

경량전철에 대한 차체 및 대차틀의 피로강도평가

Fatigue Strength Evaluation of Carbody and Bogie Frame for the Light Rail Transit System

이은철¹, ✉이준성², 최윤종², 이정환³, 서명원⁴, 이호용⁵, 이양창⁶
Eun Chul Lee¹, ✉Joon Seong Lee², Yoon Jong Choi², Jung Hwan Lee³, Myung Won Suh⁴, Ho Yong Lee⁵
and Yang Chang Lee⁶

1 경기대학교 대학원 기계공학과 (Graduated School of Mechanical Engineering, Kyonggi Univ.)

2 경기대학교 기계시스템공학과 (Dept. of Mechanical System Engineering, Kyonggi Univ.)

3 (주)한화 종합연구소 (Hanwha Chemical R&D Center)

4 성균관대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

5 한국철도기술연구원 (Korea Railroad Research Institute)

6 대림대학 (Dealim Univ.)

✉ Corresponding author: jslee1@kyonggi.ac.kr, Tel: 031-249-9818

Manuscript received: 2008.3.4 / Revised: 2008.5.13, 5.26 / Accepted: 2008.7.10

In terms of saving costs, energy and materials, the weight of cars has been gradually reduced by optimizing design of structure, which also gives us good performance. In compliance with this, it should satisfy the lifetime of cars for 25 years under the operation. The purpose of this study is to evaluate the strength of fatigue using data from strain gauges attached carbody and bogie frame. This dynamic stress can be evaluated using S-N curve based on stress amplitude. Modified S-N curve by CORTON-DOLAN is used for more conservative and substantial evaluation. In addition, the loadings itself of carbody and bogie frame are considered by calculating the rate of the differences which are occurred between empty car and fully occupied car with passengers. Rainflow cycle counting method is applied to arrange the stress data for the modified S-N curve to predict lifetime of the materials. Conclusively the cumulative damages are not only calculated by Miner's Rule, but the safety factors are also determined by Goodman diagram.

Key Words: Fatigue Strength (피로강도), Light Rail Transit System (경량전철), Modified S-N Curve (수정 S-N 선도), Rainflow Cycle Counting (레인플로 사이클집계), Cumulative Damage (누적손상)

1. 서론

경량전철은 가벼운 알루미늄 차체와 고무차륜 구조를 가진 무인 운행 가능한 소규모 전철 시스템이다. 시간당 5,000~30,000 명의 수송능력을 갖고 있는 중간규모의 철도이며, 중량전철인 지하철에 비해 크기가 작고 무게가 가벼운 경량차량 구조물

이다. 이러한 특징 때문에 대도시와 근교 위성도시를 연결하는 교통수단으로써 선진국에서는 각광을 받고 있다. 또한 운영비 절감과 건설비용이 저렴하고 다른 교통수단과 비교하여 정시성, 신속성, 친환경성 등이 우수한 장점을 가지고 있다.¹ 그러나 중량전철과 같이 25 년 이상의 긴 수명이 요구되어 지며, 경량화에 따른 구조물의 건전성 확보

를 위하여 피로강도가 중요한 설계기준으로 고려되어야 한다.

근래의 구조물에 대한 피로강도 평가방법은 크게 실물을 이용한 실험을 수행하거나, 유한요소 프로그램을 이용한 시뮬레이션 기법 적용이 일반적이다. 따라서 철도차량과 관련된 연구도 다양한 방법으로 접근되어 왔다. 한승호 등²은 경전철용 대차프레임 취약부의 구조적 안전성 검토를 위하여 설계하중과 동일한 상태를 구현할 수 있는 실험시스템을 구성하고 정적 및 피로안전성 평가를 수행하였으며, 박기준 등³은 표준전동차 대차들의 정적 및 피로하중을 고려한 구조해석과 실험결과의 비교를 통하여 정적강도와 피로 내구성에 대한 평가를 실시하였다. 또한, 서정원 등⁴은 표준전동차 대차 프레임의 건전성 평가를 위하여 S-N 시험 데이터의 확률분포를 고려한 확률론적 피로강도 평가방법을 제시하였다. 이러한 상기의 연구들은 주행 중 발생하는 실동응력에 의한 피로강도 평가 시 구조물 자체가 가지고 있는 정하중에 의한 효과를 고려하지 않았거나 정하중 시험 결과를 평균 응력으로 단순 적용한 연구이므로 차체 자중에 의한 정하중과 곡선주행 및 제동 시 발생하는 동하중의 복합적 효과를 고려하는 데는 한계가 있다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 주행 중 발생하는 복합하중 효과가 고려된 평균응력을 실동응력에 적용하여 경량전철(LPRS-111-P-002)⁵의 차체 및 대차들에 대한 피로강도평가를 실시하고자 한다.

