

## 고속열차의 하부 자갈비산 방지용 하이터의 수치적 연구

김 병 열<sup>\*1</sup>, 권 혁 빈<sup>\*2</sup>, 김 종 용<sup>\*1</sup>, 김 태 윤<sup>\*3</sup>, 이 동 호<sup>\*4</sup>

### Numerical Study of Heighter for Prevention of Ballast-flying under High Speed Train

Kim, Byeong-Yeol, Kwon, Hyeok-Bin, Kim, Jong-Yong, Kim, Tae-Yoon, Lee, Dong-Ho

The Korean high speed train runs at 300 km/h, ballast-flying phenomenon often happens by strong train-wind. It is important to consider the prevention of ballast-flying phenomenon, because the train under-body and fares or walker around a rail might be damaged. In this study, Numerical analysis of the flow field of under-body of train and study of heighter-effect were conducted to decrease the speed of under-body. The shape of under-body was simplified for convenience of meshing and analysis. According to results of Taguchi's design by orthogonal arrays, a height of tie is dominant in the flow field, so if the heighter is installed on tie, the speed of under-body might be decreased. The result of this study is useful to build a new high-speed-line.

**Key Words:** 고속열차(High Speed Train), 자갈 비산(Ballast-Flying), 하이터(Highter)

#### 1. 서 론

국내 독자기술로 개발된 한국형 고속열차는 최고 속도가 350km/h에 달하며 평균 300km/h 이상의 속도로 주행할 예정이다. 그러나 열차의 고속주행 시, 열차하부에 유도된 고속의 열차풍으로 인해 자갈비산의 가능성이 있으며, 이렇게 비산된 자갈은 차체 하부에 손상을 입히거나 선로 주변의 안전사고를 유발할 수 있다. 본 연구에서는 침목이 하부 유동장에 미치는 영향을 분석하고 이를 바탕으로 자갈비산 방지대책으로서 침목 형상 설계를 수행하였으며, 이와 관련하여 하이터를 침목에 설치함으로써 그 유용성을 검증하고자 한다. 이를 위해 우선 한국형 고속열차의 하부 유동장에 대한 수치해석을 수행하고, 실험 데이터와의 비교를 통하여 수치해석 기법의 타당성

을 보였으며, 이를 기초로 하여 침목 형상이 열차풍에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 직교배열표를 이용하여 자갈 비산 방지를 위한 침목 형상의 설계 민감도분석을 수행하였다. 해석 결과 하부유동은 침목의 높이에 가장 큰 영향을 받으므로 침목 위에 적절한 하이터를 설치하여 열차풍을 감소시킬 수 있다. 본 연구 결과는 기존 노선 및 신설 노선 건설시 자갈 비산 방지 대책으로서 응용될 수 있을 것으로 예상된다.

#### 2. 고속철도 차량의 하부 유동장 수치해석

##### 2.1 지배 방정식 및 해석 기법

지배방정식으로는 2차원 Navier-Stokes 방정식을 풀기 위해서 상용 프로그램인 Fluent의 Segregated Solution Method를 사용하였다. 이 방법은 정상상태 연속 방정식과 운동량 방정식을 다음의 식(1), (2)와 같이 쉽게 나타낼 수 있다.

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (1)$$

\*1 학생회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부  
\*2 비회원, 한국철도기술연구원 선임연구원  
\*3 비회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부  
\*4 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 교수  
\*E-mail : brkim78@snu.ac.kr

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = -\oint p \cdot d\vec{A} + \oint \vec{\tau} \cdot d\vec{A} + \int_V \vec{F} dV \quad (2)$$

$\vec{F}$ 는 고유 벡터,  $\vec{\tau}$ 는 응력텐서이다

Segregated Solution Method는 연속방정식과 운동량방정식을 선형화해서 반복된 계산을 통해서 해가 수렴을 할 때까지 푸는 방법으로 각각의 단계는 Fig. 1에서 보여주고 있다.

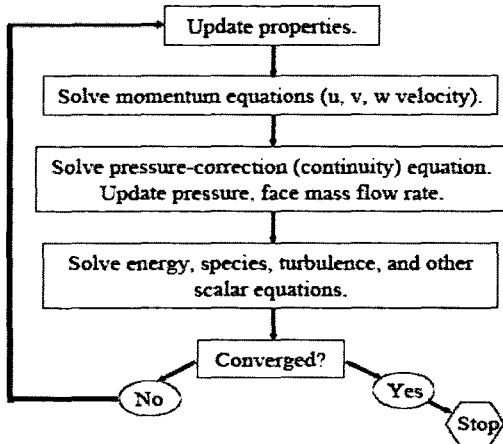


Fig. 1 Segregated Solution Method 순서도

연속방정식에서 SIMPLE 알고리즘을 통해서 압력 보정식을 구하였으며, 난류 모델을 k-ε 모델을 사용하였다.

