

# 다공성 표면 평판 끝 단 위의 비정상 공력 특성에 대한 연구

정예은\*·문영준\*\*

## Unsteady Aerodynamics of Flat Plate with Porous Trailing-edge

Ye Eun Jeong\* and Young J. Moon\*\*

**Keywords :** Porous surface (다공성 표면), Porosity (공극률), Unsteady flow (비정상 유동), Karman Vortex (칼만 와동)

### Abstract

In this study, a computational analysis is conducted to investigate the effects of porous surfaces on the lift and drag forces of the flat plate. With the porous treatment, it is found that the strength of the Karman vortex as well as its influences over the trailing-edge surface are much weakened, resulting in significant reduction of the pressure fluctuations over the flat plate. The drag and lift coefficients are decreased by 85% and 18%, respectively, compared to the solid surface. The computed results also indicate that the size of the porous surface area does not have much influences but the back side of the flat plate has non-negligible effects on the interaction between the wall and the Karman vortex. As a result, the lift coefficient for the solid back side case is decreased only by 50.5% compared to the solid case and the drag coefficient is even increased by 65%.

### 1. 서론

다공성 매질(porous media)의 개념은 이미 오래 전부터 화학 반응 촉매, 피막, 여과기 등에 다양하게 사용 되어 왔다. 물리 화학, 환경 공학 분야뿐 아니라 기계 공학 분야에서도 다공성 매질을 이용한 열 전달 특성 또는 다상 유동 연구 등은 지속적으로 수행되고 있다. 이런 추세에 힘입어 근래에는 다공성으로 표면을 가공하여 익형 등에 사용하는 연구가 진행되고 있다. 항공기 날개 끝 단은 대표적 공력 소음의 발생원 중 하나로 오래 전부터 활발히 연구가 진행 되어왔으며 공력의 해석보다는 항력, 소음 감소에 초점을 맞추고 있다. 비행기 날개 끝 단(slat trailing edge)이나 옆 면(flap side edge)을 다공성 표면으로 가공할 경우 와류 진동(vortex shedding)에 기인한 익형 상부, 하부의 압력에 영향을 주어 그 차를 줄이는 효과를 기대할 수 있으며, 항력과 소음 저감 등의 효과가 있다는 연구 결과들이 발표 되었다[1,2].

다공성 표면(porous surface)을 수치 해석하는 경우 표면의 모든 세공(pore)과 공동 내부까지 격자를 생성하여 해석하는 것은 효율이 매우 낮은 방법이다. 따라서 공동 내부와 표면을 격자로 구현 하는 대신 간단한 경계조건을 다공성 표면 대신 설정할 수 있다면 격자 수와 계산 시간을 줄일 수 있게 된다. 다공성 표면의 경계 조건은 다르시의 법칙(Darcy's Law)[3]을 사용하여 공동 내부, 외부의 압력 차를 이용하여 법선 방향의 속도로 설정할 수 있다. 이 때 다르시의 법칙을 사용하기 위하여 공동 내부 압력에 대한 가정이 필요 한데, Lee[4]는 이를 시간만의 함수로 가정하였고, Khorrani[5] 역시 공동 내부의 압력을 일정하다고 가정하여 간단하게 공동 외부의 압력만으로 경계 조건을 설정하였다. 하지만 이런 가정에 대한 검토는 제

대로 이루어 지지 않았다.

본 연구에서는 이러한 공동 내부 압력에 대한 가정을 사용하지 않고 공동 내부와 다공성 표면 주위의 유동을 해석하고 공동 내부의 압력을 검토하였다. 항공기 형상 소음, 항력 연구에 있어서 중요한 관심사항 중 하나인 평판 끝 단 유동을 해석하고 다공성 표면으로 가공된 경우의  $C_D$ ,  $C_L$  과 비교하여 항력과 양력의 변화를 가시화 하였다. 다공성 표면의 영역을 다양하게 변화시켜 영역의 영향을 항력, 양력의 변화로 살펴 보았으며, 끝 단 후면의 다공성 처리한 경우를 계산하여 항력, 양력 계수의 변화를 비교하였다.

