

철도차량용 와전류 브레이크의 다중 인자 분석

Analysis of Multiple Factor of the Eddy Current Brake for Railway Application

이 장 무* · 박 현 준* · 조 수 영** · 이 주** · 이 형 우†
 (Chang-Mu Lee · Hyun-Jun Park · Sooyoung Cho · Ju Lee · Hyung-Woo Lee)

Abstract - This paper is analysis of multiple factor that should be considered in the design of an eddy current brake used as auxiliary brake system. The eddy current brake is a brake that generates a braking torque in a rotational direction opposite to the direction of the rotor by using a time-varying magnetic flux. The eddy current brake has the advantage of being able to take high current densities because this is used for a short period of time. Also, the eddy current brake is influenced by multiple factor such as number of slots, teeth width, coating thickness, air-gap length and so on. Therefore the eddy current brake was designed for use in railway application in consideration of the operation region and critical parameters.

Key Words : Eddy current brake, Auxiliary brake, Braking torque

1. 서 론

현재 철도 차량에서는 회생 제동과 공기 제동을 혼합한 방식으로 차량을 제동시킨다. 차량에서 제동을 체결하기 위한 요구제동력에 따라 일차적으로 회생제동이 사용되며, 회생제동력이 요구제동력보다 작을 경우 공기제동이 체결되어 요구제동력을 만족시키게 된다. 회생 제동의 경우 일반적으로 유도가 이용되고 있고, 이는 그림 1에 나타나있는 것처럼 일정 속도 이전까지는 제동력이 크지만 고속 영역에서는 제동력이 떨어진다는 단점을 가지고 있다.

회생제동력의 부족분을 보완하기 위하여 사용되는 공기제동은 그림 2에 나타나 있는 것처럼 차지하는 공간이 크고, 공기압력의 전달지연에 의한 느린 제동응답, 제동압력의 불균일성, 마찰 면에 따른 마찰력의 변화, 높은 유지보수비용 등의 단점으로 인해 실시간으로 제동력이 필요한 철도시스템의 무인자동화 및 고속화에 한계를 주게 된다. 또한, 공압을 이용하는 기계식 제동방식인 담면 제동과 디스크 제동은 브레이크슈와 같은 마찰 재를 사용함으로 인해 소음 문제 및 분진 문제가 있다.[1, 2]

본 논문에서 제안하는 와전류 브레이크는 비 접촉방식으로 제동력을 발휘하는 브레이크로서, 제동 응답성이 빠를 뿐만 아니라 고속영역에서 큰 제동력을 얻을 수 있고 유지보수비용도 낮으며 소음 문제가 해결되는 등 여러 장점을 가지고 있다. 이러한 장점

으로 인하여 차량의 제동력을 보조하기 위해 후주의 Industrial brake&Friction supply사와 SIGRA사, 독일의 Telma사와 Voith사,

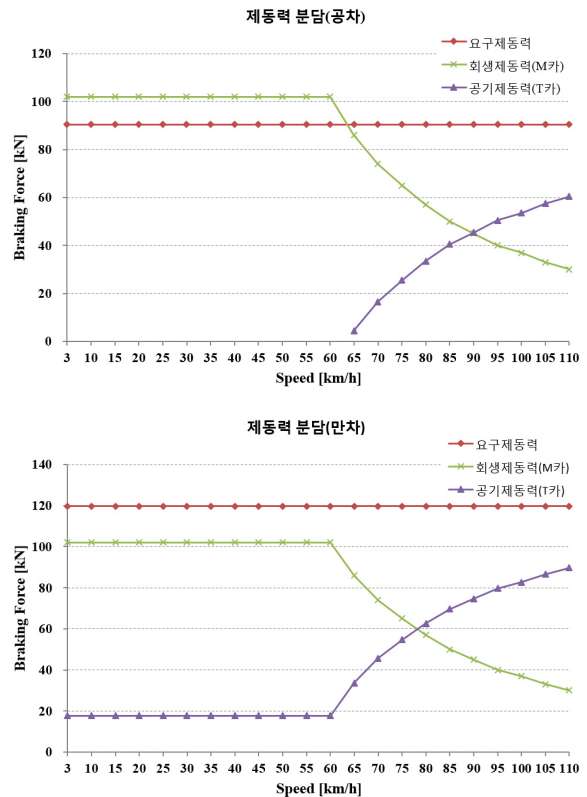


그림 1 M/T카 제동력 분담(공차·만차 상태)

