

## 고속열차 대차 측면 페어링 적용을 통한 공기저항 저감 연구

문 지 수,<sup>1</sup> 김 석 원,<sup>1</sup> 권 혁 빈<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>한국철도기술연구원 고속철도연구본부

<sup>2</sup>한국교통대학교 교통시스템공학과

### A STUDY ON THE AERODYNAMIC DRAG REDUCTION OF HIGH-SPEED TRAIN USING BOGIE SIDE FAIRING

J.S. Moon,<sup>1</sup> S.W. Kim<sup>1</sup> and H.B. Kwon<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute

<sup>2</sup>Dept. of Transportation System Engineering, Korea Nat'l Univ. of Transportation

*The aerodynamic drag of high-speed train has been calculated and the effect of bogie side fairing on the aerodynamic drag has been investigated. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation based on steady-state 3 dimensional Navier-Stokes equation has been conducted employing FLUENT 12 and the aerodynamic model of HEMU-430x, the Korean next generation high-speed train under development has been built using GAMBIT 2.4.6. Three types of bogie side fairing configuration, the proto-type without fairing, half-covered fairing to avoid the interference with the bogie frame and full-covered fairing have been adopted to the train model to compare the drag reduction effects of the bogie side fairing configurations and the numerical results yields that the bogie side fairing can reduce the aerodynamic drag of the 6-car trainset up to 7.8%. The aerodynamic drag coefficient of each vehicle as well as the flow structures around the bogie system have also been examined to analyze the reason and mechanism of the drag reduction by bogie side fairing.*

**Key Words :** 고속열차(High-speed Train), 주행저항(Resistance to Motion), 공기저항(Aerodynamic Drag), 대차 측면 페어링(Bogie Side Fairing), 전산유체역학(CFD)

## 1. 서 론

고속열차가 300 km/h 이상의 속도로 주행하는 경우 공기저항은 주행저항의 80% 이상을 차지하게 되어 고속열차의 최고 속도와 에너지소모를 결정하는 가장 큰 요인이 된다. 특히, 공기저항은 속도의 제곱에 비례한다고 알려져 있으므로 고속열차에 있어 속도가 증가할수록 공기저항의 중요성은 점점 더 커지고 있다[1].

고속열차의 공기저항은 발생 원인과 위치에 따라 여러 가지 성분으로 나뉘질 수 있는데, 그 중에서 표면마찰저항과 하부저항이 대부분을 차지하고 있다. 표면 마찰저항은 유체의

점성에 의해 물체 표면에 작용하는 전단력이 그 원인이므로 대략 열차 표면적에 비례하며, 유선화된 형상일수록 그 비중이 높아진다. 하부 저항은 대차 및 대차를 포함하는 공동부에 의해 주로 발생하는 저항으로서, 매우 복잡한 형상을 갖고 있는 휠과 차축 및 프레임 등으로 구성된 대차시스템이 열차 하부의 유동을 강하게 교란하여 발생하는 공기저항의 성분이다.

APT와 TGV 등 유럽의 고속열차의 공기저항을 분석한 결과, 표면 마찰저항과 하부저항은 전체 공기저항의 약 80%에 달하는 것으로 나타났으며[2], 차세대 한국형 고속열차인 HEMU-430X의 경우에도 1/20 축소모형에 의한 풍동시험 결과 하부에서 발생하는 저항이 전체 저항의 38.7%로서 39.1%인 표면마찰저항 다음으로 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다[3].

표면 마찰저항을 줄이기 위해서는 차체의 단면적의 둘레를 최소화함으로써 전체 열차 표면적을 줄이는 방법이 있으나, 열차의 단면 형상은 승객의 탑승공간을 우선적으로 고려하여

Received: December 5, 2013, Revised: February 4, 2014,

Accepted: February 4, 2014.