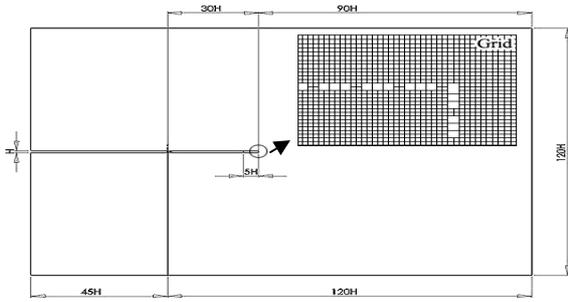
### 2. 수치 해석

#### 2.1 비정상 유동 해석

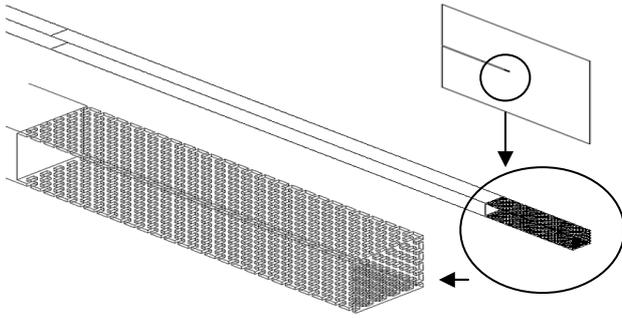
다공성 처리된 평판 끝 단의 유동을 비교하기 위해 막힌 평판 끝 단의 유동 해석도 실행 하였다. Solid Works로 평판의 형상을 구현하였고, ICFM-CFD를 사용하여 사각 격자를 생성 하였다. 평판 끝 단에서 칼만 와류 진동(Karman vortex shedding)을 관찰하기 위해 저 레이놀즈수( $Re=1000$ )를 선정하였고, 주위 유동 속도는  $U=3m/s$ 로 설정 하였다. 유동은 층류 유동(laminar flow), 비정상 유동(unsteady flow)으로 계산을 실행 하였다. 평판 두께( $H=5mm$ )를 기준으로 전체 계산 영역(computational domain)은 Fig. 1의 (a)에서 보듯이 횡축 방향으로 165H, 종축 방향으로 120H, 깊이 방향의 두께는 H로 선정하였으며, 경계조건으로 평판 앞 쪽의 45H의 길이로 미끄럼 조건(slip condition)을 사용하였고, 평판 양 옆 면으로 주기 조건을 사용하여 깊이 방향으로의 유동의 흐름을 살펴 볼 수 있도록 하였다. 비정상 유동으로 CFL수를 최소 격자에서 1 이하가 되도록 각 경우에 따라  $\Delta t$ 을 정해 주었다. 본 연구의 유동 해석을 위해 상용 프로그램인 CFX10.0을 사용하였으며 25℃의 공기의 연속 방정식과, 운동 방정식을 계산하였다.

