

# MIRA Model 후미의 저저항 최적 설계

허 남 건<sup>1</sup>, 김 욱<sup>2</sup>

## Optimal Design for the Low Drag Tail Shape of the MIRA Model

Nahmkeon Hur and Wook Kim

Drag reduction on vehicles are the main concern for the body shape designers in order to lower the fuel consumption rate and to aid the driving stability. The drag of bluff bodies like transportation vehicles is mostly pressure drag due to the flow separation, which can be minimized by controlling the location and size of the separation bubble. In the present study, the TURBO-3D code is incorporated with optimal algorithm based on analytical approximation method to obtain an optimal afterbody shape of the MIRA Model corresponding to the lowest drag coefficient. For this purpose three mutually independent afterbody angles are chosen as design variables, while the drag coefficient is chosen as an objective function. It is demonstrated in the present study that an optimal body shape having the lowest drag coefficient which is about 6% lower than that of the original shape has been successfully obtained within number of iterations of the optimal design loop.

**Key Words** : 전산유체역학(CFD), 최적설계(Optimal design, Optimization), Ahmed Body, MIRA 모델(MIRA Model)

### 1. 서 론

전산유체역학의 발달로 기계공학 분야 등 여러 분야에서 유동해석을 수행하여 설계에 적용하는 사례가 늘고 있으며, 특히 최근에는 전산유체역학 해석 프로그램에 최적화 알고리즘을 적용하여 터보기계의 효율을 증가시키고 소음을 줄이며 또한 운송기구의 저항을 줄이려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 일 예로 Shuka등[1]은 3-D Navier-Stokes 코드와 최적화 알고리즘을 이용하여 극초음속 항공기의 scramjet 입구

에서 가장 큰 전압력(total pressure)의 회복을 얻기 위한 연구를 수행하였고, Han등[2]은 3차원 bluff body가 지면에 가까운 경우에 대해서 bluff body의 후반부를 선미 형상화(boat tailing)하여 공기 저항을 최소화하기 위한 연구를 수행하였다. 또한 김광용등[3]은 자동차용 냉각팬의 축류 송풍기를 최적화 하는 연구를 수행하여 소음을 감소시킬 수 있었다. 김욱과 허남건[4]은 Ahmed Body의 후반부의 형상을 변화시켜 항력을 최소화하기 위한 연구를 수행하였고, 이정우와 문영준[5]은 유동박리와 충격파를 감소시키는 형상최적설계 문제를 다루었다. 김종섭과 박원규[6]는 Steepest Descent Method와 Conjugate Gradient Method를 이용하여 익형의 최적설계를 수행하였다.

<sup>1</sup> 정회원, 서강대학교 기계공학과

<sup>2</sup> 학생회원, 서강대학교 대학원

자동차등 운송체의 저항을 줄이는 것은 그 미적인 형상과 함께 설계에 있어서 아주 중요한 고려사항이며, 많은 노력이 경주되어 왔다. 자동차등 bluff body의 저항은 대부분 물체 표면으로부터의 유동박리에 기인하는 압력저항이며, 이러한 물체의 저항은 그 유동박리의 위치와 크기를 조절하므로써 최소화시킬 수 있다.

본 연구에서는 최근 활발히 연구가 진행되고 있는 전산유체역학을 사용하여 자동차 등 bluff body의 공기항력을 단순히 계산하는 연구에서 한 걸음 더 나아가, 최적화 알고리즘을 전산유체역학 프로그램에 적용하여 단순화된 3차원 자동차 형상인 MIRA model의 후미부분을 최적화하는 연구를 수행하였다.

## 2. 최적화 알고리즘

다수의 설계 변수를 갖는 목적함수를 최적화하는 과정은 크게 두 단계로 나눌 수 있다. 먼저 시작점에서 최적점을 향하는 방향을 설정하고, 설정한 방향으로 1차원 검색(Line search) 알고리즘을 통하여 최적점을 찾는 것이다.

본 연구에서는 3차원 Navier-Stokes 방정식 해석 프로그램인 TURBO-3D[7]를 이용하였으며, 목적함수는 압력 저항과 마찰 저항의 합으로 선정하였다. TURBO-3D는 3차원 유동해석만을 수행하게 되므로 그전에 변화된 변수에 맞게 형상을 변화시켜 주는 전처리 프로그램을 개발하여 사용하였다.