### 2.2 격자계와 경계조건

열차풍이 가장 강하게 나타나는 곳은 열차의 중심 부분으로 이는 실험을 통해서도 확인할 수 있다[2]. 따라서 이곳을 중심으로 2차원 침목 형상을 고려한 열차 하부유동을 해석하기 위해 격자를 구성하였다. Fig. 2는 수치해석에 사용한 격자계와 경계조건을 나타낸 그래프이다. 실제 열차 하부는 복잡한 형상을 하고 있지만 본 연구는 수치해석에서의 침목의 영향만을 고려하기 위해 열차하부는 평판으로 가정하였다.

격자는 실제 침목 형상과 동일하게 구성하였으며, 유동특성이 급격하게 변하는 침목 앞쪽과 뒤쪽부근, 그리고 벽면부근에서 격자를 집중시켰으며, 총 격자 수는 11,900개이다. 경계조건은 열차 하부는 moving wall 조건을 부여하였고, 완전 전개 유동으로 가정하여 속도 성분이 침목이 좌우로 계속 반복되는 가정에 따라서 식(3)과 같은 주기조건을 주었다.

$$\begin{aligned} u(\vec{r}) &= u(\vec{r} + \vec{L}) = u(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \\ u(\vec{r}) &= u(\vec{r} + \vec{L}) = u(\vec{r} + 2\vec{L}) = \dots \end{aligned} \quad (3)$$

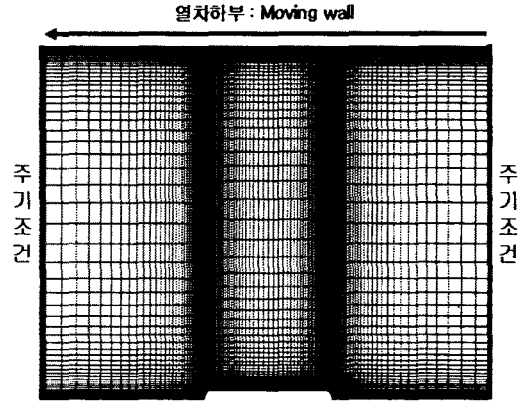


Fig. 2 격자계와 경계조건

### 2.3 수치해석 결과 및 분석

Fig. 3은 수치해석의 결과와 실험치[2]를 비교한 그래프이다. 실험치[2]는 자갈면 위 1cm 지점에서부터 수직방향으로 측정된 것으로 수치해석 결과와 속도분포가 거의 일치함을 알 수 있다.

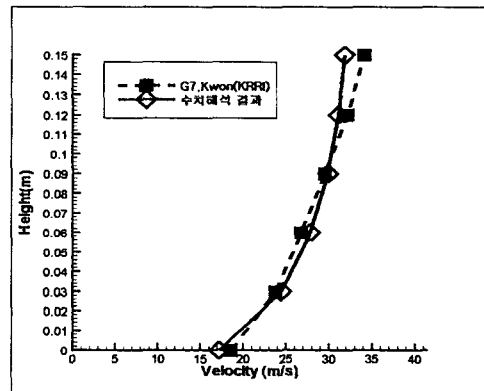


Fig. 3 실험치와 비교

Fig. 4는 침목 앞전 부근의 속도 분포를 나타낸 그림이다. 침목 앞전부근에서 가속되는 영역이 존재하게 되는데, 이는 침목의 형상으로 인해 단면적이 줄어든 효과가 발생하기 때문이며, 이 영역에서 자갈비산의 가능성이 가장 높을 것으로 예상된다. 반면 침목 바로 앞의 자갈 면에서는 침목에 의해 유동이

막혀 정체되는 영역이 발생하는데, 이 부분에서는 자갈 비산의 가능성이 상대적으로 낮다.

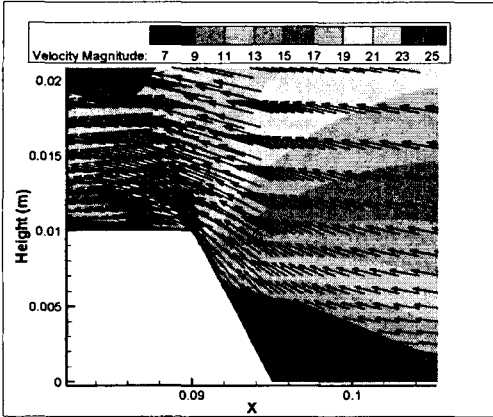


Fig. 4 침목 부근의 속도분포

위 수치모델을 바탕으로 침목의 높이와 열차의 속도에 따른 하부유동 패턴 변화를 알아보기 위하여 더 자세한 수치 해석을 실행하였다. Fig. 4는 자갈 위에서 침목 높이에 따른 열차풍의 속도를 나타낸 그래프이다. 높이가 증가할수록 열차풍이 감소됨을 알 수 있는데, 이것은 침목이 높아짐에 따라 자갈 위에서 침목의 앞과 뒤에서 정체되는 영역이 넓어지기 때문이다.