2. 경량전철의 차체 및 대차들

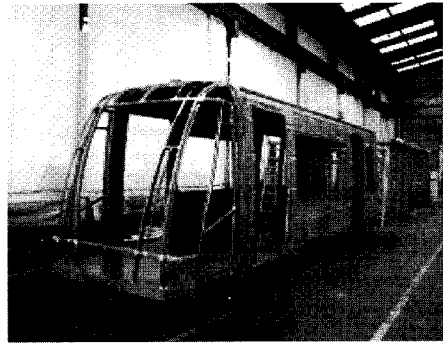
2.1 개요

경량전철은 Fig. 1 과 같이 크게 차체와 주행장치(Bogie)로 구성되어지며, 차체는 알루미늄 합금을 이용한 골조구조물로서 선행연구를 통하여 정적강도 및 강성도에 대한 평가가 수행되었다.¹ 또한, 주행장치는 차체 하중의 지지 및 주행성능에 지대한 영향을 미치는 핵심 구조물로서 대차들, 현수장치, 제동장치, 동력전달장치 등으로 구성된다. 이 중 대차들은 차체 자중 및 승객하중에 의한 정하중과 곡선주행, 제동 시 발생하는 동하중 등 진폭과 주파수가 변화하는 복합 피로하중을 받는 구조물이므로 이들에 대한 피로평가가 중요하다. 본 연구에서는 시험로를 운전하면서 차체 및

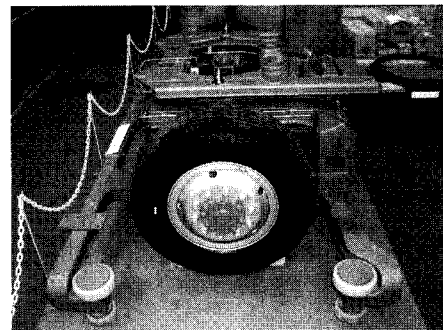
대차들에 대한 실동응력을 측정하여 피로강도 평가를 실시하였다.

2.2 재료의 기계적 성질

차체는 우수한 압출성과 적절한 강도성능으로 유럽지역에서 철도차량에 많이 적용되는 A6005A T6 합금을 사용하였으며, 대차들의 사이드 프레임은 SM400B, 크로스빔은 STKR400, 트랜섬(transom) 및 기타 브라켓류는 SS400 으로 제작되었다.⁶ 피로강도평가에 이용될 피로선도는 Table 1 과 같이 차체에 대해서는 JIS E 4207⁷에 정의된 값을 이용하였으며, 각 재료의 기계적 성질⁶은 Table 2 와 같고 대차들의 주요 재료인 SS400 에 대한 기존 연구결과⁴를 활용하였다.



(a) Carbody structure



(b) Bogie frame

Fig. 1 Light rail transit system⁵

Table 1 S-N curve

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

Table 2 Mechanical properties of materials⁶

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

3. 하중조건 및 주행상태를 고려한 평균응력

3.1 하중 조건 및 응력측정 부위

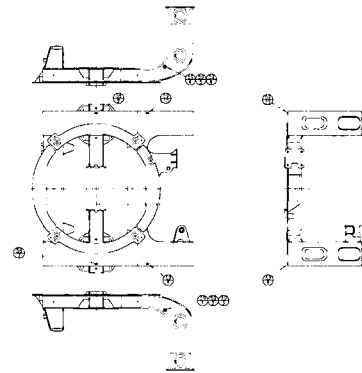
실동응력 측정에 앞서 실제로 공차 및 만차상태에 대한 하중을 Table 3 과 같이 측정하였다. 이때, 차체의 중량은 3ton, 동력대차 및 일반대차는 각각 1.73ton, 1.44ton 이다.

