

선로상 이물질 제거를 위한 자갈날림판 유동특성 연구

Flow Characteristics of the Ballast Blower for the Prevention a Foreign Object Damage on the Rail Road

노주현* 김덕영** 구요천* 윤수환* 이동호*** 권혁빈 ****
Rho, Joo Hyun Kim, Duck Young Ku, Yo Cheon Yun, Su Hwan Lee, Dong Ho Kwon, Hyeok Bin

ABSTRACT

The ballast or other objects may be located on the rail road by a lump of ice, repairing operation on the track, or the strong gust due to the high speed running of the train. When a train operated in this condition, it causes serious damages to the wheel, train, and structures near the track, or the secondary ballast flying. To remove these objects safely, a ballast blower is suggested which was attached under the train. Firstly, the numerical analyses are investigated to find out the basic flow characteristics of the ballast blower. Next, the performance of the ballast blower is verified by wind tunnel experiments. Through these studies, it is expected that the ballast blower can be applied practically.

Keyword : 고속철도, 차륜손상, 자갈날림판, 유동해석, 풍동실험, 열선유속계

1. 서론

2004년 KTX 고속전철이 개통된 이후 우리나라의 여객운송 및 물류이동에는 커다란 변화가 이루어졌으며 그 운용도 실제 생활에 잘 정착되고 있다. 더욱이 350km/h (G7고속전철), 400km/h 급의 다양한 고속전철이 개발, 검토되고 있는 이때 고속전철 운영에 대한 더욱 향상된 안전도 및 신뢰성에 대한 연구가 대두되고 있다. 고속전철의 운영 중 발생하는 전후방의 열차풍이나 강설, 빙괴, 유지보수작업 등에 의해 실제적으로 선로위에 자갈이나 기타 이물질이 위치할 수 있게 된다.^[1,2]

* 회원, 서울대학교, 기계항공공학부 박사과정

** 회원, 서울대학교, 기계항공공학부 석사과정

*** 책임저자, 회원, 서울대학교, 기계항공공학부 교수

**** 회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부 선임연구원

E-mail : dhlee@snu.ac.kr

TEL : (02)880-8051 FAX : (02)887-2662

이런 상태에서 열차가 자갈이 올라와 있는 선로 위를 주행하게 되면 차륜이 자갈에 부딪혀 심각한 손상을 입게 되며 심한 경우 차륜을 교체해야 하는 문제가 발생한다. 또한 자갈이 차륜과의 충돌로 인한 자갈 비산의 경우는 기타 이유에 의해 비산되는 경우에 비해 그 속도가 매우 빠를 것으로 예상되며, 이렇게 비산된 자갈은 선로 주변의 안전문제나 차량 하부 및 차체 손상 등의 심각한 피해를 일으킬 수 있다.^[3,4] 이러한 이유로 선로 위의 자갈을 안전하게 제거하기 위한 구조물인 자갈날림판(Ballast Blower)의 개념이 제시되었다.

특히 제시된 자갈날림판은 자갈을 직접적으로 부딪쳐서 자갈을 제거하는 방식이 강한 충격을 발생시키는 것과 비교하여 직접 레일 선상에 위치하지 않기 때문에 유동을 이용해 간접적인 충격으로 제거할 수 있으며 걸러내기 어려운 매우 작은 이물질이나 빙괴 등도 자연스럽게 제거할 수 있다. 이는 고속철도 운용 안전성 및 신뢰성을 향상시켜줄 수 있다. 제시된 자갈날림판의 개념은 그림1과 같다.

