

유동해석을 통한 고속차량 오물수거 효율화 고찰

장진영, 김재문*
한국교통대학교 교통시스템공학과

A Study on High-speed Vehicle Waste Collection Vacuum Efficiency Through Flow Analysis

Chang Chin Young, Kim Jae Moon*
Dep. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation

요약 고속철도차량은 일반적으로 운행 종료 후 다음 출고까지의 제한된 시간에서 유지보수가 이루어지며, 이에 오물수거 작업도 포함된다. 고속철도차량 오물수거 시스템은 차량 운행 중 발생하는 오물이 차량 내부 탱크에 일괄 수집되고, 기지 입고 후 수거하는 방식이다. 현재 고속차량정비 기지 내 오물수거장비는 오랜 사용으로 인해 노후화와 성능저하로 인해 작업소요시간 증가 및 누수 등과 같은 문제가 야기되고 있다. 이로 인해 고속철도차량의 유지보수 작업은 오물수거 작업 속도에 따른 시간적 영향을 받고 있으며, 오물수거 작업에 소요되는 시간을 최소화하여 유지보수 시간을 확보하는 것은 안전하고 효율적인 차량 운영을 위해 매우 중요하다. 오물수거 시스템은 오물집수정에서 진공을 발생시켜 차량에 설치된 탱크에서부터 오물집수정까지 흡입하는 형태로 수거가 이루어지는데 이 과정에서 거리와 배관 지름, 진공압력 등의 영향은 효율성에 많은 영향을 미친다. 따라서 오물수거시간을 줄이기 위해서는 이러한 환경에 대한 적절한 조건들에 대하여 효율성이 검증되어야 한다. 본 논문에서는 고속차량 오물수거에 대한 배관과 진공 등에 대한 유동해석을 통하여 효율화를 고찰하고자 한다.

Abstract High-speed rail vehicles are generally maintained within a limited period between the end of operation and the next operation, including waste collection. The waste collection system for high-speed rail vehicles entails the centralized gathering of waste generated during operation into an internal tank. Subsequently, the accumulated waste is collected after the vehicle is stationed at the depot. The waste collection equipment within the current high-speed rail maintenance depot can experience increased operational time and issues, such as leaks due to aging and performance degradation from prolonged use. Accordingly, maintenance work on high-speed rail vehicles is influenced by the time required for waste collection tasks. Securing maintenance time by minimizing the duration of waste collection work is crucial for ensuring the safety and efficiency of vehicle operations. The waste collection system generates a vacuum in the waste collection well and collects it by sucking it from the tank installed in the vehicle to the waste collection well. In this process, the effects of distance, pipe thickness, and vacuum pressure. have a significant impact on efficiency. Therefore, to reduce the waste collection time, the efficiency must be verified under conditions appropriate for this environment. This paper considers the efficiency of high-speed vehicle waste collection through flow analysis of piping and vacuum.

Keywords : Flow Analysis, High-speed Rail, Vacuum Degree, Vacuum Efficiency, Waste Collection Work

본 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 RS-2022-00143421).

*Corresponding Author : Jae-Moon Kim(Korea National University of Transportation)

email: goldmoon@ut.ac.kr

Received October 12, 2023

Accepted December 8, 2023

Revised November 21, 2023

Published December 31, 2023

1. 서론

국내철도산업은 2000년대 들어 고속철도 개통과 더불어 다시 호황기를 맞이하고 있다. 기술적으로 고도화 되고 철도운영사 측면이 아닌 이용자 중심으로 고객편의성을 강조한 시스템으로 거듭나고 있다.

철도차량 승객편의 설비 중 인간의 생리현상 해소에 중요한 역할을 하는 화장실은 많은 변화를 가져왔다. 초기에는 발생된 오물을 외부로 그냥 버리는 비산식이 주를 이루었으며 정거장 내 환경오염 문제도 함께 있었다. 이후 사회적 인식이 높아짐으로 오물처리에 대한 개념도 바뀌어 차량내부에서 발생하는 오물을 차량내부 탱크에 일괄 수집 후 기지 입고 후 수거하는 방식으로 바뀌었다. 따라서 차량 오물수거장치는 수거 및 처리방식 등이 지속적으로 발전하여 현재는 쾌적한 화장실 환경과 깨끗한 유지보수 환경을 갖추게 되었고 일반차량뿐만 아니라 고속철도 등 모든 차량에 적용되어 승객에게 쾌적한 서비스를 제공하고 있다.