\* 고려대학교 대학원, joelle@korea.ac.kr

\*\* 고려대학교 기계공학과, yjmoon@korea.ac.kr



(a) Computational domain



(b) Geometry of pore

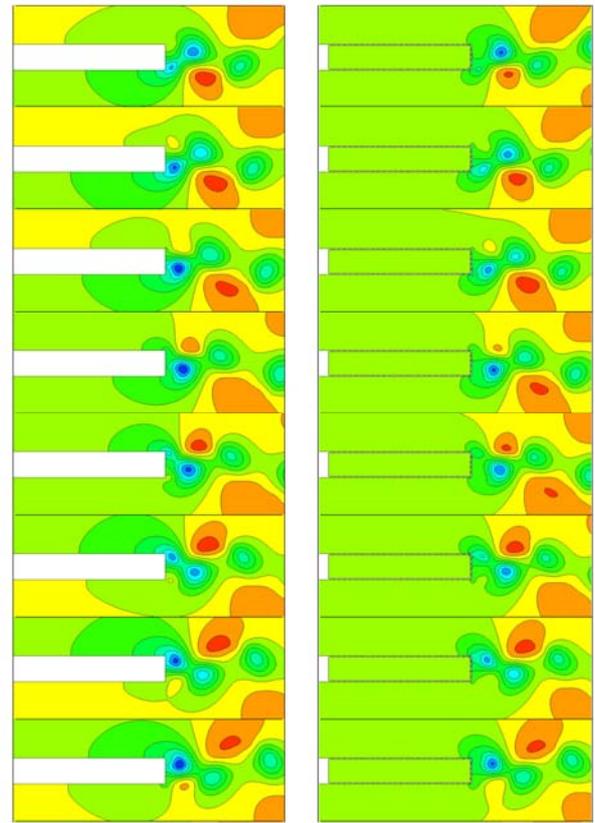
Fig. 1 Schematic of porous surface

## 2.2 다공성 표면의 유동 해석

다공성 표면으로 끝 단이 가공된 평판의 경우, 평판 끝 단에서부터 평판 길이의 각각  $1/6(=5H)$ ,  $1/8(=3H)$ ,  $1/15(=2H)$ 을 다공질 처리 하였으며, 끝 단의  $2H$ 를 다공질 처리한 경우에는 끝 단 후면을 다공질 처리한 것과 하지 않은 경우로 세분하였다. 공극률과 각 세공의 크기는 Bauer의 실험[6]을 참고하였다. 따라서 공극률은 25%로 설정하였고, 끝 단의 수직면 역시 동일한 공극률 25%로 다공질 처리 하였다. 각 세공은 Fig. 1의 (b)와 같이  $0.25\text{mm}$ 의 깊이를 가진  $0.125\text{mm}(0.05H \times 0.1H \times 0.05H$  in  $x, y, z$  when  $H=5\text{mm}$ )의 크기로, 각 케이스마다 각각 545개, 345개, 245개의 세공을 다공성 표면에 구현해 주었다. 세공의 격자는  $x, y, z$  방향으로 모두 3개의 점으로 나누어 생성하였으며, Fig. 1의 (a)와 같이 최소 세공의 중간에서 하나의 점을 가지도록 생성하였다. 전체 격자 수는 최대 243만 개에서 최소 100만 개로 세공에서의 유동은 벽면의 영향을 거의 받지 않는 포텐셜 유동에 가까울 것으로 예상할 수 있다. 따라서 본 연구에서 다공성 표면을 통해 이동하는 유동의 양은 실제 다공성 표면에 비해 많을 것이다.

## 3. 결과 및 고찰

막힌 평판 끝 단의 유동을 해석하면 칼만 와동이 떨어지면서 평판은 종축방향으로 힘을 받기 때문에 주기적인 양력을 받게 된다. 따라서 다공성 표면의 영향은 양력 변화에 더 큰 영향을 미칠 것을 예상할 수 있다. 본 연구에서는 공동이  $x, y$  축 방향으로 받는 힘을 각각 출력하여 항력계수와 양력계수를 계산하고 그래프로 나타내어 다공성 표면(porous surface)과 다공성 영역(porous region), 평판 끝 단 후면의 영향을 각각 비교하였다. 특히 평판 끝 단 후면의 영향은 압력 등고선과 속도 벡터를 그려 자세히 비교 하였으며, 공동 내부의 압력을 살펴 보기 위해 좁은 범위의 압력 등고선을 시간에 따라 그려 보았다.



(a) Solid

(b) Porous (5H)

