

모노레일 대차프레임에 대한 구조 안전성 및 피로강도 평가에 관한 연구

A Study on Evaluation of Structural Integrity and Fatigue Analysis for the Bogie Frame of Monorail

고희영* 신광복† 이광섭** 이은규**
Hee-Young Ko Kwang-Bok Shin Kwang-Seop Lee Eun-Gyu Lee

ABSTRACT

In this paper, the structural integrity and fatigue strength for the bogie frame of Monorail being developed in domestic was evaluated. Presently, the standard of evaluation for the bogie frame of monorail was not regulated. Therefore, the evaluation of the structural integrity and fatigue strength for the bogie frame was performed on the basis of the UIC 615-4 standard. The structural integrity of the designed bogie frame was evaluated by displacement and Von-Mises stress under each load conditions. And the fatigue strength was evaluated by combined main in-service load conditions specified at UIC 615-4 standard and it was compared with result of fatigue analysis using winLIFE v3.1 with the function of batch processing. The results shows that the structural integrity and fatigue strength of the designed bogie frame was satisfied, and the fatigue analysis using batch processing was more effective than conventional fatigue analysis using combined load conditions.

1. 서론

경전철은 기존 지하철에 비해 건설비 및 운영비를 절감할 수 있으며, 정시성 및 친환경성의 특징을 갖는 신교통 수단으로서 국외뿐만 아니라 국내에서도 많은 도입이 이루어지고 있다. 이러한 경전철 종류에는 모노레일, 자동무인경전철(AGT), LIM, 노면전차 등이 있으며[1-2], 이때 모노레일은 2~4량을 1편성으로 하여 궤도형태의 1개 주행로를 따라 차량이 운행되며, 주행방식은 현수식 또는 과좌식으로서 고무차륜이 외부에 노출되어 있지 않고 궤도를 감싸는 특징을 갖는다. 또한, 다른 경전철에 비해 도시미관 및 공간 활용성 면에서 우수한 특징을 갖는다[3-4]. 모노레일은 독일 뷔퍼탈(wuppertal)에서 처음으로 운행되었으며, 현재는 호주, 미국, 일본 등에서 주로 운행되고 있다. 이에 국내에서도 대구 3호선에 모노레일을 도입하기 위해 연구개발 중에 있다[5-6].

모노레일의 개발에 있어서 가장 중요한 구조물인 대차 프레임의 설계는 차체의 자중 및 승객하중에 따른 정적하중에 대해 구조적 안전성뿐만 아니라 지면과 접촉하여 운행되기 때문에 진동 및 반복하중에 대한 피로강도가 충분히 보장되도록 해야 한다[7-9]. 이때, 일반적인 대차 프레임에 대한 구조 안전성 평가 기준에는 KS R9210[10], JIS E4207/4208[11], UIC 515/615-4[12] 등이 있으나, 모노레일 대차 프레임에 대한 평가기준은 아직 규정되지 않은 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 모노레일 대차 프레임의 구조 안전성 평가를 수행하고, 이에 대한 피로강도 평가를 수행하여 피로수명을 예측하였다. 이때, 하중조건은 유럽규격인 UIC 615-4 기준을 적용하여 도출

† 교신저자 : 정희원, 국립 한밭대학교, 기계공학부 교수
E-mail : shin955@hanbat.ac.kr
TEL : (042)812-1156 FAX : (042)821-1587

* 국립 한밭대학교, 기계설계공학과 대학원

** (주)우진산전

하였으며, 유한요소해석 프로그램인 Ansys v11.0을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 그리고 Goodman 선도를 이용하여 UIC 615-4 기준에 의한 17개의 조합 주운용하중조건에 대해 피로강도를 평가하고, 이를 일괄처리 해석기능을 갖는 피로해석 전용 프로그램인 winLIFE 3.1을 이용한 피로해석 결과와 비교 검증하였다

2. 평가기준 및 하중조건

현재 모노레일 대차 프레임에 대한 평가 기준은 규정되지 않은 실정이며, 이에 구조 안전성 및 피로강도 평가는 유럽철도 규격인 UIC 615-4를 적용하여 하중조건을 도출하고 평가를 수행하였다. 이때, UIC 615-4 기준에서는 하중조건을 예외하중(exceptional load), 주운용하중(main in-service load), 특수운용하중(particular in-service load)으로 구분하고 있으며, 이에 본 연구에서는 모노레일 대차 프레임에 적용할 수 있는 예외하중과 주운용하중에 대해 각각 평가를 수행하였다.

