

자갈 종류 및 하부 유동 조건에 따른 자갈비산 확률 분석 Ballast Flying Probability Analysis for Ballast Types and Underbody Flow Conditions

노주현* · 구요천* · 윤수환* · 박훈일* · 권역빈** · 이동호[†]

Joo-Hyun Rho · Yo-Cheon Ku · Su-Hwan Yun · Hoon-Il Park · Hyeuk-Bin Kwon · Dong-Ho Lee

Abstract A ballast-flying probability is suggested for various ballast types, heighter types and underbody flow conditions as train speeds. The average speed of measured points is converted to the ballast-flying probabilities of BFPF which come from wind tunnel test data. Underbody flow fields are numerically simulated for the various conditions. The results show that the ballast-flying probability is steeply increased as train speed increased, and reaches a value of 87% at 350 km/h train speed. And the differences of probabilities among the ballast shapes are considerably high. The upper surface of heighter or tie is most probable area. Through this study, the ballast-flying Sensitivities with heighter was defined to understand the characteristics of ballast-flying probability on various conditions. And the ballast-flying probability can be reduced by the heighter.

Keywords : High speed train, Ballast-flying probability, Sensitivity analysis, Numerical simulation, Heighter

요 지 자갈비산에 대한 위험성을 평가하는 한 방법으로 열차 하부 각 지점에서 다양한 자갈 종류 및 열차 속도에 따라 자갈 비산 확률을 파라메타로 제시하였다. 이를 위하여 풍동실험 결과를 바탕으로 한 확률계수 BFPF를 이용하였으며, 다양한 조건의 열차 하부 영역에 대한 수치해석을 수행하여 각 조건에 따른 각 지점의 자갈비산확률을 검토하였다. 열차 속도증가에 따라 비산확률이 급격히 증가하고, 속도가 350 km/h가 되면 자갈비산 확률이 87%로 증가하였다. 또한 높힘침목을 적용하였을 경우와 비교를 통해, 다양한 조건에서의 자갈비산 확률에 대한 민감도를 분석하여 자갈형태 및 높힘침목 형태에 따른 변화 특성을 분석하고 높힘침목이 자갈비산 위험을 억제할 수 있음을 확인하였다.

주 요 어 : 고속열차, 자갈비산 확률, 민감도 분석, 전산시뮬레이션, 높힘침목

1. 서 론

전 지구적인 환경 문제의 대두로 인하여 열차 운송 시스템은 친환경성이 높은 대안으로 판단되고 있으며 새롭고 다양한 연구 개발이 요구되고 있다. 이에 따라 유럽연합, 미국, 일본 등의 선진국 및 국내에서도 효율적인 차세대 고속열차 시스템에 대한 관심이 증가하고 있으며 신규노선 등이 검토되고 있다. 이 결과 유럽의 TGV, ICE 일본의 신간선, 그리고 국내 HEMU-400X, KTX-II 등 차세대 모델에

대한 연구 개발이 지속되고 있고 특히 철도시스템의 고속화와 안정성, 친환경성 등에 대한 다방면의 연구가 검토되고 있다. 이와 같이 열차의 초고속화에 따라 주행안정성 및 환경소음, 공기역학적 문제는 더욱 중요한 검토사항으로 주목받고 있으며 이를 해결하기 위한 원천기술 연구는 반드시 필요하다[1,2].

이러한 문제 중의 하나로, 열차가 고속으로 주행하는 경우, 강한 하부 유동의 교란에 의해 선로 주변의 자갈이 비산하는 현상이 발생하게 된다. 이렇게 비산된 자갈이 다시 열차 하부 구조물과 부딪히게 되면 강한 속도로 2차 비산함으로써 열차 하부나 차륜의 파손, 또는 터널 내에서 유리창 파손 등을 유발할 수 있으며, 일부 유사 피해가 보고되고 있다[3].

