

도시형 자기부상열차 부상레일의 피로해석

Fatigue Analysis for Levitation Rail of Urban Maglev System

김경택* 김재용* 김용환* 박진수** 변상윤***

Kim, Kyung-Taek Kim, Jae-Yong Kim, Yong-Hwan Park, Jin-Soo Pyen, Sang-Yun

ABSTRACT

A levitation rail is placed on the top of track structure to operate Maglev vehicles and a part of track that link up with a sleeper is applied repeated load in Maglev vehicles operation. This paper aimed to verify validity of design for levitation rail, through the fatigue analysis about load which is applied to levitation rail in Maglev vehicles operation and impact load occurring in an emergency landing. Load conditions applied design load(23kN/m) in normal operation and skid drop load(24kN/m) in vehicle drop. And boundary conditions are consider bolt fixing and welding.

Through static analysis, weak point and maximum stress of levitation rail could be obtained. S-N(stress-life) method was used in order to predict fatigue life, and Goodman relationship was applied to consider a effect of mean stress. Also damage was calculated by using Miner's. As a result of fatigue analysis, levitation rail had a fatigue life which was more than requirement (10^6 cycle) in all analysis conditions. Assumption that $10^8 \sim 10^9$ cycles is infinite life, all analysis conditions had infinite life except a case under drop load and bolt fixing(1.21×10^6).

1. 서론

자기부상열차에 있어서 레일은 궤도의 상부에 설치되어 차량의 부상, 추진 및 안내와 지지역할을 수행하는 구조물의 일부분으로서, 레일의 구성요소는 차량의 대차에 취부 되어 있는 전자석으로부터 자력을 유도 받아 차량의 부상 및 안내역할을 하는 부상레일(Guide Rail)과 선형유도전동기에서 발생하는 와류에 대한 반발력을 발생시키는 추진레일(Reaction Plate)로 구성되어 있으며, 열차의 주행시 레일과 침목의 연결부는 반복적인 피로하중을 받게 된다.

레일의 피로강도(fatigue strength) 및 피로수명(fatigue life)은 레일의 형상(geometry), 재료의 특성(material property), 레일에 작용하는 하중이력(loading history) 및 사용 환경 등의 여러 가지 특징들에 근거한다. 이러한 특징들을 고려하여 레일의 취약부위 및 피로수명(fatigue life)을 가장 근사하게 예측할 수 있는 방법은 실험적인 접근이며 대부분의 제품의 개발 과정에는 실제의 구조물을 이용한 시험평가가 행해지고 있다. 하지만 실험적인 접근은 비용과 시간 측면에서 부담이 크기 때문에 설계의 초기 단계부터 적용하기엔 무리가 따른다.

이에 본 연구에서는 자기부상열차의 주행시 부상레일이 부담하게 되는 피로하중 및 비상착지시 발생하는 충격하중에 대한 피로해석을 통하여 부상레일의 설계 건전성을 검증하고자 하였다.

* 한국생산기술연구원, 신기능소재팀, 회원

E-mail : kkt@kitech.re.kr

TEL : (032) 850-0213 FAX : (032) 850-0210

** 현대제철(주), 전략기술팀, 비회원

***Simulink, 컨설팅사업부, 비회원

2. 본 문

2.1 부상레일의 형상 및 재질

본 연구에서 사용된 부상레일은 백아이언부, 상면 및 폴부분이 일체형인 형상을 하고 있으며 그림 1에서와 같이 F자 형상의 단면을 가지고 있다. 그림 1은 형상정보를 바탕으로 구성된 부상레일의 유한요소모델(단위길이 : 1.25m)을 나타낸 것으로 사면체 요소를 사용하였으며 총 절점수는 189,804개이고 요소수는 118,886개이다. 해석에 사용된 재질은 SS400으로 물성치는 표 1.과 같다.

