

EDISON_CFD를 이용한 고속열차의 운용환경에 따른 2차원 전산유동해석

Two-dimensional numerical simulation of flow around a High Speed Train using
EDISON_CFD

임새별^{1*}, 조영희¹, 장경식¹
한서대학교 항공기계학과¹

초 록

고속열차의 운행속도가 증가함에 따라 이전보다 공기역학적인 요소들의 중요성이 커지고 있다. 열차와 터널의 형상설계뿐만 아니라 주변 환경을 위해 고속 주행하는 열차 주변의 유동장을 이해할 필요성이 있다. 본 연구에서는 고속 주행으로 인해 열차 주변에 발생하는 열차풍을 분석하여 선로 주변에 작용하는 풍하중을 계산하였고, 터널 주행 시 발생하는 압력변동과 객차 연결부의 비정상 열린 공동 유동을 살펴보았다. 그 결과 2차원 해석의 정량적 한계점이 나타났지만, 정성적인 경향은 선행연구와 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 따라서 고속열차 주변의 공기역학적 특성의 이해와 열차 및 터널의 형상 변화에 따른 상대적인 비교를 위해서는 EDISON_CFD를 이용한 2차원 해석이 유용함을 볼 수 있었다.

Key Words : 고속열차(High Speed Train), 열차풍(Train draft), 철도 터널(Railway tunnel), 열린 공동 유동(Open cavity flow), 차량연결부(Gangway), 전산유체역학(CFD)

1. 서 론

고속열차란 주요 구간에서 시속 200km/h 이상 속도로 주행하는 열차로 정의되며 현재 여러 국가에서 이에 대한 관심이 높아지면서 더 빠른 열차 개발에 주력하고 있다. 우리나라의 KTX는 2004년 300km/h로 운행을 시작했으며, 현재 개발 중인 ‘해무’는 420km/h까지 주행을 성공했다. 열차의 고속화로 인해 이전보다 공기역학적인 현상들이 중요시 되고 있으며 많은 연구가 진행되고 있다. 고속열차는 형상이 매우 길기 때문에 실제 크기로 풍동시험을 하기는 어려움이 있어서 전산유체역학(CFD) 기법이 많이 사용된다. 이러한 열차 주변의 유동은 3차원적인 성격이 강하므로 2차원적으로 접근하기에는 정량적으로 분명한 한계점이 있지만, 많은 선행연구들이 계산 자원과 시간을 절약하기 위해 축대칭 조건을 적용하거나 형상변화에 따른 공력 특성 값 비교를 위해 2차원 형상에 대하여 수행되었다. 따라서 본 연구에서도 열차풍, 터널주행, 차량연결부를 주제로 고속열차에 대한 2차원 전산해석을 EDISON_CFD를 이용하여 수행하여 다양한 공기역학적 현상을 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 열차풍

2.1.1 배경

열차풍이란, 고속열차가 주행하면서 발생하는 압력장의 변화가 선로 주변의 구조물이나 사람에게 끼치는 영향을 말한다. 열차가 고속으로 주행할 때, 전두부 주위의 급격한 압력장 변화와 열차 벽면의 경계층, 그리고 후류에 의한 높은 유동속도에 의해 선로 주변에 비정상 충격 풍하중이 발생하게 되면, 이 중 가장 지배

적인 요소가 전두부와 후미부의 단면적 변화로 인한 속도와 압력변화이다. 특히, 우리나라에서는 많은 역에서 고속열차가 무정차 통과하여 역사 내에서의 열차풍 문제에 대한 연구가 일찍이 시작되었다. 조두신 등⁽¹⁾은 천안역사에 대해 KTX의 격벽 높이에 따른 풍하중 변화를 수치해석을 통해 계산하였고 김재복 등⁽²⁾은 KTX의 고속 영역에서 열차 풍압을 측정하여 단독/교행 주행 시 풍압의 비를 예측하는 연구를 수행하였다. 또한 김용환 등⁽³⁾은 풍동시험을 통해 선로 주변의 벽 구조물과 열차의 상호 작용하는 공력 특성에 대해 연구하였다. 본 연구에서는 역사통과 속도부터 현재 개발속도까지 다양한 속도영역에 걸쳐 개활지에서 주행하는 고속열차 주변에 작용하는 공력특성을 연구하고 열차풍으로부터 안전한 거리를 계산하였다.