예외하중 조건은 대차 프레임에 발생할 수 있는 최대하중들을 나타낸 것으로서, 대차 프레임에 대한 구조적 안전성을 평가하는데 사용된다. 표 1은 예외하중 조건들을 나타낸 것으로서, 모노레일 대차프레임의 형상을 고려하여 하중조건을 선정하였다. 이때, 수직하중과 좌우하중은 UIC 615-4기준에 따라 적용하였으나, 기준에 제시되어 있지 않은 코너링 하중 조건은 모노레일 대차프레임이 곡선부 주행시에 안정륜에서 받게 되는 반력을 고려하여 추가로 적용하였다. 그리고 일반적인 대차프레임에 발생하는 비틀림 하중은 1개의 주행로를 운행하는 모노레일의 특성상 제외되었다.

주운용하중 조건은 대차 프레임에 발생할 수 있는 수직하중, 좌우하중 및 코너링 하중들에 대해 중첩된 하중조건들을 나타낸 것으로서, 대차 프레임에 대한 피로균열 여부를 평가하는데 사용된다. 표 2는 주운용하중 조건들을 나타낸 것으로서, 대차의 동하중 변화를 고려하여 하중조건들이 선정되었다.

3. 대차 프레임의 구조안전성 평가

3.1 유한요소 모델링 및 적용 물성

모노레일 대차 프레임의 구조 안전성 평가는 유한요소 해석 프로그램인 Ansys v11.0을 통해 수행되었다. 이때, 각 프레임들은 2차원 쉘 요소(shell 63)를 사용하여 모사하였으며, 구동축 및 기어박스 3차원 솔리드 요소(solid 45)를 사용하여 모사하였다. 그리고 프레임 연결부위의 볼트는 3차원 Timoshenko 빔 요소(beam 188)를 사용하였으며, 이때 접촉되는 프레임은 접촉 조건(contact condition)을 적용하였다. 구조해석에 적용된 유한요소모델의 절점수와 요소수는 각각 162,984개와 200,584개이다. 표 3은 대차 프레임에 적용된 SM490A에 대한 물성을 나타낸다.

표 1. 예외하중 조건

Load case	Vertical load(N)		Lateral load(N)	Cornering load(N)
	(F _{z1})	(F _{z2})	(F _z)	(F _c)
1	40956.8	40956.8	0	0
2	26621.9	26621.9	17609.0	0
3	26621.9	26621.9	0	17609.0

표 2. 주운용하중 조건

Load case	Vertical load(N)		Lateral load(N)	Cornering load(N)
	(F _{z1})	(F _{z2})	(F _z)	(F _c)
1	22759.2	22759.2	0	0
2	20483.3	15931.4	0	0
3	20483.3	15937.4	14200.0	0
4	29587.0	25035.1	0	0
5	29587.0	25035.1	14200.0	0
6	15931.4	20483.3	0	0
7	15931.4	20483.3	-14200.0	0
8	25035.1	29587.0	0	0
9	25035.1	29587.0	-14200.0	0
10	22759.2	22759.2	14200.0	14200.0
11	20483.3	15931.4	14200.0	-14200.0
12	20483.3	15937.4	14200.0	14200.0
13	29587.0	25035.1	14200.0	-14200.0
14	29587.0	25035.1	-14200.0	14200.0
15	15931.4	20483.3	-14200.0	-14200.0
16	15931.4	20483.3	-14200.0	14200.0
17	25035.1	29587.0	-14200.0	-14200.0

표 3. 대차프레임 적용 물성

Material	Elastic modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)
SM490A	210	7,850	0.3	330

3.2 구조해석 결과

모노레일 대차 프레임의 구조해석은 UIC 615-4 기준에 따른 예외하중조건을 적용하였으며, 이때 대차 프레임의 형상 및 하중조건은 그림 1과 같다.

표 4는 대차 프레임에 대한 구조해석 결과를 보여준다. 이때, 최대 Von-mises 응력은 두 번째 하중조건에서 226.6MPa이 구동축을 고정시켜주는 프레임 모서리에서 발생하였으나, 이는 SM490A의 항복강도인 330MPa 보다 낮아 구조적으로 안전함을 확인하였다. 이때, 안전계수(n)는 1.46으로 일반 대차 기준에 비해 다소 낮지만 모노레일의 경우 운행속도가 낮고, 전용선로를 운행하는 특성을 갖고 있어 돌발적인 외부하중 등이 적으며, 경량화가 중요한 설계변수 이므로 현재의 안전계수 값이 안전한 것으로 판단된다. 최대 변위는 세 번째 하중조건에서 좌우하중을 받는 하부 프레임에서 1.535mm가 발생됨을 확인하였다. 그림 2와 3은 2번째 하중조건에 대한 변위결과와 Von-mises 응력 분포 결과를 각각 보여준다. 표 5는 고유진동수 해석 결과를 나타낸 것으로서 1차 굽힘 모드는 67.1Hz이고, 비틀림 모드는 71.9Hz로 각각 확인되었다.

