

FEM을 이용한 철도차량용 제동 디스크의 제동시 단면에서의 열응력에 의한 피로손상에 관한 연구

A Study on the Fatigue Damage of a Railway Disc Brake Surface Due to Thermal Stress During Braking Using FEM Analysis

주세민* · 권용상** · 김호경†

Se-Min Joo · Yong-Sang Kwon · Ho-Kyung Kim

Abstract In order to investigate the thermal cracking of the rolling stock brake disc, finite element analysis was conducted on the temperature distribution and thermal stress of the disc during braking. In case of initial vehicle speed of 90, 105, 120 km/h, the maximum temperature on the disk surface due to braking was 135.9°C, 157.9°C, 178.7°C, respectively. And, the maximum von-Mises stress at the disc surface was 42.4, 50.3, 57.1 MPa at a speed of 90, 105, 120 km/h, respectively, indicating that the stress increases with an increment in the speed. Damage fraction due to braking during one year running on the Seoul - Busan line was determined as 14.6%.

Keywords : Brake disc, Finite Element Analysis, Thermal stress, Fatigue damage

요지 본 연구에서는 제동시 발생하는 마찰열에 의한 철도차량 디스크의 온도 및 열응력을 유한요소해석을 이용하여 분석하고 동일 차량 디스크의 피로강도를 비교 평가하였다. 해석결과 초기속도 90, 105, 120km/h에서의 제동조건에서 제동했을 경우 디스크 마찰면에서의 최대 von-Mise 응력은 각각 42.4, 50.3, 57.1MPa로 90km/h에서 120km/h로 33.3% 증가시 응력은 약 35% 증가하였으며 1년간 서울-부산간의 1회 왕복시 14.6%의 손상율이 발생하는 것으로 평가되어 선형손상법칙을 적용시 수명이 6.85년으로 예상된다.

주요어 : 브레이크 디스크, 유한요소해석, 열응력, 피로손상

1. 서론

철도차량의 제동시스템의 주요부품인 디스크 브레이크는 차량의 운동에너지를 열에너지로 전환시켜 디스크와 패드의 마찰에 의해 차량을 정지시키며 열차의 편성차량에 해당하는 운동에너지를 본 제동시스템에서 부담하므로 큰 부하가 발생한다. 따라서 제동에 따른 마찰열은 디스크나 패드에 온도를 상승시켜 수명 및 제동성능에 큰 영향을 미친다[1-3].

브레이크 디스크는 제동마찰 표면상에서의 높은 열 발생률에 의하여 표면 균열이나 제동성능의 저하 등을 일으킬

수 있다. 주철로 제작된 브레이크 디스크는 마모보다도 열균열에서 수명이 단축되는 경우가 고속차량에서 많이 발생한다. 이러한 브레이크 디스크의 열균열은 고속에서 제동의 반복적인 사용과 순간마찰계수의 변화, 제동 시 디스크 마찰표면에 발생하는 열의 발산속도, 디스크의 강도부족, 재질결함, 제동마찰 상대재인 패드의 재질 등으로 발생한다. 이러한 디스크의 과대한 열균열의 발생은 편 마모로 이어지며 대차와의 분리로 이어져 열차탈선의 우려도 있다 [4-7].

지금까지 브레이크 디스크의 제동에 의한 온도변화 및 열응력에 관하여 많은 연구가 진행되어 왔다[3,4,6-9]. 예로 김 등[8]은 철도 차량용 제동 디스크의 운행중의 온도 변화와 열전도 등에 관한 연구를 수행하였으며, 석 등[9]은 철도 제동 디스크에서 마찰면의 압력분포를 고려한 열응력을 분석하였으며 압력분포 해석을 통하여 실제 디스크의 균열

* 책임저자 : 정희원, 서울산업대학교, 자동차공학과, 교수
E-mail : kimhk@snut.ac.kr

TEL : (02)970-6348 FAX : (02)970-7032

** 서울산업대학교, NID융합기술대학원생

*** 서울산업대학교, 자동차공학과, 대학생

위치와 최대 열응력이 발생하는 위치가 일치함을 확인하였다. Painer 등[3]은 실험적 연구를 통하여 철도 제동 디스크 패드의 강성과 패드의 접촉 길이에 대한 hot spot의 영향에 관하여 연구하였다. 그러나 이들 논문의 대부분은 디스크의 열응력을 포함한 열적 거동에 관한 연구로 현장에서 종종 발생하는 제동 디스크의 열응력에 의한 피로손상에 관한 연구는 매우 제한적이다.