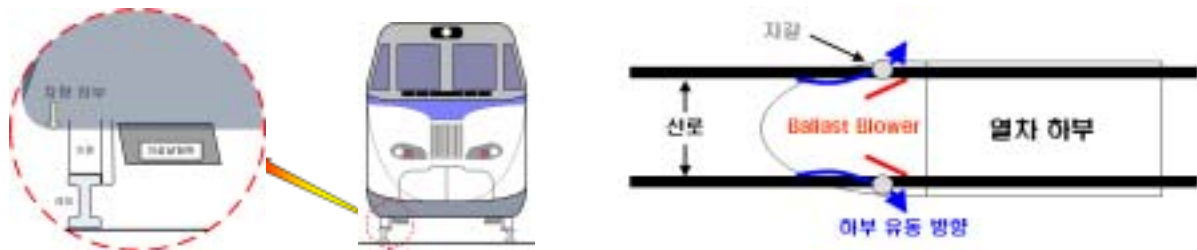


그림1 자갈날림판(Ballast Blower) 개념도

작용원리는 열차가 300km/h 이상의 고속으로 주행하게 되면 상대적으로 열차 앞쪽의 공기가 열차를 향해 동일한 속도로 접근해오는 것과 같은 효과를 갖는다. 따라서 이러한 고속의 상대 유동의 방향을 바꾸어 레일 위 자갈 방향으로 향하게 함으로써 레일 위의 이물질을 불어내는 것이다. 또한 하부유동은 차량과 자갈면 레일 등의 간섭으로 매우 복잡한 유동특성을 나타낸다.^[5] 따라서 자갈날림판은 전방에서 불어오는 유동을 열차 바깥쪽방향으로 효율적으로 전환시켜, 자갈을 제거할 수 있는 충분히 큰 유속이 유도되도록 고려되어야 한다.^[6]

우선 기본적인 구조물의 형상인 판형, 원통형 등에 대해 고려해보았으며 그 결과 판형 구조물이 가장 단순하며 효율적일 것으로 판단되어 자갈날림판의 형태를 판형으로 선택하였다.

2. 수치 해석

2.1 수치해석 모델링

자갈날림판의 3차원적 유동특성을 알아보기 위한 수치해석을 수행하였다. 열차 하부의 3차원 해석은 복잡한 형상으로 인해 많은 격자가 필요하며 이는 과도한 계산시간이 요구된다. 본 해석은 자갈날림판의 적용 가능성을 알아보기 위한 것이므로 열차 하부의 형상을 간략화해 모델링하고 레일을 제외한 다른 구조물은 수치해석에서 제외하였다. 자갈날림판에 비해 열차는 무한히 길다고 가정하였으며 전두부 및 후미부에 의한 영향은 제외하였다. 열차의 주행속도는 300km/h이며 바닥 면과 레일은 moving wall 조건을 사용하였다.

2.1.1 자갈날림판을 Z축으로만 회전시킨 경우 : Case-I

우선 자갈날림판을 z축으로만 30°, 45°, 60°회전하였다. 그림2는 자갈날림판의 크기와 위치를 표시한 그림으로 레일과의 충돌을 피하기 위해 레일 끝에서부터 약 0.05m 안쪽에 부착하였으며 자갈날림판의 크기는 가로 0.2m, 세로 0.328m 이고 격자수 250,000개이다.

2.1.2 자갈날림판을 Z축과 Y축으로 회전시킨 경우 : Case-II

그림2의 Case-I에서처럼 자갈날림판을 설치할 경우 허용한계 등의 문제와 날림판의 크기가 커져 구조

적인 문제들이 발생할 수 있으므로 자갈날림판의 크기는 줄이면서 그 효과를 발생하게 하는 자갈날림판의 부착 조건이 필요하다. 그 때문에 Case-I의 경우와는 달리 자갈날림판을 그림3과 같이 Z축뿐만 아니라 Y축 방향으로 회전시켜 Z방향의 속도성분을 발생시켜 주었다. 이를 통해 자갈날림판과 레일 사이의 안전거리를 확보함과 동시에 유동을 레일 방향으로 유도할 수 있을 것으로 판단하였다. 자갈날림판의 크기는 0.20m×0.20m 이고 레일 위의 자갈과 직접적으로 부딪치지 않게 하기 위해 레일 안쪽에 부착하였으며 유동 방향을 레일로 유도하기 위해 Y축과 Z축으로 똑같이 30°와 45°만큼 회전시켰다. 총 격자수는 약 436,000개이다.

