

## 고속열차 하부 열차풍 감소를 위한 침목 형상 효과에 대한 연구

### A Study of Tie Shape Effects for Reduction of Underbody Train Gust of High-Speed Train

김종용\* · 김태윤\*\* · 구요천\* · 윤수환\* · 권혁빈\*\*\* · 이동호†

Jong-Yong Kim · Tae-Yoon Kim · Yo-Cheon Ku · Su-Hwan Yun · Hyeok-Bin Kwon · Dong-Ho Lee

#### Abstract

In this study, the relationship between tie shape and underbody train gust of high-speed train is numerically investigated. To this end, complex train underbody/railroad model is replaced by simple plate/tie model. And it is tried to find a most important parameter for reduction of underbody train gust through the Taguchi method and orthogonal array. As a result, it is verified that the height of tie is most sensitive to the underbody train gust because of the cavity effect between ties. When the width and distance between ties are decreased, underbody train gust is also reduced. Consequently, the heighter is examined which can give the similar effect of higher tie without replacement of tie. The 5cm heighter can reduce underbody train gust about 73%, which value is only 7% less than the higher tie.

**Keywords** : High-Speed Train(고속 열차), Ballast-Flying(자갈비산), Tie(침목), Heighter(하이터), Underbody Train Gust(하부 열차풍), Taguchi(다구찌)

#### 1. 서론

국내 독자기술로 개발된 한국형 고속열차는 최고 속도가 350km/h에 달하며 평균 300km/h 이상으로 운행할 예정이다. 이런 고속주행 시, 열차하부에 유도된 고속의 열차풍으로 인해 자갈비산이 발생할 수 있으며, 이때 비산된 자갈은 차체 하부에 손상을 입히거나 선로 주변에 안전사고를 유발하게 된다[1,7].

자갈비산 메커니즘은 다음과 같다. 우선 하부에 발생하는 강한 열차풍으로 인해 표층 중 가벼운자갈이 구르다가 다른 자갈과 침목에 부딪혀 튀어 오르는 1차 비산이 발생한다.

다음으로 튀어오른 자갈이 고속의 열차 하부와 부딪혀 큰 운동에너지를 얻게 되어 다시 하부의 자갈과 충돌하여 2차 비산이 발생하게 된다.

이러한 자갈비산 방지대책에는 자갈을 그물이나 덮개로 덮거나 합성수지로 자갈을 고정시키는 방법, 선로 주위에 자갈펜스를 설치하는 방법, 그리고 침목의 형상을 조절하거나 침목 하이터와 같은 구조물을 설치하여 하부 열차풍을 감소시키는 방법 등이 있다[2].

권혁빈[3-5] 등은 풍동을 이용한 자갈비산 임계속도 측정 실험과 실제 주행하는 열차의 하부유속 측정 실험 등을 통하여 하부에 유도된 열차풍에 의한 자갈비산 가능성을 확인하였다. 따라서 하부 유동 속도를 줄임으로써 열차 운행의 안전성을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 침목 형상을 고려한 열차 하부 유동장 수치해석을 통하여 침목과 하부 열차풍의 관계를 규명하고자 하였다. 이를 위해 우선 기존에 수행되었던 하부 유동 측정 실험결과를 이용하여 수치해석의 타당성을 확보하였다. 다음으로 다구찌 실험계획법을 통해 하부 열차풍 속도와 침목 형상 변수 사이의 민감도를 분석하였다. 마지막으로 침목 위에 설치하는 구조물인 하이터에 대한 수치해석을 수행하여 방지대책으로서의 가능성을 검토해보았다.

† 책임저자 : 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 교수

E-mail : donghlee@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1900 FAX : (02)880-1910

\* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 정희원, 현대자동차

\*\*\* 정희원, 한국철도기술연구원

## 2. 고속철도 차량의 하부 유동장 수치해석

일반적으로 열차 하부 구조 및 선로, 노반 형상을 모두 고려한 하부 유동장 수치해석에는 매우 많은 계산용량과 시간이 필요하기 때문에 본 연구에서는 침목 형상만을 고려한 2차원 수치해석을 수행하였다.