영국철도청(UK Department for Transport and Network Rail)에서는 미처리 하수를 철도에 투기하는 것을 근절하기 위해 단속과 더불어 산업계와 협력 노후 차량에 대한 임시 조치로 오물탱크 개조를 실시하고 있으며 국외 오물처리 시스템도 국내 도입된 시스템과 유사한 운영 형태로 작업자의 수동연결, 수동제어 방식을 택하고 있으며, 오물통의 구조도 유사하여 육안 확인하는 등 데이터를 활용한 체계적이고 예지적 계획 수거는 하지 않고 있다[1].

고속철도차량은 특성상 대부분 편성이 새벽부터 순차적으로 운행을 시작하고 늦게 밤 운행 종료 후 심야시간에 순차적으로 일괄적인 유지보수가 시작된다. 따라서 모든 편성은 입고에서 출고까지 제한적인 유지보수시간이 주어지며 이 시간에는 차량입고와 더불어 행해지는 오물수거시간도 포함이 된다[2].

한정된 시간에 신속한 오물수거는 안전과 관련된 차량 유지보수시간을 넉넉히 확보해주는 역할을 한다. 현재 국내 고속차량정비 기지 내의 오물수거장비는 설치 시점이 오래되어 장비노후와 성능저하로 유지보수시간 확보에 많은 걸림돌이 되고 있으며, 누수 등으로 인한 많은 문제점을 보이고 있다. 따라서 유지보수 환경개선과 효율적인 유지보수시간 확보를 위하여 오물수거 기술에 대한 많은 연구를 필요로 하고 있다.

고속철도차량 오물수거장치의 구성은 크게 차량장치와 지상장치로 구분할 수 있으며 차량장치는 비산식, 개

폐식, 강제순환식, 진공식 등으로 변화하여 현재는 대부분 진공식 형태로 자리매김하고 있다[2].

그러나 지상장치는 오물을 흡입하는 흡입탱크와 차량의 오물탱크를 연결하는 배관으로 구성되는데 여러 차종을 아울러 처리해야하는 관계로 차량의 편성과 종류 등에 따라 배관의 길이는 기지의 규모에 비례한다. 따라서 배관의 규모는 오물수거를 위한 진공과 흡입 효율성에 관여하므로 본 논문에서는 배관의 규모와 오물성상 조건 등에 대하여 유동해석을 통하여 진공효율화 방안을 고찰하였다.

2. 고속철도차량 오물수거장치

2.1 철도차량 오물처리장치

철도차량 중 광역전철은 도시통근형으로 화장실 설비가 없지만 대부분 여객열차용 차량에는 승객 편의설비로 화장실이 구비되어 있어 오물처리장치가 포함되어 있다.

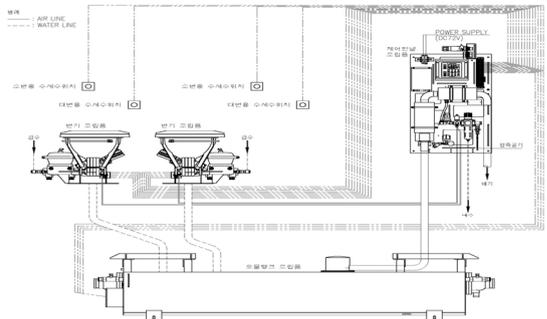


Fig. 1. Vacuum Waste Disposal Device Configuration Diagram(Dual Type)

일반적으로 차량 편성 중 다수의 일반화장실과 최소 1개소의 장애인 화장실이 설치되어 운행된다.

