제동 디스크의 온도분포에 미치는 파라미터의 영향에 관한 연구

A Study on the Effect of Parameters on the Temperature Distribution of Brake Discs

구병춘*

Goo, Byeong-Choon

ABSTRACT

A brake disc is one of the key elements of friction brake system. Thermal cracks of discs may shorten the lifetime of a disc and increase maintenance cost. Therefore, prevention of thermal cracks is very important to ensure the safety of the vehicle operation and reduction of maintenance cost. In this study, the influence of parameters on the friction heat of brake disc is examined.

1. 서 론

철도차량의 마찰제동에 사용되는 브레이크 디스크는 과도한 열 하중과 기계적 하중을 받는다. 일반적으로 기계적 하중에 의한 작용 응력은 마찰열에 의한 열응력에 비해 매우 작은 값은 갖는다. 그림 1은 열응력에 의해 발생한 균열을 보여 준다. 균열은 반경 반향을 따라 진전하고 있다. 이는 원주방향의 열응력이 지배적임을 의미한다. 제동디스크의 열 크랙은 디스크의 수명을 단축시켜 유지보수비를 증가시키며 디스크의 파손으로 사고를 유발하기도 한다. 따라서 열 크랙의 방지는 차량의 운행 안전 확보와 유지보수비 절감 등의 관점에서 대단히 중요한 기술이다.

본 연구에서는 제동 시 디스크의 온도분포에 미치는 주요 변수의 영향에 대해 기존의 연구결과를 이용하여 분석하였다.

Fig. 1 Thermal fatigue cracks on disk surface

* 책임저자 : 한국철도기술연구원, 정회원
E-mail : bcgoo@krri.re.kr
TEL : (031)460-5243, FAX : (031)460-5279

2. 디스크 재질

철도차량의 디스크에 사용되는 소재는 크게 철계금속재료와 복합재료로 구분할 수 있다. 철계금속재료는 주철계, 강계로 구분할 수 있고, 복합재료는 다시 비금속계와 금속계로 구분할 수 있다. 실제로 사용되고 있는 국내외의 디스크 재질은 표 1과 같다. 표 2는 각 디스크의 화학 성분을 보여준다.

Table 1. Materials for brake discs[1]

재료명			특징	강도 (MPa)	비중	적용분야	국가
분류		명칭					
철계	주철계	편상흑연주철 (보통주철)	마찰특성 안정 가격 저렴	250	7.2	저속선	세계 각국
		구상흑연주철 (GCD40)	마찰특성 안정	400~550	7.2	저속선	유럽
		Ni-Cr-Mo 저합금주철	마찰특성 안정 합금	250	7.2	신간선 저속선 일부	일본
		CV 흑연주철 (FCCV)	고강도 흑연형상변경	550	7.2	저속선 일시	영국 일본
		주철+주강재 (Clad 재)	마찰재+강도재 복합재료	200+580	7.2+7.8	신간선 (1988년이후)	일본
	강계	주강 (SC)	고강도 내열균열성	800	7.8	G7 대형자동차	한국 일본
		단강 (FS)	고강도 내열균열성	800	7.8	신간선 TGV KTX	일본 프랑스 한국
복합재료	비금속계	C/C 복합재료	경량 내열성	150	1.5	항공기 F1	유럽 일본
		세라믹	경량, 내열성	80	2.4	경주용 차량	독일
	금속계	Al 합금복합재	경량, 내마모성	250	2.9	상용화	유럽, 일본

Table 2 Chemical composition for brake discs[1]

재질	C	Si	Mn	P	S	Mg	Ni	Cr	Mo	V
회주철 (GC)	3.00 ~3.88	2.20	0.59	0.061	0.062	-	-	-	-	-
CV 흑연주철(FCCV)[1]	3.75	2.50	0.26	0.036	0.007	0.026	-	-	-	-
NCM 주철[2]	3.30 ~3.70	1.10 ~1.60	0.6 ~1.0	≤0.16	≤0.12	-	1.2 ~2.0	0.3 ~0.6	0.3 ~0.5	-
단강(FS)[3]	0.24 ~0.31	0.4 ~0.7	0.5 ~0.9	≤0.025	≤0.025	-	≤0.40	1.3 ~1.6	0.6 ~0.9	0.2 ~0.4
주강(SC)[4]	0.27 ~0.33	0.55 ~0.75	0.45 ~0.65	≤0.025	≤0.025	-	≤0.25	1.0 ~1.5	0.4 ~0.6	0.2 ~0.3
구상흑연주철 (GCD)[5]	3.25 ~3.55	2.0 ~2.3	0.5 ~0.7	≤0.2	≤0.1	-	≤0.2	0.45 ~0.65	0.40 ~0.65	-

국내 철도차량에 사용되는 디스크 재질에 대한 화학적 조성은 표 3과 같고, 기계적 성질은 표 4와 같다. 고속철도 디스크에는 단강이나, 주강이 사용되고 있다. 표 5는 KTX에 사용되는 단강 디스크와 한국형 고속열차 (G7)에 사용되는 주강 디스크의 기계적, 물리적 성질을 보여 준다.