### 2.1 지배방정식 및 수치 기법

열차의 주행속도 300km/h는 마하수 약 0.25에 해당된다. 따라서 비압축성 유동으로 볼 수 있으므로, 2차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 지배 방정식으로 사용하였다. 수치 해석을 위해 공력 수치해석 상용 프로그램인 FLUENT 6.1을 사용하였다. 이때 Solver는 연속방정식과 운동량방정식을 선형화해서 각 식을 차례로 반복계산하여 해가 수렴할 때까지 푸는 방법인 Segregated-implicit Method를 사용하였으며, 난류 모델은 standard  $k-\epsilon$  모델을 이용하였다[6]. 대차 돌출부에 의한 유동 교란을 고려하기 위해 기존의 연구 결과를 바탕으로 전두부 및 후미부에 압력구배 주기조건을 추가하였다.

### 2.2 격자계와 경계조건

Fig. 1은 열차 하부 중심부에서의 침목 및 하부 모델의

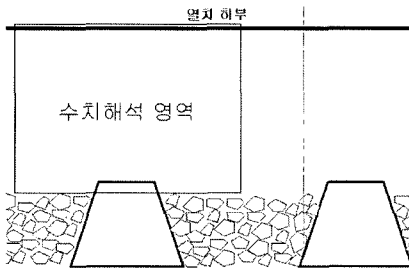


Fig. 1. Computational domain

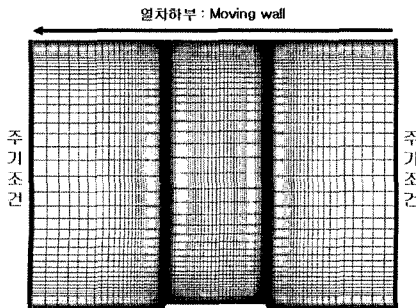


Fig. 2. Grid and boundary condition

개략도를 나타낸 그림이다. 열차풍이 가장 강하게 나타나는 곳은 선로 중심 부분으로 이는 실험을 통해서도 확인할 수 있다[2]. 따라서 이곳을 중심으로 2차원 침목 형상을 고려한 열차 하부 유동해석을 수행하였다.

Fig. 2는 수치해석에 사용한 격자계와 경계조건을 나타낸 그림이다. 수치해석 영역은 실제 열차 하부의 치수를 참조하여 바닥에서 열차하부까지의 높이는 0.42m, 침목의 폭과 높이는 각각 0.19m, 0.01m로 설정하였으며, 침목과 침목 사이 간격은 역시 실제 침목과 침목 사이의 폭인 0.48m로 계산하였다.

본 연구에서는 앞서 언급한대로 열차 하부를 평판으로 단순화하였으며, 정렬 격자를 이용하여 격자계를 구성하였다. 열차 하부 경계조건은 열차와 같은 속도(300km)로 움직이는 moving wall 조건을 부여하였고, 격자계 좌우는 완전 전개 유동으로 가정하여 침목이 계속 반복되는 주기조건을 주었다.

### 2.3 수치해석 결과 및 분석

Fig. 3은 수치해석 결과와 실험 결과를 비교한 그림이다. 실험 결과[3]는 실제 열차가 진행할 때 하부의 선로 중심부에서 자갈면 위 10mm 지점로부터 수직방향을 따라 측정된 열차풍의 시간에 따른 평균 유속이다. 수치 해석 결과가 자갈 면에 가까워질수록 하부 열차풍이 감소하는 것을 알 수 있으며 실험결과와도 거의 일치하는 것으로 보아 수치 해석의 신뢰성을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 침목 앞전 부근의 속도 분포를 나타낸 그림이다. 침목 형상에 의한 단면적 감소 효과로 인해 침목 앞전 부근에서 유동이 가속됨을 확인할 수 있으며, 이 영역에서의 자갈비산 가능성이 가장 높을 것으로 예상된다.