\* Corresponding author, E-mail: hbkwon@ut.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2014.19.1.041>

© KSCFE 2014



Fig. 1 Aerodynamic model of HEMU-430X high-speed train

결정되어야 하기 때문에 큰 폭의 공기저항 저감을 기대하기는 힘들다.

대차시스템의 경우는 유지보수의 편의성 등을 고려하여야 하기 때문에 유선형화 등 형상의 변화를 통한 공기저항의 저감이 쉽지 않으나, 최근에는 고속열차의 공기저항 저감에 대한 중요성과 관심이 증대됨에 따라 다양한 연구가 수행되었다.

일본의 Ido et al.[4]은 축소모형 풍동시험을 통하여 대차 측면 페어링 및 대차 하부 커버를 적용한 열차 하부 형상의 공기저항 저감 효과를 평가하였으며, 특히 하부저항 저감 원인은 대차에 가해지는 압력저항이 저감되기 때문이라는 것을 밝혀내었다. Mancini et al.[5]은 ETR 500 열차의 실차시험을 통하여 대차 측면 페어링을 적용한 경우 페어링이 적용되지 않은 경우에 비하여 공기저항이 약 10%의 감소하는 것을 밝혀내었다.

이와 같이 대차의 측면에 페어링을 장착하는 방안은 기존의 하부구조를 크게 바꾸지 않고 손쉽게 적용 가능하며, 차체의 유지보수에 큰 지장을 주지 않는 장점이 있어 고속열차의 공기저항 저감을 위한 효과적인 방안으로 자리매김하고 있으며, 현재 개발되고 있는 차세대 고속열차인 HEMU-430X의 경우에도 대차 측면 페어링 등을 적용하여 공기저항을 저감한 결과 2013년 3월 421.4 km/h의 최고속도를 기록한 바 있다[6].

고속열차의 공기저항을 평가하기 위해서는 앞서 언급한 축소모형 풍동시험과 실차를 이용한 타행시험[7]이 있으며, 전산해석을 이용한 해석적 방법도 고려될 수 있다. 전산해석을 통한 열차의 공기저항 평가는 축소모형 풍동시험에서의 난점으로 여겨지는 레이놀즈수, 마하수 상사 및 열차와 지면과의 상대운동의 표현에 제약이 없다는 장점이 있으며, 특히 열차가 터널 내부에 위치한 경우[8-10]처럼 풍동시험으로 모사가 불가능한 경우에는 실험적 방법의 유일한 대안으로 사용되기도 한다. 뿐만 아니라 해석적 방법은 실험적 방법으로는 얻기 힘든 유동장의 유동변수에 대한 정보를 제공하기 때문에 공기저항의 저감 뿐만 아니라 저감 원인 및 메커니즘의 분석에 사용될 수 있다.

본 연구에서는 공기저항의 정량적 평가뿐만 아니라, 대차 측면 페어링의 공기저항 저감 효과 및 메커니즘 파악을 위하여 전산유체역학을 이용한 수치해석을 수행하였다. 고속열차의 공기저항 계산을 위하여 3차원 정상 Navier-Stokes 방정식

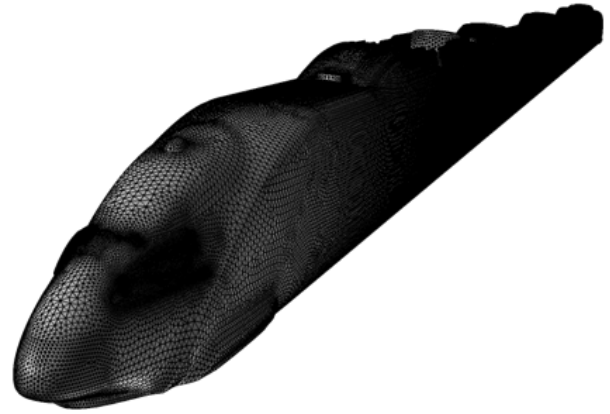


Fig. 2 Surface mesh

과  $k-\omega$  난류 모델을 이용하여 수치해석을 수행하였으며, HEMU-430X 열차의 기본형상에 대하여 두 가지 타입의 대차 커버를 모델링하여 공기저항을 계산하였다. 페어링 형상에 따른 공기역학적 특성의 변화를 살펴보기 위하여 공기저항 계수뿐만 아니라 대차 주위 압력분포 및 유속 벡터 분포도 비교하여 분석하였다.

