

패드 마모량 감소를 위한 디스크 제동력 패턴 설정에 관한 연구

A Study on the Establishment of Disc Braking Force Pattern to reduce the Wear Mass of Pad

김석원* 김영국** 김기환**
Kim, Seog Won Kim, Young Guk Kim, Ki Hwan

ABSTRACT

Korean high speed train(HSR-350x) has adopted a combined electrical and mechanical(friction) braking system. Brake blending control unit(BBCU) controls each brake system to fulfill the required brake performances such as braking distance, deceleration and jerk. Also the braking system should be designed considering the economical management, such as effective use of generated braking energy and the minimum wear of friction materials(a pad and a brake shoe). In this paper, we establish the disc braking force pattern that reduces the wear of pad in the disc braking system by minimizing the variance of the instantaneous disk baking energy during braking time, and compare the wear mass of pad between the conventional disc braking force pattern and the established results.

(국문요약)

고속철도차량의 제동시스템은 전기제동장치, 디스크제동장치, 답면제동장치 등 다양한 제동장치들의 조합으로 구성되며 요구되는 제동성능을 충족하는 범위 내에서 에너지의 효율적인 활용과 마찰재의 경제성을 고려하여 각 제동장치에 대한 제동블렌딩 제어 기능을 포함하고 있다. 일반적으로 요구제동거리를 만족하기 위한 열차 전체에 대한 제동력 패턴을 설정하고 전기제동을 최우선적으로 투입하고 부족한 부분에 대하여 기계제동을 사용하여 부족한 부분을 보상하는 방법을 사용하고 있다.

기계제동장치의 대부분을 차지하고 있는 디스크제동장치는 디스크와 패드 사이의 마찰력을 이용하여 제동력을 확보하는 것으로 사용에 따른 마모가 발생한다. 특히, 고속영역에서 사용하는 경우 패드 마모량은 저속에 비하여 급격히 증가하게 되어 패드의 교환 주기를 단축시킬 뿐만 아니라 제동 초기 과정에서 온도의 상승으로 인한 제동효율의 저하를 가져오는 단점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 제동거리, 감속도, 감속도 변화율 등 요구되는 제동성능을 만족시키는 범위 내에서 디스크 제동장치의 패드 마모량 감소를 위한 열차 주행속도에 따른 디스크 제동력 패턴을 설정하는 하나의 방법론으로 제시된 제동초기에서부터 정지할 때까지의 디스크제동에너지의 분산을 최소화 하는 최적화 방법을 이용하여 한국형 고속열차를 바탕으로 제작되는 10량 편성의 고속열차를 대상으로 모든 제동장치가 정상인 경우와 1개의 전기제동장치가 고장이 발생한 경우에 대한 패드 마모량을 구하고 현재 설정된 디스크 제동력 패턴에서의 패드 마모량과의 비교 검토를 수행하였다.

* 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

E-mail : swkim@krri.re.kr

TEL : (031) 460-5611 FAX : (031) 460-5649

** 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

2. 디스크 제동력 패턴 설정 방법

2.1 열차속도에 따른 패드 마모량

고속철도에 사용하는 소결패드에 대하여 제동 과정에서의 열차속도에 따른 마모량을 검토하기 위하여 한국형 고속열차의 패드를 개발 제작한 D사의 협조를 받아 실험실 규모의 다이내모로 패드의 마모시험을 수행하여 실제 차량에서와 동일한 조건의 시험은 아니지만 정성적인 경향을 파악하였다. 패드의 마모량은 100회의 제동시험을 수행한 후의 패드의 무게를 측정하여 구하였다.

실제 차량이 100 km/h로 주행할 때의 차륜 회전수는 약 577 RPM이므로 다이내모에서 제어 가능한 회전수 중에서 이와 유사한 548 RPM을 기준으로 선정하여 이의 정수배로 시험을 수행하였으며, 그 결과 제동 투입 회전수에서 정지시까지의 총 마모량을 나타내면 Fig. 1과 같으며, 각 회전수 구간에서의 단위에너지에 대한 패드의 평균 마모량을 회전수에 해당하는 열차속도로 표시하면 Fig. 2와 같다.

