

자갈비산 방지를 위한 하부유동장 해석 및 Heighter 설치의 타당성 검토

Numerical analysis of the under-body flow field of a train and Study of Heighter-effect for prevention of ballast-flying

김종용* 권혁빈** 김태윤* 구요전*** 이동훈****
Kim, Jong-Yong Kwon, Hyeok-Bin Kim, Tae-Yoon Ku, Yo-Cheon Lee, Dong-Ho

Abstract

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 track might be damaged. In this study, Numerical analysis of the under-body flow field of a 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. To apply the result of this study is useful to build a new high-speed-line might be expected.

1. 서 론

국내 독자기술로 개발된 한국형 고속열차는 최고 속도가 350km/h에 달하며 평균 300km/h 이상의 속도로 주행할 예정이다. 이런 고속주행 시, 열차하부에 유도된 고속의 열차풍으로 인한 자갈 비산의 가능성이 있으며, 이렇게 비산된 자갈은 자체 하부에 손상을 입거나 선로 주변의 안전사고를 유발할 수 있다. 일반적인 자갈 비산의 메커니즘은 노면에 놓인 자갈이 고속의 열차풍에 의해 1차 비산하게 되고, 비산된 자갈이 열차 하부와 충돌하여 2차 비산을 일으키는 것이다[1]. 이러한 자갈비산 방지대책에는 자갈을 그물이나 덮개로 덮거나 함성수직로 자갈을 고정시키는 방법과 침목의 형상을 조절하거나 Heighter와 같은 구조물을 설치하여 열차풍을 감소시키는 방법이 있다.

본 연구에서는 침목이 하부유동장에 주는 영향을 분석하여 그를 바탕으로 자갈비산 방지대책으로 침목 형상 설계와 Heighter의 설치의 유용성을 검증하고자 한다. 이를 위해 한국형 고속열차의 하부 유동장에 대한 수치해석을 수행하고, 실험데이터와의 비교를 통하여 수치해석 기법의 타당성을 보인 다음, 이를 기초로 하여 침목 형상이 열차풍에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 적교베열표를 이용하여 자갈 비산 방지를 위한 침목 형상의 설계 민감도분석을 수행하였다.

* 서울대학교 기계항공공학부, 정희환

** 한국철도기술연구원 철도안전연구지원센터 열전기술훈연구팀 선임연구원, 정희환

*** 서울대학교 기계항공공학부, 비희환

**** 서울대학교 기계항공공학부 교수, 정희환

2. 고속철도 차량의 하부 유동장 수치해석

열차 하부 및 선로, 노반 형상을 모두 고려한 유동장 해석에는 매우 많은 계산용량과 시간이 필요하지만 하부 유동에 가장 영향을 미치는 것은 침목의 형상으로 이를 고려한 2차원 수치해석만으로도 그 특성을 충분히 파악할 수 있으므로, 침목 형상을 고려한 2차원 수치해석을 수행하였다.

2.1 격자계와 경계조건

그림 1은 열차의 중심부분에서의 수치해석 개략도를 나타낸 그림이다. 열차풍이 가장 강하게 나타나는 곳은 열차의 중심 부분으로 이는 실험을 통해서도 확인할 수 있다[2]. 따라서 이곳을 중심으로 2차원 침목 현상을 고려한 열차 하부유동을 해석하기 위해 격자를 구성하였다. 그림 2은 수치해석에 사용한 격자계와 경계조건을 나타낸 그래프이다. 실제 열차 하부는 복잡한 형상을 하고 있지만 본 연구의 수치해석에서는 침목의 영향만을 고려하기 위해 열차하부는 평판으로 가정하였고, 격자는 실제 침목 형상을 동일하게 구성하였으며, 총 격자 수는 11,900개이다. 경계조건은 열차 하부는 moving wall 조건을 부여하였고, 완전 전개 유동으로 가정하여 침목이 좌우로 계속 반복되는 주기조건을 주었다.

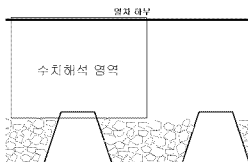


그림 1 수치해석 개략도

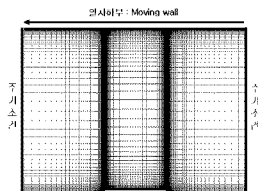


그림 2 격자계와 경계조건

본 연구에서는 공력 수치해석 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하여 해석을 수행하였다. 열차의 주행속도 300km/h는 마하 수가 약 0.25이므로 비압축성 유동으로 볼 수 있으므로, 2차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 지배 방정식으로 사용하였고, 난류 모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 대차부의 돌출부에 의한 유동 교란을 고려하기 위해 기존의 연구 결과를 참고하여 적절한 압력구배를 주기조건에 가하였다.

