

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.9.645

플랩이 있는 공동 부근에서의 유동특성 해석

송호성* □ 박준홍** □ 송시몬†

(2008년 2월 13일 접수, 2008년 6월 11일 수정, 2008년 8월 13일 심사완료)

Numerical Analysis on Flow Characteristics Around a Cavity with Flaps

Hosung Song, Junhong Park and Simon Song

Key Words: Inter-coach Spacing(차간공간), High Speed Train(고속열차), Cavity(공동), Flap(플랩), Aero-acoustic Noise(유동소음)

Abstract

For a high speed train driving at 300 km/h, aero-acoustic noise is a dominant component among various noise sources. The aeroacoustic noise is mainly due to inter-coach spacings because discontinuities in the train surface significantly disturb turbulent flows. This often leads to the uncomfortableness of passengers. Interestingly, the aero-acoustic noise reduces with decreasing the mud-flap spacing of the inter-couch spacing. We perform numerical simulations to investigate flow characteristics around the inter-coach spacing. We model the inter-coach spacing as a simple 2-D cavity with flaps, and calculate the velocity and pressure field using two equation turbulence models, varying the flap spacing. The results show that a wider flap spacing develops a higher inflection point in mean velocity profiles over the cavity. It is likely that large eddies generated near the inflection point persist longer in the downstream since they are less affected by the wall. This probably induces the more aero-acoustic noises. The wider spacing also results in the larger pressure difference between the inside and outside of the cavity. This is also responsible for the increased noise since the large difference would cause a strong flow oscillations in and out of the cavity.

기호설명

C_μ : 와점성계수 (Eddy Viscosity Coefficient, 0.09)

f : 플랩간 간력

H : 공동 높이

L : 공동 길이

S_{ij} : 평균 변형률 텐서

u : 순간 속도

u' : 난동 속도

U : 평균 속도

U_∞ : 자유 유동 속도

μ_τ : 와점성계수 (Eddy Viscosity)

ν_τ : 와동점성계수 (Kinematic Eddy Viscosity)

1. 서론

고속철도의 개통으로 무궁화호, 새마을호가 주로 담당하던 지역 간 승객 수송을 고급 운송수단인 고속열차(KTX)가 대신하게 되었다. 그러나 고속열차는 기존 열차에 비해 높은 실내 소음으로 운행 초기부터 많은 불만의 목소리를 불러왔다.

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : simonsong@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0423 FAX : (02)2298-4634

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학부



(a)



Fig. 1 Two important sources generating aero-acoustic noise of high-speed train (a) pantograph, (b) inter-coach spacing

이로 인해 고속열차의 실내 소음에 대한 다양한 연구가 필요하게 되었다.

열차의 소음은 열차의 각종 기계장치로부터 발생하는 기계소음, 바퀴와 레일에서 발생하는 구름소음, 차체표면을 흐르는 공기의 유동에 기인하는 공력소음으로 분류할 수 있다. 일반적으로 기계소음의 크기는 열차의 운행속도에 비례하고, 구름소음과 공력소음은 각각 운행속도의 3승과 6승에 비례하는 것으로 알려져 있다. 따라서 열차의 운행속도에 따라 각각의 소음이 전체 소음에서 차지하는 비중이 달라지는데, 300 km/h의 빠른 속도로 운행하는 고속열차에서는 공력소음이 가장 지배적인 소음원으로 작용하게 된다.⁽¹⁾

이러한 공력소음을 유발하는 대표적인 요소로 판토틀래프(집전장치)와 차량 간 공간을 들 수 있다. 판토틀래프는 열차운행 시 필요한 전기를 공급하는 장치로 Fig. 1의 (a)에서 화살표로 표시된

부분과 같이 열차의 상단에 전신탐처럼 솟아있는 구조이며, 따라서 큰 공기 저항을 발생하여 공력소음의 원인으로 작용한다.