2.1.2 전산해석

계산에 사용된 형상은 KTX의 평면도를 바탕으로 eMEGA에서 모델링하였다. 열차 폭에 대한 전두부의 길이 비를 0.6으로 선정하였다. 열차 길이는 실제 KTX의 길이인 388m를 열차 폭(3m)을 기준으로 무차원화하였고 수평, 수직으로 열차길이의 10배의 계산영역을 설정하였다.

격자는 H타입의 정렬격자를, 열차 주변은 O타입의 격자를 따로 생성하였다. 격자테스트를 통해 선정된 격자를 그림 1에 나타냈으며, 벽면 첫 번째 간격은 2×10^{-3} 로, 총 격자수는 약 5.3×10^4 개로 하였다.

경계조건은 계산의 효율성을 높이기 위하여 형상을 중심축을 기준으로 절단하여 symmetric condition을 적용하였다. 열차 벽면은 viscous adiabatic wall로, 유동의 입/출구는 subsonic inlet/outlet으로 설정하였다. 유동조건에서 속도는 180, 300, 350, 400, 450km/h를 열차폭을 기준으로 구한 레이놀즈 수로 입력하였다. 해석자는 2D_Comp-2.0_P를 사용하였으며 CFL수는 0.8로 설정하였다.

풍하중 계산 시, 시간에 따른 압력의 변동을 관찰하기 위해 많은 선행연구에서 이동격자법을 사용하여 비정상적으로 해석하였지만, 해석자의 가능범위 안에서 연구를 진행하기 위해 열차를 고정시킨 후 정상상태로 해석하였다. 그 후 압력분포를 측정된 다음, 거리를 시간 축으로 변환하여 비정상적인 압력 변동으로 나타내는 방법을 사용하였다. 계산횟수는 80,000번으로 설정하였으며 밀도 항의 오차가 10^{-4} 이하로 떨어지며 완전히 수렴하는 것을 확인하였다.

2.1.3 해석 결과

열차풍의 영향은 열차로부터 떨어질수록 감소한다는 것을 쉽게 예상할 수 있다. 따라서 각 속도별로 수행된 계산 결과에서 선로 중심으로부터 2~9m까지 1m 간격으로 압력을 측정하여 압력계수로 무차원화하였

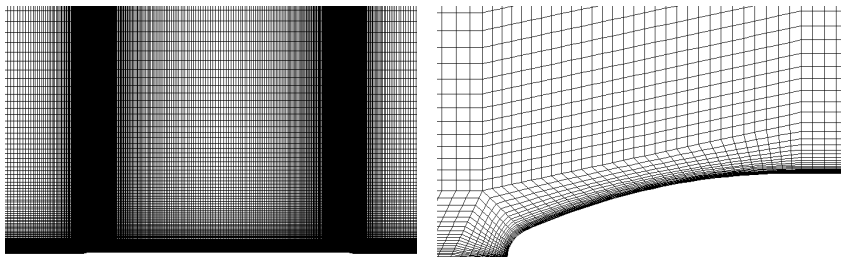


Fig. 1. 열차풍 해석에 사용된 격자

다. 그 결과 전두부와 후미부에서 거의 비슷한 압력변동이 나타났다. 따라서 전두부 근처 압력변동만을 조두신 등의 연구⁽²⁾와 비교하여 그림 2에 나타내었으며, 거리 축을 열차의 주행속도로 나누어서 시간 축으로 변환하였다. 결과를 보면 정량적으로 큰 차이를 보였는데 실제로는 최대한의 공기가 측면 대신 위쪽으로 밀려나가도록 전두부 형상을 설계함으로써 열차 측면의 압력 변화를 줄이는 반면, 2차원 해석에서는 전두부에 부딪히는 공기를 모두 측면으로 보낸다고 가정하기 때문인 것으로 판단된다. 그 값의 차이는 피크점에서 약 2.7배로 계산되었으며 김재복 등⁽³⁾이 측정한 실험데이터와 비교해본 결과 선로 중심으로부터 떨어진 거리에 따라 2.5~3.5배 정도 크게 예측되었다.