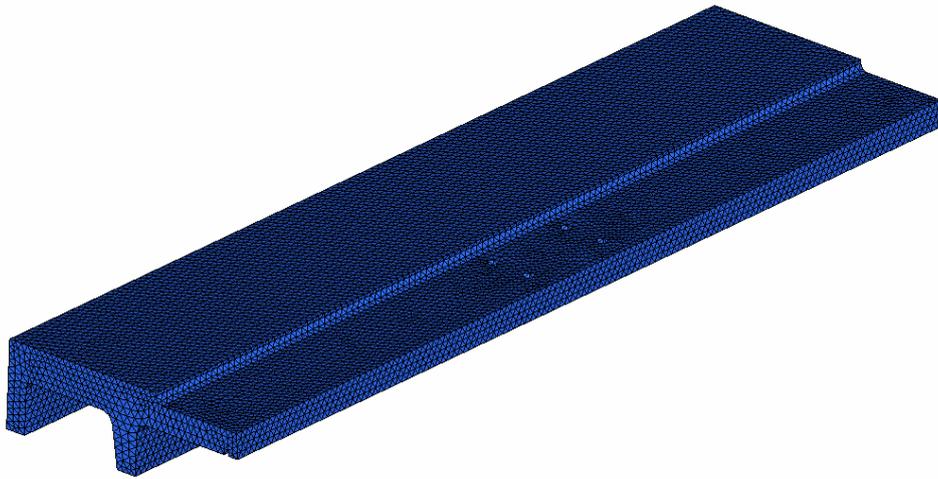


그림 1. 부상레일의 FE Model (단위길이 : 1.25m)

표 1. Material Properties

Material	SS400
Density [g/cc]	7.85
Modulus of Elasticity [GPa]	210
Poisson's Ratio	0.3
Yield Strength [MPa]	275

2.2 하중조건 및 경계조건

부상레일의 작용하는 하중은 하중이 작용하는 위치에 따라 두 가지로 구분할 수 있다. 일반적으로 주행 중 자기부상열차의 하중은 부상레일의 폴부분을 통해 전달되며, 열차 이상시 또는 비상 주행시의 경우 자기부상열차의 하중은 부상레일의 백아이언부 상면을 통해 전달된다. 본 연구에서는 전자의 경우 궤도시스템의 목표설계하중(23kN/m)을, 후자의 경우 스키드 낙하하중(24kN/m)을 적용하여 해석을 수행하였다.

부상레일과 궤도시스템의 결합 방식에 대해서는 볼트체결에 의한 결합 방식과 용접에 의한 결합 방식 두 가지 경우를 가정하여 각각의 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

그림 2는 각 해석에 사용된 하중조건과 경계조건에 나타낸 것으로 각각의 경우에 대한 해석조건은 표 2와 같다.

