150㎞/h급 비석면 스폰지형 철계 브레이크 라이닝 개발 연구

°최경진*, 이동형**, 고광범***, 권영필****

A study on the development of a Fe-based organic brake lining with sponge structure for rolling stock of 150㎞/h train

K.J. Choi, D.H. Lee, K.B. Ko, Y.P. Kwon

Key Words : disc brake lining(디스크 제동 라이닝), brake dynamo(제동 다이나모), field-test(실차시험), friction coefficient(마찰계수)

초 록

This study is to develop a Fe-based disc brake lining with sponge structure for rolling stock of 150㎞/h train and to concept design with 3 groove type for brake disc reducing hot hair-crack and certainly friction coefficient. The developing brake lining would be to presumption of saving 300 million won during one year

1. 서 론

철도차량에 있어서 제동의 역할은 승객과 화물의 안전한 수송과 비상시 열차를 안전하게 정지시키기 위한 것이다. 여기에 사용되는 제동방식은 제동라이닝을 제동디스크에 밀착시키거나 바퀴를 제륜자로 밀착시켜 열차를 멈추게 하는 방식으로 되어 있다. 제동라이닝의 종류는 주철, 수지형, 소결재 등이 있으며 우리나라는 주철과 수지형이 주로 사용되고 있다. 수지형의 경우 초기에 석면계가 사용되어오다 환경오염의 문제점 때문에 비석면계가 광범위하게 사용되고 있다.

제동라이닝은 소모부품이기 때문에 세계각국은 기술개발에 많은 투자를 하고 있으며 개발품에 대해서는 기술보호를 위해 원재료의 성분 공개를 꺼려하고 있는 실정이다. 석면을 대체한 비금속 마찰재로 초기에 개발된 재료가 스틸섬유 및 분말을 사용한 철계 마찰재(Fe-metallic)이다. 석면계에 비하여 내마모성이 우수하고 고주파 노이즈 등에서도 우수한 장점이 있으며, 내마모성이 우수한 이유는 석면보다 열적으로 안정된 흑연류, 무기질, 금속이 다량으로 배합되어 있기 때문이다. 우리나라 철도차량의 제동라이닝은 150㎞/h 최고속도로 증가할수록 마찰계수가 현저히 저하되어 제동력이 효과적으로 발휘되지 않고 있다. 고속역에서 직접적인 기계제동작용으로 발생되는 열용량에 대한 흡수력이 적기 때문에 상대재 디스크에 열크랙을 발생시켜 단기간에 교환하고 있으며 이는 보수비용의 증가원인이 되고 있다.

본 연구는 철계 마찰재의 장점을 최대한 살려 기존의 비석면 라이닝보다 내마모성이 높고 상대

---

* 한국철도기술연구원 차량연구본부 책임연구원

** 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원

*** (주)한국베랄 연구개발상무

**** 숭실대학교 교수

재인 디스크에 대한 공격성이 작고 경제성이 있는 철도차량용 비석면 스폰지형 철계 라이닝을 개발하는 것이 그 목적이다.

2. 브레이크 라이닝의 개념설계

2.1 국내외 관련 규격 및 마찰특성의 영향인자

외국의 대표적인 브레이크 마찰재 관련 규격은 UIC규격(Union Internationale des Chemins de Fer, UIC code 541-3, 4th edition, 93.7.1)이 있으며, 주요 특징으로 라이닝의 마찰면적이 200 ㎠(국내 사용품과 동일)의 세 종류가 있고, 사용최대 속도는 140 km/h(국내와 사용조건 비슷) 및 200 km/h 두 종류, 제동디스크의 크기는 ϕ640×110 mm, ϕ590×110 mm 두 종류, 환경조건은 건조상태와 습기상태를 시험하고 있다. 일본은 차량용 제동마찰재에 적용 규격으로 합성제륜자 JIS (Japanese Industrial Standard, E 4309, 95년)가 있다. 국내는 철도표준규격으로 비석면 디스크브레이크 라이닝(KRS 2242-2427, 95. 1. 24 제정)과 신형 디스크 브레이크 라이닝(KRS 242-2427, 95. 4. 1 제정)이 있으며, 신형은 객차용과 신형객차용(PP객차포함)으로 구분되어 있다.