압력변동에 따른 하중은 식 1과 같이 실험적으로 검증된 Steinheuer의 이론에 따라 계산할 수 있다⁽²⁾.

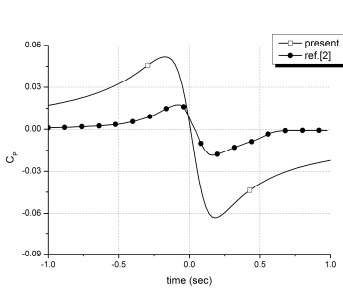


Fig. 2. 참고문헌 4와 2차원 해석에서의 C_p 분포 비교

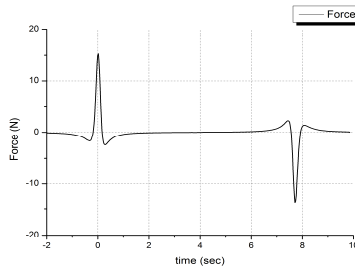


Fig. 3. 열차로부터 7.9m 떨어진 지점의 풍하중 (열차 속도 180km/h)

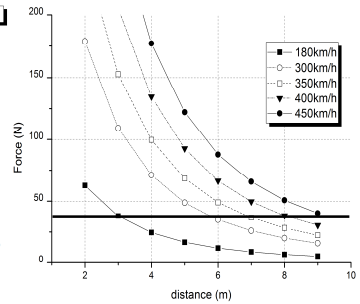


Fig. 4. 선로 중심으로부터 떨어진 거리와 속도별 풍하중 분포

$$\frac{F}{q_{\infty}} = -2\pi \frac{a^3}{U_{\infty}} \frac{\partial C_p}{\partial t} \quad (\text{식 1})$$

여기서 q_{∞} 는 열차속도에 의한 동압을 나타내며 a 는 사람을 원기둥으로 가정할 때의 직경을 나타내며 0.5m로 간주하고 테일러 급수를 이용하여 $\frac{\partial C_p}{\partial t}$ 를 구한 다음 풍하중을 계산하여 그림 3에 나타내었다.

그림 3을 보면 전두부에서 열차의 반발력이, 후미부에서는 흡인력이 작용하는 것을 확인할 수 있다. 전두부에 작용하는 풍하중을 선로 중심으로부터의 거리와 열차 속도에 따라 계산하여 그림 4에 나타내었다. 이를 보면 선로 중심으로부터 떨어질수록, 열차속도가 작을수록 풍하중이 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 주행하는 고속열차에 관한 안전규칙의 예로 프랑스 국철에서는 일반 승객의 경우 열차로부터 3.5m 떨어져야 하며 35N 이하의 힘을 받아야 안전한 것으로 간주하고 있다.⁽²⁾ 이 규정을 토대로 그림 4의 결과를 분석한 결과, 180km/h에서는 규정에 따라 선로 중심으로부터 5m 떨어진 곳은 안전한 것을 알 수 있다. 하지만 개활지에서의 고속영역에서는 300km/h로 주행할 때, 선로로부터 최소 6m 이상 떨어져야 안전하며 350, 400, 450km/h의 속도에서는 각각 7, 8, 9.5m 이상 떨어져야 안전한 것으로 확인되었다.