Table 3 Weight of car

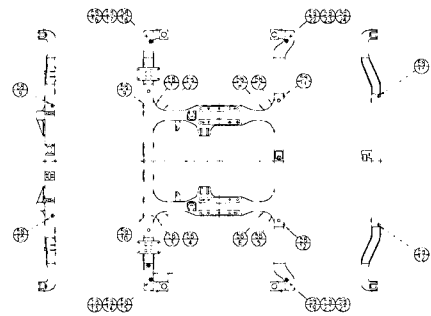
	MC1(kgf)	MC2(kgf)
Tare	12,882	12,574
Maximum	18,002	17,994
Passenger	5,120	5,420

또한, Fig. 2 및 3 은 차체 및 대차들에 대한 응력측정 부위를 나타낸 것이며, 구조해석 및

정하중 시험결과 6 에 기초하여 총 46 개(차체 24, 대차들 22) 위치를 선정하였다.



(a) Rotation frame(MC2)



(b) Guide frame(MC1)

Fig. 3 Stress measuring points of bogie frame

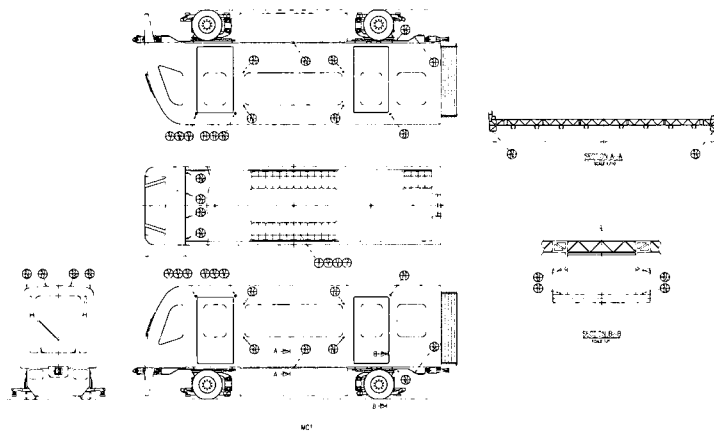


Fig. 2 Stress measuring points of carbody structure(MC1)

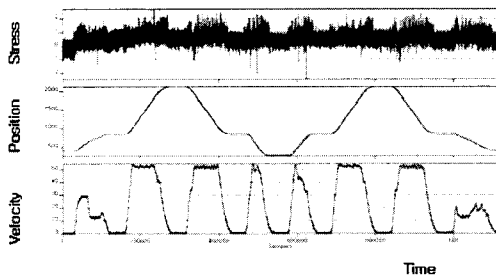
3.2 주행상태를 고려한 평균응력

실동응력 측정 시 노이즈에 의한 영향을 제거하기 위하여 보정(calibration)을 수행하게 되므로 다음과 같은 절차에 의해 주행상태를 고려한 평균응력을 계산하게 된다.

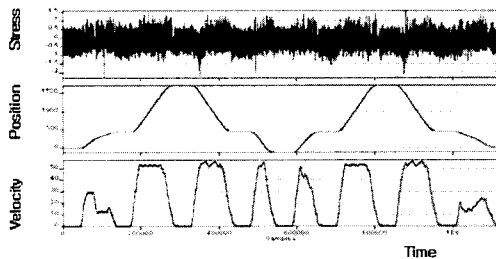
- (1) 공차와 만차중량 조건에서 실동응력 측정
- (2) 각각의 상태에 대한 응력평균 계산
- (3) Table 3의 승객하중을 이용한 하중 대 응력 평균 그래프 작성
- (4) Table 4와 같이 스트레인게이지에 영향을 주는 하중 값의 평균응력 도출

