

생체모방공학을 이용한 공력 소음 저감 기초 연구

The aero-acoustic noise reduction based on biomimetics : A case study

한재현† · 김태민* · 김정수**

Jae H. Han, Tae M. Kim, Jung S. Kim

Key Words : turbulence(난류), vorticity(와도), biomimetics(생체모방), owl feather(부엉이 깃), aerodynamic noise(공력 소음)

ABSTRACT

Recent years have witnessed speed up of moving vehicles such as high-speed of trains. Increase in speed entails concomitant increase in turbulent air flow which contributes toward aerodynamic noise. The proposed method for aerodynamic noise reduction is based on a biomimetic design of owl feather. The five morphological parameters of the owl feather is extracted from close observation, and simulation cases are constructed by applying design of experiments methodology. Swirling strength for each case is obtained through steady-state CFD analysis, and key morphological parameters that affect the turbulence are identified. Large eddy simulations (LES) are then performed on selected cases to predict the air turbulence. Different cases show varying vorticity distribution levels which is expected to lead to varying aerodynamic noise levels.

1. 서 론

과학기술의 발달은 운송수단의 고속화를 통해 인간에게 편의를 제공하고 있다. 하지만 고속화에 따른 소음과 진동의 증가로 승객의 안락감과 환경소음에 악영향을 미치게 된다. 특히, 고속 유동장에서는 난류유동의 영향으로 공력소음의 비중이 커지게 된다. 일정한 속도로 전진하는 물체는 일반적으로 표면 마찰력(접선성분)과 박리현상이나 와유동과 같이 유체의 점성운동에 기인하는 압력저항(법선성분)을 받게 된다. 특히, 고 레이놀즈 수의 유동장에서, 법선성분의 저항을 결정하는 유동현상은 실질적으로 흐름의 박리현상과 밀접한 관계가 있는 난류운동이라 할 수 있다. 이러한 난류유동은 물리적으로는 물

체표면으로부터의 주기적인 유동박리 현상이 발생한다. 주기적인 유동박리 영역에서 와류가 위아래 영역에서 교차적으로 와류의 형태로 후류로 움직이게 되고, 이러한 주기적인 와류 흘림 때문에 전체 유동장은 기본적으로 비정상유동 특성을 갖는다.⁽¹⁾ 공기 중 와류현상은 공력소음의 소음원으로서 공력소음을 야기한다.

생체모방공학은 자연계에 존재하는 생명체의 외형, 구조, 구성물질 및 작동 원리 등을 모방하여 공학적으로 응용하는 것을 말한다. 15세기 말 새의 날개를 모방한 레오나르도 다빈치의 비행체 날개 스케치로부터 최근 벤츠에서 개발한 거북복의 외형을 본뜬 Bionic concept car에 이르기까지 인류는 오랫동안 생명체를 모방하여 새로운 기술을 개발하거나 기존 기술을 향상시키기 위한 노력을 기울여 왔다. 최근에 이르러 많은 공학 분야에서 기존의 수학적 혹은 물리적 접근 방법을 통해 풀지 못했던 문제들을 생체모방적 접근 방법을 이용하여 해결하기 위한 시도가 급속도로 증가하고 있다. 생체모방공학은 자연계에 존재하는 생명체들이 오랜 시간을 거치면서 진

† 교신저자; 홍익대학교 음향·진동 실험실
E-mail : wd2007@naver.com
Tel : (02)320-1113, Fax : (02)320-1113
* 홍익대학교 기계공학과
** 홍익대학교 기계·시스템 디자인 공학과

화를 해 왔다는 데 바탕을 두고 있다. 생명체들은 생존이나 번식을 위해 ‘자연선택(natural selection)’의 과정을 통해 주어진 환경에 가장 적합하게 변화되어 왔다. 즉, 생명체가 가지고 있는 특징은 오랜 시간 동안 무수히 많은 시행착오를 통해 얻어진 것이기 때문에, 생명체를 모방한다는 것은 방대한 자연의 경험을 바탕으로 얻어진 가장 효율적인 방법을 공학적인 문제에 이용한다는 것을 의미한다.