2.2 수치해석 결과 및 분석

그림 3은 수치해석의 결과와 실험치를 비교한 그래프이다. 실험치[2]는 자갈면 위 1cm 지점에서 수직방향으로 측정된 것으로 자갈면에서 수직방향으로 멀어질수록 속도가 증가하는 경향이라든지 속도분포가 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 4는 침목 앞전 부근의 속도 분포를 나타낸 그림이다. 침목 앞전부근에서 가속되는 영역이 존재하게 되는데, 이는 침목의 형상으로 인해 난민직이 줄어든 효과가 발생하여 이 영역에서 자갈 비산의 가능성이 가장 높을 것으로 예상된다. 반면 침목 바로 앞의 자갈 면에서는 침목에 의해 유동이 마하 정제되는 영역이 발생하는데, 이 부분에서는 자갈 비산의 가능성이 상대적으로 낮다.

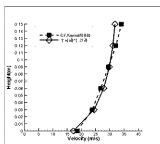


그림 3 선형지와 비교

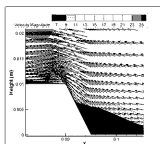


그림 4 침목 부근의 속도분포

그림 5는 침목의 앞면과 침목 위의 중앙 그리고 자갈 위에서 수직방향의 속도 분포를 나타낸 그래프이다. 상대적으로 자갈 위에서 속도가 낮고 침목 위와 침목 앞 끝에서 높지만 전체적으로 20~40m/s의 속도 분포를 나타내고 있어 대부분의 영역에서 자갈 비산의 가능성이 존재하고 있다.

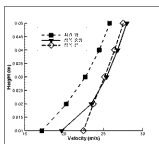


그림 5 수직방향 속도 분포

위 수치모형을 바탕으로 침목의 높이와 열차의 속도에 따른 하부유동 세턴 변화를 알아보기 위해 여러 가지 수직 해석을 진행하였다. 그림 6은 자갈위에서 침목 높이에 따른 열차풍의 속도를 수직방향으로 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보듯이 높이가 증가할수록 열차풍이 감소됨을 알 수 있는데, 이것은 침목이 높아짐에 따라 자갈 위에서 침목의 앞과 뒤에서 생성되는 영역이 넓어지기 때문이다.

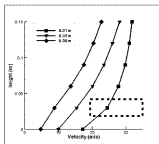


그림 6 침목높이에 따른 속도 변화

그림 7은 열차 속도 변화에 대한 하부에서 유도된 열차풍의 속도 그래프이다. 침목 영역은 자갈 비산이 발생할 가능성이 있는 속도 영역으로 자갈의 평균 변형인 3015mm의 높이에서 비산 가능성이 일계속도인 20m/s 이상이 되는 곳이다. 열차의 속도가 증가할수록 하부에서 열차풍의 속도가 증가하여 하부유동의 속도가 자갈 비산이 일어날 가능성이 있는 일계속도를 넘어 버리는 것을 알 수 있다.[5]

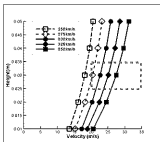


그림 7 열차속도에 따른 속도변화

침목의 높이가 높아질수록, 열차의 속도를 감소할수록 열차풍의 속도가 감소하는 것을 알 수 있다. 그러므로 열차의 속도를 낮추거나 침목 형상을 변경하여 자갈비산의 가능성을 낮출 수 있을 것으로 보이지만 고속철도의 운용 목적 상 열차의 속도를 낮추는 것은 비경제적이므로 열차의 속도를 유지한 채 침목 형상을 변경해야 할 것으로 보인다.

3. 하부 유동장 감소를 위한 설계 민감도분석 수행 및 결과 검증

하부 유동장 감소를 위한 침목 형상의 설계를 위하여 다구적 적교매엽표를 이용하여 설계민감도 분석하였다. 그림 8에서의 같이 광목 형상에 영향을 주는 침목의 높이(H), 침목 하단의 폭(D), 침목과 침목 사이의 거리(G)를 3 수준으로 선제하여 적교매엽표(표2)를 만들어 설계민감도 분석을 수행하였다. 열차의 주행 속도는 300km/h, 350 km/h의 두 경우에 대해 해석하였다.

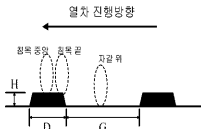


그림 8 설계민감도 분석을 위한 침목 형상

표 1 세이언자 분류 수준

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

그림 9는 총 9가지 경우에 대한 수치 해석을 바탕으로 얻어진 SN(Signal to Noise ratio)비율 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.

표 2 3개의 제이인자에 대한 3수준 직교배열표

	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

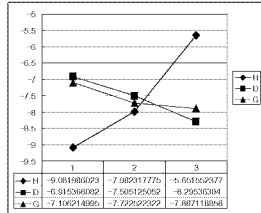


그림 9 자간 위에 대한 SN비의 95% 신뢰구간 그래프

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

이와 같은 결과가 발생하는 이유는 침목이 높아짐에 따라 침목 앞, 뒷부분에 Cavity 유동이 발생하여 박리영역이 자갈면을 덮어 버려 매우 느린 유동영역 내에 자갈 면이 포함되므로 높이를 높여 박리 영역을 늘리고 침목의 간격을 줄여줌으로써 자갈이 있는 영역을 모두 박리영역에 포함시키게 되면 하부 열차풍이 크게 감소하게 되는 것이다.