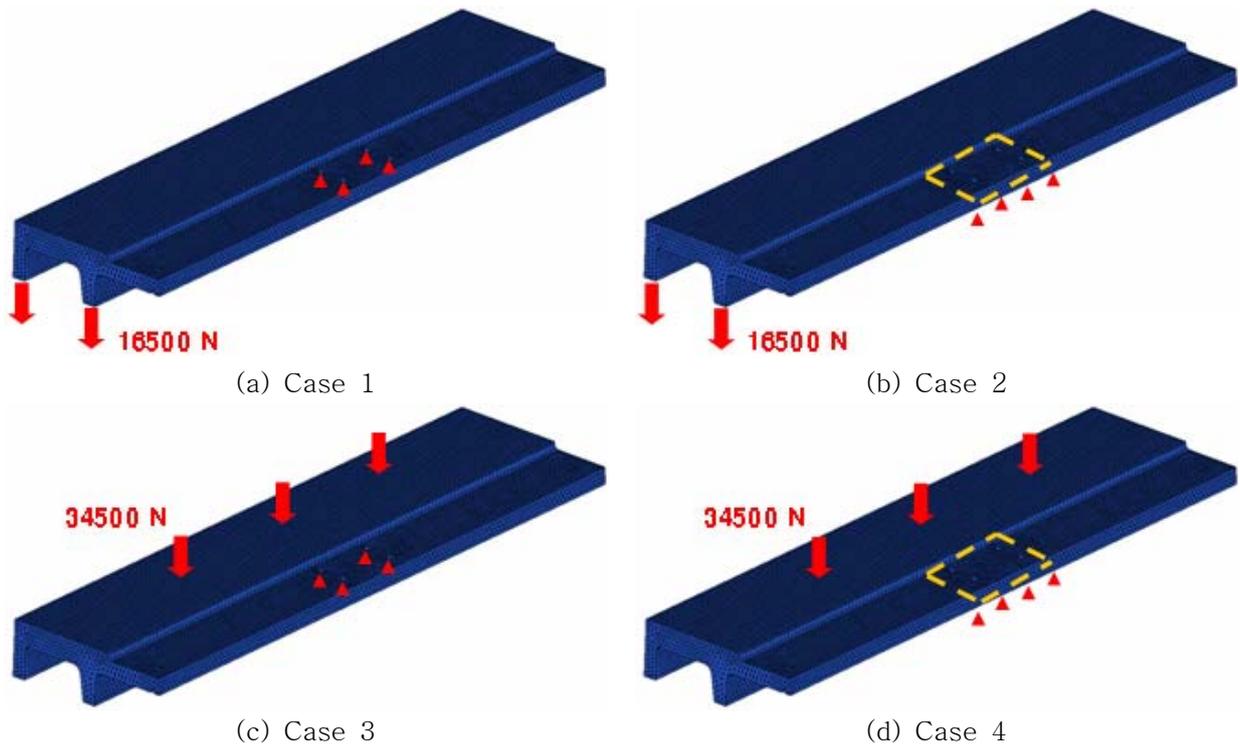


그림 2. 하중조건 및 경계조건

표 2. 해석조건 분류

Case	적용 하중	결합방식
1	목표설계하중 (폴부분)	볼트체결
2	목표설계하중 (폴부분)	용접
3	스키드낙하하중 (백아이어부 상면)	볼트체결
4	스키드낙하하중 (백아이어부 상면)	용접

2.3 정적해석

그림 3은 각 해석조건에 따른 부상레일의 응력분포를 나타낸 것이다. 응력분포를 살펴보면 최대응력이 볼트체결의 경우 볼트체결 부위에서 발생하며 용접의 경우 안쪽 폴 부분의 뿌리 부위에서 발생함을 알 수 있다. 해석결과를 요약하면 표 3과 같다.

표 3. Maximum Stress

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Maximum Stress(MPa)	133	34	231	59.6
Yield Strength(MPa)	275			
M.S.	0.72	6.16	0	2.85

$$\ast M.S. = \left(\frac{Yield\ Strength}{Safety\ Factor \times Applied\ Stress} \right) - 1, \quad Safety\ Factor = 1.2$$