2.2 현사용품 라이닝의 특성 및 개념설계

현용 라이닝의 문제점 조사분석 및 국내외 제동라이닝 규격을 비교분석한 결과 기존품은 Fig 1 과 같이 150㎞/h 속도대역에서 0.24~0.27 정도 마찰계수로서 저마찰력과 라이닝의 온도특성도 불안정한 것으로 나타났다.

새마을호급의 제동라이닝의 대상차량 제원은 Table 1 과 같으며, 이를 기본으로 제동압부력, 제동력, 비상제동거리를 계산하면 다음과 같다.

○ 비상제동거리

$$S = \frac{V}{3.6}t + \frac{4.17V^2}{\frac{Ft}{W} + R_L} = \pm\frac{768.3}{908.8}\ m$$

개발목표치로서 새마을호급 객차의 제동력에 의한 열차비상제동거리 1000m 이내를 충족하기 위하여 평균마찰계수는 0.35±10%로 하는 것이 타당하며, 내마모성, 마찰열의 분담을 고려하여 개발품을 개념설계하였고, 압축강도 5.5~7.5㎏/㎟, 기공율 11~12%, 밀도 3.10~3.25(g/cc), 경도 HRs 40~50 의 범위를 유지하도록 하였으며, 특히 마모량을 KRS 2종의 50~90×10^{-3}에서 40×10^{-3}이하로 하였다.

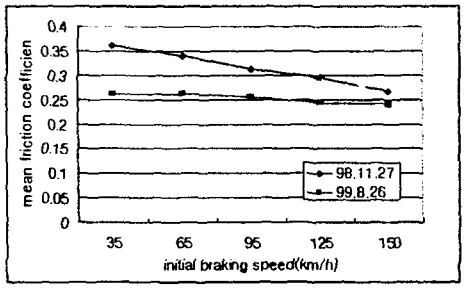

Fig. 1 Friction Cofficient of Old type

Table 1. Specification of Rolling Stock

Items	Spec.	Items	Spec.
W(ton)	Empty39 Load 43	η (%)	90
T(ratio)	4	μ	0.35±10%
BC d(cm)	25.4	t (sec)	1.81
BC N(개),	4	R_L(kg/Ton)	9.82
BC p(kg/㎠)	3.87	r(㎏/㎠),	0.34
DISC rd	48.2	rw(㎝),	76~86

3. 라이닝의 열해석 및 실물 다이나모 실험

3.1 열전달 및 열응력 해석(Transient)

열응력 해석을 위하여 우선 마찰열에 의한 라이닝의 열전달 해석의 결과와 정적상태의 응력 해석결과를 중첩하여 열응력 해석을 실시한다. 열응력 해석에 사용된 FEM 프로그램은 NISAII로 하였다고, 해석에 사용한 라이닝의 물성치는 Table 2 와 같다.

기존 모델인 홈(groove)이 2개인 형상과 홈이 3개인 형상을 모델링하였으며, 경계조건은 백스틸 부분(z=0)은 고정조건, heat flux 는 라이닝 마찰면, convection 초기조건은 라이닝의 측면과 홈 주위, 제동압부력 초기조건은 마찰력과 압부력을 마찰표면에 적용하였다.