특히 대부분의 생명체는 공기나 물 속에서 존재하고 활동하기 때문에 유동체역학 분야에서 생체모방을 이용한 연구는 무한한 가능성을 가지고 있다. 생체모방공학의 한 예로서 거의 소리를 내지 않고 조용히 먹이를 향해 비행하는 올빼미의 날개 깃털에 있는 칼깃이라는 미세한 빗살 구조가 소음저감에 기여하는 것으로 알려져 있다. 또한, 일본에서는 올빼미의 저소음 비행원리를 응용하여 신칸센 고속열차의 팬터그래프에서 발생하는 소음을 크게 줄였다고 발표하기도 하였다.⁽²⁾

본 연구에서는 공력소음 저감에 대한 기초연구로서, 생체모방공학에 기법 전 부영이의 저소음 비행 메커니즘 연구를 통해 공력소음 저감을 모색하였다. 먼저 실험계획법인 다구치방법과 CFD를 통해 정상상태의 유동을 분석하여 부영이 깃의 주요변수를 도출하고, 대와류모사법(Large Eddy Simulation, 이하 LES)을 이용하여 부영이의 깃에 따른 비정상유동특성을 분석하여 공력소음의 원인이 되는 와류를 억제하는 메커니즘을 파악하였다. 향후 본 연구 결과를 확장하여 공력 소음 저감에 응용할 수 있는 기초 방안을 제시하고자 한다.

2. 저소음 비행의 주요 인자 도출

2.1 다구치 실험 계획

생체 모방 대상인 부영이의 저소음 비행 원리를 파악하기 위해 부영이 날개의 익형, 깃의 형상 및 구조, 비행 습관 등을 조사하였다. 다른 조류와는 다르게 부영이의 깃털의 칼깃이라고 불리는 미세한 빗살구조가 작은 와류를 발생시켜 큰 와류의 발생을 억제하고 이를 통해 공력 소음을 저감시킨다는 점에서 착안하여 칼깃의 형상에서 인자를 도출하였다. 또한, 이 변수들을 실험 계획법의 하나인 다구치 법

을 사용하여 3수준 5인자로 설계하였다. 다구치는 소위 직교표(orthogonal table)라 부르는 실험계획을 이용하여 데이터를 수집할 것과, 그 데이터로부터 유도된 SN비(signal-to-noise ratio)를 분석함으로써 제품이나 공정의 최적조건을 결정할 것을 제안하고 있다.

직교표를 사용하는 이유는 실험횟수를 줄이기 위해서이며 SN비로 분석하여 제품이나 공정의 최적조건을 찾기 위함이다.

본 연구에서 선정한 부영이 저소음 비행 영향을 미치는 칼깃 모델의 변수를 정하기 위해 직관적으로 부영이 깃 형상을 관찰하였으며, Table 1과 같이 제어인자 5인자로 정하고 각 수준을 3수준으로 정하였다. Figure 1은 제어인자의 기준을 나타내고 있다. 또한, Table 2는 직교배열법을 통해 할당된 직교배열표를 나타낸다. Table 2에서 보는 바와 같이 잡음 인자가 일정하게 적용된다. 이는 해석 시뮬레이션 수행 시 직교 배열에 영향을 주지 않기 위해서이다.

Table 1 제어인자와 수준

제어인자	수 준			단 위	
	1	2	3		
길이	(A)	10	12	14	mm
Y축각도	(B)	0	15	30	°
Z축각도	(C)	0	15	30	°
굵기	(D)	1	2	3	mm
간격	(E)	1	2	3	mm

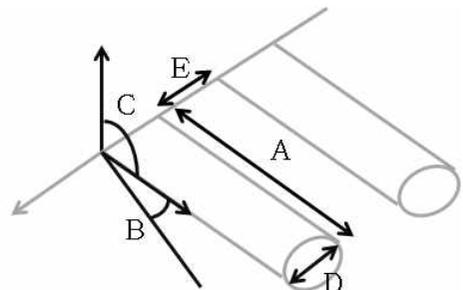


Figure 1 제어인자 기준.