Fig. 1 Sharing of braking force of M/T car (Unloaden Full situation)

† Corresponding Author : Dept. of Railway Vehicle System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea

E-mail : krhwlee@ut.ac.kr

* Korea Railroad Research Institute, Korea

** Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea

Received : August 19, 2015; Accepted : August 28, 2015

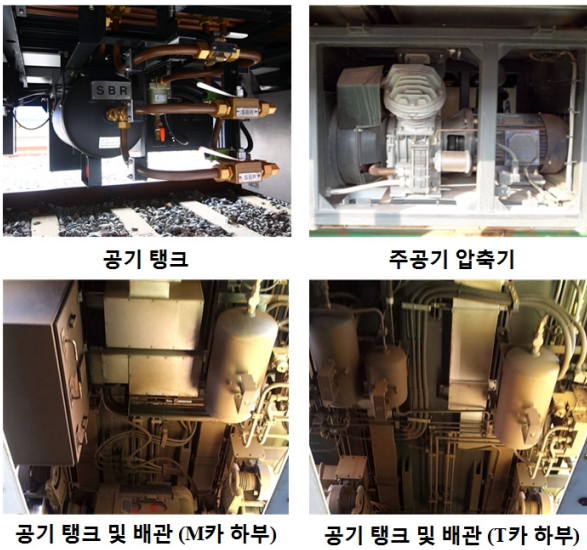


그림 2 철도차량 공기제동장치
Fig. 2 Air brake system of railway application

중국의 CAMA사와 Auhui Pioneering Electromagnetic Clutches 사 등에서 와전류브레이크를 연구 및 생산하여 대형 버스 및 트럭에 적용하였다. 또한, 독일철도(DB; Deutsche Bahn)에서는 2008년에 ICE3에 와전류 브레이크를 장착하여 운행하는 것에 대하여 프랑스의 승인을 받았다. 하지만, 철도 분야에서 연구되고 있는 와전류 브레이크는 선형 와전류 브레이크이다. 이는 본 논문에서 제안하는 Drum식 와전류 브레이크와 다르게, 공극 길이가 클 뿐만 아니라 제동력을 요구할 때마다 차상과 레일사이의 간격이 변동할 수 있어 제동력의 변동 크게 된다는 단점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 고속영역에서 큰 제동력을 얻을 수 있는 Drum식 와전류 브레이크의 제동력에 영향을 미치는 중요 인자를 분석하였다.

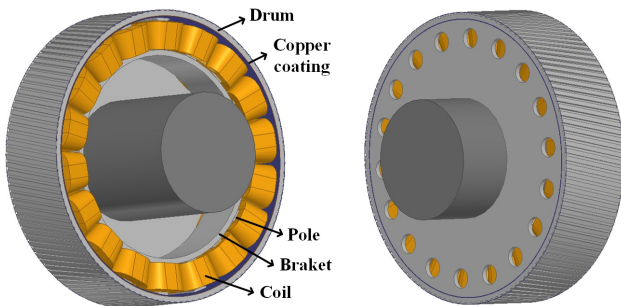


그림 3 Drum식 와전류 브레이크
Fig. 3 Eddy current brake of Drum type

2. 본 론

본 논문에서 제시하는 철도차량용 와전류브레이크는 그림 1에 나타난 것과 같이 공기 제동력을 요구하는 운전속도 60~110

[km/h](= 370~679[rpm]);(* 도시철도 차량 전동기의 실 직경 860[mm]를 이용하여 환산한 속도)를 고려하여 최대 운전속도를 700[rpm]으로 설정하였다. 또한, 이 와전류브레이크는 DC전압으로부터 고정자 권선에 입력을 받는 시스템이고, 출력 토크 향상을 위하여 선형 와전류 브레이크에 비해 공극 길이를 줄일 수 있는 Drum식 와전류 브레이크의 축소모델을 설계하였다.