Table 3. Mechanical properties of brake discs[1]

규격	재료	인장강도 (Kg/㎟)	경도 (MPa)	항절시험		연신율 (%)	CV화율 (%)
				최대하중(kg)	휨 (mm)		
철도공사 (고속대차용)	구상흑연 주철	50이상	192～262	–	–	5이상	–
철도공사 (고속대차용)	회주철	25이상	190～240	1000이상	5.0이상	–	–
서울지하철(1～4호선)	회주철	30이상	205～270	1100이상	5.5이상	–	–
BSI(독일)	회주철	25이상	190～240	–	–	–	–
CV(D.H.I)	CV흑연 주철	35～42	–	–	–	1～7	60%이상

Table 4. Mechanical and physical properties of brake discs[1]

디스크 재질	인장강도 (Kgf/㎟)	경도 (HB)	열전도도 (Cal/㎥℃s)
회주철 (GC)	20～25	160～240	0.112
Aus-GC [1]	35～40	300～330	0.112
CV 흑연주철 (FCCV)	30～40	180～250	0.100
NCM 주철	25～30	210～280	0.100
단강 (FS)	105～125	331～390	0.124
주강 (SC)	105～125	331～390	0.124

Table 5. Properties of brake disc for high speed train[1]

항 목	KTX (단강)	G7 (주강)
외형치수	∅640×45t	∅640×80t
탄성률 (N/㎟)	2.15×10^{11}	2.15×10^{11}
포와송비 ($_V$)	0.3	0.3
밀도(Kg/㎥)	7,850	7,850
열팽창계수 (mm/mmK)	12×10^{-6}	12×10^{-6}
열전도도 (W/mK)	45	45
비열비(J/KgK)	460	460
에너지분산율 (MJ)	22	15
중량 (Kg)	242	120
수량 (EA)	4 (11×4)	3 (15×3)

3. 디스크의 온도에 미치는 영향 인자

3.1 대류열전달을 무시한 경우

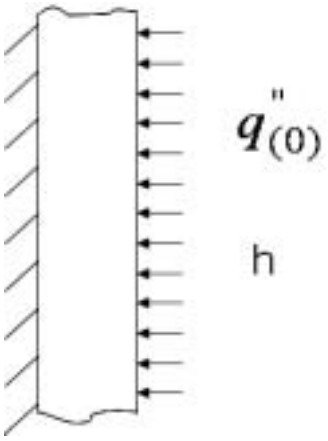

Fig. 2 Brake disc

그림 2와 같이 문제를 단순화하기 위해서 대류열전달을 무시하고, 일차원 열전달 문제를 고려할 때, 디스크 표면의 온도상승은 다음과 같이 주어진다[2].

$$\triangle T=\sqrt{\frac{5}{4}}\frac{q''_{(0)}}{k}\sqrt{at}\left(1-\frac{2}{3}\frac{t}{t_s}\right)=\sqrt{\frac{5}{4}}\,q''_{(0)}\sqrt{\frac{t}{\rho ck}}\left(1-\frac{2}{3}\frac{t}{t_s}\right) \quad (1)$$

여기서, $a=\frac{k}{\rho C}$, k는 열전도도, ρ는 밀도, C는 비열이다.

t_s는 제동 시작부터 멈출 때까지의 총 제동시간, $q''_{(0)}$는 제동 시작 시에($t=0$) 디스크의 단위면적당 유입되는 열유속이다. 식 (1)에서 디스크의 온도상승에 미치는 주요 인자는 k, ρ, c와 제동시간 t_s이다. 그런데 k, ρ, c는 결합되어 하나의 인자처럼 작용한다. $k\rho c$의 값이 클수록 온도의 상승이 작아짐을 알 수 있다. 그림 3은 k=60 (W/m℃), ρ=7,150 (Kg/㎥), c=460(J/Kg℃), $q''_{(0)}$=2×106 (J/㎡s), t_s=20 (s) 일 때 시간에 대한 디스크 표면에서의 온도 상승값이다. 그림에서 보는 바와 같이 온도는 제동 초기에 가파르게 상승하고 시간이 지나며 따라 완만하게 상승하고 있다.

