

CHIMERA 격자기법을 이용한 고속전철 주위의 전산유동해석

최성욱*, 김인선*

Numerical Flow Simulations Around High Speed Train
Using CHIMERA Grid Technique

S. W. Choi and I. S. Kim

The aerodynamic characteristics of high speed train can be improved by well-designing of its fore-body shape. In this paper, as a way of the design a fore-body shape which has optimal aerodynamic characteristics, 9 models of fore-body shapes are proposed and the change of aerodynamic characteristics is studied through calculations of flow field around high speed train for each fore-body shape. The flow field around high speed trains are calculated using Thin-layer Navier-Stokes equation and Chimera grid technique. The application of Chimera grid technique to these flow calculations over high speed train which has ground plane under the train makes grid generation easily. As a computational algorithm, Pulliam and Chaussee's Diagonal algorithm, the modified form of the Beam and Warming's AF scheme which operates on block-tridiagonal matrices, is selected to reduce computational time. Introducing hole points flag concept to this Diagonal algorithm, a algorithm for Chimera grid is generated. The variational trends of aerodynamic characteristics are studied from the results of flow calculations around high speed trains for 9 fore-body shapes.

Key Words : 고속전철(High Speed Train), 전산유체역학(CFD), Thin-Layer Navier-Stokes, Chimera Grid, 전두부 형상(Fore Body Shape)

1. 서론

고속전철에 작용하는 공기력중 압력항력의 크기를 지배하는 것은 전두부 및 후미부의 형상이다. 일반적인 경우, 고속전철의 전두부 및 후미부는 동일한 형상을 가지게 되므로 하나의 선택된 형상이 전두부 및 후미부에서 나타날 수 있는 두 가지의 상이한 공력특성을 동시에 만족하

여야 하는 특성을 내포하고 있다. 즉, 전두부에서의 항력발생의 주 요인은 전두부 앞단에 존재하는 흐름의 정체영역과 이들 정체 압력의 팽창에 따른 압력변동에 의한 것으로서 비교적 설계가 잘 되어 있는 경우 박리가 발생하지 않는 매끄러운 유동특성을 가지게 되지만, 후미부에서는 박리의 발생이 용이해 지면서 이에 의한 항력의 증가 및 와류에 의한 힘의 비정상성(unsteadiness)이 존재하게 되는 등의 전두부에서의 유동특성과는 그 양상을 달리한다.

* 정희원, 항공우주연구소

물론, 실제 열차의 경우, 그 길이가 매우 길어 지므로 전체적인 항력의 많은 부분은 길이의 함수인 표면 마찰항력이 차지하게 되어 상대적으로 전두부 및 후미부의 형상에 의한 효과가 작아질 수 있다. 그러나, 이러한 마찰항력은 열차의 길이에 의존한 고유의 항력으로서 개선이 어려운 부분이지만, 전두부 및 후미부는 공기역학적인 설계를 통해 공력성능의 향상이 가능한 부분이다. 또한, 전두부 형상은 이러한 기본적인 항력외에 흡의 승객에 영향을 주는 열차풍, 터널 미기압파, 그리고 두 열차의 교차시에 발생하는 공력문제 등에 대해 중요한 영향을 미칠 수가 있으므로 공기역학적인 관점에서 심도있는 연구가 요구되는 부분이다.

본 연구에서는 공기역학적으로 최적의 특성을 가진 고속전철 전두부의 형상을 도출하는 과정의 일환으로서 전두부의 형상을 계통적으로 변화시켜 가면서 생성한 후 수치해석을 수행하여 각 형상에 대한 공력특성을 파악하도록 하였다.

