

대심도 터널 피난관제 주행로봇의 궤도레일 최적설계

안승호¹, 이덕희¹, 장홍래^{2*}, 박종환²

¹한국철도기술연구원 철도중대사고연구실, ²창원대학교 메카트로닉스대학 기계공학부

Design Optimization of Track Rail of Evacuation Guidance Robot at Deep and Long Rail Tunnels

Seung Ho Ahn¹, Duck Hee Lee¹, Hong-Lae Jang^{2*}, Jonghwan Park²

¹Railroad Accident Research Department, Korea Railroad Research Institute

²School of Mechanical Engineering, Changwon National University

요약 본 논문은 대심도 터널에서 운영될 피난관제 주행로봇 시스템의 주행 안정성을 위한 궤도레일의 최적설계를 수행하였다. 규모가 매우 큰 대심도 철도 터널은 화재가 발생할 시 터널을 통하여 피난을 해야 하기 때문에 실시간 피난 관제가 가능한 피난관제 주행로봇이 필수적이다. 주행로봇의 안정적인 운영을 위해서는 궤도레일의 안정성 검토가 필요하다. 터널 안쪽에 궤도레일의 거치를 위한 지지대의 주요 기하 변수를 도출 하였으며, 응력 및 고유진동수에 대한 기하 변수 연구를 수행하였다. 이를 기반으로, 위상최적설계 기법을 적용하여 주행 안정성 측면에서 최적의 궤도레일 단면 형상을 얻었다. 또한, 궤도레일 지지대 단면 형상의 너비 치수에 대한 검토를 통하여 주행안정성을 확보하는 최적의 궤도 레일 형상을 획득 하였다. 본 연구 결과는 피난관제 주행로봇의 설계 과정에서 주행 안정성 측면을 고려한 궤도레일의 상세 설계에 활용될 수 있다.

Abstract In this paper, design optimization was carried out for the track rail of an evacuation guidance robot system to be operated in a deep railway tunnel. Deep railway tunnels are becoming bigger and bigger, and since it is necessary to evacuate through a tunnel in case of a fire, the need for an evacuation guidance robot capable of real-time evacuation control is increasing. For the stable operation of the evacuation guidance robot system, it is necessary to review the stability of the track rail. The main geometric parameters of the support for the mounting of the track rail inside the tunnel were derived, and the geometric parameters of the stress and natural frequency were studied. Based on this, the optimal cross-sectional shape of the track rail was obtained in terms of driving stability by applying the topology optimization technique. In addition, the optimal track rail shape to secure running stability was obtained by examining the width dimension of the cross-sectional shape of the track rail support. The results of this study could be applied for the detailed design of a track rail while considering the running stability aspect in the design process of an evacuation guidance robot.

Keywords : Deep Railway Tunnel, Eigenvalue Analysis, Evacuation Guidance Robot, Stress Analysis, Topology Optimization

본 연구는 한국철도기술연구원 "대심도 철도 사고대응 피난관제 및 승객안전 핵심기술 개발"의 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Hong-Lae Jang(Changwon National University)

email: hjang@changwon.ac.kr

Received September 2, 2022

Revised September 23, 2022

Accepted December 7, 2022

Published December 31, 2022

1. 서론

군사용으로 개발된 무인이동체는 농업, 산업, 방송중계, 경찰, 소방, 레저 등 활용분야가 최근 광범위하게 넓어지고 있으며 재난대응을 위한 무인이동체에 대한 연구 또한 활발히 이루어지고 있다. 박남희 등(2009)[1]에서는 재난대응용 원격조종 드론 개발을 위한 기초연구를 수행하였다. 문헌조사를 바탕으로 드론의 하드웨어 스펙을 조사하고 기술수준을 분석하였다.

