

고속주행 철도차량의 속도제어를 위한 공기제동장치의 설계 연구

A Study on the Air-Brake System Design of High-speed Rail-way Rolling Stock

이상일*, 김대규**, 김철호†

Sang-Il Lee*, Dea-Kyu Kim**, Chul-Ho Kim†

Abstract In this numerical study, the model air-brake system was developed and tested on the model KTX high-speed train to see its effect on the savings of the brake energy consumption. For this study, CFD simulation program; PHOENICIS (ver.2011) was incorporated for the performance analysis of the model air-brake system. From the analysis of the simulation results, it was found that the brake power required to stop the model KTX train by the ATC schedule was reduced about 9% as the air-brake system applied along with the conventional mechanical and electric brake system. The air-brake system also generates the down-force that has the positive effect on the rolling resistance of the model train.

Keywords : High-speed rail-way rolling stock, Air-brake system, Aerodynamic drag, CFD, Driving resistance

초 록 본 연구는 고속철도차량의 공기역학적 특성을 이용하여 기존의 기계 및 전동식 제동시스템과 더불어 공기의 저항력을 이용하는 친환경 제동장치인 공기제동장치(air-brake system)를 개발하여 적용하므로써 고속철도차량의 제동장치의 에너지 효율성을 높이는 데 연구의 목적을 두고있다. 이를 위해 본 연구에서 제안하는 공기제동장치의 공기역학적 특성에 관해 알아 보았으며 또한 본 장치를 현재 국내에서 운행중인 KTX 고속철도차량에 적용하였을 때 기존의 제동시스템과 대비하여 어느정도 제동에너지가 절약되는지를 정량적으로 분석해 보았다. 본 연구는 현재 국내에서 운용중인 KTX 고속철도 차량을 기반으로 차량의 공기역학적 특성을 CFD(Computational Fluid Dynamics)프로그램을 이용하여 정성, 정량적으로 분석 하였으며 또한 차량의 축소모델 풍동실험을 통해 공기제동장치의 작동 여부에 따른 차량 주위에서의 공기유동 현상을 정성적으로 분석해 보았다. 본 연구를 통해 도출된 KTX 고속철도차량의 제동에너지는 총 6km 제동구간에서 기존의 기계 및 전동식 제동방식에 비해 본 공기제동시스템을 도입하므로써 총 제동에너지의 약 9% 정도가 절약된다는 연구 결과를 도출하였다.

주요어 : 고속철도차량, 공기제동장치, 공기저항력, CFD, 주행저항

† 교신저자: 서울과학기술대학교 공과대학 기계자동차공학과(hokim@seoultech.ac.kr)

* 서울과학기술대학교 공과대학 기계자동차공학과 학부생

** 서울과학기술대학교 산업대학원 자동차공학과

1. 서론

본 연구에서 제안하는 공기제동장치(Air-brake system)은 항공기와 같은 고속으로 운행되는수송수단에 적용해 오던 제동장치이다. 현재 지상에서 300km/h 이상의 속도로 운행되는 고속철도차량의 경우 차량의 정차를 위해 기계식(답면제동, 디스크제동) 및 전동식 제어장치를 도입하여 운행하고 있으며, ATC(Automatic Train Control) 계획에 따라 총 6km의 제동거리를 확보하고 운행 중이다. 이러한 기계 및 전동식 제동시스템의 경우 차량의 정차를 위해 매우 큰 제동에너지를 필요로 하게 된다.

본 연구에서 제안하고자 하는 고속철도차량의 공기역학적 특성을 이용하는 공기제동장치는 기존의 기계/전동식 제동시스템과 더불어 적용하므로 서 고속차량의 제동에 소요되는 제동에너지를 절감하게 되며, 기존 제동장치의 수명 연장에 도움이 되므로 고속철도차량의 운용경제성과 친환경성에 도움이 될 것으로 기대된다.

일본의 고속철도인 신칸센 철도차량에서는 이러한 공기제동장치의 개념을 이미 도입하여 차량의 비상제동시에 운행하는 것으로 되어있다. 그러나 본 연구에서 제안하는 제동방식은 차량의 정차를 위해 상시 사용이 가능한 공기제동시스템의 개발을 목표로 연구를 진행하고 있다. 본 연구에서는 현재 제안하는 공기제동시스템의 가용성과 경제성 판단을 위해 CFD 시뮬레이션 기법을 이용하여 ATC 제동계획에 따른 제동에너지의 감소율에 대해 정량적으로 판단해 보았으며, 모델 차량의 유동가시화 풍동실험을 통해 공기제동장치의 작동 유무에 따른 차량 및 제동장치 주변에서의 유동특성변화에 의한 차량의 동적안전성을 판단해 보았다.