그동안 이러한 자갈비산에 대한 연구는 주로 열차 하부

[†] 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 교수, 항공우주신기술연구소
E-mail : donghlee@snu.ac.kr
TEL : (02)880-7386 FAX : (02)882-7927

* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부

** 정회원, 한국철도기술연구원

유동 해석을 통해 유속을 감소시키는 데에 집중되어 있었으며 높임침목을 이용하여 하부 유속을 감소시키려는 연구도 같은 맥락이라 할 수 있다[4-9]. 또한 자갈비산의 위험을 예측하기 위해 자갈비산과 하부 유속의 관계를 풍동 실험을 통해 자갈비산 임계속도 측정을 시도하기도 하였다 [10,11]. 이를 통해 자갈이 최초로 움직이는 자갈비산 최소 임계속도와 자갈이 모두 날리는 자갈비산 최대 임계속도를 찾아내었으며, BFPF(Ballast-Flying Probability Factor)의 개념이 제안되었다[8].

본 연구에서는 자갈비산에 대한 위험성을 평가하기 위한 방법으로 열차 하부 각 지점에서 다양한 자갈 종류 및 열차 속도에 따라 자갈 비산 확률을 구하여 제시하였다.

이를 위하여 풍동실험 결과를 바탕으로 확률계수를 검토하였으며, 검토된 확률 계수에 따른 위험도 평가를 다양한 조건의 열차 하부 영역에 대한 수치해석을 수행하여 각 조건에 따른 각 지점의 자갈비산확률을 예상하고 자갈 종류 및 열차 속도에 따라 비교 검토하여 자갈비산 위험성을 확률 파라메타 로 평가하였다. 또한 높임침목이 설치된 경우 높임침목이 설치되지 않은 경우와 비교함으로써 높임침목의 효용성을 검증하였다.

2. 자갈비산 임계속도 및 확률계수[10,11]

자갈비산 임계속도를 결정하기 위해 풍동실험 결과를 이용하였다[9]. 이 실험에서는 자갈을 그 형상에 따라 Table 1의 Shape과 같이 3가지로 분류하였다. 여기서 Type A는 둥근 형태로 유동의 방향에 따라 공력특성이 큰 차이가 없는 형상이고 Type C는 유동의 방향에 따라 민감하게 반응하는 형상이며 Type B는 그 중간 형상이다. 이렇게 분류한 자갈에 대해 풍동실험을 실시한 결과는 Fig. 1과 같다. 여기서 검은색 심볼은 자갈이 최초로 이동하기 시작하는 유동 속도이고 흰색 심볼은 모든 자갈이 날리는 속도이다. 이 실험결과를 바탕으로 자갈의 유형과 무게별 임계속도를 산출한 결과는 Table 1과 같다. Table 1에서 V_{min} 과 V_{max} 는 질량별로 자갈이 이동하기 시작하는 자갈비산 최소 임계속도와 자갈이 모두 날리는 자갈비산 최대 임계속도를 나타내며 m_1, m_2, m_3, m_4 는 자갈을 질량 별로 분류한 것으로 각각 0~50g, 50~100g, 100~150g, 150~200g을 나타낸다.

유동에 민감한 Type C의 자갈이 가장 낮은 속도에서 비산을 시작하며 Type A가 가장 높은 속도에 비산을 시작한다. 전체적으로는 약 20m/s 근처에서 자갈비산이 시작되며 34.5m/s 이상이 되면 모든 자갈이 날리는 것을 확인할 수 있다.