일반적으로 재난 상황에서의 무인이동체는 목적 달성을 위해 일반적인 경로가 아닌 구멍, 계단, 경사로 등과 같은 험지에서의 주행성능이 중요하며, 다양한 험지에서 무인이동체의 주행성능에 대한 연구가 많이 이루어졌다. 이상호 등(2007)[2]은 험지 주행을 위한 무한궤도 로봇에 대해 경사를 포함한 주행성능을 해석하였고 궤도에 대한 응력해석을 통해 구조안전성을 분석하였다. 상용 유한요소해석 프로그램인 Ansys를 이용하여 궤도 응력해석을 수행하여 구조안전성을 평가하였다. 최동규 등(2013)[3]은 재난상황에서 무너진 건물에 진입하여 실종자를 찾는 작업을 수행하는 로봇의 개념설계 및 분석을 수행하였다. 상용 다물체동역학해석 프로그램인 Recurdyn을 이용하여 험지 주행을 시뮬레이션 하여 바퀴 및 트랙 구조에 비해 다리형 구조의 주행로봇의 주행성능이 우수함을 검증하였다. 김유석 등(2013)[4]은 험지 주행용 소형로봇의 바퀴의 형상 설계에 대한 연구를 수행하였다. 실험을 통한 검증과정을 통해 재난 상황에서의 수색, 구조 임무에 있어 군집체의 제작을 고려할 경우 대량생산에도 적합하다고 주장하였다. 정혜원 등(2020)[5]은 로봇 자체 지능을 통해 주변 환경에 따라 변형되는 하이브리드 휠에 대한 바퀴 변형 방식을 제안하였다. 구동 메커니즘 및 몸체 설계를 통해 요구되는 다리의 개수, 극복 가능한 장애물의 높이에 대해 분석하여 제안하는 바퀴 변형 방식의 타당성을 검증하였다. 김대영 등(2021)[6]은 일반적인 소형 로봇의 진입 및 이동이 불가능한 해양플랜트 배관용 소형 로봇을 설계하였다. 배관 내의 로봇의 주행에 따른 메카넘휠의 위치 및 속도를 산출하였고, 실험을 통해 개발된 로봇의 주행성능을 입증하였다. 안승호 등(2021)[7]은 대심도 터널 피난관제 주행로봇 시스템의 주행 안정성 해석을 수행하였으나 궤도 레일의 터널 거치를 위한 지지대를 고려하지 않았다.

본 논문에서는 피난관제 주행로봇 시스템의 궤도레일에 대해서 응력해석 및 모드해석을 수행한다. 궤도레일

의 설치 형태를 고려하여 도출된 기하변수에 대하여 기하변수 스터디를 수행하고 이를 기반으로 위상최적설계 기법을 활용하여 최적의 궤도레일 형상을 획득한다.

2. 유한요소 모델의 정의

Fig. 1은 레일 및 주행로봇의 파트 분리를 나타낸다. 레일의 경우 셸 요소를 이용하였으며, 나머지 파트의 경우 솔리드 요소를 이용하여 요소망을 생성하였다. 4m의 레일에 대해 1m 간격으로 각 질점의 자유도를 구속하였다. 상용 유한요소 해석 솔버인 ANSYS가 사용되었다. 레일의 요소 숫자는 37,698개이며, 주행로봇의 요소 숫자는 45,560개이다. 변형량이 작기 때문에 모두 탄성체로 가정하였다. 로봇의 자중에 의한 레일의 응력 해석에서 주요 관심 영역이 아닌 메인 파트와 카메라 파트는 요소를 성글게 구성하였다. Fig. 2는 레일 요소망이고 Fig. 3은 주행로봇의 파트 별 요소망이다.

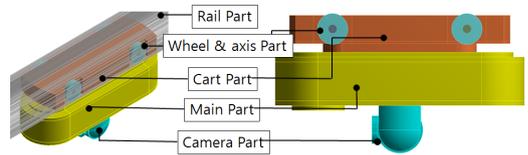


Fig. 1. Geometry of rail and evacuation guidance robot



Fig. 2. Finite element of track rail



Fig. 3. Finite element of evacuation guidance robot

주행로봇의 본체 및 레일에 사용된 재료는 알루미늄이다. 탄성계수 73GPa, 밀도는 2,700kg/m³, 포아송비는 0.33이다. 항복응력은 280MPa이다. 바퀴는 고무의 재질이 적용되었으며 탄성계수는 50Mpa, 밀도는 840kg/m³, 포아송비는 0.30이다.

