

Synthetic Jet Actuator를 이용한 능동 유동 제어

노종민^{*1}, 김종암^{*2}

Active Flow Control Using the Synthetic Jet Actuator

Jongmin Noh and Chongam Kim

Currently, the development of MEMS(Micro Electronic Mechanical System) technology awakes many research's interest for the aerodynamics. This work presents the development of a compact synthetic jet actuator for flow separation control at the flat plate. The formation and evolution of fluidic actuators based on synthetic jet technology are investigated using Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations. Also, 2-Dimensional, unsteady, incompressible Navier-Stokes equation solver with single partitioning method for Multi-Block grid to analyze and a modeled boundary condition in developed for the synthetic jet actuator. Both laminar and turbulent jets are investigated. Results show very good agreement with experimental measurements. A jet flow develops, even though no net mass flow is introduced. Pair of counter-rotating vortices are observed near the jet exit as are observed in the experiments.

Key Words: Synthetic Jet Actuator, MEMS, Flow Control, NURBS

1. 서론

최근 MEMS(Micro Electronic Mechanical System)기술의 발달로 인하여 항공분야에서도 MEMS 기술을 적용하려는 연구가 시도 되고 있다. MEMS 기술을 실제 비행체에 적용하기 위한 선행연구로서 MEMS 주위의 유동장에 대한 정확한 해석은 비행체의 공력 특성이나, 유동장의 제어, 최적 설계 등의 분야에 있어서 필수적인 요소이다. MEMS 내부 유동장의 특성에 대하여 살펴보면 비정상, 비압축성 상태이고, MEMS의 크기가 대략 수십에서 수백 μm 이기 때문에 저 레이놀즈수 유동으로 특징지을

수 있다. 때문에 본 연구에서는 비행체 주위의 유동 특성에 영향을 끼칠 수 있는 국부적인 MEMS device 내부 유동을 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 접근하였고, 특히, MEMS 중에서 synthetic jet actuator 주위의 vortex shedding 이라는 특징적인 유동현상을 해석하고, 향후 비행체에 응용할 경우 공력특성을 효과적으로 예측할 수 있도록 방법을 제시하였다. 또한 synthetic jet actuator의 구조상 복잡한 내부를 유동해석하기 위해서 multi-block 격자를 이용할 수 있도록 해석, 검증하였다. 기존에 제안되어진 synthetic jet actuator 출구의 속도분포 경계조건이 외부 유동이 있을 경우에 실험 결과와 일치하지 않는 문제점을 내재하고 있어, 본 연구에서는 synthetic jet actuator의 오리피스를 고려하여 유동현상을 해석하였고, 이를 통해 jet 출구에서 jet과 외부 유동과의 상호작용을 반영하였다. 또한 오리피스가 있을 때 jet 출구 주위의 속도분포를 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)을 이용하

여 함수화하여 오리피스를 고려하지 않고 해석하여 좋은 결과를 얻었다. 이를 통해 기존의 'top-hat' 방식의 경계조건 대신 jet 출구에서의 속도분포를 고려한 새로운 수치적 경계조건을 제시하였다.

2. Synthetic Jet Actuator 의 특성

Synthetic jet은 주기적인 운동을 하는 장치로써 압전장치와 다이어프램 또는 피스톤을 이용하여 공동의 한쪽면에서 진동을 하여 주기적인 jet을 형성시키는 장치이다. [그림1]은 synthetic jet actuator의 단면을 보여주는 것으로서 membrane의 진동에 의해서 cavity로부터 mass가 오리피스를 통하여 유출입 함으로써 net mass 의 양은 일정하고, 외부 유동장에 운동량만 전달을 하는 것이다. 또한 외부유동장의 속도 차이로 인하여 전단층을 형성하고, 결과적으로 와류(vortex)를 형성하게 된다.