Table 1. Critical Velocity of Ballast-flying [m/s]

Type	Shape	V	m_1	m_2	m_3	m_4
A		V_{min}	22.5	24	28	23
		V_{max}	34	34.5	34	34
B		V_{min}	20	22	20	20
		V_{max}	35	34	34	34
C		V_{min}	18	21	21	20
		V_{max}	26.5	29	34	34

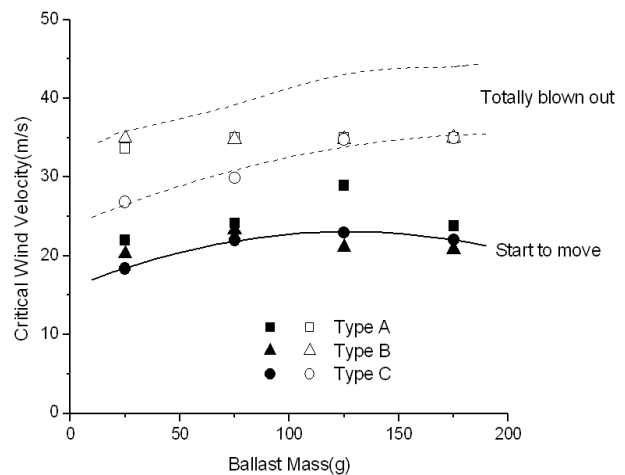


Fig. 1. Minimum and maximum velocity of ballast-flying[8]

풍동실험을 통해 구한 자갈의 최소, 최대 임계 속도를 바탕으로 자갈비산 확률계수 도출을 시도하였다. 아래의 식 (1)은 자갈의 비산 확률을 정량적으로 평가하기 위해 정의된 자갈비산확률계수(BFPF, Ballast-Flying Probability Factor)를 나타낸다[10].

$$BFPF = \begin{cases} 0 & (V < V_{min}) \\ \int_{m_1}^{m_2} \frac{V - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \frac{dm}{m_2 - m_1} & (V_{min} < V < V_{max}) \\ 1 & (V_{max} < V) \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 V 는 선로표면 근처의 열차풍 평균유속을 나타낸다. V 가 V_{min} 보다 작을 경우에는 자갈이동이 일어나지 않으므로 자갈비산이 일어날 가능성이 없다고 볼 수 있으므로 $BFPF=0$ 으로 생각할 수 있다. 또한 V 가 V_{max} 보다 클 경우에는 모든 자갈이 이동한다고 볼 수 있으므로 $BFPF=1$ 로 생각할 수 있다. V 가 V_{min} 과 V_{max} 사이에 있을 경우에는 속도에 1차 근사한다고 가정하여 식 (1)에 의해 계산하도록 하였다.

3. 지갈비산 확률 분석

높임침목의 공력특성 평가[9]를 위해 검토된 열차하부와 동일한 형상을 가지고, 다양한 조건에서의 자갈 비산의 위험도를 예측하기 위하여 앞에서 언급한 자갈비산 임계속도 [10]를 바탕으로 하부 유동속도와 비교하여 자갈 비산 확률 [11]을 정량화하였다. 이를 통하여 다양한 열차 주행 속도와 자갈의 형태를 파라메타로 하여 각각 비산 확률 결과를 비교하여 위험도를 검토하였다.

열차주행 속도별 하부 유동 특성 검토를 위해 전산 해석을 수행하였다. 침목에서 열차 하부까지의 높이는 418mm, 침목의 최대 폭은 190mm, 침목과 침목 사이 간격은 480mm이고, 자갈에서 침목까지의 높이는 10mm가 되도록 구성하였으며, 확률 분석을 위해 Fig. 2과 같이 중앙으로부터 침목 주변의 4지점($x_1 = 0\text{mm}$, $x_2 = 80\text{mm}$, $x_3 = 160\text{mm}$, $x_4 = 240\text{mm}$)에서 각각 5가지의 높이(10~50mm)에 대해 하부 유속을 추출하여 그 평균값을 사용하였다.

전산 해석을 위하여 약 16000개의 정렬 격자를 사용하였으며 침목과 높임침목의 모서리 부분은 격자를 집중하여 배치하였다. 수치해석은 상용 해석 프로그램인 Fluent를 사용하였으며 경계조건 및 지배방정식 등은 높임침목형상의 공력특성 평가[9]때와 동일조건으로 적용하였다. 열차 하부 형상조건이 변화하면 하부유동 속도도 따라서 변화하므로 각각의 열차 하부 형상에 따르는 유동 특성은 반드시 면밀히 검토 되어야 한다.

