

수정 S-N선도를 이용한 경량전철의 피로수명 평가

Fatigue life Evaluation of Light Rail Transit System Using Modified S-N Curve

*이은철¹, 최윤종¹, 김형택¹, #이준성¹, 이양창², 이정환³, 이호용⁴

*E. C. Lee¹, Y. J. Choi¹, H. T. Kim¹, #J. S. Lee(jslee1@kgu.ac.kr)¹, Y.C. Lee², J. H. Lee³, H. Y. Lee⁴

¹ 경기대학교 기계공학과, ² 대림대학, ³ (주)한화 종합연구소, ⁴ 한국철도기술연구

Key words : Light Rail Transit System, Life Evaluation, Rainflow Cycle Counting, Fatigue Strength

1. 서론

경량전철은 지하철과 버스의 단점을 보완한 대중교통수단으로, 선진국에서는 1980년대 이후 본격 실용화되었으며, 우리나라는 도입을 추진 중이다. '경전철'이란 용어는 기존의 지하철-전철과 같은 '중전철'과 반대되는 가벼운 전철이란 뜻으로 통용되고 있다. 수송용량이 지하철과 버스의 중간규모이면서도 시스템에 따라 교통수요 처리능력이 다양하여 기존지하철의 지선, 중소도시의 간선, 대도시 및 위성도시를 연결하는 교통수요 처리에 적합한 것으로 알려져 있다. 또한, 건설비용이 km당 400억 원 정도에 불과한데다 저렴한 유지운영비, 저공해 환경친화성 등으로 신교통수단으로 각광받고 있다.

경전철에는 소형 전철, 모노레일, 궤도버스, 자기부상열차 등 여러 가지 유형이 있다. 일반적으로 '무인자동대중교통수단(Automatic Guided Transit: AGT)'은 운전자 없이 자동으로 운행되며, 노선구성은 매우 단순하여 두 개의 양끝 터미널과 이를 잇는 단선인 경우가 대부분이다. '자동안내주행차량'이라고도 불린다. AGT에는 고무차륜형과 철제차륜형이 있다. 일본 동경, 요코하마 공항 셔틀노선, 프랑스 오를리 공항 노선 등에서 채택하고 있는 '고무차륜형 AGT'은 기존 도시철도에 쓰이는 철제레일 대신 콘크리트나 철판 형태의 평면궤도 위를 일반 자동차와 유사한 고무바퀴로 달리는 차량 시스템이다. 철제바퀴에 비해 주행소음과 진동을 줄일 수 있는 장점이 있다. 최고 운행 속도는 기존 지하철(80~90km/h)보다 다소 떨어지는 60~80km/h이다.

국내에서는 이러한 경량전철에 대해 시험운전 중에 있으므로 안전수명까지 내구성을 지닐 수 있도록 좀 더 보수적인 평가가 요구되고 있다. 그리고 제동이나 가속, 회전 등에 의한 불균형 등은 정적인 하중보다 더욱 가혹한 운전환경을 만들기 때문에 이때에 작용하는 단축 및 다축에 대한 정확한 하중이력을 고려할 필요가 있다.

차량의 경우 승객이 최대로 탑승했을 때의 경우(만차)와 빈상태의 경우(공차)에 대해서도 평가하였는데, 각각에 정하중을 부과하여 평균응력을 고려한 평가방법을 적용하였다. 따라서 본 연구에서는 주행 중 발생하는 복합하중 효과가 고려된 평균응력을 실동응력에 적용하여 경량전철의 차체, 대차틀 및 안내레일에 대한 피로수명을 평가하고자 한다.

2. 경량전철의 차체, 대차틀 및 안내레일

경량전철은 Fig. 1과 같이 크게 차체와 주행장치(Bogie)로 구성되어지며, 차체는 알루미늄 합금을 이용한 골조구조물로서 선형연구를 통하여 정적강도 및 강성도에 대한 평가가 수행되었다.^{1,4} 또한, 주행장치는 차체 하중의 지지 및 주행성능에 지대한 영향을 미치는 핵심 구조물로서 대차틀, 현수장치, 제동장치, 동력전달장치 등으로 구성된다. 이 중 대차틀은 차체 자중 및 승객하중에 의한 정하중과 곡선주행, 제동 시 발생하는 동하중 등 진폭과 주파수가 변화하는 복합 피로하중을 받는 구조물이므로 이를 피로강도평가의 대상으로 선정하였다.

