

철도차량 제동디스크 소재 열충격 실험에 대한 피로해석

A Fatigue Analysis of Thermal Shock Test in Brake Disc Material for Railway

임충환† 구병춘*
Choong-Hwan Lim Byeong-Choon Goo

ABSTRACT

During braking of railway vehicles the repetitive thermal shock leads to thermal cracks on disc surface, and the lifetime of brake disc is dependent on the number of trimming works for removing these thermal cracks. Many tries for development of high heat resistant brake disc to extend the disc life and to warrant reliable braking performance has been continued. In present study, we carry out the computational fatigue analysis for thermal fatigue test in three candidate materials which were made to develop new high heat resistant material. Using FEM, we simulate thermal fatigue test in three candidate materials and conventional disc material. We then estimate the number of cycle to thermal crack initiation based on data from mechanical fatigue tests, and the results are compared with each material. For each material, the correction factor for N_{F40} which is the number of cycles when crack over $40\mu m$ was observed in thermal fatigue test is decided. From this study, we can verify the performance of thermal fatigue test system and suggest a qualitatively comparative method for heat resistance by FEM analysis of thermal shocking phenomenon.

1. 서론

철도차량 혹은 자동차의 디스크-패드 마찰제동 시스템에 있어서 고열로 전환된 에너지는 마찰 디스크 표면에 온도구배와 열피로 현상으로 인한 열균열을 발생시킨다. 이러한 열균열은 제동성능을 저하시킬뿐더러 디스크 정비 및 교체주기를 감소시켜 유지보수비용을 상승시킨다.

그동안 세계 곳곳에서 제동 디스크 표면에 발생하는 열균열 현상과 관련한 많은 연구가 진행되어 왔다. Mackin 등[1]은 자동차용 제동 디스크에 대한 FEM 해석과 Coffin-Manson 식을 이용하여 피로수명을 계산하였고, Yamabe 등[2]과 Sakamoto 등[3]은 각각 트럭용과 철도차량용 제동 디스크에 대하여 열균열의 발생 및 진전을 저감할 수 있는 신재질을 개발하기 위한 마찰성능 시험 등을 수행하였다. 또한, Fissolo 등[4]은 열피로 시험장치를 이용, 스테인리스강의 열균열 발생 및 진전 등의 열피로 거동을 연구한바 있다.

본 논문에서는 철도차량의 제동 시 발생하는 열피로에 대해 열균열 발생 저항성이 향상된 재질을 개발하는 과정에서 수행된 열피로 시험에 대해 유한요소법을 이용하여 시편 내부에서 열응력에 의해 발생하는 변형률을 계산하였다. 또한, 재료의 인장시험 및 회전굽힘 피로시험에서 얻어진 데이터를 이용하여 저주기 피로경우에 적합한 strain-life 수명계산식을 각 후보 재료별로 도출하여 열피로 시험 환경에서의 수명을 계산하였다.

† 책임저자 : 비회원, 한국철도기술연구원 연구원/과학기술연합
대학원대학교 박사과정

E-mail : chlim@krrl.re.kr

TEL : (031)460-5285 FAX : (031)460-5289

* 정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원

이 결과를 열피로 시험에서의 균열발생 수명과 비교할 수 있도록 $40\mu m$ 이상의 균열이 최초로 관찰된 시점에 대한 보정계수를 결정하였다. 이상의 연구를 통하여 열피로 실험 장치의 성능을 검증하고 열충격 현상의 유한요소 해석을 통한 정성적인 내열성 비교방법을 제시하였다.

2. 열피로 시험

열피로 시험에는 인덕션 히터를 이용하여 고속으로 시편을 가열할 수 있는 열피로 시험기가 사용되었다(그림 1). 가열된 시편은 설정온도에 따라 다른 시점에 하강하여 수조의 냉각수에 의해 급냉된다. 이때 냉각수는 냉각기에 의해 일정 온도로 유지된다. 시험동안 일정한 사이클의 열피로가 가해진 시편은 별도 제작한 시편관찰지그로 옮겨져 디지털 현미경을 통해 표면 열균열의 발생 및 진전현상이 관찰된다. 최종 종료순간까지 수집된 열균열 이미지는 자체개발 된 영상분석 프로그램을 통해 분석된다.

최고온도 $T_{max}=500^{\circ}C$, 최저온도 $T_{min}=40^{\circ}C$ 로 $\Delta T=460^{\circ}C$ 의 온도범위로 열피로를 가하였다. 시험에는 기존 철도차량 제동디스크 재질(Conv.)과 함께, 연구를 통해 개발된 3종의 재질(B, C 및 D)로 제작된 시편이 사용되었다. 도표 1에 Conv. 재질과 3종의 개발 재질의 화학 조성 분석결과를 나타내었다.