### 3. 설계 민감도분석

하부 유동장 감소를 위한 침목 형상의 설계를 위하여, Fig. 5에서와 같이 침목 형상에 영향을 주는 침목의 높이(H), 침목 하단의 폭(D), 침목과 침목 사이의 거리(G)를 3수준으로 선택하여, 다구찌 직교배열표를 만들어 설계민감도 분석을 수행하였다.

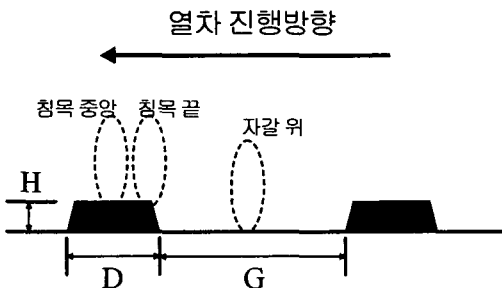


Fig. 5 설계민감도 분석을 위한 침목 형상

Fig. 6은 총 9가지 경우에 대한 수치 해석을 바탕으로 얻어진 SN(Signal to Noise ratio)비를 신뢰도 95%로 나타낸 그래프이다. 침목의 높이는 현재보다 증가시키고, 침목의 폭과 침목 사이의 간격은 줄일수록 속도가 감소하는 것을 알 수 있으며, 하부유동속도는 침목의 폭과 간격에 비해 침목 높이에 많은 영향을 받는 것으로 보인다.

Table 1 제어인자 분류 수준

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

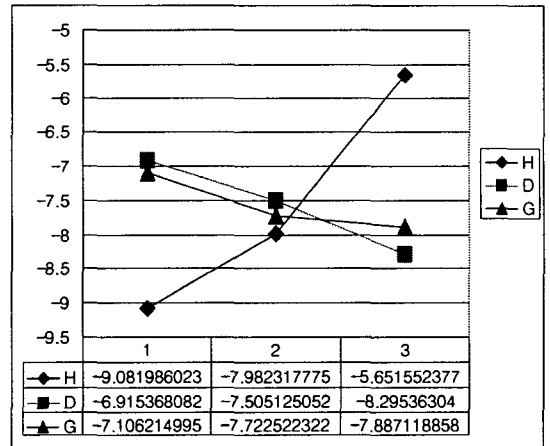


Fig. 6 자갈 위에 대한 SN비의 95% 신뢰구간 그래프

분석 결과 속도나 위치에 관계없이 침목의 높이를 높이고 폭과 간격을 줄일수록 하부 유동 속도를 감소시키는 것으로 예측되었다.

이와 같은 결과가 발생하는 이유는 침목의 높이를 높여 박리 영역을 늘리고 침목의 간격을 줄여줌으로써 자갈이 있는 영역을 모두 박리영역에 포함시키게 되면 하부 열차풍이 크게 감소하게 되기 때문이다.

### 4. 하이터 설치시 유동특성

현재 기존선로에서 자갈 비산을 방지하기 위해 자갈과 침목 사이의 높이를 50mm를 유지하도록 지속적인 관리를 하고 있지만, 이것 역시 많은 작업 시간이 필요하여 노반 침하 등의 부작용이 있다. Fig. 7은 현재 일본에서 실행 중인 자갈비산 방지책중 하나인 침목 하이터의 개략도이다. 침목 하이터는 기존 선로의 침목 위에 고무재질의 구조물을 부착하여 자갈비산을 억제하는 칸막이 역할을 하는 것으로 비교적 고가이기는 하지만 궤도 보수에 지장을 주지 않으면서 작업시마다 분리하지 않아도 되는 장점이 있다.