2.1 슬롯 수 선정

Drum의 폭과 Braket 폭이 고정된 상태에서 와전류 브레이크의 슬롯 수를 선정하기 위하여, 그림 4와 같이 10, 20, 30, 40슬롯을 가진 모델을 기본 모델로 선정하였다.

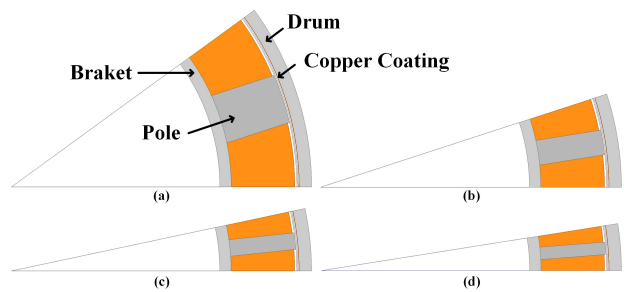


그림4 와전류 브레이크의 기본모델
Fig. 4 Basic model of the eddy current brake
(a) 10slots (b) 20slots (c) 30slots (d)40slots

표 1 기본모델 공통사항

Table 1 Common specifications of the basic model

Content	Value	Unit
Drum 외경	291	mm
Drum 폭	6	mm
Braket 폭	5.5	mm
극 끝단 길이	240	mm
Coating 길이	0.15	mm
전류 밀도	6.92	A/mm ²
기자력	29040	Aturn

이 기본 모델들은 표 1과 같이 Drum의 폭과 Braket폭이 같고, 공극부분과 만나는 극 끝단의 길이가 같으며, 기자력 및 전류 밀도가 같은 조건하에서 슬롯 수에 따른 속도별 출력 토크 값을 FEM 해석을 통해 비교 분석하였다.

그림 5를 보면 기자력 및 전류 밀도가 모두 동일하지만, 슬롯 수에 따라 출력 토크 값이 다르다는 것을 확인할 수 있다. 이는 그림 6에 나타난 것처럼 10슬롯 모델의 경우 자기 포화로 인하여 20슬롯 모델보다는 토크 값이 작게 나왔다는 것을 알 수 있다. 또한, 30슬롯과 40슬롯을 가진 모델의 경우 20슬롯보다는 낮은 자속밀도가 철심에 형성이 되어 토크 값이 작게 나왔다는

것을 알 수 있다. 즉, 운전 속도 범위가 700[rpm] 이하인 것을 고려하면, 자기포화를 고려하여 20슬롯을 가진 모델을 선정해야 한다는 것을 알 수 있다.

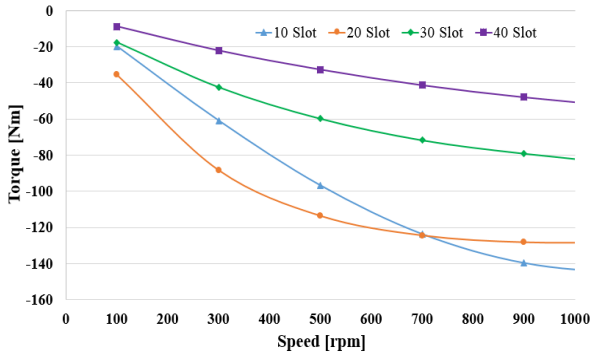


그림 5 동일 전류밀도와 기자력조건하에서 슬롯 수에 따른 속도 토크 곡선

Fig. 5 Speed-torque curve according to the number of slots under the condition of same current density and the magnetomotive force

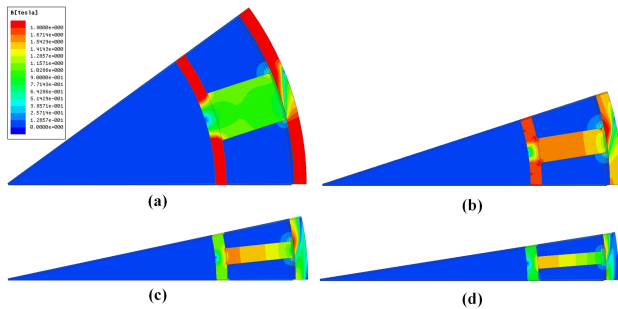


그림 6 기본모델의 자속밀도

Fig. 6 Flux density of the basic model
(a) 10slots (b) 20slots (c) 30slots (d) 40slots