3.1 열차 주행속도에 따른 자갈비산 확률

먼저 열차의 주행속도에 따른 자갈비산 확률을 비교해보았다. Fig. 3~5는 자갈의 유형별로 열차의 속도에 따른 비산 확률을 나타내고 있다. 비교 위치에 따라 조금씩 변화폭은 다르지만 대체로 열차 속도에 따라 비산확률이 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 3에서 Fig. 5까지 비교해 보면 속도에 따라 자갈비산 확률이 급격히 증가하게 되며, 특히 열차 주행속도가 350km/h 인 경우에는 열차 하부의 모든 영역에서 매우 높은 자갈비산 확률을 보이고 있다. 특히 침목의 윗면(x_1, x_2)에서 높은 확률로 비산할 수 있음을 나타내며 이것은 열차 하부에 의해 유도된 선로면의 열차풍 속도가 가속되는 영역과 동일 위치이다.

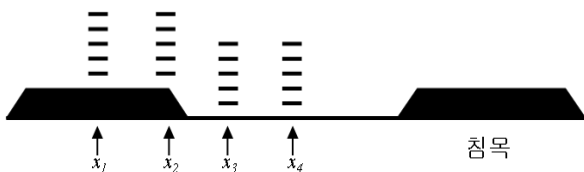


Fig. 2. Underbody flow measuring points

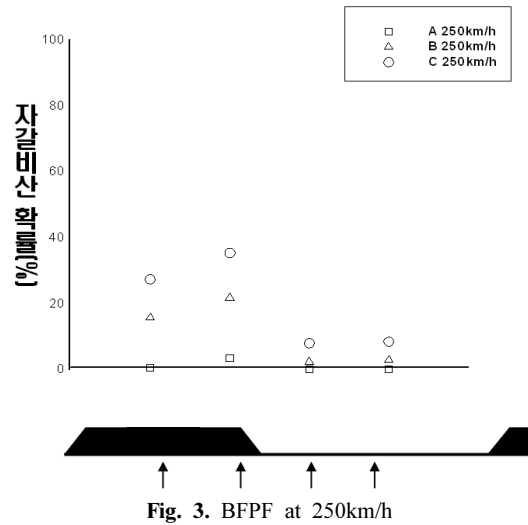


Fig. 3. BFPF at 250km/h