Table 2 직교표 할당

No.	A	B	C	D	E	잡음인자
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	1
3	1	1	1	1	3	1
4	1	2	2	2	1	1
5	1	2	2	2	2	1
6	1	2	2	2	3	1
7	1	3	3	3	1	1
8	1	3	3	3	2	1
9	1	3	3	3	3	1
10	2	1	2	3	1	1
11	2	1	2	3	2	1
12	2	1	2	3	3	1
13	2	2	3	1	1	1
14	2	2	3	1	2	1
15	2	2	3	1	3	1
16	2	3	1	2	1	1
17	2	3	1	2	2	1
18	2	3	1	2	3	1
19	3	1	3	2	1	1
20	3	1	3	2	2	1
21	3	1	3	2	3	1
22	3	2	1	3	1	1
23	3	2	1	3	2	1
24	3	2	1	3	3	1
25	3	3	2	1	1	1
26	3	3	2	1	2	1
27	3	3	2	1	3	1

2.2 수치해석을 통한 와류량 비교

(1) 깃 형상 모델링

직교배열표의 27case의 깃 형상을 CAD 모델링 프로그램 UGNX를 사용하여 모델링하였다. 계산 효율을 증대시키기 위해 깃의 개수를 3개로 고정시켜 모델링하였다.

(2) 수치해석 격자

격자 구성에는 Hypermesh를 이용하였으며, 차량표면 격자와 해석영역을 미소한 제어체적으로 분할하여 격자망을 형성하였다. 계산 격자는 약 60만 ~ 80만개의 tetrahedral 격자로 구성하였다.

(3) 경계조건 및 지배방정식

입구에서 유입되는 공기의 밀도, 온도, 점도는 모든 경우에 대하여 Table 3과 같이 고정하였으며 출구에서는 유동이 자유롭게 빠져나가도록 설정하였다.

Table 3 해석유체의 물성값

Fluid (air)	
Density	1.225 kg/m ³
Temperature	288.16 K
Viscosity	1.7894e-05 kg/m·s

경계조건으로 입구에서 유입되는 공기의 속도를 55.56m/s로 균일하게 설정하였다. 모델링의 벽면은 Figure 2와 같이 유체가 흐르는 수직방향의 벽은 유입되는 유속과 동일한 속도로 움직이는 moving wall로 설정하여, 자유장에서 유동이 흐르는 효과를 내도록 설정하여 해석을 수행하였다.

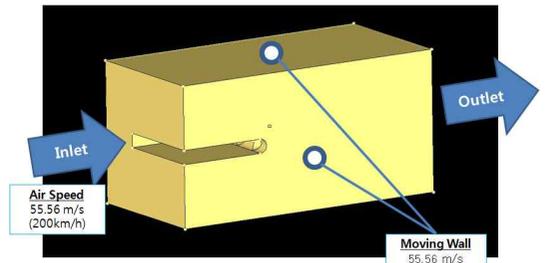


Figure 2 경계조건

3차원 정상상태로 해석을 수행하였다. Table 4에서 보는바와 같이 지배방정식으로는 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 해석을 수행하였고 난류 모델은 상용 유동해석 소프트웨어인 FLUENT에서 제공하는 Standard k-epsilon 2 equation 모델⁽³⁾을 사용하였으며, 압력장을 풀기 위해서 연속 방정식으로부터 압력을 계산할 수 있는 방정식을 유도하여 속도와 압력을 연관시켜 계산하는 "Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equation algorithm"을 사용하였는데, 그 형태가 간단하고 가장 많이 사용되는 algorithm 중 하나이다.

