

제동에너지 관점에서의 최적 디스크 제동력 패턴 설정

Optimization of Disc Braking Force pattern from the viewpoint of Braking Energy

김석원* 김영국** 박찬경** 김기환**
Kim, Seog Won Kim, Young Guk Park, Chan Kyoung 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. When the disc brake is applied in the high speed region, the wear of pad is increased rapidly. In this paper, we discuss the optimized patterns of the disc brake force from the view point of braking energy.

1. 서론

고속철도차량의 제동시스템은 전기제동장치, 디스크제동장치, 답면제동장치 등 다양한 제동장치들의 조합으로 구성되며 요구되는 제동성능을 충족하는 범위 내에서 에너지의 효율적인 활용과 마찰계의 경제성을 고려하여 각 제동장치에 대한 제동블렌딩 제어 기능을 포함하고 있다. 일반적으로 요구제동거리를 만족하기 위한 열차 전체에 대한 제동력 패턴을 설정하여 전기제동을 최우선적으로 투입하고 부족한 부분에 대하여 기계제동으로 부족한 부분을 보상하는 방법을 사용하고 있다[1, 2].

디스크제동력은 디스크와 패드 사이의 마찰에너지를 이용하는 것으로 고속영역에서 사용하는 경우 에너지의 증가량에 비하여 패드 마모량은 급격히 증가하게 되어 패드의 교환 주기를 단축시킬 뿐만 아니라 제동 초기 과정에서 온도의 상승으로 인한 제동효율의 저하를 가져오는 단점이 있어 가능한 제동력의 투입을 억제하는 것이 유리하다.

본 논문에서는 제동거리, 감속도, 감속도 변화율 등 요구되는 제동성능을 만족시키는 범위내에서 제동 초기에서부터 정지할 때까지의 디스크제동에너지의 분산을 목적함수로 하여 이를 최소로 하는 최적화 방법을 제안하고, 한국형 고속열차를 바탕으로 10량으로 편성되는 열차를 대상차량으로 하여 최적화된 디스크 제동력 패턴과 기존의 제동력 패턴에 대한 비교를 수행하여 새로운 패턴의 장점을 확인하였으며, 철도 운영 측면의 경제성을 고려한 디스크 제동력 패턴 설정에 대한 하나의 방법론을 제시하였다.

* 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

E-mail : swkim@krri.re.kr

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

** 한국철도기술연구원, 고속철도기술개발사업단

2. 디스크 제동력 패턴 최적화 방법

2.1 제동속도에 따른 패드 마모량

고속철도에 사용하는 소결패드에 대하여 제동속도에 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 시험 전후의 무게 차이를 계산하여 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 결과는 그림 1과 같다. 그림 1을 살펴보면, 548 RPM에서 정지까지의 마모량에는 제동이 체결되는 경우에 발생하는 기본적인 마모량이 포함되어 있는 것으로 판단되므로, 제동 투입 속도에 따른 추가적인 마모량의 변화를 제동속도에 따라 살펴보았다.

2,742 RPM에서 548 RPM 까지 감속하는데 소요되는 에너지는 1,097 RPM에서 548 RPM 까지 감속하는 경우에 비하여 8배 증가하나, 마모량은 약 35배가 된다. 즉, 속도가 증가함에 따라 마모량은 에너지 증가비보다 급격히 증가함을 알 수 있으며, 실제 차량에서도 유사한 경향을 나타낼 것으로 판단되므로 고속 영역에서 디스크 제동력은 가급적 적게 투입하는 것이 패드의 마모 측면에서 유리하다고 판단된다.

