

고속전철의 형상에 따른 공력특성 연구

진원재*(홍익대 대학원 기계설계학과), 이봉래(홍익대 기계정보공학과)

A Study about aerodynamic characteristics of High speed train by fore-body shape design

W. J. Jin(Mech. Design. Dept., HIU), K. D. Kim(Mech. Info. Eng. Dept., HIU))

ABSTRACT

The aerodynamic characteristics of high speed train can be improved by fore-body design. In this paper, the design a fore-body shape which has optimal aerodynamic characteristics, 6 models of fore-body shape 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 Navier-Stokes equation. The variational trends of aerodynamic characteristics are studied from the result of flow calculations around high speed trains for 6 fore-body shapes.

Key Words : 고속전철(High Speed Train), 전두부 형상(fore-body shape), 항력(Drag force), 양력(Lift force)

1. 서론

21세기 들어 경제적인 발전과 교통체계의 완비됨과 더불어 교통수단의 에너지 감소, 안전성, 환경문제, 승차감 등이 매우 중요하게 부각되어지고 있고, 이는 현재 우리가 풀어야 할 큰 과제 중 하나이다. 포화 상태인 도로 교통에 비하여 보다 빠르고 안전한 중장거리 교통수단의 필요성에 의해 프랑스, 독일, 일본 등 선진국에서는 이미 고속전철을 개발하여 상업 운행 중에 있다.

현재 우리 나라에서도 낙후된 교통체제를 개선하기 위해 국책사업으로 경부고속전철 건설사업을 추진 중에 있고, 동시에 사업의 일환으로 이전되는 기술을 바탕으로 한 한국형 고속전철기술 개발사업을 추진 중에 있다. 우리나라는 이미 프랑스로부터 고속전철 TGV를 도입하여 시험운행 중에 있는데, 운행속도는 약 300km/h로서, 이는 마하수 0.24에 해당하며, 한국형 고속전철은 350km/h를 목표로 개발이 추진중이다. 이처럼 열차가 고속화됨에 따라 기존의 재래식 열차는 물론이고 60-70년대에 개발된 고속열차에서 간과되었던 여러 가지 공기역학

적인 관점들이 중요하게 대두되었다. 고속전철의 공력 문제는 다른 교통수단과 비교해 보면 육상 교통 수단인 자동차와 비슷하지만 주행속도나 해석시의 압축성 유동을 고려해야 한다는 점에서는 항공기의 공기역학에 가깝다. 고속전철에서 반드시 고려되어야 할 공기역학적인 현상들은 공기저항, 측풍의 영향, 교행 특성, 열차풍, 공력소음 그리고 터널통과 특성 등이 있으며, 이러한 공력 문제는 주행안정성, 에너지 소모, 환경문제, 승차의 쾌적성 등 수송기관으로서의 기본적 성능에 직접적인 영향을 미치므로 공기역학적 형상설계가 꼭 필요하다.

특히 고속전철의 경우 일반적으로 전두부와 후미부의 형상이 동일하며 이 부분이 고속전철 전체의 공력 특성을 지배하는 부분으로 공기역학적인 형상설계가 필요한 가장 대표적인 부분이다. 따라서 전두부의 설계시 후미부로 사용될 경우의 후류의 안정성과 공기저항도 고려해야 한다. 물론, 실제 열차 운행의 경우 그 길이가 매우 길어지므로 전체적인 항력의 많은 부분은 길이의 함수인 표면 마찰 항력이 차지하게 되어 상대적으로 전두부 및

후미부의 형상에 의한 효과가 작아질 수 있다. 그러나 이러한 마찰저항은 열차의 길이에 의존한 고유의 항력으로서 개선이 어려운 반면에 전두부 및 후미부는 공기역학적인 설계를 바탕으로 공력 성능의 향상이 가능한 부분이다. 특히 전두부의 형상은 이러한 기본적인 항력 외에 열차내의 승객에게 영향을 미치는 열차풍, 터널 미기압파, 그리고 두 열차의 교차시에 발생하는 공력문제 등에 대해 중요한 영향을 미칠 수 있으므로 공기역학적인 관점에서 심도있는 연구가 요구되는 부분이다. 아울러 전두부 형상의 미적 또는 styling의 관점에서도 전두부의 형상은 일반 승객에게는 고속전철 그 자체로 인식되는 만큼 전두부의 형상 설계시 산업디자인적인 측면에서의 설계도 고려 되어야 한다.