2. 형상 모델링

고속전철의 전체적인 미적 형상을 지배하기도 하는 전두부의 형상은 전두부의 내부에 장착되는 장비의 종류 및 크기, 운전실의 요구형태 및 운전자의 시야 확보, 그리고 전두부의 전방하면에 설치될 수 있는 철로상의 운행 장애물을 제거하기 위한 Skirt 나 Snow plow 등의 형태에 따라 변화될 수 있지만, 공기역학적인 관점에서는 유선형을 유지하되 이러한 유선형이 3차원적으로 전두부의 어느 평면에 대해 적용되느냐에 따라 형상 및 이에 따른 공력특성이 크게 변화될 수 있다. 다시 말해서, 전두부의 측면에만 유선형을 적용시키고 평면(위에서 바라본)모양은 거의 사각의 형태를 유지시키는 2차원적 형상인 쐐기형(wedge)이 있을 수 있으며, 측면과 평면에 대해 모두 유선형을 적용시키는 3차원적인 콘형(cone)이 있을 수 있다. 또한, 전두부의 길이에 따라 공력특성이 변화가 있을 수 있으므로 전두부의 길이 역시 공기역학적인 형상을 결정하는 중요한 요소이다. 다음에서는 이러한 형상의 파라메타를 근간으로 하여 모두 9가지의 전두부 형상을 생성하는 과정을 기술하였다.

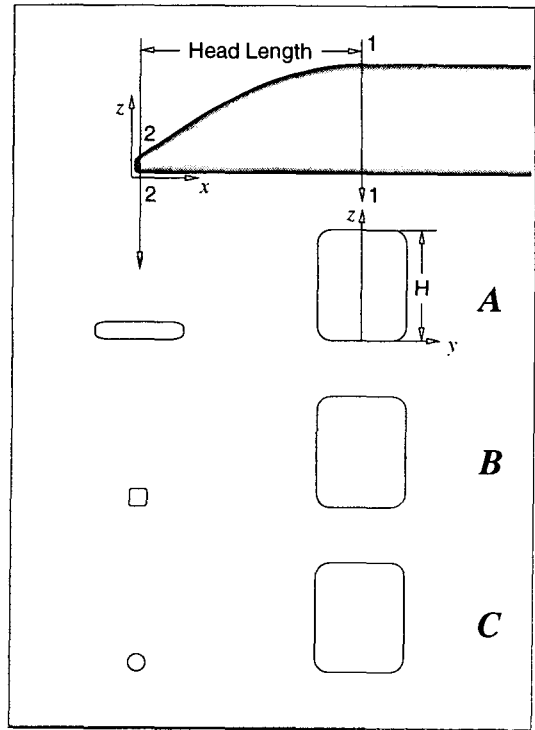


Fig. 1 Construction of fore-body shape

먼저, Fig.1에서 보는 바와 같이 전두부가 끝나는 지점1-1의 단면의 모양은 입수된 TGV 고속전철의 단면도를 단순화하여 round를 가진 직사각형으로 채택하였다. 위에서 언급된 유선형의 형태를 어떠한 평면에 대해 적용할 것인가는 앞부분인 단면2-2의 모양에 의해 결정되게 되는데, 첫번째로 단면1-1 모양을 y축으로는 그대로 유지하고 z축 방향으로만 축소시킨 형태, 즉, Fig.1의 A형태로 정의할 수 있으며, 이러한 형태는 최종적으로 쐐기형의 형상을 가지게 된다. 둘째로는, 단면 2-2의 모양을 z축 뿐만 아니라 y축으로도 축소시킨 B의 형태로서, 전체적으로 round 처리된 사각단면을 유지하는 콘형으로 생성되어질 수 있다. 셋째로는 B의 형태가 사각에서 사각으로 변화함에 따른 다소 각진 모서리의 형태를 보다 완만하게 처리하기 위하여 단면2-2의 모양을 원형으로 하여 전체적인 형상의 사각에서 원형으로 변화되는 콘형이 되도록 하는 C의 형태가 있다. 단면1-1에서 2-2로 변화되는 형태는 sine 함수를 적용하여 전두부

가 끝나는 지점의 기울기가 0 이 되도록 하여 뒷부분과의 연결에 있어서 불연속이 없도록 하였다. 이와 같은 단면 변화의 형태 A, B, C 에 전두부의 길이 변화를 기본단면 1-1의 높이 H 를 기준으로 1H, 2H, 3H로 변화시키면 생성될 수 있는 형상의 종류는 3x3의 총 9가지가 된다.