차체는 우수한 압출성과 적절한 강도성능으로 유럽지역에서 철도차량에 많이 적용되는 A6005A T6합금을 사용하였으며, 대차틀의 사이드 프레임은 SM400B, 크로스빔은 STKR400, 트랜섬(transom) 및 기타 브라켓류는 SS400으로 제작되었다. 각 재질

의 기계적 성질은 Table 1과 같으며, 피로강도평가에 이용될 피로선도는 Table 2와 같이 차체에 대해서는 JIS E 4207⁵에 정의된 값을 이용하였으며, 대차틀은 주요 재질인 SS400에 대한 기존 연구결과⁴를 활용하였다.



(a) Carbody structure

(b) Bogie frame



(c) Guide rail

Fig. 1 Light rail transit system

Table 1 Mechanical properties of materials

Material	Ultimate Strength (kgf/mm ²)	Yield Strength (kgf/mm ²)	Elastic Modulus (kgf/mm ²)
A6005A	26.5	21.9	7.3E3
SM400B	41	25	2.1E4
STKR400	41	25	2.1E4
SS400	41	25	2.1E4

Table 2 S-N curve

Material	S-N curve (kgf/mm ²)
A6005A	264.85N ^{-0.257}
SS400	794.71N ^{-0.263}

3. 게이지의 실동응력 측정

실동응력 측정 시 노이즈에 의한 영향을 제거하기 위하여 보정을 수행하게 되므로 다음과 같은 절차에 의해 주행상태를 고려한 평균응력을 계산하게 된다.

- (1) 공차와 만차중량 조건에서 실동응력 측정
- (2) 각각의 상태에 대한 응력평균 계산
- (3) 승객하중을 이용한 하중 대 응력평균 그래프 작성
- (4) 스트레인게이지에 영향을 주는 하중 값의 선형보간에 의한 평균응력 도출

수명평가를 위해 46개 포인트에서 응력데이터를 취득하였으며, 필터링은 일반적으로 많이 활용되는 최대/최소 방법을 사용하였다. 하나의 예로써 차체, 대차틀, 안내레일에 대한 실동응력을 Fig. 2에 나타내었다. 이때, 3축 게이지를 통해 얻어진 응력데이터는 식 (1)과 같이 signed von mises method⁶을 이용하여 단축등가응력으로 변환하여 적용하였다.

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma_p}{|\sigma_p|} \times \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2]^{1/2} \quad (1)$$

또한, 사이클 카운팅은 작용하중 순서에 따른 효과를 고려할 수 있는 rainflow counting 방법을 사용하였다. 예로써 차체의 만차하중에 대한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 최대 진폭 5% 미만의 데이터는 삭제하였다. 그리고 주어진 응력상태에서 수명을 예측하기 위하여 Fig. 4과 같은 수정 S-N 선도를 활용하였으며, 이때의 내구한도는 항복강도의 25%를 적용하여 보수적으로 수명을 예측하도록 하였다. 마지막으로 피로강도는 누적피로손상 개념을 적용하여 평가하였다.

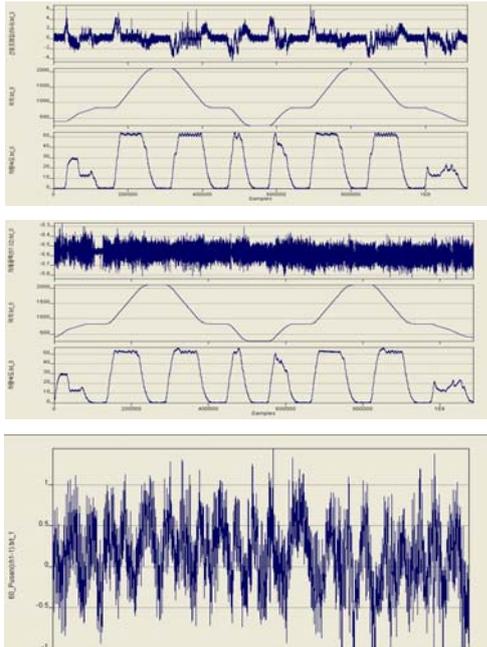


Fig. 2 Example of stress history for carbody structure, bogie frame and guide rail at tare

