화차용 브레이크 슈의 제동에 미치는 영향

°최경진*, 이동형**

Effect of the Brake Shoe on the Brake Force of the Freight Car

K. J. Choi, D. H. Lee

Key Words : brake shoe(브레이크 슈), brake dynamo(제동 다이나모), friction coefficient(마찰계수)

ABSTRACT

It is vary importance that stopping distance for the freight train and need to design parameter of the brake force and friction coefficient. Acoording to the brake force between shoe and wheel less than the adhesion between wheel and rail. Because of vary difference between empty and weight car of 0~500kN, this solution was made to application for variable loaded brake system

When the V=110㎞/h, the emergency stopping distance of freight train is about 700m, so this study was considered on the two condition, one of the increse brake force and to be different of the increse friction coeifficient on the brake shoe. It was usefull increse friction coeifficient

Result of study, analyze effect of the brake shoe on the brake force of the freight car and high friction coefficient were proposed. To do this, μ=0.155±10% when S=600m on the V=110 ㎞/h of the train, 2 groove of friction surface on the temperature distribution were considered

1. 서 론

화물수송 열차는 화물을 대량 운반할 수 있는 철도수송의 최대 강점에 속한다. 안전한 교통수단으로서의 화차는 제동시스템이 매우 중요하다. 제동시스템의 역할은 화물의 안전한 수송과 비상시 열차를 안전하게 정지시키기 위한 것이다. 제동방식은 브레이크 슈를 바퀴의 답면에 밀착시켜 운동에너지를 열에너지로 바꾸므로서 열차를 멈추게 하고 있다.

화차 제동은 공기압력을 이용하여 제어밸브를 통해 압부력을 형성하는 구조이고, 바퀴의 원주를 편압, 양압으로 밀착하여 마찰력을 주게 된다. 화차에 브레이크 슈의 종류는 주철, 수지형, 소결재 등이 있으나 우리나라는 주철제과 수지계가 주로 사용되고 있다. 수지형은 초기에 석면계가 사용되어오다 환경오염의 문제를 줄이기 위하여 비금속 마찰재로 초기에 개발된 재료가 스틸섬유 및 분말을 사용한 비석면의 합성계가 개발되고 있다. 합성계는 내마모성이 우수하고 노이즈 등에 우수하며 내마모성과 내열성은 안정된 흑연류, 무기질, 금속이 다량으로 배합되어 있기 때문이다.

* 한국철도기술연구원 차량연구본부 책임연구원

** 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원

차륜답면 마찰제동은 브레이크 슈를 밀착하므로 바퀴의 형상 변화와 수명에 영향을 미치며 마찰에 의한 열균열이 발생한다. 슈는 바퀴에 손상을 주지 않는 범위의 최대 마찰력을 발휘해야 한다. 최적의 마찰 제동력을 효과적으로 발휘하기 위하여는 제동시스템의 파라메터인 공기압력, 제동통의 크기, 차량의 압부력 전달 기구인 레바비에 의한 압부력 검토, 빈차와 만차의 중량변화에 의한 제동력의 변화, 마찰재료의 특성과 압부력 변화에 대응하는 마찰 특성, 마찰 속도에 의한 마찰계수의 변화 특성, 기계 제동으로 발생되는 열발생량에 대한 방열 및 통풍 구조와 소모재료의 수명에 의한 경제성 등 종합적 분석이 필요하다.

본 연구는 화차용 브레이크 슈의 고마찰을 적용하면서 중량 변화와 화물 수송열차 속도 및 열발생 문제에 대응하는 제동 성능 설계에 있어서 브레이크 슈가 제동에 미치는 영향을 파악하는데 그 목적이 있다.

2. 화차 제동 개념설계

2.1 비상 제동 성능 및 주요 변수

현재 화물 수송차량은 만차 90㎞/h로 운행하는 차량과 설계 최고속도 120㎞/h로 개발되어 속도 향상에 대응하는 차량이 있으며, 고속용 화차는 견인방식과 열차제동에 있어 성능을 높이기 위한 기술개발이 선행해야 할 필요가 있다. 고속용 화물 수송열차에서 고려해야 할 제동성능 요소기술은 Fig 1과 같다. 화물 하중이 500kN의 변화가 있으므로 이때의 열차 비상제동거리를 기준으로 제동력과 점착력을 비교 검토해야 한다. 또한, 바퀴 답면에 직접 제동하므로 마찰열 발생을 방지할 수 있는 재료와 구조를 제동열 발생을 최소화하는 데 목표로 해야 한다.