Table 2. Property of Brake Lining

물성치	실험치		참고문헌	
	마찰재	보강재	마찰재	보강재
탄성계수(kg/m^2)	3.0×10^{7}	2.1×10^{10}	3.0×10^{7}	1.93×10^{10}
포와송비	0.25	0.30	0.2	0.30
밀도(kg/m^3)	3100	7800	2250	7800
선열팽창계수($\times10^{-6}$)	4.8	11.0	4.0	9.9
열전도계수(W/mK)	10.03	17.4	7.5	17.4
비열(J/kgK)	600	460	1200	460
항복강도(kg/mm^2)	7.0	22.4	6.9	27.9

1) 열전달 해석

라이닝의 열전달해석은 150km/h에서 제동시간 40초의 경우에 대하여 시간변화에 따른 해석을 실시하여 Fig. 2, 3과 같이 최대온도는 홈이 2개일 경우 173℃, 홈이 3개일 경우 149℃로서 홈이 3개일 경우에서 마찰면 온도가 24℃ 정도 낮게 나타나 홈 개수에 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4. 5은 라이닝의 정응력 해석결과로서 스틸보강재(back plate)와 마찰재의 접합부위에서 응력이 가장 큰 것으로 나타나 이 부분이 가장 취약할 것으로 예상된다.

2) 열응력 해석

열응력 해석결과는 Fig 6, 7과 같이 마찰면 홈이 2개일 경우 von mises 최대응력이 5.98 kg/㎟, 홈이 3개일 경우는 5.53 kg/㎟ 이 작용하여 마찰면 홈이 3개일 경우가 2개와 비교하여 약간 낮은 응력 상태를 나타낸다. 최대응력이 작용되는 부분은 마찰면 홈에서 발생되며, 라이닝의 마찰재료의 항복강도가 7.0 kg/㎟ 으로서 해석적인 열응력은 허용범위 이내이므로 안전한 것으로 판단된다.

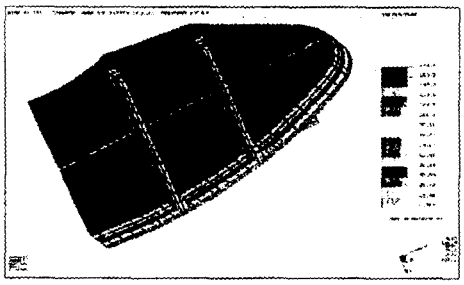

Fig. 2 Groove 2ea(150km/h, t=40s)

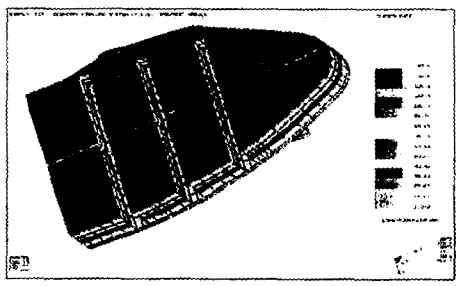

Fig. 3. Groove 3ea(150km/h, t=40s)