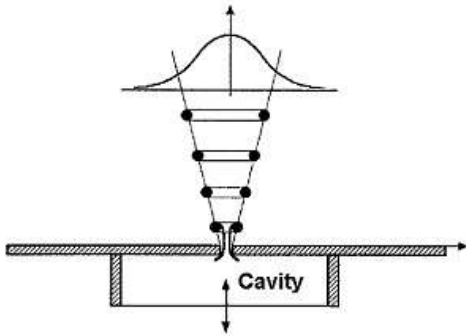


Fig.1 Synthetic Jet Actuator 단면도

2.1 Synthetic Jet Actuator 모델 경계 조건

Synthetic jet actuator의 주기적인 조화 운동으로부터 유동의 요동을 모델링 하기 위해서 suction/blowing 형태의 경계조건을 사용하였다. 유동장의 요동은 진동면에서 벽면에 수직한 방향으로 다음과 같이 정의 하여 사용되어 진다.

$$\bar{u}_n(\xi=0, \eta, t) = Af(\eta)\sin(\omega t) \quad (1)$$

위 식에서 ξ 는 유동의 진행 방향으로 정의 되고, η 는 유동의 진행면에 수직한 방향을 나타낸다. 그리고 ω 는 속도의 유동방향 성분을 나타낸다. 또한 Synthetic Jet Actuator의 orifice의 출구에서 유동속도의 형태를 나타내는 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$f(\eta) \begin{cases} 1 \\ \sin(\pi\eta) \\ \sin^2(\pi\eta) \end{cases} \quad (2)$$

이러한 분포는 실제적으로 계산 결과 및 실험 결과와 잘 일치하고 있지만, 자유류가 Synthetic Jet Actuator에 영향을 줄 경우에는 계산 결과과 실험 결과와 잘 일치하고 있지 않아 본 연구에서는 새로운 방법을 제시하였다. 또한 Synthetic Jet Actuator의 벽면의 압력 경계조건은 운동량 방정식을 고려하여 벽면의 압력 경계조건은 운동량 방정식을 고려하여 세웠다. 벽면에서의 경계조건은

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial \xi} = 0$$

이러한 경계조건은 유동의 진행방향으로 점성효과를 무시하여 운동량 방정식으로부터 유도 되어진다. 하지만 조화운동을 통하여 주위 유동장을 섭동(perturbation)시키는 synthetic jet actuator의 벽면 압력 경계조건은 식(2)의 수정된 식을 다음과 같이 정의 하여 사용한다.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \xi} = -\rho \frac{\partial \bar{u}_n}{\partial t}$$

3. 해석결과

3.1 Synthetic Jet Actuator 주위의 유동 현상

Synthetic Jet Actuator 오리피스 근처로 10^{-3} 의 크기로 격자를 모아 주었다. 또한 오리피스와 외부 유동장의 상호 영향 관계를 알아보기 위해서 Multi-Block 격자를 이용하였으며, 경계 조건 으로는 대칭 경계조건을 사용하였다. 계산에 사용 되어진 CFL수와 pseudo compressibility β 값은 각각 2와 20으로 고정하였다. Physical time step은 computation time 0.1과 한주기당 strouhal 수를 기준으로 1/60으로 무차원 하였다. 계산 조건으로 실험결과와 비교하기 위해 실험에서 사용한 레이놀즈수는 1214와 406을 이용하였다. 또한 Grid refinement study를 하고 공력계수를 산출하여 실험 결과와 비교해 보았다.

[그림 2] 에서 볼 수 있듯이 synthetic jet의 오리피스로부터 나온 유동은 유동 방향으로 진행 하면서 전 유동장의 압력분포 및와류(vorticity) 분포가 확산되지 않고 그 형태를 유지하면서 일정한 크기를 가지고 전파되어짐을 알 수가 있다. 하지만, 실제의 실험에서는 [그림 3] 처럼 진행하면서 압력 및 와류 분