2. 본론

2.1 주행저항

2.1.1 KTX차량의 주행저항

열차의 주행저항은 차량의 속도에 비례하는데 일반적으로 아래 식(1)에 나타난 Davis equation[1]으로 표현된다.

$$R = A + BV + CV^2 \quad (1)$$

여기서 V 는 열차의 속도이며, 계수 A 와 B 는 기계적 저항을 포함하기 때문에 열차의 질량과 관련되어 있으며 100km/h 이하의 저속에서는 주행저항은 열차의 질량에 비례하게 된다. 그러나 고속에서는 공기저항에 해당하는 CV^2 이 지배 항이 된다.

실험을 통하여 열차의 타행 운전과정에서 감속도를 측정하여 추정된 KTX차량의 주행저항식은 식(2)와 같다.[1-3]

$$R = 0.77\sqrt{(10nM)} + 0.008MV + (0.02225 + 0.00352T)V^2 \quad (2)$$

여기서 n= 축 수, M= 열차 질량(ton), T= 객차 수, V= 열차 속도(km/h).

이러한 KTX 차량의 주행저항 공식을 CASE(1)으로 구분하였으며 구름저항과 공기역학의 기본법칙을 적용한 KTX의 주행저항 식은 식(3)과 같이 표현되며 CASE(2)로 구분하였다.

$$R = \mu mg + \frac{1}{2}\rho AC_D V^2 \quad (3)$$

여기서 R= 주행저항, μ = 레일과 차륜과의 마찰계수, m= 열차 질량(kg), A= 열차 전면 투영면적(m²), C_D= 항력계수, V= 열차 속도(m/s)

2.1.2 에어브레이크 작동시 KTX차량의 주행저항

에어브레이크를 장착한 KTX의 주행저항을 구하기 위하여 CASE(1)으로 구분한 위의 식(2)를 사용하였으며, 주행저항식은 아래와 같다.

$$R = (0.77\sqrt{(10nM)} + 0.008MV_1) \times 10 + \frac{1}{2}\rho AC_{D-ABrake} V_2^2 + \mu F_A \cos \theta \quad (4)$$

여기서 C_{D-ABrake}= 에어브레이크 작동시 차량의 항력계수, F_A= 에어브레이크에 가해지는 힘, θ = 에어브레이크의 설치 각도

CASE(2)와 같이 구름저항과 유체역학의 기본법칙을 이용하여 도출한 식은 아래 식(5)로 표현하였다.

$$R = \mu(mg + F_A \cos \theta) + \frac{1}{2}\rho AC_{D-ABrake} V^2 \quad (5)$$

여기서 $F_A \cos \theta$ 는 에어브레이크에 의한 다운포스(Down Force)를 나타낸 것이다.

$$F_A = P_A \times A_A \quad (6)$$

여기서 P_A= 에어브레이크에 가해지는 압력, A_A= 에어브레이크 단면적

위와 같은 식(6)을 이용하여 F_A를 산출할 수 있다. P_A의 값은 CFD해석을 통해 값을 산출하였다.

2.1.3 에어브레이크 작동시 KTX차량의 Energy Save

Energy Save공식은 에어브레이크 작동시의 주행저항과 에어브레이크를 비작동시 주행저항의 차이를 이용하여 유도하였다. 식(7)인 CASE(1)을 이용하여 식을 유도하였으며 식(8)은 CASE(2)를 통하여 식을 유도하였다.

$$W = [(C_{D-ABrake} \frac{1}{2}\rho AV_1^2 + \mu F_A \cos \theta) - (((0.02225 + 0.00352T)V_2^2) \times 10)] \times V_1 \quad (7)$$

여기서 V_1 = ATC 구간 평균 열차 속도 (m/s), T = 객차 수, V_2 = ATC 구간별 열차의 평균속도 (km/h).

$$W = \left(\left(\frac{1}{2} \rho A C_{D-ABrake} V^2 + \mu F_A \cos \theta \right) - \frac{1}{2} \rho A C_D V^2 \right) \times V \quad (8)$$

KTX 고속철도차량이 정지하기 위해서는 ATC(Automatic Train Control) 제동계획[4]에 의해 제동시스템이 가동된다. 위의 식에서 제동에너지 산출을 위해 각 제동구간별 차량의 속도는 구간별 평균속도의 값을 이용하였다.