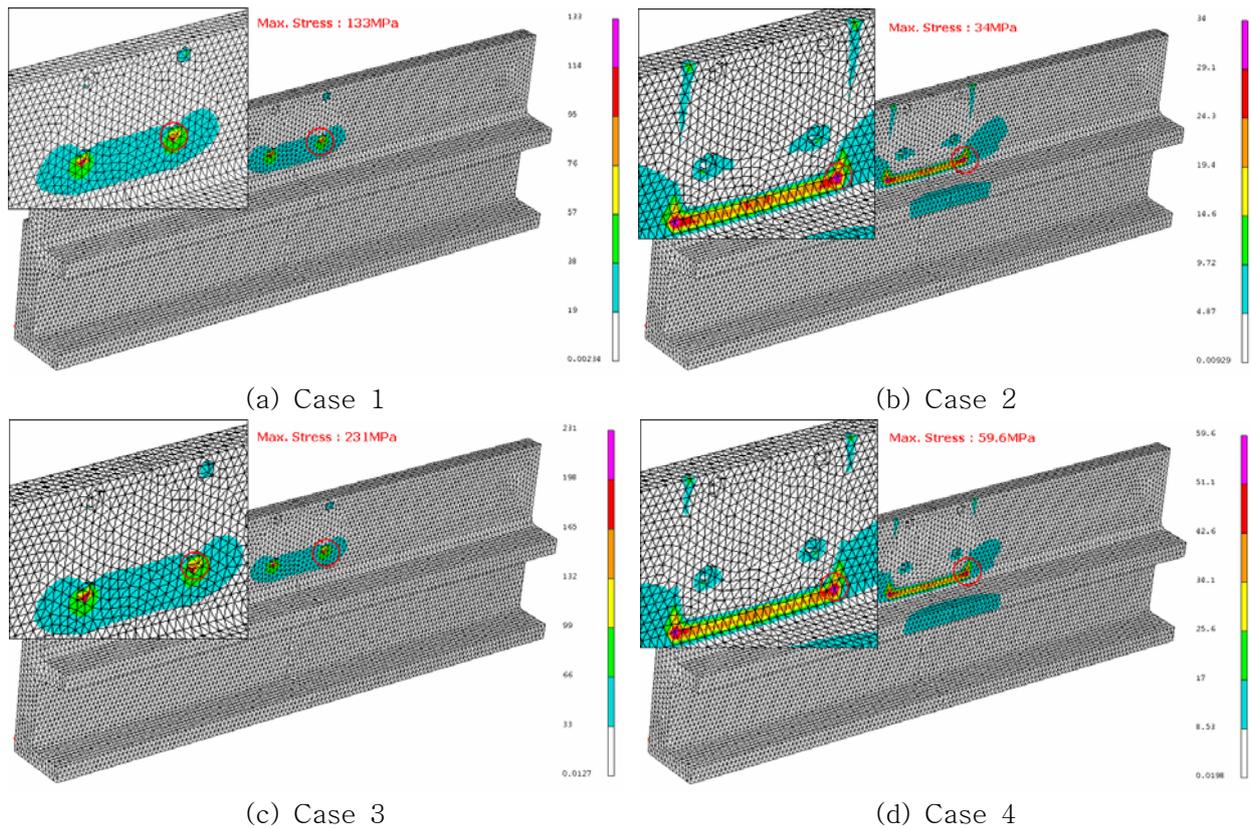


그림 3. 해석조건에 따른 부상레일의 응력분포

2.4 하중스펙트럼의 정의

부상레일의 피로 수명을 예측하기 위해서는 우선 부상레일에 작용하는 하중 스펙트럼에 대하여 정의하여야 하며 부상레일에 작용하는 하중 스펙트럼은 자기부상열차의 작동하중에 의해 결정되어진다. 본 연구에서는 부상레일의 정적해석에서 고려한 하중조건을 바탕으로 부상레일의 피로하중을 결정하였다. 부상레일은 10^6 cycle동안 반복하중을 받으며 진폭은 각 조건에서 적용된 하중의 1/2에 해당하는 값으로 정의하였다. 그림 4는 부상레일에 작용하는 하중이력을 나타낸 것이다.