차량 간 공간은 Fig. 1의 (b)와 같이 열차의 객차와 객차를 연결하는 부분에서 형성된다. 이 공간 때문에 유동이 불안정하게 되어 유동박리를 일으키고, 이때 생성되는 와류는 차체 표면을 가진하여 객실 내부의 소음으로 전달된다.⁽²⁾

고속열차가 300 km/h로 운행하고 있는 도중에는 판토틀래프에 의한 소음보다 차량 간 공간에 의한 소음의 비중이 더욱 크다고 알려져 있다.⁽¹⁾ 따라서 차량 간 공간이 소음에 미치는 영향과 이러한 소음을 제어하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

고속열차의 차량 간 공간은 차체 표면에서 유동방향에 대해 수직으로 파여진 직사각 형태의 공동(Cavity)과 유사하다. 여러 운송체 및 구조체에서 많이 접할 수 있는 공동은 심각한 소음, 구조물의 피로, 항력의 증가 등을 야기하는 것으로 알려져 있으며 따라서 공동 주위의 유동에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.^(2,3) 하지만 고속열차의 경우 공동의 양 끝단에 부착된 머드플랩(mud-flap)의 영향으로 일반적인 공동 부근 유동보다 더 복잡한 유동이 발생한다.

현재까지 진행된 차량 간 공간에 의한 유동소음에 대한 연구에서는 주로 머드플랩 사이의 거리가 소음에 미치는 영향을 실차 실험 및 풍동 실험을 통하여 분석하였다.^(4,5) 그 결과 머드플랩의 간격이 넓을수록 더 많은 소음이 발생한다는 것을 알아내었다. 또한 수치해석을 통한 연구는 주로 고속열차가 터널내부로 들어가는 경우와^(6,7) 고속열차가 서로 마주보며 지나가는 경우⁽⁸⁾ 등 큰 소음이 유발되는 경우를 중심으로 진행되어 왔다. 하지만 차량 간 공간 주변의 유동특성에 대한 연구는 부족하다.

본 연구는 고속열차의 공력소음 저감 방안을 모색하기 위한 과정으로 차량 간 공간에서의 유동특성 해석을 그 목적으로 하고 있다. 이를 위해 차량 간 공간을 플랩이 있는 공동으로 모델링하여 그 부근의 유동을 상용 수치해석 프로그램을 이용하여 예측하고자 한다. 특히 플랩 사이의 간격이 유동에 미치는 영향을 조사하여 왜 플랩 간 간격이 좁을수록 소음이 감소하는지에 대한 유체역학적인 분석을 한다.

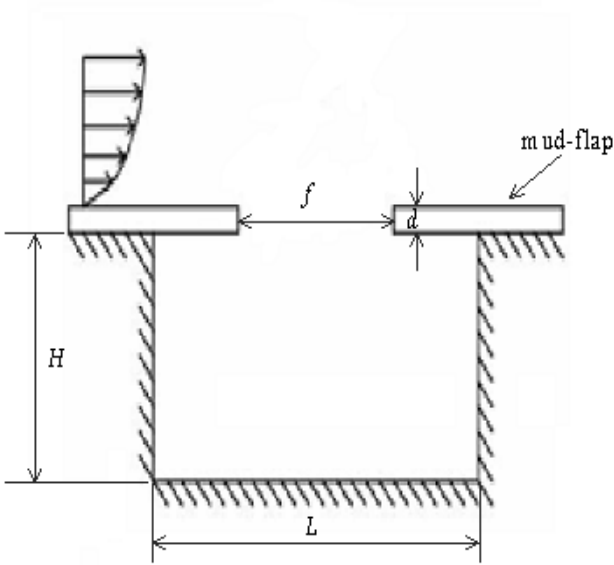


Fig. 2 2D model of cavity with flaps

2. 수치해석

2.1 난류모델 및 지배방정식

상용 수치해석 프로그램에서 널리 쓰이는 난류 모델은 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식에 기반을 둔 모델이다. 본 연구에서는 $k-\epsilon$ 과 $k-\omega$ 모델을 적용하여 수치해석을 수행하였으며, FLUENT(6.2.16판)를 이용하였다. 이 때 $k-\epsilon$ 모델의 경우는 Launder 등⁽⁹⁾의 Standard 형을, $k-\omega$ 모델의 경우는 Wilcox 의 1998년 모델을 사용하였다.⁽¹⁰⁾