3. 궤도레일의 응력해석

레일 지지대의 형상에 따른 최대 응력의 변화와 모드 형상 등을 알아보기 위해 레일이 설치될 위치에 따른 기하 변수를 설정하여 레일의 형상을 가정하였다. Fig. 4는 레일의 주요 기하변수이다. 레일의 주요 기하 변수는 설치 높이와 지지대의 각 부재의 길이와 두 부재 간의 각도가 중요하다 판단되어 설치 높이와 지지대 부재의 길이와 각도를 변수로 설정하였고, 예상되는 설치 높이 4.0m를 고려하여 부재 a의 길이와 부재 a와 b가 이루는 각도에 따른 지지대의 형상을 변경해가며 해석을 수행하였다. 같은 설치 위치에 대해 부재 b의 길이는 부재 a의 길이와 각도에 의존하기 때문에 길이 b는 주요 변수로 설정하지 않았다.

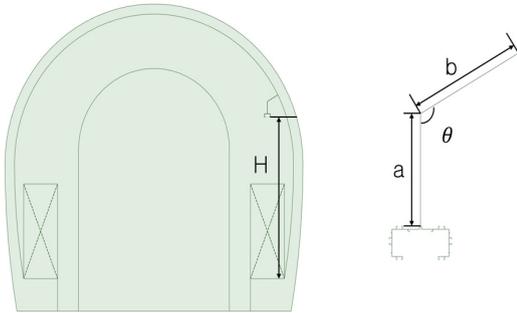


Fig. 4. Geometric parameter of rail

1m 간격으로 고정된 레일에 대하여 로봇의 자중에 의한 응력 해석을 수행하였다. 레일의 볼팅은 해당 위치의 절점의 자유도를 구속하는 방식으로 고려하였으며, 레일의 최대 응력을 살펴보았다. Fig. 5는 레일의 기하 변수의 변화에 따른 최대 응력값이다. 레일의 최대 응력은 주행 로봇과 가까운 고정 위치에서 나타났으며, 레일의 주재료인 알루미늄의 항복강도 280MPa와 비교해보면 레일의 형상에 따라 안전계수는 1.59에서 3.29까지 나타났다. 또한, 기하변수 a의 동일한 길이에 대해 각도가 증가하면 최대 응력은 감소하고, 같은 각도에 대해서도 기하변수 a의 길이가 증가하면 최대 응력이 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

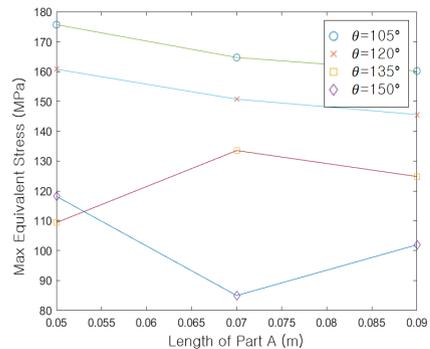
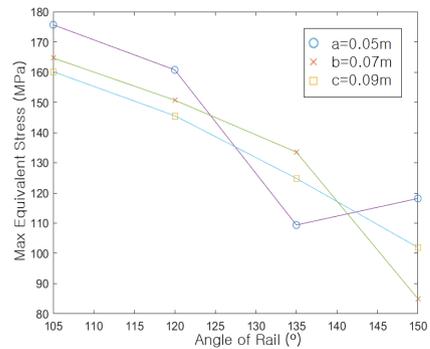


Fig. 5. Variation of maximum stress with geometric parameter
(a) Angle of rail, (b) Length parameter a

4. 궤도레일의 모드해석

Fig. 6은 레일 볼팅 조건 및 주행 로봇의 위치이다. 레일의 고정 간격 1m에 대하여 레일의 모드해석을 수행하였다. 레일의 고정은 해당 위치의 절점의 자유도를 구속하는 방식으로 고려하였으며, 1차 모드의 고유진동수와 모드형상을 살펴보았다.