2.2 중요 파라미터에 대한 영향 분석

표 2 20슬롯을 가지는 기본 모델 사양

Table 2 Specifications of the basic model with 20 slots

Content	Value	Unit
Drum 외경	291	mm
Drum 폭	6	mm
Braket 폭	5.5	mm
Pole 폭	12	mm
Coating 길이	0.15	mm
공극 길이	1	mm
공급 전압	128	V
병렬회로 수	1	-

위의 결과를 바탕으로 표 2와 같은 사양을 가지는 20슬롯의 모델을 기본 모델로 선정하였다. 와전류 브레이크의 설계 시 여러 파라미터가 출력 토크에 영향을 미치지만, 이 논문에서는 자기포화에 영향을 주는 Pole 폭과 와전류 발생을 증가시켜 토크 향상에 기여하는 구리 코팅두께 및 공극 길이에 따른 영향을 분석하였다.

2.2.1 Pole 폭에 따른 영향

표 2의 기본모델 사양을 바탕으로 권선의 직경이 동일한 상태에서 Pole폭의 변동에 따른 출력 토크의 영향을 알아보기 위하여 FEM 해석한 결과는 그림 7과 같다.

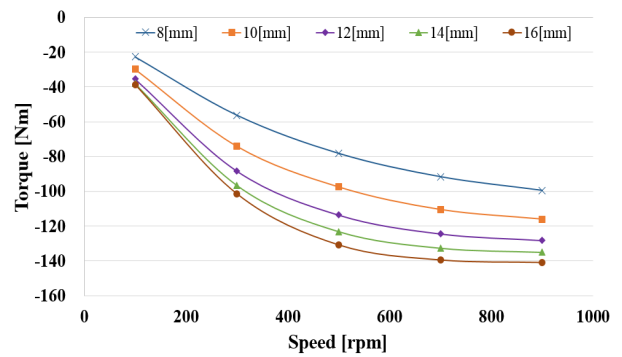


그림 7 Pole 폭에 따른 출력토크

Fig. 7 Output torque according to the Pole width

이와 같이 Pole 폭에 따라 출력토크 값이 바뀌는 이유에 대해 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 만약 Pole 폭이 줄어들게 된다면 슬롯의 면적이 증가하게 되고, 이에 따라 동일한 권선 직경을 사용하게 되면 턴 수를 증가시킬 수 있게 된다. 또한 턴 수가 증가하게 되면 저항 값도 증가하기 때문에 전기회로의 옴의 법칙에 따라(Ohm's law) 전압이 고정된 상태이므로 전류는 감소하게 된다. 하지만 $\Phi = NI/R$ 을 구성하는 릴럭턴스 값은 식 (1)의 관계에 따라 Pole 폭이 줄어들어 상승하게 된다. 따라서 기자력의 변화가 미비하지만 자기저항 값은 Pole 폭의 변동에 따라 큰 영향을 받게 된다.

$$R = \frac{l}{\mu S} = \frac{l_{Pole}}{\mu_r \mu_0 W_{Pole} N_{Poles} L_{shaft}} \quad [\Omega] \quad (1)$$

여기서 l_{Pole} 은 Pole의 길이[mm], W_{Pole} 은 Pole 폭[mm], N_{Poles} 은 Pole의 개수, L_{shaft} 는 축 방향 길이[mm]이다.

즉, 그림 7에 나타난 것처럼 Pole 폭이 줄어들 때 릴럭턴스 값이 상승하고 자속 값은 줄어들어 출력 토크가 감소하게 된다. ($\Phi \propto T$) 그러나 이러한 원리에 따라 출력 토크를 향상시키기 위해 Pole 폭을 무조건 늘리는 것은 좋지 않다. Pole 폭을 늘리게 되면 권선에 인가되는 전류 값이 상승하게 되어 기기에서 요구하는 전류밀도 값을 넘어설 수 있기 때문이다. 따라서 전류밀

도를 고려하여 적절한 Pole 폭을 선정하는 것이 중요하다.

