

유체 진동기에 의해 생성된 제트의 유동가시화

박통일* · 김대겸†

Flow Visualization of a jet generated by a sweeping jet actuator

Tongil Park, Daegyoun Kim[†]

Abstract A sweeping jet actuator (SJA) is an instrument generating pulsing jets with no moving elements. Because of its simple design and high durability to shock and vibration, SJA has recently drawn increasing attention for the application to flow control such as aerodynamic control of a wing and thrust vectoring of a jet engine. However, experimental and numerical studies on SJA have been limited to internal flow structure of SJA. In this study, we investigated the flow structure and its variation in the outlet of SJA. We carried out the experiment to understand the flow structures using PIV (Particle Image Velocimetry). The flow structure varies with a degree of the outlet and volume flow rate. There is leaking process during half jetting cycle. The process of the main jet can occur because the jet moving time increased from one side to the other side.

Key Words : Flow Visualization(유동가시화), Fluid Actuator(유체 구동기), Jet(제트)

1. 서 론

유동 제어는 마이크로 스케일에서부터 매크로 스케일까지 다양한 분야 걸쳐 지속적으로 연구되고 있다. 유동을 제어하기 위해 압력을 제어하거나, 유체가 흐르는 채널의 기하학적 구조의 변형을 통해 제어하는 등 유동 제어를 효과적으로 하기 위한 연구들이 지속적으로 진행되고 있다. 그중 출구에서 일정하게 유체를 분출하는 제트와는 달리 불규칙적으로 분출하는 특성을 갖는 유체 진동기(Sweeping Jet Actuator)가 있다. 유체 진동기는 내부에 유체의 흐름을 변경하는 장치를 장착하여 외

부 신호를 통해 유체를 제어하는 방식과 유체 진동기의 고유 특성을 이용하여 제어하는 방식이 있다. 이 중 고유 특성에 의해 불규칙한 제트를 형성하는 유체 진동기는 기계적인 특성에서 다른 방식의 진동기에 비해 장점을 갖고 있다. 진동기 내부에 유체 흐름을 바꾸는 요소가 없으므로 고압의 유체를 유입시켜도 기계적 충격이나 진동에 파손되지 않는다. 또한, 외부 신호에 의해 제어하는 방식이 아니므로 EMI(Electromagnetic Interference)에 영향을 받지 않는다.^[1] 이러한 장점에 기인하여 유체 진동기는 항공기 수직 날개에 부착하여 유동 제어를 통해 수직 날개의 효율성을 증가시키는 연구와 제트엔진의 수직 방향에 장착하여 전투기가 급격하게 선회하는 추력편향(Thrust Vectoring)에 적용하는 연구에 사용되었다.^[2, 3]

† 한국과학기술원 기계공학과(KAIST)

E-mail: daegyounkim@kaist.ac.kr

* 한국과학기술원 기계공학과(KAIST)

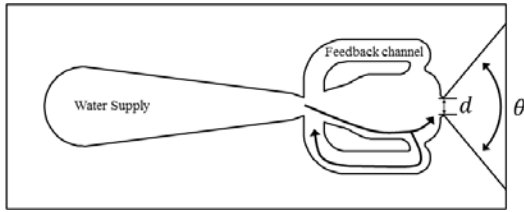


Figure 1. Geometry of a sweeping jet actuator[1]

Fig 1에서와 같이 2개의 피드백 채널을 가진 유체 진동기는 유체가 진동기 내부로 진입할 때 코안다 효과(Coanda Effect)로 인해 유체가 주 유동이 한쪽 벽면으로 이동한다. 주 유동이 이동한 방향의 피드백 채널로 주 유동의 일부가 이동하게 되며 피드백 채널의 압력이 증가하여 유체 진동기 입구의 주 유동을 반대 방향으로 이동시킨다. 위의 과정이 지속적으로 반복되어 출구에서 불규칙한 제트를 형성한다. 일반적으로 유량이 증가하면 진동기의 진동 주파수가 증가하지만, 설계 변수 변화에 따른 주파수 유량-진동 주파수 관계가 명확히 정립되지 않았다. Bobusch는 유체 진동기 내부 유동 구조를 실험적으로 분석하여 유체 진동기 구동 원리 및 특성을 밝혔다. Gokoglu는 출구가 두 개로 나누어진 유체 진동기를 수치적으로 분석하였다. [4, 5] Kara는 모서리에 곡면 처리된 유체 진동기의 특성을 수치적으로 분석하였다. [6] 다양한 스케일과 형상에 대해 많은 연구가 진행되었지만 모든 유체 진동기에 적용될 수 있는 이론은 없는 상태이며 이에 대해 지속적으로 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 유체 진동기가 출구에서의 유동 흐름의 변화를 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry)를 통해 가시화하여 출구에서의 특성을 분석하였다.

