

답면 브레이크 슈의 마찰계수와 제동성능향상을 위한 평가기술

Evaluation Technology for the Improvement of Brake Performance and Friction Coefficient of Tread Brake Shoe

°최경진* 이동형** 이희성*** 송문석**** 신유정*****
Choi, Kyung-Jin Lee, Dong-Hyung Lee, hisung Song, Mun-Suk Shin You-Jung

ABSTRACT

In tread braking of freight cars, braking force is produced by the friction between the wheel and the braking shoe. Friction coefficients such as the brake power, weight variation and brake shoe types should be sensitively treated as the design parameters. The conditions of the car, empty and weighted, should also be taken into consideration in brake force design and the control of brake force has some limitations in terms of the brake system design so that the brake materials selection should be considered as important measures to solve that difficulties. Friction characteristics of brake materials should remain within the range of maximum and minimum value and the friction performance should remain stable regardless of braking time and temperature.

This study presented an experimental evaluation method to secure optimum braking performance by keeping safe braking effect and braking distance by the friction coefficient of the brake shoe of the freight cars.

1. 서론

철도는 화물을 안전하게 대량 운반할 수 있는 수송의 강점을 가진다. 교통수단으로서 타교통보다 안전성은 높지만 한편으로 화차는 제동제어 기술이 매우 중요하며, 제동제어의 역할은 수송중에 비상 상황이 발생하면 열차를 안전하게 정지시키기 위한 것이다. 제동방식은 브레이크 슈를 바퀴의 답면에 밀착시키는 답면제동제어로 운동에너지 $E=1/2MV^2$ 을 열에너지로 바꾸어 열차를 멈추게 하고 있다.

화차는 공기지령제어에 의한 답면 제동(tread brake) 방식이며, 제동관(brake pipe)의 공기압력을 이용하여 제어밸브(control valve)를 통해 압부력(brake power)이 형성되고, 바퀴의 원주를 편압, 양압으로 밀착하여 마찰력을 주게 된다. 편압을 가하면 윤축의 운동이 불안정하므로 제동 압부력을 높이는 데 한계가 있고, 양압의 경우에도 바퀴와 레일의 점착력보다 작아야 하므로 제동력은 제한적이다.

화차용 브레이크 슈의 종류는 주철, 수지, 소결체 등이 있으나 최근 수지계가 증가하는 추세에 있으므로 수지계의 마찰특성과 제동에 미치는 영향에 대하여 성능시험 평가기술을 확보할 필요가 있다. 수지는 석면계에서 비석면계로 기술개발 후 금속섬유나 금속분말을 배합한 합성계가 개발되고 있다. 합성계는 내마모성이 좋고 노이즈에도 우수하며 흑연류, 무기질, 윤활제 및 금속을 다양하게 배합하므로서 마찰성능을 높일 수 있는 특징이 있다.

답면 마찰제동은 브레이크 슈를 밀착하므로 최적 제동력은 점착력의 변수인 차량증량에 의해 적용 범위가 달라지고, 공기 제어압력, 제동통 크기, 압부력 전달 기구인 기초제동장치, 레바비 등에 의한 압부력 변화가 제동력에 영향을 미치며, 재료 특성과 압부력에 대응하는 마찰, 제동초속도에 의한 마찰계수 변화, 제동열 발생 및 냉각 구조와 수명평가에 의한 경제성 등 종합 평가연구가 필요하다.

* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
*** 서울산업대 철도전문대학원, 교수, 정회원
**** 한국철도대학 교수, 비회원
***** 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

본 연구는 화차 답면용 브레이크 슈의 마찰계수가 제동 효과로서 제동거리에 미치는 영향인자를 분석하고, 마찰재료의 제반시험 및 평가 방법을 개발하여 제동 성능을 향상하기 위한 방안을 도출하는데 그 목적이 있다.

2. 화차 제동의 영향 인자 고찰

2.1 화차의 제동 및 변수

현재 화물 수송차량은 90km/h로 상업 운행하는 차량이 있으며, 설계속도 120km/h로 개발되어 속도 향상에 대응하는 화차가 있으나, 견인력과 제동력에 있어 차량성능을 높이기 위한 기술개발의 선행조건으로 해결되어야 한다. 화물 수송 차량에서 제동성능을 향상하기 위하여 고려해야 할 제동성능은 화물 중량이 0~500kN의 변화로 매우 크므로 열차 비상제동거리를 목표 기준으로 제동력과 점착력을 비교 검토해야 한다. 또한, 바퀴 답면에 직접 제동하므로 마찰열 발생을 감소하기 위한 재료특성과 구조를 마찰열 발생을 최소화하는 성능시험 평가기술 및 유지보수 비용의 개선 방안을 필요로 한다.