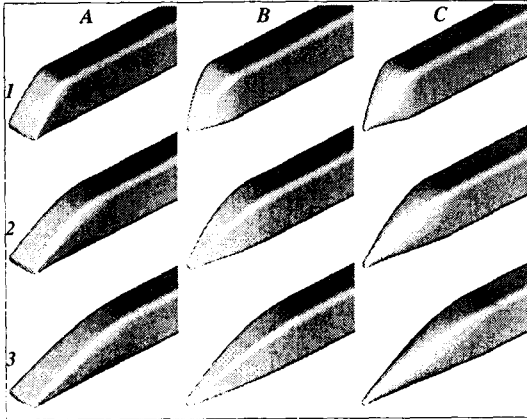


Fig. 2 Hierachy of fore-body shape

이상의 과정은 전두부의 형상중 단면1-1에서 2-2까지만을 생성하는 것으로서 단순한 대수적인 방법에 의한 것이다. 전두부의 앞부분은 위의 과정을 통해 이미 생성된 형상의 시작부분의 접선성분과 전두부 꼭지점의 수직성분을 이용하여 3차원 곡면을 생성시켰다. 따라서 단면2-2가 원형인 Type C 의 경우는 앞쪽의 형상이 구와 가까운 형태를 갖게된다. 지금까지의 과정을 이용해 만들어진 9가지의 3차원 형상이 Fig.2에 나타나 있으며, 우측방향으로는 단면의 변화 A, B, C 를, 상하방향으로 전두부의 길이의 크기변화에 의한 형상변화를 나타낸다. 따라서, 예를 들어, 형상 C-2 의 의미는 단면이 사각에서 원형으로 변화되고 전두부 길이는 기준단면적 높이의 2배인 2H를 의미함을 알 수 있다.

3. 수치적 계산기법

본 연구에서는 Chimera(혹은 Overset) 격자기법을 이용하여 고속전철 주위의 유동을 해석하였다. 다중블럭 격자기법중의 하나인 Chimera 격자기법은 해석대상 물체를 대표적인 부분으로

나누어 각각에 대해 독립적으로 격자를 생성한 후 이들을 중첩(overset)시켜 전체 시스템을 계산하는 방법이며, 보다 엄밀하게는 격자의 다중성 뿐만 아니라 지배방정식의 다중성까지 포함한다. 이러한 Chimera 격자기법의 적용은 부분별로 독립적인 격자계를 구성케 함으로서 격자 생성에 투입되는 노력을 상대적으로 감소시키며, 복잡한 물체의 격자생성시에 불가피하게 발생할 수 있는 격자의 극심한 왜곡(distortion, skewness)을 피할 수 있게 한다. 특히, 본 연구의 해석대상인 고속전철과 같이 지면의 존재를 동반하는 지상 고속운송체의 경우에 대해 이와 같은 Chimera 격자기법을 적용시에 부각될 수 있는 커다란 잇점은 열차주위의 격자를 지면에 대해 독립적으로 생성시킬 수 있으므로 격자의 생성이 매우 용이하고, 또한 열차주위의 격자의 이동이 지면에 대해 쉽게 이루어 질 수 있음으로서 지면효과에 대한 고찰이 폭넓게 이루어 질 수 있다는 것이다.

지배방정식은 3차원 압축성 Thin-Layer Navier-Stokes 방정식을 사용하였으며, 일반화된 좌표계에서 다음과 같이 표현된다.

$$\partial_\xi \hat{Q} + \partial_\xi \hat{E} + \partial_\eta \hat{F} + \partial_\zeta \hat{G} = Re^{-1} \delta_\zeta \hat{S} \quad (1)$$

식(1)에 Beam 과 Warming[1], 그리고 Steger [2]에 의한 AF(Approximate Factorization) 알고리즘을 적용시키면 다음과 같은 delta form 의 유한 차분식이 도출된다.