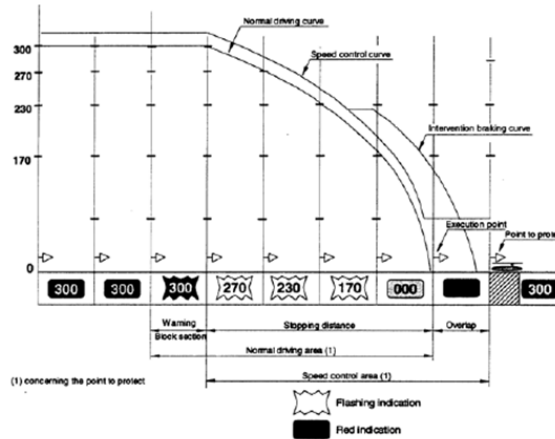


Fig. 1 ATC(Automatic Train Control) schedule for the stopping of a KTX high-speed train

2.2 모델 KTX 차량의 공기역학적 특성

2.2.1 KTX모델 및 Air-Brake모델 특성

본 연구를 위해 적용한 KTX 모델차량의 차체 제원은 Table 1에 주어진 것과 같으며, 이를 이용하여 KTX차량(PC+M+M+PC)을 3D모델화 하였으며 아래의 Fig. 2에 주어진 바와 같다.



Fig. 2 2-D view of the model high-speed train (PC+M+M+PC)

Table 1 Geometry specification of a KTX high-speed train

KTX차체의 형상 제원	동력차(LxWxH)	22.5m×2.8m×4.1m
	동력대차(LxWxH)	21.8m×2.9m×3.5m
	객차(LxWxH)	18.7m×2.9m×3.5m
	선로 ↔ 지붕	4.1m
	전차선 높이	고속선5.08m 기존선5.2m

차량의 제동에 적용할 공기제동장치의 설계는 Table 1을 참조하였으며 KTX 차량의 높이와 전차선의 제원을 비교하여 공기제동장치의 최대 높이를 결정하였다. 이때 동력차 공기제동장치의 최대높이는 0.8m이고 동력객차, 객차의 에어브레이크 최대높이는 1.3m로 설정하였다. 아래 Fig. 3은 본 연구를 위해 설계된 공기제동장치의 형상과 크기를 보여준다.

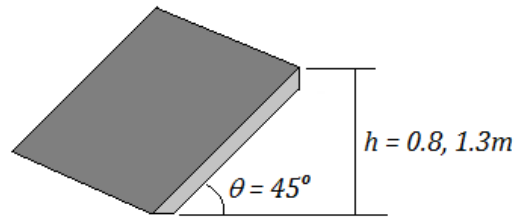


Fig. 3 Prospective view of the model air-brake and its dimension

2.2.2 CFD해석을 위한 조건 및 변수 설정

차량이 주행할 때 차량 주위에서 발생하는 공기의 유동현상을 수치해석 기법으로 묘사하기 위해 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 적용하는 범용 CFD코드인 PHOENICS(ver. 2011)을 사용하였다. 또한 해석을 위한 경계조건의 단순화를 위해 주행 차량의 외부에는 바람이 없다고 가정하였으며, 난류유동장의 해석을 위해 표준 (κ - ϵ) 모델을 이용하였다. 해석을 위한 공기의 유동장은 다음과 같이 정의하였다.[5, 6]

- 준3차원 유동 (Quasi-3D Flow)
- 난류유동 (Turbulent Flow)
- 비압축성유동(Incompressible Flow)
- 정상유동 (Steady Flow)
- 등온유동 (Isothermal Flow)

3. 해석결과 및 분석

3.1 CFD해석결과의 정성적 분석

3.1.1 공기제동장치 비작동시 KTX의 공기역학적 특성

아래의 Fig. 4는 KTX 모델차량의 CFD해석을 위해 적용한 해석도메인의 수치격자의 생성 예를 보여주고 있다. 해석을 위해 격자시험을 실시하였으며 해석을 위한 최적의 총 격자수는 (41×219×72)으로 결정하였다.