Table 4 선행해석 단계의 지배방정식

	Condition
Governing equation	Continuity & Time averaged Navier-Stokes equation
Turbulence model	Standard k-ε (2 equation)
Pressure term	SIMPLE algorithm

(4) 해석 결과

와류를 확인하기 위해 사용되는 방법 중 하나인 Swirling strength를 확인하여 각 case의 와류량을 예측하였다. 깃 형상이 없는 기본모델의 경우에는 Swirling strength이 $766.67S^{-1}$ 인 반면에 case24의 경우 Swirling strength가 $663.14S^{-1}$ 로 적었다. Table 5는 각 case별 Swirling strength을 나타내었고, Figure 3은 비교를 위하여 그래프로 나타내었다.

Table 5 각 case별 생성 와류량

No.	Swirling strength (S^{-1})
base	766.67
1	1429.21
2	3217.92
3	1358.52
4	2418.97
5	2192.49
6	2585.50
7	3380.04
8	2718.63
9	3088.09
10	1518.71
11	1419.91
12	1541.22
13	4375.47
14	4806.74
15	1505.82
16	1490.74
17	1461.86
18	1653.63
19	2824.29
20	2937.50
21	1218.26
22	663.37
23	673.38
24	663.14
25	1196.61
26	1219.74
27	1144.08

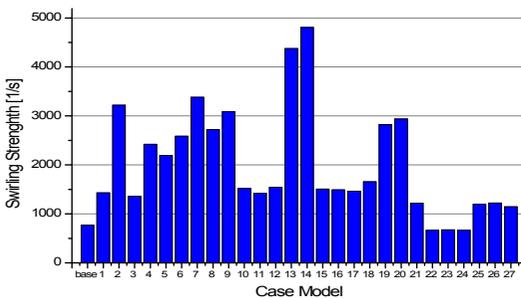


Figure 3 case별 Swirling Strength

2.3 결과 분석 및 주요 인자 도출

본 연구의 경우에는 Swirling strength가 적을 수록 와류량이 적어지기 때문에 망소특성에 해당되며 SN비는 아래의 공식에 의해서 계산된다.⁽⁴⁾

$$SN_i = -10\log\left\{\frac{1}{n}\left(\sum_{j=1}^n y_{ij}^2\right)\right\}$$

각 case의 SN비 계산 결과를 이용한 각 인자별 주 효과도는 Figure 4에 나타내었다.

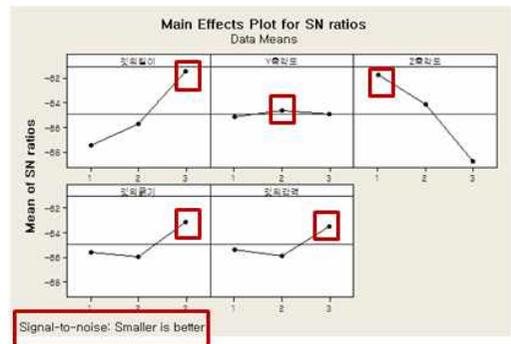


Figure 4 각 인자별 주 효과도

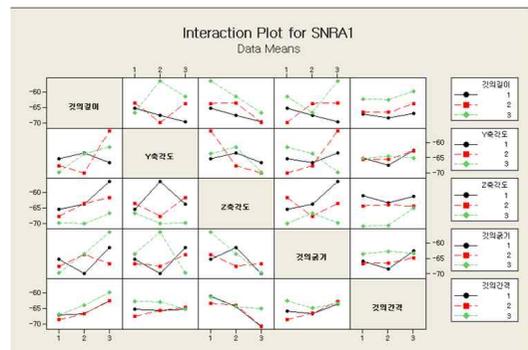


Figure 5 각 인자의 교호 작용도

이를 통해 깃의 길이와 Z축의 각도가 신호 대 잡음비에 가장 큰 영향을 주는 요인으로 작용하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 깃의 길이와 Z축 각도가 와류량에 민감한 인자인 것을 알 수 있다.

