

차륜 및 차축 재료의 저주기 피로특성

Low Cycle Fatigue Characteristics of the Railway Wheels and Axles

김태진*, 석창성*, 서경원**

D. J. Kim, C. S. Seok, J. W. Seo.

ABSTRACT

Railway wheelset is the most essential part which undergoes severe cyclic loadings. In recent years, there has been increasing need for insuring the safety of running as the speed of the railway vehicles is getting higher. So it is required on the assessment of fatigue characteristics of the wheelset to consider plastic deformation which might be probable in the severe loading condition. In this study, total-strain controlled low cycle fatigue(LCF) test were performed to observe the LCF behaviors of the railway wheels and axles using companion specimens method. From the experimental results, the cyclic mechanical properties have been evaluated and total strain amplitude versus life relationship have been derived using the empirical Coffin-Manson law.

1. 서론

최근 철도차량의 고속화, 고성능화 추세에 따라 우수한 주행성능과 더불어 차량의 안전성이 더욱 강조되고 있다. 철도차량 주행장치의 교량 역할을 하는 핵심부품인 차축과 차륜은 차량의 운행 시 매우 큰 하중 범위의 반복응력을 받는 부분으로서 차량의 주행 안전성 확보 및 과속방지를 위한 신뢰성 평가가 필수적으로 요구된다. 유큽(Wheelset)의 신뢰성 평가에 관해서 그동안 계료의 파괴인성 및 접촉 손상에 관한 연구가 이루어져 왔으나 [1-2] 저주기 피로특성에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 고속화에 따라 점점 가혹해지는 차륜과 차축의 사용조건은 재료의 소성변형을 유발할 수 있으므로 유큽의 수명평가를 위해서는 소성변형까지 고려한 파로수명평가가 필요하다고 판단된다. 본 연구에서는 철도차량의 차축 및 차륜재료에 대한 저주기 피로시험을 수행하여 소성영역에서의 유큽 재료의 거동을 관찰하였고 Coffin-Manson 식을 이용한 민행률과 피로수명과의 관계식을 도출하였다.

2. Strain-Life Relationship

Fig. 2.1은 비반성 하중을 받는 재료의 거동을 나타내는 히스테리시스 루프 모양을 나타낸 것이다. 전 변형률 진폭에 해당하는 $\Delta\epsilon/2$ 는 아래와 같이 탄성성분 $\Delta\epsilon_e/2$ 와 소성성분 $\Delta\epsilon_p/2$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \quad (1)$$

* 성균관대학교 기계공학부

** 경도기술연구원, 강회원

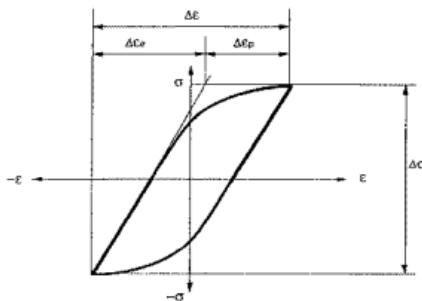


Fig. 2.1 Hysteresis loop[3]

Hooke's Law를 이용하면 식(1)은 식(2)와 같이 변형된다.

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} \quad (2)$$

한편, 식 Basquin[4]의 식 (3)과 Coffin-Manson[5-6]의 식 (4)는 각각 대수 좌표상에서의 응력-수명 및 변형률-수명의 선형적인 관계를 표현한 것이다.

$$\frac{\Delta \epsilon_e}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b \quad (3)$$

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = c_f' (2N_f)^c \quad (4)$$

여기서, σ_f' : 폐로강도계수(fatigue strength coefficient),

b : 폐로강도지수(fatigue strength exponent or Basquin's exponent),

c_f' : 폐로연성지수(fatigue ductility coefficient).

c : 폐로연성지수(fatigue ductility exponent).

E : 탄성계수, N_f : 폐단 사이클 수

한편, (3)+(4)로부터 천이수명(transition life, N_0)은 다음과 같은 식으로부터 구할 수 있다.

$$2N_0 = \left(\frac{\sigma_f'}{\sigma_f} \right)^{1/(b-c)} \quad (5)$$

또한, Basquin의 식 (3)과 Coffin-Manson의 식 (4)를 식 (2)에 대입하면 ASTM[7]에 규정되어 있는 변형률과 수명에 대한 아래의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + c_f' (2N_f)^c \quad (6)$$

3. 재료 및 시험방법

3.1 시험재료 및 시험편

본 시험에 사용된 재료는 철도차량의 차축(Axle) 및 차륜(Wheel)의 재료로 사용되고 있는 SFA60과 SSW1이며 Table 3.1에 화학적 조성, 기계적 물성치를 나타내었다. 차륜의 경우 레일파의 접촉부인 RIM부에서 시험편을 채취하였다. 시험편의 형상 및 치수는 ASTM E606[7]에 따라 Fig. 3.1과 같이 가공하였다.