본 연구에서는 공기역학적으로 최적의 특성을 가진 고속전철 전두부의 형상을 찾기 위해 이 부분을 몇 가지의 경우로 계통적으로 변화시켜 가면서 생성해 수치해석을 통해 속도에 따른 공기저항을 최소화할 수 있는 형상을 찾아내고, 그 형상에 따른 공력특성을 각 시점에서의 압력파의 변화와 와류군의 형성·강화 등을 통해 파악하고자 한다.

2. 지배방정식 및 수치해석

2.1 지배방정식

압축성 유동의 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식으로서 물리량으로 속도를 취함으로서 얻어지며, 운동량에 대한 수송방정식으로서 기술된다.

압축성 Navier-Stokes 방정식은 보존형으로 다음과 같이 나타낸다.

$$U_t + E_x + F_y = \left(\frac{1}{Re}\right)(R_x + S_y) \quad (1)$$

U : 미지변수벡터

E, F : 각각 x, y방향 flux 벡터

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ m \\ n \\ e \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} m \\ m^2/\rho + p \\ mn/\rho \\ m(e+p)/\rho \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} n \\ mn/\rho \\ n^2/\rho + p \\ n(e+p)/\rho \end{bmatrix} \quad (2)$$

ρ : 밀도

$m \equiv \rho u$: x방향운동량

$n \equiv \rho v$: y방향운동량

e : 단위체적당 총 에너지

$$R = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{yx} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{yx} + \frac{\gamma\mu}{Pr} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + \frac{\gamma\mu}{Pr} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

R, S : 확산항

2.2 형상모델링 및 경계조건

고속전철의 전두부 형상은 전체적인 형상을 결정하며, 고속전철 전체의 공력특성을 지배하는 부분으로 공기역학적 설계가 필요한 대표적인 부분이다. 또한 전두부의 형상에 따라 운전석의 장비나 요구형태가 결정된다. 공기역학적인 관점에서 볼 때 유선형을 유지하며, 이 선이 어느 면에 적용되는가에 따라 공력특성이 변할 수 있다. 또한 전두부의 길이 및 모양에 따라라도 공력특성이 변할 수 있다. 이것을 고려하여 6개의 모델을 만들어 연구하였다. 먼저 전두부의 형태를 2가지로 나누고, 2차원의 평면을 고려하여 위에서 볼 때 거의 사각형을 유지하는 쐐기 형이 있을 수 있고, 위에서 본 평면에 대해 모두 유선형을 적용시키는 콘형이 있을 수 있다.

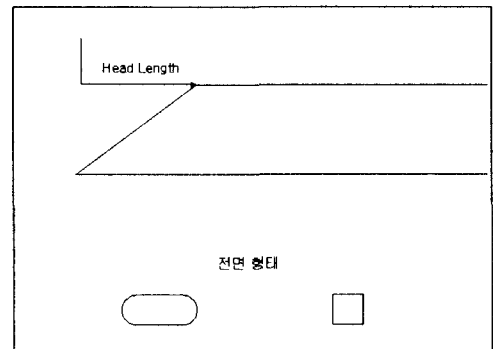


Fig. 1 전두부 형상

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 고속전철을 단순화하여 라운드가 있는 직사각형 형태로 만들었다. 그리고 전면형태는 2가지를 가지고 각각의 경우에 Head Length를 3가지로 길이 변화를 시키며 6개의 모델

을 생성했다. 각각의 모델은 외부에 큰 직사각형 모양의 유동장을 만들고 한쪽면은 Pressure-inlet, 반대쪽 면은 Pressure-outlet으로 결정했다.