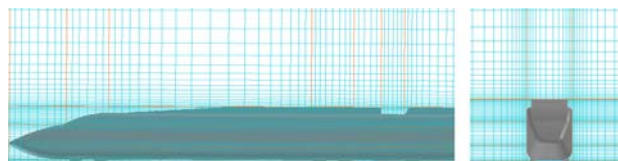


Fig. 4 An example of numerical mesh of the model KTX train ; (41 x 219 x 72)

아래의 Fig.5~Fig.7은 에어브레이크를 작동하지 않은 상태에서 KTX차량 주위에서의 유동특성을 보여준다. Fig. 5은 차량 주변에서의 공기속도 분포를 나타내며, 차량의 후방과 객차의 연결부위에서 강한 와류현상이 발생하는 사실을 알 수 있다.

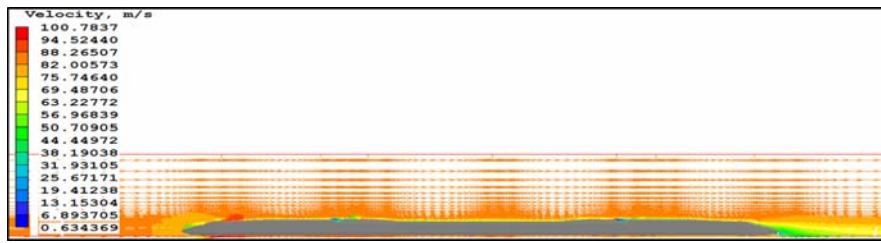


Fig. 5 Velocity distribution on the KTX high-speed train

Fig.6과 Fig.7은 KTX차량 주변에서의 압력분포와 난류운동에너지 분포를 보여준다. 차량 전방에 강한 정체압력이 나타나며, 차체의 표면에역시 표면마찰저항이 나타났다.

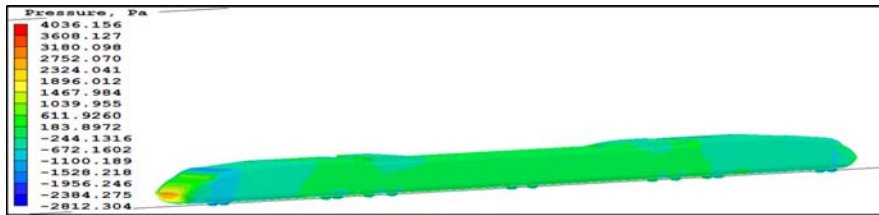


Fig. 6 Pressure distribution on the surface of the KTX high-speed train

난류운동에너지의 경우 차체의 유선형 설계에 의해 차량주위에서 매우 낮은 운동에너지의 분포를 보여주고 있다.

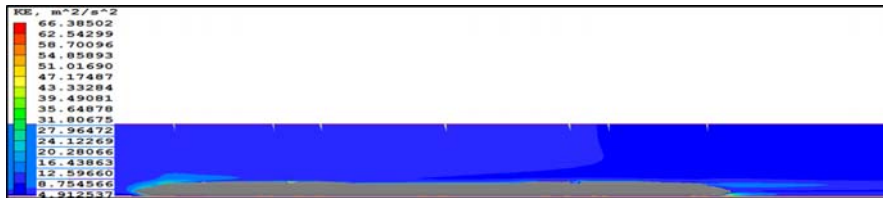


Fig. 7 Turbulent kinetic energy distribution on the KTX high-speed train

3.1.2 공기제동장치 작동시 KTX의 공기역학적 특성

아래의 Fig.8~Fig.10은 동일 운전조건에서 공기제동장치를 작동하였을 때 KTX차량 주변에서의 속도, 압력 그리고 난류운동에너지의 분포를 보여준다. 공기제동장치 작동시 모델 차량의 항력계수($C_{D-ABrake}$)를 도출하여 공기제동장치를 얹은 KTX차량의 항력계수($C_{D-total}$)와 비교하였으며 이 결과를 바탕으로 제동에너지의 경제성을 판단하였다.

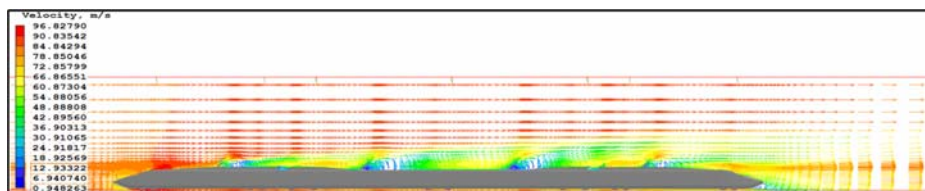


Fig. 8 Velocity distribution of the model KTX train with the air-brake

Fig. 8에서 알 수 있듯이 공기제동장치의 후방에서 매우 강한 와류현상이 발생하며, 이는 제동장치의 전후방 압력차를 유발하여 공기제동의 효과가 크게 나타난다는 사실을 보여준다. 동시에 차체에 다운포스(down-force)를 유발하여 차량의 굴림저항력을 증가시키는 효과를 발생하게 된다.