3.2 시험방법

ASTM E606(Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing)에 따라서 변형률 제어를 통한 인장압축 테스트를 수행하였다. 시험편의 평행부에 Extensometer (Instron No. 2630-17)를 부착하여 사이클 진행에 따른 하중 및 변형률 값을 획득하였고, 0.2%~2.3% 사이의 변형률 진폭 범위에서 실험을 수행하였다. 시험속도는 0.1Hz이며 과단시점은 작용하는 인장하중이 안정상태 히스테리시스 최대하중의 10% 이하로 감소되는 시점으로 정의하였다. 시험 도중 발생할 수 있는 좌굴(buckling)현상을 미연에 방지하기 위하여 Wood's metal pot[7]을 사용하였고, Wood's metal을 용융시키기 위해 증기발생장치(Steam generator, Reimers, JR-26276)를 사용하였다. Fig. 3.2에 시험기(Instron 1332, 25Ton Capacity) 및 시험장치의 모습을 나타내었다.

Table 3.1 Chemical Composition and Mechanical Properties of Test Specimens

Type	Material	Chemical Compositions (wt. %)					Mechanical Properties		
		C	Si	Mn	P	S	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	Elongation (%)
Axle	SFA60	0.41	0.27	0.78	0.010	0.006	425	661	31.8
Wheel	SSW1	0.70	0.30	0.8	0.045	0.045	507	361	27.2

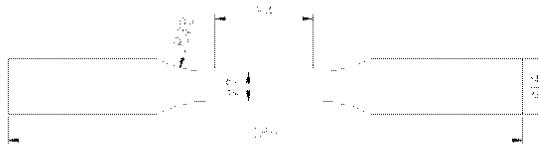


Fig. 3.1 Configuration of a Specimen for Fatigue Test

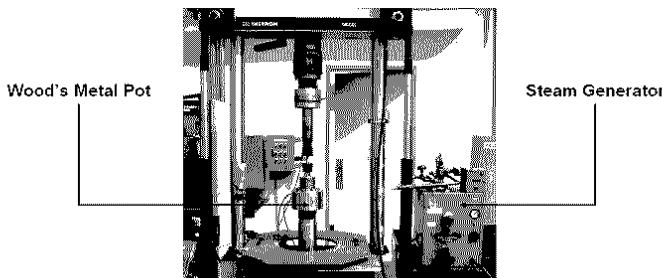
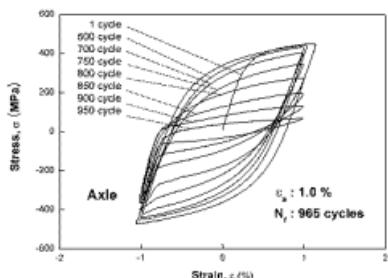


Fig. 3.2 Experimental Setup for Low Cycle Fatigue Test

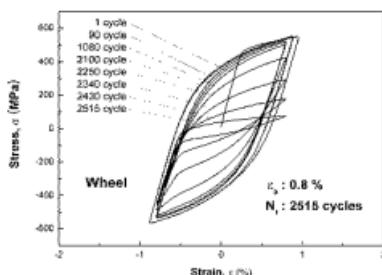
4. 시험결과 및 고찰

4.1 Cyclic Stress-Strain Curve

Fig. 4.1의 (a)와 (b)는 각각 차주가 폐로시험을 통해 얻은 차축과 차륜계의 대표적인 히스테리시스 루프를 보여주고 있다. 1 cycle에 해당하는 루프를 통해 알 수 있듯이 시위 시작 직후 다소 변형률 범위를 벗어나게 되는데 이러한 이叛은 수 사이클 아래에 안정화되었다. 과단시점에 가까워지면서 인장응력은 균등으로 감소하는 반면 압축응력은 시험관의 상하 파면에 서로 부딪힘으로 인해 과단시까지도 일정수준 이하로는 감소하지 않음을 알수있다. 두 계로 모두 히스테리시스 루프가 안정화 상태로 접어드는데 걸리는 시간은 대부분 10 cycle 이내였으며 최대 50 cycle 이내에 모두 안정상태의 히스테리시스 루프를 나타내었다. 모든 시험관에 대한 반수명($\Sigma/N_t=0.5$)에서의 안정상태 히스테리시스 루프를 염고, 각각의 좌우축 선단을 연결하여 구한 주기적 응력-변형률 선도(cyclic stress-strain curve)를 Fig. 4.2에 나타내었다. 주기적 응력-변형률 선도창에서, 차축은 약 200MPa, 차륜은 약 300MPa인 저점에서부터 소성면행이 일어나기 시작하는데 이러한 응력은 차축과 차륜의 향강강도인 425MPa과 507MPa에 비하면 매우 작은 값임을 알 수 있다. 이것은 차축과 차륜의 설계에 있어서 단순 인장시험에 의한 기계적 불성치만 고려하는 경우 위험한 설계를 할 수 있을음을 의미한다.