$$\begin{aligned} & (I+h \delta_\xi \hat{A}^n + D_\xi^{(2)})(I+h \delta_\eta \hat{B}^n + D_\eta^{(2)}) \\ & (I+h \delta_\zeta \hat{C}^n + D_\zeta^{(2)}) \Delta \hat{Q}^n \\ & = -\Delta t (\delta_\xi \hat{E} + \delta_\eta \hat{F} + \delta_\zeta \hat{G} - Re^{-1} \delta_\zeta \hat{S}^n) \\ & + D_e^{(4)} = \hat{R}^n \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)의 Jacobian 행렬 A, B, C를 상사변환시켜 대입하여 정리하면 다음과 같은 Pulliam 과 Chaussee[3]의 대각화된 유한 차분식이 도출된다.

$$\begin{aligned} & T_\xi^n (I+h \delta_\xi A_\xi + D_\xi^{(2)}) \hat{N} (I+h \delta_\eta A_\eta + D_\eta^{(2)}) \\ & \hat{P} (I+h \delta_\zeta A_\zeta + D_\zeta^{(2)}) (T_\xi^{-1})^n \Delta \hat{Q}^n = \hat{R}^n \end{aligned} \quad (3)$$

대각화 알고리즘 식(3)으로 부터 Chimera 기법이 적용된 알고리즘으로의 변환은 hole point flag인 i_b 를 도입함으로써 간단하게 이루어 질

수 있다[4]. 하나의 격자시스템(major grid, 주 격자)이 다른 격자(minor grid, 부 격자)의 물체 경계를 포함하는 경우, 부 격자계의 물체의 내부나 혹은 사용자가 정한 경계 내의 격자점들로 구성되는 임의의 hole point들은 계산과정에서 제외되는 blank point로서 정상적인 격자점에서는 $i_b=1$ 로 지정되고, hole point에서는 $i_b=0$ 으로 지정된다. 즉, hole point가 존재하지 않는 정상적인 격자점에서는 원래의 차분계산을 수행하다가 hole point를 만나면 $i_b=0$ 에 의해서 자동적으로 계산이 중단되지 않게 된다. 또한 이러한 hole point들의 경계로 구성되는 fringe point가 계산의 경계면으로 설정되고, 이 fringe point 들을 통해 부 격자계의 유동정보가 interpolation(3차원의 경우 trilinear interpolation)을 통해 주 격자계로 입력된다. 대각화 알고리즘에 hole point flag 를 도입하면 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} &T_{\xi}^n(I+i_b h \delta_{\xi} \Lambda_{\xi}+i_b D_{\xi}^{(2)}) \\ &\hat{N}(I+i_b h \delta_{\eta} \Lambda_{\eta}+i_b D_{\eta}^{(2)}) \\ &\hat{P}(I+i_b h \delta_{\zeta} \Lambda_{\zeta}+i_b D_{\zeta}^{(2)}) \\ &(T_{\xi}^{-1})^n \Delta \hat{Q}^n = -i_b \hat{R}^n \end{aligned} \quad (4)$$

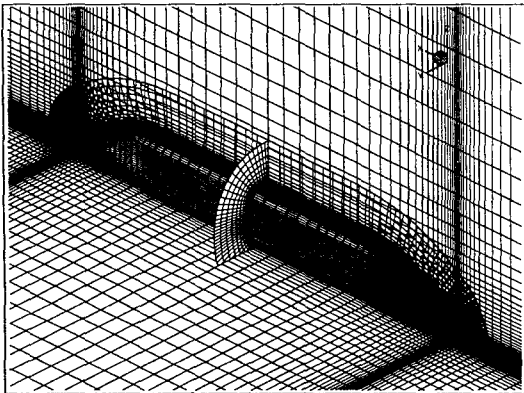


Fig. 3 Isoparametric view of Chimera grid system

해석을 위한 격자생성은 부격자계로 설정되는 열차주위에 대해서는 쌍곡선형(hyperbolic) 격자 생성법[5]을 적용하였으며, 지면과 원방경계를 포함하는 주격자계는 단순 직선격자계로 구성하였다. Fig.3은 생성된 격자계의 열차주위의 확대