## 2. 수치 해법

### 2.1 열차 형상 및 격자 구성

계산에 사용된 열차는 한국철도기술연구원이 개발 중인 차세대 동력분산형 고속열차의 시제 차량인 HEMU-430X이다. 본 열차는 총 6량 편성으로서 열차의 총 길이는 149 m이며, 열차의 단면적은 10.221m<sup>2</sup>이다. 차량의 3차원 CAD 모델을 바탕으로 전두부, 연결부, 상부, 대차 및 하부구조 등 열차의 형상을 모델링하였고 효율적인 전산유체해석을 위해 공기저항에 큰 영향을 주지 않는 미세형상 등은 단순화 하였다. Fig. 1에는 수치해석을 위해 모델링 된 HEMU-430x 열차의 전체 형상이 나타나 있다.

Fig. 2에는 차량 모델 표면에 형성된 격자를 보여주고 있다. 차량 표면의 복잡한 형상을 잘 반영할 수 있도록 삼각형 격자를 사용하였다. 열차의 좌우 대칭인 특징을 이용하여 전체 형상의 절반만을 사용하여 격자의 수를 줄여 계산 효율을 증대시켰다. 계산에 사용된 격자 수는 대략 천만 개이다.

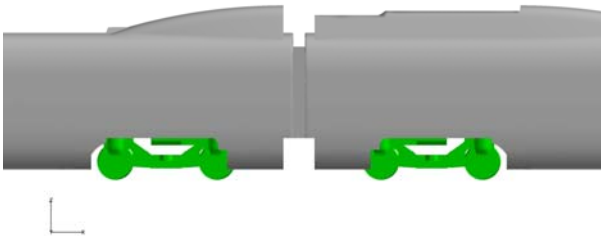


Fig. 3 Shape of bogie side fairing (case01: no-bogie fairing)

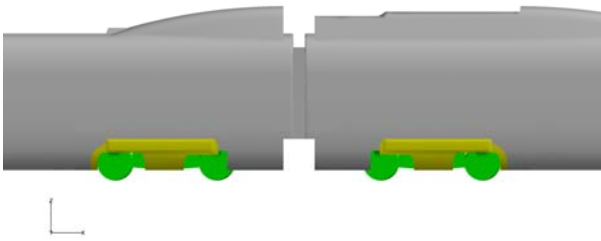


Fig. 4 Shape of bogie side fairing (case02: semi-bogie fairing)

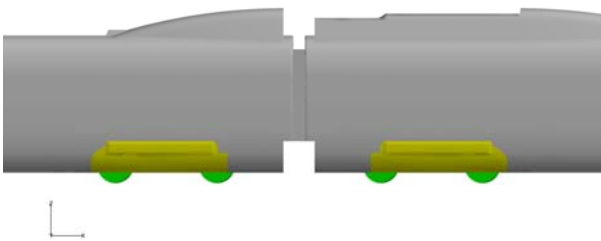


Fig. 5 Shape of bogie side fairing (case03: full-bogie fairing)

## 2.2 대차 측면 페어링 형상

대차 측면 페어링이 공기저항에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 페어링의 적용여부 및 형상에 따른 3가지 대차 측면 페어링 형상에 대해 해석을 수행하였다. 해석에 수행된 페어링 형상은 아래 Table 1에 정리되어 있으며, Fig. 3~5에는 해석을 위해 모델링된 3가지 조건의 열차 하부 형상이 나타나 있다.