철도차량 내 오물처리장치는 비산식의 환경오염 유발로 차내 수집형태로 변경, 개폐식, 강제순환식 등 기술이 적용되어 오다가 최근에는 진공식으로 자리매김하고 있다. 진공식은 오물탱크 내부를 진공으로 하고 변기를 배관으로 연결, 사용 후 변기 개폐기를 열어 짧은 시간에 오물을 처리하는 방식으로 악취와 오염에 의한 불편을 최소화하고 있다. Fig. 1은 진공 오물처리방식에 있어 1개 탱크에 변기가 1개와 2개인 형식 중 2개인 형식의 구성도이다.

진공식 오물처리장치는 제어전원과 진공용 공압 5bar

와 급수 압력 1bar가 사용되며 모든 작동은 제어장치에 의해 순차적으로 작동한다. 장치 작동은 일반 작동과 안전 작동으로 구분한다. 일반 작동은 수세 스위치를 누르면 진공 발생기가 동작하고 탱크 내 공기가 냄새제거 필터를 통하여 대기로 방출되면서 탱크가 진공된다. 이후 내부 진공 스위치가 설정치인 -0.2bar에 도달하면 급수 가압기와 세정 전자밸브를 통해 작동 세정수가 노즐로 분사되면서 세척과 더불어 탱크 내부 진공력에 의해 오물이 강제 흡입된다.

안전 작동은 시스템에 이상이 발생했을 때 제어장치에 의해 자동 처치하며 원인요소가 제거되지 않으면 시스템 보호를 위하여 자동차단 정지된다. 주된 원인은 공압부족, 진공부족, 탱크 내부 만수위, 흡입밸브 고장 등이 있다[3,4].

2.2 철도차량 오물수거 지상장치

오물수거 지상장치는 철도차량 정비를 시행하는 차고나 유치선 또는 역구내 주박선 등에 단독으로 설치하여 사용하는 시설로 철도차량 운용과 차량 유지보수까지 정비비용량에 영향을 주는 주 공정(Critical Path)에 속하는 작업설비이다.



Fig. 2. Railroad Vehicle Waste Collection Work Flow Diagram

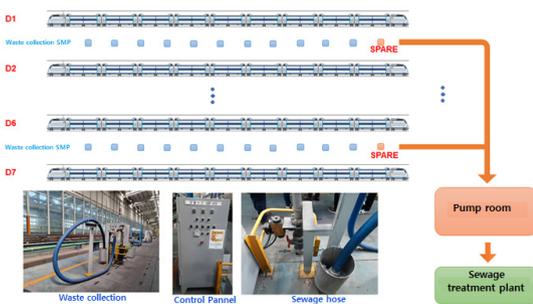


Fig. 3. Vehicle Depot Waste Collection System[1]

Fig. 2는 철도차량과 오물수거 지상장치간 오물수거 작업 흐름도로 유지보수 작업 전에 시행하고 있다. Fig. 3은 차량정비단 오물수거 시스템에 대한 구성도이다.

2.3 철도차량 오물수거 시스템 문제점

철도차량에 설치된 오물 처리장치에 저장된 오물은 차량이 기지에 입고된 후 배관을 통해 지상장치와 연결되어 하수종말처리장으로 보내게 된다. 이론상으로는 단순하게 보이지만 여러 가지 문제점이 내포하고 있다[5].

첫째, 철도차량 편성의 장단으로 인하여 지상 수거 장치의 길이가 길어 진공흡입에 대한 효율성이 떨어질 수 있다. 둘째, 오물 성상의 유형에 따라 배관내부 흐름을 나쁘게 하고 셋째, 장치의 연결부위에 대한 신뢰성 결여시 내용물의 누수로 인하여 환경오염 등 작업조건을 악화시키는 등 유지보수 환경과 효율성에 영향을 미친다.

3. 유동해석 시뮬레이션

상기에 기술된 철도차량 오물수거시스템의 문제점 중에서 철도차량 오물탱크에서 지상 수집 장치까지 배관크기와 흡입거리, 진공압에 따른 탱크 내 오물수거상태 변화 등 다양한 조건을 설정하고 시뮬레이션을 구현하였다 [6].

3.1 오물수거시스템 구성 및 조건

차상/지상 오물수거 시뮬레이션을 위한 구성은 오물 성상의 흐름을 위한 펌프로 Fig. 4와 같이 진공펌프와 로브펌프를 적용하였으며 기존시스템과 성능개선 한 시스템과 비교 가능하도록 하였다.