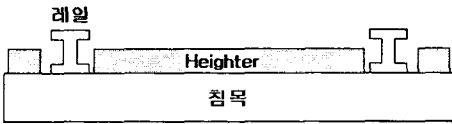


Fig.7 침목 Heifter 개략도

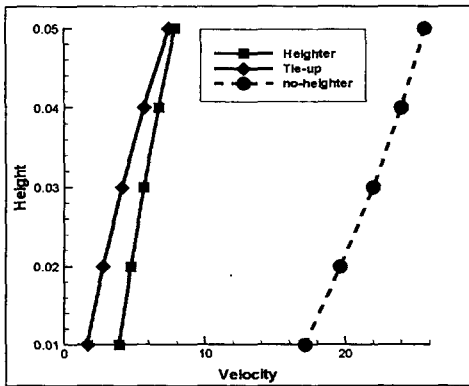


Fig.8 자갈 위에서의 속도 비교

Fig. 8은 0.01m의 침목에 0.05m의 하이터를 설치한 경우와 0.06m 침목, 0.01m의 침목의 세가지 경우에 대하여 자갈위에서의 속도를 비교한 그래프이고, Fig 9는 하이터를 설치한 경우와 침목의 높이를 높인 경우에 침목 앞쪽 부근에서의 압력분포를 비교한 그래프이다. 침목 하이터의 높이가 0.05m인 경우 설치하지 않았을 경우 약 73%의 하부 유동 속도 감소 효과를 보여주고 있으며, 침목의 높이를 0.06m로 높일 경우에는 약80%정도의 속도가 감소되는 것을 볼

수 있다.

하이터를 설치할 경우에 자갈위에서의 속도 감소 효과가 크고, 침목을 높이는 효과가 있기 때문에, 침목의 높이를 높였을 경우와 거의 비슷한 속도 감소를 보인다. 따라서 하이터를 설치하는 것만으로도 자갈 비산 방지에 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 단순히 높이만을 고려하였지만 이후 형상의 최적 설계를 통해 그 효과를 극대화할 수 있을 것으로 보인다.

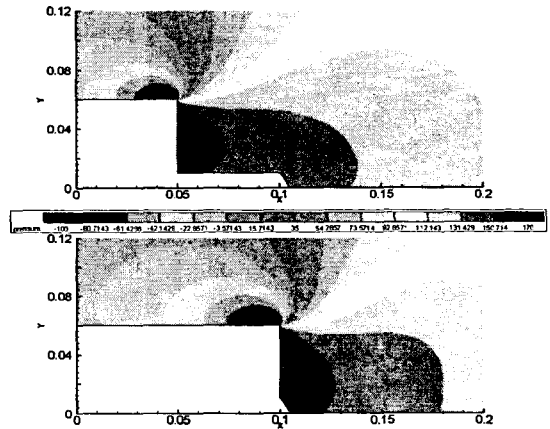


Fig.9 침목의 압력분포 비교

### 5. 결 론

본 연구에서는 자갈비산을 방지하기 위해 열차 하부 유동장의 2차원 수치해석을 수행하였다. 그리고 이를 바탕으로 하부 침목의 최적설계를 위한 설계민감도 분석을 수행하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론에 도달하였다.

열차의 하부형상에 대한 2차원 수치해석을 수행하여 고속열차에 대한 실험치와 일치함을 확인하였다. 해석 결과 열차 속도가 300km/h 일 때 노반 부근 대부분의 영역에서 자갈 비산이 일어날 가능성이 있으며, 침목의 높이를 증가시키면 열차풍이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이러한 수치해석 결과를 바탕으로 다구찌 직교배열표를 이용하여 하부 열차풍 속도 감소를 위한 설계민감도 분석을 수행하였다. 그 결과 열차의 하부 유동장 속도는 침목의 폭과 침목 사이 간격보다는 열차의 높이에 더욱 민감하므로 자갈 비산 방지를 위한 침목 형상 설계는 높이에 초점을 맞

추는 것이 바람직하다. 특히, 침목 하이터는 기존 선로에서 침목의 교체 없이 침목의 높이를 올리는 효과가 있으며, 향후, 침목 하이터 형상의 최적화를 통해 그 효과를 극대화할 수 있을 것으로 보인다.

## 후기

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

## 참고문헌

- [1] 권혁빈, 박춘수, 강형민, 이동호, 이도형, 2003, “자갈비산 메커니즘 규명을 위한 고속철도차량 하부 유동장 수치해석 및 시험” 한국철도학회 추계 학술대회 발표 논문.
- [2] 한국철도기술연구원, 2004, 시험선 구간 시운전에 따른 궤도 및 노반시설물의 성능 검증 보고서.
- [3] 권혁빈, 박춘수, 강형민, 이동호, 2003, “풍동실험을 통한 철도 노반상 자갈의 비산 특성 연구”, 한국 항공우주학회 추계 학술대회 발표 논문.
- [4] E. Wilemsen, 1997, “High Reynolds number wind tunnel experiments on trains”, *Journal of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics*, 69-71 pp.437-447.
- [5] 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.
- [6] 박성현, 2003, 현대실험계획법, 민영사.
- [7] Fluent Inc. Fluent user's manual.