사용된 연속방정식과 RANS 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ji} + \tau_{ij}) \quad (2)$$

τ_{ij} 은 Reynolds stress 텐서이며, 다음과 같이 정의한다.

$$\tau_{ij} = - \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (3)$$

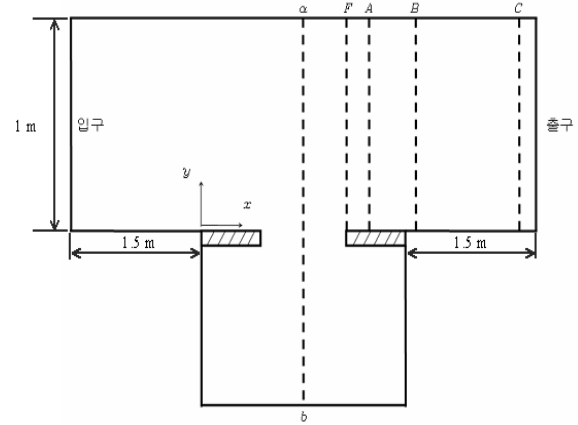


Fig. 3 Computation region

$k-\epsilon$ 모델과 $k-\omega$ 모델에 사용되는 동 와점성 계수(Kinetic Eddy Viscosity)는 각각 아래와 같이 정의한다.

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon \quad (4)$$

$$\nu_t = k / \omega \quad (5)$$

2.2 계산 영역 및 경계 조건

본 연구에서는 차량 간 공간을 Fig. 2와 같이 플랩이 있는 공동으로 모델링하였다. 공동의 높이 H와 길이 L은 0.5 m 로 고정시키고 플랩의 두께를 0.05 m 로 하였으며, 플랩 간 간격 f가 각각 0.1 m, 0.3 m, 0.4 m인 세 가지 경우에 대한 계산을 수행하였다. 이 때 계산영역은 Fig. 3과 같이 설정하였는데 입구에서 공동까지를 1.5 m, 공동에서 출구까지를 1.5 m로 하였고 공동으로부터 위쪽 경계까지는 1.0 m를 유지하였다. 유체는 밀도가 1.225 kg/m³, 점성계수가 1.789×10⁻⁵ Pa·s 인 공기로 가정하였으며 주위의 압력은 대기압으로 가정하였다.

수치해석에 필요한 경계조건은 입구의 경우 속도경계조건을 사용하였으며 이 때 필요한 속도 및 k , ϵ , ω 등 각종 난류 값들은 40 m/s의 자유 유동속도를 가지는 20 m 길이의 평판유동의 계산을 통하여 구한 값을 적용하였다. 출구 경계조건으로는 대기압을 사용하였다. 위쪽 경계는 개방된 공간이므로 대칭경계조건을 사용하여 처리하였다.