먼저 Case01은 시험차의 초기 형상으로서 대차 측면 페어링이 없는 경우이다. 이 경우 대차는 차체 하부에 형성된 공동부에 장착되며, 대차의 좌우는 대기과 직접 연결된다. Case02는 대차와 차체의 상대운동에 따른 페어링과의 간섭을 회피하기 위하여 간섭되는 부분을 제거한 페어링 형상으로서, 곡면 주행 시 차체보다 더 돌출되는 축 중심 부근이 개방되어 있는 모습을 볼 수 있다. Case03은 Case02에서의 간섭을

고려하지 않고, 대차의 측면을 열차의 측면과 동일한 형상으로 모두 막은 형상이다. Fig. 1에서 보이듯이 양 끝단 대차 2개는 다소 돌출된 형상의 페어링이 이미 장착되어 있으며, 모든 경우에 대하여 동일하게 적용하였다.

## 2.3 전산해석 기법

본 연구에서는 상용 전산해석 프로그램인 FLUENT V12를 이용하여 고속열차 주위의 유동장을 해석하고, 수립된 해를 이용하여 열차표면에 가해지는 압력 및 전단력을 적분하여 열차의 공기저항을 계산하였다. 지배방정식은 3차원 정상 (steady) Navier-Stokes 방정식을 이용하였고, 본 연구의 해석속도인 500 km/h에 해당하는 마하수가 약 0.4이므로 공기의 압축성 효과를 고려할 수 있는 Density 기반의 수치해법을 이용하였다. 공간 차분을 위하여 2차 upwind scheme을 적용하였으며, 난류 모델로는 2-equation 모델인 k- $\omega$  모델을 적용하였다. 원방경계는 열차 중앙을 중심으로 전후 240 m, 위로 80 m, 측면으로 38 m의 직사각형 형태를 이루도록 설정되어 열차 주위의 유동 교란이 원방경계 이내에 머물도록 하였다. 벽면의 경우, 열차의 표면은 유체의 점성을 고려하여 non-slip 조건을 적용하였고, 지면의 경우에는 실제 열차의 주행조건을 모사하기 위하여 자유류 속도로 후방으로 이동하는 non-slip 조건을 적용하였다.

## 3. 해석 결과

### 3.1 공기저항 계수

통상적으로 공기저항을 공기의 동압과 기준 단면적으로 무차원화하여 표현할 경우 대기압, 온도, 축적에 무관한 무차원화 계수를 얻을 수 있기 때문에 아래 식 (1)과 같이 공기저항 계수로 표현하여 분석을 수행하였다.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} \quad (1)$$

위 식에서  $C_D$ 는 공기저항 계수이며,  $D$ 는 공기저항,  $\rho$ 는 공기 밀도,  $U$ 는 자유류 속도,  $S$ 는 기준면적을 의미한다.

본 연구에서 공기밀도는 표준대기조건으로 가정하여 1.225 kg/m<sup>3</sup>을 적용하였고 자유류 속도는 열차 속도 500 km/h

Table 1 Case description

Name	Description
Case01	No-Bogie Fairing
Case02	Semi-Bogie Fairing
Case03	Full-Bogie Fairing