Fig. 2를 살펴보면 동일한 에너지의 소모를 위한 패드 마모량은 190 km/h 이상의 고속영역에서 상대적으로 급격히 커지는 것을 알 수 있으며, 380 km/h 이상의 속도영역에서는 작아지나 이 속도영역에서는 낮은 점착계수로 인하여 큰 제동력의 투입이 어려울 뿐만 아니라 제동 초기에 큰 제동에너지가 투입되는 경우 온도 상승에 의한 제동효율의 저하 및 마찰재의 손상 등이 발생할 우려가 있어 디스크 제동을 투입하기에는 실제적으로 어려움이 있다. 또한, 최적화 대상의 고속열차는 최고속도 300 km/h로 운행하는 열차이므로 이 속도 구간에서의 마모량은 고려 대상에서 제외하여도 무방한 것으로 판단된다.

따라서 패드 마모량의 감소를 위하여 단위 에너지에 대한 마모량이 상대적으로 큰 고속 영역에서의 디스크 제동력은 가급적 적게 투입하는 것이 패드의 마모 측면에서 유리하다고 판단된다.

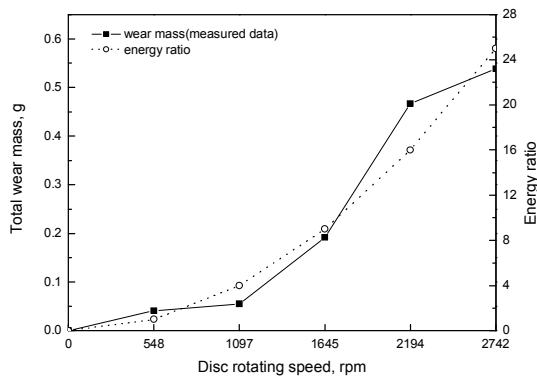


Fig. 1 Total wear mass of pad and energy ratio for wear test with lab scale dynamometer

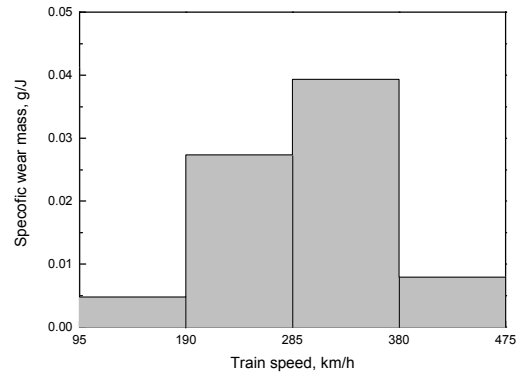


Fig. 2 Specific wear mass with respect to energy for wear test with lab scale dynamometer

2.2 디스크 제동력 패턴에 따른 패드 마모량 계산 방법

열차 제동요구조건을 만족하면서 고속 영역에서의 디스크 제동력을 최소화하기 위한 디스크 제동력 패턴을 구하기 위하여 식 (1)과 같이 전체 제동과정에 대한 제동에너지의 분산을 목적함수로 하여 이를 최소가 되도록 하는 최적화 방법을 이용하였다[3]. 최적설계를 위한 제한 조건식은 식 (4)와 같이 정의되며, 최적화 계산 흐름도는 Fig. 3과 같다.

$$f(x) = S[E_{disc}] \quad (1)$$

여기서, $S[E_{disc}]$ 는 디스크 제동장치에 의한 제동에너지의 분산이며, 제동에너지의 총 합은 식 (2)와 같이 미소시간(Δt) 동안에 작용하는 디스크 제동장치 제동력과 제동거리의 곱에 대한 합으로 표시된다.

$$E_{disc} = \sum(F_{brake_disc} \times S) \quad (2)$$

여기서, F_{brake_disc} 는 디스크 제동장치의 제동력(kN) 이며, S 는 미소시간(Δt) 동안의 제동거리(m)이다. 제동은 초기속도 300 km/h에서 작동을 시작하여 정지할 때까지 지속되므로 설계변수(x_i)는 식 (3) 과 같이 열차속도 10 km/h 마다의 디스크 제동력으로 정하였으며, 총 31개가 된다.