### 2.1 탐색 방향(Search direction)의 결정

다수의 설계변수를 갖는 최적화를 수행하기 위하여 본 연구에서는 표 1과 같이 다섯 가지의 최적화 방향 설정 방법을 사용하여 최적화 알고리즘에 적용하였다.

첫 번째 경우인 gradient를 이용한 방향설정 은 gradient의 부호의 반대 방향에 최적값을 갖는 설계변수의 값이 있다는 것을 이용한 것으로 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\mathbf{u}_k = -\mathbf{g}_k \quad (1)$$

Conjugate gradient를 이용한 최적화 방향 설정은 먼저 계산된 방향을 계승하여 사용하는 것

으로 다음과 같이 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{u}_0 = -\mathbf{g}_0 \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_k = -\mathbf{g}_k + \frac{\|\mathbf{g}_k\|^2}{\|\mathbf{g}_{k-1}\|^2} \mathbf{u}_{k-1} \quad (3)$$

즉, 두 번째 반복 계산에서부터 conjugate gradient 는 적용될 수 있다.

One-at-a-time 방법은 최적화 알고리즘의 한 회에 한 방향으로만 최적값을 구하는 방법이며 설계변수의 방향에 수직으로 전개된다.

One-at-a-time based on residual gradient 방법은 one-at-time 방법에서 먼저 계산된 gradient를 그대로 남겨둔 채 현재 계산 회수의 설계변수 방향으로 최적화 하는 것이다. 목적함수가 unimodal convex 하다면 공학적으로 효율이 좋을 수도 있다.

Modified gradient method는 공학적인 설계에 있어서 목적함수가 단조감소일 때 즉 모든 방향에서 감소 또는 증가하는 경우일 때 효율적일 수 있다. one-at-a-time 방법에서 현재 계산되고 있는 설계 변수에 대하여 계산하면서 동시에 다른 방향의 영향도 조금 가미시키는 것이다. 구배를 전진차분법을 이용하여 구한다면 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$g_j = \frac{E(D_1 + \epsilon_m, D_2 + \epsilon_s) - E(D_1, D_2)}{\epsilon_m} \quad (4)$$

$$g_{j+1} = \frac{E(D_1 + \epsilon_m, D_2 + \epsilon_s) - E(D_1, D_2)}{\delta} \quad (5)$$

여기서,  $\epsilon_m \gg \epsilon_s$ ,  $\delta \ll 1$  로 둔다.

Table 1 Methods considered for Finding search direction method

Case 1-1	Gradient Method
Case 1-2	Conjugate Gradient Method
Case 1-3	One-at-a-time Method
Case 1-4	One-at-a-time based on residual gradient Method
Case 1-5	Modified Gradient Method

2.2 1차원 검색 방법(Line search method)

대부분의 공학적인 목적함수는 수치적으로 2차 미분이 어려운 경우가 많으므로 2차 미분을 추정하는 방법을 고려하여야 한다. 본 연구에서 사용된 Analytical Approximation Method[8]는 최소값을 구하기 위해서 2차 미분 즉 hessian을 수치적으로 추정하여 최소값을 구하는 방법이다.

어떤 임의의 점에서 일정한 거리  $\delta$ 만큼 떨어진 곳에서 목적함수(objective function)의 최소값이 있다고 가정하면, 탐색 방향 벡터가  $u$ 일 때  $\delta$ 는 다음과 같다.

$$\delta = \lambda \frac{u}{|u|} \tag{6}$$

목적함수의 최소값을 현재의 위치에 관한 함수로 표시하면 Taylor 시리즈 전개에 의해 다음의 식과 같다.

$$E(D+\delta) = E(D) + g^T \delta + \frac{1}{2} \delta^T H \delta \tag{7}$$

식 (6)과 식 (7)에서 최적값의 위치까지의 거리를 나타내는  $\lambda$ 를 가상의 step length  $\mu$ 에 관한 식으로 나타내면 다음의 식과 같다.

$$\lambda_{min} = -\frac{\mu^2 g^T u}{2|u|} \left( E(D + \mu \frac{u}{|u|}) - E(D) - \mu \frac{g^T u}{|u|} \right)^{-1} \tag{8}$$