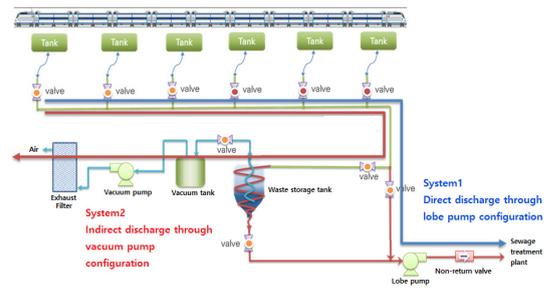
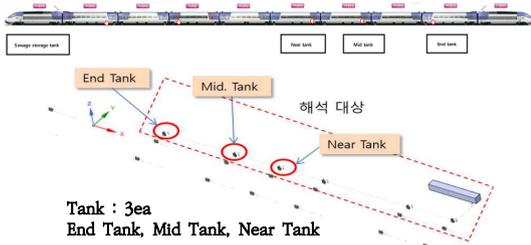


Fig. 4. Vacuum System Configuration for Simulation

오물수거거리는 200m를 기준으로 하되 거리 증가에 대한 시뮬레이션을 위해 300m와 400m 조건을 추가하였다. 더불어 Fig. 5와 같이 동시수거 조건에 따라 열차 구성에 맞추어 오물탱크 흡입구와 가장 멀리 위치한 3개의 탱크를 선정하였다.



	Item			Item			Item		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pipe Diameter	80mm	100mm	150mm	80mm	100mm	150mm	80mm	100mm	150mm
Distance	200m			300m			400m		

Fig. 5. Definition of Field Conditions for Simulation

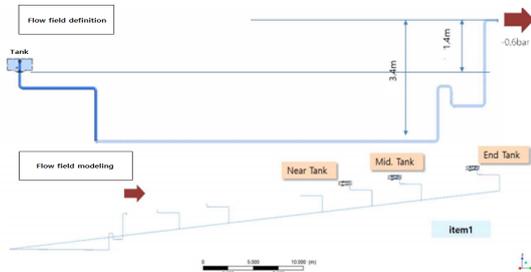


Fig. 6. Flow Field Definition for Analysis Conditions

해석 조건에 대하여 차량 오물탱크 높이를 기준으로 유동장을 Fig. 6과 같이 정의하고 모델링하였다. 해석방법은 ANSYS-CFX14, Transient Analysis(Time step : 0.1s, Total Time : 60s), Turbulent Model : SST Model을 적용하였다[7].

3.2 오물수거시스템 모델링

시뮬레이션을 위하여 Fig. 7과 같이 흡입 압력을 정의하고 Fig. 8과 같이 오물탱크를 모델링하고 수위를 설정하였다. 흡입압력은 평균 부압으로 -0.6bar 및 -0.9bar를 기준으로 진행하였다. 그리고 절대압(abs)은 760torr = 1033mbar = 1bar로 게이지 압력(g)=-1bar를 기준으로 하였다. 오물탱크는 실제 탱크를 모델링하고 오물수위가 500ℓ가 되는 조건으로 설정하였다[8].

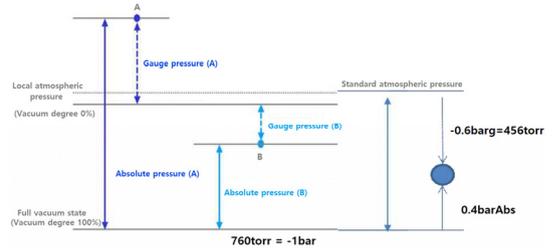


Fig. 7. Suction Pressure Definition

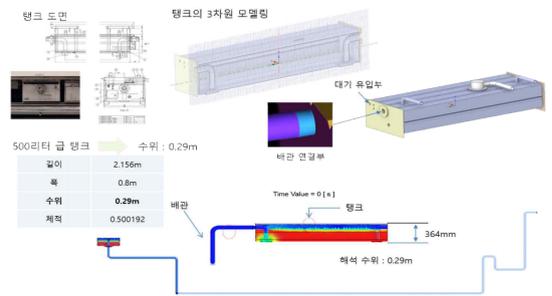


Fig. 8. Waste Tank Modeling[10]