2. 실험 장비 및 실험 준비

유체 진동기 실험은 1200×500×450mm (길이×폭×높이) 수조를 가지고 진행하였다(Fig 2). 사용한 유체 진동기로부터 양쪽으로 분출되는 유동이 수조 측면에 반사되어 돌아오는 영향을 줄이기 위해 폭이 모델의 폭에 비해 충분히 넓은 수조를 사용하였다. 가시화할 때 제트에 의한 수면의 흔들림의

영향을 줄이기 위하여 수면으로부터 210mm 떨어진 곳에 유체 진동기를 고정했다. 수조 외부의 급수펌프로 유체 진동기의 유입부에 물을 공급하고 유량계와 펌프 사이에 유량 밸브를 설치하여 유량 조절이 가능하도록 하였다. 유량 조절은 5% 오차를 갖는 면적식 유량계를 사용하였다.

실험에 사용한 유체 진동기는 Fig 1의 기하학적 구조로 되어 있으며 Ultimaker사의 3D 프린터를 통해 실험모델을 제작하였다. 제트 출구의 폭(d)은 6.25mm로 고정하고 분출 각도(θ)는 60°, 80°, 100°로 제작하였다. 유출구의 중형비는 1:1로 고정했다. 유체 진동기에 유입되는 유량은 3.0, 3.5, 4.0 LPM(Liter/min)을 사용하여 실험을 진행하였다.

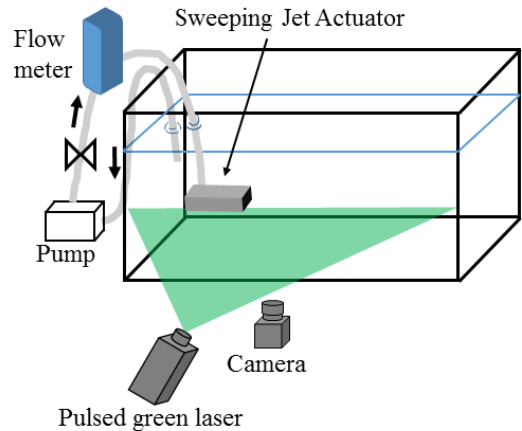


Figure 2. Schematic of experimental setup

유동 가시화를 위해서 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry)를 활용하였으며 영상 표본화 주파수와 레이저 펄스 간격은 각각 15Hz, 1ms로 설정하였다. 입자 영상유속계를 위해 사용한 파티클은 평균 지름이 50 μ m인 것을 사용하였고, 주기적으로 진동기 내에 입자가 적층되지 않도록 진동기를 세척해 주었다. 레이저 시트를 유체 진동기 출구 높이의 중간에 맞추고 수조 옆면으로부터 비춰지도록 배치하고 카메라(GEV-B1620M, Imperx, Inc.)를 수조 아래에 고정해서 촬영할 수 있도록 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

유체 진동기의 제트는 출구에서 단일 제트만 지속적으로 발생하는 일반적인 제트와 달리 출구에서 방향이 다른 두 개의 맥동을 가진 비정상적인 (Unsteady) 제트를 발생한다. 일정한 유량을 유체 진동기에 유입했을 때 출구에서 생성되는 제트는 특정 주파수를 가지며 좌우로 이동한다.