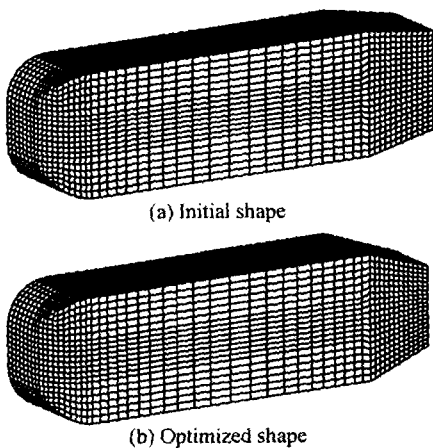


Fig. 2 Shapes of an Ahmed Body

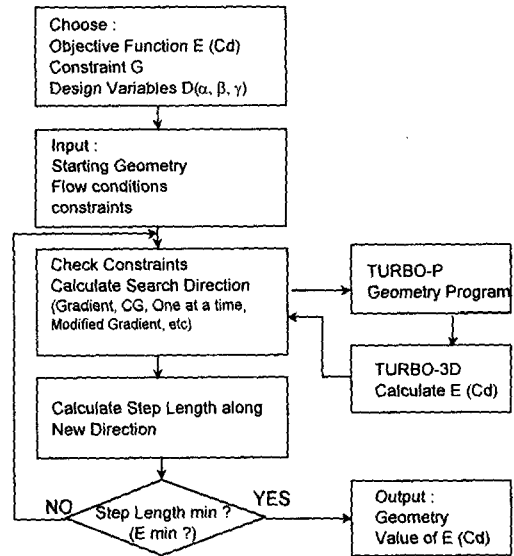


Fig. 1 Flow chart of optimization algorithm

앞의 식 (8)은 Hessian이 생략된 표현으로 현재의 위치에서 최소값까지의 거리를 나타내는 것이다. 프로그램의 시작에서 step length  $\mu$ 의 값을 임의로 지정하여 시작한다. 첫 회의 반복 계산에서 임의로 지정된  $\mu$ 값에 의하여 새로운 step length  $\lambda$ 가 지정되며 구해진  $\lambda$ 은 다음 회의 반복계산에서  $\mu$ 가 된다. step length  $\lambda$ 가 종료조건에 다다르면 최적값을 찾게 된다. 위의 Analytical Approximation Method와 TURBO-3D를 이용한 최적화 알고리즘은 그림 1에 나타내었다.

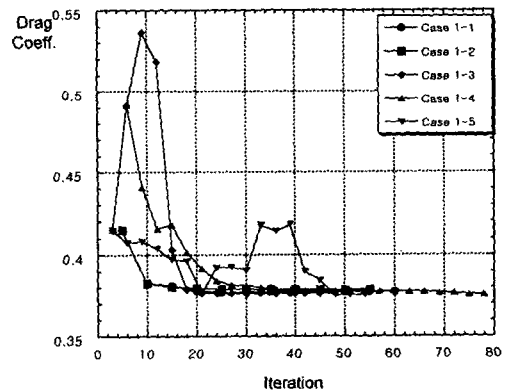


Fig. 3 Convergence history of drag coeff. for the Ahmed Body optimization

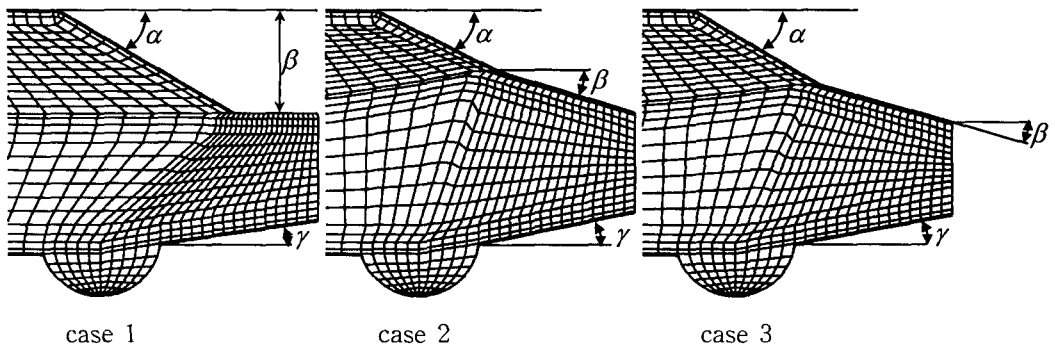


Fig. 4 Design variables and optimized shapes of various afterbodies of the MIRA Model