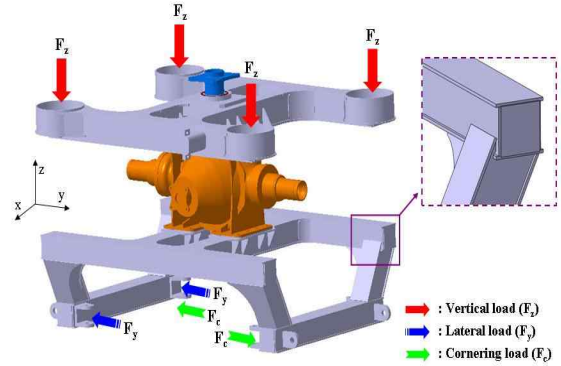


그림 1. 하중조건

이때, 최대 변위는 세 번째 하중조건에서 좌우하중을 받는 하부 프레임에서 1.535mm가 발생됨을 확인하였다. 그림 2와 3은 2번째 하중조건에 대한 변위결과와 Von-mises 응력 분포 결과를 각각 보여준다. 표 5는 고유진동수 해석 결과를 나타낸 것으로서 1차 굽힘 모드는 67.1Hz이고, 비틀림 모드는 71.9Hz로 각각 확인되었다.

표 4. 구조해석 결과

Load case	Max. displacement (mm)	Von-Mises stress (MPa)	Safety factor (n)
1	1.279	154.4	2.14
2	1.351	226.6	1.46
3	1.535	100.4	3.29

표 5. 고유진동수 결과

Mode	Natural frequency (Hz)	
	Bending mode	Twisting mode
1 st mode	67.1	71.9
2 nd mode	100.2	73.9

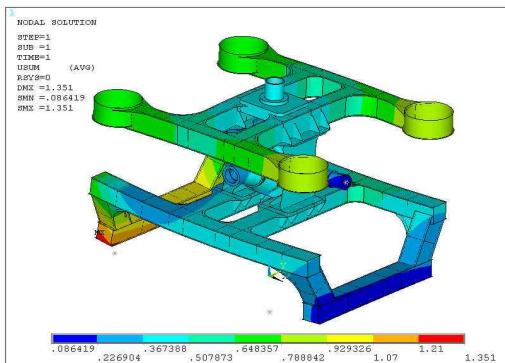


그림 2. 변위 결과(load case 2)

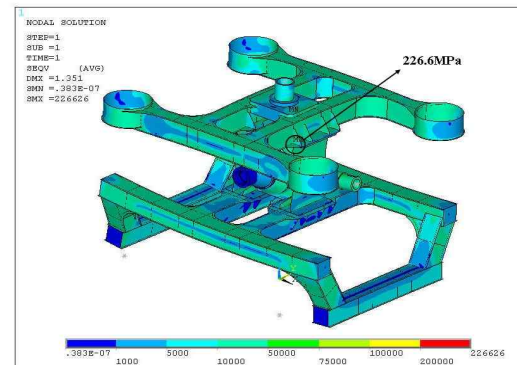


그림 3. Von-mises 응력 결과(load case 2)

4. 대차 프레임의 피로강도 평가

4.1 주운용하중 조건에 따른 피로강도 평가

구조적 안전성 평가를 통해 도출된 대차 프레임의 3차 설계 모델에 대해 동적하중을 적용한 피로강도 평가를 수행하였다. 이때, 하중조건은 앞에서 나타냈듯이 UIC 615-4 규정에 의해 17개의 조합 주운용하중조건을 적용하였으며, 각 하중조건에 대해 구조해석을 수행한 후, 그 결과를 조합하여 피로강도를 도출하였다.

주운용하중조건에 대한 대차 프레임의 피로강도 평가는 Goodman 선도상에 표현하였으며, 이때 평균 응력(σ_m)과 응력진폭($\Delta\sigma$) 값은 각 하중조건들에 대한 해석결과를 통해 도출하였다. 식(1)과 (2)는 평균 응력과 응력진폭을 구하는 식으로서, 최대응력(σ_{max})과 최소응력(σ_{min})을 통하여 정의된다.