열피로 시험을 통한 관찰 결과, $40\mu m$ 이상의 최초 균열이 관찰된 시점은 Conv.: 60cycles, B: 90cycles, C: 110cycles, D: 100cycles 등으로 확인되었다.

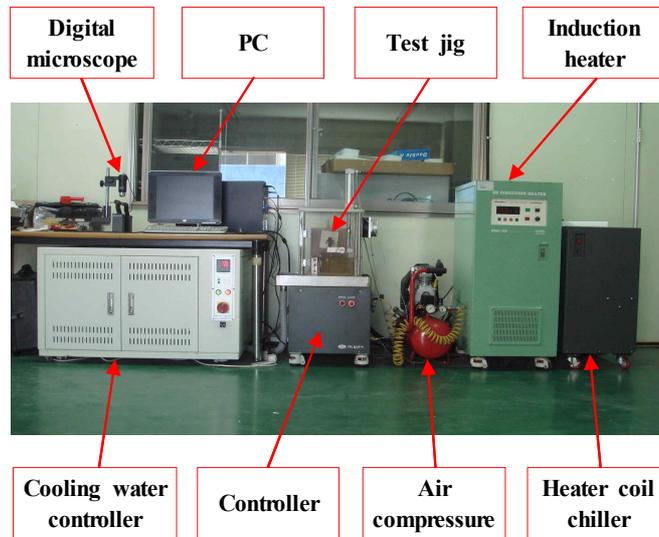


그림 1. 열피로 시험장치

도표 1. 재질별 화학조성 분석결과

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Mg
Conv.	3.13	2.05	0.71	0.041	0.018	0.3	-	0.8	-	-
B	3.79	2.39	0.419	0.039	0.013	0.353	0.419	0.222	0.284	0.016
C	3.75	2.41	0.401	0.04	0.013	0.353	1.05	0.403	0.433	0.015
D	3.77	2.33	0.393	0.04	0.014	0.341	1.01	0.534	0.549	0.015

3. 유한요소 해석

3.1. 해석조건 및 모델링

열충격에 의해 시편 내부에서 발생하는 변형률을 계산하기 위한 Coupled temperature-displacement 해석을 위하여 총 7,680개의 C3D8RT 요소가 사용되었으며 대칭을 고려하여 시편의 1/4만 모델링하였다. 대칭면에는 단열의 경계조건을 부여하였다. 그림 2에서 실물시편과 유한요소모델을 비교하여 보이고 있다.

유한요소 해석에서 시편 표면에 가해지는 최대(500°C), 최소(40°C)의 온도 범위와 가열 및 냉각 시간을 실제 열피로 시험에서의 조건과 동일하게 부여하였으며 시편의 가열부위에서 유도전류에 의해 발생하는 온도분포는 일정하다고 가정하였다.

해석에 사용된 각 재료의 기계적, 열적 특성이 실험을 통하여 얻어졌고 그 결과를 도표 2와 3에 각각 나타내었다.



그림 2. 열피로 시편 및 유한요소 모델

도표 2. 각 재료의 기계적 물성

	Tensile strength (N/mm ²)	Tensile Elongation (%)	Compressive Strength (N/mm ²)	Specific gravity
Conv.	275.0	0.11	693.2	7.241
B	414.0	3.1	688.4	7.056
C	483.4	2.1	784.1	7.137
D	499.6	1.2	824.2	7.085

도표 3. 각 재료의 열적 물성

	Temp.	Conv.	B	C	D
Specific heat (J/g·°C)	25°C	0.476	0.445	0.444	0.457
	150°C	0.535	0.506	0.508	0.516
	300°C	0.593	0.587	0.583	0.576
Thermal conductivity (W/m·°C)	25°C	55.35	33.66	33.53	31.94
	150°C	51.24	36.09	36.03	35.42
	300°C	47.72	38.48	38.49	35.42
Thermal expansion coefficient (×10 ⁻⁶ /°C)	30-150°C	10.3	10.9	10.4	10.2
	150-300°C	14.5	15.2	14.4	14.6
	300-450°C	16.0	16.0	15.9	15.9
	450-600°C	17.0	16.0	16.9	16.5

3.2. 해석 결과

열피로 시험에서의 열충격에 의하여 그림 3에서와 같이 시편 내부에서 온도분포가 변화하며, 그로 인하여 변형률이 발생된다. 열피로 시험에서의 균열 관찰위치에 해당하는 node 207에서 각 방향의 변형률이 계산되었고, 이를 수명계산에 필요한 등가 변형률 범위로 변환하기 위하여 ASME Code [5]에서 제안하는 다음 식(1)의 등가 변형률 범위 기준을 사용하였다. 등가 변형률 범위 계산을 위해 사용된 변형률은 반복경화 현상을 고려하여 10회 째 사이클에서의 값을 취하였다.