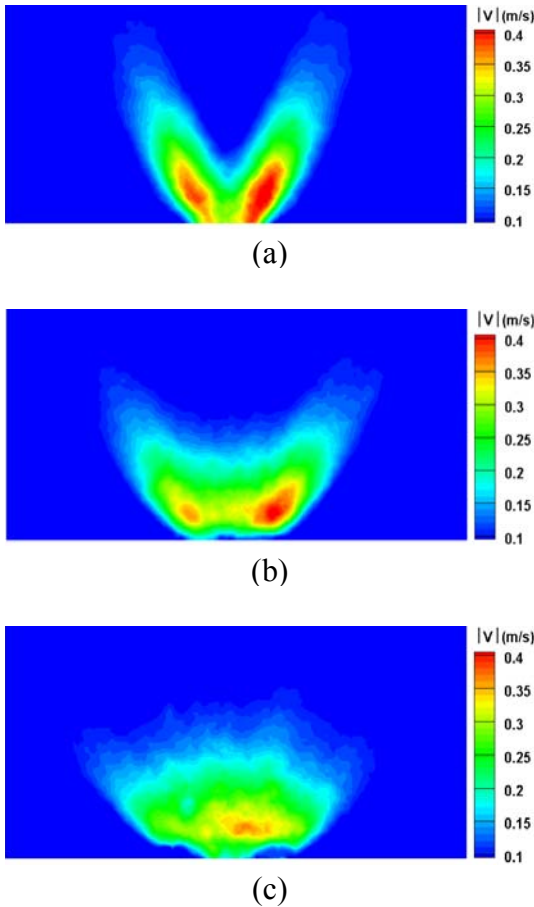


Figure 3. RMS of velocity magnitude at 4LPM, (a) 60°, (b) 80°, (c) 100°

Fig. 3은 유체 진동기에 4LPM 유량을 가했을 때 각 위치에서의 유속 RMS (Root Mean Square)을 출구 각도에 따라 각각 나타낸 것이다. 유체 진동기 출구에서의 유동은 출구 좌우측에서 두개의 최댓값을 갖는다. 유체 진동기가 가지는 고유한 형상

특성에 의해 생기는 유동 현상이며 주 유동이 두 지점을 중심으로 분출되는 것을 나타낸다.

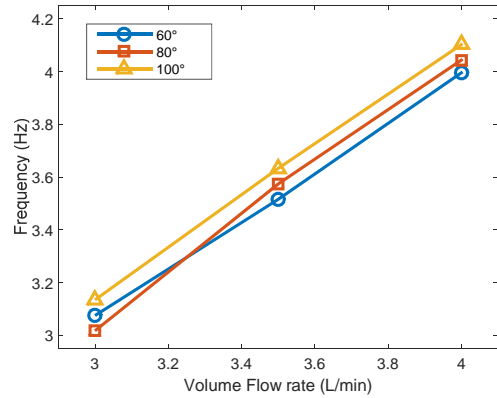
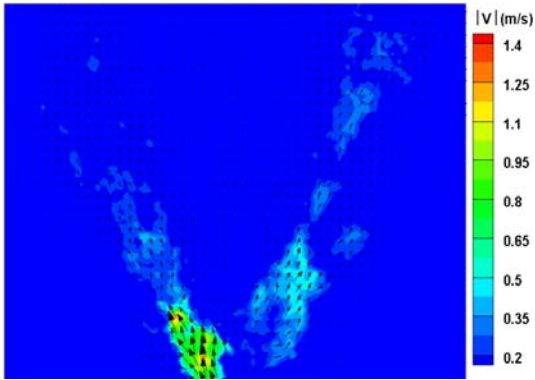


Figure 4. Oscillating frequency to volume

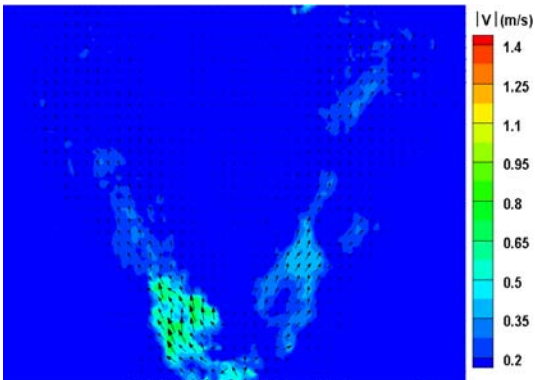
각각의 실험 케이스에서 분출 주파수를 확인하기 위해 주 유동이 지나가는 선에서의 최댓값을 가지는 좌표에서 시간에 따른 유속을 FFT (Fast Fourier Transform)를 통해 분석하여 Fig 4에 제시하였다. 짧은 유량 구간에서 실험하였기 때문에 유량과 진동 주파수가 선형적인 관계인 것처럼 보이거나 공기를 가지고 실험하였을 경우 일부 구간에서만 선형적인 관계를 가진다는 것이 알려져 있다. [7]