표 6은 대차 프레임의 피로강도를 평가하기 위한 SM490A에 대한 기계적 물성을 나타낸 것이다[11]. 이때, 재료의 항복강도, 인장강도, 피로한도(10^7 cycle)를 통해 Goodman 선도상의 피로한도 기준선을 정의할 수 있다.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1)$$

표 6. SM490A의 피로강도 물성정리

Material	Yield strength (MPa)	Failure strength (MPa)	*Fatigue strength (MPa)	
			Basic material	Grinding & welding
SM490A	330	490	155	110

*Fatigue strength with endurance limit of 10^7 cycle

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2)$$

그림 4는 주운용하중조건에 따른 평균응력과 응력 진폭 결과를 Goodman 선도에 나타낸 것이다. 이때, 선도상의 실선은 SM490A에 대한 피로한도를 나타내며, 점선은 SM490A의 용접후 그라인딩에 대한 피로한도를 나타낸다. 피로강도 평가결과 구조해석시에 높은 응력결과를 나타낸 절점들에 대한 결과가 용접후 그라인딩선 안에 나타났으며, 이를 통해 설계된 대차 프레임이 피로한도 기준인 10^7 사이클 이상의 수명을 갖는 것으로 확인하였다.

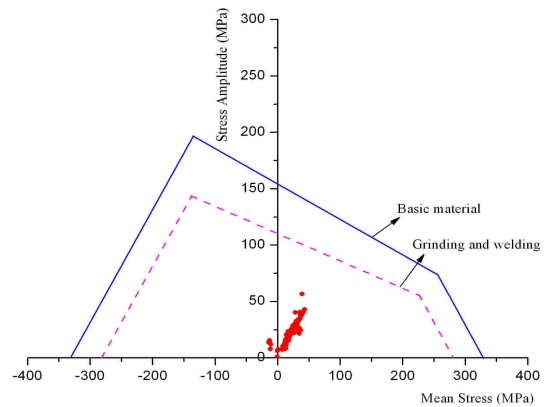


그림 4. 주운용하중 조건하의 Goodman 선도 결과

4.2 피로해석 프로그램을 이용한 피로강도 평가

대차 프레임에 대한 피로강도 평가는 피로해석 전용 프로그램을 이용하여 수행할 수 있으며, 이를 통해 빠른 결과를 도출할 수 있다. 일반적으로 대차프레임의 피로강도 평가를 위해 많이 사용되는 UIC 615-4 기준은 기본하중 조건을 서로 조합하여 도출된 주운용하중조건들에 대해 각각 구조해석을 수행해야 한다. 반면, 피로해석 프로그램을 이용한 방법은 기본하중 조건에 대해서만 구조해석을 수행하고, 이에 대한 하중값을 지정해주면 프로그램 자체적으로 일괄처리(batch-processing)하여 각 하중별 결과를 조합하여 도출한다. 또한, 하중조건 변경시에도 피로해석은 하중값만 변경하여 새로운 결과를 얻을 수 있으며, 운항시험 등을 통해 얻을 수 있는 변동하중을 적용한 피로강도 평가가 가능하다.

이에 본 연구에서는 피로해석 전용 소프트웨어인 winLIFE v3.1을 이용하여 대차 프레임에 대한 피로해석 평가를 수행하였으며, 이에 대한 결과를 검증하기 위해 UIC 615-4 기준에 따른 주운용하중조건 결과와 서로 비교하였다. 다음은 대차 프레임에 대한 피로해석 절차를 나타낸 것이다.

- ① 대차 프레임에 적용되는 피로하중 조건을 선정한다.
- ② 선정된 하중조건에 대해 단위하중(1N)을 적용하여 구조해석을 수행한다.
- ③ winLIFE 프로그램 상에서 대차 프레임에 적용되는 하중조건 개수를 선정하고 적용재질에 대한 S-N 선도 정보를 입력한다.
- ④ 대차 프레임에 가해지는 피로하중 값을 입력한 후 각 하중조건별 구조해석 결과를 적용한다.
- ⑤ 피로해석을 수행하고 피로한도가 높은 각 절점에 대해 피로수명 및 Goodman 선도 결과를 확인한다.