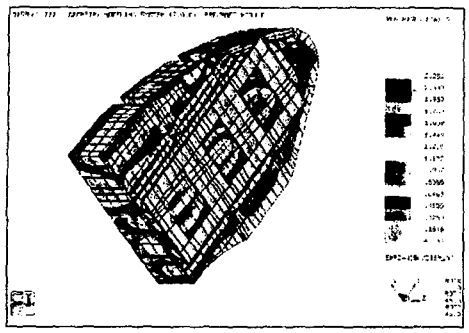

Fig. 4. Stress of Groove 2ea

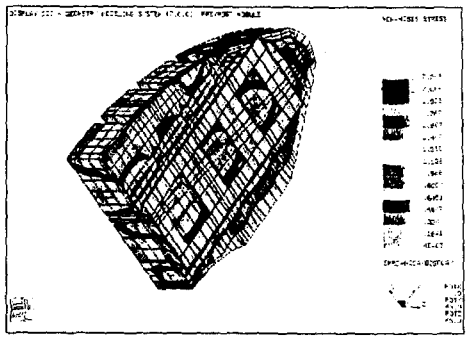

Fig. 5. Stress of Groove 3ea

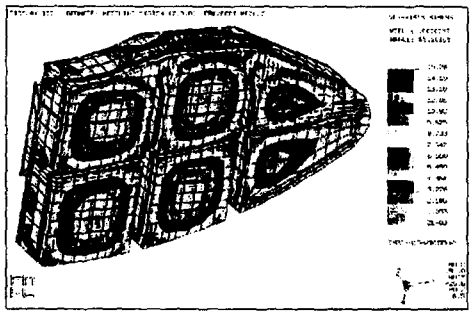

Fig. 6. Thermal Stress of Groove 2ea

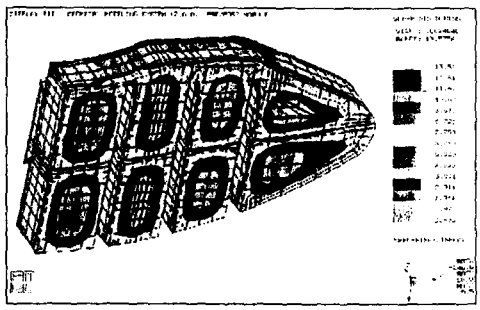

Fig. 7. Thermal Stress of Groove 3ea

3.2 실물 다이나모 실험 결과

실험 조건은 실물 브레이크 라이닝을 마찰면 접촉을 위한 90% 이상의 연마(bedding) 후 시험하였으며, 실험장치의 전경은 Photo 1과 같다.

실험의 상대재는 12공 제동디스크(주철제)를 사용하였으며, 제동압부력 1.6 t × 2 제동디스크 시험 초기온도 60℃ 이하, 시험속도 및 회수 35, 65, 95, 125, 150 km/h 조합 20stop 씩 3회를 평균하여 정리하였다. Fig. 8, 9는 철계 개발품의 실험결과이며, 개발품1# 은 마찰면 홈이 2개인 기존형상으로 제작되었으고, 마찰면과 온도특성은 양호하였으나, 평균마찰계수가 150㎞/h에서 약간 하한치를 벗어나는 것으로 나타났다.

개발품 2# 는 마찰면 홈이 3개인 형상으로 디스크의 온도에 비해 라이닝의 온도를 약 10℃ 정도 낮추는 것으로 나타나므로 상대적으로 디스크에 열영향을 감소시키는 것으로 판단되었고, 0.35 ±10%의 수준을 유지하였다.

Photo 1. Full scale Brake Dynamometer

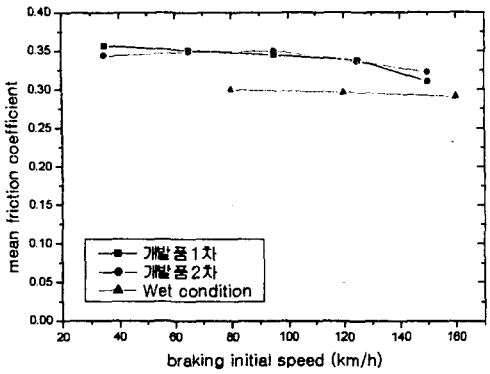

Fig. 8 Friction Coefficient of New Lining

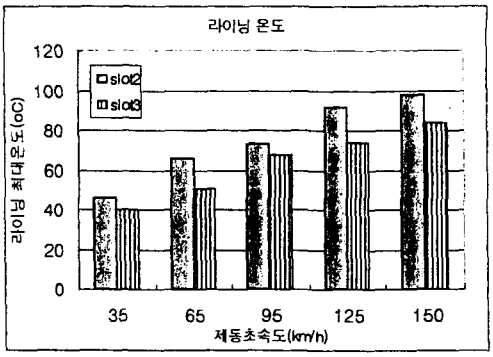

Fig. 9 Temperature of New Lining

4. 실차시험 및 사용기간에 따른 경제성

4.1 실차 시험

실차시험은 새마을호 객차 397호에 대차별로 시험품과 기존품을 각 8조씩 새로 교환후 일정기간마다 마모량을 실측하였으며, Photo 2 는 시험품을 설치한 장면이다.

철계 시험품으로 2회의 걸쳐 실차시험을 실시하였으며, Table 3 및 Fig. 10 은 주행기간별 대비 라이닝의 두께감소 마모량을 측정한 결과이다.

2-1# 개발품은 내마모성이 목표치에 미달하였고 비교품에 비하여 약 1.6배 마모가 빠르고 교환주기는 2.4개월 정도로 예측되었으며, 다만, 제동디스크의 마찰 표면은 양호하였다.