표 1은 화차의 제동성능 제원은 나타내며 압부력에 영향을 미치는 인자로 대차 레바비, 제동통 직경과 수량 및 공기압력(변동제어), 공주시간이 있으며, 주행저항도 작지만 영향인자에 속한다. 평균마찰계수는 철도 표준규격을 나타내었으며, 차량의 제작사양에서 평균마찰계수 0.13이상을 요구하면 표준규격과 불일치는 결과가 예상된다. 브레이크 슈의 종류별 특징을 보면, 주철계는 광범위하게 사용되고 있으나 제동시 마찰 불꽃에 의한 선로 연변의 화재 발생의 우려가 있어 사용이 줄어드는 경향이다. 주철계의 순간 마찰계수 특성은 그림 1과 같이 마찰계수가 높지 않고 정지직전에 급격히 높아지므로 정지직전에 과제동의 슬립에 의한 답면 손상의 우려가 많다. 레진계는 제동초속도 90km/h 이하의 유조차, 위험물 수송용 일부 화차에 마찰 불꽃 방지용으로 활용되고 있으나 열적 영향의 문제가 있으며, 합성계는 고속 화차용으로 제동 초속도 110km/h의 마찰성능으로 설계되었으나 제동성능의 검토가 필요하다. 마찰면의 접촉면적을 보면 주철이 가장 크고, 레진 경우는 중앙에 홈이 있어 가장 작게 나타나고 있다.

브레이크 슈의 압부력은 식(1), 제동력은 식(2), 비상제동거리는 식(3)에 표 1의 인자를 적용하여 계산하였다.

$$Pt = \left[\frac{\pi \times d^2}{4} \cdot (p-r) - r2 - r3 \right] \times N \times L \times \eta \times 2 \quad (1)$$

$$F_t = \mu \times P_t \quad (2)$$

$$S = S_1 + S_2 = \frac{V}{3.6} t + \frac{4.17V^2}{F_t/W + R_L} \quad (3)$$

여기서, P_t 는 슈 압부력, F_t 는 제동력, μ 는 평균마찰계수, S 는 열차 비상제동거리를 나타낸다. 열차 비상제동거리의 계산 결과를 속도별로 나타내면 표 2 및 그림 3과 같다. 제동초속도 120km/h에서 900m 이내이지만 제동초속도 110km

표 1. 화물 차량의 제동성능 제원

Parameters	Spec.	Parameters	Spec.
W(ton)	19~72	μ	0.11±0.02
L(ratio)	4/1.921	t(sec)	2.5~3.5
BC d(cm)	35.56	R_L (kg/Ton)	9.82
N(ea)	2	r(kg/cm ²)	0.35
p(kg/cm ²)	1.6~3.87	r2(kgf)	204×2

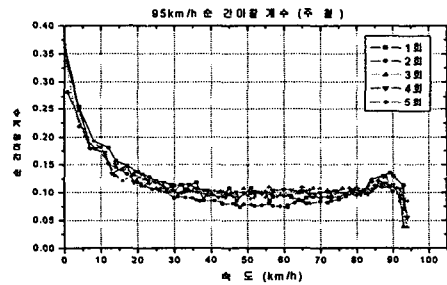


그림 1. 주철 마찰계의 순간마찰계수

표 2. 주철계의 비상제동거리 계산(DL 1 + FC 9)

Velocity (km/h)	AFC (KRS)	K2 type		P4a type		Remarks
		EC	WC	EC	WC	
70	0.2142	186	254	203	215	EC(empty car)t WC(weight car)t
90	0.1768	344	479	365	386	
110	0.1393	613	865	639	674	

/h에서 600m에 만족하지 못하고 있다.

압부력을 향상하는 방안은 표 1에서 제동통의 공기 압력 및 제동통의 단면적을 크게하여 제동 원력을 높이거나 기초제동 레바비를 높게 하는 방법이 있는데 시스템 구조를 개량해야 하므로 공간적 제약과 구조변경 비용면에서 불리하고 기술력과 작업기간이 소요되는 단점이 있다.