### 3. 계산 결과 및 고찰

본 연구에 앞서 선행 연구로서 Ahmed Body의 후두부를 선후 형상화하여 그 형상을 최적화하는 연구[4]를 수행한 바 있다. 우선 앞장에서 제시한 5가지 종류의 탐색 방향 결정 방법을 Ahmed Body(그림 2 참조)의 최적화에 적용하여 효율성을 비교하였다. 그림 3의 결과는 Ahmed Body의 최적화를 5가지 방법의 탐색 방향 결정 알고리즘을 적용하여 계산한 결과이다. 그림 3에서 x 축의 iteration은, 최적화가 진행되는 동안 변형된 3차원 형상에 대한 Navier-Stokes 방정식을 실제 계산한 회수이며, outer iteration은 최적화 방법의 진행 회수이다. gradient에 기초를 둔 방법은 case 1-1과 case 1-2이며, 이 경우에는 한번의 최적화 알고리즘의 한 회의 반복계산을 수행하기 위해서는 5번의 Navier-Stokes 방정식을 풀게 된다. 그러나 case 1-3에서 case 1-5까지의 one-at-a-time 방법에 기초를 둔 최적화 방법은 최적화 알고리즘의 한 회를 진행하기 위해서는 3번의 계산이 필요하다. 그림 3의 결과에서 5가지 최적화 방법 모두 비슷한 정도의 최적값을 찾아갔다. 또한 outer iteration의 수는 case 1-1과 case 1-2의 gradient에 기초를 둔 방법이 적었지만, 각 방법마다 Navier-Stokes 방정식의 계산수는 거의 같은 것으로 나타났다. 최적값을 찾아가는 안정성은 gradient에 기초를 둔 case 1-1과 case 1-2가 중간에 진동하는 경우 없이 좀 더 안정적인 것으로 판단되어 MIRA model의 최적화에는 Conjugate gradient 방법을 이용하였다.

MIRA model의 최적화에서 설계변수의 설정은 3가지 경우에 대하여 연구하였다(그림 4, 5 참조). MIRA model은 11940 개의 고체 격자로 구성하였고, 유동장 계산 영역은 196060 개의 유동 격자로 구성하여 총 208000 개의 계산 격자로 구성되었다. 계산은 Silicon Graphics사의 Origin 2000에서 단일 cpu를 사용하여 계산하였으며 한 회의 계산에 약 40분이 소요되었다. 각 경우의 경계구속조건(side constraint)은 표 2에 나타내었다. 경계구속조건은 계산격자의 형상이 너무 뒤틀리지 않게 하기 위하여 사용하였다. 그림 6, 7과 표 2는 3가지 설계변수의 설정에 대한 최적화 결과이다. 그림 6은 각 설계변수의 설정에 따른 목적함수  $C_D$  값의 수렴곡선이며 그림 7은 이때 각 경우에 대하여 설계변수들의 수렴곡선이다. 시작점의  $C_D$  값이 다른 것은 각 설계변수의 설정에 따라 초기형상이 다르기 때문이다.

각 경우에 대한 최적화된 결과의 설계변수의 값도 표 2에 나타내었다. 세가지 경우에 보면 MIRA model의 뒤쪽 하단부가 모두 다른 것을 알 수 있는데 뒤쪽 상단부의 각도가 커질수록 뒤쪽 하단부의 각도도 같이 커지는 경향을 보여주었다. 전체적인 최적화 경향은 C pillar의 각도는 작은 경우에 뒤쪽 상단부의 높이가 낮고 각도가 커진 경우에  $C_D$  값이 줄어들었다.