Fig. 2 Pressure contours near the trailing edge

## 3.1 다공성 표면의 영향

다공질 처리된 평판과 그렇지 않은 평판의 끝 단의 유동을 분석해 보면 Fig. 2와 같이 1주기(1T)동안의 상대압  $-4.5\text{Pa} \sim 1.5\text{Pa}$  범위의 압력 등고선을 얻을 수 있다. 표면 막힌 경우 칼만 와동이 주기적으로 떨어질 때의 스트라울 수 (Strouhal number)는 0.167로 주기(T)는 약 0.01sec이다. 끝 단 상하부의 압력 차이가 이 와동의 영향으로 주기적으로 끝 단에서부터 발생하는 것을 볼 수 있다. 와동이 떨어질 때 평판의 끝 단에서는 와동과 벽면 사이의 상호작용(vortex-wall interaction)이 발생하여 와동이 영향을 받아 동역학적 특성이 변화하게 된다. 이 때 변화된 와동의 압력과 속도는 전류(upstream)에 영향을 미치고, 이로 인해 평판 끝 단은 주기적인 양력과 항력을 받게 된다. 그 영향의 범위는 Fig. 2의 (a)에서 볼 수 있다. 그러나 다공질 처리된 평판의 경우 와동과 변면 사이의 상호작용은 전면이 막힌 경우와 비교하여 각 세공에서 작아지게 된다. 따라서 Fig. 2의 (b)에서 압력 등고선과 같이 다공성 표면의 경우 끝 단에서 떨어진 칼만 와동에 의해 발생한 압력 차이가 전면이 막힌 경우에 비하여 그 크기가 작으며 영향을 받는 유동 상류의 범위 또한 좁음을 발견 할 수 있다. 또한 끝 단 상하부의 압력 변동(fluctuation)이 막힌 경우에 비해 작으며 떨어진 와동의 크기 또한 다공질 처리된 표면에서 작을 것을 알 수 있다.

다공성 표면에서 유동의 흐름을 해석해 보면 다공성 표면이 시작 되는 앞면에서 유동이 세공을 통해 들어와 뒷면의 압력이 낮은 세공으로 빠져나가는데 이때 공동 내외부의 압력 차이는 이런 내부 유동의 흐름으로 인해 끝 단의 표면에서 교환된다. 따라서 평판에 끝 단의 상하부의 압력 변동 역시 줄

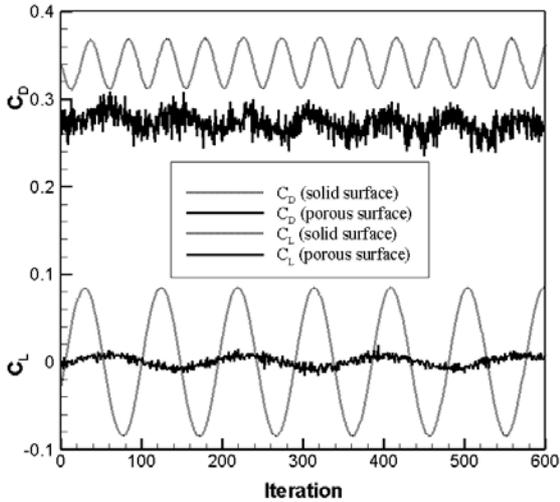


Fig. 3 Drag & lift coefficients of the solid & porous surfaces

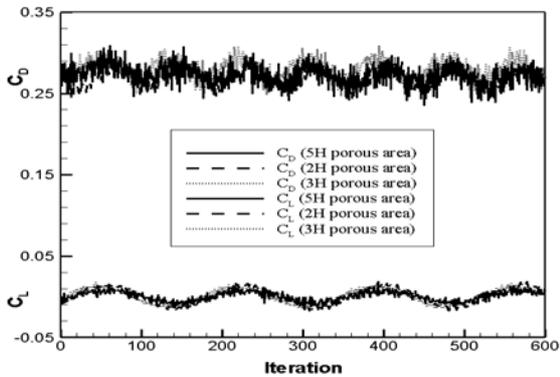


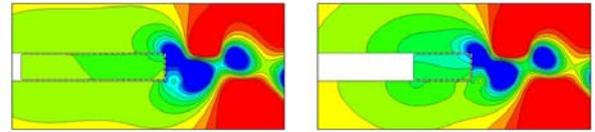
Fig. 4 Drag & lift coefficients of the various porous regions

어늘고, 다공성 표면에서 양력 값은 막힌 표면에 비해 현저히 줄어들게 된다.