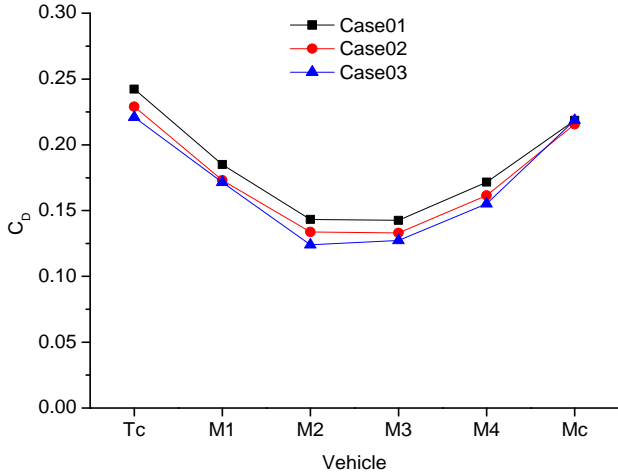


Fig. 6 Aerodynamic drag coefficient of the vehicles

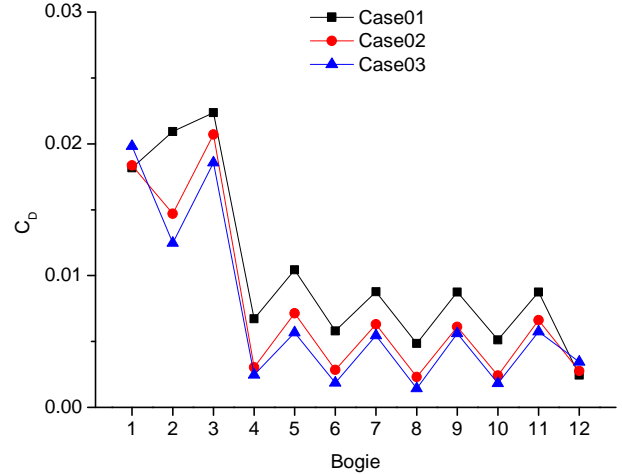


Fig. 7 Aerodynamic drag coefficient of the bogie

에 해당하는 138.89 m/s를 적용하였다. 기준면적은 대략의 열차 단면적에 해당하는 10 m<sup>2</sup>를 적용하였다.

3.1.1 열차 공기저항 계수

Table 2에는 세 가지 대차 페어링에 대한 공기저항계수가 나타나 있다. 아래 표에서 Case01, Case02, Case03의 공기저항 계수는 각각 1.1035, 1.0457, 1.0175로서 대차 측면 페어링을 적용한 Case02와 Case03이 페어링이 적용되지 않은 Case01에 비하여 공기저항이 각각 5.2%, 7.8%낮은 것으로 나타났다.

공기저항을 성분 별로 살펴보면, 페어링 장착 시 압력저항은 감소하나 마찰저항은 약간 증가하는 것으로 나타났으며, 압력저항의 감소 폭이 마찰저항의 증가 폭에 비하여 훨씬 크기 때문에 총 저항은 줄어드는 것으로 나타났다. 즉, 대차 측면 페어링에 의한 공기저항의 감소는 압력저항의 감소에 기인하는 것으로 보이며, 마찰저항은 페어링 적용 시 페어링에 의한 표면적의 증가 및 유동 구조의 변화로 인하여 압력저항의 감소에 비하여 미미하게 증가하는 것으로 나타났다.

3.1.2 차량 별 공기저항 계수

대차 측면 페어링에 의한 공기저항 저감 효과를 보다 자세히 살펴보기 위하여 차량 별 공기저항 계수를 계산하여 아래 Fig. 6에 나타내었다. 차량 별 공기저항 계수는 선두차(Tc)와 후미차(Mc)가 가장 크고 중간 차량(M2, M3)이 가장 작은 값을 나타낸다. 선두차와 후미차의 공기저항의 원인은 전두부와

후미부로 인한 압력저항이라고 볼 수 있다. 즉, 전두부 끝단 정체점 부근에는 높은 압력이 형성되어 선두차 공기저항의 원인이 되며, 후미부 끝단에서는 유체의 점성효과로 인하여 후미부 끝단에서 압력이 회복되지 않고 대기압 이하로 머물기 때문에 후미차에 큰 공기저항이 발생하는 것이다. 이러한 경향은 기존의 풍동시험 결과[3]에서도 확인될 수 있으며, 이를 통하여 본 연구에서 수행된 전산해석의 결과가 타당함을 간접적으로 보여준다.

대부분의 차량에서 페어링을 적용한 경우(Case02, Case03)가 적용하지 않은 경우(Case01)에 비하여 공기저항이 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 측면을 완전히 감싼 경우(Case03)가 공기저항이 가장 작게 나타났다. 다만 후미차의 경우에는 세 경우 모두 공기저항의 차이가 거의 나타나지 않았다.