2.2 터널통과

2.2.1 배경이론

고속열차 차량의 터널에 진입 시, 터널 내에 공기를 압축하여 압축파가 생성되며, 생성된 압축파는 음속으로 터널 내를 진행하다가 후미부에서 반복적으로 반사되면서 열차 주위의 압력을 급격히 변동시키게 된다. 이 압축파를 진입압축파라고 하며, 그 크기는 터널 내 압력변동의 크기를 결정한다. 열차 주위의 압력변동으로 인하여 객실 내의 압력도 변화하게 되는데, 이로 인해 객실 내의 승객은 청각적 불쾌감을 느낄 수 있다. 터널을 통과하면서 발생하는 공력 문제에 관한 연구가 국내외로 활발히 진행되어온 가운데 신대용 등⁽⁴⁾은 2차원 축대칭, 3차원으로 해석하여 비교한 결과, 단순한 터널 내 고속열차의 압력파의 형태를 위한 해석이라면 계산에 시간과 자원이 많이 소요되는 3차원 해석보다 2차원 축대칭 조건으로도 합리적인 해석 결과를 얻을 수 있다고 밝혔다. 따라서 EDISON_CFD로 2차원 해석을 수행하였다.

2.2.2 전산해석

열차의 전두부 형상은 미사일과 같은 축대칭 형상의 초고속 비행체의 선두부에 많이 사용되는 식 (2)와 그림 5와 같은 Tangent Ogive 형상을 이용하였다. 전두부 길이는 10m, 전체열차길이는 100m, 터널의 길이는 2000m이며, 열차와 터널의 직경은 각각 0.5m와 1m이다. e-MEGA에서는 이 치수를 열차의 직경(3m)로 무차원화 하여 형상을 생성하였다.

$$\rho = \frac{R^2 + L^2}{2R} \quad y = \sqrt{\rho^2 - (L-x)^2} + R - \rho \quad (\text{식 2})$$

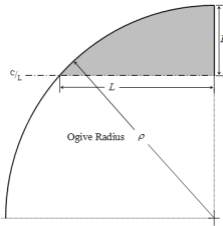


Fig. 5. Tangent Ogive

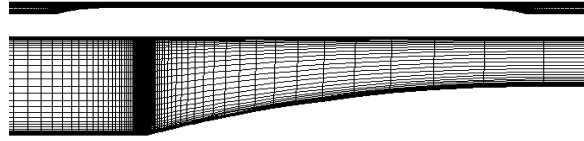


Fig. 6. 터널주행 해석의 격자

식 (3)은 Tangent Ogive 형상의 곡률반경과 원을 구하는 식이며, L은 선두부 길이, R은 열차반경, ρ 는 곡률반경을 나타낸다. 신대용 등⁽⁴⁾의 연구에서는 열차의 중심을 기준으로 축대칭(axisymmetric) 조건으로 해석하였으나, EDISON_CFD의 환경에 따라 symmetric condition으로 설정하였다. 격자는 eMEGA를 이용하여 H타입과 다중블록으로 생성하였다. 열차풍 해석과 마찬가지로 격자테스트를 통해 선정된 격자를 그림 6에 나타냈으며, 벽면에서 첫 번째 간격은 2.0×10^{-5} 로 선정하였고 총 격자수는 약 1.8×10^4 개다. 경계 조건은 터널입구/출구는 subsonic inlet/outlet, 열차와 터널벽면은 viscous adiabatic wall로 설정하였다. 유동조건을 표2에 나타내었으며, 계산횟수를 80,000번으로 하여 밀도 항의 오차가 10^{-4} 이하로 떨어지며 완전히 수렴하는 것을 확인하였다.