실제로 계산을 통하여 얻은 막힌 표면(solid surface)의 평균 끝 단과 다공성 표면의 평균 끝 단의 항력, 양력 값을 보면 다공성 표면의 경우 전면이 막힌 표면에 비해 항력, 양력값이 현저하게 감소한 결과를 얻을 수 있다. 여기서 얻은 항력, 양력 값으로 항력, 양력 계수를 계산하면 Fig. 3과 같은 그래프를 얻을 수 있다. 항력 계수의 평균 값을 각각 비교하면 0.339(solid surface)과 0.277(porous surface)으로 다공성 표면의 경우 18.3%의 감소를 보였으며, 양력계수의 진폭을 각각 비교하면 다공성 표면의 경우 0.013으로 막힌 표면에 0.084에 비해 84.5%의 감소를 보였다. 이는 막힌 표면에 비해 현저히 감소한 값으로 다공성 표면의 효과가 높음을 알 수 있다. 그러나 다공성 표면의 양력, 항력 계수 값은 막힌 표면과 비교하여 미세하게 진동하는 것을 볼 수 있는데, 이는 Fig. 2의 (b)에서 볼 수 있듯이 평판 끝 단에서 떨어진 와동에 의해 발생한 동역학적 변화가 약간의 시간차를 두고 평판 후면에 영향을 미쳐 각 세공 주변에서 급격한 압력 변화는 물론, 내부 공동 앞면과 뒷면으로 공간적인 압력 차등이 존재 하게 된다. 이 내부의 압력 차등이 외부와 비교하여 공간적으로 불균등하여 진동하는 것 이라고 예상할 수 있다.

### 3.2 다공성 영역의 영향

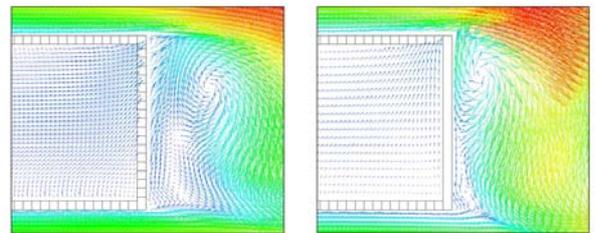
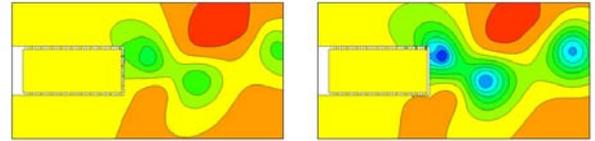
다공성 표면이 평판 끝 단의 항력, 양력 계수에 영향을 미



(a) 5H

(b) 2H

Fig. 5 Pressure contours of two different porous regions



(a) Porous

(b) Solid

Fig. 6 Pressure contours & vector planes near the back side

쳐 대략 1/7 정도로 감소되는 것은 알아보았지만, 효율적인 다공성 영역의 넓이는 다공성 영역을 변화시켜 얻은 결과로 알 수 있다. Fig. 4을 보면 다공성 영역이 끝 단의 5H, 3H, 2H인 경우의 항력, 양력 계수 그래프가 거의 유사한 것을 볼 수 있고, 항력계수의 평균값은 각각 0.277, 0.281, 0.271으로 아주 미세한 차이만 존재 하였다. 양력계수의 진폭 역시 0.0130, 0.0165, 0.0165으로 미세한 차이만을 보였다. 평균 상하부의 압력 차는 칼만 와동이 떨어지는 부분에서 끝 단의 뒷부분인 1.5~2H 부분에서 급격히 크기 때문에 끝 단의 2H정도 까지만 다공질 처리 하여도 거의 같은 결과를 얻을 수 있다.

공동 내부의 공간적인 압력 차등을 Fig. 5와 같이 좁은 범위(상대압 -1.5Pa~0Pa)의 압력 등고선을 그려 살펴보면 내부 공동의 크기가 작은 2H경우가 공동 내부에서 압력 차가 다른 경우에 비해 빠르게 변하는 것을 알 수 있다. 그러나 끝 단의 5H를 다공질 처리 한 경우가 다른 경우에 비해 더욱 진동하는 양력, 항력 값을 얻게 된다. 이는 다공성 영역이 큰 5H의 경우 내부 공동 크기가 커서 외부 압력과 차등이 생기는 내부 압력 영역이 더 넓어진 것에 기인한다. 따라서 진동을 줄여 안정성을 높이기 위해서는 불필요하게 넓은 영역대신 적절한 영역을 설정하여 다공질 처리 하는 것이 필요하다.