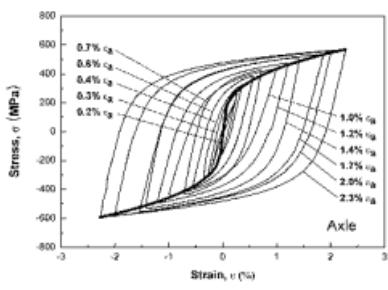


(a) axle, $\epsilon_u = 1.0 \%$

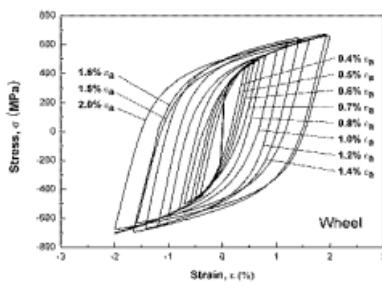


(b) wheel, $\epsilon_u = 0.8 \%$

Fig. 4.1 Cyclic Stress-Strain Responses



(a) axle



(b) wheel

Fig. 4.2 Cyclic Stress-Strain Curves

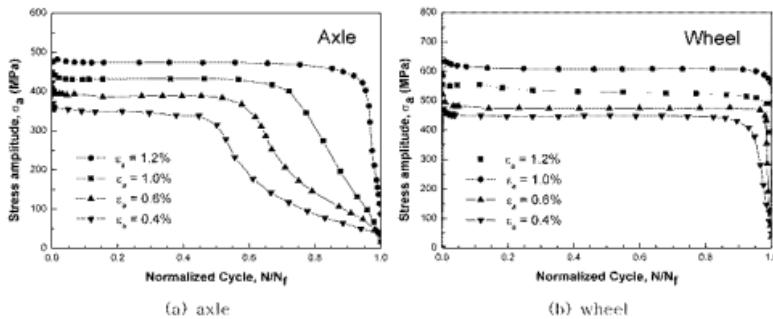


Fig. 4.3 Cyclic Stress Responses

4.2 사이클 비에 따른 응력진폭의 변화

Fig. 4.3의 (a)와 (b)는 각각 자주 및 차운 재료의 사이클 변화에 따른 응력 진폭의 변화를 나타낸다. 좌표의 x축은 사이클을 과단수명으로 나누어 무자원화한 값이며 y축은 일의의 한 사이클에 대한 헤스테리시스 주파 상의 최대 인장응력을 나타낸다. 두 재료 모두 뚜렷한 주기적 경화(cyclic hardening)나 주기적 연화(cyclic softening)를 보이진 않았으나 차운재의 경우 전체수명의 5%이내의 구간에서 경미한 주기적 연화현상이 나타났다.

차운재의 경우 전체수명의 약 90% ($N/N_f=0.9$)가 될 때까지 응력진폭의 변화가 거의 없고 그 이후로 급격하게 응력이 감소하여 폐단에 이르게 되는 특성을 보여주고 있으며 규밀 밭생까지의 수명이 전체수명의 대부분을 차지하고 있다. 차축재의 경우 변형률 진폭 ϵ_0 가 차운재수록 응력진폭이 감소하는 시점이 빨라졌는데 이는 ϵ_0 가 차운재수록 전체수명에 있어서 균열전진수명이 차지하는 비율이 절절 기진다는 것을 의미한다. 또한 ϵ_0 가 1.0%보다 작아지면서부터는 선도상에 변곡점(inflexion point)이 나타나는 것을 관찰할 수 있다.

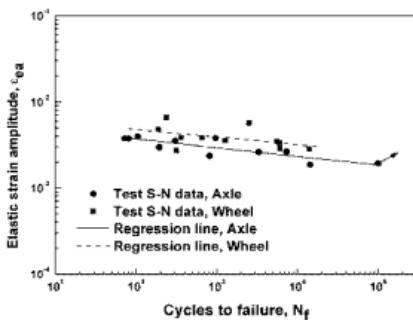
4.3 쟈시클 피로수명 특성

반수명($N/N_f=0.5$)에서의 헤스테리시스 주파를 이용하여 변형률을 단성(ϵ_{sa}) 및 소성 변형률(ϵ_{pa}) 성분으로 구분하였고 각 변형률에 대한 수명의 관계인 $\sigma_{sa}-N_f$ 및 $\sigma_{pa}-N_f$ 선도는 Fig. 4.4의 (a)와 (b)에 나타내었다. 이때 식 (3)에서의 a'/E 와 b 는 각각 $\epsilon_{sa}-N_f$ 선도의 y절편과 기울기를 의미하며, 마찬가지로 식 (4)에서의 c' 와 c 는 각각 $\epsilon_{pa}-N_f$ 선도의 y절편과 기울기를 의미한다.[8]