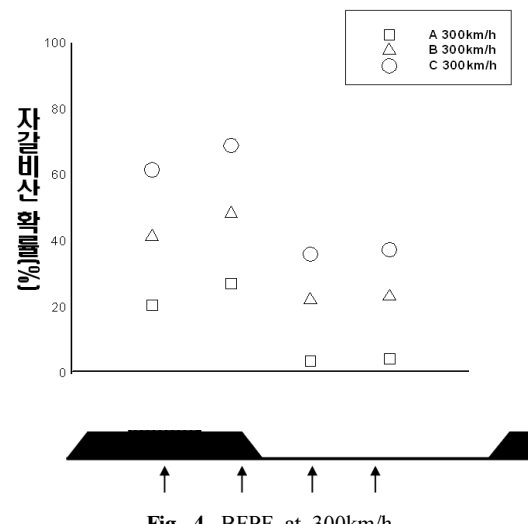


Fig. 4. BFPF at 300km/h

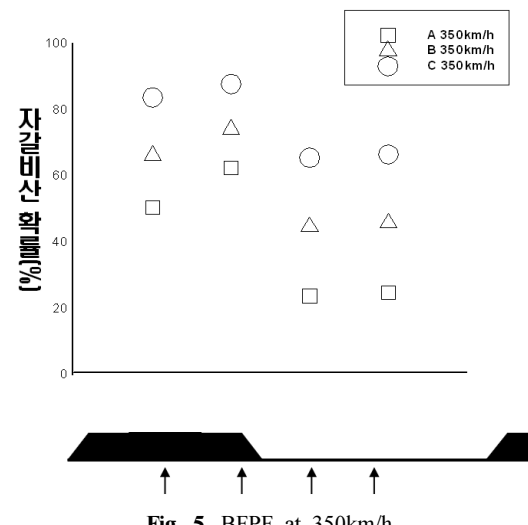


Fig. 5. BFPF at 350km/h

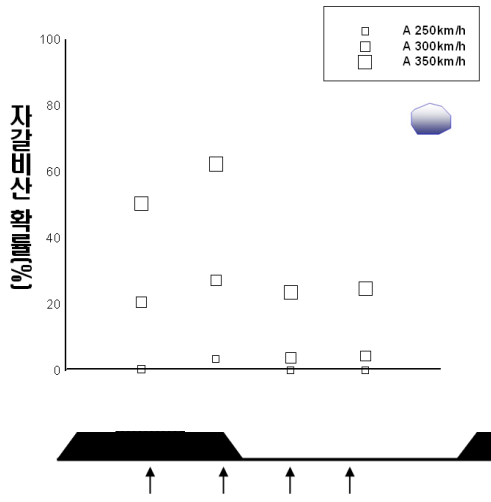


Fig. 6. BFPF of type A ballast

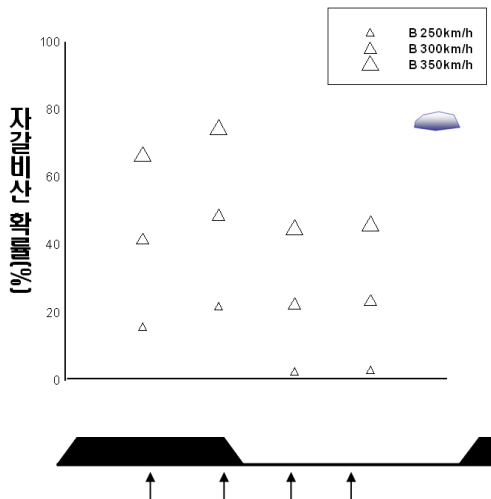


Fig. 7. BFPF of type B ballast

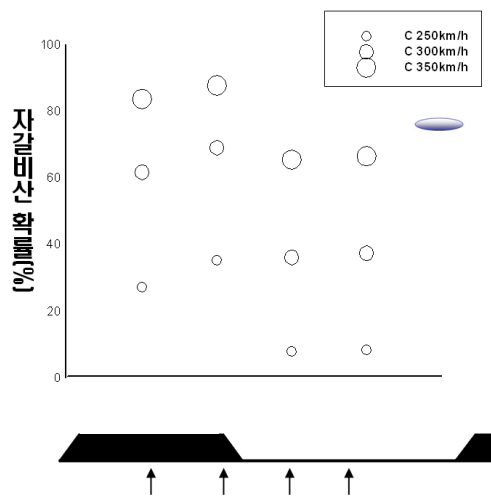


Fig. 8. BFPF of type C ballast

3.2 자갈 유형에 따른 자갈비산 확률

먼저 자갈의 유형에 따라 자갈비산 확률을 비교해보았다. Fig. 6~8은 자갈 형태 A~C에 대해 Fig. 2에서 정의한 각 지점에서의 자갈비산 확률을 도시한 그림이다. 각 인덱스의 상대적 크기는 열차 주행속도를 의미하며 그 형상은 Type A, B, C에 따라 각각 사각형, 삼각형, 원형으로 표시하였다.