Table 2. 터널 주행 해석의 유동조건

유동조건	값
Mach Number	0.245
Reynolds Number	1.7×10^7
Turbulent model	RANS $k-\omega$ SST
Steadiness	Steady flow
Solver	2D_Comp-2.1_P

2.2.3 해석결과

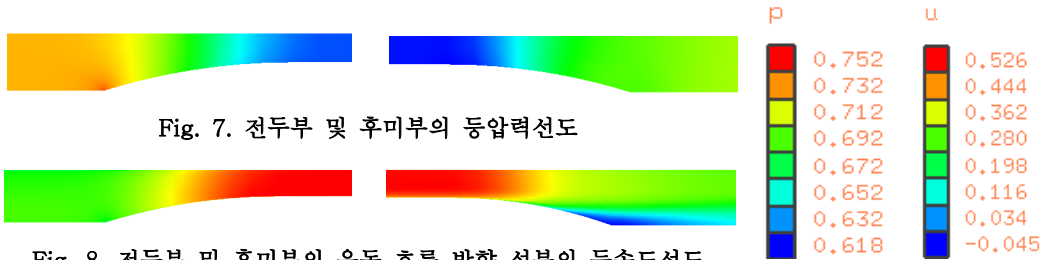


Fig. 7. 전두부 및 후미부의 등압력선도

Fig. 8. 전두부 및 후미부의 유동 흐름 방향 성분의 등속도선도

그림 7,8은 터널 내에 완전 진입한 열차의 압력, 속도 분포이다. 열차 표면의 압력장을 보면, 전두부에서 급격히 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 피스톤 효과에 의해 열차 앞쪽의 공기가 압축되어 열차보다 앞서 음속으로 전파하기 때문이다. 후미부에서는 압력이 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 이는 속도장에서 보는 바와 같이 유동이 박리하기 때문으로 볼 수 있다. 그림 9, 10은 권혁빈 등의 연구결과⁽⁶⁾와 계산결과를 벽면을 따라 압력을 측정하여 차원화한 그래프이다. 정성적으로는 꽤 일치하는 경향을 보이지만, 정량적으로는 큰 차이를 볼 수 있다. 이는 참고문헌과 본 연구의 경계조건 등이 다르기 때문으로 보인다. 또한 높은 압력이 터널 출구까지 유지되는 것을 볼 수 있는데, 터널 밖은 대기압으로 0기압인 것을 감안하면, 터널 출구와 터널 외부 사이에 급격한 압력변화가 발생할 것으로 예상된다. 이러한 현상으로 열차가 터널 내 주행 시 터널 밖으로 순간과동이 방사되어 승객에게나 주변 환경에 문제가 되며, 심할 시 열차 탈선으로도 이어지는데 이 현상을 터널 미기압파라고 한다.

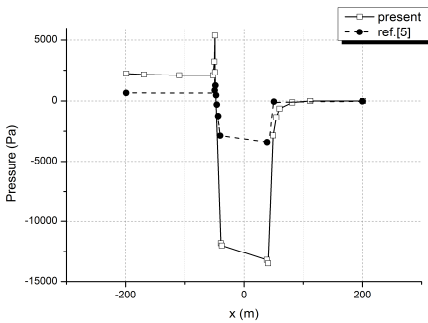


Fig. 9. 열차 벽면을 따라 측정된 압력 (300km/h)

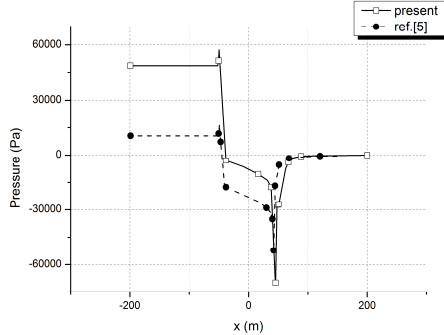


Fig. 10. 열차 벽면을 따라 측정된 압력 (700km/h)