본 연구에서는 경부선 새마을호 열차에서 사용하고 있는 통기식 디스크의 제동시의 열응력에 의한 피로손상에 관하여 분석하고자 한다. 열차의 초기 속도인 90, 105, 120km/h를 기준으로 유한요소해석을 이용하여 제동 시 마찰열에 의한 디스크의 온도분포 및 열응력을 해석하였다. 또한 동일열차의 제동 디스크에 대한 피로강도 데이터[7]를 기초로 유한요소해석 결과와 비교 검토하고 제동에 의한 피로손상을 분석하여 디스크 브레이크 재료의 개발 및 설계 시 중요한 정보를 제공하고자 한다.

2. 수치해석 및 실험 절차

2.1 수치해석 조건 및 방법

주행 중인 열차를 역에 정차하기 위하여 열차를 제동시켰을 때 디스크 브레이크를 사용하는 동안 광범위한 열응력과 온도가 발생한다. 유효제동력이 작용하여 초기속도 V_0 에서 0으로 일정하게 감소하면서 제동시간 t 동안 제동 하며 정지할 경우 평균 감속도 $a = V_0/t$ 이며 제동 거리 $S = 0.5 V_0 t S$ 이다. 한편 제동 압부력 P_t 는 다음과 같이 결정하였다.

$$P_t = \frac{\pi d^2}{4} \times (p - k) \times \eta \quad (1)$$

여기서 d : 제동 실린더 직경, η : 제동효율 ($= 0.9$), p : 제동 실린더압력, k : 스프링 반력이다.

디스크와 패드에는 차량이 주행 중 가지고 있던 운동에너지가 변환되어 마찰열 에너지가 발생하게 되고, 디스크와 패드가 접촉한 부분에서는 열유속(heat flux), q 가 작용하게 된다. 제동 마력은 열유동율로, 디스크와 패드가 접한 부분에서 열에너지로 소산되므로 제동마력을 열량으로 환산하여 디스크와 패드의 회전 접촉 면적으로 나누면 열유속이 결정된다. 또한 제동 마력 P_b 는 다음과 같이 계산하였다.

$$P_b = \mu P_t V \gamma \quad (2)$$

여기서 μ : 마찰계수로 철도 디스크의 경우 0.35를 적용하였으며. V : 속도(m/s). γ : 디스크 열분담율 (heat partition

ratio)로 디스크로 유입되는 열분담율 γ 는 다음과 같은 식에 의해 결정한 결과 0.87로 결정하였다 [1].

$$\gamma = \frac{q_d}{q_d + q_p} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_p c_p k_p}{\rho_d c_d k_d}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

여기서,

q_d : 디스크로의 열 유입량(W/m^2)

q_p : 패드로의 열 유입량(W/m^2)

ρ_d : 디스크의 밀도(kg/m^3)

ρ_p : 패드의 밀도(kg/m^3)

c_d : 디스크의 비열($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)

c_p : 패드의 비열($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)

k_d : 디스크의 열 전도율($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)

k_p : 패드의 열 전도율($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)이다.

마찰표면에서의 단위면적당의 발열량, 즉 열유속은 식 (3)을 대입하여 다음과 같이 결정하였다.

$$q = \frac{P_b}{A_{pad}} \quad (4)$$

또한 마찰 면에서의 회전접촉면적은 다음과 같다.

$$A_{pad} = \pi(r_2^2 - r_1^2) \quad (5)$$

여기서 r_1 과 r_2 는 각각 패드의 내경과 외경이다.