참고로 변형되지 않은 MIRA model의  $C_D$  값은 풍동 실험을 통해서 구한 경우는 0.36이며 TURBO-3D를 통해서 구한 경우는 0.546이다. 계산된 항력계수가 풍동 실험을 통하여 구한 항력 계수의 값보다 크게 나오는 것은 난류 모델

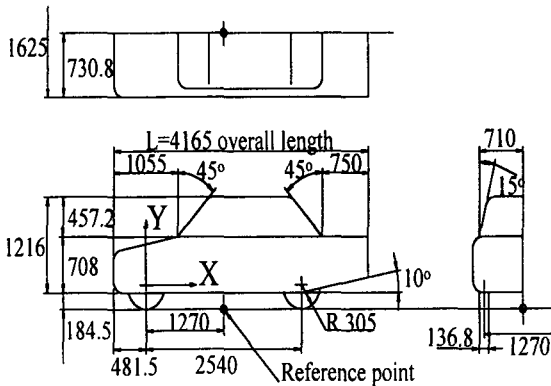


Fig. 5 Dimensions of the MIRA Model

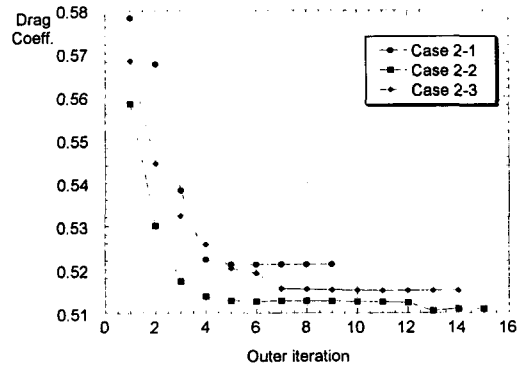


Fig. 6 Convergence history of drag coeff. for the MIRA Model optimization

의 부정확성 및 계산 격자의 크기 등에 의해 영향을 받은 것이지만 본 연구의 항력 계수를 목적함수로 하는 형상 최적화는 정성적인 경향성을 보여주는 것이다.

그림 8부터 그림 11까지는 case 2-3의 초기형상과 최적화된 형상의 전압력 계수와 속도 벡터를 나타낸 것이다. 그림에서 각 section 면의 간격은 1.5 m 이다. 전압력은 자동차 형상에서 마찰과 유동박리에 의해서 손실이 있게 되며 자동차의 뒷부분에서 전압력의 회복이 있게 되는데 전압력의 회복이 좋은 경우에  $C_D$  값이 작아지게 된다. 전압력 계수의 경우 초기형상의 그림 8과 최적화된 형상의 그림 9를 비교해 보면 후류 영역 즉 유동박리가 발생된 영역의 높이는 거의 유사하지만 지면과 가까운 부분에서 최적화된 경우에 후류 영역이 줄어들었다. 또한 후류 영역내에서 최적화된 경우에 전압력의 손실

이 더 작아져서 저항이 줄어들을 알 수 있다. 전압력 분포도에서 초기형상과 최적화된 형상에서 지면과 가까운 부분에서 전압력의 손실이 차이를 보이는 것은 자동차형상의 뒷부분 하단부에 각도를 주어 압력회복이 잘 되었기 때문이다. 속도벡터의 경우 그림 10과 그림 11을 비교해 보면 자동차 뒷부분 상부에서 발생하는 와류의 강도가 최적화된 후에 약해졌다. 뒷부분에서의 trailing vortices는 초기형상에서는 시계 방향으로 회전하는 경향을 보이지만 최적화된 후에는 trailing vortices의 형태가 후미의 상부에서 유도된 시계방향의 vortex와 하부에서 유도된 반시계 방향의 vortex가 동시에 나타나고 있다. 즉 전압력 계수의 값이 작아지면서 와류의 수는 증가하였고 크기는 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 허남건등[9]이 수치해석한 결과에서도 나타났다. 즉 MIRA model의

Table 2 Side constraints and total drag coefficients for various afterbodies

Case	Side constraints				Optimized values			
		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$C_D$
2-1	min	30°	0.3 m	0°	30.0°	0.51 m	8.5°	0.521
	max	90°	0.51 m	20°				
2-2	min	20°	0°	0°	26.1°	16.1°	11.5°	0.511
	max	55°	$\alpha - 10^\circ$	20°				
2-3	min	30°	0°	0°	30.0°	15.0°	10.7°	0.515
	max	70°	15°	20°				