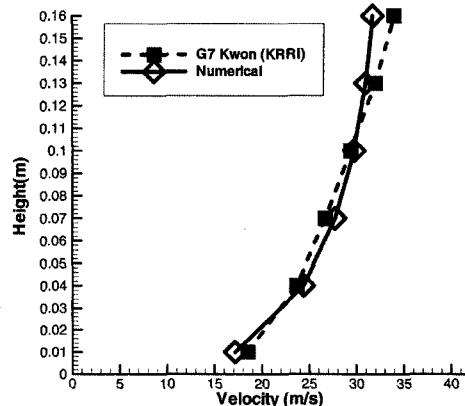


Fig. 3. Verification of numerical result

Fig. 5는 침목의 앞전과 침목 위의 중앙부분 그리고 자갈면 위에서의 수직방향 속도 분포를 나타낸 그래프이다. 침목 위와 침목 앞전 부근의 하부 열차풍 속도가 자갈면 위에서보다 상대적으로 높은 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 20-30m/s의 속도 분포를 나타내고 있어 대부분의 영역에서 자갈비산의 가능성이 존재하고 있다.

위 수치모델을 바탕으로 침목의 높이와 열차의 속도에 따른 하부 열차풍 패턴 변화를 알아보기 위하여 좀 더 자세한 수치 해석을 수행하였다.

Fig. 6은 자갈 위에서 침목 높이에 따른 열차풍의 속도를 수직방향으로 나타낸 그래프이다. Fig. 6에서 보듯이 침목의 높이가 높아질수록 열차풍이 감소됨을 알 수 있는데, 이것은 침목이 높아짐에 따라 침목 앞뒤의 정체 영역이 확장되기 때문이다.

Fig. 7은 열차 속도 변화에 대한 하부 열차풍의 크기를 나타낸 그래프이다. 열차의 속도가 증가할수록 유도되는 열차풍의 속도도 증가함을 볼 수 있다. 점선으로 표시된 영역은

자갈비산이 발생할 가능성이 있는 영역으로 자갈의 평균 반경인 30±5mm의 높이에서 하부 열차풍 속도가 자갈비산 임계속도인 20m/s[4]를 초과하는 영역이다.

앞서 살펴본 바와 같이 침목의 높이가 높아질수록, 열차의 속도가 감소할수록 하부 열차풍의 속도가 감소하는 것을 알 수 있다. 그러므로 열차의 속도를 낮추거나 침목 높이를 높임으로써 자갈비산의 가능성을 낮출 수 있을 것으로 보인다. 하지만 열차의 속도를 낮추는 것은 고속철도의 운영 취지에 부합하지 않으므로 침목 형상 변화를 통한 하부 열차풍 감소 대책을 마련해야 한다.

### 3. 다구찌 방법을 이용한 설계 민감도 분석

하부 열차풍 감소를 위한 침목 형상의 설계를 위하여 다구찌 방법과 직교배열표를 이용하여 설계민감도 분석을 수행하였다[8].