브레이크 디스크의 온도분포 해석을 위하여 유한요소 해석을 수행하였으며, 본 연구에서는 열차가 주행을 할 때 구배가 없는 직선로이며, 주행저항은 없으며, 감가속도 일정하고, 공기 힘력에 의한 제동효과도 없으며, 차량의 제동에너지는 90%가 열에너지로 전환한다고 가정하였다. 마찰면에서 마찰열의 유입을 설정하였고, 제동 시 마찰면에서의 복사열은 배제하였으며, 디스크내의 주위로 대류에 의한 열 이동을 고려하였다.

디스크의 기하학적 형상은 상용 CAD 소프트웨어인 Pro-Engineer를 이용하여 3차원의 geometry solid 모델로 구성하였고, 이 모델을 pre-processor인 HyperMesh를 이용하여 회전축 대칭을 고려하여 1/4 모델만 유한요소모델을 구성하였다. 유한요소 해석에 사용된 소프트웨어는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS이며, Fig. 1에서 보는 바와 같이 열전달 해석에 사용하는 3D 요소인 C3D4T 요소를 사용하여 52,528개의 절점과 236,280개의 요소로 유한요소모델을 구성하였다.

응력 해석 시에 패드와 디스크간의 마찰력에 의한 응력 효과는 배제하였다. 제동력에 의하여 제동 디스크와 패드 간의 마찰력이 발생하며 이로 인하여 전단응력이 발생한

다. 이 경우 전단응력은 표면에서의 제동력을 패드의 면적으로 나눈 값으로 패드의 압력과 거의 동일하다고 판단된다. 실제 디스크에 압력이 1MPa 정도로 매우 작아서 본 연구에서는 무시하였습니다. 온도가 증가하면서 재료의 피로 강도를 포함한 기계적 물성치가 저하할 수 있다. 이를 위해 서는 추가적인 고온에서의 물성치 실험이 필요하며 본 연구에서는 온도에 따라 재료 물성치는 일정하다고 가정하고 해석을 수행하였다.

경계조건으로 Fig. 2에서와 같이 디스크 마찰면에 대한 열유속을 적용하였으며, 실제 디스크의 연장인 단면은 대칭면으로 적용하고, 열유속이 적용되는 마찰 면을 제외한 모든 면에 대류열전달 계수가 전체적으로 분포한다고 가정하였다. Table 1은 본 해석에 사용된 브레이크 디스크의 열적 물성치이며, 유한요소해석에 적용한 새마을호 열차의 제원은 Table 2와 같다.

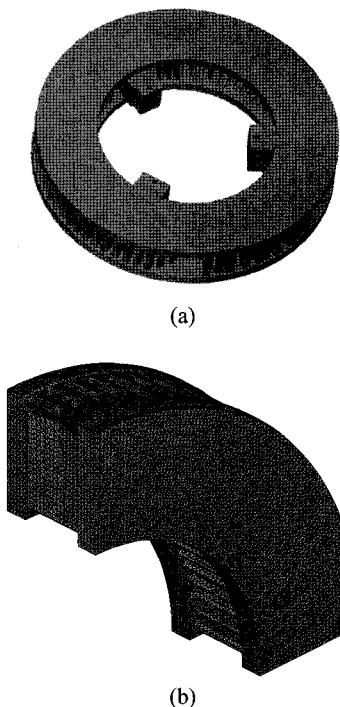


Fig. 1. 3D geometry and F.E. model of the brake disc

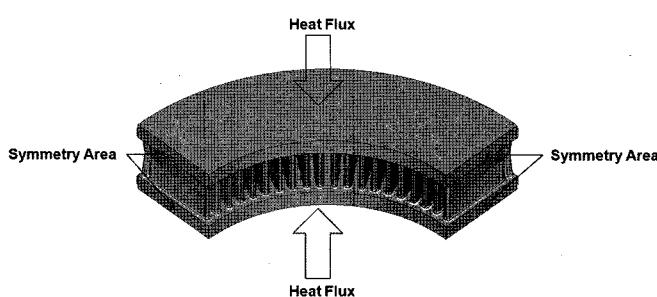


Fig. 2. Boundary conditions for thermal analysis

Table 1. Material properties for F.E. analysis [7]

Thermal properties	Numerical values
Initial temperature, T (°C)	30
Density, ρ (kg/m ³)	7,150
Specific heat, c (J/kg · °C)	460
Thermal conductivity, k (W/m · °C)	54
Coefficient of thermal expansion, α (1/°C)	10.5×10^{-6}