다음으로 각각의 대차에 가해지는 공기저항을 살펴보기 위하여 대차 별 공기저항을 Fig. 7에 나타내었다. 그림의 x축에서 1은 바람방향에 대하여 최전방에 위치한 대차를 의미하며, 숫자가 증가할수록 순서대로 후방에 위치한 대차가 된다. 6개의 열차가 2개씩의 대차를 갖기 때문에 총 대차의 수는 12이다.

그림에서 전방의 세 대차가 월등히 높은 공기저항을 나타내고 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 열차 하부로 유입된 유동이 강하게 대차에 작용하기 때문에 대차의 공기저항이 큰 것으로 보인다. 4번째 대차부터 공기저항이 급격하게 줄어드는 이유는 열차 하부의 경계층이 완전히 성장하여 대차에 작용하는 유속이 크게 줄어들기 때문에 나타난 현상으로 보이며, 이러한 결과는 열차 하부에 형성되는 열차풍에 대한 현장 측정 시험 결과를 통해서도 확인된 바 있다[11].

4번째 대차 이후 대차 별 공기저항의 특성을 살펴보면, 홀수 대차의 공기저항이 짝수 대차의 공기저항보다 월등히 크

Table 2 Aerodynamic drag coefficients

Name	Pressure	Friction	Total	%
Case01	0.9399	0.1636	1.1035	100.0
Case02	0.8752	0.1704	1.0457	94.8
Case03	0.8391	0.1784	1.0175	92.2

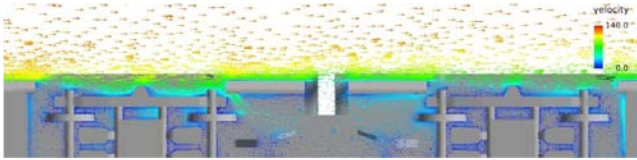


Fig. 8 Velocity vector (case01: no-bogie fairing)

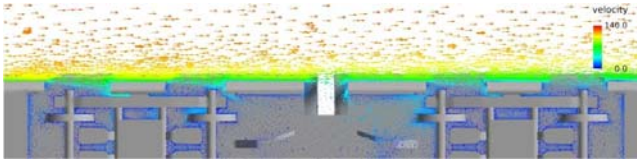


Fig. 9 Velocity vector (case02: semi-bogie fairing)

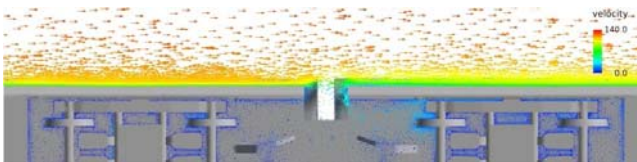


Fig. 10 Velocity vector (case03: full-bogie fairing)

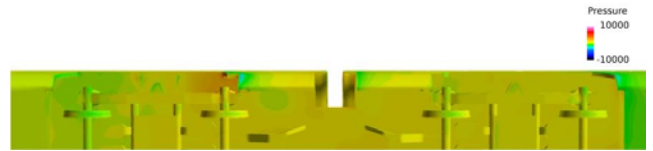


Fig. 11 Surface pressure contour (case01: no-bogie fairing)



Fig. 12 Surface pressure contour (case02: semi-bogie fairing)

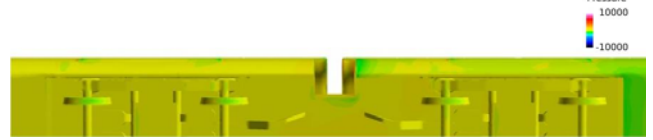


Fig. 13 Surface pressure contour (case03: full-bogie fairing)

다는 점을 알 수 있다. 홀수 대차는 각 차량의 입장에서는 전방에 위치한 대차이며, 연결부를 기준으로 후방에 위치한 대차이다. 즉, 차간 연결부를 기준으로 볼 때 차체 하부 공동에 위치한 두 개의 대차 중 전방의 대차보다 후방에 위치한 대차가 월등히 높은 공기저항을 나타내게 되는데, 이는 전방의 대차가 공동부의 앞쪽에 있어 하부 유동의 영향을 덜 받는 반면, 후반부의 하부 유동의 영향을 상대적으로 더 크게 받기 때문에 더 큰 공기저항을 받는다고 볼 수 있다.