Mass and Momentum Conservation Equations

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

Discretization Process

$$\sum_{ip} (\rho u_j \Delta n_i)_{ip} = 0$$

$$\sum_{ip} m_{ip} (u_i)_{ip} = \sum_{ip} (p \Delta n_i)_{ip} + \sum_{ip} \left(u_{ip} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \Delta n_j \right)_{ip}$$

Fig. 9. Mathematical Modeling

또한 유동해성 시뮬레이션을 위하여 오물 탱크를 Fig. 9와 같이 수학적으로 모델링하였다. 오물의 성상은 유사 시스템에 대한 오물(분변)의 걸보기 밀도 연구 결과를 참조하였으며[7], 최악의 조건을 고려하여 걸보기 밀도 1,250kg/m³로 진행하였다. 인분의 경우 75% 물과 15~20% 소화되지 않은 음식물과 5% 세균으로 구성된다. 최악 조건을 고려하여 오물에 대한 비중을 약 2,000kg/m³으로 가정하면 물(1,000kg/m³) × 0.75 + 오물(2,000kg/m³) × 0.25 = 1,250kg/m³이 된다. 여기에서 유사시스템의 걸보기 밀도는 축산 분뇨인 경우 함수율 75%로 하여 걸보기 밀도 800kg/m³이다[9].

3.3 유동해석 결과

유동해석 시뮬레이션은 진공도 -0.6bar와 -0.9bar 두 가지 조건으로 각각 배관 길이를 200, 300, 400m, 배관 지름을 (a)80, (b)100, (c)150mm로 하여 시행하였다.

Table 1. Variation in Collection Time Tanks and Waste Bins

Classification (Pipe Diameter)	Tank Waste Collection Time(sec)			Deviation Rate Compared to Average Cesspool Collection Time		
	Near Tank	Mid Tank	End Tank	Near Tank	Mid Tank	End Tank
Case1 (80mm)	61.9	93.2	115.9	-31.5%	3.2%	28.3%
Case2 (100mm)	48.0	68.7	76.0	-25.3%	7.0%	18.3%
Case2 (150mm)	31.9	33.7	31.4	-1.3%	4.2%	-2.9%

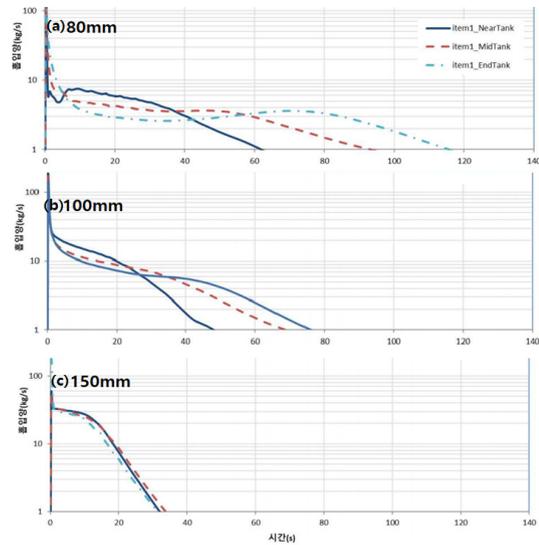


Fig. 10. Collection Simulation Results for Each Waste Bin According to Pipe Diameter[10]

진공압력 0.9bar의 경우는 차량 오물탱크의 찌그러짐 현상 발생으로 결과 언급에 의미가 없었으며, 배관길이의 경우는 흡입시간의 장단만 존재하였다.

따라서 배관 지름에 대한 시뮬레이션 결과만을 살펴보면 오물탱크 오물수거시간 및 편차는 80mm 배관에서 가장 크며, 배관경이 커질수록 줄어드는 경향을 보였다. 탱크 오물수거 시간과 오물통간 수거시간 편차를 Table 1에 나타내었다. 표에서 보듯 앞쪽이 뒤쪽보다 수거시간이 빠른 것을 알 수 있다. 또한 배관 직경에 따라 수거시간에 차이가 Fig. 10과 같다. 직경이 작을수록 앞쪽과 뒤쪽 차량 간에 시간차가 크다는 것 알 수 있다.