2.3 객차 사이의 열린 공동 유동

2.3.1 배경

고속열차의 선로는 곡선과 높이 구배가 최소가 되는 것이 이상적이지만, 실제로 곡선 구간을 피하기란 불가능하다. 따라서 선로의 곡률에 맞게 열차를 몇 개의 객차로 나누는데, 이 연결부에서는 열린 공동(cavity) 유동이 형성되어 고속열차의 주 소음원이 된다. 이를 해결하기 위해 많은 노력이 수행되고 있는데 그 중 가장 대표적인 것이 머드플랩의 형상을 조정하는 것이다. 예를 들어, 일본의 신칸센의 경우 FASTECH 360의 차량 연결부의 머드플랩을 완벽한 밀폐형으로 하여 최대한 연속성 있는 유선형으로 설계하고 있다⁽⁶⁾. 우리나라의 KTX도 소음으로 인한 문제가 커지자, 2005년 3월 머드 플랩의 폭을 180mm로 확대 조정하였다. 본 연구에서는 객차 연결부에 머드 플랩이 있는 것을 모사하여 2차원 해석하여 열린 공동 유동특성을 관찰하였다.

2.3.2 전산해석

해석에 사용된 형상 및 격자를 그림 11에 나타내었으며, 너비 대 깊이 비, W/D 가 대략 0.71이다. 벽면에서의 첫 번째 간격은 0.0005로 설정하였으며 총 격자수는 25,103개이다. 경계조건은 벽면을 viscous adiabatic wall, 전/후방을 farfield로 설정하였다. 해석자는 2D_Comp-2.0_P를 사용하였으며 유동조건으로는 마하수를 0.245, CFL수를 0.5로, 이산화 기법으로는 AUSM+ 로, 제한자는 van Leer로 선택하였다. 레이놀즈수를 속도영역에 따라 계산한 결과, 5.7×10^6 를 해야하지만, 해석결과가 초기에는 유동의 진동형상이 발생하다가 시간이 지나면서 정상상태로 수렴해버렸다. 때문에 더욱 많은 격자 수를 필요로 하였지만, 계산 시간이 너무 오래 걸려 레이놀즈수를 5.7×10^4 으로 낮추어 해석하였다.

2.3.3 해석 결과

그림 11에서 ★지점의 압력을 시간에 따라 그래프로 그림 12에 나타내었다. 압력의 변동은 두 주파수 성분을 띄었으며 작은 주파수의 파동에 따라 (a)~(d)까지의 등압력선을 그림 13에 도시하였다. 이를 보면 좌측 머드플랩으로부터 vortex가 떨어져나가 우측 머드플랩에 부딪히며, 차량 연결부내에서는 주기적으로 압력

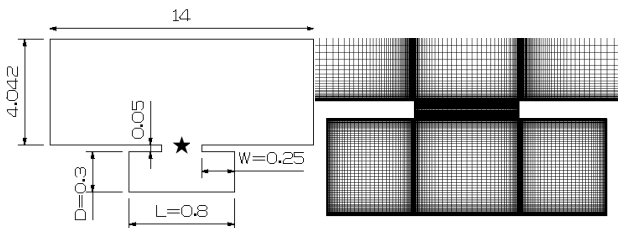


Fig. 11. 객차 연결부 해석의 형상과 격자

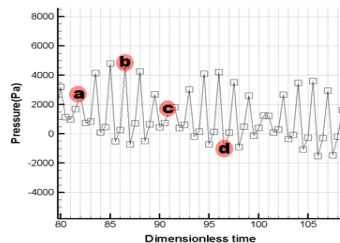


Fig. 12. 시간에 따른 압력 변동

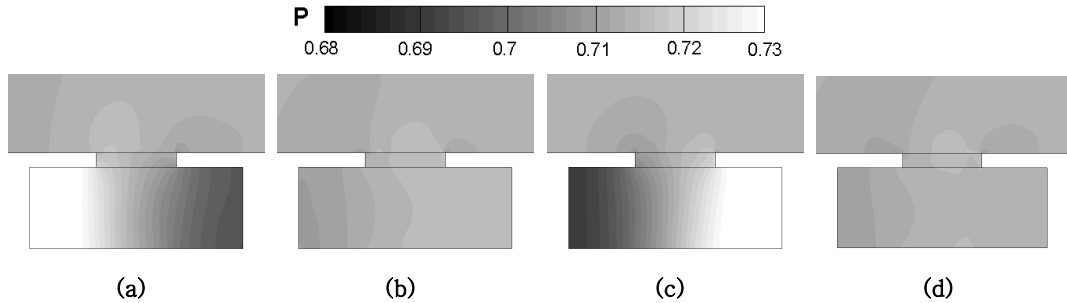


Fig. 13. 시간간격에 따른 압력파동의 한 주기 동안의 등압력선 (300km/h)