Fig. 8에서와 같이 하부 열차풍에 영향을 주는 침목 형상

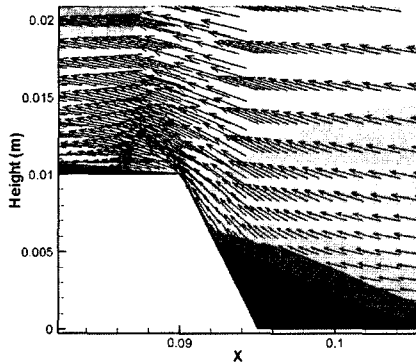


Fig. 4. Velocity distribution near the leading edge

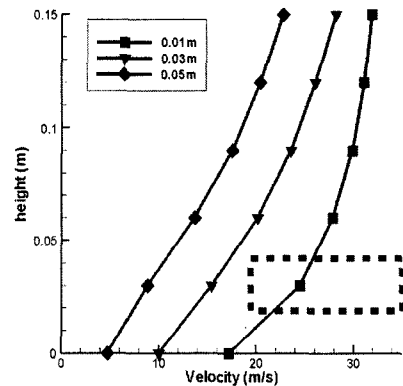


Fig. 6. Velocity vs Height of Tie

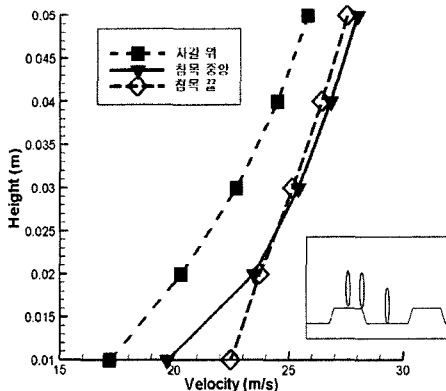


Fig. 5. Velocity profile at each position

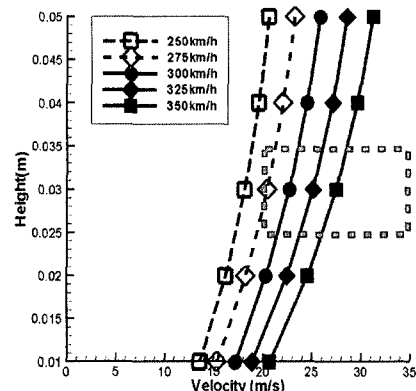


Fig. 7. Velocity vs Train speed

을 결정하는 제어인자를 침목의 높이(H), 침목 하단의 폭(D), 침목과 침목 사이의 거리(G)로 선택하였다. 이들 제어인자를 Table 1과 같이 3 수준으로 나눈 후, Table 2와 같은 직교 배열표를 이용하여 각 제어 인자들의 설계 민감도 분석을 수행하였다.

현재보다 증가시키고, 침목의 폭과 침목 사이의 간격은 줄일수록 속도가 감소하는 것을 알 수 있으며, 하부 열차풍 속도는 침목의 폭과 간격에 비해 침목 높이에 많은 영향을 받는다. 이는 침목이 높아지고 침목 사이의 간격이 감소함에 따라 침목 앞, 뒷부분에 발생하는 Cavity 유동 영역이 확장되어 결국 자갈 면을 덮게 되어 나타나는 현상이다. 따라서 침목에 의한 박리효과가 나타나는 영역, 즉 Cavity 영역을 확장하여 좁으므로 자갈면 위에서의 열차풍을 효과적으로 감소시킬 수 있으며 결국 자갈비산의 확률을 낮출 수 있

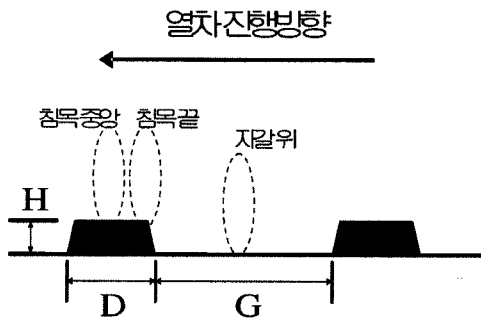


Fig. 8. Shape of tie for Design-sensitivity analysis

Table 1. Level of Design variables

		수준		
		1	2	3
제어 인자	H	10mm	30mm	50mm
	D	100mm	200mm	300mm
	G	240mm	480mm	720mm

Table 2. Orthogonal array[7]

	H	D	G
#1	1	1	1
#2	1	2	2
#3	1	3	3
#4	2	1	2
#5	2	2	3
#6	2	3	1
#7	3	1	3
#8	3	2	1
#9	3	3	2

을 것으로 기대된다.

Fig. 10, 11은 열차 속도가 각각 300km/h, 350km/h일 때 직교배열표를 이용하여 해석한 9가지 경우에 대해 자갈면에서 수직인 방향으로의 하부 열차 풍속도 분포를 나타낸 그림이다. 앞서 언급한대로 침목의 높이가 높은 경우(#7, #8, #9)가 다른 경우에 비해 큰 감소폭을 보이고 있음을 알 수 있다. opt는 각 설계변수의 최적 조합의 경우(H=3, D=1, G=1)를 나타내며 가장 큰 하부 유동 감소 효과를 보인다. #8과 opt의 경우, 침목 사이 간격이 좁고 침목의 높이가 높아져 침목 사이에서 소용돌이현상이 발생하기 때문에 다른 경우들과는 다른 속도분포를 나타내게 된다.