개발품 2-2# 는 약 7개월 이상의 사용수명이 예측되어 개발목표를 만족하였고, 제동디스크의 마찰면은 매우 깨끗하여 선명한 마찰상태를 유지하여 상대재 디스크의 열균열 발생이 없는 것으로 나타났다.

비교품은 비슷한 마모주기를 나타나고 있으나 다이나모 제동시험결과 평균마찰계수가 0.24~0.26 의 범위에 있어 저마찰계수를 유지하고 있으며, 상대 제동디스크의 표면에 흑화현상이 심하여 마찰열의 영향이 큰 것으로 분석되었다.

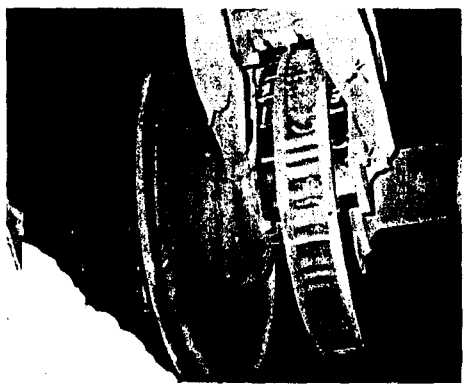

Photo 2. Test of New Lining

Table 3. Wear Result of New Lining on the car

Thick. \ Times		1st	2nd	3rd	Wear (mm)	Life (months)	days
No 2-1	Proto-Lining	35.1	28.5	17.4	17.70	2.4	2nd-17 3rd-52
	Old-Lining	35.3	33.2	28.5	6.80	6.3	
No 2-2	New-Lining	35.1	31.9	29.5	5.60	7.0	2nd-26 3rd-47

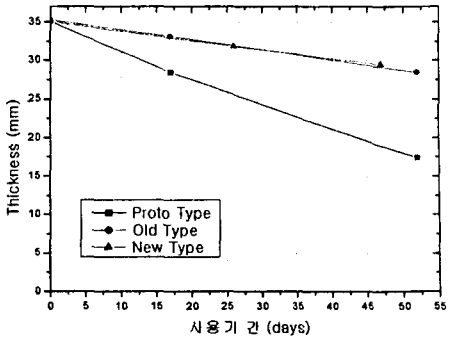

Fig. 10 Wear rate of lining in field test

4.2 사용수명에 의한 경제성

기존품의 제동라이닝의 사용수명에 의한 교환 주기는 평균 3~5개월, 브레이크 디스크의 교환 주기는 평균 3~4년으로 조사되어 있는 데 디스크 대부분의 교환은 마모한도보다 마찰면 열균열에 의한 교체로서 1996~1997년의 2년동안 새마을호 객차 171량(3공식, 8조)의 1,368조중 661조를 교체하여 열균열로 인한 평균교환량은 24.1%가 교체되고 있다. 특히, 열크랙 발생에 따른 2~3년 사이의 교환이 많고, 평균수명인 3~4년 이내에 교체되는 비율이 약 70%에 달하는 것으로 정상 마모수명이라고 할 수 있는 5~6년에는 크게 미달하고 있는 것으로 분석되고 있다. Table 4 는 3공 제동디스크의 사용기간별 교환율을 조사한 결과이다.

마찰마모재인 객차용 브레이크 디스크/라이닝에 있어서 99년말 총보유 객차는 1,546량으로서 향후 평균 교환주기를 기존품 3.5개월, 개발품 5개월, 실소요량은 60%로 하여 소요량에서 절감수량은 약 21,000조로 예상되고 있으나 단계적인 교환수량을 7,400조로 추정하여 산출한 절감예산은 약 1억 5천만원으로 분석되었다.

제동디스크의 사용수명연장에 대하여 98년 기준으로 보면 약 288조의 절감수량이 예상되므로 이는 직접구입비 1억원의 절감으로 나타나고, 마찰재료의 총구입비로 약 2.5억원의 예산절감이 추정되고 유지보수의 인적비용을 고려하면 약 3억원의 예산절감이 가능할 것으로 분석된다.