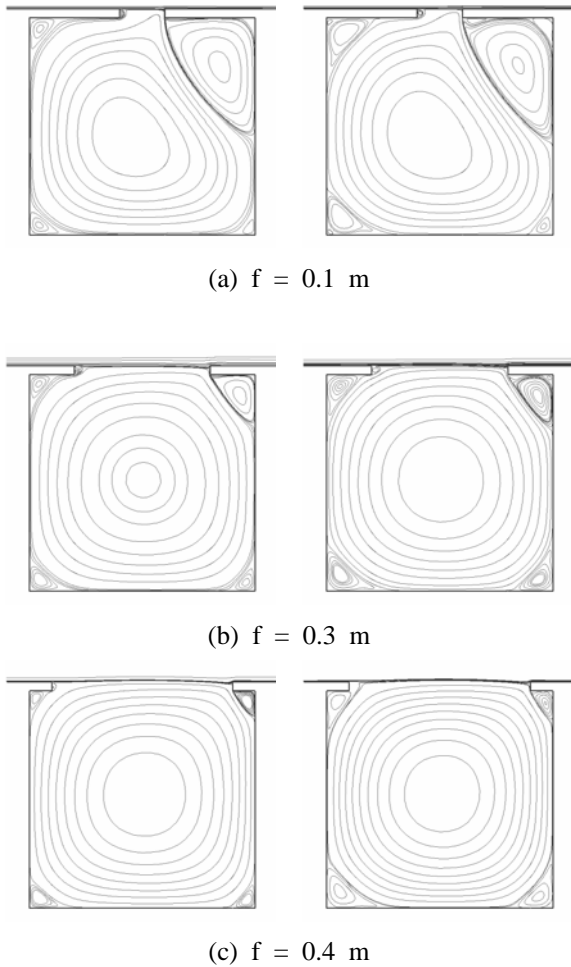


Fig. 4 Streamlines in the cavity: $k-\epsilon$ model (left) and $k-\omega$ model (right)

3. 결과 및 고찰

공동 부근의 유동장을 살펴보기 위해 Fig. 4에 유선을 도시하였다. 전체적으로 가운데에서 주 와동(Primary vortex)이 생성되고 각 모서리에서 2차 와동(Secondary vortex)이 생성되는 경향을 보여, 일반적인 공동 유동에서의 유선 분포와 비슷한 양상을 나타낸다. 그림에서 보듯 $k-\epsilon$ 모델로 계산한 좌측 열과 $k-\omega$ 모델로 계산한 우측 열의 유선 분포가 유사하였고, 다른 결과 값들도 정성적으로 유사하므로, 이후에는 $k-\epsilon$ 모델의 결과를 중심으로 설명하겠다.

Fig. 5는 플랩 사이에서의 평균 와도의 분포를 도시한 그림이다. 평균 와도는 플랩 사이의 공간에서 대체로 강하였다. 그런데 가장 강한 와도의

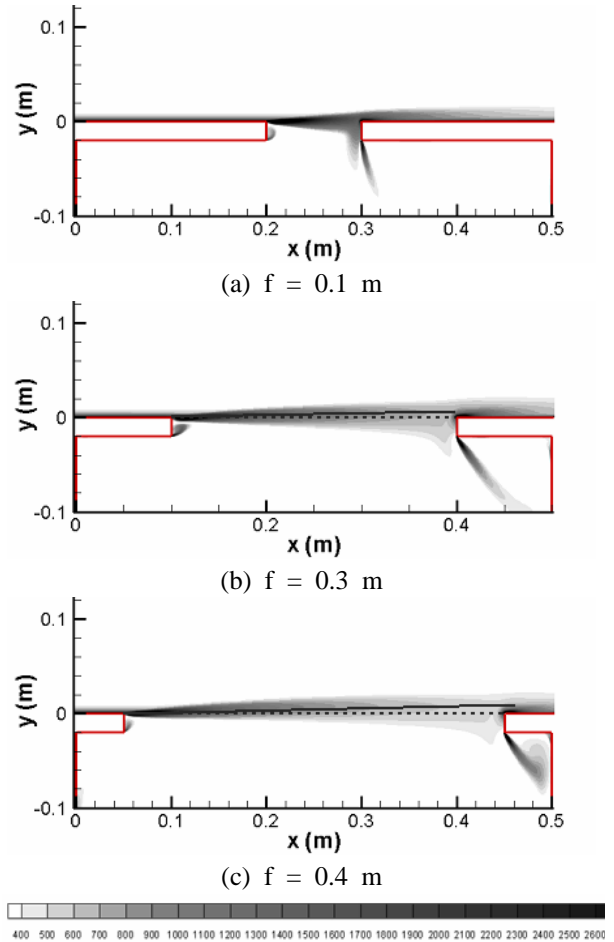


Fig. 5 Mean vorticity contours (unit: [1/s])

위치는 플랩간 간격에 영향을 받고 있다. 즉 플랩간 간격이 좁을수록 가장 강한 와의 중심선(그림에서 실선으로 표시된 부분)이 벽면에 가깝게 된다. 따라서 플랩간 간격이 좁을수록 와의 발달이 저해된다고 생각되어진다.