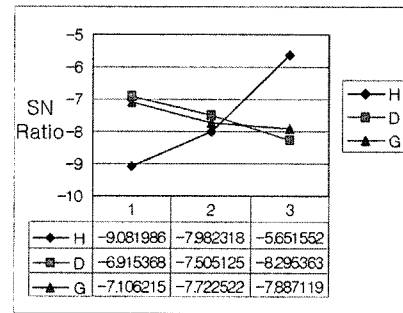


Fig. 9. SN ratio on ballast(95% confidence interval)

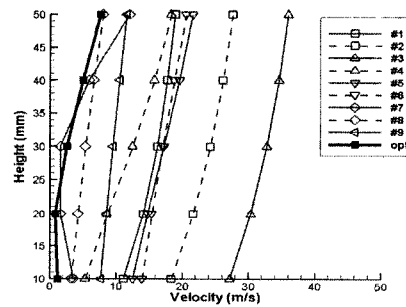


Fig. 10. Velocity profile for each case(300km/h)

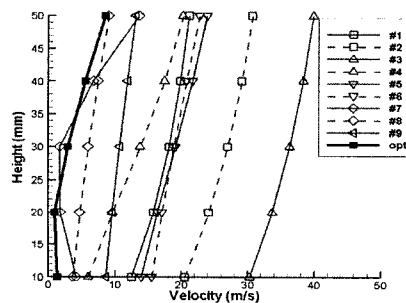


Fig. 11. Velocity profile for each case(350km/h)

#### 4. 침목 하이터 설치의 타당성 검토

이러한 Cavity 유동을 발생시키기 위해서는 침목의 높이를 증가시키면 되지만, 기존 선로의 침목들을 모두 교체하는 것은 거의 불가능하며, 신설 노선에서도 침목의 높이, 폭이나 간격을 조절하는 것은 많은 비용이 들게 되므로, 침목을 교체하는 방식이 아닌 다른 대안이 필요하다.

현재 기존선로에서 자갈비산을 방지하기 위해 자갈과 침목 사이의 높이를 50mm로 유지하도록 지속적인 관리를 하고 있지만 이것 역시 많은 작업 시간이 필요하여 열차의 운행에 방해할 가하는 등의 부작용이 있다. 침목 하이터는 기존 선로의 침목 위에 고무재질의 구조물을 부착하여 자갈비산을 억제하는 칸막이 역할을 하는 것으로 비교적 고가이기는 하지만 궤도 보수에 지장을 주지 않으면서 작업 시마다 분리하지 않아도 되는 장점이 있다[9].

침목 하이터의 성능 검토를 위해 침목을 50mm 높인 경우와 같은 높이의 하이터를 설치한 경우의 수치해석을 수행하였다.

Fig. 12는 각 경우의 속도 분포와 유선을 비교한 그림이다. 하이터를 설치한 경우 높이는 같지만 폭이 작기 때문에 박리영역의 크기가 약간 작게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 13은 각 경우 하부 열차풍의 수직방향 속도분포를 나타낸 그림이다. 높은 침목을 설치한 경우가 하이터를 설치

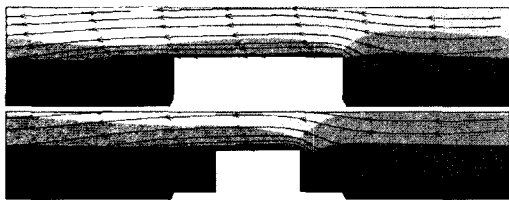


Fig. 12. Stream line(Tie-up Vs Heighter)

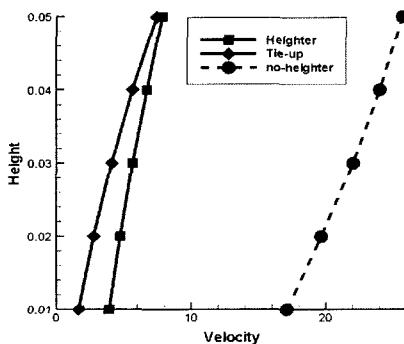


Fig. 13. Velocity(Tie-up Vs Heighter)

Table 3. Tie-up Vs Heighter

	Base	Tie-up	Heighter
속도(m/s)	21.7	4.3	5.8
감소폭		-80.2%	-73.3%

한 경우보다 약간 더 큰 감소폭을 보이지만 그 차이는 매우 작다.