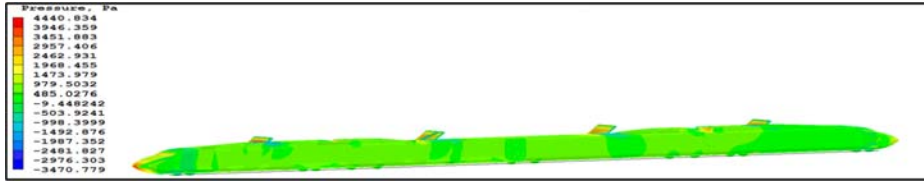


Fig. 9 Pressure distribution on the surface of the model KTX train with the air-brake

위의 Fig. 9는 모델 차량표면에서의 정압분포를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 차량의 전방과 공기제동판 각각에서 매우 높은 압력이 형성된다는 사실을 알 수 있다. 이는 차체에 강한 공기저항력을 유발하여 차체의 제동력 증가에 기여할 것으로 판단된다.

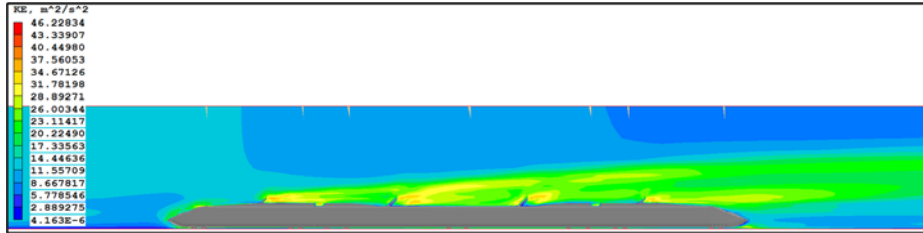


Fig.10 Turbulent kinetic energy distribution of the model with the air-brake

Fig. 10은 차체 주위에서의 난류운동에너지 분포를 보여준다. 공기제동판 후방에서 매우 강한 난류운동에너지 손실이 발생한다는 사실을 알 수 있다. 이러한 에너지 손실은 차량의 제동에너지 증가로 나타남을 의미한다.

3.2 CFD해석결과의 정량적 분석

아래 Table 2는 공기제동장치를 작동하지 않은 상태에서 KTX차량의 CFD해석결과를 통해 동력차와 동력대차 각각의 공기저항계수(C_D)값과 전체 모델차량의 공기저항계수($C_{D-total}$)를 도출한 결과를 보여준다.

Table 2 Drag coefficient ($C_{d-total}$) of the model KTX high-speed train

동력차	동력대차	동력차	동력대차
$C_{d-1}=0.189$	$C_{d-2}=0.085$	$C_{d-3}=0.066$	$C_{d-4}=0.163$
Total Drag Coefficient($C_{D-total}$)=0.502			

아래 Table 3은 공기제동장치의 작동시 KTX차체와 공기제동장치 각각에서 발생하는 항력계수의 크기와 모델차량의 총 공기저항계수의 크기를 정량적으로 산출한 결과를 보여준다.

Table 3 Drag coefficient ($C_{D-ABrake}$) of the KTX train with the air-brake

동력차		동력차의 Air-Brake	
C_{d-1}	0.49	$C_{D-ABrake1}$	0.12
C_{d-2}	0.007	$C_{D-ABrake2}$	0.15
C_{d-3}	0.06	$C_{D-ABrake3}$	0.15
C_{d-4}	-0.24	$C_{D-ABrake4}$	0.07

Total Drag Coefficient of the KTX High-speed Train($C_{D-ABrake}$) = 0.73

위의 Table 2와 Table 3의 결과 값을 이용하여 KTX차량에서 공기제동장치의 작동 유무에 따른 총 항력계수의 크기변화를 도출해 보았다.

