# 대심도 터널 피난관제 주행로봇 시스템의 주행 안정성 해석

## 안승호<sup>\*</sup>, 이덕희, 김진성 한국철도기술연구원 철도중대사고연구실

# Running Stability Analysis of Evacuation Guidance Robot at Deep and Long Rail Tunnels

# Seung Ho Ahn<sup>\*</sup>, Duck Hee Lee, Jin Sung Kim Railroad Accident Research Department, Korea Railroad Research Institute

**요 약** 본 논문은 대심도 터널에서 운영될 피난관제 주행로봇 시스템의 주행 안정성 해석을 수행하고 있다. 최근 개발 중인 대심도 철도 터널은 규모가 점점 커지고 있으며, 화재가 발생할 시 터널을 통하여 피난을 해야 하기 때문에 실시간 피난관제가 가능한 피난관제 주행로봇에 대한 필요성이 증가하고 있다. 주행로봇이 고속으로 운행됨에 따라 주행로봇의 운동에 의하여 레일에 가해지는 응력을 분석하여 레일의 안정성을 검토 하였다. 레일의 볼트 간격에 따른 고유진동수 해석을 수행하여 열차의 가진주파수에 따른 공진현상의 유발 여부를 검토 하였다. 또한, 레일 위를 이동하는 주행로봇의 고유진동수 해석을 수행하여 주행로봇에서 진동을 유발할 수 있는 모터의 동적 하중 등에 의한 공진현상을 피할 수 있도 록 하였다. 주행 안정성을 해석하기 위하여 상용 유한 요소 해석 프로그램인 LS-DYNA를 활용하여 Implicit 해석에 기반한 응력해석 및 모드해석을 수행하였다. 본 연구 결과는 피난관제 주행로봇의 설계 과정에서 주행 안정성 측면을 고려한 상세 설계를 하는데 활용될 수 있다.

**Abstract** This paper executes a running stability analysis of an evacuation guidance robot system in deep railway tunnels. The deep railway tunnels that have been developed recently are becoming bigger and bigger. So, in case of fire within the tunnel, it is necessary to evacuate people from these tunnels with the help of evacuation guidance robots that are equipped with real-time evacuation control. Since the evacuation guidance robot runs at high speed during the evacuation, the stability of the rail was verified by analyzing the stress applied on the rail by the movement of the evacuation guidance robot. Moreover, by performing a natural frequency analysis with the bolt spacing of the rail, it was verified if the robot movement causes any resonance by matching the excitation frequency of the train. In addition, the natural frequency analysis of the evacuation guidance robot moving on the rail was performed to avoid resonance caused by the dynamic load of the motor causing vibration in the evacuation guidance robot. Finally, stress and mode analyses based on implicit algorithms were performed using LS-DYNA, a commercial finite element analysis program, to study the running stability of the robot. The results of this study suggest they can be used for detailed design considering the running stability of the evacuation guidance robot.

**Keywords :** Deep Railway Tunnel, Evacuation Guidance Robot, Finite Element Analysis, Stress Analysis, Eigenvalue Analysis

### 1. 서론

최근 개발 중인 대심도 철도 터널의 평균심도는 지하 40m에 이르고 그 길이가 수십 km에 이를 정도로 규모 가 커지고 있다. 국내 단선 터널의 경우 화재가 발생할 시 터널을 통하여 피난을 해야 되는데 이 때 방향을 잘못 선택한 승객은 연기에 노출되어 큰 위험에 처할 수 있기 에 피난방향 안내 및 영상 기반의 실시간 피난 관제가 요 구된다[1]. 이를 위하여 신속하게 화재 현장으로 이동하 고 사고 현장의 상황을 파악할 수 있는 영상을 전송하며 승객의 피난을 안내할 수 있는 방송시설 등이 탑재된 관 제용 주행로봇 시스템의 개발이 요구된다[2].