$$x_i = F_{brake_disc,i} , \quad i = 0, 10, 20, \dots, 280, 290, 300 \quad (3)$$

$$F_{brake_disc,i} \leq \max[F_{brake_disc_adh}, F_{brake_disc_pbc}] \quad (4)$$

$$S_{PWM} \leq S_{req_PWM}$$

$$a_{max} \leq 1.0m/sec^2$$

$$Jerk_{max} \leq 0.5m/sec^2$$

$$E_{disc} \leq 810MJ$$

$$F_{brake_disc,i} - F_{brake_disc,j} \geq 0 , \quad \text{for } i < j$$

여기서, $F_{brake_disc_adh}$ 는 최대 점착력(kN), $F_{brake_disc_pbc}$ 는 제동실린더에 의한 최대 제동력(kN), S_{PWM} 은 제동지령 PWM 신호에 대한 계산 제동거리(m), S_{req_PWM} 는 제동지령 PWM 신호에 대한 요구제동거리(m), a_{max} 는 최대 감속도(m/sec^2), $Jerk_{max}$ 는 최대 감속도변화율(m/sec^3)을 나타낸다.

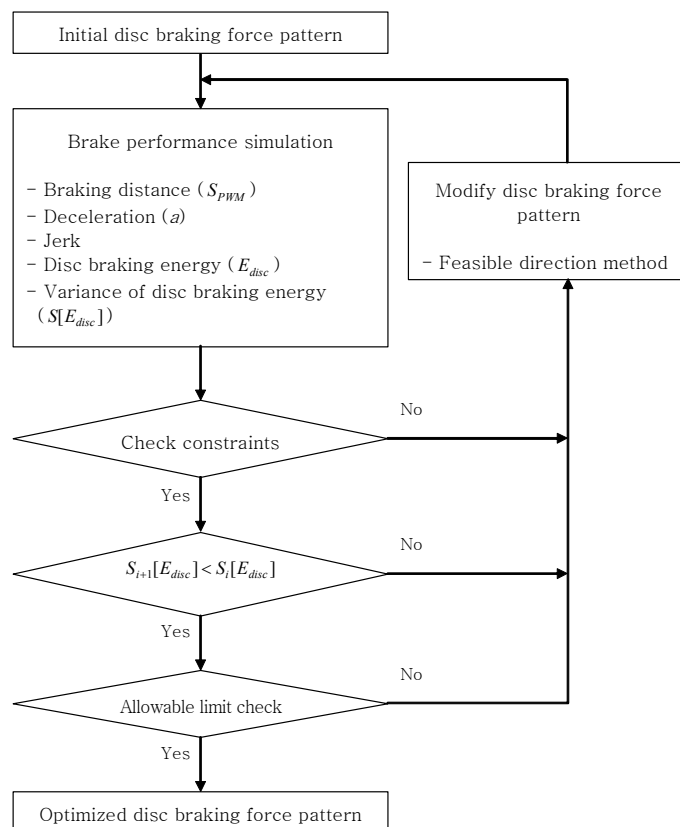


Fig.3 Flow chart for optimization of disc braking force pattern

이상의 과정을 통하여 최적화된 디스크 제동력 패턴을 구하고 최적화된 제동력 패턴에 Fig. 2의 차량 속도에 따른 단위에너지에 대한 평균 마모량을 곱하여 총 패드 마모량을 구한다.

3. 제동력 패턴에 따른 패드 마모량 계산

3.1 대상 차량

디스크 제동장치의 패드 마모량 검토를 위한 대상 차량은 한국형 고속열차를 바탕으로 제작되는 10량 편성의 고속열차로 하였다. 대상 열차는 동력차(1량)+객차(8량)+동력차(1량)으로 구성되며, 동력대차는 동력차에만 배치되도록 하였다. 제동장치는 표 1과 같이 동력대차에는 전기제동장치와 답면제동장치가 설치되고 부수대차에는 디스크 제동장치가 각각 설치된다.