4. Heighter 설치의 타당성 검토

이러한 Cavity 유동을 발생시키기 위해서는 침목의 높이를 증가 시키면 되지만, 기존 선로의 침목들을 모두 교체하는 것은 불가능하며, 신설 노선에서도 침목의 높이, 폭이나 간격을 조절하는 것은 많은 비용이 들게 되므로, 침목을 교체하는 방식이 아닌 다른 대안이 필요한 것으로 보인다. 현재 기존선로에서 자갈 비산을 방지하기 위해 자갈과 침목 사이의 높이를 50mm를 유지하도록 계속적인 관리를 하고 있지만 이것 역시 많은 작업 시간이 필요하여 열차의 운행에 방해를 가하는 등의 부작용이 있다. 그림 10는 현재 일본에서 선행 중인 자갈비산 방지책중 하나인 침목 Heighter의 개략도이다. 침목 Heighter는 기존 선로의 침목 위에 고무재질의 구조물을 부착하여 자갈비산을 억제하는 칸막이 역할을 하는 것으로 비교적 고가이기는 하지만 제도 보수에 지장을 주지 않으면서 작업 시마나 분리하지 않아도 되는 장점이 있다.

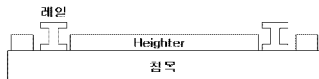


그림 10 침목 Heighter 개략도

침목 Heighter를 설치할 경우 침목을 높이는 결과와 가지므로, 침목 Heighter의 높이가 50mm 인 경우 선지하지 않았을 경우의 속도 대비 약 60%의 하부 속도 감소 효과를 보여주는 것으로 수치 해석 결과가 나왔다. 본 연구에서는 단순히 높이만을 고려하였지만 이후 형상의 최적 설계를 통해 그 효과를 극대화할 수 있을 것으로 보인다.

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.

고속열차의 2차원 수치해석을 통해 침목 위나 끝 부분의 속도가 자갈면 위의 속도보다 높으므로 이 부분에서 자갈 비산의 가능성이 높다는 것을 알 수 있다. 열차의 하부형상을 단순화하여 수치해석을 하였으므로 전두부의 영향과 복잡한 하부 형상에 의해 발생하는 실제 유동장과는 차이가 발생하게 되고, 이를 보완하기 위해 기존의 연구 결과를 바탕으로 유동장의 앞뒤에 압력구배를 적용하여, 그 결과 개발중인 한국형 고속열차의 실현치와 수치해석 결과치가 일치함을 확인하였다. 해석 결과 열차 속도가 300km/h 일 때 노반 부근 대부분의 영역에서 자갈 비산이 일어 날수 있는 가능성이 있는 것으로 예상되며, 열차의 속도를 낮추거나 침목의 높이를 증가시키면 열차풍이 감소하는 것을 알 수 있었다. 수치해석결과를 바탕으로 다구체 적교배열표를 이용하여 하부 열차풍 속도 감소를 위한 설계민감도 분석을 수행하였다. 그 결과 침목의 높이는 증가시키고, 침목의 폭과 간격을 감소하는 것이 하부 열차풍의 속도를 감소시킬 것으로 예상되며, 열차의 하부 유동장 속도는 침목의 폭과 침목 사이 간격보다는 열차의 높이에 더욱 민감하므로 자갈 비산 방지를 위한 침목 형상 설계는 높이에 초점을 맞추는 것이 바람직할 것으로 예상된다. 침목 Heighter는 기존 선로에서 침목의 교체없이 침목의 높이를 올리는 효과를 가지으며 향후 침목 Heighter 형상의 최적화를 통해 그 효과를 극대화할 수 있을 것으로 보인다.

본 연구의 결과는 기존선로의 자갈방지 대책 (Heighter 설치)과 향후 신설되는 고속철도 노선 건설작업 시 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. 권혁민, 박준수, 강형민, 이동호, 이도형, "자갈비산 베커니즘 규명을 위한 고속철도차량 하부 유동장 수치해석 및 시험" 한국철도학회 추계 학술대회 발표 논문, 2003
2. 한국철도기술연구원 (2004년), 시험선 구간 시운전에 따른 제도 및 노반시설물의 성능검증 보고서
3. 권혁민, 박준수, 강형민, 이동호, "풍동실험을 통한 철도 노반상 자갈의 비산 특성 연구", 한국항공우주학회 추계 학술대회 발표 논문, 2003
4. E. Wilemsen (1997년), "High Reynolds number wind tunnel experiments on trains", Journal of Wind Eng. and Ind. Aerodynamics, 69-71 pp. 437-447
5. Peters, J-L. (1983년), "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, 현대실형제회법, 민영사, 2003