Table 6는 각 인자가 와류량에 미치는 영향이 민감한 정도를 순위로 나타내었다.⁽⁵⁾

Table 6 SN비에 대한 반응표

수준	길이	Y축각도	Z축각도	굽기	간격
1	2488	1939	1396	2250	2143
2	2196	2206	1692	2087	2291
3	1390	1928	2984	1736	1640
민감도	1098	278	1586	515	651
순위	2	5	1	4	3

정상상태 유동해석에 기반한 생성 와류량의 비교를 통하여 도출된 와류 생성 인자를 이용하여 Table 7과 같이 최적의 깃 형상을 선정하였다.

Table 7 깃 최적형상

제어인자	선정값	단위
길이	14	mm
Y축각도	15	°
Z축각도	0	°
굽기	3	mm
간격	3	mm

3. 비정상상태 유동특성 파악

3.1 난류모델 선정

공력소음이 지배적인 고레이놀즈 수 유동은 고주파수 영역의 미소 스케일(small scale)과 난류 특성을 가지는 간헐(intermittence)적인 운동이 서로 유동에너지 전달을 유발시킨다. 이를 해석하기 위해 난류의 와류를 표현하는 최소 스케일인 Kolmogorov 스케일을 포함하는 DNS (Direct Numerical Simulation)해석을 이용하는 것은 비용이나 시간적 측면에서 비현실적이다. 따라서 어느 정도 규모의 비정상 유동을 모사할 수 있는 대와류 모사법(Large-Eddy Simulation; LES)을 사용하는 것이 현실적인 대안이 될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 LES 기법을 선정하였다. LES 기법에서는 아격자 모델 (SubGrid-Scale; SGS)을 필요로 한다. 큰 스케일 내의 아격자 스케일의 효과를 나타내는 아격자 난류점성 모델⁽⁶⁾을 사용하였으며, 아격자 난류점성을 계산하기 위해 Smagorinski-Lilly 모델⁽⁷⁾을 선정하여 사용하였다. 이 모델은 에너지의 순수 소산량이 해석격자에서 아격자 크기로의 에너지 전달량과 같다는 사실을 와류-점도에 의해 반영함으로써 평균적으로 에너지 보

존이 만족하도록 제안된 모델이다. 식은 다음과 같다.

$$\mu_t = \rho L_S^2 |\bar{S}|$$

$$L_S = \min(\kappa d, C_S V^{\frac{1}{3}})$$

여기서 L_S 는 혼합 길이, κ 는 von Kármán 상수, d 는 가까운 벽면거리, C_S 는 Smagorinsky 상수, 그리고 V 는 격자의 체적을 나타낸다.

3.2 수치해석 방법

본 연구에서는 비정상상태의 정확한 난류 유동장을 파악하기 위해 LES모델을 적용하였다. 아격자 난류점성 모델은 Smagorinsky-Lilly 모델을 사용하였으며, Smagorinsky 상수는 광범위한 유동장 해석에서도 사용가능하도록 Lilly⁽⁸⁾가 제안한 상수 값 0.1을 적용하여 해석을 수행하였다.

격자 및 경계조건은 선행해석 단계와 동일하게 설정하여 해석을 수행하였으며 와류 생성 원리를 확인하기 위해 형상모델이 적용되지 않은 기본모델(base model)과 깃 형상이 적용된 27개의 case 중, 선행해석단계에서 Swirling strength가 가장 크고 작은 14번 case 모델과 24번 case 모델을 우선적으로 선정하여 해석을 수행하였다.

