

초고속 자기부상열차의 유동 특성에 관한 수치 연구

Numerical Study of Flow Characteristics of High Speed Maglev Train

이종광*[†], 신광복*, 강승구**, 이은규***, 윤일로***JongKwang Lee*[†], KwangBok Shin*, SeungGu Kang**, EunKyu Lee***, IllRo Yoon***

Abstract In this paper, the Navier-Stokes equation with the equation of the k- ϵ model of turbulence model were solved numerically for 3 dimensional flows around 550 km/h high speed magnetically levitated (Maglev) train. Maglev train travels on a high railroad at high speed unlike normal train. To simplify the situation, we assumed that the train ran in the air. At the velocity 550 km/m, pressure drag was 91 % of the drag and the drag was increased with the proportion for the square of velocity. As a result, the study of aerodynamics analysis for high speed train was considered to be essential.

Keywords : Maglev Train, CFD, Aerodynamics

초 록 본 논문에서는 550 km/h 급 초고속 자기부상열차의 기초 형상을 토대로 주위의 유동을 Navier-Stokes 방정식을 사용하여 예측하고 이를 기반으로 항력과 유동 특성에 대한 연구를 수행하였다. 유동의 마하수가 0.44 임을 고려하여 압축성 모델이 사용되었고, 난류 모델은 k- ϵ 모델을 적용하였다. 자기부상열차는 일반 열차와는 달리 고가 궤도에서 부상하여 고속으로 주행하는데 이 연구에서는 이를 단순화하기 위하여 열차가 공기 중에서 주행하고 있는 것으로 가정하여 공력 특성을 분석하였다. 열차의 주행 속도가 550 km/h 일 때 압력에 의한 항력이 91%였으며, 항력이 열차의 주행 속도의 제곱에 비례하며 증가됨을 확인하였다. 이와 같은 결과를 토대로 열차의 고속 주행 연구에 있어 공력 해석 관련 연구는 필수적인 것으로 판단된다.

주요어 : 자기부상열차, 전산유체역학, 공기역학

1. 서론

계속적인 사회의 발전으로 자동차 수의 급격한 증가와 이로 인한 교통 체증 그리고 차량에서 발생하는 소음 및 배기가스로 인해 이를 대체할 수 있는 친환경 교통 시스템에 대한 관심이 커지고 있다[1-3]. 이를 해결하기 위한 다양한 방법들 중 전자기력을 이용하는 자기부상열차는 도시간 대량 교통 수요를 만족시키며, 전자기력을 이용하므로 소음 및 배기 가스 문제를 유발하지 않는 교통 수단으로 선진국에서는 오래 전부터 많은 연구가 진행되고 있다. 이미 독일의 Transrapid와 일본의 MLX 등의 개발 사례가 있다[4].

† 교신저자: 국립한밭대학교 기계공학과(Jongkwang@hanbat.ac.kr)

* 국립한밭대학교 기계공학과

** 국립한밭대학교 기계설계공학과, 경량구조 및 CAE 실험실

*** (주) 우진산전

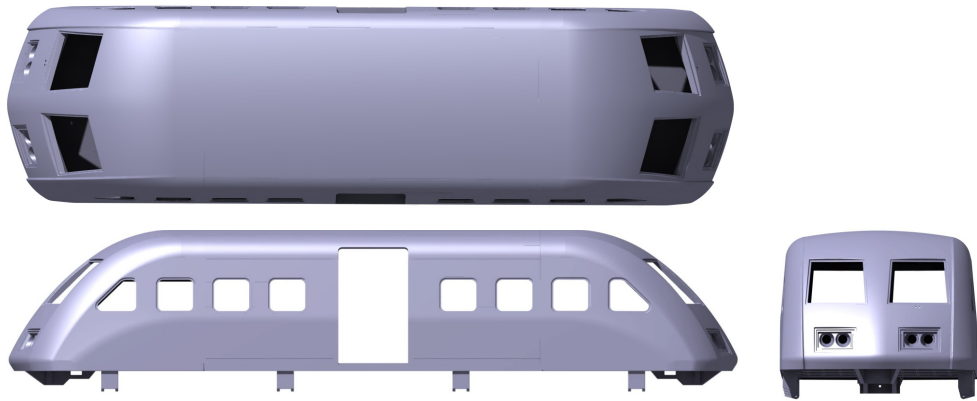


Fig. 1 Test model of high speed Maglev train

자기부상열차는 전자기력으로 고가 궤도로 부상하여 고속으로 주행한다. 저속으로 주행하는 열차의 경우 공기 저항이 크지 않아서 동력 대부분이 기계적 저항에 소모되나 200 km/h 이상의 고속 주행에서는 공기 저항이 차지하는 비율이 80% 이상 수준으로 높아지게 된다[5].