포가 난류로 천이가 되어 와류(vorticity)가 확산되어 점점 감소하여 소산되어짐을 알 수가 있다. 따라서 synthetic jet actuator에서 발생되어진 jet 유동은 반드시 난류현상을 고려하여야 함을 알 수가 있다. 본 연구에서는 이를 위해서 벽면과 벽면으로부터 멀어짐에 따른 특정한 SST모델을 사용하였다. [그림 3]에서는 난류 현상을 고려하였을 때의 압력 및 와류 분포인데 시간이 지남에 따라서 운동량이 소산되어 난류로 천이되어 Synthetic Jet Actuator에서 발생되어진 유동현상이 실험결과와 비슷하게 나옴을 확인할 수가 있다. 이러한 현상을 좀 더 수치화 하여 정확하게 살펴 보기 위해 유동 방향을 jet 속도의 최대값으로 무차원화 하여 jet의 오리피스로부터 멀어짐으로써 나타나는 유속의 크기를 측정하였다.[그림 4] 여기서 볼 수 있듯이 난류현상을 고려한 Synthetic Jet Actuator가 층류현상만을 고려한 결과보다 실험 결과와 잘 일치하고 있다. 이는 Synthetic Jet Actuator로부터 나온 유동이 오리피스의 출구로부터 멀어짐으로써 운동량이 감소하여 천이 과정을 거치게 되고 난류에너지의 소산이 지속되면서 결국 유동특성이 난류화 되어 [그림 3]에서 본 압력 및 와류 분포와 잘 일치함을 알 수가 있다. 또한 기존에 선행 연구자들이 Jet의 경계조건으로 사용한 0-D model에 대한 특성을 파악하기 위해서, 0-D model과 오리피스를 고려한 모델에 대하여 살펴보았다. 이때, 오리피스의 아랫면의 경계조건은 기존의 simple jet 경계조건을 따랐다. 오리피스를 고려한 경우에는 오리피스 내부로부터 경계층이 형성되기 때문에 오리피스 출구에서 기존의 “top-hat” 속도 분포에 비하여 다른 특성을 보인다. 하지만, 외부유동(자유류)이 없을 경우에는 [그림3]에서 볼 수 있듯이 잘 일치함을 볼 수가 있다. 결국 synthetic jet actuator에서는 오리피스의 효과보다는 유동장의 난류 효과가 중요함을 알 수가 있다.

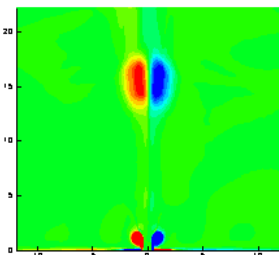


Fig.2 층류일 경우 와류분포

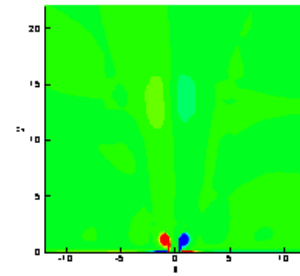


Fig.3 난류일 경우의 와류분포

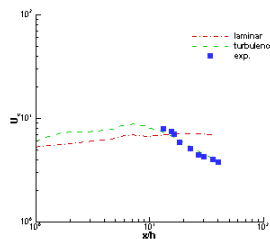


Fig.4 층류와 난류일 경우의 centerline 속도분포

3.2 자유류와 Synthetic Jet Actuator의 관계

평판 경계층과 Synthetic Jets의 상호 영향 관계를 알아보기 위해서 난류 경계층의 inner layer 안에서 생성된 와류에 관하여 알아보았다. 앞서 연구한 결과를 토대로 하여 오리피스의 유무에 따른 외부유동(자유류)에 대한 특성을 살펴보았다. 우선 실험 결과로부터 주어진 synthetic jet actuator의 위치에서 경계층의 두께로부터 운동량 적분 정리와 power law를 이용하여 계산할 영역의 유입류 조건을 정하였다. 계산으로부터 얻은 유입류 조건으로 synthetic jet actuator가 없는 난류 평판을 계산하여 synthetic jet actuator의 위치에서 경계층의 속도분포를 보았다. Physical time step은 synthetic jet actuator의 주파수와 jet의 한주기당 평균속도로 계산한 strouhal 수를 실험과 동일하게 하였다. 또한 오리피스 유무에 따른 특성을 파악하기 위해서 single block 격자와 multi-block 격자를 이용하여 계산을 수행하였다. [그림 5]을 보면 위상각 120도에 따라서 한 주기동안 와류(vorticity)분포에 대하여 알아보았다. 이때, 전체적으로 와류(vorticity)분포가 비슷하지만, 강도가 오리피스를 고려한 경우가 더 큰값을 가짐을 알 수가 있다. 이를 수치적으로 더 정확하게 비교하기 위해서 synthetic jet의 위치로부터 경계층의 두께를 기준으로 무차원 하여 -0.5, 0.5, 3.0