3.3 해석 결과

Figure 6과 7은 기본 모델과 24번 case 모델의 와류분포도를 보여준다. Figure 6의 경우 두 모델에 대한 해석 결과를 옆면에서 도시화 한 와류 분포도를 나타낸다. Figure 6-(a)는 기본 모델을 6-(b)는 24 case 모델을 보여준다. 그림의 흰 부분은 강제로 모델링 된 해석 모델을 보여준다. Figure 6에서 볼 수 있듯이 기본 모델의 경우 주기적으로 와류가 생성되어 모델 끝 부분에서 많은 양의 와류가 생성 되어 있는 것을 볼 수 있다. 반면 24번 case 모델의 경우 동일하게 모델 끝 부분에서 와류가 생성 되지만 기본 모델에 비해 적은 양의 와류가 생성되는 것을 볼 수있으며 생성되는 와류가 깃형상을 타고 올라가는 것을 확인할 수 있다.

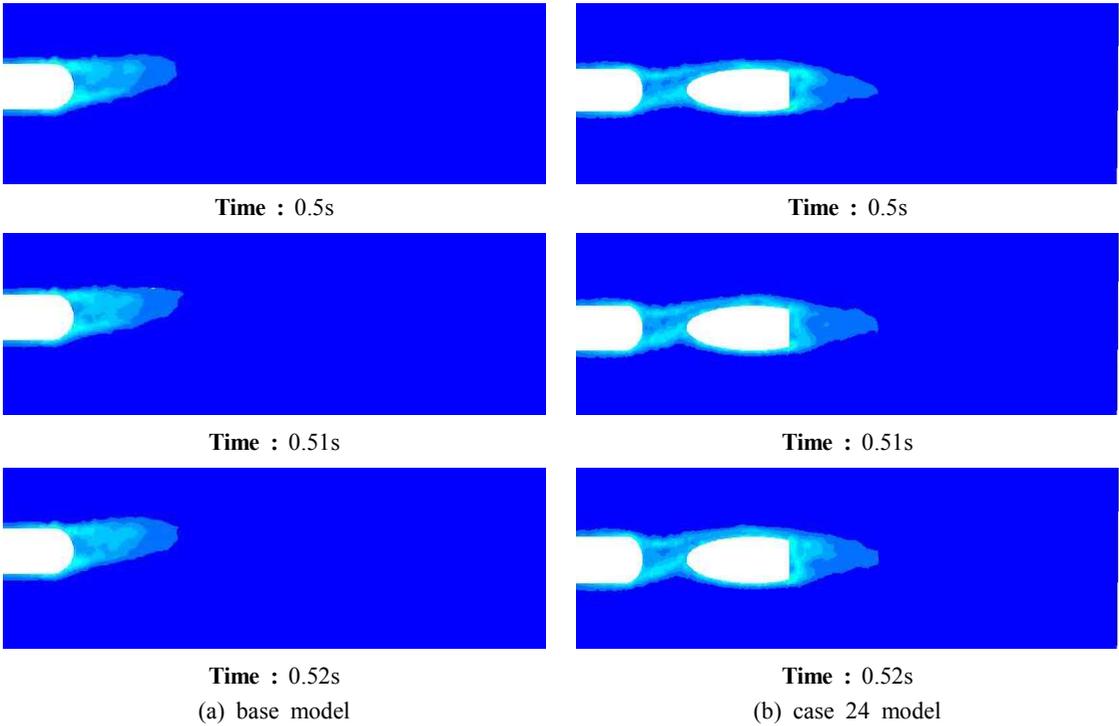


Figure 6 Vorticity distribution (side)

Figure 7은 입자의 이동 경로를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 유체가 깃 형상을 만나 유동이 갈라짐으로 기본 모델에 비해 작은 와류가 생기며 깃 형상을 타고 올라가면서 작은 와류들을 생성시키는 것을 볼 수 있다. 기본 모델의 경우 유체가 모델의 끝 부분에서 한 번에 박리 되지만, 깃 형상을 부착한 모델의 경우 유체 입자들이 깃 형상 모양의 영향을 받아 순차적으로 떨어지는 것을 볼 수 있다.