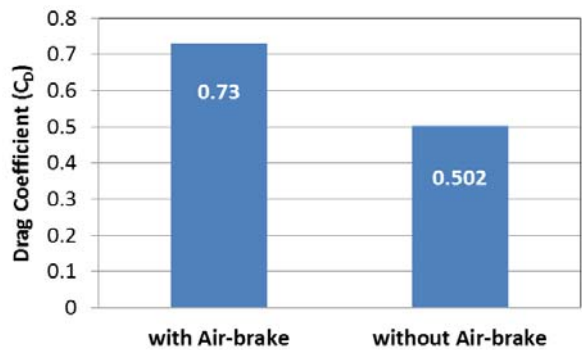


Fig. 11 Comparison of the total drag coefficient of the model KTX high-speed train

Fig. 11에서 알 수 있듯이 공기제동장치를 작동하였을 때 차량의 총 공기저항이 약 31%정도 증가한다는 사실을 알 수 있다.

3.3 KTX차량의 제동에너지 절감분석

위의 해석 결과를 통해 모델 KTX차량의 공기제동장치의 작동 유무에 따른 차량의 주행저항을 산출하였으며, 이를 통해 기대되는 제동에너지 절감의 크기를 예측해 보았다.

Fig.12에서 알 수 있듯이 공기제동장치를 작동시에 제동력의 약 7%가 감소한다는 사실을 알 수 있었으며, 이로 인한 Fig. 13에서 알 수 있듯이 제동출력은 약 9%정도 줄어든다는 사실을 알 수 있다.

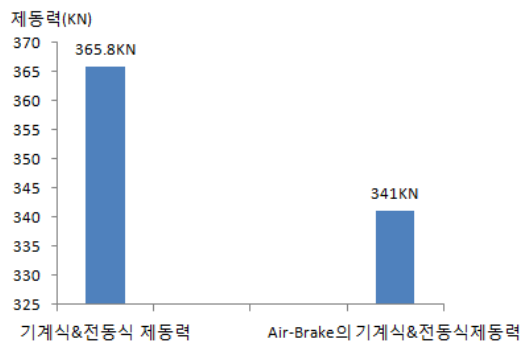


Fig. 12 Comparison of the brake forces needed for the model KTX high-speed train with or without the air-brake

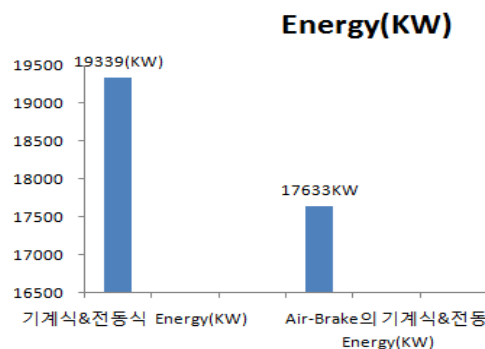


Fig. 13 Comparison of the brake power needed for the model KTX high-speed train with or without the air-brake

4. 결 론

본 연구는 기존의 KTX고속철도차량에서 공기제동장치의 작동 여부에 따른 차량의 제동효과에 대해 정성, 정량적으로 판단해 보았으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 공기제동장치의 작동에 따른 KTX차량의 총 제동력의 감소비율은 약 7%
- (2) 공기제동장치의 작동에 따른 제동에너지 소모율은 약 9% 감소

후 기

본 연구는 2013년도 서울과학기술대학교의 통합연구지원사업에 의해 수행된 연구과제이며, 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] B. P. Rochard and F. Schmiding, (2000)"A review of methods to measure and calculate train resistances," *Journal of Railway and Rapid Transit.*, Vol. 214, pp. 185-199
- [2] 권혁빈, 김석원, 김영국, 박춘수, (2007), 한국형 고속열차의 주행저항식 예측, 한국철도공학회 2007년도 춘계학술대회 논문집, pp. 1-7
- [3] 박찬경, 김상수, 김기환, 김영국, (2009), 철도차량의 주행저항 측정 방법의 관한 고찰, 한국철도공학회 2009년도 추계학술대회논문집, pp. 2782-2787
- [4] 한재문, 김석현, 조용기, (2012), 경부고속선 ATC구간에서 300km/h이상 종속 시험을 위한 차상 신호시스템제어 방안에 관한 연구, 한국철도공학회 2012년도 정기총회 및 추계학술대회, pp. 1546-1550
- [5] C.H.Kim, C.B.Youn, (2005), AERODYNAMIC EFFECT OF ROOF-FAIRING SYSTEM ON A HEAVY-DUTY TRUCK, *International Journal of Automotive Technology*,6(3), pp. 211-227
- [6] CHAM, (2008), PHOENICS Technical Report (TR/326), Concentration Heat and Momentum Limited