Table 4 Workload at tare and maximum weight

	Tare(kgf)	Maximum(kgf)
Carbody	6,712	11,832
Bogie frame	4,702	7,412



(a) tare weight



(b) maximum weight

Fig. 4 Stress history of bogie frame gauge 58-2 at tare and maximum weight

해석에 필요한 데이터는 경사를 포함한 직선 및 곡선주행을 하는 4.61km의 시험로에서 직접 시험운전을 하여 얻었다. 이때 최고속도는 70km/hr이다. 상기의 과정을 설명하기 위한 하나

의 예로서 대차틀 58-2 게이지를 선택하여 적용시킨 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림과 같이 공차 및 만차상태에 대한 실동응력을 측정하고, 응력평균을 계산하면 각각 -0.052kgf/mm^2 , -0.168kgf/mm^2 이다.

Table 4의 공차 및 만차상태의 구조물에 의한 작용하중을 적용하여 평균응력을 계산하면 -0.173 및 -0.326kgf/mm^2 이 된다.

4. 차체 및 대차틀의 피로강도평가

4.1 피로강도평가 방법

Fig. 5는 본 연구에서 적용한 피로강도평가 방법을 개략적으로 나타낸 것이다. 즉, 46개 포인트에서 응력데이터를 취득하였으며, 필터링은 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 일반적으로 많이 활용되는 최대/최소 방법 및 진폭 5%이하 데이터를 처리하는 방법을 사용하였다.

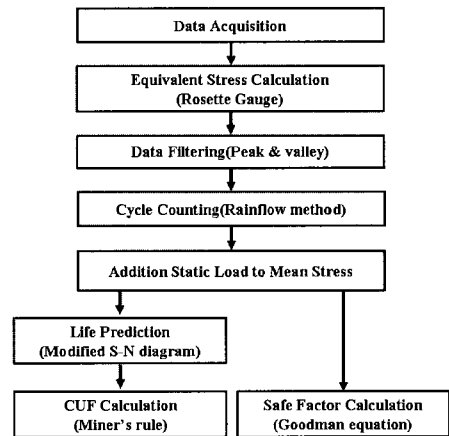


Fig. 5 Process of fatigue damage calculation

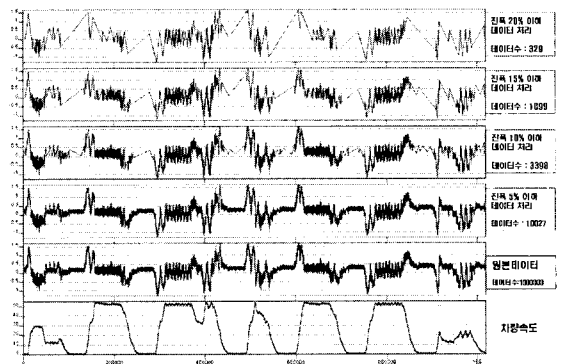


Fig. 6 Example of filtering

이때, 3 축 게이지를 통해 얻어진 응력 데이터는 식 (1)과 같이 부호분마이세스법(signed von mises method)⁸ 을 이용하여 단축등가응력으로 변환하여 적용하였다.

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

또한, 사이클 카운팅은 작용하중 순서에 따른 효과를 고려할 수 있는 레인플로우 카운팅(rainflow counting) 방법을 사용하였고, 예로써 대차를 58-2 번 채널의 만차하중에 대한 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 여기서 최대 진폭 5% 미만의 데이터는 삭제하였으며 3.2 절에서 도출한 평균응력을 적용하였다. 그리고 주어진 응력상태에서 수명을 예측하기 위하여 Fig. 8 과 같은 수정 S-N 선도⁹ 를 활용하였으며, 이때의 내구한도는 항복강도의 25%를 적용하여 보수적으로 수명을 예측하도록 하였다. 마지막으로 피로강도는 식 (2)와 같이 Miner¹⁰ 가 제안한 누적피로손상(Cumulative Fatigue Damage) 개념을 적용하여 평가하였다.

$$CUF = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} \quad (2)$$

여기서 n_i 는 응력진폭 S_i 에서 집계된 사이클의 발생빈도수이며, N_i 는 응력진폭 S_i 에서 S-N 선도상의 수명이고 CUF 값이 1 이 도달할 때 파손이 일어난다고 가정한다.