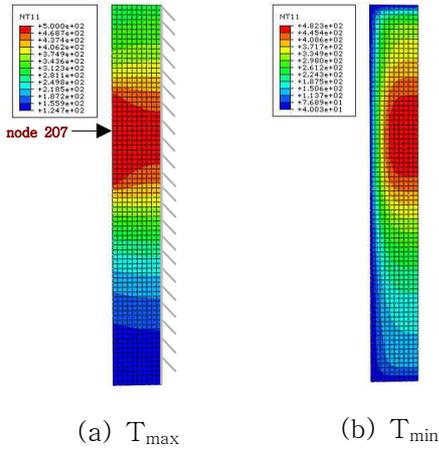


그림 3. T_{max} 와 T_{min} 에서의 시편 온도분포

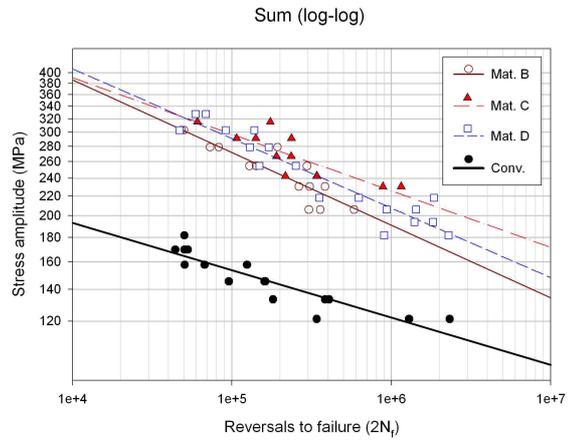


그림 4. 회전굽힘 피로시험 결과

$$\Delta\epsilon_{eq} = \left\{ \frac{\sqrt{2}}{3} [(\Delta\epsilon_{11} - \Delta\epsilon_{22})^2 + (\Delta\epsilon_{22} - \Delta\epsilon_{33})^2 + (\Delta\epsilon_{33} - \Delta\epsilon_{11})^2 + 6(\Delta\epsilon_{12}^2 + \Delta\epsilon_{23}^2 + \Delta\epsilon_{31}^2)]^{1/2} \right\} \quad (1)$$

계산을 통해 얻어진 Conv, B, C 및 D 재료의 등가 변형률 범위는 각각 $5.601E-3$, $4.999E-3$, $5.157E-3$ 및 $5.116E-3$ 이다.

4. 피로해석

4.1. 피로수명식 도출

열충격에 의한 저주기 피로수명을 계산하기 위하여 다음의 Manson-Coffin 식을 사용하였다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (2)$$

여기서, $\Delta\epsilon$ 는 변형률 범위, σ'_f 는 피로강도계수, ϵ'_f 는 피로연성계수, b 는 피로강도지수, c 는 피로연성지수, E 는 탄성계수이며 N_f 는 파괴까지의 사이클 수이다.

먼저, 피로강도계수 σ'_f 는 진 파괴강도(true fracture strength) σ_f 에 거의 근사한 것으로 가정할 수 있으며 [6] 강한 취성의 성질을 갖는 주철의 경우에 단면수축에 의한 necking 현상이 거의 발생하지 않으므로 인장강도를 진 파괴강도로 볼 수 있다. 따라서 각 재료의 인장강도를 피로강도계수로 사용하였다.

피로강도지수 b 를 구하기 위하여 각 재료에 대해 수행된 회전굽힘 피로시험의 결과(그림 4)를 활용하였다. 그 결과, 각 재료의 피로강도지수는 Conv.: -0.100 , B: -0.153 , C: -0.119 , D: -0.147 인 것으로 계산되었다.

피로연성지수 c 는 변형률 제어 피로시험 결과로부터 얻어질 수 있다. 하지만 본 연구에서는 해당 시험이 수행되지 못하였고, 그에 따라 일반적인 주철의 피로연성지수로 알려져 있는 값($c=-0.788$, [7])을 계산에 적용하였다.