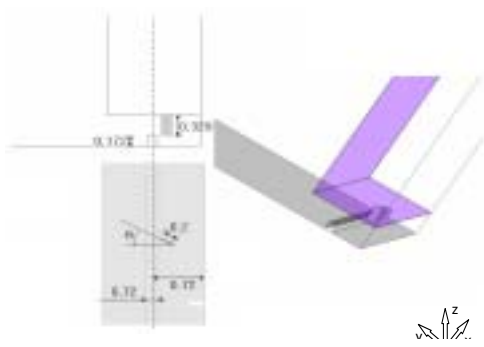


그림2 자갈날림판 위치(Case-I)

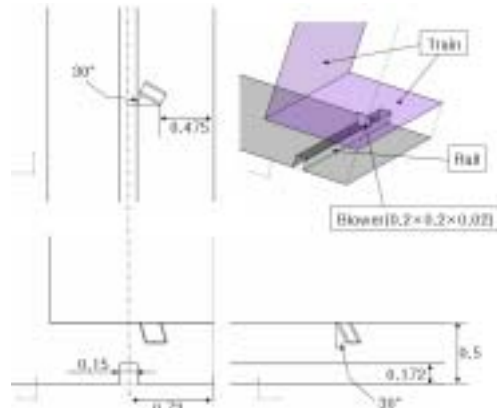


그림3 자갈날림판 위치(Case-II)

2.2 수치해석 결과

자갈 가운데 비교적 작고 가벼운 자갈이 레일 위에 올라갈 확률이 보다 높기 때문에 레일 위에서의 자갈비산 임계속도는 25m/s보다 작을 것으로 예상되며 따라서 자갈비산이 최초로 일어나게 되는 18m/s 이상의 영역을 모두 고려하였다.

2.2.1 Case-I의 해석 결과

그림4는 자갈날림판 주위의 압력분포와 유선을 나타낸 그림이다. 날림판 앞쪽에서부터 서서히 가속되고 자갈날림판에 의해 y방향으로 속도 성분이 발생하며 날림판 뒤쪽으로 후류가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림5는 레일 위에서 자갈날림판의 각도에 따른 속도 분포를 레일 길이 방향에 따라 나타낸 그래프이며 속도 측정 지점은 레일 중심에서 수직 방향으로 0.03m 위이다. 그림에서와 같이 각이 증가함에 따라 유도되는 속도는 감소하는 것을 알 수 있으며 45°이상일 경우 유도되는 y방향의 속도가 자갈비산의 임계속도인 18m/s이하로 떨어져 자갈날림판 부착의 효과가 없어지는 것을 알 수 있다.

