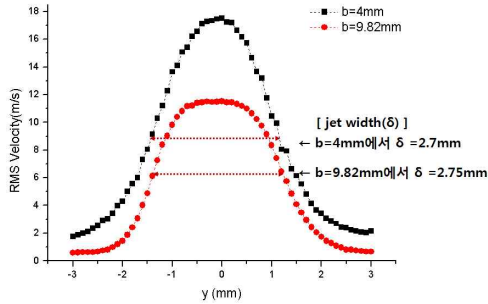


그림 6 D=3mm, RMS 속도

2.4 z방향 속도 분포 특성

z방향 속도 변화를 관찰하기 위한 실험을 수행했다. 2.2~2.3절과 동일한 신호를 입력하고, z=3mm~53mm 높이까지 1mm 간격으로 이동하며 출구 중앙의 RMS 속도를 측정했다. 측정된 데이터를 바탕으로 z축 방향 속도 감쇠율을 계산하였다. 난류 이론에 의하면 z/D>8 거리에서 난류 Jet의 초기 속도(U_j)와 z 높이에서의 속도(U_s)의 관계는 다음과 같이 알려져 있다.⁷

- Plane Jet : $U_s/U_j = C(z/D)^{-1/2}$
- Circular Jet : $U_s/U_j = C(z/D)^{-1}$

그림 7은 출구 중앙 RMS 속도의 무차원 계수 그래프이다. z/D>8 영역을 대상으로 Power Curve Fitting을 하여 $U_s/U_j = C(z/D)^m$ 관계를 비교하였다. 동일 간격(b=4mm)에서 각 출구의 감쇠율은 Plane Jet과 Circular Jet의 이론적인 값과 차이가 났는데 이에 대한 원인은 원형 출구에서 분출된 Jet의 형상과 관련이 있는 것으로 판단된다. 그림 9와 같이 원형 출구에서 분출된 Vortex Ring은 출구에서 멀어질수록 z에 비례하여 크기가 증가하는 것으로 알려져 있다.⁸ 그런데 원형 출구가 배열된 형태에서는 각각의 원형 출구에서 발생한 Vortex Ring이 z방향으로 흐를수록 서로 만나서 혼합되기 때문에 최초의 성질을 유지하지 못한다. 또한 그림 8을 보면 출구 간격이 달라도 일정한 높이가 지나서

각 출구의 유동이 혼합된 이후에는 비슷한 감쇠율을 나타내고 있다.

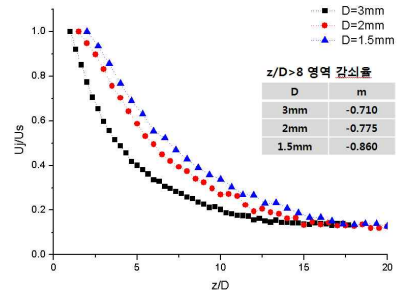


그림 7 b=4mm, 무차원 속도

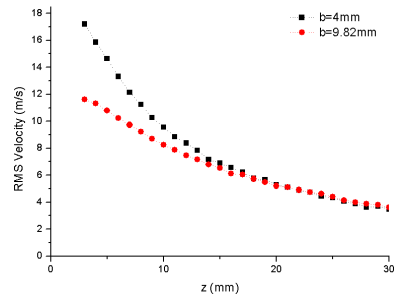


그림 8 D=3mm, RMS 속도

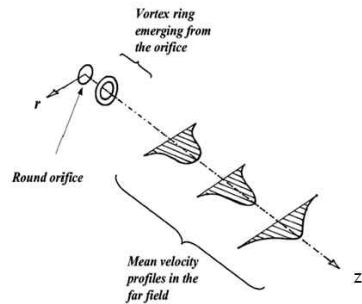


그림 9 원형 출구의 속도 형상⁸

2.5 Momentum Flux 계산

원형 출구에서 외부로 전달되는 운동량을 비교하기 위해 z=3mm에서 측정된 z방향 속도를 기준으로 Momentum Flux를 계산하였다. 다음의 관계식을 이용하여 원형 출구 1개의 Momentum Flux를 계산하고, 출구 형태별로 전체 면적에 대한 값을 도출하였다.⁹

$$\overline{M}_0 = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \left[\int_0^{D/2} \rho u_0^2(r, t) \cdot 2\pi r dr \right] dt$$