이 변동한다는 것을 확인할 수 있다. 큰 주파수 성분의 파동의 파장은 무차원수로 세 점이었으며, 한 주기 동안 더욱 많은 점을 확인하고 싶었으나 저장할 수 있는 최소시간간격이 10으로 제한이 되어있어 충분하지 못하였다. 무차원수를 이용하여 큰 주파수 성분의 무차원 Strouhal 수는 0.53으로 확인되었다.

3. 결 론

본 연구에서는 EDISON_CFD를 이용하여 고속열차의 다양한 운용환경에 따라 2차원 유동 해석을 수행하였다. 개활지나 승강장에서 주행하는 열차 주변에 발생하는 열차풍은 열차방향에 따른 압력분포의 영향을 받으며, 정상유동의 해를 시간에 따른 압력변동으로 변환하여 구할 수 있었다. 열차가 터널을 통과할 때에는 전두부로부터 터널 출구까지 압축과가 전파되면서 높은 압력이 유지되어 터널 출구에 미기압과가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 객차 연결부에서는 비정상 해석을 수행함으로써 머드플랩과 함께 열린 공동 유동이 형성되어 압력이 일정한 주파수를 가지면서 진동하는 것을 볼 수 있었으며 이는 고속열차의 소음 중 상당 부분을 차지할 것으로 판단된다. 2차원 해석을 수행함에 따라 선행연구의 3차원 해석 및 실험치와 비교하였을 때, 정량적으로 한계점이 나타났지만 정성적으로는 꽤 일치함이 확인되었다. 따라서 고속열차의 여러 환경에 대한 공기역학적 특성을 관찰하거나, 열차 및 터널 형상 변화에 따른 상대적인 비교를 위해서는 EDISON_CFD를 이용한 2차원 해석이 유용할 것으로 사료된다. 아울러 EDISON_CFD에 축대칭 및 이동격자 방식이 도입되어 심화된 연구를 할 것을 기대한다.

참고문헌

- (1) 조두신, 허남건, 김사량, 2001, “한국고속전철(KTX)이 역사를 통과할 때 격벽의 높이에 따른 풍하중 변화에 대한 수치해석 연구,” 한국전산유체공학회지 제6권 제1호 pp.56~62.
- (2) 김재복, 남성원, 고태환, 2007, “고속열차 350km/h 주행시 열차풍이 방음벽 등 궤도에 수직평행한 선로 변 구조물에 미치는 영향에 관한 연구,” 한국철도학회 학술발표대회논문집, pp.525~540.
- (3) 김용환, 전중환, 허남건, 1995, “고속전철과 벽 구조물 상호작용에 관한 연구,” 대한기계학회 ‘95년도 추계학술대회논문집(II) pp.120~125.
- (4) 신대용, 이상건, 오현주, 김홍근, 윤수환, 김찬중, 2012, “3차원 형상을 고려한 고속철도에 의한 터널내 압력과 전파의 CFD 해석,” 한국전산유체공학회지 제17권 제4호, pp.49~55.
- (5) 권혁빈, 강부병, 김병운, 이두환, 정현주, 2010, “진공튜브 내 초고속열차의 공기저항 파라메타 연구-1,” 한국철도학회 논문집 제13권 제1호, pp.44~50.
- (6) 강형민, 김철완, 조태환, 전완호, 윤수환, 권혁빈, 박춘수, 2011, “차세대 고속전철 차량연결부의 저소음 형상설계를 위한 차량 연결부의 2차원적 수치해석 연구,” 한국철도학회 논문집 제14권 제4호, pp.327~332.