평균 마찰계수는 제동 초속도 120km/h에서 0.13이상을 적용하기 위한 적정 마찰계수는 제동 초속도 110km/h에서 0.150로 계산된다. 슈의 마찰력을 높이는 방안이 가능하며 기초제동의 구조개량보다 마찰계수를 높이는 방안이 용이하다고 볼수 있다.

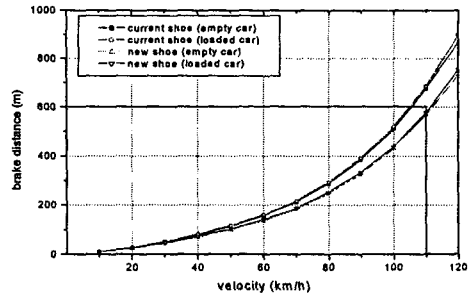


그림 2. 화차의 비상제동거리 계산 결과

2.2 점착력에 의한 제동력 설계 검토

제동거리의 목표 수준에서도 제동력은 차륜의 점착력의 범위에 있어야 하므로 제동 초속도 110km/h에서 비상제동거리 600m 이내를 충족하기 위하여 최대 점착력과 제동력의 최대 및 최소값을 구하였으며 그 결과는 그림 3과 같다. 브레이크 슈의 필요 평균 마찰계수는 110km/h에서 $\mu=0.155$ 이다.

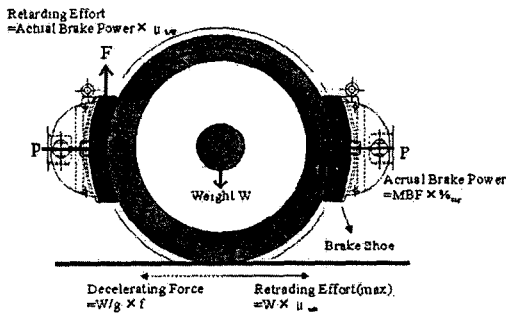


그림 3. 점착력과 제동력의 관계

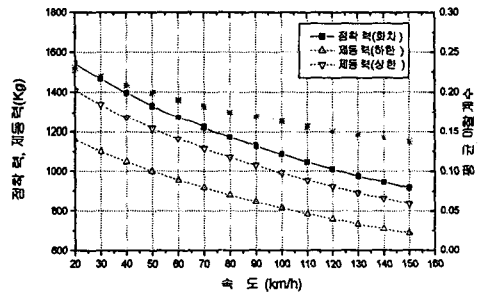


그림 4. 제동력과 점착력 및 평균마찰계수

2.3 브레이크 슈의 제동특성 분석

1) 표준규격과 마찰계수의 특성은 표 3과 같으며, 레진과 합성계의 차이점은 평균마찰계수는 제동 초속도 110km/h(레진계 미적용)에서 0.09~0.13을 적용하였고, 마모량은 0.120mm이하에서 0.040mm이하로 1/3 수준으로 감소되었다. 표 4는 국내의 마찰계수를 비교한 내용이다.

표 3. 화차용 수지계 브레이크 슈의 규격과 주요항목 비교(KRS)

항 목	레진계	합성계
표준규격	KRS2242-2059(1종)	KRS2240-2489(00. 9)
제동초속도	35,65,95(km/h), 각각 5회	35,65,95,110(km/h), 각각 5회
평균마찰계수	평균 0.12±0.02(95km/h)	평균 0.12±0.02(95km/h) 0.11±0.02(110km/h)
열반점 온도	10회 제동체결, 475℃이하	10회 제동체결, 475℃이하
압축강도	500kg/cm ² 이상	60N/mm ² (MPa) 이상
충격강도	2.0kg/cm ² 이상	3.0kg/cm ² 이상
마모량	0.120mm이하	0.040mm이하

표 4. 국내의 화차용 브레이크 슈 및 제동력 검토

AFC(fm, v=120)							Force	
KNR		UIC		AAR	JIS		(kgf/wheel)	
설계(주철)	레진(95)	합성(110)	합성 2.06t<	합성 Jurid	합성	(v=95이하)	(v=95초과)	empty/weight
0.130	0.10~0.14	0.09~0.13	0.185	0.20~0.26	0.24~0.3	0.06~0.09	0.18~0.30	1,941.0/5,530.2

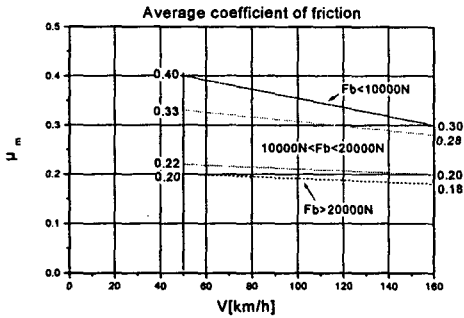


그림 5. 평균 마찰계수(UIC)