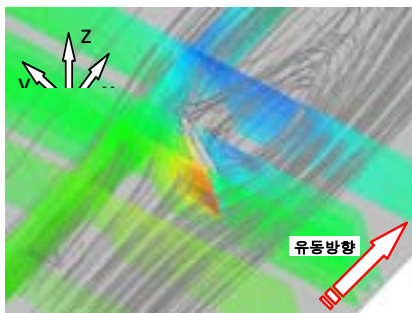


그림4 자갈날림판 주위의 압력분포와 유선

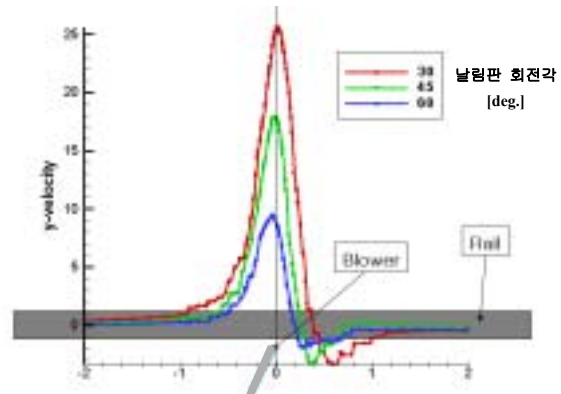


그림5 레일 위에서 Y방향 속도 분포

2.2.1 Case-II의 해석 결과

그림6은 자갈날림판을 y축과 z축으로 각각 30°씩 회전하여 부착하였을 때 앞서 연구된 자갈비산 임계 속도 가운데 가장 가볍고 유동에 민감한 형태인 동글납작한 형상의 최소 임계속도인 18m/s 이상의 유동이 유도되는 영역을 표시한 그림이다.^[6] 여기서 속도는 y 방향의 속도 성분과 z 방향의 속도성분의 합으로 그림7을 통해 자갈날림판 끝단에서 유도되는 속도가 가장 크고 이 지점에서 멀어질수록 속도가 감소함을 알 수 있다. 즉, 자갈날림판이 레일과 가까운 지점에 있어야 충분한 속도가 유도됨을 예상할 수 있다. 그림7은 그림6에 표시된 네 지점에서 열차 주행방향 속도 분포를 나타낸다. 즉 레일 위에 놓여있는 자갈이 시간에 따라 받게 되는 유동 속도로 간주해도 무방하다. 자갈이 자갈날림판과 3cm 거리에 위치한 경우 35m/s 이상의 충분한 유동이 유도되므로 레일 위의 자갈이 제거되기에 충분하다. 하지만 거리가 멀어질수록 유도되는 속도가 감소하게 되고 약 8cm 이상 떨어지게 되면 자갈에 유도되는 속도가 20m/s 이하로 감소하게 되어 성능을 보장하기 힘들다.

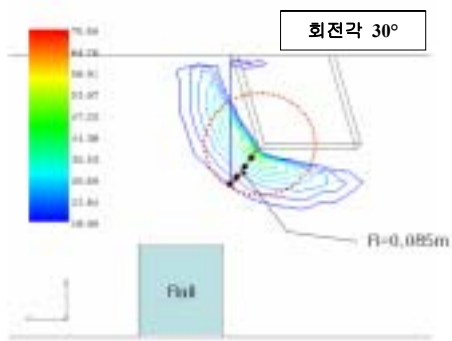


그림6 자갈날림판 끝단의 속도 분포

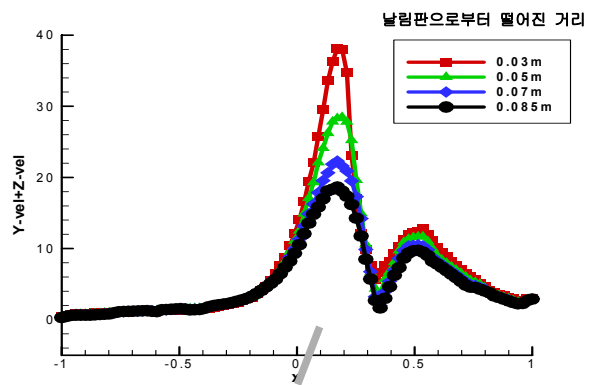


그림7 자갈날림판 끝단의 속도 분포

그림8은 y축과 z축으로 45°를 회전하여 부착하였을 때의 임계속도 영역을 표시한 그림이다. 30° 회전한 경우에 비하여 그 영역이 대폭 감소된 것을 알 수 있다. 이 경우 역시 가까운 거리(0.03m)에서는 자갈을 제거할 수 있는 유동을 만들어 내지만 멀어질 경우 그 효과가 없음을 알 수 있다. 따라서 자갈날림판과 레일 사이의 거리가 작을수록 좋은 성능이 기대된다. 하지만 레일과 차량 하부 구조물의 거리가 가깝게 되면 충돌의 위험이 증가하므로 향후 자갈날림판 형상의 개선을 통해 성능을 유지하면서 거리를 보다 멀리 증가시키기 위한 작업이 필요할 것으로 예상된다.



그림8 자갈날림판 끝단의 속도 분포

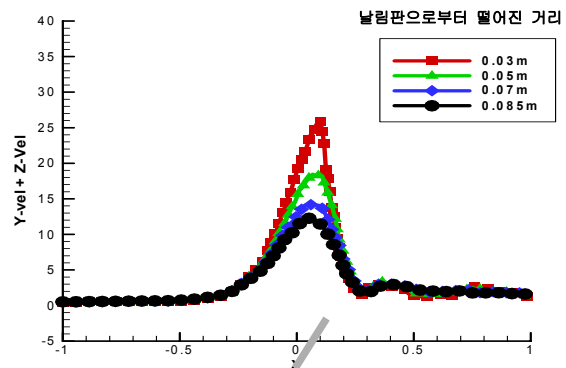


그림9 자갈날림판 끝단의 속도 분포

그림7과 그림9에서 2차 속도 증가 영역은 자갈날림판 뒤쪽의 저압 영역으로 유도된 속도로, 첫 속도 증가부분의 속도 성분과 반대 방향으로 이 영역의 속도성분이 앞쪽의 속도 증가 영역을 감소시키는 작용을 한다. 그러므로 이 영역을 줄이는 것도 자갈날림판의 효과를 증가시키는 방안이 될 수 있다.