### 3.3 평판 끝 단 후면

Fig. 2에서 보았듯이 다공성 표면에서는 평판 끝 단에서 떨어진 칼만 와동이 후면에서 벽면과 와동의 상호작용을 적게 받아 동역학적 특성의 변화가 작으며 유동 상류에 미치는 영향도 작은 것을 알 수 있다. Fig. 4에서도 평판 끝 단 상하부에서 다공성 영역은 칼만 와동에 의해 압력이 급격하게 변하는 부분을 제외하면 항력, 양력 계수에 큰 영향이 없다는 것을 알 수 있었고 결국 평판 끝 단 후면의 영향이 크다는 것을 예상 할 수 있다. 뒷면이 막힌 경우 공동 내부의 유동의 흐름을 뒷면이 다공성인 평판과 비교하면 차이가 나는 것을 알 수 있다. 뒷면이 다공질 처리된 기존의 경우는 앞면에서 유동이 들

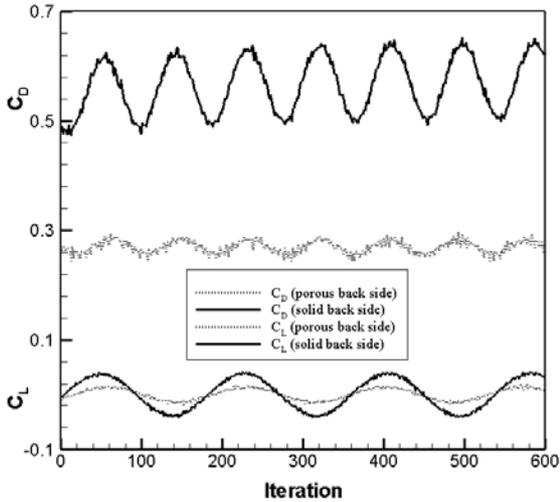


Fig. 7 Drag & lift coefficients of the solid & porous back sides

어와 공동 뒷면의 압력이 낮은 쪽의 세공으로 빠져나가는 흐름을 보인다. 따라서 흡수되는 앞쪽에서는 경계층에 영향을 주고 뒤쪽으로는 세공으로 빠져나가는 유동의 흐름을 Fig. 6의 (a)의 벡터 평면에서 볼 수 있다. 반면에 뒤쪽이 막힌 경우 앞쪽에서 흡수된 유동은 뒤쪽으로 빠져나가지 못하고 막힌 뒷면에 부딪혀 세공이 있는 끝 단의 상하부로 빠져나가게 된다. 또한 Fig. 6의 (b)에서 보이듯이 떨어져 나간 와동이 뒷면에서 세공의 영향을 받지 못하고 끝 단 뒷면과 와동의 상호작용을 일으켜 동역학적 특성이 변화된다. 또한 와동이 떨어진 위치를 벡터 평면을 그려 확인 하면 전면이 막힌 경우에 비해 뒷면만 막힌 경우가 와동이 더욱 뒷면에 부착 되어 더욱 벽면과 상호 작용 하는 것을 알 수 있다. 따라서 항력은 오히려 뒷면의 내부 외부로 부딪히는 유동으로 인해 전면이 막힌 평판에 비해서도 증가하게 된다. 하지만 앞쪽에서 들어온 유동은 뒷면의 상하부로 빠져 나가게 되고 평판 상하부의 압력은 순환하여 양력은 전면이 막힌 평판에 비하여는 감소하게 되지만, 뒷면이 다공질 처리된 경우에 비하여는 그 효과가 떨어진다. 그 결과 평판에 있어서 끝 단 후면을 다공질 처리 하지 않는다면 전혀 다공질 처리 하지 않은 경우에 비하여도 낮은 효과를 보일 수 있기 때문에 다공성 표면을 사용할 때는 유동 해석을 통하여 효과적인 표면의 위치를 선정하는 것이 중요함을 알 수 있다.