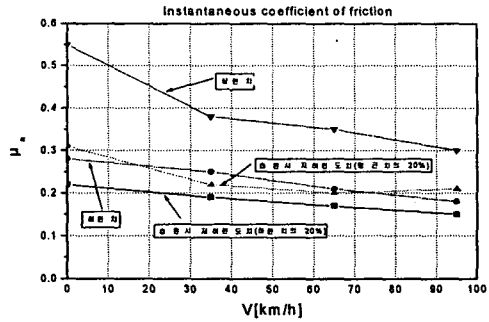


그림 6. 순간 마찰계수(JIS)

그림 5는 UIC의 평균 마찰계수 기준이고 압부력에 따라 적용범위를 정하고 있으며, 그림 6은 JIS의 순간 마찰계수 기준을 나타내고 있으며 습윤 시에 20%를 낮게 기준을 정하고 있다.

2) 제동 마찰의 열영향과 온도 기준은 합성계에 대하여 제동초속도 125km/h의 마찰온도를 적외선 카메라로 측정결과는 중앙부가 최고 585.4℃(제동후 15초후, 평균온도: 172.6℃)까지 발생하며 마찰 주위온도이므로 변화가 있지만 순간적 주위온도는 높음을 알 수 있다. 온도 측정의 방법에도 다양한 접근 평가기술이 필요하며, 국내의 규격의 바퀴 온도 기준은 300~475℃이하고 바퀴 담면에서 5~10mm의 깊이에서 측정하는 방법을 채용하고 있다.

제동 시 발생하는 주철체의 불꽃 영향도에 대한 불꽃시험(spark test)은 AAR Spec. M-926에서 적용하고 있다. 불꽃시험의 기준은 차륜과 간격은 16cm에서 불꽃 감지판(광목천)에 불꽃이 닿지 않아야 하고, 이때의 시험조건은 제동시험 45분간을 주기로 35km/h의 일정 속도와 제동 하중을 가해 바퀴 온도, 슈의 마모, 압부력 등을 측정하며, 공기의 유동속도는 16~24km/h로 한다.

3) 마모량 시험은 평균 마찰계수 시험전후의 브레이크 슈 중량을 측정(측정정도 50mg)하여 속도 대역별로 5회 제동 횟수를 마친 후에 마찰면의 마모 두께로서 $40 \sim 120 \times 10^{-3} \text{mm}$ 를 기준으로 하고 있다.

4) 경도 시험은 로크웰 경도시험기로 R스케일을 사용하며 기록은 "R"을 침자로 붙여서 숫자를 기록한다.(HR_R80) 시편 표면은 평면으로 한다. 압입볼은 12.70mm를 사용한다.

5) 재료 강도 시험에서 충격강도 시험은 KS M 3056의 샤르피 충격 시험 방법에 의하며 시험편은 성형가압의 방향이 두께의 방향이 되도록 한다.

브레이크 슈의 파열강도는 휨 강도처럼 3곳에 하중을 가해 시편이 외관상 파괴될 때 측정하며 만능 시험기로 파열 지그와 50.8mm 지그를 사용하며, 시편의 크기는 12×15×80mm로서 실물 브레이크 슈에서 채취하고, 시험방법은 하중범위를 설정후 시편이 파열될 때까지 하중을 가한다. 파열 강도의 계산은 $w/bd \times 777$ 로 값을 구하며 w는 하중(Newton), b는 가로(mm), d는 세로(mm)를 나타낸다.

압축강도는 브레이크 슈의 파괴력을 측정하기 위해 A.S.T.M D695를 준용하며 만능시험기로 압축 지그를 사용한다. 시험편으로 12.7×12.7×25.4mm, ±0.5mm 또는 직경 12.7×25.4mm, ±0.5mm를 사용한다. 모서리는 0.025mm 이내로 가공하고 이방성[異方性]이 안되도록 한다. 시험 방법으로 시편의 횡단면 최소값, 시편길이를 측정후 시험한다. 하중범위에서 15~45초 이내에 분쇄되도록 하중을 증가시킨다. 압축강도는 P/A를 구하며 P는 파괴하중 A는 횡단면의 최소길이를 나타낸다.