도로써 Chimera 격자기법의 적용으로 두 격자 시스템이 서로 독립적으로 생성되어진 것을 볼 수 있으며, 단지 두 격자간에 신뢰성있는 정보 전달을 위해 주 격자계의 경우 전두부 및 후미부 근처로 격자를 밀집시키도록 하였다. 열차의 형상은 전두부와 후미부가 동일한 형상으로 되어 있으며, 열차 주위의 격자는 $111 \times 43 \times 31=147,963$ 개이고, 지면을 포함하는 주격자계는 $101 \times 42 \times 56=237,552$ 개로서 전체 격자수는 385,515개가 되었다. 또한 난류계산을 고려하여 벽면의 첫번째 격자의 크기가 $0.00002H$ 가 되도록 밀집시켰다. 열차와 지면과의 간격은 TGV 도면을 참고하여 대략 $0.1H$ (열차높이의 $1/10$)으로 설정하였다.

4. 결과 및 고찰

계산 조건은 열차의 주행속도를 350km/h라고 가정하여 $M=0.283$ 으로 하였고, 레이놀즈 수는 $1/26$ 축소 풍동시험모델을 대상으로 특성길이를 열차의 높이로 하여 $Re=1.036 \times 10^6$ 로 정하였다. 난류모델은 Baldwin-Lomax의 대수형 모델을 채택하였으며, 열차의 벽면과 지면에 대해 각각 적용하였다. 지면은 모든 계산에 대해 이동지면을 고려하여 지면의 속도를 자유류의 속도로 고정시켰다.

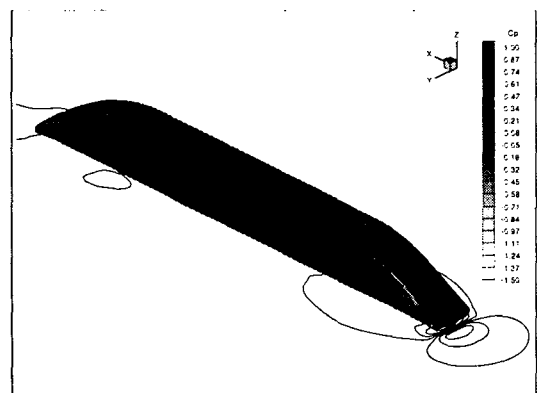


Fig. 4 Pressure distribution on the surface (A-2)

Fig.4는 형상A-2에 대한 해석결과로서 열차

표면 및 지면의 압력계수 분포이다. 전두부 전방에서 흐름의 정체구간이 넓게 형성되어 있으며, 전두부의 모서리를 따라 흐름이 급격히 팽창되어 압력이 낮아 지는 것을 볼 수 있다. 열차의 중앙부분에서는 자유류의 압력에 가깝게 회복하다가 후미부를 만나면서 전두부에서와 유사한 압력패턴을 보이게 된다. 또한 열차의 전두부 영역에서의 압력변화가 지면에 전달되어 진 것을 볼 수 있다.