현장 관제용 주행로봇은 다양한 산업 분야에서 널리 활용되고 있다. 지하구내의 전력설비 상태감시를 위하여 지능형 궤도주행 이동감시로봇 시스템이 적용되었다. 인 력순시의 한계를 극복하여 최적화된 점검 및 감시가 가 능하다[3]. 또한, 전력선의 효율적인 점검을 위한 점검로 봇이 개발되었다. 기존 연구에서는 다물체 동역학 프로그 램을 이용하여 변위, 가속도, 모멘트 등에 대한 분석이 수 행되었다. 중력, 모터의 진동, 표면의 거칠기, 바람의 영 향력 등을 고려하여 고유진동수 해석을 수행하였으며 고 유진동수 해석 결과를 반영하여 모터의 동적 하중을 설 계하였다[4,5]. 레일에 거치된 채로 운행을 하는 형태의 모노레일 열차에 대한 연구가 수행되었다. 열차의 주행안 정성을 확인하기 위하여 동역학 해석이 수행되었으며 고

본 논문에서는 피난관제 주행로봇 시스템의 초기 개발 모델에 대해서 주행 안정성 해석을 수행하였다. 주행로봇 이 20km/h 이상의 고속으로 레일 위를 운행함에 따라 주행로봇 및 레일에 응력이 집중될 것으로 예상되며, 응 력해석을 수행하여 이에 대한 안정성을 확인하였다. 레일 의 볼트 간격에 따른 고유진동수 해석을 수행하여 주행 체의 가진주파수에 의한 공진현상의 유발 여부를 검토 하였다. 이는, 추후 레일의 볼트 간격 설계에 활용될 수 있다. 레일 위를 주행하는 주행로봇의 고유진동수 해석을 수행하였다. 주행로봇에서 진동을 유발할 수 있는 모터의 동적 하중 등에 의한 공진현상을 피함으로써 주행로봇의 주행 안정성을 확보할 수 있다.

#### 2. 모델의 정의

2.1 피난관제 주행로봇 시스템

대심도 터널에서 운용될 예정인 피난관제 주행로봇의 개략적인 모델 형상은 Fig. 1과 같다. 한 번의 배터리 충 전으로 30km를 주행 가능해야 하며 로봇은 사고 지점까 지 어디서든 5분 이내로 접근 가능하도록 배치하도록 최 대 속도는 20km/h 설정하였다. 피난 방향 표시 기능이 있어야 하며 컨트롤 센터에서 실시간으로 컨트롤이 가능 해야 한다. 차체는 내열성이 있어야 한다. 주행로봇 시스 템의 운용 과정에서 응력 집중 및 진동 특성에 의한 손상 이 발생하지 않아 주행 안정성에 문제가 없어야 한다.





#### 2.2 유한요소 모델링

Fig. 2는 피난관제 주행로봇의 유한요소 모델이다. 주 행로봇의 상세 모델링이 아직 진행되지 않았기 때문에 개략적인 형상을 유한요소로 모델링 하였다. 각 파트의 목표 질량과 일치하도록 질량을 설정하였다. 레일의 상단은 1m 간격으로 볼트로 고정되어 있으며 로봇은 3.5m/s로 이동한다. 상용 유한요소 해석 솔버인 LS-DYNA가 사용 되었다. 해석 시간이 길고 접촉 조건이 복잡하지 않으며 정확한 해석을 위하여 Implicit 동적 해석 알고리즘을 활용하였다. Belytschko Tsay 쉘 요소와 Constant stress 솔리드 요소가 활용되었다. 요소의 사이즈는 주행 로봇은 5mm로 레일은 10mm로 하였다. 변형량이 작기 때문에 탄성체로 가정하였다. 주행로봇의 본체 및 레일 에 사용된 재질은 알루미늄이다. 탄성계수 73GPa, 밀도 는 2,700kg/m<sup>3</sup>, 포아송비는 0.33이다. 항복응력은 200MPa이다. 바퀴는 고무의 재질이 적용되었으며 탄성 계수는 50Mpa, 밀도는 840kg/m<sup>3</sup>, 포아송비는 0.30이 다. 감쇠 적분이 사용되었으며 두께 방향으로는 5개의 적분점이 사용되었다. Implicit 해석에 적합한 \*AUTOMATIC SINGLE SURFACE MORTAR 접촉 조 건을 사용 하였다. 마찰계수는 정지마찰계수 0.8 운동마 찰계수 0.6을 적용하였으며 바퀴가 레일 위를 따라가며