인 위치에서 평균 속도 분포를 구한 결과 synthetic jet actuator의 오리피스를 고려한 결과가 고려하지 않은 결과 보다 실험 결과와 잘 일치함을 알 수가 있다.[그림6] 이러한 계산 결과로 보아 synthetic jet actuator와 평판 사이의 상호 영향의 물리적 특성을 대부분 잘 관찰할 수 있었다. 결과적으로 synthetic jet actuator는 벽면의 압력구배를 변하게 하고, jet이 작동하지 않았을 경우(baseline model)와 비교하여 jet 후류 근처의 와류(vorticity)의 두께가 감소하고, 이러한 압력구배의 존재로 인하여 최종적으로는 난류경계층의 두께가 감소함을 알 수가 있다.

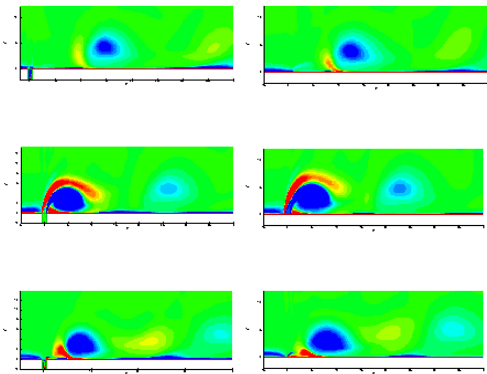


Fig.5 오리피스 유무에 따른 와류분포

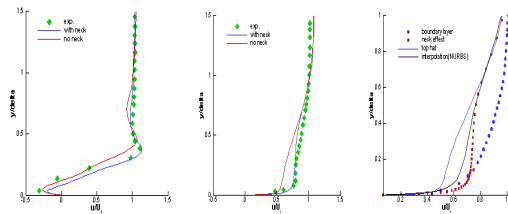


Fig.6 위치에 따른 경계층 두께

3.3 오리피스 경계 조건

blowing, suction방법의 유동제어에 사용되어진 jet 경계조건은 식(2)와 같이 표현 되어진다. 이때 U_0 는 한 주기동안에 이루어지는 blowing과 suction의 속도 평균값을 의미하며, $f(\eta)$ 는 오리피스의 입구에서 발생되어지는 jet 형태를 뜻한다. 이런 jet 입구에서의 속도 형태는 자유류(cross-flow)가 없을 경우에는 실험 결과와 잘 일치하고 있지만, 자유류(cross-flow)가 있을 경우에는 잘 일치하지 않음을 알 수가 있다. 이러한 이유는 자유류(cross-flow)가 jet의 입구에서 발생되어지는 속도에 영향을 주는 것으로 알 수가 있다. [그림 6]은 오리피스가 있는 경우와 없는 경우의 오리피스의 입구에서 속도 분포를

나타내는 것인데, 최대 속도가 오리피스가 있는 경우가 없는 경우보다 약 10%정도 큰 크기를 가지고 있다. 이러한 최대 속도는 앞서 살펴본 synthetic jet actuator에서 발생하는 와류(vorticity)에 영향을 끼치며, 결국 실제 주위의 유동에서는 오리피스의 효과를 고려하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 jet 출구에서 정의된 "top-hat" 속도분포를 나타내는 1대신에 jet 입구의 속도형상을 함수화 하여 새로운 $f(\eta)$ 를 제안하고자 한다. [그림 7]에서 볼 수 있듯이 jet 입구에서 자유류와 synthetic jet의 상호 영향에 의해서 발생되어진 속도분포를 식(3)과 같이 4차, 6차의 다항식으로 내삽(interpolation)법을 사용하여 얻을 수 있다. 하지만, [그림 7]에서 볼 수 있듯이 jet의 최대 속도가 계산결과와 일치하지 않아, NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)을 이용하여 jet 입구에서의 속도형상과 거의 일치하는 NURBS 방정식을 얻을 수 있었고, 이를 기존의 jet 입구의 속도형상 $f(\eta)=1$ 대신에, $f(\eta)$ 에 대입하여 오리피스 없이 계산을 수행하였다. 수치해석 결과 [그림 3]에서 볼 수 있듯이 오리피스를 고려하지 않은 경우보다 오리피스를 고려한 실험 결과에 경계층의 속도분포가 근접함을 알 수가 있다. 이러한 연구를 통해서, 앞으로는 오리피스를 계산하지 않는 reduced-order model의 경우에 기존의 연구자들이 사용하였던 "top-hat"속도 분포 보다는 jet 입구의 속도분포를 함수화한 속도형태를 넣는 것이 좀더 효과적 이라 생각된다. 하지만, 이러한 방법을 공식화 하기 위해서는 먼저 jet actuator의 길이 및 주파수, jet의 속도와 jet 입구에서의 속도분포와의 관계를 좀 더 많은 연구가 필요 할 듯 싶다.