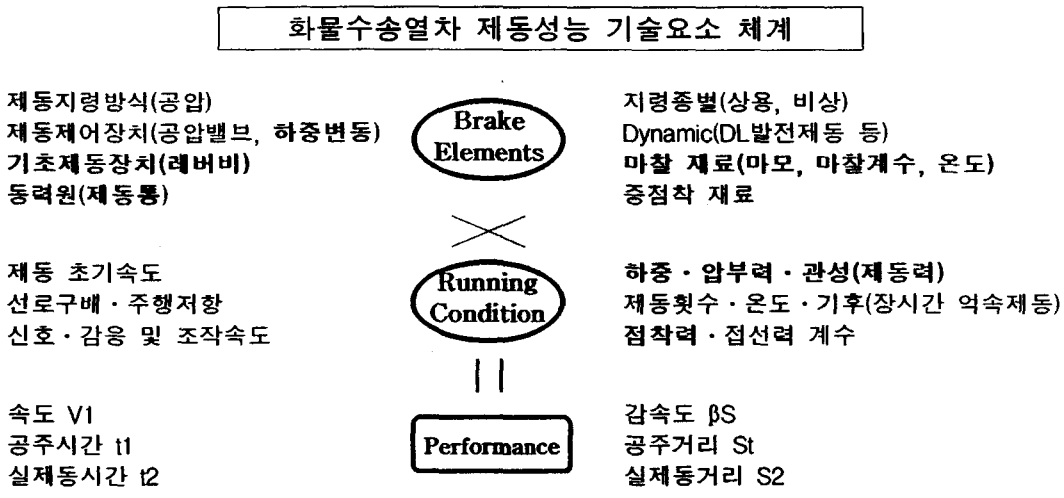


Fig. 1 Technology analysis for brake performance of the freight car

고속용 화차의 차량 제원은 Table 1를 적용하였으며, 이를 기본으로 제동압부력, 제동력, 비상제동거리를 계산하였다. 마찰재료로서 현재 사용되고 있는 브레이크 슈의 종류는 Table 2와 같이 주철계, 레진계, 합성계가 있으며 주철계는 광범위하게 화차용으로 사용되고 있으나 최근 마찰불꽃에 의한 화재발생 우려가 있으므로 적용 차량이 줄어드는 경향에 있다. 레진계는 $V=90$㎞/h 이하의 유조차, 위험물 수송용 일부 화차에 마찰 불꽃 방지용으로 활용되고 있으나 증가 추세에 있다. 합성계는 고속 화차용으로 최근 $V=110$㎞/h 까지 보장하는 제품이 개발되어 적용될 예정이다.

Table 1. Specification of the freight car

Items	Spec.	Items	Spec.
W(ton)	Empty 19 Loaded 72	μ	0.13±10%
T(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/㎠)	0.35
p(kg/㎠)	1.6~3.87	r2(kgf)	204×2

Table 2. Kind of brake shoe for the freight car

Items	Cast iron	Resin	Composite
Freght cars	general	oil tank	high speed
Demension (L×w×t, ㎜)	340×86×40	350×79×45+2	312×86×40
Contact area(㎠) groove	301 not	237 center, 60㎜	274not

고속 화차용의 열차 비상 제동성능을 검토하기 위하여 제동력을 식 (1), 열차 비상제동거리는 식 (2)를 적용하여 계산하였다.

$$Ft = \mu \times [\frac{\pi \times d^2}{4} \cdot (p - r) - r2 - r3\ ] \times N \times T \times \eta \times 2 \quad \cdots\cdots (1)$$

$$S = \frac{V}{3.6} t + \frac{4.17 V^2}{Ft/W + R_L} \quad \cdots\cdots (2)$$

여기서, Ft 는 제동력, μ는 브레이크 슈의 평균마찰계수, S는 열차 비상제동거리를 나타낸다. 열차 비상제동거리의 계산 결과를 열차속도별로 나타내면 Fig. 2와 같다. V=120㎞/h에서 S=900m의 이내에 들고 있다. 다만, 일반 장거리 열차의 비상제동 안전거리는 V=110㎞/h, S=600m이내 이므로 호환 및 표준에는 충족하지 못하고 있으며, 이를 개선하기 위하여 압부력을 높이거나 평균 마찰계수를 높이는 방법이 있다.