굴러가는 형태로 접촉이 발생한다. Implicit 동적 해석 알고리즘은 동해석 과정에서 CONTROL IMPLICIT EIGENVALUE 키워드를 사용하여 임의의 시간 간격에서 고유진동수 해석을 수행할 수 있다. 또한, CONTROL DYNAMIC RELAXATION 키워드를 이용하여 중력에 의 한 평형 상태에 이른 이후 해석이 진행되도록 설정하였다.



Fig. 2. Finite element model of a evacuation guidance robot

# 3. 응력 해석 결과

Fig. 3은 로봇의 동적 이동에 따른 응력 해석 결과를 보여준다. 1.0m 간격으로 고정되어 있는 레일 볼트 주변 과 레일과 로봇의 접촉부에 응력이 집중됨을 알 수 있다. Fig. 4는 시간에 따른 해석 모델에서 발생하는 응력의 최 대값의 변화이다. 주행로봇의 현재 위치와 가장 인접한 볼트 고정 지점에서 최대 응력이 관측되며 시간에 따라 14-18MPa 수준으로 알루미늄의 항복응력 200MPa를 고려할 때 10 이상의 안전계수가 확보됨을 알 수 있다. 집중응력의 관점에서는 피난관제 주행로봇의 주행 안정 성이 확보됨을 알 수 있다.





(c) Fig. 3. Stress fields of a evacuation guidance robot (a) t=0.0s, (b) t=0.3s, (c) t=0.6s



Fig. 4. Variation of maximum stress with time on rail

### 4. 고유 진동수 해석 결과

#### 4.1 레일의 고유 진동수 해석

Fig. 5는 레일 위에서 볼트의 고정 위치 및 볼트의 설 치 간격의 변화를 나타낸다. 레일의 빨간점으로 표시된 부근을 고정하였으며 레일은 1m, 2m, 3m 간격으로 변 화시켜 가며 고유진동수의 변화를 관측함으로써 레일의 볼트 고정 간격이 고유진동수에 미치는 영향력을 확인하 고자 하였다.



Fig. 5. Distance between bolts on rail

Fig. 6-10은 레일의 볼트 간격에 따른 모드형상 및 고 유진동수를 보여준다. 로봇의 진행 방향이 Z 방향이며 로봇의 위쪽이 Y 방향이다. 볼트 간격 1m 에서는 Z축을 중심으로 회전하는 모드가 주로 나타난다. 볼트 간격이 2m 이상에서는 Z축 방향으로 웨이브가 발생하는 모드가 주로 나타난다. 즉, Z축 방향으로 충분히 고정이 되지 않 을 경우 해당 방향으로 변형이 유발되는 모드 형상이 나 타남을 추측할 수 있다. 또한, 볼트 간격이 커질수록 더 작은 주파수 범위에서 모드 형상이 나타남을 알 수 있다. 열차의 가진주파수가 레일의 고유진동수와 일치하게 될 경우 공진현상이 유발될 수 있다. 열차의 가진주파수 는 차량의 속도를 열차의 유효타격 간격으로 나눈 값으 로 정의된다[7]. 현재, 속도는 3.5m/s이고 열차의 유효 타격 간격을 주행로봇의 길이인 0.5m로 가정할 경우 주 행로봇의 가진주파수는 7Hz이다. 볼트 간격 3m인 경우 의 1차 모드의 고유진동수가 31.4Hz로 열차의 가진주파 수를 상회하기 때문에 열차의 가진주파수에 의한 공진이 일어날 우려가 적다.