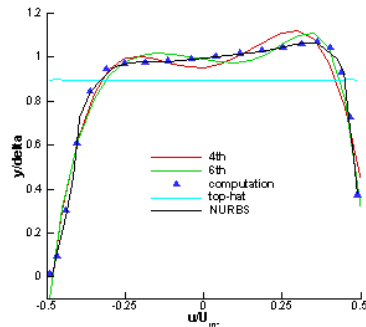


Fig.7 오리피스 입구에서의 jet 속도분포

5. 결론

MEMS(Micro Electro Mechanical System) 주위

의 공력 특성을 해석하기 위해 기존의 2차원 비정상, 비압축성, Navier-Stokes 방정식 해석코드를 Multi-Block 격자기법 중 하나인 single partitioning 기법을 이용하여 개선하였다. 또한 MEMS 의 일종인 Synthetic Jet Actuator를 이용하여 난류 평판 경계층 상의 경계층 제어 방법을 제시 하였고, 기존의 blowing/suction 의 수치적 경계조건에 대한 새로운 방법을 제시하여 기존의 Synthetic Jet Actuator의 오리피스 및 cavity를 고려하지 않고, 좀더 효율적인 계산을 수행하였다.

기존의 해석코드를 이용하여 MEMS 내부 유동 특성 해석을 통해, 저 레이놀즈수 영역의 유동 특성에서도 수치모사를 하였고, 실험결과와 비교하였다. 또한 Single Block 격자를 이용하여 MEMS 내부 및 외부 유동을 구성한 격자보다 Multi Block 격자를 사용하여 오리피스와 외부 유동장의 경계에서 격자의 질을 향상시켰다. 본 연구에서 사용되어진 Multi-Block code와 새롭게 제안된 jet 경계조건에 대한 좀 더 정확성을 위해서 앞으로는 에어포일 및 실린더와 같이 구배가 있는 물체에 synthetic jet actuator를 고려하여 다양한 연구가 필요하고, 이러한 경우에 synthetic jet이 천이점 이후의 난류 특성을 잘 모사 할 수 있는지에 대한 난류모델을 연구할 필요가 있다.

후기

본 연구는 국방과학연구소 및 서울대학교 비행체 특화연구센터의 연구비 지원에 의한 연구결과입니다.

참고문헌

- [1] H. Ok, "Development of an incompressible Navier-Stokes Solver and Its Application to the Calculation of Separated Flows," Ph. D. Dissertation, Dep's of Aeronautics and Astronautics Eng., Univ. of Washington, 1993.
- [2] C. Hirsch, "Numerical Computation of INTERNAL AND EXTERNAL FLOWS," Vol. 2: computational Methods for Inviscid and Viscous Flows, John Wiley & Sons, 1990

- [3] KUNWOO LEE, "Principles of CAD/CAM/CAE systmes," Addison Wiley
- [4] Frank M. White "Viscous Fluid Flow," McGRAW-HILL
- [5] Lin D. Kral, John F. Donovan, Alan B. Cain, and Andrew W. Cary. AIAA 97-1824
- [6] H. Tennekes and J.L. Lumley "A First Course in Turbulence," MIT
- [7] Lin D. Kral, John F. Donovan, Alan B. Cain, and Andrew W. Cary. "Numerical Simulation of Synthetic Jet Actuators" AIAA 97-1824
- [8] Donald P. Rizzetta, Miguel R. Visbal and Michael J. Stanek."Numerical Investigation of Synthetic Jet Flowfields" AIAA 98-2910
- [9] B.L.Smith and A. Glezer "Jet vectoring using synthetic jets" AIAA 97-1824