대차 페어링의 형상에 따른 차이는 총 공기저항계수의 순서와 마찬가지로 Case01, Case02, Case03의 순서로 공기저항계수가 작아지는 것을 알 수 있으며, 특히 2번째 대차에서 페어링의 적용에 따른 공기저항의 저감이 가장 크게 나타났다.

### 3.2 하부 유동장 분석

#### 3.2.1 하부 유속 벡터 분포

대차 측면 페어링에 의한 공기저항 저감 원인을 보다 상세히 살펴보기 위하여 열차의 중간에 위치한 M2 차량(좌측)과 M3 차량의 연결부 부근의 유속벡터 분포를 페어링 형상에 따라 Fig. 8~10에 각각 나타내었다.

먼저, 페어링이 없는 경우(Fig. 8)를 보면, 대차 측면에서 유동의 유입 및 유출이 활발하게 이루어지고 있음을 알 수 있으며, 특히 그림에서 왼쪽에 위치한 전방 대차 부근에서의 유동 유입이 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 유입된

유동은 대차 부근에 기류를 형성하여 대차 및 차체의 압력저항을 발생시키는 원인이 됨을 추측할 수 있다.

Fig. 9에서 부분적으로 페어링이 적용된 경우(Case02) 페어링의 영향으로 인해 측면에서의 유동 유입이 다소 줄어들었으며, 따라서 공동 내부의 유동도 전반적으로 약화된 것을 확인할 수 있다. Fig. 10에서 측면에 완전히 차단된 경우(Case03)에는 유동 유입이 보다 더 크게 줄어든 것을 알 수 있다. 특히 전방 대차 측면에서의 유동유입은 완전히 차단되어 내부 유동이 매우 미약하게 줄어든 것을 알 수 있으며, 후방 대차 부근의 경우에는 차간 연결부를 통한 유동유입에 의해 전방 대차 부근보다는 다소 내부 유동이 발생함을 알 수 있다.

#### 3.2.2 하부 표면 압력 분포

Fig. 11~13에는 M2 차량(좌측)과 M3 차량 하부의 표면 압력분포를 나타내고 있다. 먼저 Fig. 11에 나타나 있듯이 대차 페어링이 없는 경우(Case01) 전방 대차 주위에 강한 압력 분포가 나타난다. 특히 전방대차의 두 번째 축 부근의 차체 표면에서는 강한 고압영역이 형성되는데, 이는 대차 측면에서 유입된 유동이 차체와 부딪혀 나타나는 결과인 것으로 보인다. Case02 (Fig. 12)에서는 대차 페어링의 영향으로 이러한 고압 영역이 크게 완화되었음을 알 수 있으며, 측면을 완전히 차단한 Case03의 경우(Fig. 13)에도 차체 하부 표면의 압력구배가 매우 완화되었음을 알 수 있다.

앞서 유속벡터의 분석을 통하여 대차 측면 페어링의 적용

이 측면에서 유입되는 유동을 차단하여 대차 공동부 내부의 유동을 약화시키는 것을 확인하였는데, 그 결과로 공동부 표면의 압력구배도 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 대차 측면 페어링의 공기저항 저감 효과 및 메커니즘 파악을 위하여 HEMU-430X 고속열차에 다양한 대차 측면 페어링 형상을 적용하여 전산해석을 수행하였으며, 해석 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 제시할 수 있다.