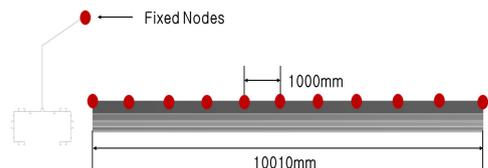


Fig. 6. Bolting condition of rail and position of evacuation guidance robot

Fig. 7은 레일의 각도에 따른 1차 고유진동수의 변화이다. 레일의 1차 고유진동수는 레일 형상에 따라 4.326Hz에서 6.064Hz까지 나타났으며, 로봇의 주행에 의한 가진주파수 12.5Hz와 비교하였을 때, 모든 레일의 공진 가능성이 높음을 알 수 있다. 또한, 같은 기하변수 a 의 길이에 대해 각도가 증가하면 1차 고유진동수는 감소하고, 같은 각도에 대해서도 기하변수 a 의 길이가 증가하면 1차 고유진동수는 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

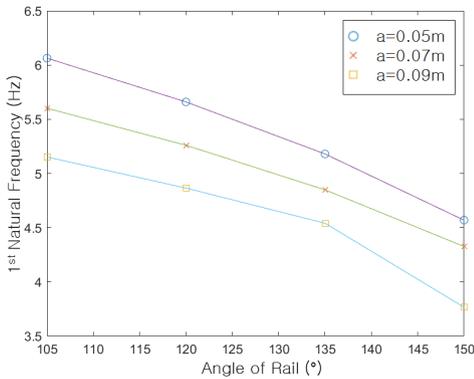


Fig. 7. Variation of natural frequency with angle of rail

5. 궤도레일의 위상최적설계

5.1 위상최적화에 기반한 레일 단면형상설계

레일의 위상최적화 결과를 기반으로 레일의 지지대를 설계하기 위해 설계 영역을 Fig. 8과 같이 설정하였다. 레일과 연결된 영역에는 로봇과 레일의 하단부에 의한 자중을 고려하여 압력을 가하였고, 터널과 만나는 지점의 자유도를 구속하여 응력을 계산하였다.

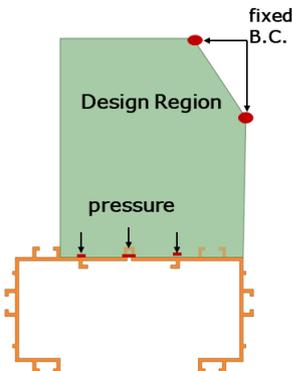


Fig. 8. Design region and boundary condition

부피 제약 조건을 고려하여 구조물의 강성을 최대화하는 위상최적설계를 수행하였다. Fig. 9는 질량 감소율에 따른 위상 최적설계 결과이며 질량을 90% 감소시킨 10% 유지 결과를 기반으로 레일의 단면 형상을 Fig. 10과 같이 재설계 하였다.