Fig. 6은 공동의 가운데 지점(Fig. 3의 점선 ab)에서의 평균 속도 분포를 도시한 그림이다. 이 그래프에서 $y/H=0$ 인 곳 부근에서 변곡점이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 변곡점에서는 강한 난류가 발생하고 따라서 많은 Large eddy들이 생성된다.^(11,12) 변곡점의 위치를 보다 정확하게 확인하기 위해 평균 속도 프로파일을 높이에 대해 미분하여 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 점선은 벽이 위치한 높이이다. 플랩간 간격이 0.1 m인 경우 변곡점이 벽에서 그리 멀지 않은 곳에 형성되지만 간격이 0.3 m과 0.4 m로 증가하는 경우 벽에서 점점 더 멀어진 곳에서 변곡점이 형성되는 것을 볼 수 있다. 변곡점이 벽으로부터

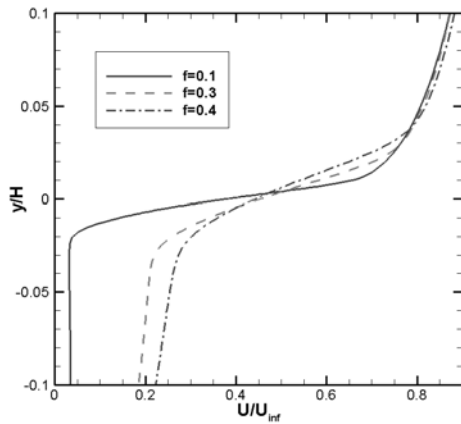


Fig. 6 Mean velocity in the streamline direction at the cavity center line

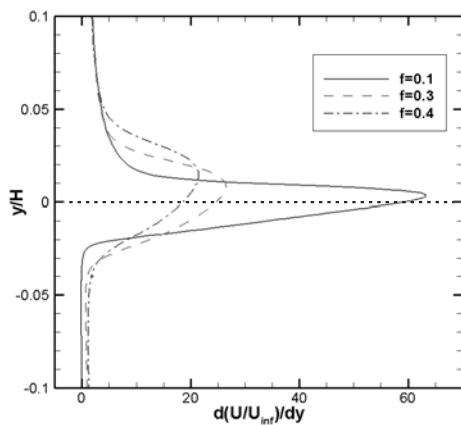


Fig. 7 Profiles of mean-velocity gradient

면 곳에서 형성되면, 생성된 Large eddy들이 벽의 영향을 적게 받아 공동 하류까지 강하게 유지된다.^(11,12) 그 결과, Large eddy들이 지날 때 마다 압력섭동이 발생하고 이로 인해 차체가 가진되어 객실 내부의 소음이 증가된다고 생각할 수 있다. 즉 공동에서 생성된 Large eddy들로 인해 후방플랩의 leading edge에서 유발되는 진동과 압력의 변화로도 소음이 발생하지만⁽⁴⁾ 이와 더불어 하류로 이동한 Large eddy들도 압력섭동에 의해 차체를 가진시킨다고 생각된다.