Table 2. Specification of the railway vehicle [7]

Item	Spec.	Item	Spec.
Vehicle weight, W(kg)	43000	Braking efficiency, η	0.9
Brake cylinder diameter, d (mm)	254	Friction coefficient, μ	0.35
Brake cylinder pressure, p (MPa)	0.379	Spring pressure, k (MPa)	0.033
Disc diameter, r_d (mm)	482	Wheel diameter, r_w (mm)	860

3. 해석결과 및 고찰

3.1 온도분포

대류에 대해서는 제동 시 차량의 속도가 변함에 따라 대류 열전달계수가 변화하며 디스크 형상이 복잡하고, 주변의 유동, 바람의 영향 등에 따라 다르다. 본 연구에서는 대류열전달계수 $100\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 를 적용하여 초기 속도 90, 105, 120km/h에 따른 1회 제동 시 최고온도의 분포도에 관한 해석을 실시하였다. Fig. 3~5는 대류 열전달계수 $100\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 에 대한 초기 속도 90, 105, 120km/h에 따른 1회 제동시의 온도 분포를 각각 나타내었다. 디스크 면과 접하는 패드의 작용반경 범위 내의 3개의 절점을 선정하여 온도를 표시하였다. Fig. 3은 초기속도 90km/h, 제동시간 86.2sec, 감속도 0.29m/s^2 , 대류 열전달계수 $100\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 를 적용한 결과로 총 제동시간 중 최대온도인 54.7초 일 때의 온도분포이다. 마찰면의 최고온도는 약 136°C로서 초기온도 30°C를 고려하면 상승최고 온도 폭은 106°C로 나타났다. 한편 초기속도 105km/h, 제동시간 89.2sec, 대류 열전달계수 $100\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 를 적용한 결과 마찰면의 최고온도는 약 158°C로서 나타났다. 본 실험차량과 유사한 연구[8]에 대한 실험 연구의 경우 평균 주행 속도 107km/h에서 상하행선에 따라 평균 92.6, 104.5°C이며 최대 194.7, 222.5°C로 보고되었다. 본 연구의 경우 105km/h의 경우 158°C의 최대 결과 값은 약간 낮은 수치이나 실험 결과치 구간으로 적절

히 해석이 수행되었다고 판단된다.

Fig. 6은 대류 열전달계수 $100\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 를 적용한 디스크 딥면의 3 지점에 대한 초기속도 90km/h 에서의 시간별 온도 변화를 나타낸 그래프로 제동 시작 후 약 10초까지는 온도 증가가 급격하며 그 이후 최대 온도 시간인 54.7초까지 완만하게 증가하여 그 이후에는 점차적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 제동 초기에는 디스크 내부로의 열전도에 의한 가열효과가 지배적이지만, 시간이 경과함에 따라 대류에 의한 냉각효과로 점차적으로 감소하는 것을 추정 할 수 있다. 그러므로 브레이크의 성능을 향상시키기 위해서는 소재의 열용량 증대를 위한 마찰 접촉면의 폭 증가와 더불어, 대류에 의한 방열 효과를 극대화시키기 위한 형상의 설계, 열용량, 열전도, 강도를 고려한 적절한 소재 선택 등이 요구된다. 각각의 차량 속도에 따른 총 제동시간과 최대온도일 때의 제동시간을 Table 3에 나타내었으며 최고의 온도가 발생하는 시점이 총 제동시간의 평균적으로 약 60% 정도에서 발생한다. 이와 같은 결과는 최고의 온도가 발생하는 시점이 총 제동시간의 약 50%인 승용차의 경우 [8]보다 약간 긴 것으로 나타났다. 이는 철도차량과 비교하여 승용차의 경우 상대적으로 빠른 차량속도에서 제동시간이 매우 짧아 제동 초기에 많은 제동 열이 딥면에 전달되어 결과적으로 최고온도에 도달하는 시간이 상대적으로 짧은 것으로 판단된다.