3. 풍동 실험

3.1 실험 개요 및 실험 장치

실제 주행상황과 같이 날림판을 열차 하부에 직접 설치하여 실험하는 것은 안전이나 비용면에서 여러 문제가 발생한다. 따라서 안전하게 재현된 풍동 실험을 통해 그 성능을 검증하였다. 자갈날림판은 열차의 맨 앞쪽에 설치할 것을 고려하여 설계되었으므로 복잡한 유동의 간섭 영향을 상대적으로 적게 받게 되므로 그림10과 같이 자갈날림판은 정지해 있고 날림판이 전진할 때와 같이 상대속도의 바람을 불어줌과 동시에 자갈을 가이드로 전진운동 시켜주는 것으로 모사될 수 있다.^[7] 또한 자갈 입장에서 날림판의 유동이 돌풍처럼 가해지므로 그림11과 같이 셔터를 이용한 돌풍모사 경계층 장치를 만들고 자갈 및 레일을 실제 크기와 동일하게 제작하여 실험하였다. 그림12는 선행된 수치해석을 통해 크기와 각도가 선정된 날림판을 설치한 모습이며 열선유속계(Hot-wire Anemometry)와 이송장치(Travels system)를 함께 보여주고 있다. 이와 같이 실험 장치를 구성하여 자갈날림판의 효과를 조사하였다.

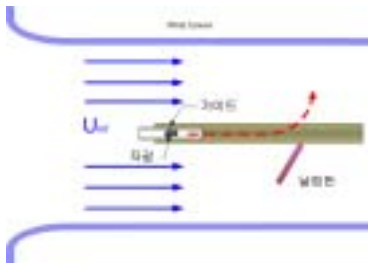


그림10 실험 장치 개요



그림11 자갈날림판 실험 모델



그림12 자갈날림판 및 열선유속계 설치

본 연구에서 사용한 풍동은 공군사관학교의 폐회로 순환방식의 중형 아음속 풍동이다. 시험부의 크기는 2.45m×3.5m×8.7m 이며, 운용 가능한 풍속영역은 5~92m/s(±0.03)이다. 그림11의 실험 모델의 크기는 1.2m(H)×2m(W)×3.7m(L)이며, 돌풍장치의 셔터 개폐로 인한 공력하중을 안전하게 견디도록 1000kg의 강구조물로 제작되었다. 내부에는 실제 크기의 자갈과 침목, 레일, 자갈날림판이 설치되었다.

계획된 풍동의 실험조건은 TCS(Tunnel Control System)의 제어 명령에 의하여 작동되고, 실험결과의 측정 및 저장은 DAS(Data Acquisition System)에 의하여 수행된다. 실험에서 측정된 압력 데이터는 PRESSURE SYSTEMS社의 PIS 8400 pressure transducer 시스템에 연결되어 4hz로 1분간 압력을 측정하여 저장한 후 평균값으로 표시한다. 열선의 직경은 5 μ m이고 길이는 1.25mm이다. ±43° 범위에서 30~60m/s 까지 Calibration을 하여 속도를 구한다.^[8]

3.2 실험 결과

실험은 풍동의 안전과 자갈로부터 풍동을 보호하기위하여 실제 설계속도 보다 낮은 40 m/s에서 수행하였다. 예비실험을 통해 확인된 유속을 내기위해 돌풍장치를 갑자기 개방하고 자갈날림판 효과를 정성적으로 검증한 결과 그림13과 같이 날림판에 의해 실제 자갈이 굴러 떨어지는 것을 확인하였다. 이를 통하여 제안된 자갈날림판이 효과적임을 알 수 있었다.