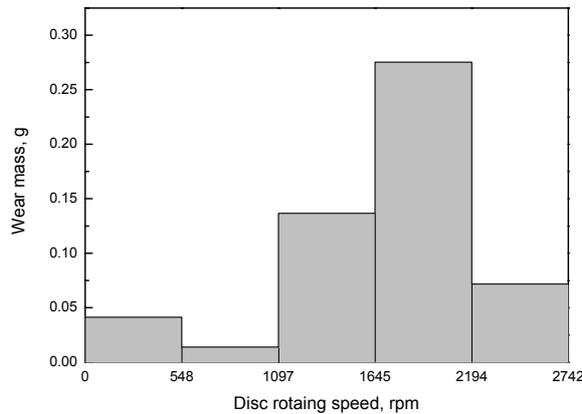


Fig. 1 Wear mass of pad for wear test with lab scale dynamometer

2.2 최적화 방법

일반적으로 최적화 문제는 최소화 하거나 최대화할 목적함수의 정의가 필요하며, 이 목적함수는 최적화하려는 목적에 적합하도록 선정하여야 한다. 디스크 제동장치의 제동력 패턴에 대한 최적화를 위한 목적함수는 전체 제동과정에 대한 제동에너지의 분산으로 하였으며, 이를 최소가 되도록 식 (1)과 같이 최적화 문제로 정의하였다.

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

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.

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

디스크 제동력 패턴 최적화를 위하여 주어진 디스크 제동력 패턴에 대하여 제동성능해석 프로그램을 이용하여 열차의 제동거리, 디스크 제동에너지, 감속도, 감속도변화율 등을 계산하고 상용 프로그램인 ModelCenter[3]에 내장된 최적화 모듈 중 가능방향법(Feasible direction method)[4]을 이용하여 디스크 제동력 패턴에 대한 최적화를 수행하였다.

2.3 해석 대상 차량 및 차량 특성값

최적 디스크 제동력 패턴을 구하기 위한 최적화 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 담면제동장치가 설치되고 부수대차에는 디스크 제동장치가 각각 설치된다.

제동성능에 영향을 미치는 열차중량, 각 제동장치의 제동력, 주행저항 등은 7량 편성의 한국형 고속열차의 값을 이용하여 10량 편성으로 확장하여 식 (4)와 같이 추정하여 사용하였다.

- 열차중량 : 431.1 ton
- 주행저항식 : $R=257.796 + 3.4499V + 0.04109V^2$ (4)

Table 1. Braking apparatuses per each bogie for optimization 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			54

2.4 최적화 해석을 위한 제한조건

최적화 해석을 위한 최적화 해석을 위한 제한조건은 점착력, 제동거리, 디스크 실린더에 의한 최대 제동력, 최대 감속도, 디스크에서의 최대 허용 에너지, 감속도변화율 등이며, 점착계수는 신간선의 건조레일 조건의 80%를 사용하여 축중을 고려하여 최대 점착력으로 설정하였다.

제동거리는 기존의 제동력 패턴에 따라 계산된 전체 제동력(전기제동력+담면제동력+디스크제동력)의 최대값을 100% 제동 경우로 하고, 각 제동 PWM 신호에 따라 계산된 제동거리를 최적화 해석의 요구 제동거리로 하였다. 디스크 실린더에 의한 최대 제동력과 최대 허용 에너지는 한국형 고속열차에서 사용하는 실린더, 캘리퍼 및 디스크의 사양에 따라 계산된 값으로 하였으며, 한개의 객차대차에 대하여 각각 46.5 kN, 90 MJ로 하였다.

감속도와 감속도변화율은 1.0 m/sec^2 와 0.5 m/sec^3 을 제한값으로 하였으며, 속도에 따른 제동력의 크기는 고속영역의 제동력이 저속영역의 크기보다 작거나 같은 것으로 하였다. 이는 동일한 제동력이 작용할 경우 고속영역에서의 제동에너지가 저속영역에서 비하여 상대적으로 커서 제동 초기에 열에너지

가 급격히 커지게 됨에 따라 마찰재의 마모 및 열에 의한 마찰재의 손상 가능성이 커지게 되는 것을 방지하고 마찰재의 온도가 상승하게 되면 마찰계수의 감소를 가져오는 경향이 있으므로 이를 사전에 제거하기 위한 목적이다. 이상의 제한조건들을 종합하여 디스크 제동력 패턴 최적화를 위한 제한조건식은 식 (5)와 같이 정의된다.

$$F_{brake_disc,i} \leq \max [F_{brake_disc_adh}, F_{brake_disc_pbc}] \quad (5)$$

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

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

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

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

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

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.