Fig. 6. 1<sup>st</sup> mode shape with distance between bolts (a) 1.0m : 106.3Hz, (b) 2.0m : 61.7Hz, (c) 3.0m : 31.4Hz



Fig. 7. 2<sup>nd</sup> mode shape with distance between bolts (a) 1.0m : 106.4Hz, (b) 2.0m : 61.8Hz, (c) 3.0m : 33.0Hz



Fig. 8. 3<sup>rd</sup> mode shape with distance between bolts
(a) 1.0m : 107.5Hz, (b) 2.0m : 64.2Hz, (c) 3.0m : 34.0Hz



Fig. 9. 4<sup>th</sup> mode shape with distance between bolts (a) 1.0m : 110.4Hz, (b) 2.0m : 64.3Hz, (c) 3.0m : 35.5Hz



Fig. 10. 5<sup>th</sup> mode shape with distance between bolts (a) 1.0m : 113.1Hz, (b) 2.0m : 66.5Hz, (c) 3.0m : 40.3Hz

### 4.2 주행로봇의 고유 진동수 해석

레일 위를 주행로봇이 지나고 있을 때를 가정하여 고 유진동수 해석을 수행하였다. LS-DYNA의 Implicit 해 석을 활용하여 시간의 변화에 따른 고유진동수의 변화를 추적할 수 있다. 또한, 선형 해석에 기반한 고유 진동수 해석을 할 경우 중력에 의하여 거치되어 있는 물체의 고 유 진동수 해석을 위한 경계 조건을 가하기 애매한 측면 이 있다. Implicit 동적 해석 알고리즘은 중력에 의한 동 적 이완법(Dynamic relaxation method)이 적용된 이 후에 고유진동수 해석이 수행되기 때문에 경계 조건에 대한 고려가 필요하지 않다. Fig. 11은 레일 위를 지나가 는 주행로봇의 고유진동수 해석 결과를 보여준다. 1차와 2차 모드는 Z축을 중심으로 회전하는 모드이다. 3차 모 드는 Y축 방향으로 반복 운동하는 모드이다. 5차 모드는 레 일이 Z축을 중심으로 회전하는 모드이다.



Fig. 11. Eigenvalue analysis of evacuation guidance model (a) 1<sup>st</sup> mode shape, f1=16.8Hz, (b) 2<sup>nd</sup> mode shape, f2=33.7Hz, (c) 3<sup>rd</sup> mode shape, f3=36.3Hz, (d) 4<sup>th</sup> mode shape, f4=74.5Hz, (e) 5<sup>th</sup> mode shape, f5=116.8Hz

공진현상을 막기 위하여 주행로봇에서 진동을 유발할 수 있는 모터의 동적 하중 등이 주행로봇의 고유진동수 를 피하도록 하는 설계가 필요할 것으로 보인다. 향후 상 세 설계 과정에서 모델 형상이 구체화 됨에 따라 고유 진 동수는 달라질 수 있기 때문에 상세 설계 이후 고유진동 수의 재검토가 반드시 필요하다.

## 5. 결론

본 연구에서는 피난관제 주행로봇 시스템의 주행 안정성 해석을 수행하였다. 본 연구의 주요 결론은 아래와 같다. (1) 피난관제 주행로봇시스템의 응력해석을 수행 하였 으며 10 이상의 안전계수가 확보됨을 확인하였다.

- (2) 레일의 볼트 간격에 따른 고유진동수 해석을 수행 하였으며 레일의 볼트 간격에 따라 모드형상과 고 유진동수가 달라짐을 확인하였다. 주행로봇에 의 한 가진주파수와 레일의 공진현상이 유발되지 않 음을 확인하였다.
- (3) 레일 위를 지나가는 주행 로봇에 대한 고유진동수 해석을 수행 하였으며, 차량에서 진동을 유발할 수 있는 모터의 동적 하중 등에 대한 공진현상을

피하는 설계가 가능할 것으로 보인다.