그림13 날림판의 자갈 제거 모습

그림14는 자갈날림판 주위의 유동속도 벡터를 나타낸다. 레일과 같은 방향으로 수평하게 유입된 유동은 날림판에 접근할수록 Y방향으로 휘어지는 것을 볼 수 있다. 특히 위쪽 방향의 유동일수록 날림판과 가까워질수록 휘어지게 된다. 이것은 수치해석 결과와 동일한 경향을 보이며 그 값은 그림 15와 같다.

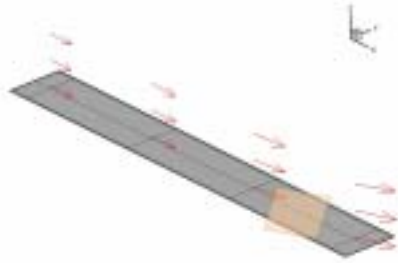


그림14 날림판 주위 속도 벡터

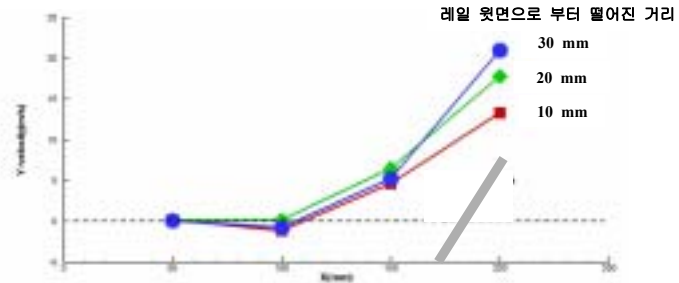


그림15 날림판으로 인한 Y방향 속도성분(평균도)

3. 결론

- 레일 위의 자갈을 제거하기 위한 차량 하부 구조물인 자갈날림판(Ballast Blower) 형상을 제안하고 이에 대한 3차원 수치해석을 수행함으로써 성능을 예상하였으며 실용화를 위한 기초자료로 활용될 수 있도록 해석결과를 제시하였다.
- 풍동실험을 통해 레일 위의 자갈이 측면으로 제거되는 것을 확인하였으며 유동이 자갈 방향으로 굴절되는 속도를 열선유속계로 측정하여 수치해석 결과와 비교하였고 레일과 자갈날림판의 거리가 가까울수록 Y방향의 유동 속도가 증가하여 효율적으로 레일 상의 자갈 제거가 가능할 것이라는 점에서 유사한 경향을 보였다.
- 자갈날림판은 매우 적은 비용으로 큰 위험요소를 제거할 수 있으며, 본 연구를 통해 날림판 효과가 확인되어 향후 실용화될 수 있을 것으로 기대되며 한국형 고속전철 시스템의 신뢰성 및 안전성 향상을 위한 기반기술로 활용 될 수 있을 것이다.

4. 후기

본 논문은 건설교통부 고속철도기술개발사업으로 지원된 “고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술 개발”과제 연구결과의 일부이며, 2단계 BK사업의 지원에 의해 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

5. 참고문헌

- (1) 김인선, 하성도, 허남건, 1994 “고속전철의 공력설계 기술 개발”, 대한 기계학회지 Vol.34, No.6, pp. 430~435
- (2) 권혁빈, 박춘수, 강형민, 이동호, 2003 "풍동실험을 통한 철도 노반 상 자갈의 비산 특성 연구", 2003년 한국항공우주학회 추계학술발표회 논문집, pp.728~731.
- (3) 철도청, 2004 “고속선 설빙피해 방지대책 연구 보고서”
- (4) 권혁빈, 박춘수, 2005, “열차풍에 의한 고속선 자갈비산현상 연구”, 한국철도학회논문집, Vol.8, No.1, pp.6~14
- (5) A Ido, 2003 "A study on the aerodynamic drag reduction of trains", 2003 WCRR Congress proceeding
- (6) H.B. Kwon, C.S. Park, 2006, "An experimental study on the relationship between ballast-flying phenomena and strong wind under high-speed train", 2006 WCRR Congress proceeding
- (7) 노주현, 김중용, 구요천, 윤수환, 권혁빈, 조동현, 이동호, 2006, "돌풍장치를 적용한 고속철도 선로유동에 대한 실험 연구", 2006 대한 기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1542~1547
- (8) Dantec manual, Installation & User's guide