최근 주행 속도 550 km/h인 초고속 자기부상열차의 상용화를 목적으로 국책 과제가 선정되어 개발 중에 있으며, 현재 차체에 대한 기본 설계가 완료되어, 시험 차량을 위해 차체를 제작 중이다. 초고속 자기부상열차의 형상은 Fig. 1과 같다.

이 연구는 초고속 자기부상열차의 공력 해석을 수행한 과정과 결과에 대한 내용으로, 550 km/h에서 열차에 가해지는 항력을 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 이용하여 계산하였다.

2. 해석 모델

2.1 해석 기법

고속 주행하는 열차의 공력 특성을 파악하기 위해서는 열차의 3차원 형상을 정확히 모사하여 수치해석을 수행해야 한다. 이를 위해서는 형상에 맞는 정밀한 격자를 생성하고, 지배방정식을 푸는 과정이 필요하다. 이 연구에서는 CFD 분야에서 많은 검증을 통해 신뢰성을 인정받고 있는 상용 전산유체 프로그램인 Ansys Fluent 12.0.1을 사용하여 유동을 계산하고 해석하였다.

최고 운전 속도 550 km/h로 주행하는 차량의 마하(Mach) 수는 0.44이므로 압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 난류 모델은 k-ε 모델을 사용하였으며, 벽면에서의 조건은 wall functions를 사용하였다.

자기 부상 열차는 일반 열차와는 달리 고가궤도 위를 부상하여 고속으로 주행하기 때문에 그 해석 방법 (경계조건)을 지상 위를 달리는 일반 열차와는 다르게 해야 한다. 고가궤도면은 평판이 주기적으로 놓여 있는 경우로서 벽면효과와 자유유동 효과가 주기적으로 이뤄진다. 이 연구에서는 고가궤도면의 벽면 효과를 무시하여 열차가 항공기처럼 공기 중을 달린다고 가정하고 유동장 및 공력학적 특성을 해석하였다[3].

2.2 격자 생성

Fig. 2는 해석을 위해 단순화된 자기부상열차 모델이다. 유동 방향으로 길이가 12.95 m, 높이 방향으로 4.1 m, 측면 방향으로 3.5 m이다. 유동 해석을 위하여 유동장의 변화가 경계 조건에 영향을 주지 않게 하기 위하여 차량 길이 방향 약 100 m, 높이 방향으로 약 22 m, 측면 방향으로 약 18 m의 계산영역을 설정하였다. 복잡한 형상에 격자를 생성하기 위하여 T-grid를 이용하여 격자를 생성하여 약 5,100,00개의 요소 격자를 생성하였다. Fig. 3은 생성된 격자의 모습이다.

2.3 경계 조건

이 연구에서는 계산 영역의 경계에는 far field 경계 조건을 주었으며, 외부 유동의 inlet에는 velocity inlet 조건을 주었다. 유동이 계산 영역을 나가는 영역에는 pressure outlet 조건을 주었으며, 차량의 차체 표면은 점착 조건 (no-slip condition)을 가지는 벽으로 처리하였다. 차량 속도는 100 km/h, 200 km/h, 300 km/h, 400km/h, 500 km/h, 550 km/h 인 조건에 대하여 각각 계산을 수행하였다.