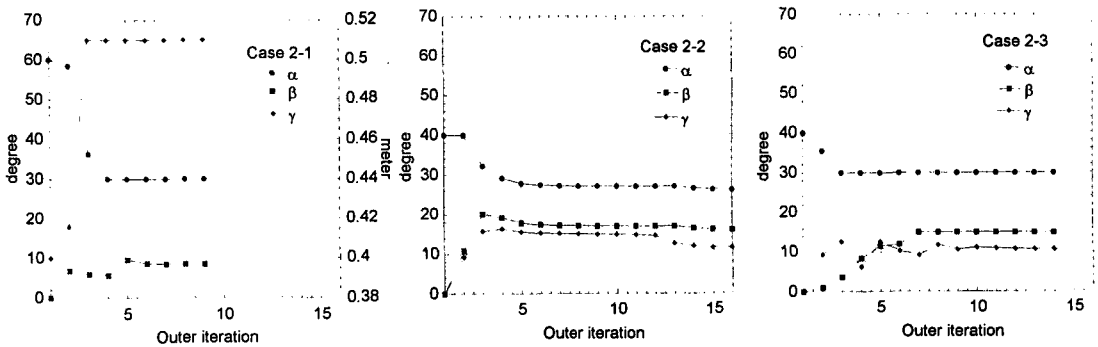


Fig. 7 Convergence history of design variables for the MIRA Model optimization

공기 저항이 후미에서 형성되는 와류의 수와 형상에 따라 영향을 받는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 MIRA model의 뒷부분 형상을 최적화 시켜서 항력계수 값을 줄이려는 연구를 수행하기 위하여 항력계수를 목적함수로 설정하고 MIRA model의 뒷부분 형상을 세가지 경우에 대해서 각각 3개의 설계변수로 두었다. 각각의 경우 outer iteration이 9내지 16회에서 최적형상을 얻었으며, 항력계수는 원래형상보다 대략 6% 줄어든 값을 얻을 수 있었다.

본 연구의 결과, CFD해석 프로그램에 최적화 알고리즘을 접목하여 자동차와 같은 운송체의 저저항 3차원 형상 최적화가 가능함을 보였으며, 본 연구의 결과는 향후 고속전철의 선두부 및 Truck의 공력장치의 형상 최적화등에 활용될 수 있을 것이다.

#### 후기

본 연구는 과제번호 AFR-97-A08에 의한 포항공과대학 첨단유체공학연구센터(AFERC)의 연구비 지원으로 수행되었기에 관계자 여러분께 감사드립니다.

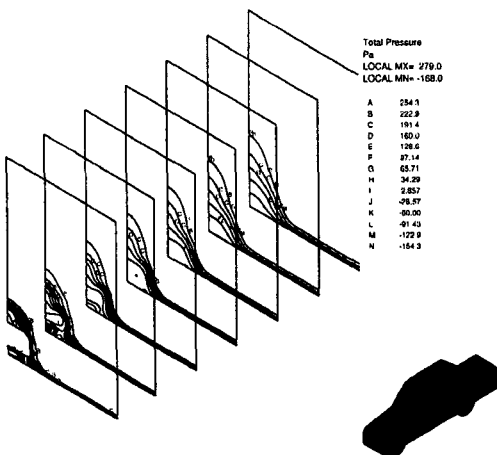


Fig. 8 Total pressure coeff. contour plots behind the MIRA model at section normal to flow direction (case 3 : initial shape)

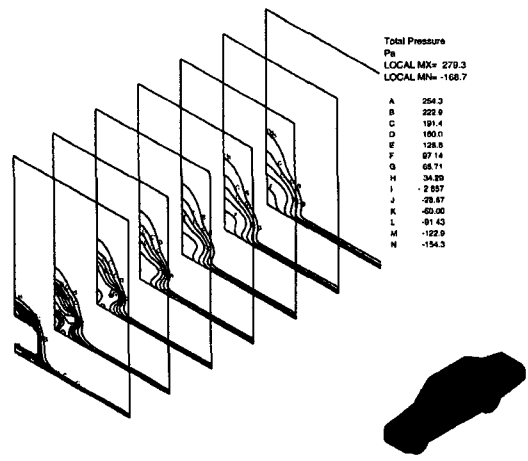


Fig. 9 Total pressure coeff. contour plots behind the MIRA model at section normal to flow direction (case 3 : optimized shape)