Fig. 6에서 열차가 250km/h의 속도로 주행하는 경우 Type A의 자갈은 모든 지점에서 거의 움직이지 않음을 알 수 있다. 하지만 Fig. 7의 Type B나 Fig. 8의 Type C의 자갈은 250km/h 주행시 침목 윗부분에서 20~40% 정도의 비산확률을 보여주고 있다. 이것은 자갈이 침목에 상부에 노출되는 경우 자갈의 형태에 따라서 적층되어 있는 위치보다 빠른 유동속도에 영향을 차별적으로 민감하게 받을 수 있음을 나타낸다. 열차가 350km/h의 속도로 주행하는 경우 Type C는 침목 위에서 80% 이상의 비산 확률을 보이고 있다. 이러한 비산확률은 위험한 상황을 야기할 수 있다고 판단할 수 있으며 공기역학적 효과 이외의 주기적 진동이나 돌풍 등 기타 불확실한 요인이 더하여져 2차 비산발생의 위험한 상황으로 발전할 가능성이 높음을 의미한다. 또한 침목 상부 영역은 마찰력도 기타 위치 보다 작기 때문에 속도가 증가함에 따라 자갈이 갑자기 구르거나 움직일 수 있고 이러한 현상은 다른 풍동실험[12]의 결과에서도 확인할 수 있다.

3.3 높임침목을 설치한 경우의 자갈비산 확률

높임침목은 자갈 궤도면의 유동 속도를 감소시킴으로써 자갈비산을 방지하기도 하고 날리는 자갈을 직접 막아주는 역할도 한다[5,6]. 높임침목이 설치된 경우의 자갈비산 확률의 변화를 알아보기 위해 높임침목이 있는 조건에서 동일한 속도별로 해석을 수행하였다. 높임침목의 높이는 차량하부와의 간섭 등으로 제한되므로 본 연구에서는 높임침목의 높이를 10mm로 고정하고 높임침목 단면 형태의 가로 세로비를 변화하기 위해 폭을 2.5mm, 5.0mm, 7.5mm, 10mm로, 변화시키면서 해석을 수행하여 자갈비산 확률 변화를 검토하였다.

열차 주행속도가 250km/h인 경우에는 높임침목이 없는 경우에도 모든 영역에서 비산확률이 40% 미만이었으며, 높임침목이 있는 경우에는 자갈비산 확률이 0로 감소한다. 따라서 열차 주행속도가 250km/h 이하인 경우에는 10mm 높이의 높임침목으로도 충분히 자갈비산을 방지할 수 있을 것으로 추정할 수 있다.

Fig. 9~11은 자갈 비산 확률이 가장 높은 주행속도 350 km/h 조건에서 높임침목이 설치한 경우의 자갈비산 확률

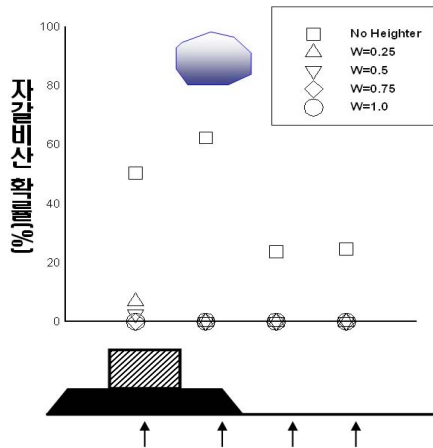


Fig. 9. BFPF of type A ballast with heighter (350km/h)

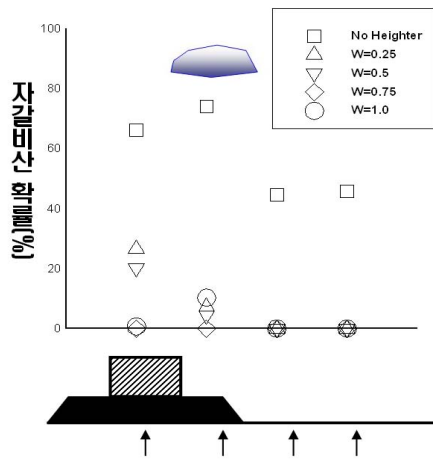


Fig. 10. BFPF of type B ballast with heighter (350km/h)