3. 디스크 제동력 패턴 최적화

3.1 기존 및 최적화 패턴

한국형 고속열차의 디스크 제동력 패턴에 대한 각 제동 PWM 신호에 따른 디스크 제동력 및 디스크 제동장치의 에너지 분포는 그림 2 및 그림 3과 같으며, 제시한 최적화 방법에 따라 디스크 제동장치의 제동에너지 분산을 최소화 하는 최적화를 수행하여 구한 디스크 제동력 패턴은 그림 4와 같으며, 속도에 따른 에너지 분포는 그림 5와 같다.

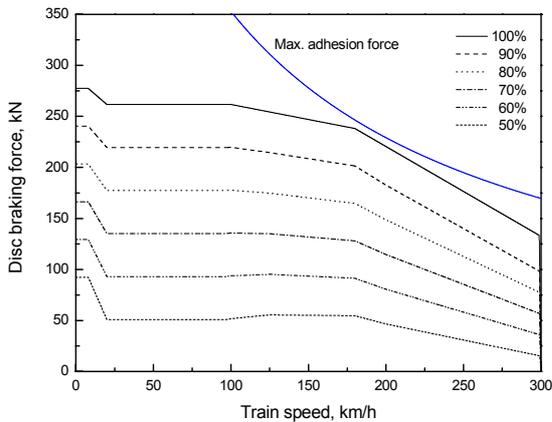


Fig. 2 Disc braking force pattern of present case

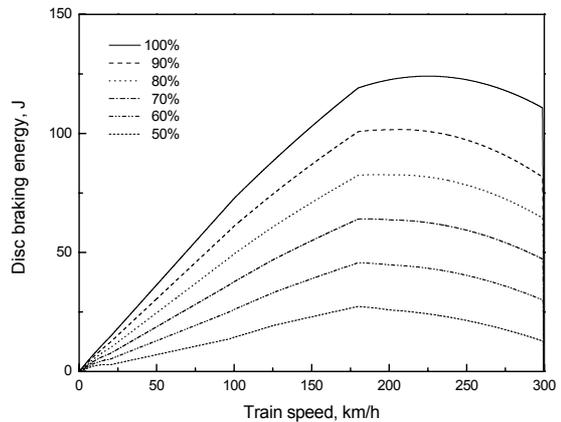


Fig. 3 Disc braking energy for the present force pattern

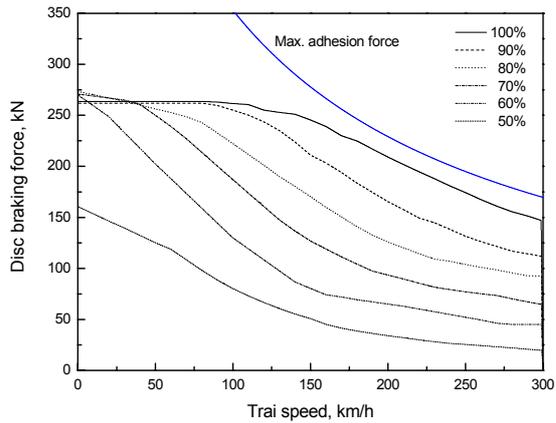


Fig. 4 Optimized disc braking force pattern

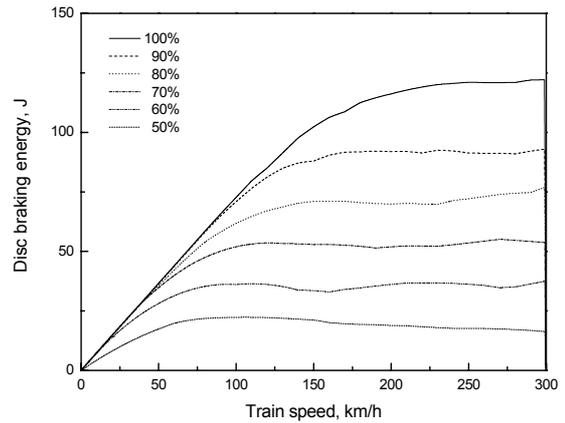


Fig. 5 Disc braking energy of the optimized force pattern

3.2 최적화 결과 검토

최적화 연산 횟수에 대한 목적함수의 수렴도를 확인하기 위하여 연산 횟수에 따른 분산값의 변화를 각 제동 지령 크기에 따라 나타내면 그림 6과 같다. 연산 횟수가 600회 이상이 되면 목적함수인 분산값은 큰 변동이 없이 수렴하는 것을 알 수 있다. 따라서, 최적화 계산 결과는 수렴도 측면에서 충분한 것으로 판단된다.