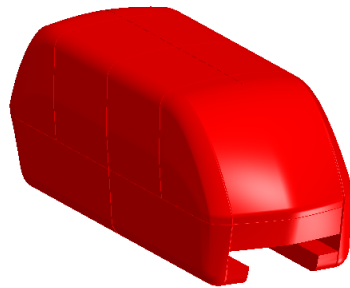


Fig. 2 Simplified model for CFD analysis

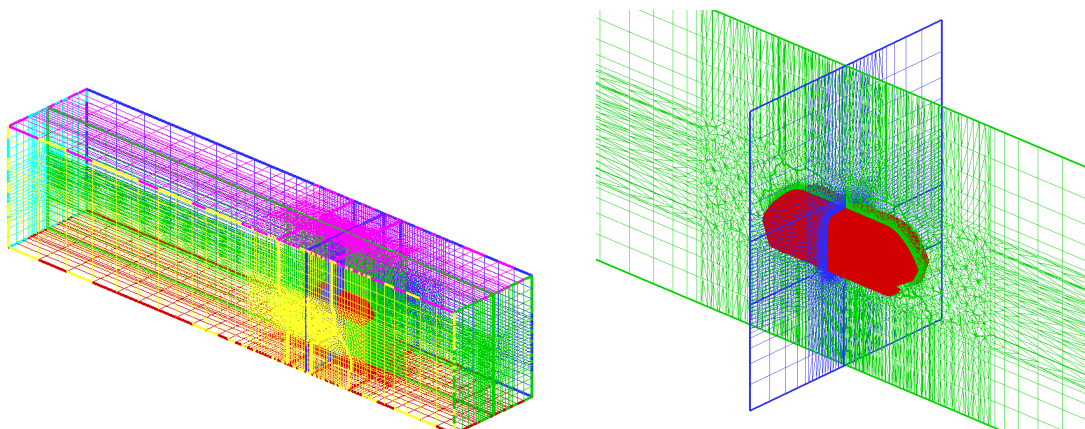


Fig. 3 Grid for Maglev train

3. 해석 결과

Fig. 4 ~ 7은 열차의 압력장, 속도장, 압력 계수에 대한 결과이다. 압력에 유동 특성은 Yang 등[6]의 결과와 같이 선두부의 선단 근처에서 정체압력이 발생하고 있으며, 상류로부터 흘러 들어온 공기는 선단 부근을 지나 곡면의 열차 주위를 흐를 때, 유선이 구부러지기 때문에 정체점의 압력에너지가 속도에너지로 변환된다. 따라서 급격한 압력강하가 발생하여 순압력 구배가 형성된다. 이러한 압력 강하로 인하여 압력은 대기압보다 낮은 값을 가지게 되며 유동 방향 곡률이 변하는 지점에서 최소 압력이 형성된다. 압력이 최소가 되는 지점을 지나면서 속도 에너지는 다시 압력 에너지로 변화되어 압력이 점차 상승하나 점성으로 인한 마찰 손실 때문에 자유 유동 상태의 압력으로 완전히 회복하지 못하고 있다.