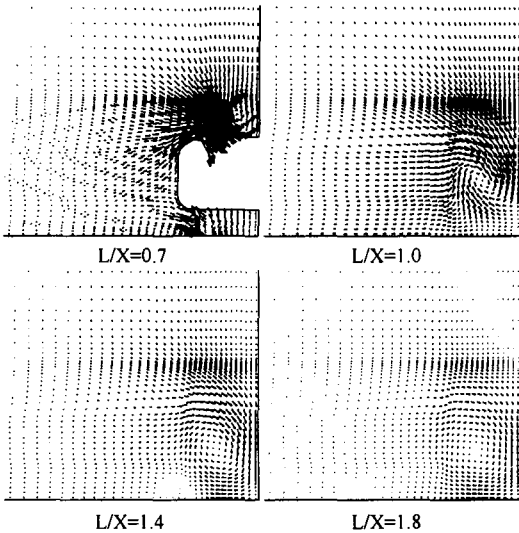


Fig. 10 Velocity vector plots at section normal to flow direction (case 3 : initial shape)

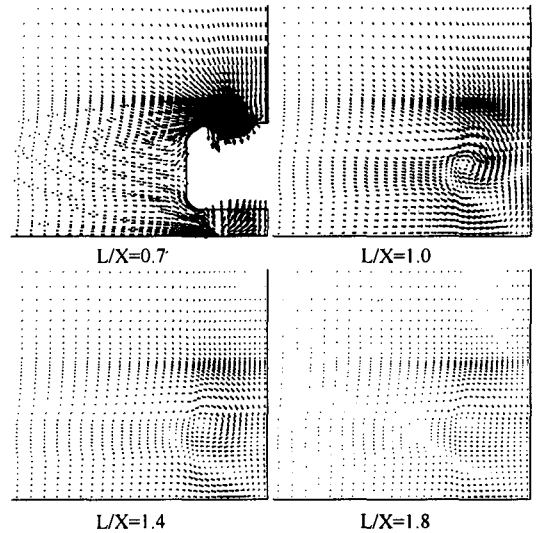


Fig. 11 Velocity vector plots at section normal to flow direction (case 3 : initial shape)

### 참고 문헌

- [1] Shuka, V., Gelsey, A., Schwabacher, M., Smith, D., Knight, D. D., "Automated Redesign of the NASA P8 Hypersonic Inlet Using Numerical Optimization," AIAA (1996), pp. 96-2549.
- [2] T. Han, D. C. Hammand Jr., C. J. Sagi, "Optimization of Bluff Body for Minimum Drag in Ground Proximity," AIAA Journal. Vol. 30, No. 4 (1992), pp. 882-889.
- [3] 김광용, 최재호, 정덕수, "자동차용 냉각팬의 수치최적설계기법," 97 유체기계 연구개발 발표회 논문집 (1997), pp. 133-136.
- [4] 김욱, 허남건, "CFD를 이용한 Ahmed Body 후미의 저저항 최적설계," 전산유체공학회 97 춘계학술대회논문집 (1997), pp. 181-187.
- [5] 이정우, 문영준, "전산유체역학을 이용한 수치 최적설계," 대한기계학회논문집(B) 제 20 권 제 7 호 (1996), pp. 2347-2355.
- [6] 김종섭, 박원규, "최적화기법을 이용한 익형의 역설계," 한국전산유체공학회 97 추계학술대회논문집 (1997), pp. 126-130.
- [7] 허남건, 조원국, 윤성영, 김광호, "일반 비직교좌표계를 사용하는 3차원 범용 유동해석 프로그램의 개발," 대한기계학회 논문집 제 18 권, 제 12 호 (1994), pp. 3345-3356.
- [8] Taylor, D. L., Computer-Aided Design, Addison Wesley (1992), pp. 206-208.
- [9] 허남건, 안이기, 김사랑, 이경현, 이승철, "A Study on Vehicle Aerodynamics by using CFD : Simulation of 3-D Flow Fields around MIRA Reference Vehicle Model," AFERC Report No. AFR-94-B04, Advanced Fluid Engineering Research Center (1994), pp. 105-143.