Table 1. Braking apparatuses per each bogie for analysis train

Bogie No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Total
Electrical brake		2	2										2	2	8
Mechanical brake	Tread	4	4										4	4	16
	Disc			6	6	6	6	6	6	6	6	6			54

패드 마모량 계산은 모든 전기제동장치가 정상인 경우와 1개의 동력 대차가 고장이 발생한 경우에 대하여 제동거리, 최대감속도 등 제한조건을 만족하는 기존의 디스크 제동력 패턴과 최적화된 디스크 제동력 패턴에 대하여 300km/h에서 정지할 때까지의 패드 마모량을 각각 계산하여 패드 마모량의 변화에 대하여 검토하였다.

3.2 패드 마모량 검토

대상 열차에 대하여 각 제동크기 지령인 PWM 값에 대하여 모든 제동장치가 정상인 경우와 전기제동장치 1대의 고장이 발생한 경우에 대한 최적화된 디스크 제동력 패턴은 Fig. 4와 같다. Fig. 4를 살펴보면 모든 제동장치가 정상인 경우에는 설정한 최대 점착력 이내에서 요구하는 제동조건을 충족하며, 1대의 전기제동장치가 고장이 발생하는 경우에는 디스크 제동장치에서 손실되는 제동력 확보를 위하여 최대점착력까지 디스크 제동력이 작용함을 알 수 있다.

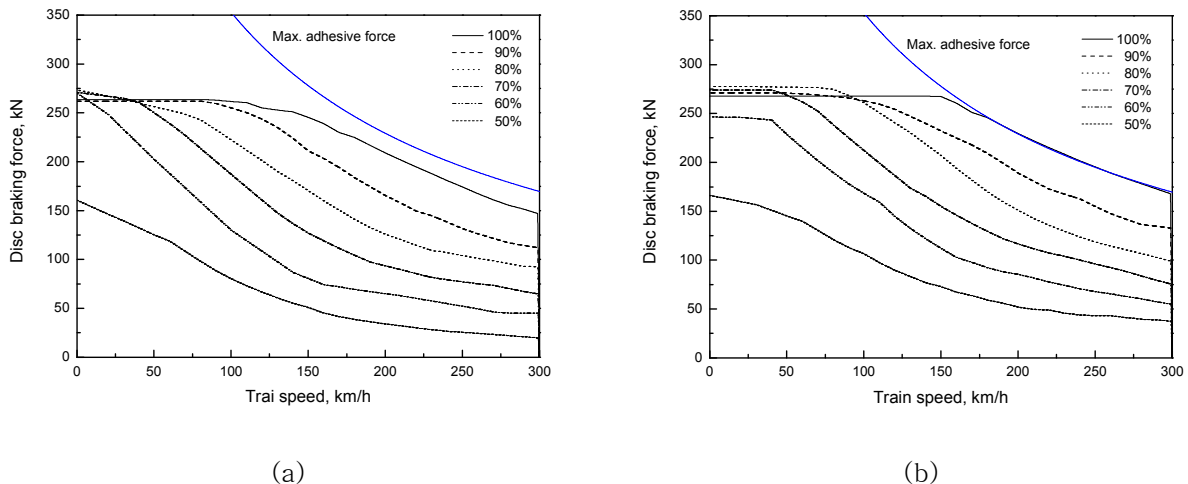


Fig. 4 Optimized disc braking force pattern, (a) normal condition, (b) one motor bogie failed condition