Table 3. Maximum temperature and its time for various velocities

Velocity	Total braking time (sec)	Maximum temperature time (sec)	Maximum temperature (°C)
90 km/h	86.2	54.7	135.9
105 km/h	89.2	56.9	157.9
120 km/h	92.6	59.3	178.7

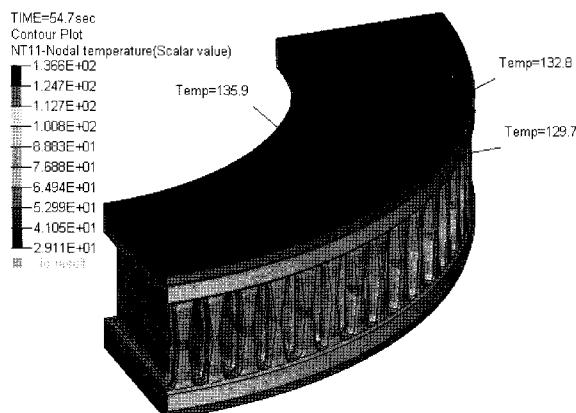


Fig. 3. Temperature distribution due to braking at 90 km/h

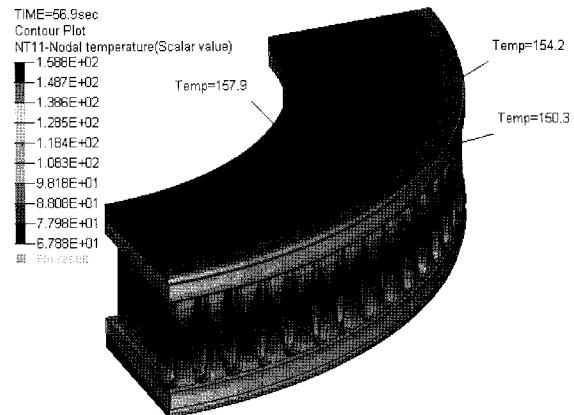


Fig. 4. Temperature distribution due to braking at 105 km/h

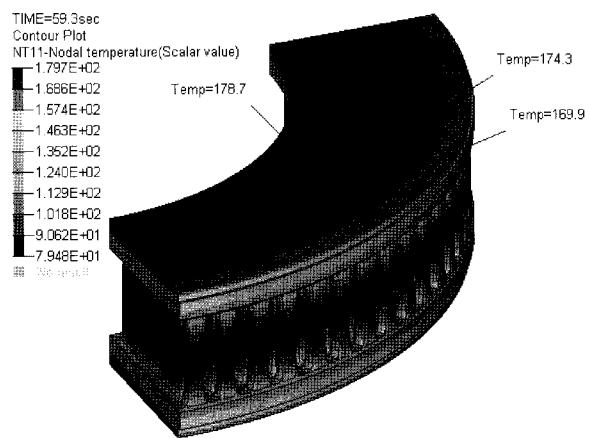


Fig. 5. Temperature distribution due to braking at 120 km/h

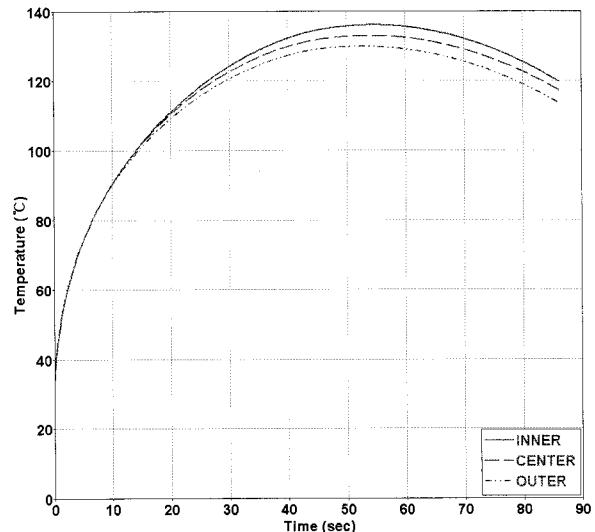


Fig. 6. Variations of temperature as a function of time during braking of three surface locations at $v = 90\text{km/h}$

3.2 열응력 해석

물체는 온도변화에 따라 팽창 또는 수축되는데, 이 팽창이나 수축이 외부적인 구속에 의해 방해를 받으면 그 방해

받은 변형량 만큼 변형을 받게 되며, 그에 상응하는 물체 내부의 변형력에 의해 열응력이 발생한다. 따라서 가열과 냉각이 반복됨으로써 열변형력이 되풀이 되어 열 피로에 의해 파괴되기도 한다.