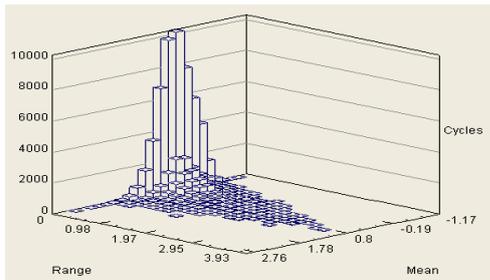


Fig. 3 Result of a rainflow cycle histogram

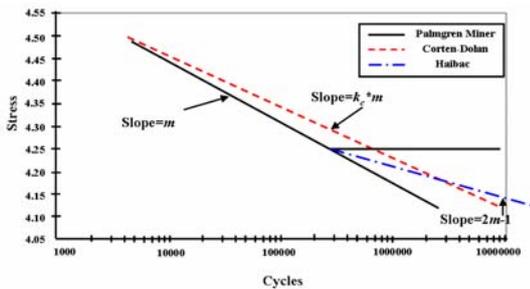


Fig. 4 Modified S-N Curve

4. 해석 결과

Table 3은 정 해석을 통하여 응력 값이 크게 나온 부위에 대한 누적피로손상(CUF) 값을 나타낸 것이며, 이때의 왕복구간

거리는 4.61km이다. 따라서 25년의 운행보장거리인 365만km를 고려할 때 측정 왕복구간에 대한 이론적인 피로손상은 1.263E-6 이 된다. 이를 주행상태의 평균응력을 적용한 Table 3의 CUF값과 비교하면, 모든 채널에서 이론적인 피로손상보다 낮은 값을 나타내고 있다. 따라서 주어진 설계하중 조건하에서 차체와 대차틀은 충분한 정적강도와 피로 내구성을 확보하고 있다고 판단된다.

Table 3 Stress-based fatigue life evaluation results

Component	Channel	CUF	CUF(25year)
Carbody	57-456	1.099E-33	8.701E-28
	57-13	1.316E-33	1.042E-27
	57-14	3.770E-33	2.985E-27
	57-15	1.806E-33	1.430E-27
	57-16	1.878E-33	1.487E-27
Bogie frame	58-2	4.320E-8	0.0342
	58-3	3.880E-8	0.0307
	58-4	3.247E-8	0.0257
	59-123	1.491E-8	0.0118
	59-456	1.035E-8	0.0082

Table 4 Fatigue life evaluation results of guide rail

Channel	CUF	Channel	CUF
st1-1	1.411E-35	st2-3	1.452E-35
st1-2	1.472E-35	st2-4	1.459E-35
st1-3	1.486E-35	st3-1	1.468E-35
st1-4	1.477E-35	st3-2	1.477E-35
st2-1	1.459E-35	st3-3	1.484E-35
st2-2	1.466E-35	st3-4	1.484E-35

5. 결론

본 연구에서는 운전하중에서 측정된 실동응력을 바탕으로 누적손상법칙을 적용하여 피로강도평가를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 보수적으로 수정된 S-N선도를 이용한 평가에서 차체는 무한 수명을 갖는 것으로 판단된다. 대차틀에 대한 누적손상계수는 58-2번 채널에서 0.0342가 발생하였으며, 안전계수 10이상으로 나타났다. 따라서 25년 동안 강도적으로 안전성을 가질 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Lee, H. Y., Hong, J. S., Jung, J. D., Lee, K. S., "Carbody basic design for rubber tired AGT," Transaction of the KSR, Vol. 3, No. 3, pp. 161-169, 2000.
2. Han, S. H., Han, J. W., Shin, B. C., "Static and fatigue strength estimation of bogie frame for light railway vehicle," Spring Conference Proceedings of the KSME(A), pp. 987-992, 1999.
3. Park, K. J., Lee, H. Y., Lee, K. S., Kim, W. K., "Fatigue strength evaluation of a bogie frame for standard electric multiple unit(I)," Transaction of the KSR, Vol. 3, No. 3, pp. 170-177, 2000
4. Seo, J. W., Goo, B. C., Kim, N. P., You, W. H., Chung, H. C., "Probabilistic estimation of the fatigue strength of an electric car bogie frame," Autumn Conference Proceedings of the KSR, pp. 261-266, 2001
5. Japanese Industrial Standards E 4207, Truck frames for railway rolling stock(General rules for design), 2004.
6. J. A. Bannantine, J. J. Comer and J. L. Handrock, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," Prentice Hall, Englewood Cliffs, 2000.