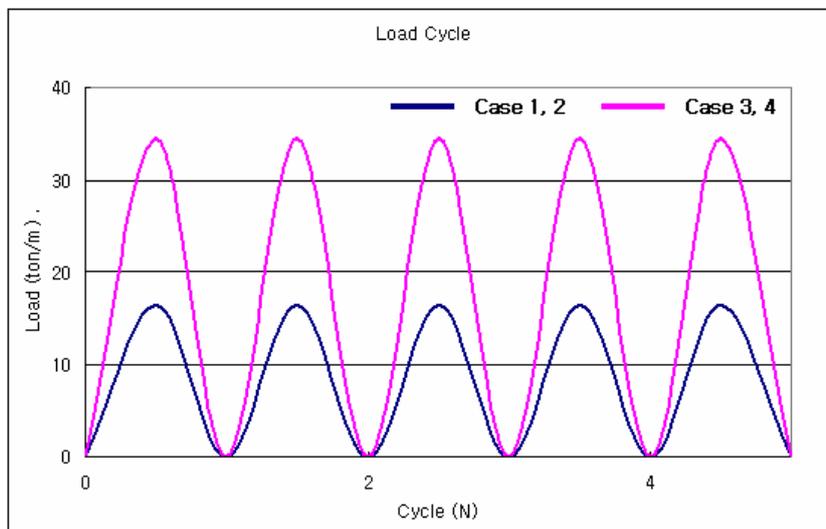


그림 4. 부상레일의 하중 스펙트럼

2.5 피로해석

부상레일의 피로 수명은 응력-수명(Stress-Life) 방법을 사용하여 예측하였다. 응력-수명 방법의 기본은 파괴 시까지의 반복수(N)에 대한 교변응력(S)의 관계로 나타내어지는 S-N 선도이다. 그림 5는 해석에 사용된 SS400의 S-N 선도를 나타낸 것이다.

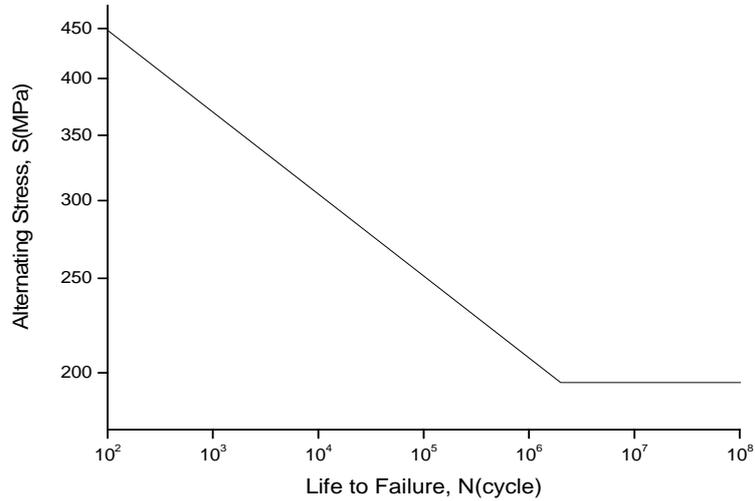


그림 5. S-N Curve

평균응력의 영향을 고려하기 위해 Goodman 관계식을 적용하였으며 Damage 계산에는 Miner 법칙을 이용하였다. 그림 6은 각 해석조건에 따른 부상레일의 손상률(damage)을 나타낸 것이다.