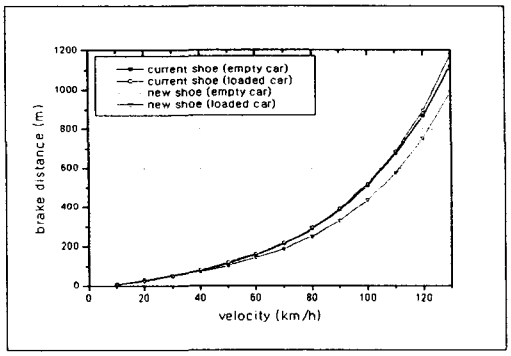


Fig. 2 Emergency brake distance of train for the freght car

압부력의 경우에는 Table 1에서 보는 바와 같이. 제동통의 공기 압력 및 제동통의 단면적 크기를 높여 압부력 발생원을 높이거나 압부력 전달기구인 레바비를 높게 하는 등의 방법이 있다. 여기서, 압부력을 높이는 방법은 구조를 개량해야 하므로 기술적 제약과 비용 측면이 불리하다고 볼 수 있다.

따라서, 현재의 평균 마찰계수가 V=120㎞/h에서 μ=0.13을 적용되고 있는데 구조 개량 부담을 줄이고 제동력을 높이는 데는 브레이크 슈를 고마찰로 높이는 기술접근이 용이한 방안이 되는 것이다.

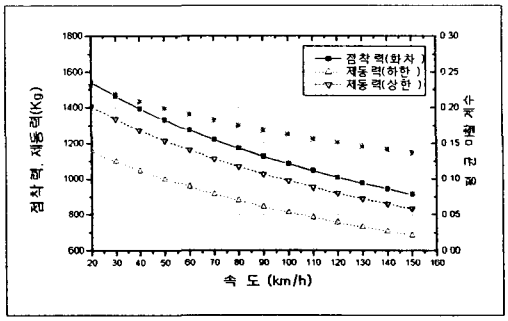


Fig. 3 Optimum design for the brake shoe

Fig 3은 V=110㎞/h에서 S=600m 이내를 충족하기 위하여 최대 점착력을 계산하고 제동력을 상,하한치를 구하였으며, 브레이크 슈의 필요 평균 마찰계수로 하였다. 그림에서 V=110㎞/h의 평균 마찰계수 μ=0.155 로 나타나고 있다.

2.2 화차용 브레이크 슈의 마찰력

화차용 브레이크 슈의 철도 표준규격을 보면 Table 3과 같으며, 표에서 레진계와 합성계의 차이점은 평균마찰계수를 $V=110$㎞/h에서 $\mu=0.09\sim0.13$을 적용하고, 마모량이 0.120mm이하에서 0.040mm이하로 1/3정도 감소되는 재질로 보완되었다.

따라서, 속도 $V=110$㎞/h에서 S=600m 이내의 결과를 얻기 위하여 Table 3의 고마찰 슈 시험편과 같이 시험속도를 $V=120$㎞/h까지 평가하고 이때의 평균마찰계수는 $\mu=0.130\sim0.170$, 관성모멘트를 170 $kg\cdot m\cdot s^2$ 로 하고, 온도조건은 375℃로 하며, 마모량도 0.040mm이하로 하는 것이 유용한 것으로 분석되고 있다.

Table 3. Test items of brake shoe for the freght car(KRS class 1)

항 목	레진 제륜자	합성 제륜자	고마찰 슈 시험편
철도 표준규격	KRS2242-2059(1종)	KRS2240-2489(00. 9)	기술 개발중
제동초속도	35,65,95(㎞/h), 각각 5회	35,65,95,110(㎞/h), 각각 5회	35,65,95,120(㎞/h), 각각 5회
관성모멘트	120 kg · m · s^2	120 kg · m · s^2	170 kg · m · s^2
압부력 및 차륜온도	제륜자 1개 3.0 ton, 제동초속도 60℃ 이하	제륜자 1개 3.0 ton, 제동초속도 60℃ 이하	제륜자 1개 3.0 ton, 제동초속도 60℃ 이하
마찰계수 (평균, 순간)	평균 0.20±0.03(35㎞/h)~ 0.12±0.02(95㎞/h) - 순간 <없음>	평균 0.20±0.03(35㎞/h) 0.12±0.02(95㎞/h) 0.11±0.02(110㎞/h) 순간 <없음>	평균 0.200±0.03(35㎞/h) 0.165±0.02(95㎞/h) 0.150±0.02(120㎞/h) 순간 <설정 필요>
마찰열 측정위치	차륜답면 10mm, 제륜자 마찰면 5~10mm	차륜답면 10mm 제륜자 마찰면 5~10mm	차륜답면 10mm 이내 제륜자 마찰면 5~10mm
열반점 온도	10회 제동체결, 475℃이하	10회 제동체결, 475℃이하	10회 제동체결, 375℃이하
압축강도	500㎏/㎠ 이상	60N/㎟(MPa) 이상	60N/㎟(MPa) 이상
충격강도	2.0㎏/㎠ 이상	3.0㎏/㎠ 이상	3.0㎏/㎠ 이상
마모량	0.120mm이하	0.040mm이하	0.040mm이하
형상 변경	홈 1개	홈 없음	홈 2개