Table. 3은 두 경우의 열차풍 평균 속도와 감소폭을 나타낸 것으로 침목 전체를 높이 지 않고 침목 하이터를 설치하는 것만으로도 충분한 열차풍 감소 효과를 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 하부 유동과 침목 형상의 관계 규명을 위해 열차 하부 유동장의 2차원 수치해석을 수행하였다. 이를 위해 열차의 하부 형상을 단순화하였으며 열차 전두부 및 후미부의 압력구배를 적용함으로써 실험 결과와 일치하는 수치해석 결과를 얻을 수 있었다. 수치해석 결과를 통해 열차의 속도가 빠를수록, 침목의 높이가 낮을수록 하부에 유동되는 열차풍의 크기가 증가함을 알 수 있었으며, 열차 하부에서도 침목의 앞전 부근에서 유속이 가장 빠름을 확인하였다. 즉, 이 영역에서의 자갈비산 확률이 그만큼 높다고 할 수 있다.

보다 구체적인 해석을 위해 다구찌 방법과 직교배열표를 이용하였으며 침목 형상 변수를 높이와 폭, 간격으로 설정하여 총 9가지 경우에 대한 해석을 수행하였다. 그 결과 각 형상변수들의 최적 조합을 찾을 수 있었으며 하부 유동도 큰 폭으로 감소하였다.

마지막으로 하이터에 의한 하부 유동 감소에 대해 해석을 수행하였다. 그 결과 침목의 높이를 높이는 경우(-80.2%)와 거의 동일한 결과(-73.3%)를 얻을 수 있었다. 특히, 하이터를 설치하게 되면 기존 침목의 교체 없이 하부 유동을 감소시킬 수 있으므로 자갈비산 방지를 위한 효율적인 대안이라 할 수 있으며 실제 선로에 적용하기 위해 보다 구체적인 하이터 형상 설계가 필요할 것으로 예상된다.

#### 후 기

본 연구는 2004년도 건설교통부에서 시행한 고속철도 기술개발 사업의 기술개발 결과 중 일부를 밝힙니다.

## 참고문헌

1. 한국철도기술연구원 (2004), 시험선 구간 시운전에 따른 궤도 및 노반시설물의 성능 검증보고서, 철도청
2. M. Yhshida, M. Uchida, Yaguchi, N. Mifune (1992), "Counter-measures for Ballast-flying Phenomena Caused by High-Speed-Train", RTRI Report Vol.6, No.6.
3. 권혁빈, 박춘수, 강형민, 이동호, 이도형 (2003), "자갈비산 메커니즘 규명을 위한 고속철도차량 하부 유동장 수치해석 및 시험", 한국철도학회 추계 학술대회 발표 논문
4. 권혁빈, 박춘수, 강형민, 이동호 (2003), "풍동실험을 통한 철도 노반상 자갈의 비산 특성 연구", 한국 항공우주학회 추계 학술대회 발표 논문
5. 권혁빈, 박춘수 (2005), "열차풍에 의한 고속선 자갈비산현상 연구", 한국철도학회 논문집, 제8권, 제1호, pp.6-14.
6. FLUENT Uacr manual Document, FLUENT Inc.
7. Peters, J-L, 1983, "Aerodynamics of very high speed trains and maglev vehicles: State of the art and future potential", Int. J. of Vehicle Design, Special Publication Sp3.
8. 박성현, 2003, 현대실험계획법, 민영사.
9. 권혁빈, 남성원, 김재상, 이일화, 한진식 (2004), "고속철도 설비 낙하에 의한 자갈 비산 방지대책 연구", 한국철도학회 춘계학술대회 발표논문.