따라서 평판 끝 단의 후면을 막힌 표면으로 처리한 평판의 경우 항력, 양력 계수를 기존의 다공성 표면과 비교하면 Fig. 7와 같은 그래프를 얻을 수 있다. 그래프에 의하면 끝 단 후면까지 다공질 처리한 경우 전면이 막힌 표면에 비해 양력계수의 진폭이 1/7까지 감소하였던 것에 비해 끝 단 후면이 막힌 경우 0.0416의 진폭으로 1/2 정도만 감소 하였다. 양력 계수는 끝 단 후면이 막혀 있더라도 평판의 상하부는 여전히 다공질

처리가 되어있어 감소하였으나, 항력계수의 경우 오히려 평판 전면이 막힌 표면의 경우에 비해서도 증가하는 양상을 보인다. 끝 단 후면이 막힌 경우 항력계수의 평균값은 0.56로 후면이 다공질 처리된 표면에 비해 2.02배 증가하였으며 전면이 막힌 표면과 비교하여도 63.7% 증가 하였다. 평판에 있어서 끝 단 후면이 칼만 와동을 영향을 완화시키는 역할을 하기 때문에 이 부분을 제외하고 다공질 처리 할 경우 다공성 표면의 일반적인 효과를 기대하기 어려워짐을 알 수 있을 뿐 아니라 오히려 다공질 처리 되지 않은 평판에 비해 성능이 낮은 결과를 얻을 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 평판 끝 단의 유동을 해석하여 다공성 표면의 항력, 양력 계수 저감의 효과를 알아보았다. 끝 단이 다공질 처리된 경우 전면이 막힌 평판에 비해 와동이 떨어지면서 벽면과 와동 사이의 상호작용이 저감되어 동역학적 특성이 변화 됨을 알 수 있었다. 따라서 끝 단에서의 급격한 압력 변화가 유동 상류에 미치는 영향이 다공성 표면의 경우 그 범위가 줄어들고, 평판 상하부의 압력 변동이 감소하며, 와동의 크기 또한 줄어 드는 것을 볼 수 있다. 그 결과 항력, 양력 계수가 전면이 막힌 평판에 비해 각각 85%, 15% 감소한 것을 확인할 수 있다. 평판을 다공질 처리할 경우 끝 단에서의 다공성 표면의 면적은 항력, 양력 계수 변화에 큰 영향을 미치지 않으나 끝 단 후면의 영향은 크게 영향을 미친다. 이는 와동이 떨어질때 뒷면에서의 벽면과 와동 사이의 상호 작용의 역할이 커짐에 따른 것으로 수치상 전면이 막힌 경우에 비해 양력 계수는 50.5% 감소하며, 항력 계수는 65.2% 증가 한 것을 확인할 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] Revell, J.D., Kuntz, H.L., Balena, F.J., Horne, C., Storms, B.L., and Dougherty, R.P., "Trailing Edge Flap Noise Reduction by Porous Acoustic Treatment," AIAA Paper 97-1646(1997).
- [2] Khorrani, M.R. and Choudhari, M.M., "Application of Passive Porous Treatment to Slat Trailing Edge Noise," NASA/TM-2003-212416(2003).
- [3] Darcy, H., "Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon," (1856), p.590.
- [4] Lee, S., "Reduction of Blade-Vortex Interaction Noise through Porous Leading Edge," AIAA Journal, vol. 32(1994), no. 3, pp.480-488.
- [5] Khorrani, M.R., Li, F. and Choudhari, M.M., "Novel Approach for Reducing Rotor Tip-Clearance-Induced Noise in Turbofan Engines," AIAA Journal, vol. 40(2002), no. 8, pp.1518-1528.
- [6] Bauer, S. X. S., and Hemsch, M. J., "Alleviation of Side Force on Tangent-Ogive Forebodies Using Passive Porosity," Journal of Aircraft, Vol. 31(1993), no. 2, pp.354-361.