2.3 제동 마찰열 발생

Photo 1은 차륜 답면 표면 상태가 심하게 손상되어 조사한 경우이며, 회전 방향으로 깊은 홈, 마찰 면의 경면이 심화되어 있으며, 차륜 경도의 KS규격은 브리넬 25mm 깊이에서 248~285HB와 비교한 결과 표면 후렌지 측은 261~282HB, 후렌지 반대측 213~222HB로서 후렌지 반대측이 매우 낮은 값을 나타내고 있다. 또한, 제동 마찰면 측은 378~ 391HB 로서 매우 높은 값으로서 이는 열적인 영향에 의해 경면화 된 것으로 추정할 수 있다.

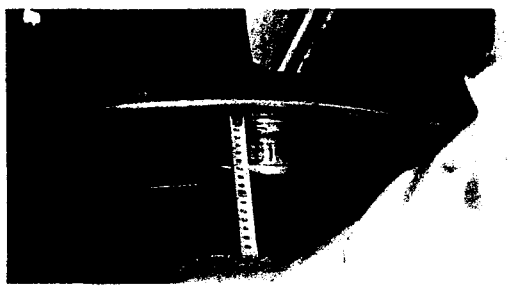


photo 1. Profile of wheel tread

Fig. 8은 제동시험기에서 합성제륜자 $V=125$km/h 정지제동시의 마찰온도를 적외선 카메라로 측정한 결과로서 중앙 마찰부가 최고 585.4℃(제동후 15초후, 평균온도: 172.6℃)를 보이고 있다. 마찰표면 근처의 온도이므로 답면 및 슈의 온도로 보기는 어려우나 순간적인 마찰온도발생은 매우 높은 결과로 분석된다.

3. 열해석 및 제동 마찰 실험

3.1 열해석에 의한 구조 변경

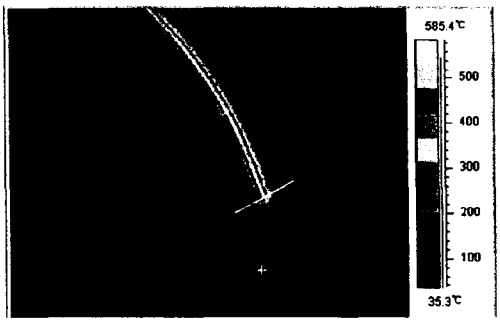
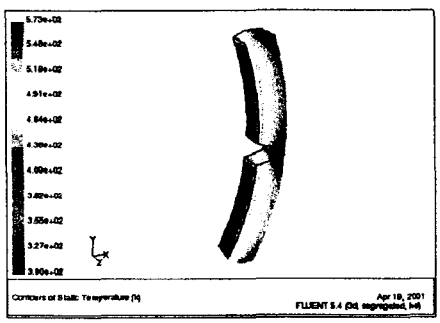


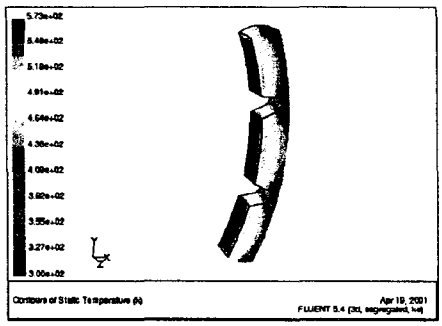
Fig. 4 Max. temperature(surface 585.4℃)

열해석을 위하여 사용된 FEM 프로그램은 FLUENT 로 하였으며 해석에 사용된 주요 물성치는 탄성계수 $3.0\times\times10^{7}kg/m^{2}$, 밀도 $3100\,kg/m^{3}$, 선열팽창계수 4.8×10^{-6}, 열전도계수 $10.03\,W/mK$ 를 적용하였다. 외형크기는 동일하게 하고 마찰면을 기존 형상의 홈(groove)이 1개와 홈이 2개를 갖도록 모델링하였으며, 경계조건은 백스틸부분(z=0)은 고정조건, heat flux 는 슈의 마찰면, convection 초기조건은 슈의 측면과 홈 주위, 제동 압부력 초기조건은 마찰력과 압부력을 마찰 표면에 적용하였다.