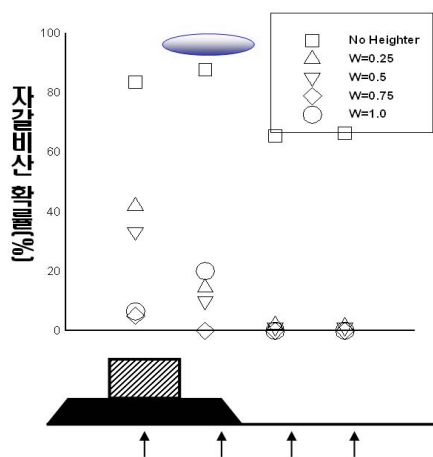


Fig. 11. BFPF of type C ballast with heighter (350km/h)

을 계산한 결과를 보여주고 있다. 열차 주행속도가 350 km/h라 하더라도 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 Type A의 자갈

에 대해서는 10mm 높이의 높임침목을 설치하면 비산을 충분히 억제할 수 있다. 하지만 유동에 민감한 Type B와 C는 약간의 자갈비산 확률을 보여주고 있다. Fig. 10과 Fig. 11은 높임침목 폭의 변화에 따라 Type B와 Type C 자갈에 대한 자갈비산 확률의 변화를 보여주고 있다.

높임침목이 설치되지 않은 경우에 비해 자갈비산확률이 현저히 감소됨을 확인할 수 있으며, 특히 자갈면 위(x_3, x_4)에서는 높임침목의 효과에 의해 자갈비산이 완전히 억제되고 있다. 그러나 비교적 유속이 빠른 침목이나 높임침목의 윗면(x_1, x_2)에서는 여전히 자갈이 비산할 확률이 있으며 Type C와 같이 납작하고 잘 날릴 수 있는 형태의 경우, 높임 침목이 있더라도 최대 비산확률은 약 45% 정도이다. 하지만 이 값도 높임침목의 폭이 7.5mm 이상이 되면 자갈비산을 충분히 억제할 수 있음을 보여준다. 따라서 Fig. 9~11의 결과에서 볼 수 있듯이 자갈비산 현상이 예상되는 선로에 자갈을 도포할 경우 Type B, C와 같이 납작한 형상보다는 Type A와 같이 둥근 자갈을 골라 도포한다면 비산 위험을 줄일 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

3.4 자갈비산 확률 민감도 분석

높임침목 폭 변화에 따른 비산확률 변화의 민감도를 분석하기 위하여 민감도를 f_B (최대 자갈비산 확률)과 h/w (높임침목의 종횡비)로 식 (2)와 같이 정의하고 각 조건에 따라 정리하면 Table 2와 같은 결과를 얻게 된다.

$$\frac{\partial f_B}{\partial w} = \frac{f_{B0} - f_{Bw}}{h/w} \quad (2)$$

Table 2. Ballast-flying Sensitivity with heighter (350km/h)

Type	Shape	W=2.5	W=5.0	W=7.5	W=10
A		14.5	31	48.7	65
B		12.5	27.5	55.5	75
C		10.5	26	61.5	87

Table 2의 결과에서 볼 수 있듯이, 높임침목 형태에 따라서는 전체적으로 침목의 폭이 커질수록 효과가 커짐을 확인할 수 있다. 또한 Type A 자갈은 좁은 형상의 높임 침목에서도 효과가 있지만 Type B, C의 형상과 같이 납작한 자갈 형태 즉, 쉽게 자갈비산이 발생할 수 있는 위험한 형태의 조건에서는 높임침목의 폭이 높이의 반 이상 되어야 억제 효과가 크게 나타남을 파악할 수 있다. 하지만 정사각형 형상이 되면 자갈형상에 의한 민감도 차이는 거의 무시할 수 있게 된다.