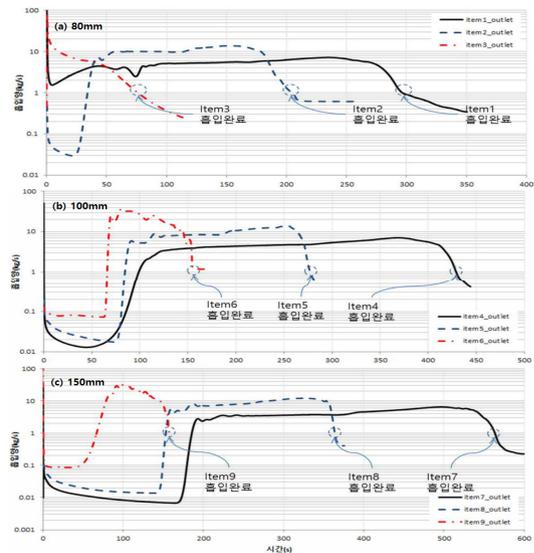


Fig. 11. Waste Collection Completion Time by Pipe Diameter[10]

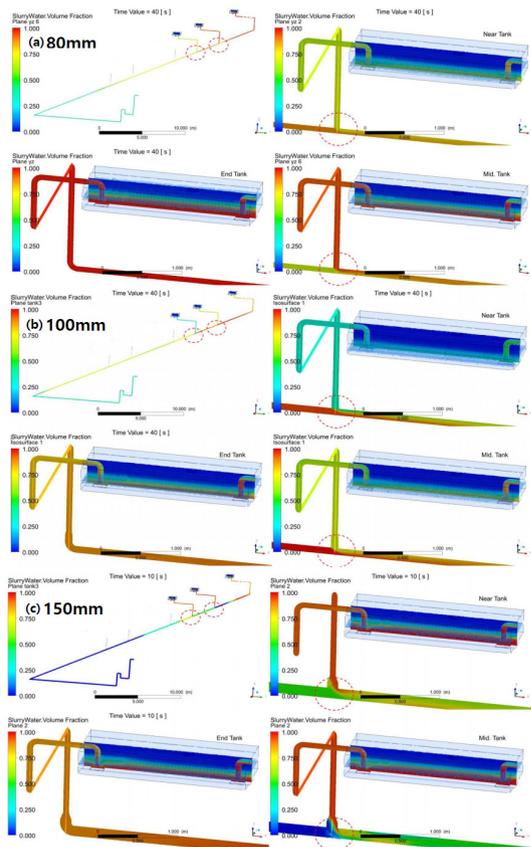


Fig. 12. Analysis of Bottleneck Phenomenon at Confluence Point by Pipe Diameter

Fig. 11에서 주어진 조건에 따라 배관내의 오물수거 완료 시간을 분석하였으며 결과는 Fig. 12와 같이 길이에 따라서 시간차는 보이지만 유사한 유형을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 12에서는 배관길이와 지름에 따라 접속부위에 대한 병목현상에 대한 분석으로 길이에 따라 약간의 차이는 보이지만 지름에 따라 (a) 80mm와 (b) 100mm의 경우 오물 탱크의 오물이 가까운 오물통에서 회수되는 오물과 합류되는 지점에서 병목현상을 보였으며, 이로 인해 수거시간이 길어지는 양상을 보였다. 그러나 (c) 150mm 배관은 병목현상이 거의 발생하지 않음을 알 수 있었다[10].