Fig. 5는 브레이크 슈의 홈이 1개인 기존품과 홈을 2개로 형상 변경한 경우의 열해석 결과를 나타내고 있다. 공기유동 효과에 의해 홈 2개 인 경우에서 온도분포가 작아지는 온도분포를 나타내고 있으며, 비교할 수 있다.



(a) groove 1



(b) groove 2

Fig. 5 Temperature distribution around contact surface of brake shoe

3.2 실물 제동 실험 및 결과

실험 조건은 실물 브레이크 라이닝을 마찰면 접촉을 위한 90% 이상의 연마(bedding) 후 시험하였으며, 시험편의 기본 형상은 Photo 2와 같다.

실험의 상대 차륜은 화차용 탄소강 주강재이고 제동 압부력은 3.0 t 양압식 차륜의 시험 초기온도 60℃ 이하, 시험속도 및 회수 35, 65, 95, 125km/h 조합 5회를 평균하여 정리하였다. 관성모멘트는 실험식 (3)의 계산 결과에 의해 $170kgms^{2}$ 로 하였다.

Photo 2. Test pieces

$$I = M \times r^{2} \quad \cdots\cdots (3)$$

여기서, I 는 관성 모멘트 상당량 ($kg \cdot m^2$), M 은 화차 빈차, 만차 중량에서 차륜당 제동 중량(kg), r 은 바퀴 반경(m)을 나타낸다.

Fig. 6은 고마찰 브레이크 슈의 시험편 실험 결과이며, 시험편은 마찰면 홈이 1개 및 2개로 제작하였다. 마찰면과 온도 특성은 양호하였으며, 속도 V=125㎞/h에서 평균마찰계수가 상한치를 약간 웃돌고 있으나 비교적 제동력을 고려한 범위에 있고 바퀴 답면에 대한 표면 손상은 나타나지 않았다.

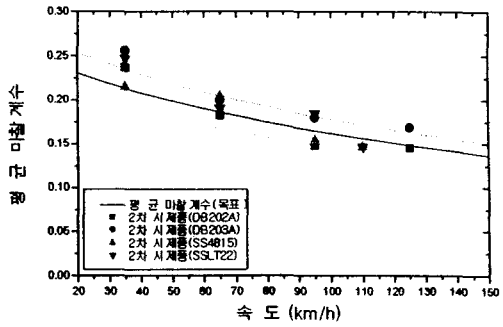


Fig. 6 Exprimental result of friction coefficient

3. 결 론

화물 수송 차량의 안전을 확보하기 위한 제동성능의 설계는 제동력을 지배하는 압부력과 마찰재료의 평균마찰계수가 매우 중요하며, 화물 열차도 제동 성능에서 V=110㎞/h에서 비상제동거리 S= 600m 이내를 유지하도록 하므로써 다른 열차와의 호환이 가능하다.

화물 수송 차량의 제동장치는 공기 지령방식이고 압력 감응속도가 늦다. 제동력을 높이는 방안에서 구조가 복잡하므로 개량 비용등을 고려하면 압부력을 높이는 것보다는 마찰재의 평균 마찰계수를 높이는 방안이 효과적으로 보인다. 상대적으로 마찰계수를 높인 후에는 압부력을 낮출 수 여유를 가질 수 있다.

본 연구는 점착력보다 낮은 수준에서 제동력의 표준값을 구하여 바퀴의 안전성을 확보하도록 브레이크 슈의 평균마찰계수를 V= 110㎞/h에서 μ=0.155±10% 범위로 높이는 안을 제시하였으며, 특히 열적인 영향을 최소화하기 위하여 형상을 변경하고, 화물의 만차 조건에 대응하기 위한 최대 관성 모멘트로 실험 결과를 도출하므로서 향후 고마찰 브레이크 슈의 상용제품 개발에 적용하도록 하였다.

감사의 글

본 연구는 공공이사회의 기본연구사업에 의한 "철도시스템 기반기술 연구-제동장치 성능 및 신뢰성 향상분야"의 일환으로 수행되었으며 관계자에게 감사드린다.

참고문헌

1. 최경진, 구병춘, 이동형외, 열차 제동거리 기준치 설정에 관한 연구, 1997.12
2. 최경진, 권석진외, 철도차량의 제동성능 향상에 관한 연구, 1996.8
3. 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