주철인 본 재료에 대한 열피로 시험에서는 가열 시의 압축응력이 냉각 시의 인장응력에 비해 대단히 크게 작용하므로, 인장성분의 응력이 피로수명에 미치는 영향을 고려하는 평균응력효과(mean stress effect)는 무시할 수 있는 것으로 가정하였다.

현실적으로 본 계산 결과는 실제 열피로 시험에 있어서의 표면 균열 발생시점과 일치하지 못한다. 그

이유로는 회전굽힘 피로시험에서의 완전 파단시점의 수명과 열피로 균열 발생시점과의 차이, 수명계산식 도출을 위한 갖가지 실험들에 존재하는 실험 오차 등이 고려될 수 있고 변형률 제어 피로시험 데이터의 부재에 의해 보편적인 피로연성계수가 수명식에 적용된 것도 큰 이유로 작용할 수 있을 것이다. 또한, 실제로 균열관찰 장비의 성능이 한계가 있고 초기 발생균열에 대한 기준도 확실히 결정지어질 수 없는 것이어서 현실에서 균열의 발생시점을 정확하게 평가하는 것은 불가능하다.

이러한 이유로 수명계산 결과와 열피로 시험 결과 간에는 그 경향에 관한 정성적인 비교만이 가능할 것이다. 이를 위하여, 열피로 시험에서 $40\mu m$ 이상의 길이를 가지는 균열이 최초로 발견된 시점 N_{f-40} 과 유한요소해석 및 피로수명식에 의해 계산된 수명 N_f , 그리고 이들의 차이에 대한 보정계수 $c_{cf} (=N_f / N_{f-40})$ 를 각 재료별로 비교하여 도표 4에 나타내었다.

비교를 통해 D 재질을 제외한 나머지 재료들에서 시편의 재질에 따른 수명 경향이 대체로 유사함을 확인할 수 있다. 하지만 보정계수의 비교 결과, 각 재료의 보정계수들 간에는 차이가 큰 것으로 확인되었고, 재료별로 정확한 피로연성지수를 적용하지 못한 것이 이러한 차이의 가장 큰 원인인 것으로 고려되었다.

도표 4. 재료별 수명결과 비교

	N_{f-40} from TFT (cycles)	N_f from strain-life eq. (cycles)	c_{cf} (N_f / N_{f-40})
Conv.	60	11	0.183
B	90	39	0.433
C	110	40	0.364
D	100	20	0.200

5. 결론

열균열 저항성을 개선시킨 철도차량용 제동 디스크 소재를 개발하는 과정에서 수행된 열피로 시험에 대하여, 시편 내부에서 발생하는 변형률을 유한요소법을 이용하여 계산하였다. 또한, 재료의 인장시험 및 회전굽힘 피로시험에서 얻어진 데이터로부터 피로강도계수 및 지수, 그리고 피로연성계수를 결정하고 보편적인 주철의 피로연성지수를 선택하여 저주기 피로경우에 적합한 각 후보 재료별 strain-life 수명계산식을 도출하였다. 수명식의 계산을 통해 얻어진 각 재료의 수명 결과를 열피로 시험에서의 균열발생 수명과 비교함으로써 그 경향을 정성적으로 평가하였고 두 결과수명들 간의 보정계수를 계산하였다. 두 결과들에서 재료별 수명의 경향은 대체로 유사하였으나 각 보정계수들 간에는 큰 차이를 보였으며 이에 대한 개선을 위해서는 변형률 제어 피로시험을 통한 정확한 피로연성지수의 획득이 가장 우선되어야 할 것으로 고려되었다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 “철도 구성품 환경성향상 기술개발” 과제의 일부로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Thomas J. Mackin, et al., "Thermal cracking in disc brakes", *Engineering Failure Analysis* 9, pp. 63-76, 2002.
2. Junichiro Yamabe, et al., "Development of disc brake rotors for trucks with high thermal fatigue strength", *JSAE Review* 23, pp. 105-112, 2002.
3. Haruo Sakamoto, et al., "Fracture analysis and material improvement of brake discs", *JSME International Journal, Series A*, Vol. 48, No. 4, pp. 458-464, 2005.
4. A. Fissolo, et al., "Thermal fatigue behaviour for a 316L type steel", *Journal of Nuclear Materials* 233-237, pp. 156-161, 1996.
5. American Society of Mechanical Engineers, "Cases of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code", Case N-47-12 (1592-2), ASME, New York, 1977.
6. Julie A. Bannantine, Jess J. Comer and James L. Handrock, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall, 1990.
7. CHR. Boller and T. Seeger, "Data for Cyclic Loading, Part E: Case and Welded Metals", Elsevier, 1987.