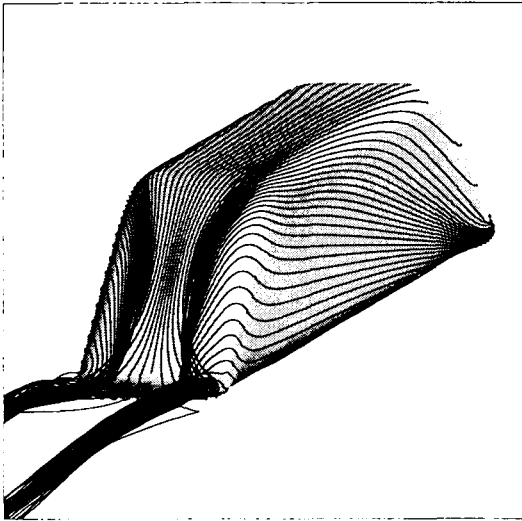


Fig. 5 Streamline of shape A-2

열차표면의 압력변화는 Fig.5의 표면유선과 연관지어 설명될 수 있다. 먼저, 전두부의 모서리 부분에서 윗면에서 타고 내려온 급격히 팽창된 흐름과 아랫면에서 올라온 흐름이 만나면서 흐름의 분리선이 형성된다. 흐름은 전두부를 지나면서 이미 형성되어 진 흐름의 분리선을 유지하면서 차량의 중앙부분을 통과하게 되고, 후미부의 모서리에서 다시 측면에서 윗면쪽으로 거슬러 올라가는 흐름에 의해 보다 강한 흐름의 분리선이 생기게 된다. 후미부에서 보이는 이러한 분리선은 측면에서 거슬러 올라온 흐름의 박리선을 의미하며, 차량의 대칭면 쪽으로 회전하는 와동이 후미부가 시작되는 윗면으로 부터 서서히 발생하여 후방으로 갈수록 확산이 이루어지는 현상을 나타내고 있다. 후미부가 끝나는 부분에서 흐름의 박리가 발생함을 볼 수 있다.

지금까지 언급된 흐름의 패턴은 형상A-2에 국한된 것으로서 Fig.2에서 제시된 9가지의 형상에 따라 흐름의 모양이 달라 질 수 있다. 궁극적으로 이와 같은 형상에 따른 흐름의 변화는 열차에 작용하는 힘의 크기로서 나타나게 되며, Table 1과 2에 9가지의 형상에 대한 항력 및 양력의 값들을 각각 나타 내었다.

Table 1로 부터 항력계수는 대체적으로 길이가

Table 1 C_d of each body shape

Type	A		B		C	
1	0.325		0.165		0.148	
	0.262	0.063	0.092	0.073	0.072	0.076
2	0.226		0.137		0.124	
	0.137	0.089	0.047	0.090	0.033	0.091
3	0.198		0.135		0.124	
	0.093	0.105	0.032	0.103	0.023	0.101
$C_{D\ Total}$						
			C_{Dp}		C_{Dv}	

가 길어짐에 따라, 그리고, 평면모양이 사각단면인 형상A에서 3차원 형상인 형상C로 변화됨에 따라 감소되어지는 경향을 가짐을 볼 수 있다. 길이가 길어짐에 따라 항력이 감소되는 현상은 압력변화가 완만하게 이루어 짐에 의한 박리영역의 감소가 지배적인 역할을 하게 된 결과이다. 물론, 길이가 길어 지면서 표면면적의 증가에 따른 표면마찰항력은 증가되지만 그 변화가 압력항력처럼 크지는 않다. 형상이 A에서 C로 변화되면서 항력이 감소되는 것 역시 압력항력의 감소에 기인한다. 그러나, 여기서, 주의 깊게 보아야 할 것은 B나 C와 같은 3차원 형상의 경우, 2차원 형상인 A의 경우와는 다소 다르게, 길이가 증가한 만큼 항력은 크게 감소되지 않는다는 사실이다. 즉, 3차원 형상의 경우, 박리영역의 감소로 인해 압력항력이 이미 충분하게 감소되어 있는 상태이므로 길이의 증가는 압력항력을 감소시키기는 하지만 그 변화의 폭이 작아지고, 길이의 함수인 마찰항력은 꾸준히 증가하여 전체적인 항력계수는 길이의 변화에 따라 크게 변화하지 않게 된다. 이러한 현상은 2차원 형상인 A에서도 길이가 2에서 3으로 변화될 때 발견되며, 궁극적으로 전두부의 길이가 계속적

으로 증가된다 할지라도 항력은 결코 같은 경향으로 감소되지는 않으며, 오히려 증가되는 결과를 초래 할 수도 있다는 것이다. 따라서, 공기역학적인 관점에서 전두부 길이의 증가는 항력감소에 일정 수준까지만 큰 영향을 미치며, 여타의 공력적인 측면과 연관되어 최적의 길이를 찾아 내는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

Table 2 C_L of each body shape

Type H.L.	A		B		C	
1	0.132		-0.055		-0.080	
	0.124	0.008	-0.059	0.004	-0.081	0.001
2	0.116		-0.032		-0.059	
	0.108	0.008	-0.036	0.004	-0.060	0.001
3	0.086		-0.025		-0.047	
	0.079	0.007	-0.029	0.004	-0.048	0.001
$C_{L, Total}$						
			$C_{L,D}$		$C_{L,v}$	