(4) 본 논문에서 제시한 결과는 직선 형태 레일의 상단 부가 고정되는 경우를 가정 하였으나, 추후 레일이 터널의 측면 방향으로 설치될 경우 레일의 형상이 다소 복잡하게 변경될 수 있기 때문에 응력해석을 통한 안전계수 및 고유진동수 해석에 대한 재검토 가 필요할 것으로 예측된다.

## References

[1] W. H. Park, W. M. Cho, C. Y. Kim, T. S. Kwon, D. H. Lee, "Design and conduct of fire and smoke control tests in very long and deep tunnels." *Asia-pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology*, Vol.8, No.8, pp.245-254, August. 2018.

DOI: <u>http://dx.doi.org/10.35873/ajmahs.2018.8.8.024</u>

[2] De Santis, A., Siciliano, B., Villani, L, "Fuzzy trajectory planning and redundancy resolution for a fire fighting robot operating in tunnels." *In Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automationroceedings of KIIT Conference*, pp.472-477, 2005.
 DOI :

http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570163

- [3] S. S. Park, T. O. Kim, K. G. Choi, S. I. Kim, T. W. Bae, "Development and application for intelligent rail mobile system for monitoring the underground electric power facilities." *KIEE Summer Conference* 2015, pp.400-401, 2015.
- [4] X. H. Xiao, G. P. Wu, E. S. Du, S. P. Li, "Impacts of flexible obstructive working environment on dynamic performances of inspection robot for power transmission line." *Journal of Central South University of Technology*, Vol.15, No.6, pp.869-876, May. 2008. DOI : https://doi.org/10.1007/s11771-008-0159-8
- [5] J. Li, X. Dong, Z. C. Zheng, Y. Gao, Z. T. Jiang, H. Y. Xiao, "Modal Analysis of the Line Inspection Robot's Manipulator." *In Applied Mechanics and Materials*, Vol.681, pp.100-105, August. 2017. DOI : <u>https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.681.100</u>
- [6] C. Cai, Q. He, S. Zhu, W. Zhai, M. Wang, "Dynamic interaction of suspension-type monorail vehicle and bridge: numerical simulation and experiment." *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.118, pp.388-407, 2019. DOI : <u>https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.08.062</u>
- [7] S. I. Kim, W. S. Chung, E. S. Choi, "A study on the optimal span length selection of conventional railway bridges considering resonance suppression." *Journal* of the Korean Society for Railway, Vol.8, No.2, pp.137-144, 2005.

안 승 호(Seung Ho Ahn)

[정회원]



- 2009년 2월 : 서울대학교 조선해 양공학과 (공학학사)
- 2016년 8월 : 서울대학교 조선해
   양공학과 (공학박사)
- 2016년 8월 ~ 2020년 6월 : ㈜한화/방산 선임연구원
- 2020년 6월 ~ 현재 : 한국철도기 술연구원 선임연구원

〈관심분야〉 최적설계, 철도차량 충돌안전

#### 이 덕 희(Duck-Hee Lee)

#### [정회원]



- 1997년 8월 : 연세대학교 본대학원 물리학과 (이학석사)
- 2016년 8월 : 연세대학교 본대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 9월 ~ 현재 : 한국철도기 술연구원 책임연구원

〈관심분야〉 철도 방재 및 화재 열유체

김 진 성(Jin Sung Kim)

[정회원]



〈관심분야〉 철도차량 충돌안전

- 2002년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학학사)
- 2004년 8월 : KAIST 기계공학과 (공학석사)
- 2010년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2020년 2월 ~ 현재 : 한국철도기 술연구원 선임연구원