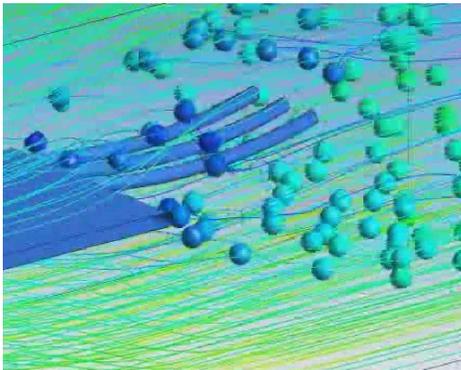


Figure 7 Streamline of flow

Figure 8은 모델 윗면에서 본 두 모델의 와류분포도를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 24번 case 모델이 기본 모델에 비하여 상대적으로 적은 와류를 생성하는 것을 볼 수 있다. 이는 깃 형상을 모방 한 막대 모양이 기본 모델 끝단에서 생성되는 와류를 분산시키는 동시에 유동이 깃 형상을 타고 오르게 하여 큰 와류를 억제하는 것으로 판단된다. 즉, 유동이 떨어지면서 생기는 와류량을 줄이기 위하여 얇은 깃 형상이 유체의 흐름을 분산시키며 그와 동시에 유동이 모델에서 떨어지는 시간을 늘려 급격한 유동의 변화를 줄여 주는 것으로 판단된다.

비교를 위하여 2장의 실험 계획표의 14번 case 모델을 살펴보면 기본 모델에 비해 더 많은 양의 와류를 발생시키는 것을 알 수 있다. Figure 9는 14번 case 모델의 와류량을 보여준다. 14번 case 모델의 경우 깃 형상 모양의 각도가 높아서 더 많은 와류를 생성하는 것을 볼 수 있다. 즉 유체가 깃 형상을 타고 올라가기 보다는 깃 형상이 벽과 같이 유동을 막게 모델링 되어서 더 많은 와류가 생성된 것으로 판단된다. 따라서 깃 형상의 z축 각도가 일정 각도 이상이 되면 깃 형상이 작은 와류를 생성하

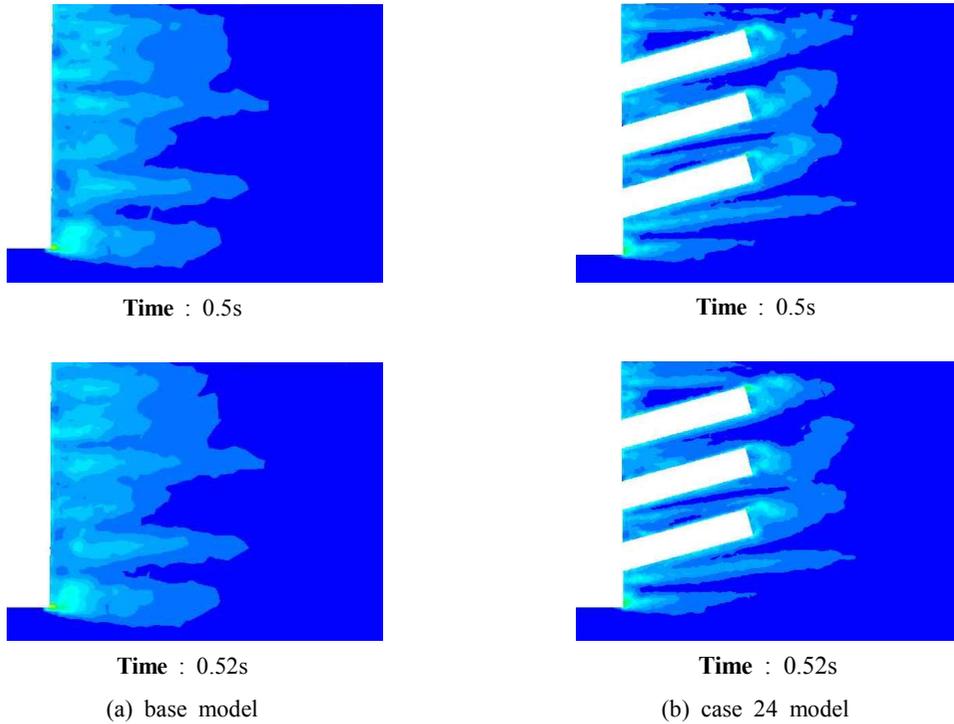


Figure 8 Vorticity distribution (top)

기 보다는 유동장의 흐름을 방해하여 더 큰 와류를 생성하는 것을 볼 수 있다.