따라서 무조건 크고 넓게 만드는 것 보다는 효과적인 형상의 연구검토가 필요할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 자갈비산 위험성을 확률 파라메타로 평가하였다. 이를 위해 하부 유동에 대한 수치해석과 BFPF 계산을 수행하였다.

그 결과 열차의 주행속도에 따라 자갈비산 확률이 급격히 증가하여 350km/h의 속도로 주행하는 경우 최대 87%에 이르는 높은 비산확률을 나타내었다. 또한 자갈의 형태에 따라서는 납작한 형태의 자갈이 쉽게 비산확률이 증가하여 위험을 초래할 수 있음을 확인할 수 있었다.

이와 같은 자갈비산의 위험을 억제하기 위해 높임침목을 설치하게 되면 자갈비산확률은 급격히 감소하며 높이가 10mm, 폭이 7.5mm의 크기만으로도 350km/s 유동속도 조건에서 자갈비산확률을 87% 수준에서 5% 수준까지 낮추어 줄 수 있다.

마지막으로 각 조건에서의 결과 값 비교를 통해 자갈비산 확률에 대한 민감도를 정의하고 검토하여 자갈형태 및 높임침목 형태에 따른 자갈비산 확률 저감 효과를 분석하였다.

후 기

연구는 서울대학교 “차세대 기계항공시스템 창의설계 인력양성사업단” 및 국토해양부 “미래철도기술개발사업” 과제번호 07차세대고속철도A01)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이재춘(2009), “차세대 고속철도기술로 실현하는 ‘친환경 교통 강국’의 미래,” 철도저널, 제 12권, 제 4호, pp.4-5.
2. 엄진기(2009), “외국의 고속철도 네트워크 구축계획,” 철도저널, 제 12권, 제 3호, pp.29-31.
3. 권혁빈, 남성원, 김대상, 이일화, 한진석(2004), “고속철도 설비 낙하에 의한 자갈비산 방지대책 연구,” 한국철도학회 학술발표대회논문집, pp.77-82.
4. 건설교통부(2003), “고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술 개발(1차년도 연차보고서),” pp.495-536.
5. 건설교통부(2004), “고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술 개발(2차년도 연차보고서),” pp.353-392.
6. M. Yhshida, M. Uchida, N. Yaguchi, and N. Mifune(1992), “Countermeasures for ballast-flying phenomena caused by high-speed trains,” RTRI Report Vol. 6, No. 6.
7. 김종용, 권혁빈, 김태운, 구요천, 이동호(2004), “자갈비산 방지를 위한 침목 하부유동장 해석 및 Heighter 설치의 타당성 검토,” 한국철도학회 추계 학술대회 논문집, pp.209-209.
8. 구요천, 김종용, 윤수환, 노주현, 이동호, 권혁빈(2005), “하이터를 이용한 하부 열차풍 감소에 대한 연구,” 한국철도학회 추계 학술대회 논문집, pp.1241-1247.
9. 노주현, 김종용, 구요천, 윤수환, 권혁빈, 이동호(2009), “선로상 돌풍 감소를 위한 높임침목형상의 공력특성 평가,” 한국철도학회 논문집, 제 12권, 제 1호, pp.39-44.
10. 권혁빈, 박춘수, 강형민, 이동호, 이도형(2003), “풍동실험을 통한 철도 노반상 자갈의 비산 특성 연구,” 한국항공우주학회 추계 학술대회 논문집, pp.728-731.
11. 권혁빈, 박춘수(2005), “열차풍에 의한 고속선 자갈비산현상 연구,” 한국철도학회 논문집, 제 8권, 제 1호, pp.6-14.
12. 노주현, 김종용, 구요천, 윤수환, 권혁빈, 조동현, 이동호(2006), “돌풍 장치를 적용한 고속철도 선로 유동에 대한 실험 연구,” 대한기계학회 춘계학술대회, pp.1542-1547.

접수일(2008년 5월 29일), 수정일(2008년 10월 22일),
게재확정일(2009년 12월 14일)