박리강도(pull-off strength)는 UIC 541-4에 의해 브레이크 슈의 마찰재와 지지철판의 접착강도를

파악하기 위하여 시험한다. 실물 시제품을 사용하여 하부의 고정 지그에 수직으로 장착후 상단의 압축 지그에서 하중을 가하도록 한다. 지지철판이 브레이크 슈로부터 박리될때까지 하중을 증가시키고 최대하중을 측정한다.

3. 브레이크 슈 시험평가

3.1 실물 제동 실험

1) 실험의 조건 및 실험장치

실험 조건은 실물 브레이크 라이닝을 마찰면 유효 접촉을 위한 90% 이상의 연마(bedding) 후 시험해야 하며, 슈의 기본 형상에 의하여 접촉면적을 측정한다. 상대 차륜은 화차용 탄소강 주강이고, 압부력은 3.0t 양압식 차륜의 초기시험온도는 60℃ 이하, 시험속도 및 회수는 35, 65, 95, 125km/h를 조합 5회로 평균하여 정리한다. 관성모멘트는 식 $I = M \cdot r^2$ 에 의해 만차 조건은 $170 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ 으로 한다. I는 관성 모멘트 상당량 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$), M은 화차 빈차, 만차 중량에서 차륜당 제동 중량(kg), r은 바퀴 반경(m)을 나타낸다.

실물 시험기의 평균마찰계수는 평균 감속도로부터 식 $f_m = 0.028 \cdot (W_M / APB\eta) \cdot \beta_m$ 로 산출하며 f_m 는 평균 마찰계수, W_m 는 관성 중량(kg), A는 제동통 유효 면적(cm^2), B는 제동배율, P는 제동통 공기압력(kg/cm^2), η 는 제동효율, β_m 는 평균 감속도(km/H/S)를 나타낸다.

슈의 마모량은 속도대역별 시험전후의 슈의 중량을 측정 후에 식 $\delta = \Delta W / (s \cdot \rho)$ 에서 구하고 δ 는 마모량 ($\times 10^{-3} \text{mm}$), s는 접촉면적(cm^2), ΔW 는 시험 전후의 중량차(g), ρ 는 슈의 밀도(g/mm^3)이다.

2) 마찰계수

그림. 7은 브레이크 슈의 실물 제동시험기에서 평균 마찰계수를 시험 평가한 결과이며, 초기 시험품(202, 203A)은 저속, 고속에서 목표 범위값보다 낮거나 높은 결과이지만 안정화 후(303A)에는 저속 35km/h에서는 목표에 만족하고, 고속에서 약간 높은 경향이다. 습윤 시의 경우 약 15%정도 낮아지고 있다. 그림 8은 순간 마찰계수의 시험평가 결과이며, 시험품(303A)의 전속도에서 순간 마찰계수의 변화는 크지 않고 안정적인 결과를 나타내고있다.

3.2 재료 특성시험 평가 및 기준

표 5는 재료 특성시험 평가 결과이며, 목표 기준에 잘 일치하고 있으며 마찰계수 및 사용수명을 고려하여 적용범위를 보완하는 접근이 필요하다. 그림 9는 박리강도 시험을 보여준다.

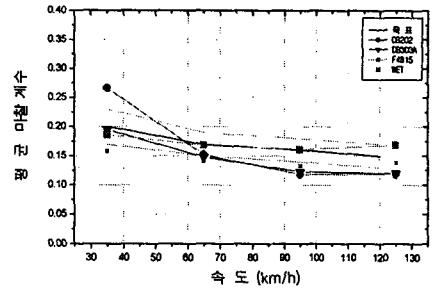


그림 7. 평균마찰계수 시험평가

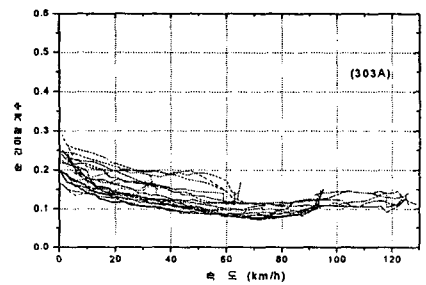


그림 8. 순간마찰계수 시험평가



그림 9. 박리강도 시험

표 5. 마찰 슈의 재료특성 시험 평가

Test Parameter	Tarket spec.	4815C
Specific gravity	1.75-2.00	1.81
Hardness Rockwell(HR _R)	75-100	82,85,87,95
Cross break strength(N/cm ²)	1500≤	2130/2340
Crushing strength(N/cm ²)	2500≤	3780/3640
Modulus of elasticity(N/cm ²)	8500≤	87590/88230
B/P Pull off(N/)	13000≤	17860

3.3. 제동성능 향상을 위한 평가 항목 및 기준

화물 차량의 제동성능을 향상하기 위한 성능시험 주요 항목과 평가 기준에 대하여 실험 및 관련 자료를 통하여 표6과 같이 정리하였다.