Fig. 7은 초기속도 105km/h에서는 제동시간을 89.2초를 적용하고, 대류 열전달계수 $100\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 를 적용시의 총 제동시간 89.2초 중 최대 응력 시간인 13.2초 일 때의 von-Mises 응력분포이다. Fig. 7과 같이 초기 속도 105km/h에서의 답면에서의 최대 von-Mises 응력은 50.3MPa로 나타났다. 제동 열이 발생하여 가장 온도가 높은 답면에 비하여 통기구 근처에 많은 열응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 통기구의 경우 대류에 의한 빠른 냉각에 의하여 상대적으로 높은 열응력이 발생한 것으로 평가된다. 통기구 근처가 아닌 답면에서 열 균열 현상이 통상적으로 발생하는 사실에 비추어 이는 답면의 경우 접촉 마찰에 의한 효과가 추가되어 열 균열이 발생하는 것으로 판단되며 이에 대한 추후 상세한 연구가 필요하다.

또한 해석결과 최대응력이 나타나는 시간이 최대온도가 발생하는 시간보다 빠른 것으로 나타났다. 이는 디스크 표면에서의 최대응력이 제동초기 시간대에 높게 나타나는 것은 단순 열응력 공식으로 생각하면 제동초기에 온도가 급격하게 변하여 즉 ΔT 가 높은 것으로 판단된다. 반면에 온도는 서서히 확산되다가 최대온도가 된 후 대류계수의 영향으로 온도가 내려가기 때문인 것으로 판단된다. 초기속도 90km/h 및 120km/h에서의 최대응력분포를 해석한 결과 각각 42.4MPa, 57.1MPa로 나타나 속도가 90km/h에서 120 km/h로 33.3% 증가 시 응력은 약 35% 증가함을 알 수 있다. Table 4는 각각의 속도에 따른 제동시 디스크 답면의 최대 von-Mises 응력 및 시간을 요약하였다.

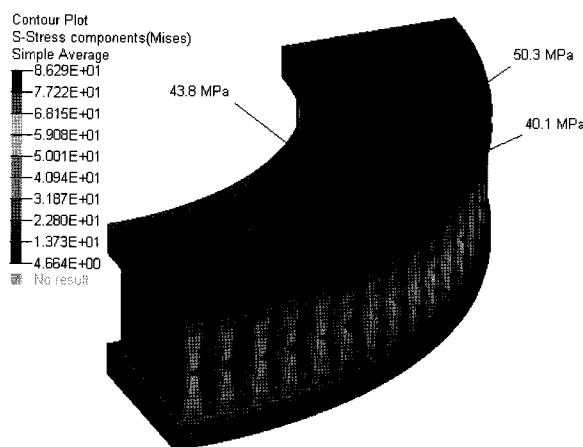


Fig. 7. Von-Mises stress distribution due to braking at 105 km/h

Table 4. Maximum von-Mises stress values on the disk surface during braking for various velocities

Velocity	Time at maximum stress on the disk surface	Max. von Mises stress on the disk surface
90 km/h	13.6 sec	42.4 MPa
105 km/h	13.2 sec	50.3 MPa
120 km/h	13.9 sec	57.1 MPa

3.3 피로손상 예측

서울-부산 간 새마을호의 브레이크 디스크의 열응력에 의한 피로손상 예측을 위하여 실제 서울-부산 간 새마을호의 운행 일자 데이터를 기준 [7]으로 이용하였다. 열차의 운행에서 제동의 반복적인 작용 과정에서 발생하는 디스크의 열응력에 의한 손상을 평가하기 위하여 디스크 표면에 균열이 발생한다고 판단하여 디스크 표면에서의 von-Mises 최대응력을 기준으로 평가하였다. 실제 디스크 재료를 이용하여 피로 강도를 수행한 연구의 S-N 선도 ($N_f = 5.7 \times 10^{18} \sigma^{-7.7}$) [7]를 적용하여 각 속도에서의 최대 von-Mises 응력에 따라 해당하는 피로수명을 Table 5에 도시하였다. 여기서 N_f 는 피로수명이며 σ 는 응력진폭이다. 이때 속도 110km/h 및 100km/h의 경우는 보간법을 이용하여 결정하였다.