Fig 5-6은 시간에 따른 유동 변화를 나타낸 것이다. 주 유동이 분출된 이후에 반대편으로 이동하는데 주 유동에 비해 속력이 작은 제트가 분출되며 이동한다. 각 주기별로 제트가 중앙을 두 번 지나지만 그 유속이 작아 시간 평균값이 작음을 확인할 수 있다. 하지만 출구 각도가 100°인 경우에서 다른 케이스와 다른 현상이 발생한다.(Fig. 6) 유체 진동기의 작동원리를 살펴보면 두 개의 주 유동이 내부 형상의 고유 특성에 의해 좌우로 변경한다. 즉, 개폐 밸브에 의해 여단은 원리가 아니기 때문에 출구에서의 제트가 지속적으로 분출되고 있는 상태로 좌우로 방향을 변경한다. 출구 각도가 60°, 80°인 경우에 주 유동이 좌우로 이동하며 중간 지점에서 제트 일부가 분출되지만 주 유동 이동 시간이 짧아 유실 유량이 상대적으로 적다. 출구각도 100° 모델의 경우 주 유동이 좌우로 이동하는 시간이 상대적으로 길어 좌우 끝단에서 발생해야 할

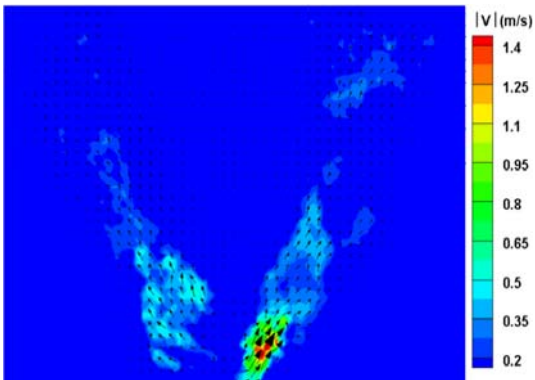
맥동이 이동 중에 일부 분출되어 중앙선 근방에서 유속 RMS 값이 상대적으로 크다. 또한, 유속 분포가 출구 각도 증가에 따라 좌우로 넓어지는 것뿐만 아니라 중앙선 근처에서도 유량 유실로 인해 넓은 영역으로 유속이 존재하는 것을 알 수 있다.



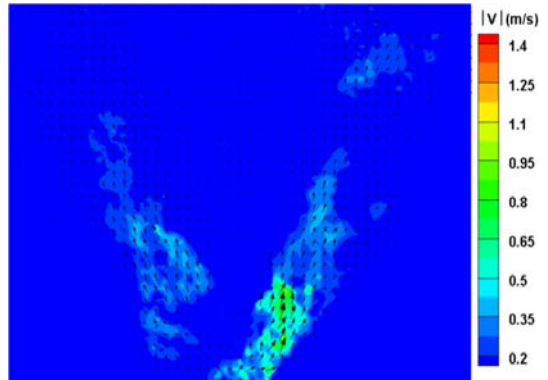
(a)



(b)



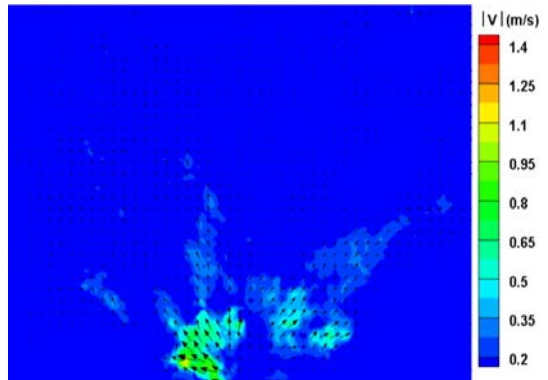
(c)