플랩간 간격이 공동 하류의 유동에 미치는 영향을 알아보기 위해 Law of the wall을 Fig. 8에서 부터 Fig. 10에 나타내었다. 그래프에서 A, B, C는 각각 Fig. 3에 A, B, C로 나타낸 지점에서 측정된 속도 분포를 의미하며, 이 때 하류 쪽 플랩에서 A, B, C까지의 길이, 즉 FA, FB, FC는 각각

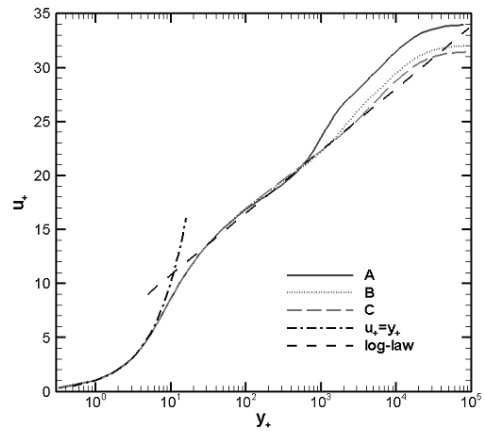


Fig. 8 Law of the wall for f = 0.1 m

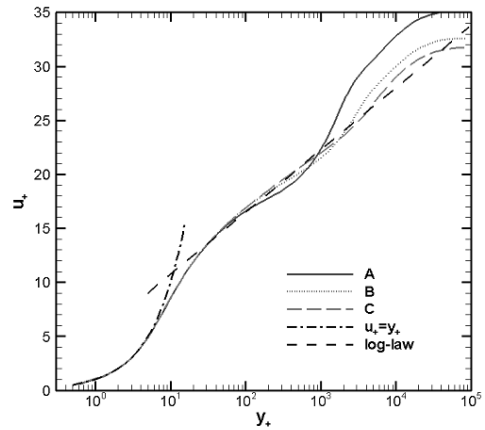


Fig. 9 Law of the wall for f = 0.3 m

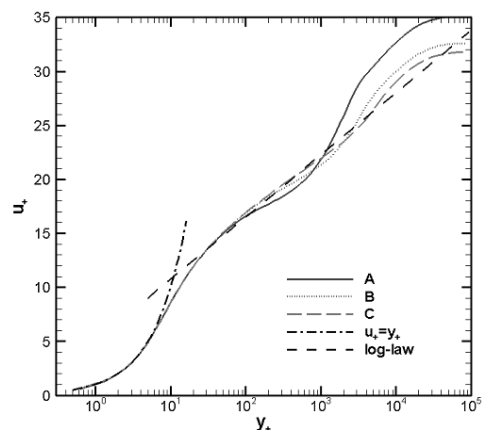


Fig. 10 Law of the wall for f = 0.4 m

0.15, 0.55, 1.55 m이다.

Fig. 8은 플랩간 간격이 0.1 m인 경우의 Law of the wall을 나타내고 있다. 이 경우 공동 입구에서 생성된 Large eddy들이 벽면에 가까이 위치