Fig. 4에 나타난 최적화된 디스크 제동력 패턴과 기존의 제동력 패턴에 대한 각 제동크기 지령에 따른 패드의 총 마모량을 계산하여 나타내면 Fig. 5와 같으며, 모든 제동장치가 정상인 경우에는 최적화에 따른 마모량은 기존 패턴에 비하여 100 % 지령인 경우에는 차이가 없으나, 70 % 지령인 경우 96 % 수준, 50 % 지령인 경우 91 % 수준으로 감소함을 알 수 있으며, 1개의 전기제동장치가 고장이 발생한 경우에는 기존 경우에 비하여 100 % 지령인 경우에는 101 % 수준으로 미소한 증가를 나타내며, 70 % 지령인 경우 94 % 수준, 50 % 지령인 경우 89 % 수준으로 감소함을 알 수 있다. 제동크기 PWM이 큰 경우에 패드 마모량의 감소비가 PWM 크기가 작은 경우에 비하여 작은 이유는 제동거리를 만족하기 위하여 고속영역에서 저속영역까지 전 영역에 걸쳐 큰 제동력이 투입되기 때문인 것으로 판단되며, 1개의 전기제동장치가 고장이고 제동 PWM 신호가 100 %인 경우에는 마모량이 기존의 경우에 비하여 다소 증가하는 값을 나타내는데 이는 기존 패턴이 최대 점착력을 초과하여 선정되어 최적화 결과 요구하는 제동거리를 만족하기 위하여 고속영역에서 점착력 이내의 최대 제동력이 작용하였기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6은 전기제동장치 1개가 고장인 경우와 모든 제동장치가 정상인 경우에 대하여 최적화를 수행한 각 제동 PWM 신호에 따른 패드 마모량을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전기제동장치 1개가 고장인 경우의 패드 마모량이 정상인 경우에 비하여 상대적으로 크며, 이는 고장이 발생한 전기제동장치의 제동력을 디스크 제동장치가 추가로 부담하여야 하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7은 기존 제동력 패턴에서 마모되는 패드 마모량에 대한 최적화 수행 이후 감소되는 패드 마모량의 비를 나타낸 것이다. 최적화에 따라 감소하는 패드 마모량의 비는 전기제동장치 1대가 고장인 경우가 모든 제동장치가 정상인 경우에 비하여 상대적으로 크며, 두가지 경우 모두 제동 PWM 신호가 작을 수록 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 제동 PWM 신호가 100 %인 경우에는 그 효과가 거의 없는 것을 알 수 있는데 이는 기존 경우와 최적화 경우에 대한 디스크 제동에너지 분포의 차이가 거의 없기 때문이다. 그러나, PWM 신호가 50 % 인 경우에는 모든 제동장치가 정상인 경우 약 9 %, 전기제동장치 1대가 고장인 경우 약 11 %가 감소되며, PWM 신호가 작은 경우에는 고속영역에서의 제동에너지가 저속영역으로 변경되기 때문에 효과가 커진다는 것을 알 수 있다.

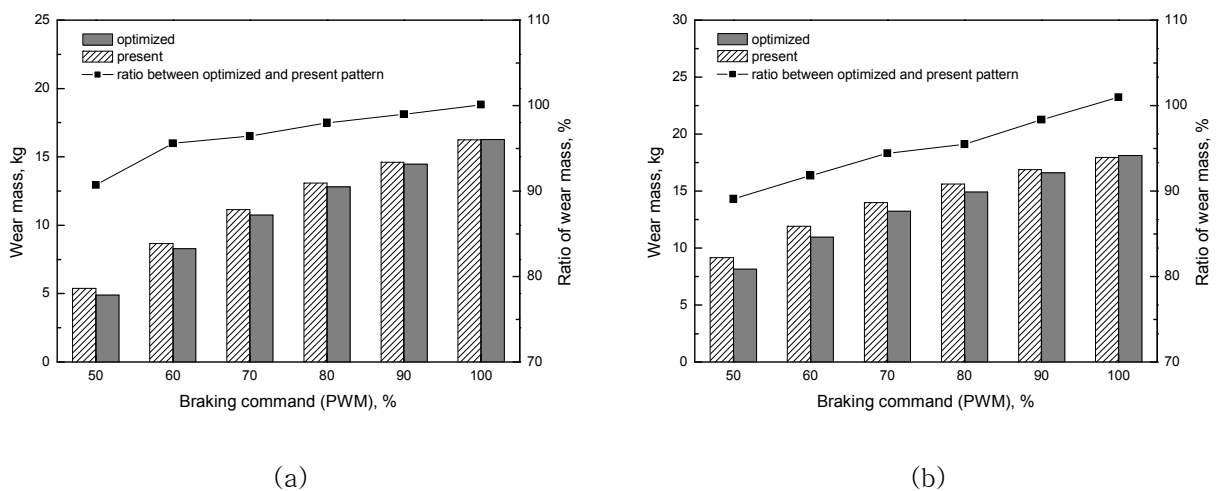


Fig. 5 Comparison of wear mass and ratio of wear mass between present and optimized cases, (a) normal condition, (b) one motor bogie failed condition