Fig. 2 외부유동장에 Mesh 생성

계산조건은 열차의 주행속도를 350km라고 가정하고 $M=0.25$ 로 하였다.

3. 결과 및 고찰

현재 상용운행 중에 있는 고속전철을 살펴보면 시속 300km에 달하고 있고 향후 더욱 고속으로 운행할 계획으로 여러 나라에서 고속전철에 대한 연구가 진행 중에 있다. 이러한 고속으로 운행되는 고속전철의 공력설계의 문제점은 고속화에 따른 공기저항은 속도의 2승, 요구동력은 속도의 3승에 비례하여 증가되고, 공력소음은 속도의 6승에 비례하여 시속 300km로 주행시 최대 소음원이 되며 그 이상의 속도증가에서는 기하급수적으로 증가하는 것으로 알려져 있다. 우리나라는 산악지형이 많아 현재 프랑스에서 거의 개발지를 운행하는 TGV는 상대적으로 터널통과 등의 공력특성 변화에 대한 연구가 미흡하다. 본 연구는 이러한 공력특성에 대한 변화를 파악하는 가장 기본이 되는 것으로서 고속전철의 전두부의 형상설계에 대해 고찰해 보고자 한다. 고속전철의 전두부 형상은 고속전철 전체의 공력특성을 지배하는 부분으로 공기역학적인 설계가 필요한 대표적인 부분이다. 전두부 형상의 우선적인 요구조건으로는 공기저항의 최소화, 주행시의 동적 안정성 유지, 그리고 주행시 수반되는 공력소음의 최소화 등을 들 수 있다. 또한 고속전철의 경우 전두부와 후미부가 동일하므로 전두부 설계시 후미부로 사용될 경우의 후류의 안정성과 공기저항, 내부에 장착되는 장비, 운전 시야의 확보 등에 대한 고려도 필요하다. 그리고 전두부 형상은 일반

승객들에게는 고속전철 그 자체로 인식되는 만큼 전두부 형상의 미적 또는 styling 관점도 중요하게 다루어져야 한다. 전두부의 최적의 형상설계는 이와 같은 모든 사항을 만족해야하나 초기 설계시 가장 중요하게 고려할 것은 저항을 적게 받는 형상의 설계이다. 이는 저저항의 형상설계가 일반적으로 공력안정성, 공력소음, 그리고 styling 등 다른 주요 요구조건을 쉽게 만족시키기 때문이다.

본 연구에서는 전두부 및 후미부 형상이 차량의 공력특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여 6가지로 전두부 형상을 변화시켜 가며 저저항 설계에 관해 연구했다. 전두부의 형상으로써 2종류의 단순형상을 대상으로 했다. 하나는 폭방향으로의 변화가 적은 2차원의 썸기형과 다른 하나는 그 형상의 변화가 큰 3차원의 콘형이다. 그리고 전두부의 앞쪽은 타원형에 가까운 직사각형, 사각형의 2가지와 그에 따른 전두부의 유선형 부분의 길이를 각각 3가지로 변화시켜 9개의 모델을 생성했다. 차량의 기본적인 크기는 우리나라에서 현재 도입해 시험 운행 중인 TGV 고속전철의 크기를 따랐고 전두부의 뒤쪽으로는 모서리에 round 처리를 한 직사각형 모양으로 하였다.

계산 조건은 앞으로 개발하고자 하는 한국형 차세대 고속전철의 목표속도가 350km/h인 점을 감안했고 계산은 지면에 대한 효과는 고려하지 않고 전두부의 선단에서 후미부까지의 압력 분포에 따른 항력의 변화를 비교해 보았다.