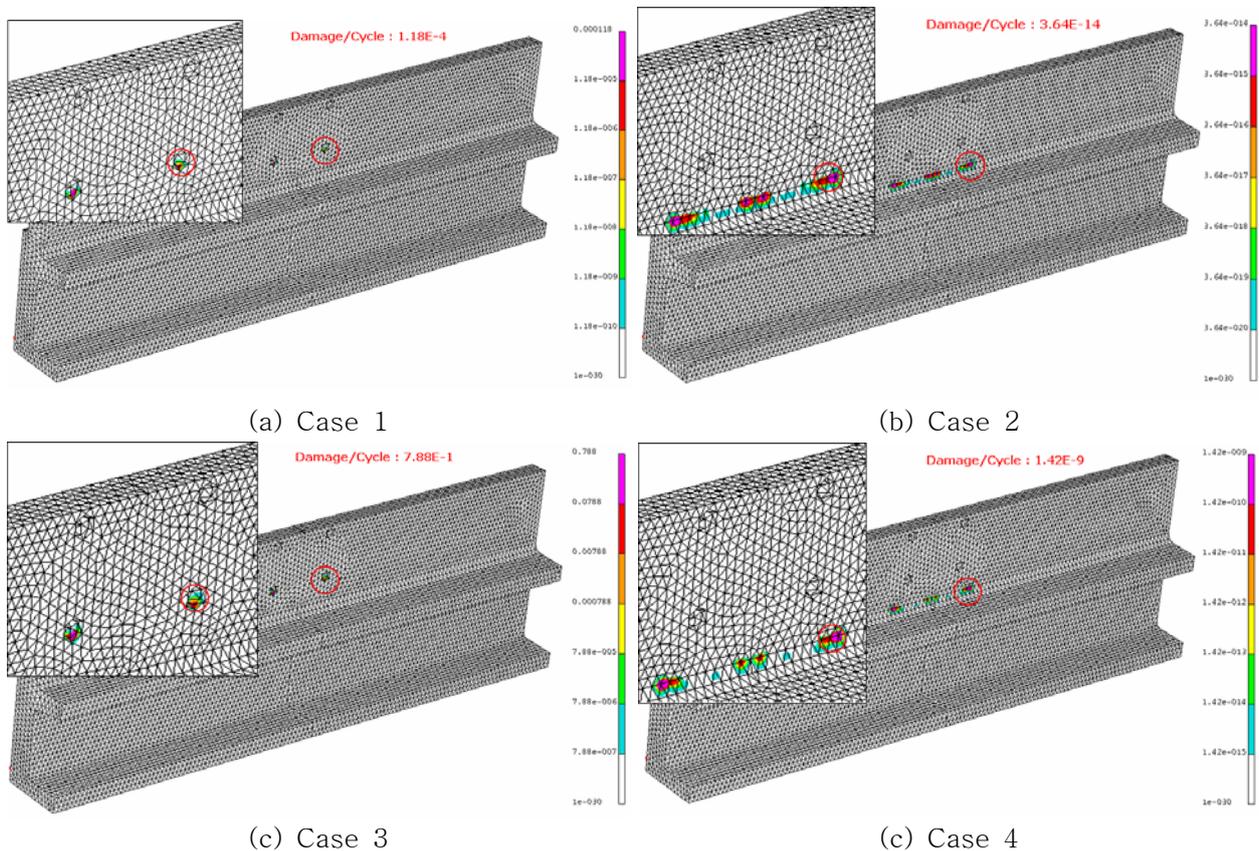


그림 6. 해석조건에 따른 부상레일의 Damage

해석결과를 살펴보면 주어진 해석조건에서 모두 요구하는 피로수명 이상의 피로수명을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 보통 산업적으로 $10^8 \sim 10^9$ cycle을 무한수명으로 가정하므로 Case 3을 제외하고 무한수명으로 가정할 수 있다. 표 4는 부상레일의 피로해석 결과를 요약하여 나타낸 것이다.

표 4. Fatigue Life and Damage

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Fatigue Life (cycle)	8.47×10^9	2.75×10^{19}	1.21×10^6	7.04×10^{14}
Damage.	1.18×10^{-4}	3.64×10^{-14}	7.88×10^{-1}	1.42×10^{-9}

3. 결 론

본 연구에서는 자기부상열차의 주행시 부상레일이 부담하게 되는 피로하중 및 비상착지시 발생하는 충격하중에 대한 피로해석을 통하여 부상레일의 설계 건전성을 검증 하였다. 하중 및 경계조건은 정상상태의 주행을 고려하여 설계하중인 23kN/m를 적용하였으며, 차량의 낙하 및 비상주행시를 고려하여 스키드 낙하하중인 24kN/m를 적용하여 레일과 침목의 체결방식에 따라 볼트체결과 용접체결의 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

정적해석시 응력집중은 볼트체결 및 용접체결의 두 경우 모두 침목의 선단부분에서 발생하였으며, 최대응력은 231MPa로서 볼트체결방식의 경우에서 발생하였다. 피로수명은 응력-수명방법을 사용하여 예측하였으며, 평균응력의 영향을 고려하기 위하여 Goodman 관계식을 적용하고 Damage 계산에는 Miner법칙을 이용한 피로해석 결과는 주어진 해석조건에서 모두 요구하는 피로수명 이상의 피로수명을 나타내었으며, $10^8 \sim 10^9$ 사이클을 무한수명으로 가정하면 볼트체결방식의 낙하하중상태(1.21×10^6)를 제외하고 모두 무한수명을 갖는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 도시형 자기부상열차 실용화 사업단의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 최은수, 이희업, 김이현, 정원석(2006), “도시형 자기부상철도 궤도구조 개선 및 거동분석”, 한국철도학회 특별세션, pp. 239-252
2. 권순기, 박형진(1996), “중장비의 동적 시뮬레이션과 유한요소법을 이용한 피로수명예측”, 대한 기계학회 논문집, Vol. 20, No. 5, pp. 1392-1400
3. 심동석, 김강범, 김정규(2000), “변동하중하에서 고강도 알루미늄 합금의 피로수명 예측”, 대한 기계학회 논문집, Vol. 24, No. 8, pp. 2074-2082
4. 김철수, 이준형, 김정규(2001), “커넥팅 로드 의 피로강도에 대한 신뢰성 해석”, 대한 기계학회 논문집, Vol. 25, No. 10, pp. 1651-1658
5. 이용복, 김호경, 정진성(2005), “피로해석의 기초”, 淸文閣 A4(210×297mm)