Table 5. Damage fraction per 1000 cycles braking

Velocity (km/h)	Max von-Mises stress (MPa)	Number of cycle to failure ($\times 10^3$)	damage ratio per 1000 cycles
120	57.1	169	0.0059
110	52.6	319	0.0031
105	50.3	451	0.0022
100	47.7	678	0.0014
90	42.4	1679	0.0006

본 디스크의 열응력에 의한 균열은 여러 제동이 반복되어 최종 파단에 이르며 선형 손상 법칙에 근거하여 각각의 여러 제동 상황에서 발생하는 열응력에 의한 누적손상이 1에 도달 시 디스크가 최종 파단에 도달한 것으로 가정하였다. 이와 같은 가정을 근거로 주행 중 감속으로 인한 제동 열응력의 영향을 무시하고 역에서의 완전 정차를 위한 제동 시 열응력에 의한 손상을 고려하였다. 예로, 초기속도 120km/h에서 제동시 최대 von-Mises 응력이 57.1MPa이 작용하여 $N_f = 5.7 \times 10^{18} \sigma^{-7.7}$ 을 적용하면 이에 해당하는 파단수명은 169×10^3 이 된다. 주행 중 1000회 제동을 사용하였을 경우 0.59%의 손상이 가해질 수 있다. 참고문헌 [7]을

Table 6. Damage fraction due to braking as a function of velocity for Seoul-Busan line

Velocity (km/h)	120	110	105	100	90	Note
1 year [7]	11,220	10,560	10,560	11,880	9,240	1 return/day 330 days/year
damage fraction	0.0664	0.0331	0.0234	0.0175	0.0055	Total 0.1459

기초로 Table 6에서와 같이 1일 서울-부산 간의 1회 왕복 시 각각의 초기 속도별 제동 횟수와 그에 해당하는 손상을 모두 합하면 1년간 31.91%의 손상을 발생한다. 이 경우 디스크 수명은 약 3.13년에 해당한다. 참고로 속도 90 km/h의 경우 1년에 9240회의 제동에 의한 총 손상을 0.6%로 매우 낮아 그 이하의 속도는 본 연구에서 고려하지 않았다.

결론적으로, 종종 열 균열 현상에 의하여 교환한도 전에 교체하게 되는 새마을호 열차의 브레이크 디스크는 각각의 속도에 따른 반복적이며 연속적인 제동의 사용과 제동을 사용하는 과정에서 디스크 소재내의 국부적인 급열, 급냉 등에 따른 온도변화가 디스크 담면의 열 균열에 지대한 영향을 준다[7]. 또한 기관사들이 열차를 운전할 때 기준으로 삼는 표준운전선도의 적용이 아닌 경험에 의한 불규칙적인 운전행태에 의해서 시행되는 제동습관, 브레이크 디스크 상대재인 패드의 재질특성과 디스크 제조과정에서 주물 특성상 결함의 내재 또는 주물의 다양한 조건 변화에 의한 기계적 물성치와 화학적 성분의 차이로 인하여 사용초기에 열 균열이 발생할 가능성도 배제할 수 없다고 판단된다[7]. 본 연구에서는 특정 디스크에서 채취한 피로 물성치와 2일 간의 특정 기관사에 의한 서울과 부산 간의 운행기록을 기초로 감속도를 일정하다고 가정하여 작성한 데이터[7]를 토대로 피로수명을 평가하였다. 그러나 실제 기관사들의 제동 습관이 각기 다른 것을 감안하여 여러 기관사들의 계절별 통계를 근거로 제동조건을 구분하여 실제 제동조건과 좀 더 근사한 상황에서의 제동시의 디스크에 작용하는 응력분포를 연구하는 것이 요구된다. 또한 본 연구에서는 온도가 증가하면서 디스크 재질의 물리적, 기계적 물성치에 대한 영향을 무시하고 해석하였다. 특히 인장강도와 더불어 피로강도 저하가 예상된다. 예로 주철의 경우 인장강도가 상온에 비하여 200°C에서 약 10% 정도 감소한 것으로 보고되었다[11]. 그러나 본 연구에서는 제동시 발생하는 열응력만을 고려하여 수행하였으므로 실제의 경우 추가적인 수명 감소가 예상된다. 한편 디스크 재료의 열응력에 의한 파손 시 선형손상법칙의 타당성 여부, 마찰에 의한 피로손상 증가 효과 등 추가적인 세부적인 연구가 더 정확한 수명을 평가하기 위하여 요구된다.