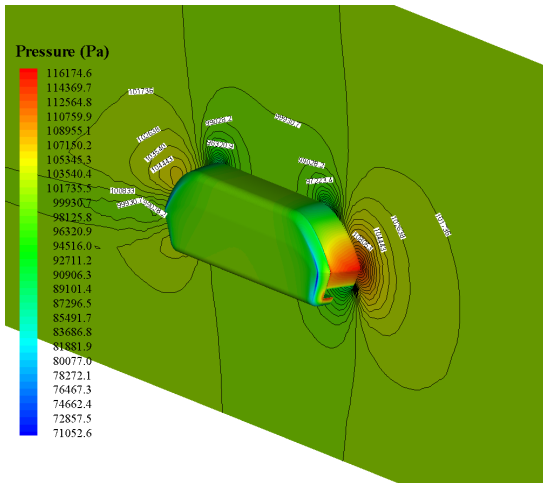


Fig. 4 Pressure contour at 550 km/h

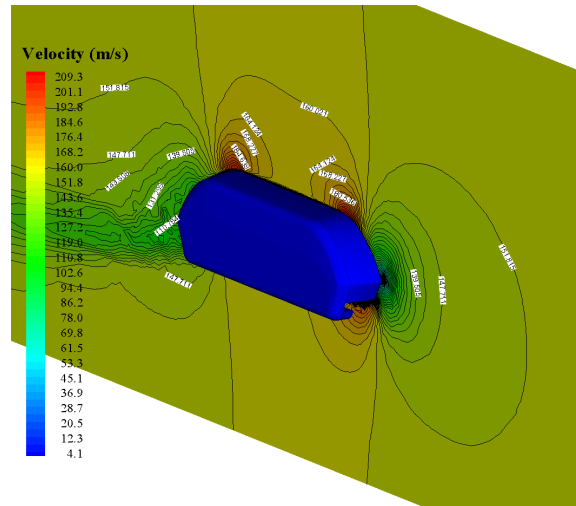


Fig. 5 Velocity contour at 550 km/h

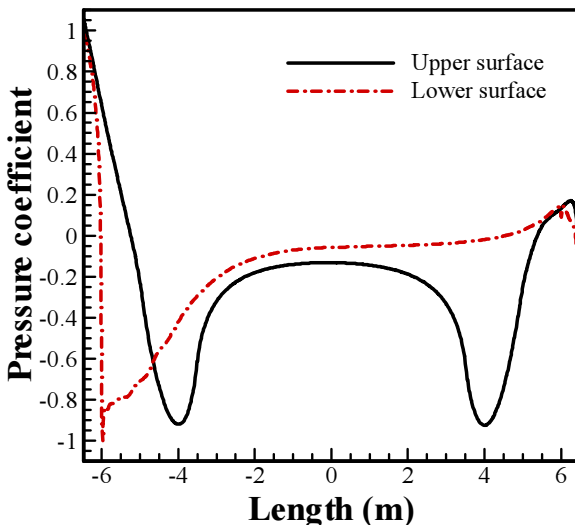


Fig. 6 Pressure coefficient 550 km/h

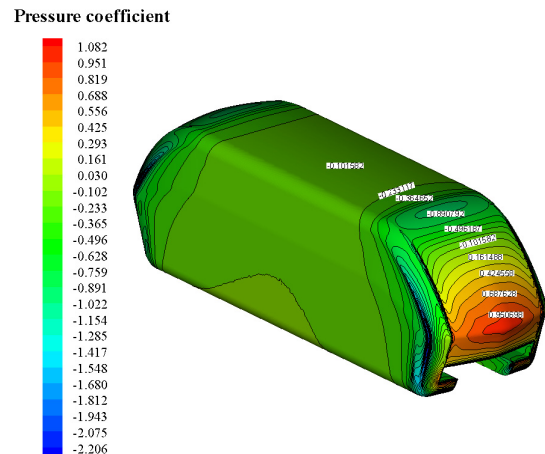


Fig. 7 Pressure coefficient contour at 550 km/h

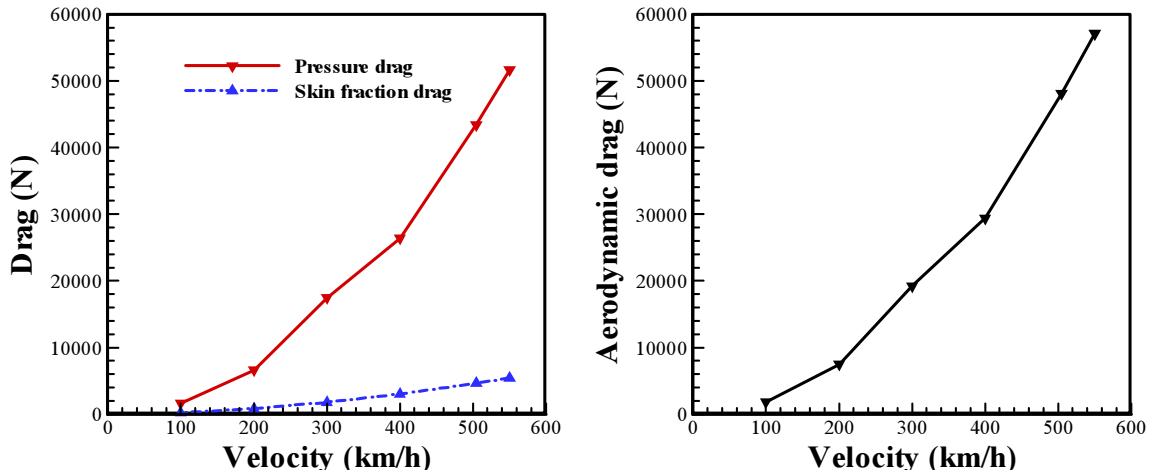


Fig. 8 Aerodynamic drag as a function of velocity

따라서 열차 표면의 중심부 전 영역에서 비교적 큰 부압이 분포하고 있다. 열차 후미부에서는 다시 선두부에서와 같이 곡률의 영향으로 압력 분포가 선두부와 유사한 경향을 가지나, 선두부에서와 같은 정도의 압력 강하 및 상승은 발생하지 않고 있다. 이는 공기 유동 시 점성 손실 및 후미부에서의 발산 흐름으로 인하여 속도 에너지가 압력 에너지로 변환이 작기 때문이다. 속도가 다른 경우에는 크기의 차이는 있으나 550 km/h와 유사한 유동장을 가지고 있었다.

유동의 속도장은 상류에서 흘러 들어온 공기는 물체의 영향으로 감속된 후 선단 주위를 지나면서 서서히 감속되어 평판에서와 유사한 난류 경계층 유동으로 발달되고 있음을 알 수 있다. 후미부에서는 다시 유동방향 곡률의 영향으로 발산흐름이 되어 유동이 감속되며 후류가 형성되고 있었다.

마지막으로 항력에 대한 결과는 Fig. 8과 같다. 열차가 550 km/h로 주행하고 있을 경우는 압력에 의한 항력이 91 %, 점성에 의한 항력이 9%로 계산되어 압력에 의한 항력이 지배적임을 확인할 수 있었으며 그 때의 항력은 51,657 N으로 계산되었다.

3. 결론

이 연구에서는 초고속 자기부상열차의 기초 연구로 열차가 550 km/h의 속도로 주행하는 경우에 대한 유동 특성을 분석하였으며 아래와 같은 결론은 얻을 수 있었다.

- (1) 자기부상열차에서 유동은 선두부에서 정체점을 가진 후, 유선을 따라 가속되나 유체의 빠른 속도로 인하여 길이의 70% 지점에서 박리 현상하며 큰 압력 항력을 초래하였다.
- (2) 속도가 100 km/h에서 550 km/h로 증가 시 속도 증가는 5.5배 였으나 항력의 증가는 31 배로 열차가 고속으로 주행할수록 항력의 영향성이 매우 급증하는 것을 확인할 수 있으며, 항력의 증가는 속도 제곱에 비례함을 확인하였다.