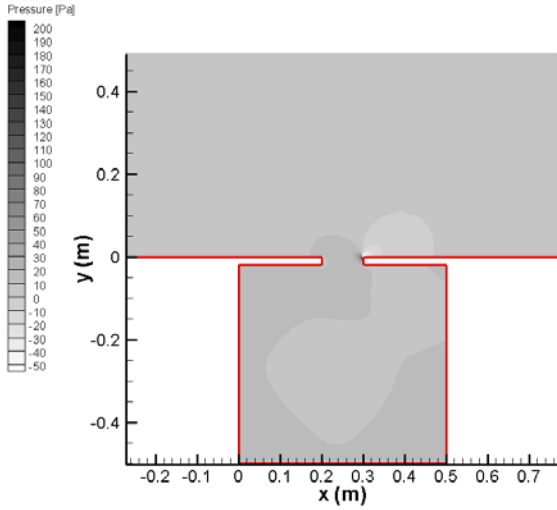


Fig. 11 Mean pressure distribution for $f = 0.1$ m

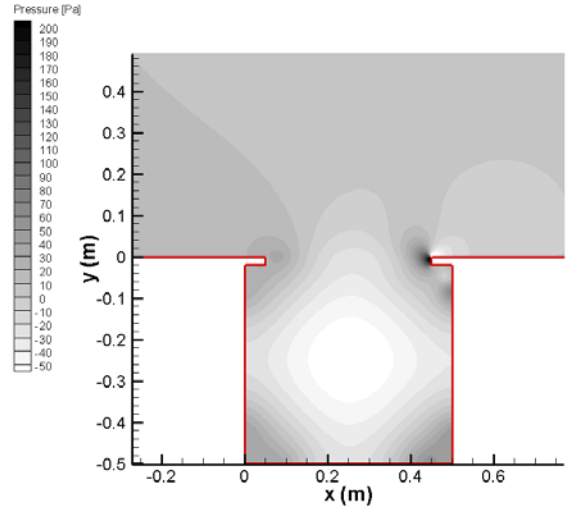


Fig. 13 Mean pressure distribution for $f = 0.4$ m

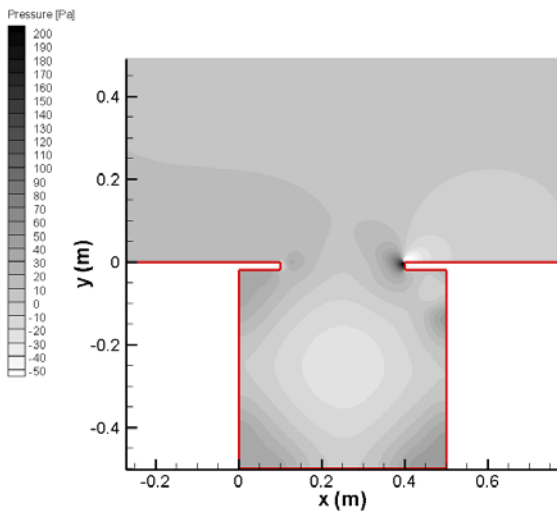


Fig. 12 Mean pressure distribution for $f = 0.3$ m

해 있어 벽의 영향을 많이 받고 빠르게 소멸되므로 하류에 미치는 영향이 적어 평판유동의 Law of the wall을 잘 따르고 있는 것을 확인할 수 있다. 플랩간 간격이 0.3 m인 경우(Fig. 9)는 속도분포가 Law of the wall의 logarithmic line 아래에 위치하여 난류경계층이 교란된 모습을 보이고 있다. 하류로 갈수록 그 차이가 작아져 난류경계층이 회복되는 모습을 확인할 수 있지만, 평균속도보다 난류 성량들이 훨씬 늦게 회복되는 것을 감안하면 플랩 간 간격이 커질수록 Large eddy들로 인해 난류의 교란이 심해지고 경계층의 회복이 늦어져서 소음이 커진다고 할 수 있다. 플랩간 간격이 0.4 m에 대한 결과인 Fig. 10에서는 이러

한 경향이 더욱 두드러짐을 알 수 있다.

플랩 간 간격은 공동 부근에서의 압력 분포에도 많은 영향을 끼친다. Fig. 11부터 Fig. 13까지는 이러한 공동 부근에서의 평균압력분포를 도시한 그림이다. Fig. 11은 플랩간 간격이 0.1 m인 경우로 공동 내부와 외부의 압력차가 상대적으로 크지 않다. 그러나 플랩간 간격이 커질수록 공동 내부와 외부의 압력차가 증가하게 된다. 이러한 공동 내부와 외부의 압력 차이는 공동 안팎으로 활발한 유동의 유입 및 유출이 있음을 의미한다. 따라서 플랩 간 간격이 넓을수록 공동 주변에서 생성되는 Large eddy 및 압력의 난동 성분이 강해져서 더 많은 소음을 발생시키게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 고속열차의 차량 간 공간을 플랩이 있는 공동으로 모델링하여 그 부근의 유동을 $k-\epsilon$ 모델과 $k-\omega$ 모델을 적용하여 수치해석하였다. 그 결과 플랩 간 간격이 유동에 미치는 영향을 다음과 같이 정리하였다.