주행중에 있는 고속전철 주위의 유선 분포를 보면 유선이 전철의 형상을 따라 잘 나타나고 있음을 볼 수 있다. 전철의 전두부를 넘어서는 유선은 전두부 상부 경계면에서의 형상 변화에 따른 박리 영역의 영향과 전두부 정점의 중심부에서 모서리를 따라서 넘어나가는 형상의 영향에 따른 성분이 복합되어, 전체적으로 중심에서 바깥쪽으로 흘러나가는 흐름이 형성되며, 이 점성 박리유동성분의 영향과 더불어 측면 경계의 형상을 따라 횡단면 방향으로 비틀리는 와류 성분이 존재할 것을 추측할 수 있다. 후미부의 유선을 살펴보면 후미부의 경계의 변곡선을 지나면서 유동은 표면에서 떨어져 나가고 이때 상면 표면 근처에서의 유동은 점성의 영향과 후미부의 정점 근처에서 형성되는 싱크영역의 영향에 따라 다시 안쪽으로 급격히 선회하여 측면과 하면을 빠져나오는 유동과 합류되면서 이 영역에 강한 와류군을 형성할 것을 추측할 수 있다. 압력분

포를 보면 전두부의 모서리를 따라 항력이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 열차의 중앙 부분에서는 자유류의 압력에 가깝게 회복되고, 후미부에서는 전두부와 유사한 모양을 볼 수 있다. 항력의 변화를 살펴보면 항력은 2차원의 썩기형에서 3차원의 콘형으로 변해가며 감소되는 것을 볼 수 있었다. Head Length가 증가하면 그만큼 압력구배가 완만해지고 박리영역이 적어지기 때문이다. 그러나 계속적인 Head Length의 증가에 따라 항력이 같은 경향으로 계속 감소되는 것은 아니다. 공기역학적으로 전두부의 길이는 항력의 감소에 어느 선까지만 영향을 미친다. 양력을 살펴보면 2차원의 썩기형에서는 양의 값이 3차원의 콘형에서는 음의 값을 보이고 있다. 또한 Head Length가 증가함에 따라 그 값이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이처럼 전두부의 길이가 길수록 썩기형보다는 콘형으로 갈수록 공기역학적으로 좋은 디자인이라는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 한없이 앞을 뺏속하게 만든다고 해서 더 좋은 결과를 얻는 것은 아니다. 앞으로 좀더 세분화된 연구를 통해 최적의 값을 찾는 것이 중요할 것이다. 또한 이 연구를 바탕으로 터널통과나 지면효과를 고려한 연구 등도 수행되어야 할 것이다.

4. 결론

고속전철 전두부의 최적의 공기역학적 형상설계를 위해 6 가지의 형상을 생성하여 각각에 대한 유동특성을 통해 형상에 따른 공력특성을 파악하였다.

전두부가 길어질수록, 형상이 콘형에 가까워질수록 항력계수는 감소되는 경향을 보이며, 이러한 변화는 박리영역의 크기와 연관된 압력 항력에 의한 것이다.

전두부의 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 찾는 것이 중요하다.

2차원 형상의 경우에는 양의 양력값을, 3차원 형상은 음의 양력값을 갖으며, 양력계수에 관한 모든 형상에 대해 길이가 길어질수록 그 절대치는 감소하는 경향을 보인다.

본 연구는 개활지에서 주행하고 있는 고속전철의

전두부의 형상변화에 따른 항력 및 양력 특성의 변화에 국한되고, 지면효과를 고려하지 않은 결과로서 여타의 공기역학적인 문제가 함께 고려되어 연관된 연구가 앞으로 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. C.A.J.Fletcher, "Computational Techniques for Fluid Dynamics," Springer-Verlag, 1990.
2. Roger Peyret, Handbook of Computational Fluid Mechanics, Academic Press, 1995.
3. T.J Chang, "Applied Continuum Mechanics," Cambridge University Press, 1996.
4. James E.A.John, William L.Haberman, "Introduction to Fluid Mechanics," Prentice-Hall, 1988.
5. Frank M.White, "Fluid Mechanics," McGraw-Hill, 1994
6. SUMIDA Shunsuke, "High Speed Railways in the world & The Speed Up and MAGLEV system," 1994
7. 장경수, 백남욱, 김기환 공역, "세계의 고속철도," 1999
8. Thomas D.Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics," SAE.