4. 결론

오물수거시스템은 철도차량 유지보수에 있어 필수적이나 수거 시간단축과 효율성 향상을 위한 구성 시스템에 대한 연구는 진행되고 있으나 차량과 지상장치 간의 연계과정에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 오물수거시스템에 있어 차상장치와 지상장치 간의 대상물의 이동에 효율성을 부여하기 위하여 모델링을 통하여 순조로운 흐름과 방해 요인 등에 대하여 대상물의 성상, 진공도, 배관길이 등을 기준으로 배관 구경별로 분석하였다. 대상물의 성상은 환경부 수생태보전과 기준을 적용하였으며 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 오물탱크의 오물수거 시간 해석에 있어 수거시간은 80mm 배관에서 진공도 차이에 대하여 크게 영향을 받았으나 150mm 배관에서는 영향이 적음을 확인하였다. 또한 동일 위치에서 수거시간은 시물레이션에서 설정한 거리 차이에 대하여 크게 영향이 없었다. 주배관의 지름에 따라 비례적으로 수거시간이 단축되는 경향을 보였으며, 이는 탱크에서 일정 진공도가 걸리며 배출되기 때문으로 보이며, 주배관의 지름이 클수록 수거시간 편차가 줄어드는 편차를 보이는 것으로 확인하였다.
- (2) 주 배관 끝단(Outlet)에서 수거시간 해석에 있어서는 진공도가 클수록 수거시간이 짧아지는 경향을 보였다. 80mm 배관에서 진공도 차이에 대해 크게 영향을 받았고 150mm 배관에서 상대적으로 영향 적은 것으로 보였다. 또한 배관 지름이 작을 경우 흡입시 주 배관 합류지점에서 병목현상에 의한 오물탱크 간 진공도 편차(흡입속도 차이)가 커져

서 가까운 거리와 먼 거리에 위치한 탱크의 수거 시간 차이가 커지는 성향을 보인다. 진공탱크 용량은 이상적일 경우 오물탱크 3개 용량인 1,500 l/min(90m³/h) 이상일 경우 배관 내 일정 진공도 유지 및 성능 발휘가 가능할 것으로 예상되나 설치, 동작 조건 등 여러 변수에 의해 차이 발생이 예상되어 충분한 여유를 가지는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

따라서 주 배관의 지름을 크게 하거나 형태를 길이에 따라 차등(뒤로 갈수록 가늘게)을 두어 설계하면 흡입 오물의 병목현상을 해소할 것으로 보인다. 그리고 전체 오물 스테이션과 순차 흡입시간을 조정하여 주 배관에서 수용할 수 있는 흡입 오물량 조절과 진공도 증가를 통하여 병목현상 감소로 오물수거시간을 효율적으로 단축할 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] Korea Agency for Land, Infrastructure and Transport Science and Technology Promotion, "Development of a high-speed rail vehicle waste collection system", 2022.
- [2] Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers conference Vol.2022 No.10, pp42-46 "Consideration of work measurement methods to define standard time for railway vehicle waste collection work", 2022.
- [3] Korail, "KTX-Sanchun Maintenance Manual" 2018.
- [4] Korail, "Power distributed high-speed train maintenance manual(KTX-Eum)", 2023.
- [5] Korail, Maintenance instructions K14-1-U2400-T-040, "Dirt Cleaning", 2016.
- [6] Jong-gun Choi, "Structural Analysis Finite Element Method", 2020.
- [7] Taesung S&E FEA, "ANSYS Workbench", 2008.
- [8] Min-gyu Lee etc, "Evaluation of Food Waste Characteristics and Methane Generation Potential", 2019.
- [9] Ministry of Environment Aquatic Ecology Conservation Division-1062, "Standard Design for Livestock Manure Recycling Facility", 2008.
- [10] Inter-Mobility, "Flow Analysis Simulation", 2023.

장 진 영(Chin-Young Chang)

[정회원]



- 2010년 2월 : 중앙대학교 대학원 전자전기공학 (공학석사)
- 2015년 2월 : 중앙대학교 대학원 전자전기공학 (공학박사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 교통시스템공학과 조교

<관심분야>

전기철도, 전력전자

김 재 문(Jae-Moon Kim)

[정회원]



- 1996년 2월 : 성균관대학교 전기공학 (공학석사)
- 2000년 2월 : 성균관대학교 전기공학 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 2004년 2월 : 현대모비스 기술연구소 책임연구원
- 2004년 3월 ~ 2012년 2월 : 한국철도대학 철도차량전기과 교수
- 2012년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 교통시스템공학과 교수

<관심분야>

전기철도, 전력전자