(1) 플랩 간 간격이 넓을수록 공동 중앙의 평균 속도 프로파일의 변곡점의 위치가 더 높은 곳에 위치하게 되고, 여기서 생성된 Large eddy들이 벽면의 영향을 상대적으로 적게 받아 하류까지 유지되므로 난류경계층에 더 많은 영향을 주게 된다. 이러한 eddy들이 하류의 경계층의 지나갈 때 압력 섭동이 발생하여 차체가 가진되고 이에 따라 더 높은 실내소음이 발생한다고 유추할 수 있

다.

(2) 플랩 간 간격이 넓을수록 공동 내부와 외부의 압력 차가 커지게 되고, 공동 안팎으로 활발한 유동의 유입 및 유출이 있게 되는데 이 또한 소음이 발생하는 원인으로 작용할 것이라고 생각되나, 이를 입증하기 위한 실험적 또는 해석적 연구가 요구된다.

본 연구를 통해 플랩이 있는 공동 부근에서의 유동특성을 확인할 수 있었으나 상용 프로그램에 내재된 RANS 난류모델을 사용하였으므로 유동의 평균 성량만으로 난류 유동을 분석하는 한계가 있었고, 또한 플랩을 강체로 가정하였기 때문에 플랩의 진동에 의한 영향이 반영되지 않았다. 차후 연구에서는 이러한 점을 개선하여 본 연구에서 해석한 플랩이 있는 공동 부근에서의 유동특성에 대해 보다 정확하게 규명해야 할 것이다.

참고문헌

- (1) Lee, U. and Pak, C.-H., 1999, "State-of-the-Art on the Indoor-Noise Characteristics of High Speed Train," *Journal of KSR*, Vol. 2, No. 3, pp. 18~25.
- (2) Choi, J., Hahn, S. and Choi, H., 1999, "Large Eddy Simulation of Turbulent Flow over an Open Cavity," *The 1999 Spring Conference of KSME*, pp. 44~49.
- (3) Tam, C. K. W. and Block, P. J. W., 1978, "On the Tones and Pressure Oscillations Induced by Flow over Rectangular Cavities," *J. Fluid Mech.*, Vol. 89, pp.373~399.
- (4) Seo, S.-I., Choi, S.-H. and Chung, I.-S., 2006, "A Study on the Effect of Mud-flap on the Cabin Noise in KTX," *Journal of KSR*, Vol. 9, No. 5, pp. 550~554.
- (5) Choi, S., Park, J. and Park, C. K., 2006, "Characteristics of the Aero-Acoustic Noise Generated from the Inter-Coach Spacing of a High-Speed Train," *The 2006 Fall Conference of KSR*, pp. 7~11.
- (6) Ogawa, T. and Fujii, K., 1997, "Numerical Investigation of Three-Dimensional Compressible Flows Induced by a Train Moving into Tunnel," *Computers & Fluids*, Vol. 26, No. 6, pp. 565~585.
- (7) Shin, C.-H. and Park, W.-G., 2003, "Numerical Study of Flow Characteristics of the High Speed Train Entering into a Tunnel," *Mechanics Research Communicatoins*, Vol. 30, pp. 287~296.
- (8) Fujii, K. and Ogawa, T., 1995, "Aerodynamics of High Speed Trains Passing by Each Other," *Computers & Fluids*, Vol. 24, No. 8, pp. 897~908.
- (9) Launder, B. E. and Spalding, D. B., 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.3, 1974, pp. 269~289.
- (10) Wilcox, D.C., 2004, *Turbulence Modeling for CFD, 2nd ed.* DCW Industries, Chap. 4.
- (11) Song, S., DeGraaff, D. B. and Eaton, J. K., 2000, "Experimental Study of a Separating, Reattaching, and Redeveloping Flow over a Smoothly Contoured Ramp," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol.21, pp. 512~519.
- (12) Song, S. and Eaton, J. K., 2004, "Reynolds Number Effects on a Turbulent Boundary Layer with Separation, Reattachment, and Recovery," 2004, *Exp. Fluids*, Vol.36, pp. 246~258.