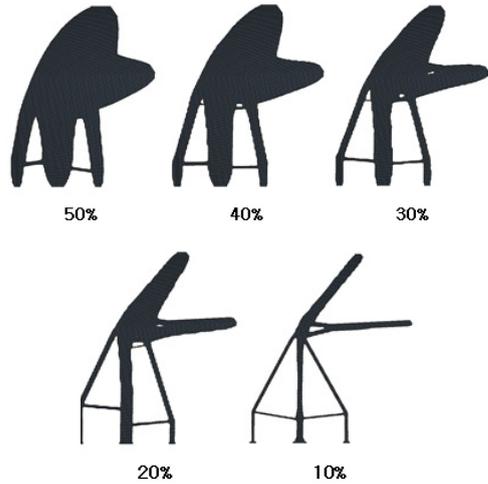


Fig. 9. Topology optimization result

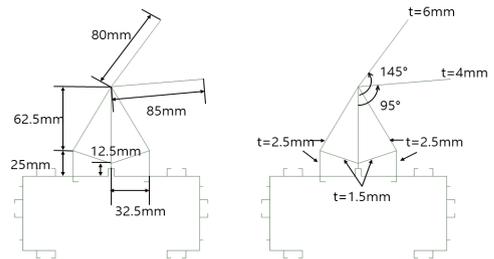


Fig. 10. Rail design based on topology optimization

위상 최적화 결과를 기반으로 변경된 레일 형상에 대해 응력해석과 모드해석을 수행한 결과, 최대 응력은 2.3MPa이고, 1차 고유진동수는 42.11Hz이다. 알루미늄 재료의 항복강도 280MPa와 비교하여 121.7의 안전계수를 얻을 수 있었고, 로봇의 주행에 의한 가진주파수 12.5Hz와 비교하여 공진이 일어날 가능성이 낮음을 알 수 있었다.

5.2 궤도 레일 지지대 너비 최적화

지지대를 모든 레일에 걸쳐서 설치하는 경우 지나치게 보수적인 결과가 도출됨을 확인하였다. Fig. 11과 같이 1m 간격으로 지지대를 설치하되 지지대의 너비를

변수로 설정하여 지지대의 너비에 따른 응력해석을 수행하였다.

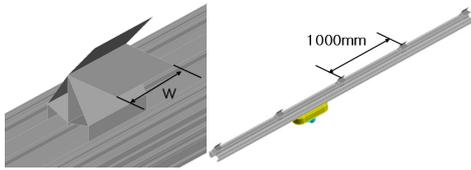


Fig. 11. Width of support and position of robot

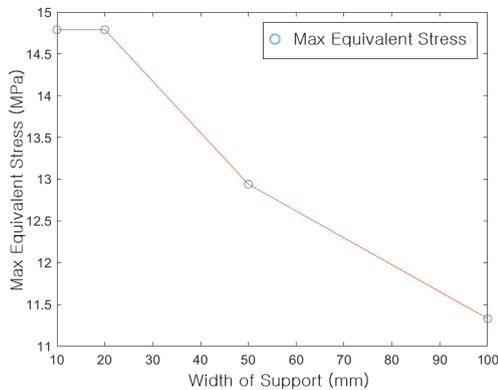


Fig. 12. Variation of maximum stress with width of support

Fig. 12는 지지대 너비 변화에 따른 응력 값의 변화이다. 지지대의 너비를 10mm까지 줄였을 때, 최대 응력은 14.79MPa, 안전계수는 18.93으로 계산되었으며 10mm까지 줄여도 안정성이 확보됨을 알 수 있다.

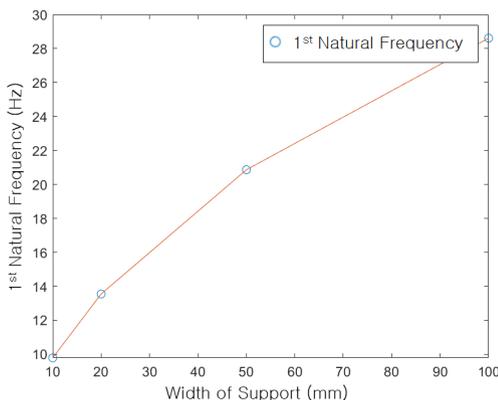


Fig. 13. Variation of natural frequency with width of support

Fig. 13은 지지대 너비 변화에 따른 고유진동수 값의 변화이다. 너비가 20mm 이하인 경우 1차 고유진동수

는 13.55Hz 이하로, 예상되는 가진주파수 12.5Hz와 비교하여 공진 안전계수는 1 이하이거나 1에 근접하기 때문에 적절한 너비가 아님을 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 피난관계 주행로봇 시스템의 주행 안정성 해석을 위한 궤도레일의 최적설계를 수행하였다. 본 연구의 주요 결론은 아래와 같다.