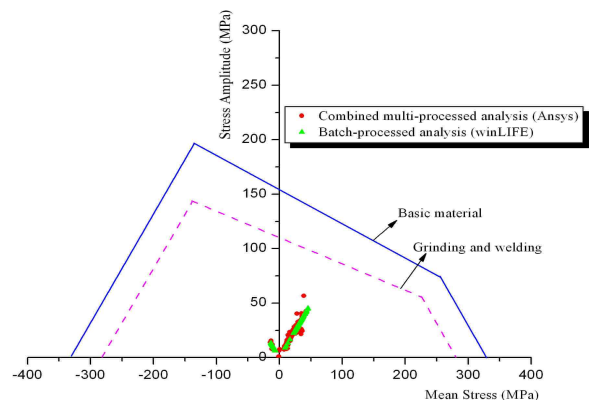


그림 5. 주운용하중조건 결과(Ansys)와 피로해석 결과(winLIFE)의 비교

그림 5는 피로해석을 통해 얻은 각 절점별 평균응력과 응력진폭 결과를 Goodman 선도상에 나타낸 것으로서, UIC 615-4 기준에 따른 주운용하중조건 결과와 비교하여 나타났다. 이때, 피로해석을 통해 얻은 피로한도 결과분포가 주운용하중조건에 따른 결과와 전체적으로 잘 일치함을 확인하였다.

따라서, 본 연구를 통해 검증된 피로해석 방법을 통하여 추후 대차 프레임에 대한 피로강도 평가시에 활용할 수 있을 것으로 사료되며, 이를 통해 보다 빠른 피로강도 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 현재 국내에서 개발중인 모노레일 대차 프레임의 설계모델에 대한 구조적 안전성 및 피로강도 평가를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 모노레일 대차 프레임에 대한 구조적 안전성 및 피로강도를 평가하기 위해 유럽규격인 UIC 615-4 기준을 적용하였으며, 예외하중조건과 주운용하중조건에 대해 각각 평가를 수행하였다.

(2) 예외하중조건이 적용된 대차 프레임에 대한 구조해석을 통하여 최대변위는 세 번째 하중조건에서 1.535mm가 발생하였으며, 최대 Von-mises 응력은 두 번째 하중조건에서 226.6MPa이 발생하여 안전계수가 1.46으로 구조적 안전성을 확보하였다.

(3) 17개의 조합 주운용하중조건에 따른 대차 프레임의 피로강도 평가를 UIC 615-4에 따라 수행하였으며, Goodman 선도를 통해 피로안전도를 만족함을 확인하였다.

(4) 일괄처리 기능을 갖는 피로해석 전용 프로그램(winLIFE)을 이용하여 피로강도 평가를 수행하였으며, 주운용하중조건을 조합하여 얻은 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 따라서, 대차 프레임과 같이 피로평가가 반드시 필요한 구조물에 대한 피로강도 평가시에 일괄처리를 이용한 피로해석을 통해 빠른 설계검증을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 정경렬, 윤세균, 최용훈, “경전철 산업 활성화 및 발전 방안에 관한 연구,” 한국철도학회논문집, 제9권 제1호, pp.95-101, 2006.
2. 안용모, 전소영, “경전철(모노레일) 정거장 규모 최소화 방안에 관한 연구,” 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.45-49, 2008.
3. 박태훈, 박문호, 박순웅, 조성욱, “과좌형 모노레일 시스템 하중을 고려한 PSC Beam 거더 고가교교량의 최적설계,” 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.2496-2499, 2007.
4. 안용모, “국내최초 첨단교통시스템 모노레일 대구 도시철도 3호선 건설,” 대한토목학회지, 제57권 제11호, pp.66-72, 2009.
5. 홍재성, 류상환, 이호용, 황현철, “모노레일형식 경전철 차량 표준규격 연구(기본 구성 및 성능),” 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.436-440, 2008.
6. Taketoshi, S., Motomi, H., Soichiro, Y., Takayuki, T., “China’s first urban monorail system in chongqing,” Hitachi Review. Vol. 54, pp.193-197, 2005.
7. 김정석, 김남포, “틸팅대차 프레임에 대한 피로강도평가 절차에 관한 해석적 연구,” 한국철도학회논문집, 제8권 제4호, pp.321-329, 2005.
8. 박기준, 이호용, 이관섭, 김원경, “표준전동차 대차틀 피로강도평가(1),” 한국철도학회지, 제3권 제3호, pp.145-151, 2000.
9. 김우진, 송시엽, 박근수, 박형순, “유럽규격을 적용한 디젤동차 대차프레임의 정적 및 피로강도 평가,” 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.797-804, 2007.
10. KS R9210 철도차량용 대차 스톡-설계 통칙
11. Truck Frames for Railway Rolling Stock-General Rules for Design. Japanese Industrial

Standard (JIS) E 4207.

12. UIC Code 615-4 : Motive Power Units Bogies and Running Gear Bogie Frame Structure Strength Tests, 1994.