Table 4. Change rate of 3hole Brake Disk

Disk Type	2~3 years	3~4 years	4~5 years	A total	Remark
110mm, 3hole	205	751	412	1,368	'95.3~'97.3, Seoul Shop 2years, 171cars Semaeulho-car
%	15.0	54.9	30.1	100	

Table 5. purchase rates of disc/lining per year

Brake Type		'98	'99	Ave.	'99 Cost (1,000won)
Brake Disc	140mm, 12hole	550	740	645	576,232
	110mm, 12hole	230	720	475	
	110mm, 3hole	500	230	365	
Brake Linning	New Type	17,000	21,000	19,000	532,500
	Old Type	3,500	4,000	3,750	

Table 6 cost reduction of changing brake lining

Items / Type	Price (won)	Change Rate (%)	No. to buy (sets)	Cost to buy (1,000won)	Remarks
old-type	20,900	60	23,038	504,532	Cost of '95 year
reformat. -type	23,400	40			
Fe	22,500	100	15,627	351,608	Predic.
cost -redused			152,924	152,924	

3. 결 론

제동성능을 좌우하는 평균마찰계수는 0.35±10% 범위에서 안정적인 품질을 유지하면서, 마모량 35~65 $\times 10^{-3} mm$ 범위로 하였고 특히 열적인 영향을 최소화하여 품질기준(안) 제안하였다.

열해석 결과 마찰면 홈을 2개에서 3개인 경우가 20℃정도 마찰온도를 낮추는 효과가 있으며, von mises 최대응력이 3개일 경우 5.53 kg/㎟ 으로서 라이닝의 마찰재 부분 항복강도의 허용범위 이내이므로 열응력에 의한 구조적 한계를 고려하면 수평방향의 홈을 2개에서 3개로 하는 것이 최적형상으로 제안되었다.

시험결과에서 개발품중 마찰면 홈이 3개인 최적으로서 사용수명이 약 6개월 이상으로 예측되고, 비교품의 평균마찰계수 0.22~0.26 보다 매우 안정적인 0.35±10% 의 마찰특성이 유지되며, 마찰면의 상태가 선명하여 양호함을 확인하였다. 습윤시의 평균마찰계수의 범위도15% 이내로 우천과 설해시 제동력 저하를 방지할 수 있다.

개발품의 철계 라이닝은 년간 약 3억원의 예산 절감이 가능한 것으로 분석되었다.

후기

본연구는 철도청 및 공공이사회의 연구비 지원으로 수행되었으며 관계자에게 감사드린다.

참고문헌

1) Gray, V.K., Dynamics of railway vehicle systems, Toronto, ACADEM PRESS, 1984, p103~105,

2) M Fermer, Brake discs for passenger trains-a theoretical and experimental comparison of temperatures and stresses on solid and ventilated discs, I Mech E, pp. 37-46, 1992

3) P.R.J.HARDING, Flexural effects in disc brake pads, pp. 1-7, 1978

4) A J Day, The dissipation of frictional energy from the interface of an annular disc brake, I Mech E, pp. 201-209, 1984

5) わだゆういち, ブレーキライニング, ブレーキディスクの開發, R&M, pp. 14, 1996

6). 鐵道車輛用金屬系摩擦ブレーキ材料に關する硏究(その3), RTRI REPORT Vol. 5. No.7, 1991

7) 紺野常雄, ブレーキクラツチ用ノンアスベスト材の開發動向, トライボロジスト, 제 38권, 제5호, pp. 445-450, 1993,

8) 최경진, 구병춘, 권석진외, 열차 제동거리 기준치 설정에 관한 연구, 1997.12

9) 최경진, 권석진외, 철도차량의 제동성능 향상에 관한 연구(별책부록), 1996.8

10) 함영삼외, 차량분야 주요부품의 적정사용년수 기준작성 연구, pp306-307, 1997.12)