표 6. 성능향상을 고려한 브레이크슈 주요 시험평가 항목 및 기준

주요 평가 항목	기준	관련 자료
비상제동거리(110Km/h)	600m 이하	설계계산서(V=120Km/h, 900m)
마찰계수(평균) (V=120Km/h)	0.200±0.03(35km/h) 0.165±0.02(95km/h) 0.150±0.02(120km/h)	KRS 2240-2489(0.11±0.02, V=120) 설계계산서 관성모멘트 계산(170 kg·m·s ²)
마모량 (×10 ⁻³ mm)	40이하 [각 속도별 5회]	3개월 이상 목표(JIS 및 KRS-레진 0.14mm) 기존 3배이상(레진 120 이하, 15~25일 사용)
브레이크 슈/차륜 최고온도(10회)	차륜 375℃이하 (슈온도 150℃) [차륜담면 10mm 이내] [브레이크 슈 표면 5~10mm]	KRS 2240-2489(475℃ 이하) UIC 541-4(375℃ 이하), AAR (310℃ 이하) JIS 차륜-300℃ 이하(표면10mm) JIS 슈-300℃ 이하(표면5~10mm)
차륜담면상태	열크랙 없을 것	KRS, UIC 541-4
중량(kg)	4~6	경량화 8~10kg
찰상방지	제동력<접착력	속도별(주철제 정지직전 발생 방지)

4. 결론

화물 수송의 안전을 확보하기 위하여 제동 성능의 향상은 핵심적으로 제동력에 영향을 미치는 압부력과 마찰계수를 효과적으로 제어할 수 있어야 한다. 현재 제동 초속도 90km/h에서 비상제동거리는 600m이내로 운용하고 있으나, 속도향상 시에는 제동거리가 연장되므로 브레이크 슈를 저마찰, 고마찰로 등급을 정하고, 속도향상 시 제동제어는 고마찰을 적용하도록 개발할 필요가 있다.

고마찰 슈의 적용 방안은 비용절감 효과가 클 것으로 보이며, 마찰계수를 높이면 일반차량은 압부력을 낮추는 여유를 가질 수 있다. 따라서, 제동초속도 110km/h에서 비상제동거리 600m이내로 유지하기 위하여 점착력 범위안에서 제동력 기준값을 분석하고 평균마찰계수를 0.155±10%로 하는 방안을 제시하였다.

실물제동의 실험조건과 만차 조건에 대응하기 위한 최대 관성 모멘트인 170 kgms²로 하고, 평균마찰과 순간마찰 계수의 범위를 평가기준으로 검토하였다. 마찰특성의 신뢰성을 위하여 경도와 마찰제박리강도, 파열강도 등 시험방법을 제시하였다. 제동시험 시 바퀴의 온도 평가기준은 375℃이하로 하는 것이 차륜의 열크랙 방지에 유용할 것으로 보인다.

화물 차량의 제동제어는 공기지령 제어방식이므로 열차의 길이에 의한 제어밸브의 응답속도가 후부차량에서 빠르게 할 필요가 있다. 압부력을 높이기 위해 공기제어 압력을 6kg/cm²를 높이는 방안도 고려해볼 수 있으나, 향후 국제 교류와 대륙 철도 연결에 대비 충분한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 최경진, 이동형, 화차용 브레이크 슈의 제동에 미치는 영향, 추계철도학회 논문집, 2001.10,
2. 최경진, 구병춘, 이동형외, 열차 제동거리 기준치 설정에 관한 연구, 1997.12
3. 紺野常雄, プレーキクラッチ用ノンアスベスト材の開発動向, トライボロジスト, 제 38권, 제5호, pp. 445~450, 1993
4. 日本工業規格, "鐵道車輛用合成制輪子", JIS E4309, 2001.6.27
5. UIC 541-4 2nd, Brakes with composition brake blocks, 94.1.1
6. 鐵道車輛のプレーキ技術(5), 機械の研究 第49卷 第1号, pp.49~59, 1997