$$U_0 = f \int_0^{T/2} u_0(t) dt : U_0 = 1/2 \text{ 주기 속도, } T = 1/f$$

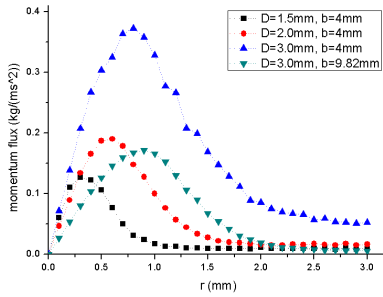


그림 10 출구 1개의 Momentum Flux

그림 10과 표 2는 출구 1개와 전체면적의 Momentum Flux를 비교한 그래프이다. 동일 간격($b=4\text{mm}$)일 때 $D=3\text{mm}$ 인 경우에 가장 큰 값이 도출되었다. 그림 6과 그림 10을 비교하면 출구 간격이 증가할 때($b=9.82\text{mm}$) 출구 속도와 Momentum Flux가 감소했다. 이를 토대로 동일한 구동기 입력 조건에서 출구 간격(b)과 출구 지름(D)을 조정하여 Momentum Flux 출력을 변화시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

표 2 Momentum Flux 합계(50mm^2)

지름 (D)	간격(b)	출구 1개 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$	전체 면적 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$
1.5mm	4mm	1.98	55.41
2.0mm	4mm	3.56	56.96
3.0mm	4mm	9.91	60.04
3.0mm	9.82mm	3.81	26.68

3. 결론

본 논문에서는 자유류가 없는 조건에서 원형 출구를 배열한 Synthetic jet의 유동 특성을 연구했다. 그 결과 동일한 구동기 입력 조건에서 출구 지름과 간격에 따라 출구 속도, 난류도, Jet Width, Momentum Flux가 달라지는 현상을 확인했다. 원형 출구를 배열한 형태는 x방향으로 일정한 속도 분포를 나타냈기 때문에 직사각형 출구에서 출구 중앙 부분의 속도가 감소하는 문제점의 대책이 될 수 있다. 또한 출구를 박리 영역을 따라 곡선 형태로 배열할 수 있기 때문에 Synthetic jet의 유동제어 성능을 개선할 수 있다. 향후에는 자유류가 있는 조건에서 원형 출구의 유동 특성을 연구하고, 최적의 유동 제어 성능을 발휘할 수 있는 조건과 그 현상에 대한 물리적 원리를 분석할 계획이다.

참고 문헌

- David Greenblatt, Israel J. Wygnanski, "The control of flow separation by periodic excitation", Progress in Aerospace Sciences 36 (2000) 487-545.
- S. Abdou, S. Ziada, "Spanwise Characteristics of High-Aspect-Ratio Synthetic jets", AIAA JOURNAL Vol. 44, No. 7, July 2006.
- Woore Kim, Sanghoon Kim, Kwangwoo Choi, Chongam Kim, "Experimental and Computational Study on Flow Characteristics by Synthetic jets Configuration", 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 4-7 January 2010, Orlando, Florida.
- Shan Zhong, Mark Jabbal, Hui Tang, Luis Garcillan, Fushui Guo, Norman Wood, Clyde Warsop, "Towards the Design of Synthetic-Jet Actuators for Full-scale Flight Conditions Part 1: The Fluid Mechanics of Synthetic-Jet Actuators", Flow Turbulence Combust (2007) 78:283-307.
- Ivana M. Milanovic, K. B. M. Q. Zaman, "Synthetic jets in Crossflow", AIAA JOURNAL Vol. 43, No. 5, May 2005.
- Amit Agrawal, Gunjan Verma, "Similarity analysis of planar and axisymmetric turbulent Synthetic jets", Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Powai, Mumbai 400 076, India, International Journal of Heat and Mass Transfer 51 (2008) 6194-6198.
- H.Tennekes, J.L.Lumley, "A First Course In Turbulence", The MIT Press(1972) 130-134.
- Gopi Krishnan, Kamran Mohseni, "Axisymmetric Synthetic jets: An Experimental and Theoretical Examination", AIAA JOURNAL Vol. 47, No. 10, October 2009.
- Hui Tang, Shan Zhong, Mark Jabbal, Luis Garcillan, Fushui Guo, Norman Wood, Clyde Warsop, "Towards the Design of Synthetic-Jet Actuators for Full-scale Flight Conditions", Flow Turbulence Combust (2007) 78: 309-329.
- Sang Hoon Kim, Chongam Kim, "Separation control on NACA23012 using Synthetic jet", Aerospace Science and Technology 13 (2009) 172-182.

후기

본 연구는 교육과학기술부 한국연구재단(No.20090084669), 국토해양부 건설기술혁신사업('09 기술혁신 E02), 항공우주 신기술연구소 및 BK21 사업의 지원으로 수행되었습니다.