상태의 난류 유동장 해석을 통하여 선정된 모델의 경우 기본 모델에 비해 와류량이 크게 감소한 것을 확인 할 수 있었다. 이는 부영이 저소음 비행 원리를 모방한 깃 형상이 작은 와류를 생성하여 큰 와류 생성을 방해하기 때문인 것으로 판단된다. 깃 형상은 유체 흐름을 분산 시키는 동시에, 유체가 깃 형상을 타고 오르며 박리현상을 지속화 시켜 유동의 급격한 변화를 크게 줄이는 것으로 판단된다. 결과적으로 부영이 저소음 비행원리를 적용한 모델의 경우 와류량이 상대적으로 감소시키는 것으로 해석 되었다. 추후 본 모델을 이용하여 소음 저감 효과를 분석할 예정이다.

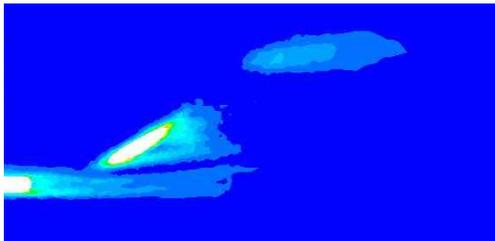


Figure 9 Vorticity distribution for case 14 model

4. 결 론

본 연구에서는 운송 수단의 고속화에 따른 공력 소음을 저감 시킬 수 있는 생체 모방 공학 연구를 수행하였다. 부영의 저소음 비행 원리와 관계된 5개의 형상 변수를 설정한 뒤 실험 계획법에 따라 직교표를 작성하였다. 정상상태에서 FLUENT를 사용하여 유동해석을 수행하였으며 부영이 저소음 비행 원리를 모방한 최적화된 모델을 선정하였다. 비정상

후 기

본 연구는 한국연구재단 과제 (생체모방공학을 활용한 공학디자인 방법론 개발)로 수행된 연구 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- (1) D. Rocchi, A. Zasso, 2002, Vortex shedding from a circular cylinder in a smooth and wired configuration: comparison between 3D LES simulation and experimental analysis, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90, pp. 475~489.
- (2) Choi, H. C. Park, H. M. SAGONG, W. 2010, Bio-Mimetic Flow Control, *Physics & High Technology*, pp. 28~33
- (3) Cha, C. H., Kwon, H. B., Nam, S. W. 2006, Flow characteristics caused by the face-lift of mud-flap in inter-car gap for KTX train, *Proceedings of the KSME Annual autumn Conference*, Vol. 34, No.10, pp.925~931.
- (4) Lee, S. H., Min, B. H., Kim, B. G. 2001, Optimizing the Injection Molding Process for Cooling Filter Using Computer Simulation and Taguchi Method, *Proceedings of the KORMS/KIIE Annual Spring Conference*, pp. 825~828.
- (5) Yoo, S. Y., Kim, J. H., Jeon, J. Y. 2010, Evaluation of Impact Sound Reduction in Floor Structure using Taguchi Method, *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 535~536.
- (6) Kang, S. M. 2000, On Subgrid-Scale Models for Large-Eddy Simulation of Turbulent Flows, *Transactions of the KSME B*, Vol. 24, No.11, pp. 1523~1534.
- (7) Mo, J. O., Lee, Y. H. 2010, A Basic Study on the Aero-acoustic Noise Characteristics around a circular Cylinder Using the Large Eddy Simulation, *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 13, No.3, pp. 5~11.
- (8) Lilly, D. K. 1992, A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale closure model, *Physics of Fluids*, pp. 633~635.