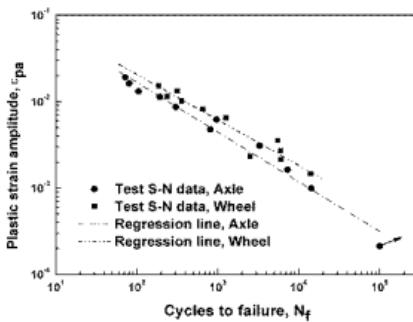
Fig. 4.4의 (a)와 (b)에서의 실험 데이터에 대한 선형 회귀선법(linear least square method)을 통해 구한 자주기 피로수명식의 파라미터(a'/E , c' , b , c)와 피로수명식은 Table 4.1에 정리하였다. Fig. 4.4의 (c)는 피로시험 데이터와 단성 및 소성 회귀선을 함께 나타낸 것이다. 자주기 피로특성은 전체적으로 차음이 차축에 비해 우수하였다. 단성 및 소성 회귀선이 만나는 지점에 해당하는 선이수명[3]을 식 (5)에 의해 구한 결과 차축은 1197 cycle, 차원은 1440 cycle로 얻어졌다.

Table 4.1 Coefficients and Exponents of Basquin's and Coffin-Manson eq.

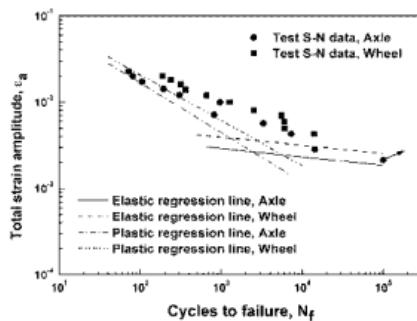
	a'/E	b	c'	c	$\sigma-N_f$
Axle	0.0058	-0.0996	0.2351	-0.5754	$\sigma_a = 0.0058(2N_f)^{-0.0996} + 0.2351(2N_f)^{-0.5754}$
Wheel	0.0073	-0.0904	0.2338	-0.5256	$\sigma_a = 0.0073(2N_f)^{-0.0904} + 0.2338(2N_f)^{-0.5256}$



(a) Elastic Strain-Life Curve



(b) Plastic Strain-Life Curve



(c) Total Strain-Life Curve

Fig. 4.4 Strain-Life Curve

5. 결론

철도차량의 차축(Axle)과 차륜(Wheel)재료인 SFA60과 SSW1에 대한 저사이클 피로시험을 수행하였고 그 결과를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 차축 및 차륜재료의 천이수명 및 저주기 피로수명식을 도출하였다.
- (2) 차축과 차륜재에 대한 주기적 응력-변형률 곡선을 획득하였다.
- (3) 차륜재의 경우 반복하중 작용시 수명 초기에 주기적 연화현상이 나타났으며 이후 일정 응력진폭을 유지하다가 전체수명의 약 90%($N/N_f=0.9$)이후에 응력이 급격히 감소하며 파단하는 양상을 나타내었다.
- (4) 차축재의 경우 σ_a 가 작아질수록 전체수명에 있어서 σ_a 가 감소하는 시점이 빨라졌으며 σ_a 가 1.0% 보다 작은 경우 σ_a-N/N_f 선도상에 변곡점이 나타났다.

후기

본 연구는 국가지정연구실(NRL) 사업(철도기술연구원) 및 BK21 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 권석진, “임계위치에서의 고속철도용 윤축의 파괴인성”, 한국철도학회 춘계학술대회, 2004.
- [2] 서정원, 구병준, 최재봉, 김영진, “잔류응력 변화를 고려한 철도차량 차륜의 접촉피로 수명평가”, 대한기계학회논문집 A권, 제28권, 제9호, pp. 1391~1398., 2004.
- [3] Julie A. Bannantine, Jess J. Comer, James L. Handrock, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, 1990.
- [4] O.H. Basquin, "The Exponential Law of Endurance Test", Proceedings, American Society for Testing and Materials, ASTEA, vol. 10, pp. 625 ~ 630., 1910.
- [5] L. F. Coffin, Jr., " A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal", Trans. ASME, Vol. 76, pp. 931~950., 1954.
- [6] S. S. Manson, "Behavior of Materials under Conditions of Thermal Stress", Heat Transfer Symposium, University of Michigan Engineering Research Institute, 1953.
- [7] ASTM E606-92, "Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing, 1998.
- [8] 권재도, 우승완, 박종철, 이옹선, 박윤원, “주조 스테인리스강 CF8M의 430°C 열화거동에 관한 연구 (II)”, 대한기계학회논문집 A권, 제24권 제9호, pp. 2183~2190., 2000.