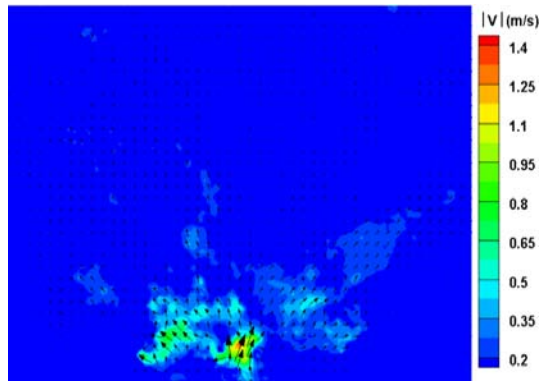
(d)

Figure 5. Time series of velocity magnitude in 3.5LPM, 60°

(a) $t = 0$, (b) $t = \Delta t$, (c) $t = 2\Delta t$, (d) $t = 3\Delta t$, (e) $t = 4\Delta t$, ($\Delta t = 66.7$ ms)



(a)



(b)

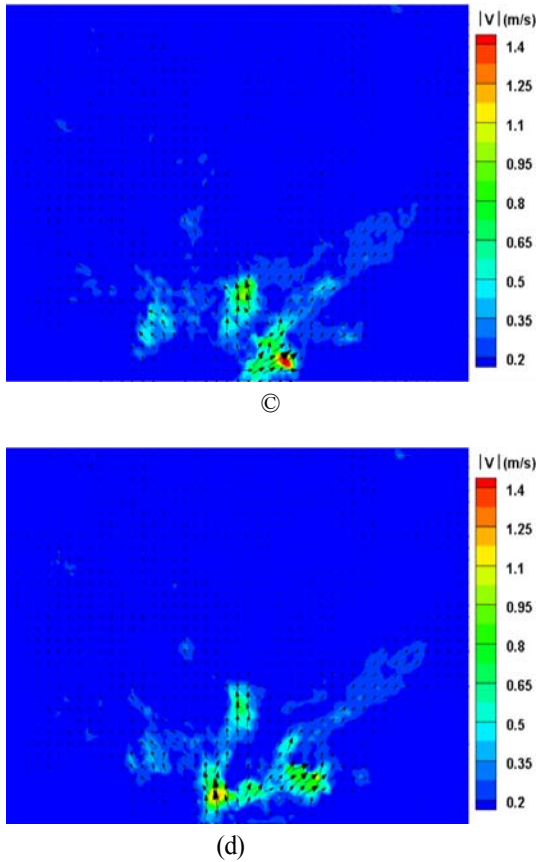


Figure 6. Time series of velocity magnitude in 3.5LPM, 100°
 (a) $t = 0$, (b) $t = \Delta t$, (c) $t = 2\Delta t$, (d) $t = 3\Delta t$, (e) $t = 4\Delta t$, ($\Delta t = 66.7$ ms)

유체 유동기 출구에서 34mm 떨어진 지점에서 출구에서 제트 속도 프로파일을 유량 변화에 따라 Fig 7에 나타내었다. 중앙선 좌우측으로 두 개의 최댓값 영역을 가지고 있으며 이는 주 유동이 지나가는 경로이다. 각도 증가에 따라 중앙선의 유속이 증가함을 확인할 수 있다. 유량의 변화에 따라 살펴보면 3LPM (Fig 7(a))의 낮은 유량에서 유속 프로파일이 2차 함수 형태로 나타난다. 즉, 좌우측의 유속 RMS값이 최댓값 영역이 사라지고 중앙선에서 한 개의 최댓값만을 갖는다. 이는 4LPM (Fig 7(b))에서의 실험과 상이한 결과로 4LPM에서는 중앙선에 최댓값 영역이 추가된 6차 함수 형태의 속도 프로파일을 형성한다. 유량 감소로 인해 주 유동의 이동시간이 83 ms 증가하여 주 유동이 중앙

에서 유출량 증가한다. 이로 인해 중앙선에서 유출량이 큰 100° 모델에서 유량에 따라 속도 프로파일의 변화가 나타난다.