최적화 수행을 위한 목적 함수인 디스크 제동에너지의 분산값을 기존 패턴과 최적화를 수행한 결과 패턴에 대하여 비교하면 그림 7과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 최적화 패턴에 해당하는 분산값은 기존 패턴의 경우에 비하여 100 % 지령인 경우 97 %, 50 % 지령인 경우 27 % 수준으로 감소함을 알 수 있으며, 상용제동 100 %인 경우에는 분산값의 차이가 비교적 작는데 이는 제동거리를 만족하기 위하여 고속영역에서 저속영역까지 전영역에 걸쳐 큰 제동력이 투입되기 때문인 것으로 판단된다.

기존 상태 및 최적화 수행 결과에 대한 디스크 제동력 패턴 및 제동에너지를 각 제동 PWM 신호가 100% 및 70%인 경우에 대하여 나타내면 그림 8 및 그림 9와 같다. 이를 살펴보면 최적화를 수행한 제동력은 기존의 제동력 패턴에 비하여 고속영역에서는 제동력이 줄어들며, 저속 영역에서는 최적화 제동력이 기존의 경우에 비하여 커지는 것을 알 수 있다. 제동 에너지는 최대값은 줄어들고 균일하게 분포하는 영역이 확대됨을 알 수 있다.

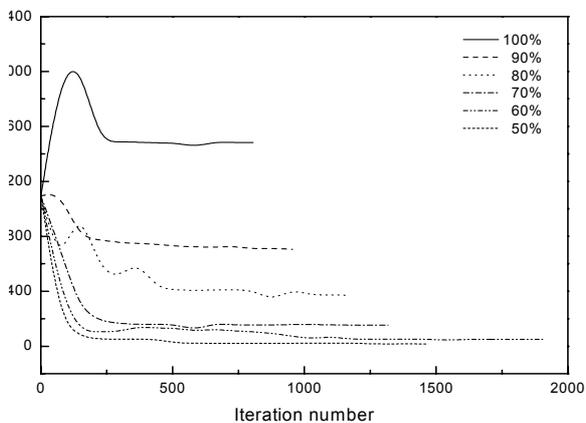


Fig. 6 Convergence of the variance according to the iteration number

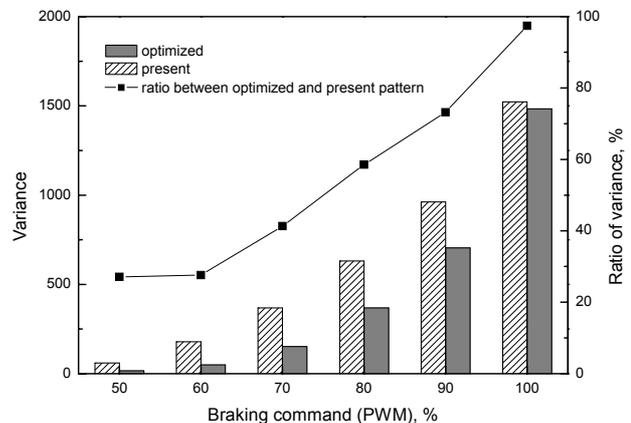


Fig. 7 Comparison of the variance of braking energy between present and optimized pattern