- (3) 초고속 자기부상열차는 기존 열차에 비해 측풍의 영향성과 레일 영역에서의 박리 및

와류의 영향성이 매우 클 것으로 예측되며, 초고속 자기부상열차를 위해 이에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] J.S.Bang, J.W.Han, and J.M.Lee (2011) Light-Weight Design of Maglev Car-Body Frame Using Response Surface Approximation, *The Korea Society for Precision*, 28(11), pp. 1297-1308.
- [2] H.W.Lee, K.C.Kim, and J. Lee (2006) Review of Maglev Train Technologies, *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(7), pp.1917-1925
- [3] J.S.Maeng, and S.Y. Yang (1993) Numerical Analysis of Aerodynamic Characteristic of the Magetically Levitated Train Configuration, *The Korea Society for Aeronautical and Space Sciences*, 12, pp. 107-122.
- [4] J.M.Lee, Y.Bae, and C.H.Kim (2012) Design of Vehicle and Guideway of a Small-scale Superspeed Maglev Train, *The Korean Society for Railway*, pp.1260-1265.
- [5] J.Cho, M.Kwak, S.Yun, Y.Lee, S,Choi, K.Kim, and D. Lee, (2012) Numerical Study of Flow Characteristics around Roof Cover of Korean High-speed Train, *Proceedings of the spring conference of The Korean Society for Railway*, pp.1266-1271.
- [6] S.Y.Yang, and J.S.Maeng (1993) Numerical Analysis of Three-dimensional Turbulent Flow Arround Magnetically Levitated Train Configuration, *Proceedings of the Korea Society of Mechanical Engineers*, pp.38-42.