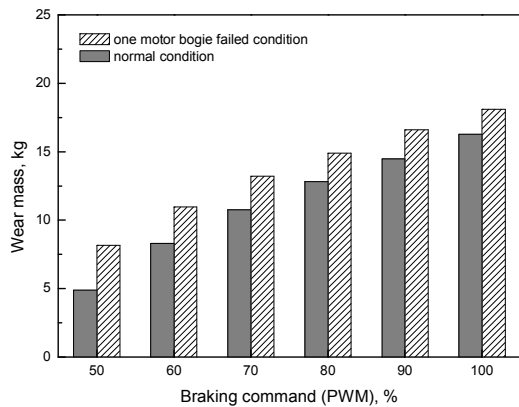


Fig. 6 Total wear mass of pad for normal and one motor bogie failed condition (optimized disc braking force pattern)

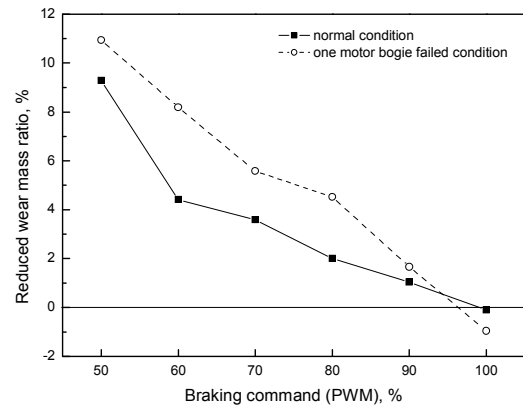


Fig. 7 Reduced wear mass ratio between present force pattern and optimized force pattern

4. 결론

제동거리, 감속도, 감속도 변화율 등 요구되는 제동성능을 만족시키는 범위 내에서 제동초기에서부터 정지할 때까지의 디스크제동에너지의 분산을 최소로 하는 최적화 방법을 이용하여 설정된 디스크 제동력 패턴에 대한 패드마모량을 계산하여 이를 기존의 제동력 패턴에 대한 패드 마모량과 비교 검토를 수행하였으며 이상의 결과는 다음과 같다.

(1) 단위 에너지에 대한 패드 마모량은 저속영역에 비하여 고속영역에서 상대적으로 크며 패드 마모량 감소를 위하여는 제동거리, 감속도 등의 제동요구조건을 만족하는 범위내에서 저속영역에서 많은 제동에너지를 투입하도록 하는 것이 유리하다.

(2) 전체 제동과정에서의 디스크 제동 에너지 분산값을 최소로 하는 최적화 방법을 사용하여 디스크 제동 패턴을 설정하는 경우 기존의 제동력 패턴에 비하여 패드 마모량을 감소할 수 있으며, 제동 PWM의 크기가 작을수록 큰 효과를 나타냄을 알 수 있다.

(3) 전기제동장치 1대의 고장이 발생한 경우에 대한 패드 마모량의 감소 비율이 모든 제동장치가 정상인 경우에 비하여 다소 크며, 최적화 방법에 따른 제동력 패턴 설정이 효과적임을 알 수 있다.

(4) 단순히 요구제동거리를 만족하는 제동력 패턴의 설정 방법이 아니라 제동에너지의 분산을 최소화하는 방법을 사용하는 경우 패드 마모량을 감소할 수 있으며, 이에 대한 유용성을 확인하였다.

감사의 글

본 내용은 건설교통부에서 시행하는 고속철도기술개발사업의 기술결과입니다.

참고문헌

[1] 제동시스템 개발, 고속전철기술개발사업 연차보고서, 건교부/산자부/과기부, 1996-2001
 [2] 한국고속철도건설공단, 경부고속철도 계약서, Vol.1, 1994
 [3] 김석원, 김영국, 박찬경, 김기환, “제동에너지 관점에서의 최적 디스크 제동력 패턴 설정”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 2006
 [4] Pheonix Integration, Inc., ModelCenter V. 4 Manual, 2002
 [5] Vanderplaats, G. N., Numerical optimization technique for engineering design, McGraw-Hill Book Company, 1989