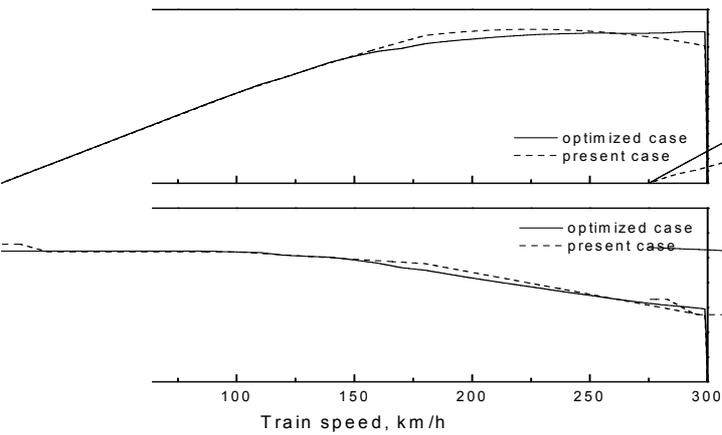


Fig. 8 Comparison of disc braking force and braking energy between present and optimized cases (PWM 100%)

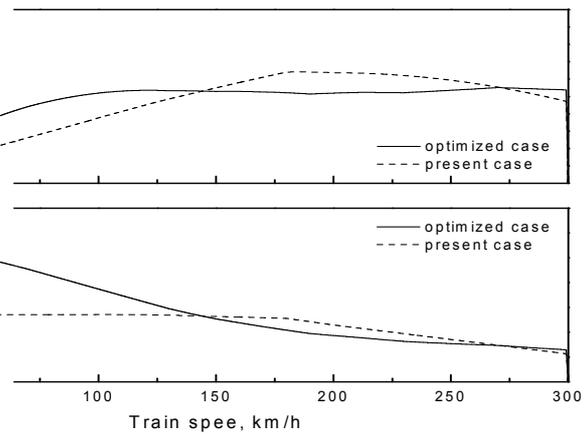


Fig. 9 Comparison of disc braking force and braking energy between present and optimized cases (PWM 70%)

4. 결론

디스크 제동장치의 패드에 대한 마모량을 최소화하기 위하여 제동체결과정에서 작용하는 디스크 제동력에 의한 디스크 에너지의 분산을 목적함수로 하여 이를 최소로 하는 최적화 해석을 수행하였으며, 제안한 최적화 방법에 의한 최적화 결과는 다음과 같다.

(1) 기존의 디스크 제동력 패턴과 비교하여 200 km/h 이상의 고속영역에서의 제동력이 감소하고 저속영역에서의 제동력이 증가하는 패턴을 구할 수 있었으며, 이에 따라 패드의 마모량은 감소할 것으로 판단된다.

(2) 순간제동에너지의 최대값은 감소하였으며, 전체 제동체결 과정에서 제동에너지가 평탄하게 분포되는 부분이 확대된다.

(3) 제동 초기 과정인 고속에서의 순간제동에너지의 크기가 감소함에 따라 제동 초기에 마찰재의 급격한 온도상승을 방지하고 이에 따라 열에 의한 마찰재의 손상이 줄어들 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 단순히 요구제동거리를 만족하는 제동력 패턴의 설정 방법이 아니라 마찰재의 마모를 고려하여 제동력 패턴을 설정하는 하나의 방법론으로 제동에너지의 분산을 최소화 하는 방법을 제안하였으며, 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] Pheonix Integration, Inc., ModelCenter V. 4 Manual, 2002
 [4] Vanderplaats, G. N., Numerical optimization technique for engineering design, McGraw-Hill Book Company, 1989