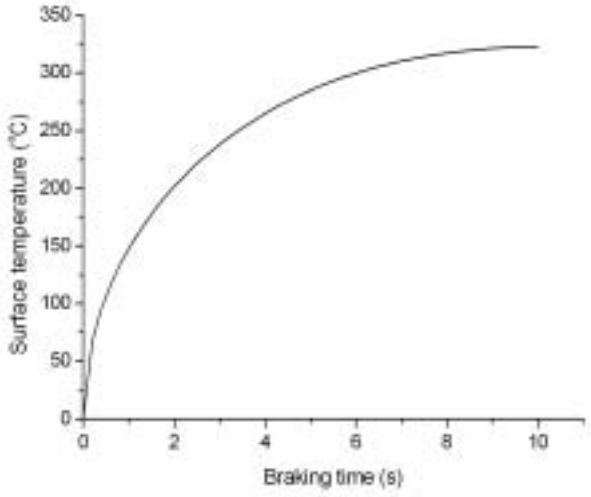

Fig. 3 Theoretical surface temperature

3.2 대류열전달을 고려한 경우 [2]

그림 4와 같이 디스크의 두께는 2L이고 길이는 무한히 크다고 가정하여 1차원 열전달 문제로 모델링 되었다. 디스크의 양쪽 면은 heat flux $\ddot{q}(0)$에 의해 가열되며 대류에 의해서 냉각되어진다. 대류 열전달계수는 h_R이다. 이와 같은 조건들 하에서 일정한 heat flux에 대한 해석적인 해를 구할 수 있다.

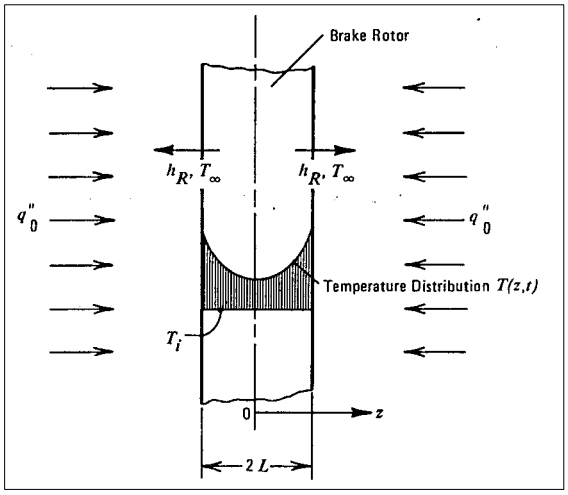

Fig. 4 브레이크 디스크의 물리적 시스템

일차원 문제에 대한 온도분포의 이론해는 다음과 같은 가정으로부터 구할 수 있다[2].

a) 온도는 마찰면에 수직인 좌표 z와 시간의 함수이다.

b) 열전달 계수 h_R은 일정하다.

c) heat flux는 마찰면과 수직한 방향이다.

d) 마찰되는 디스크와 드럼의 열특성은 일정하고 그 특성값은 평균 온도에서 구할 수 있다.

e) 주위온도 T_∞는 일정하다.

f) 복사열전달계수는 등가 열전달계수에 포함한다.

$$\Theta_0(z,t)=\frac{\bar{q}_0}{h_R}\left[2\left(\frac{\Theta_i h_R}{\bar{q}_0}-1\right)\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\sin(\lambda_n L)}{\lambda_n L+\sin(\lambda_n L)\cos(\lambda_n L)}\times e^{-a_t\lambda_n^2 t}\cos(\lambda_n z)+1\right] \quad (3)$$

여기서,

a_t= $k_R/(\rho_R c_R)$ thermal diffusivity, ㎡/h

h_R= convective heat transfer coefficient, Nm/hK㎡

L = one-half disc thickness, m

n = 1, 2, 3, …

$\bar{q}_0$ = average heat flux into disc, Nm/h㎡

T_i = initial temperature, K

$T_0(z,t)$ = transient temperature distribution in disc due to a constant heat flux

$T_\infty(z,t)$ ambient temperature

t = time, h

z = horizontal distance measured from center of disc, m

Θ_i = $T_i - T_a$ = initial temperature difference between brake and ambient, K

$\Theta_0(z,t)$ = $T_0(z,t) - T_\infty$, relative temperature of brake resulting from constant heat flux, K

$\lambda_n = n\pi/L$, 1/m

$\lambda_n L$의 값은 초월 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$(\lambda_n L)\tan(\lambda_n L) - h_R L/k = 0 \quad (4)$$

식 (3)에 의하면 디스크 표면온도의 상승은 대류열전달 계수에 반비례함을 알 수 있다.

4. 결론

브레이크 디스크의 열균열을 방지하기 위해서는 제동 마찰열에 의한 온도상승을 최대한 억제해야 하는데 온도의 상승은 k, ρ, c와 제동시간 t_s, 그리고 대류열전달계수 h에 의해 결정된다. 따라서 열균열을 억제하기 위해서는 이러한 파라미터의 값을 변화시키기는 것과 더불어 발생한 미소 균열이 진전하지 않도록 열균열 진전에 대한 저항이 큰 재료의 개발이 요구된다. 열균열 저항에 대한 파라미터는 파괴역학에서 다루는 파괴인성 등을 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 기본연구사업 중 '차량 성능향상 기술개발' 과제의 지원으로 이루어졌습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

2. 박훈규 외 (2005. 7), '제동시스템 실용기술 개발,' 철도기술연구개발사업, 건설교통부

3. R. Limpert (1992), 'Brake design and safety,'Society of Automotive Engineering, Inc.