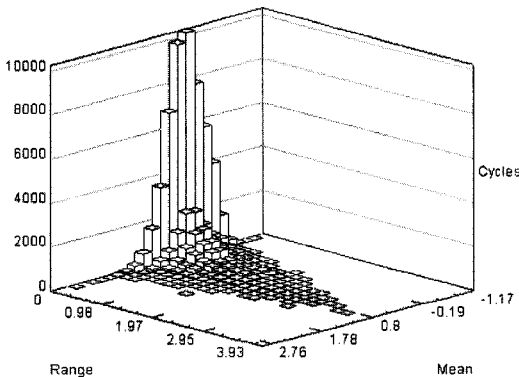


Fig. 7 Result of a rainflow cycle histogram

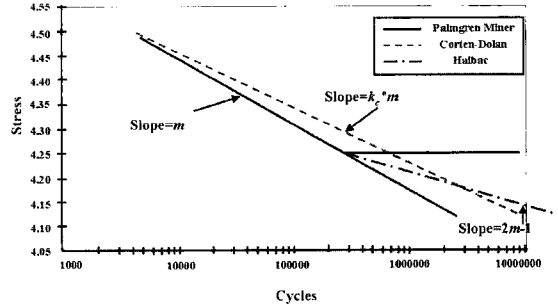


Fig. 8 Modified S-N curve

4.2 Goodman 관계식에 의한 안전계수 계산

단축하중의 피로강도 해석에 평균응력을 고려한 Goodman 관계식 (3)으로부터 안전계수를 구한다.

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_u} = 1 \quad (3)$$

여기서 S_a 는 최대진폭, S_m 은 평균응력, S_e 는 피로한도, S_u 는 인장강도, 은 안전계수이다.

4.3 피로강도평가 및 안전계수 계산 결과

Table 5 는 정적 해석을 통하여 응력 값이 크게 나온 부위⁶ 에 대한 누적피로손상(CUF) 값을 나타낸 것이며, 이때의 왕복구간 거리는 4.61km 이다. 따라서 25 년의 운행보장거리인 3,650,000km (400km/일×365 일/년×25 년)를 고려할 때 측정 왕복구간에 대한 이론적인 피로손상은 4.61/3,650,000 = 1.263E-6 이 된다. 이를 주행상태의 평균응력¹¹ 을 적용한 Table 5 의 CUF 값과 비교하면, 모든 채널에서 이론적인 피로손상보다 낮은 값을 나타내고 있다. 따라서 주어진 설계하중 조건하에서 차체와 대차들은 충분한 정적강도와 피로 내구성을 확보하고 있다고 판단된다.

Table 6 은 레인플로 사이클 카운팅에서 얻은 평균응력과 응력진폭을 Goodman 관계식 (3)에 대입하여 가장 작은 값을 안전계수로 하였다. 여기서도 마찬가지로 정적 해석⁵ 을 통하여 응력 값이 크게 나온 부위만을 나타내었다. Fig. 9 는 위에서 계산된 결과를 이용하여 평균응력과 응력진폭 데이터와의 관계를 Goodman 선도에 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 충분한 피로강도를 갖고 있었다.

Table 5 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

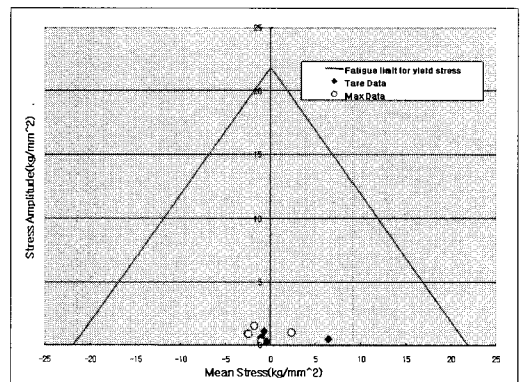
Table 6 Results of Safety Factor calculation