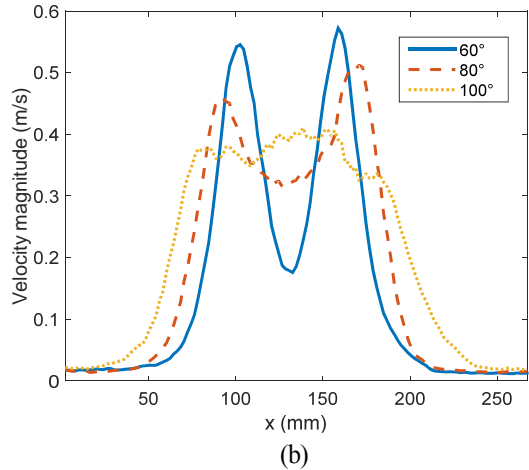
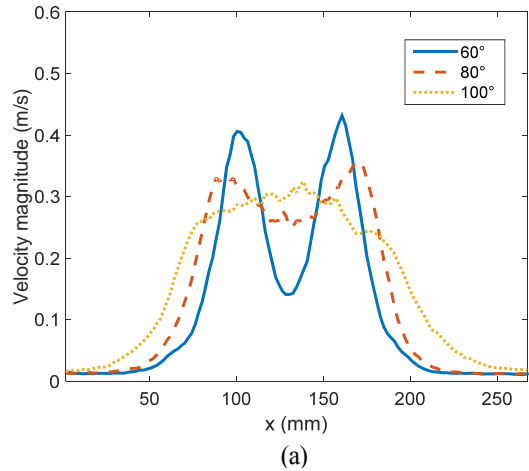


Figure 7. Comparison of RMS velocity profiles at 34mm (a) 3LPM, (b) 4LPM

4. 결론

본 연구에서는 고유 형상에 의해 유동 변화를 유도하는 유체 진동기를 가지고 출구 각도와 유량에 따른 출구에서의 유동 변화를 가시화하여 그 원리와 경향성에 대해 분석하였다.

주어진 유량에서 출구에서의 주 유동이 중앙선

좌우측으로 일정한 주기를 가지고 이동하는 것을 확인하였다. 본 실험에서는 유량 구간이 좁아 유량에 따른 주 유동의 분출 주파수에 대해 분석하기는 어렵다.

유체 진동기의 출구 각도를 변경하였을 때 각 각도에 따라 유속 프로파일이 달라졌다. 이는 주 유동이 한쪽 끝에서 분출된 후 반대편 끝단으로 이동하는 시간이 길어질 때 발생하는 현상으로 출구 각도가 작은 모델에서는 발생하지 않았지만, 출구 각도가 커질수록 중앙선 근방에서 유속이 증가함을 볼 수 있다. 유체 진동기를 선택할 때 사용 목적에 맞는 진동 주파수를 갖는 모델을 선택하는 것뿐만 아니라 출구에서 주 유동이 지나가는 경로 및 유실 유량이 발생하는 지점 및 그 양을 고려해야 한다.

본 연구에서는 출구 각도 및 유량에 따른 유체 진동기의 출구에서의 유동 특성에 대해 연구하였다. 유체 진동기의 각도 및 유량에 대한 특성을 정확하게 파악하기 위해 넓은 유량 영역에서의 실험이 동반되어야 한다. 또한, 출구 각도뿐만 아니라 출구 주변의 다양한 상황에 따른 유체 진동기 유동 특성변화에 대한 연구가 필요하다.

후 기

This research was supported by the KUSTAR-KAIST Institute, KAIST, Korea.

REFERENCE

- 1) Cattafesta III, Louis N., and Mark Sheplak., 2011, "Actuators for active flow control.", *Annu. Rev. Fluid Mech.* 43, pp. 247~272.
- 2) Seele, Roman, et al., 2012, "Improving rudder effectiveness with sweeping jet actuators." 6th AIAA Flow Control Conference.
- 3) Raman, G., et al., 2005, "Jet thrust vectoring using a miniature fluidic oscillator." *Aeronautical Journal* 109.1093, pp. 129~138.
- 4) Bobusch, Bernhard C., et al., 2013, "Experimental study of the internal flow structures inside a fluidic oscillator." *Exp. Fluids* 54.6, pp. 1~12.
- 5) Gokoglu, Suleyman A., et al., 2009, "Numerical studies of a fluidic diverter for flow control." 39th AIAA Fluid Dynamics conference.
- 6) Kara, Kursat., 2015, "Numerical Study of Internal Flow Structures in a Sweeping Jet Actuator." 33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference.
- 7) Woszidlo, René, et al., 2010, "Parametric study of sweeping jet actuators for separation control.", 5th AIAA Flow Control Conference. Vol. 28.