Table 2는 형상에 따른 양력계수의 변화로서 2차원 형상인 형상A 에서는 양력계수가 전체적으로 양의 값을 가지면서 길이의 증가에 따라 그 값이 점차로 감소되는 경향을 보인다. 반면에 3차원 형상인 B, C의 경우에는 양력계수의 값이 음의 값을 갖게 되어 차랑을 내리 누르려는 힘으로 작용하게 된다. 형상A의 경우, 전두부의 길이가 짧을 수록 양력계수가 커지는 것은 열차의 단면모양이 캠버의 형태를 취하고 있어서 길이가 짧을 수록 캠버가 커지는 효과를 가지기 때문이라고 볼 수 있다. 또한, 형상A가 형상B 및 C에 비해서 양력계수가 월등히 크게 나타나는 것은 형상A의 2차원적인 형상에 기인한다. 양력계수에 관한한, 모든 형상에 대해 길이가 길어 질수록 그 절대치는 감소하는 경향을 보인다.

5. 결론

- (1) 고속전철 전두부의 공기역학적인 형상설계 과정의 일환으로 9가지의 형상을 생성하여 각각에 대해 유동해석을 수행하여 형상변화에 따른 공력특성을 파악하였다.
- (2) Chimera 격자기법을 적용함으로써 격자의

생성이 매우 용이하였으며, 따라서 본 연구와 같은 형상변화를 통한 파라메트릭 연구에 매우 적합하였다.

- (3) 전두부가 길어 질수록, 형상이 콘형에 가까울 수록 항력계수는 감소되는 경향을 보이며, 이러한 변화는 박리영역의 크기와 연관된 압력항력에 의해 지배된다.
- (4) 그러나, 전두부 길이가 계속 증가된다고 할지라도 항력계수는 같은 경향으로 계속적으로 감소되지는 않으며, 오히려 증가하게 된다. 따라서 항력의 관점에서 길이의 증가는 바람직한 설계요소가 될 수 없으며, 최적의 길이를 찾아 내는 작업이 요구된다.
- (5) 형상A와 같은 2차원 형상의 경우에는 양의 양력값을, B, C 와 같은 3차원 형상은 음의 양력값을 갖으며, 양력계수에 관한한, 모든 형상에 대해 길이가 길어 질수록 그 절대치는 감소하는 경향을 보인다.
- (6) 본 연구에서 수행한 수치실험결과에 대해서는 다른 수치적 기법 및 풍동시험을 통해 검증이 이루어 져야 할 것이다.
- (7) 본 연구는 개활지를 주행하는 고속전철 전두부의 형상변화에 따른 항력 및 양력특성의 변화에 국한된 것으로서, 향후, 전두부의 형상에 따라 변화될 수 있는 여타의 공기역학적인 문제들과 연관되어 보다 복합적인 연구가 이루어 져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술처의 국책과제인 “고속전철 시스템의 기계기술과제”의 세부과제인 “차량 기본형상 공력설계 및 해석기술 개발” 과제의 일부로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] Beam, R. and Warming, R. F., "An Implicit Finite-Difference Algorithm for Hyperbolic Systems in Conservation Law Form", Journal of Computational Physics, Vol.22, Sept., 1976, pp. 87-110.

- [2] Steger, J. L., "Implicit Finite Difference Simulation of Flow About Arbitrary Geometries with Application to Airfoils," AIAA Journal, Vol. 16, July 1978, p. 679.
- [3] Pulliam, T. H. and Chaussee, D. S., "A Diagonal Form of an Implicit Approximate -Factorization Alogorithm", Journal of Computational Physics, Vol.39, Feb., 1981, pp. 347-363.
- [4] Steger, J. L., Dougherty, F. C. and Benek, J. A., "A Chimera Grid Scheme", Advances in Grid Generation, ASME FED-5, 59-69, 1983.
- [5] Steger, J. L. and Rizk, Y. M., "Generation of Three Dimensional Body Fitted Coordinates Using Hyperbolic Partial Differential Equations", NASA TM 86753, June, 1985.