Component	Channel	Safety Factor	Mean Stress (kgf/mm ²)	Stress Amplitude (kgf/mm ²)
Carbody	57-456	4.45	2.384	1.022
	57-13	4.64	-1.796	1.568
	57-14	12.02	-1.052	0.330
	57-15	4.55	-2.534	0.942
	57-16	4.72	-2.459	0.904
Bogie Frame	58-2	5.20	-0.326	3.874
	58-3	4.87	-0.671	3.973
	58-4	4.40	0.992	4.496
	59-123	4.29	1.462	4.147
	59-456	4.32	1.447	3.618

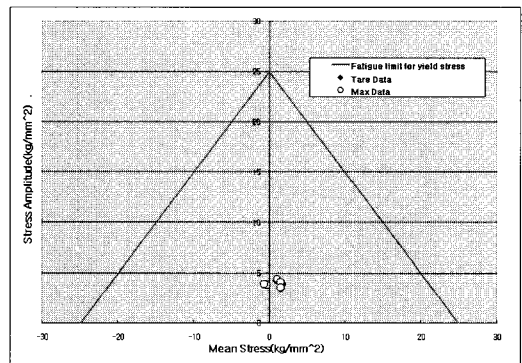
5. 결론

본 연구에서는 운전하중에서 측정된 실동응력을 바탕으로 누적손상법칙을 적용하여 피로강도평가를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 차체는 보수적으로 수정된 S-N 선도를 이용한 평가에서 무한수명을 갖는 것으로 평가된다. 대차틀에 대한 누적손상계수는 58-2 번 채널 (사이드 프레임과 크로스빔 연결부)에서 0.0342 가 발생하였으며, 안전계수 10 이상으로 나타났다. 따라서 25 년 동

안 강도적으로 안전성을 가질 것으로 예상된다. Goodman 관계식을 이용한 안전계수는 Rosette 게이지에서 다른 게이지에 비해 작은 값을 가졌으나 3 이상으로 충분한 피로강도를 갖는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제안한 주행상태를 고려한 평균응력 도출방법은 다른 종류의 철도차량에 대한 피로강도 평가에 유사하게 적용시킬 수 있다고 사료된다.



(a) Mean stress vs. amplitude of safety factor on Goodman diagram of carbody



(b) Mean stress vs. amplitude of safety factor on Goodman diagram of bogie frame

Fig. 9 Plotting of safety factors

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정목적기초연구(R01-2004-000-10469-0)와 한국철도기술연구원의 지원으로 수행되었기에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, H. Y., Hong, J. S., Jung, J. D. and 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. and Shin, B. C., "Static and fatigue strength estimation of bogie frame for light railway vehicle," Spring Conference Proceedings of the KSME(A), Vol. 1, No. 1, pp. 987-992, 1999.
3. Park, K. J., Lee, H. Y., Lee, K. S. and 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. and Chung, H. C., "Probabilistic estimation of the fatigue strength of an electric car bogie frame," Autumn Conference Proceedings of the KSR, Vol. 1, pp. 261-266, 2001.
5. LPRS, "Development of Light Rail Transit System," Report of LRT System, Korea Railroad Research Institute & WooJin Co., Ltd., No. 1, pp. 35-55, 2002.
6. LPSE, "Structural Analysis and Static Test of Light Rail Transit System," Review of LRT System, Korea Railroad Research Institute, No. 1, pp. 1-42, 2007.
7. JSME, Japanese Industrial Standards E 4207, "Truck frames for railway rolling stock (General rules for design)," pp. 1-35, 2004.
8. Bannantine, J. A., Comer and J. J. and Handrock, J. L., "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," Prentice Hall, pp. 18-40, 2000.
9. Singh, A., "The nature of initiation and propagation S-N curves at and below the fatigue limit," Fatigue Fracture Engineering and Material Structure, Vol. 25, No. 2, pp. 79-89, 2002.
10. Miner, M. A., "Cumulative damage in fatigue," Journal of Applied Mechanics, Trans, ASME, Vol. 12, No. 3, pp. 159-164, 1945.
11. Lee, J. H., Kim, J. M., Choi, Y. J., Lee, E. C., Lee, J. S., Lee, H. Y. and Seo, M. Y., "Experimental Research for Fatigue Strength Estimation of Light Rail Transit System," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 147-151, 2007.