- (1) 기하변수로 선정된 궤도레일의 각도, 궤도레일 부재의 길이와 등가 응력 및 1차 고유진동수와 상관을 도출하였다.
- (2) 위상최적설계 기법을 적용하여 부피 제약 조건을 갖는 구조물의 강성 최대화 문제를 해결함으로써 주행 안정성 측면에서 최적의 궤도레일 단면 형상을 획득하였다.
- (3) 설계의 효율성을 위하여 궤도레일 지지대 단면 형상의 너비 치수와 등가 응력 및 1차 고유진동수와 상관을 검토하여 최적의 너비 치수를 도출하였다.
- (4) 응력 해석 관점에서 충분한 안정성을 확보하고 모드 해석 관점에서 공진을 피하면서 재료 사용량을 최소로 하는 최적의 궤도레일 형상을 획득하였다.

References

- [1] N. Park, Y. Ahn, Y. Hwang, A Study on the Development of a Remote Control Drone for Disaster Response, *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 15, No. 4, pp. 578-589, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15683/kosdi.2019.12.31.578>
- [2] S. H. Lee, J. S. Ko, Y. H. Jung, H. S. Shin, C. J. Kim, S. Y. Lee, C. S. Han, A Study on the Driving Analysis of Tracked Robot, *The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 142-147, 2007.
- [3] D. K. Choi, S. M. Jung, J. W. Kim, Conceptual Design and Analysis of the Rough Terrain Mobile Robot, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 30, No. 1, pp. 24-31, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2013.30.1.24>
- [4] Y. S. Kim, H. Kim, G. P. Kim, S. H. Kim, K. J. Cho, J. N. Chu, A New Wheel Design for Miniaturized Terrain Adaptive Robot, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 30 No. 1, pp. 32-38, 2013.

DOI: <http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2013.30.1.32>

- [5] H. W. Jung, S. H. Park, H. B. Yoo, M. S. Park, S. H. Kim, A Study on Autonomous Driving Robots to Overcome Obstructions in Hybrid Wheel, Proceedings of the Korea Information Processing Society Conference, Vol. 27, No. 2, pp. 621-624, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.3745/PKIPS.y2020m11a.621>
- [6] D. Y. Kim, S. W. Park, J. P. Kim, W. J. Jung, D. H. Kwak, Development of Pipe Robot by Using Mecanum Wheels. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No. 2, pp. 58-65, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2021.20.02.058>
- [7] S. H. Ahn, D. H. Lee, J. S. Kim, Running Stability Analysis of Evacuation Guidance Robot at Deep and Long Rail Tunnels, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 22, No. 12, pp. 883-888, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.12.883>

안 승 호(Seung Ho Ahn)

[정회원]



- 2009년 2월 : 서울대학교 조선해양공학과 (공학학사)
- 2016년 8월 : 서울대학교 조선해양공학과 (공학박사)
- 2016년 8월 ~ 2020년 6월 : (주)한화/방산 선임연구원
- 2020년 6월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 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 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도 방재 및 화재 열유체

장 흥 래(Hong-Lae Jang)

[정회원]



- 2008년 8월 : 서울대학교 조선해양공학과 (공학학사)
- 2015년 2월 : 서울대학교 조선해양공학과 (공학박사)
- 2016년 9월 ~ 2019년 8월 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2019년 9월 ~ 현재 : 창원대학교 기계공학부 조교수

<관심분야>

최적설계, 철도차량 충돌안전

박 종 환(Jonghwan Park)

[준회원]



- 2017년 2월 ~ 현재 : 창원대학교 기계공학부 기계공학전공 학부생

<관심분야>

최적설계, 철도차량 충돌안전