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 제동 시 발생하는 마찰열에 의한 철도차량 디스크의 온도 및 열응력을 해석하여 동일 차량 디스크의 피로강도를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초기속도 90, 105, 120km/h에서의 제동조건에서 제동했을 경우 디스크 마찰면에서의 최고온도는 각각 135.9 °C, 157.9°C, 178.7°C로 나타났으며 최고의 온도가 발생하는 시점이 총 제동시간의 평균적으로 약 60% 정도에서 발생한다.
- (2) 초기속도 90, 105, 120km/h에서의 제동조건에서 제동했을 경우 디스크 마찰면에서의 최대 von-Mise 응력은 각각 42.4, 50.3, 57.1MPa로 90 km/h에서 120km/h로 33.3% 증가 시 응력은 약 35% 증가하였다.
- (3) 역에서의 완전 정차를 위한 제동 시 열응력에 의한 손상만을 고려하면 1년간 서울-부산 간의 1회 왕복 시 14.6%의 손상을 발생하는 것으로 결정되어 선형손상법칙을 적용 시 수명이 6.85년으로 예상된다.

참 고 문 헌

1. Limpert, R. (1992). "Brake Design and Safety," Society of Automotive Eng., Inc.
2. Benseddiq N, Weichert D, Seidermann J, Minet M. (1996). "Optimization of design of railway disc brake pads," Proc. Inst. Mech. Eng. Part F, J. Rail and Rapid Transit, Vol. 210, No. 1, pp.51-61.
3. Panier S., Dufrenoy P., Weichert D. (2004) "An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes," Wear, Vol. 256, No. 7-8, pp.764-773.
4. Miyauchi T. (2005) "Thermal phenomena in railway friction braking," Journal of Japan Society Trib., vol. 50, no. 1, pp. 21-26.
5. Thomas J. et al. (2002) "Thermal cracking in disc brakes", Eng. Failure Analysis, Vol. 9, pp. 63-76.
6. Dufrenoy P. and Weichert D. (1995) "Prediction of railway disc brake temperatures taking the bearing surface variations into account," Proc. Inst. Mech. Eng. Part F, J. Rail & Rapid Transit, Vol. 209, No. 2 pp.67-76.

7. 이현목 (2002) “철도차량용 제동 디스크의 열균열 현상에 관한 연구,” 서울산업대학교 석사학위 논문.
8. 김재훈, 구병춘, 석창성 (2007) “철도 차량용 제동 디스크의 운전중 온도변화 및 열전도도 측정 연구,” 한국철도학회 논문집 Vol. 10, No. 6, pp. 665-669.
9. Kim D.J., Lee Y.M., Park J.S., Seok C.S., (2008) “Thermal stress analysis for a disk brake of railway vehicles with consideration of the pressure distribution on a frictional surface,” Mat. Sci. Eng. A, Vol. 483-484, pp. 456-459.
10. 정진성, 최명일, 이영인, 김호경, (2005) “FEM을 이용한 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 열균열 현상에 관한 연구,” 한국윤활학회지 Vol. 21, No. 2, pp. 63-70.
11. 김종영, 강춘식, (1986) “C/V 흑연 주철의 고온에서의 기계적 성질에 관한 연구,” Vol. 24, No. 12, pp. 1302-1307.

접수일(2008년 9월 2일), 수정일(2008년 11월 10일),
게재확정일(2009년 4월 13일)