도시형 자기부상열차 부상레일의 피로해석

Fatigue Analysis for Levitation Rail of Urban Maglev System

김경택* 김재용* 김용환* 박진수** 변상윤***

Kim, Kyung-Taek Kim, Jae-Yong Kim, Yong-Hwan Park, Jin-Soo Pyen, Sang-Yun

ABSTRACT

A levitation rail is placed on the top of track structure to operate Maglev vehicles and a part of track that link up with a sleeper is applied repeated load in Maglev vehicles operation. This paper aimed to verify validity of design for levitation rail, through the fatigue analysis about load which is applied to levitation rail in Maglev vehicles operation and impact load occurring in an emergency landing. Load conditions applied design load(23kN/m) in normal operation and skid drop load(24kN/m) in vehicle drop. And boundary conditions are consider bolt fixing and welding.

Through static analysis, weak point and maximum stress of levitation rail could be obtained. S-N(stress-life) method was used in order to predict fatigue life, and Goodman relationship was applied to consider a effect of mean stress. Also damage was calculated by using Miner's. As a result of fatigue analysis, levitation rail had a fatigue life which was more than requirement (10^6 cycle) in all analysis conditions. Assumption that $10^8 \sim 10^9$ cycles is infinite life, all analysis conditions had infinite life except a case under drop load and bolt fixing(1.21×10^6).

국문요약

부상레일은 자기부상열차의 운영을 위한 선로구축물의 궤도상부에 설치되어 있으며, 열차의 주행시 레일과 침목의 연결부는 반복적인 피로하중을 받게 된다. 이에 본 연구에서는 자기부상열차의 주행시 부상레일이 부담하게 되는 피로하중 및 비상착지시 발생하는 충격하중에 대한 피로해석을 통하여 부상레일의 설계 건전성을 검증하고자 하였다. 하중 및 경계조건은 정상상태의 주행을 고려하여 설계하중인 23kN/m를 적용하였으며, 차량의 낙하 및 비상주행시를 고려하여 스키드 낙하하중인 24kN/m를 적용하여 레일과 침목의 체결방식에 따라 볼트체결과 용접체결의 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

정적해석시 응력집중은 볼트체결 및 용접체결의 두 경우 모두 침목의 선단부분에서 발생하였으며, 최대응력은 231MPa로서 볼트체결방식의 경우에서 발생하였다. 피로수명은 응력-수명방법을 사용하여 예측하였으며, 평균응력의 영향을 고려하기 위하여 Goodman 관계식을 적용하고 Damage 계산에는 Miner법칙을 이용한 피로해석 결과는 주어진 해석조건에서 모두 요구하는 피로수명 이상의 피로수명을 나타내었으며, $10^8 \sim 10^9$ 사이클을 무한수명으로 가정하면 볼트체결방식의 낙하하중상태(1.21×10^6)를 제외하고 모두 무한수명을 갖는 것을 알 수 있었다.

* 한국생산기술연구원, 신기능소재팀, 회원

E-mail : kkt@kitech.re.kr

TEL : (032) 850-0213 FAX : (032) 850-0210

** 현대제철(주), 전략기술팀, 비회원

***Simulink, 컨설팅사업부, 비회원