- (1) 대차 측면 페어링을 적용하지 않는 기본 형상의 공기저항 계수는 1.1035이며, Semi-Bogie 페어링 적용 시에는 1.0457로 공기저항이 5.2% 감소한 것으로 나타났다. 또한 Full-Bogie 페어링 적용 시에는 1.0175로 7.8% 감소한 것으로 나타났다.
- (2) 대차 측면 페어링에 의한 공기저항의 저감은 압력저항의 감소에 기인하며, 마찰저항은 페어링 적용 시 페어링에 의한 표면적의 증가 및 유동 구조의 변화로 인하여 압력저항의 감소에 비하여 미미하게 증가한다.
- (3) 대차 측면 페어링의 적용은 측면에서 대차부 공동 내부로 유입되는 유동을 차단하여 대차 공동부 내부의 유동을 약화시키며, 결과적으로 대차 및 차체의 압력저항을 저감시키는 효과를 가져다준다.

#### 후 기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 철도기술 개발사업 중 430 km/h급 고속열차(HEMU-430X) 기술개발 과제 일환으로 수행되었습니다.

#### References

[1] 2011, Kwon, H.B., Yun, S.H. and Lee, H.W., "Target and Implementation of Aerodynamic Drag Reduction for High-speed Train to Reach Up to 500km/h Running Speed," (in Korean) *Proc. of KSR 2011 fall conference*.

[2] 1993, Peters, J.L., "Aerodynamics of very high speed trains

and maglev vehicles: State of the art and future potential," *Int. J. of Vehicle Design, Special Publication Sp3*.

[3] 2013, Kwon, H.B. and Oh, H.K., "Decomposition and reduction of aerodynamic drag of high-speed train," *Proc. of the WCRR 2013*, Sidney.

[4] 2001, Ido, A., Kondo, Y., Matsumura, T., Suzuki, M. and Maeda, T., "Wind Tunnel Tests to Reduce Aerodynamic Drag of Trains by Smoothing the Under-floor Construction," *Quarterly Report of RTRI*, Vol.42, No.2, pp.94-97.

[5] 2001, Mancini, G., Malfatti, A., Violi, A.G. and Matschke, G., "Effects of experimental bogie fairings on the aerodynamic drag of the ETR 500 high speed train," *Proc. of WCRR 2001*.

[6] 2013, Oh, H.K., Kwon, H.B., Kim, S.S., Choi, D. and Kim, S., "The running resistance characteristic of next generation high speed train (HEMU-430X)," (in Korean) *Proc. of KSR 2013 fall conference*, KSR2013A223.

[7] 2006, Kim, S.W., Kwon, H.B., Kim, Y.G. and Park, T.W., "Calculation of resistance to motion of a high-speed train using acceleration measurements in irregular coasting conditions," *Proc. IMechE*, Vol.220, pp.449-459.

[8] 2010, Kwon, H.B., Kang, B.B., Kim, B.Y., Lee, D.H. and Jung H.J., "Parametric Study on the Aerodynamic Drag of Ultra High-speed Train in Evacuated Tube: Part 1," (in Korean) *Journal of the Korean society for railway*, Vol.13, No.1, pp.44-50.

[9] 2010, Kwon, H.B., Nam, S.W., Kim, D.H., Jang, Y.J. and Kang B.B., "Parametric Study on the Aerodynamic Drag of Ultra High-speed Train in Evacuated Tube: Part 2," (in Korean) *Journal of the Korean society for railway*, Vol.13, No.1, pp.51-57.

[10] 2013, Kwon, H.B. and Hong, J.S., "Aerodynamic Drag Reduction on High-performance EMU Train by Streamlined Shape Modification," (in Korean) *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.16, No.3, pp.169-174.

[11] 2006, Kwon, H.B. and Park, C.S., "An experimental study on the relationship between ballast-flying phenomenon and strong wind under high-speed train," *Proc. of the WCRR 2006*, Montreal, paper 625.