2.2.2 구리 코팅 두께에 따른 영향

와전류 브레이크의 출력 토크를 향상시키기 위해서는 Drum 의 표면에 Drum보다 도전율이 더 높은 구리 코팅을 입히는 방법을 사용한다. 구리 코팅을 입히면 좀 더 도전성이 좋아질 뿐만 아니라, 자기저항에 대한 식인 식 (2)의 관계에 따라 구리코팅 부분의 자기저항이 작아지게 된다. 즉, 자기저항이 작아지게 되면 동일 기자력이 발생하였을 때, $\Phi = NI/R$ 의 관계에 따라 자속이 좀 더 크게 발생하게 된다.

$$R = \frac{l}{\mu S} = \frac{l_{copper\ coating}}{\mu_r \mu_0 \frac{360^\circ}{N_{poles}} R_g L_{shaft}} \quad [\Omega] \quad (2)$$

여기서 $l_{copper\ coating}$ 은 구리코팅의 두께[mm], N_{Poles} 은 Pole의 개수, R_g 는 공극의 반경[mm], L_{shaft} 는 축 방향 길이[mm]이다.

즉, 자속 발생량이 증가하면 공극자속밀도가 커지고, 식 (3)의 관계에 따라 와전류브레이크의 최대 토크가 커지게 된다.

$$T_m = \frac{K_m}{\pi} \frac{1}{\mu_0} (\pi R^2 L) B_0^2 \quad [Nm] \quad (3)$$

여기서 K_m 은 비투자율에 영향을 받는 계수이고, R 은 회전자 반경[mm], L 은 축 방향 길이[mm], B_0 는 공극자속 밀도[T]이다.

즉, 보통 전동기의 출력 토크 값과 유사하게, 전동기의 부피에 비례하고, 공극자속밀도의 크기에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다[3].

와전류 브레이크의 공극길이를 일정하게 두고, Drum내경을 구리 코팅 두께만큼 줄여 FEM 해석한 결과는 다음과 같다.

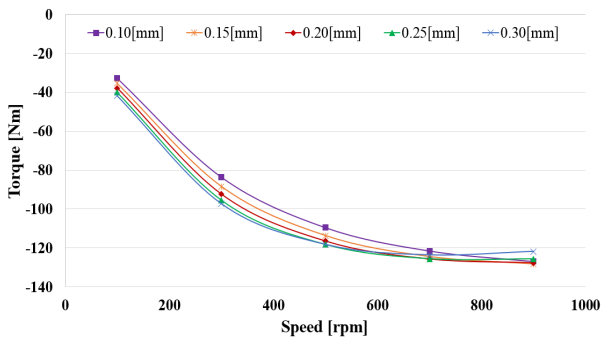


그림 8 구리 코팅 두께에 따른 출력토크
Fig. 8 Output torque according to the copper coating length

그림 8을 토대로 하여 운전 속도 범위에 따른 출력 토크를 고려해 보면 구리 코팅의 두께가 두꺼울수록 좋다고 말할 수 없다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 구리 코팅의 투자율은 공극의

투자율과 유사하기 때문에, 자기저항이 증가하게 되기 때문이다. 따라서 이 모델의 경우 운전 속도영역이 500[rpm] 이하 영역에서 다른 속도영역에 비해 좀 더 큰 제동력을 요구할 경우에는 구리코팅 두께를 0.3[mm]로 가져가는 것이 타당하지만, 500[rpm] 이후 속도영역에서 큰 제동력을 요구할 경우는 0.2[mm]로 구리 코팅 두께를 선정해야한다.

2.2.3 공극 길이에 따른 영향

와전류 브레이크의 공극길이에 따른 영향은 그림 9와 같다. 즉, 공극 길이가 증가할수록 속도별 출력토크 값이 감소하게 된다. 그 이유는 공극은 투자율이 작기 때문에, 자기저항 값이 커져서 자속의 값이 작아지기 때문이다. 따라서 선형 전동기보다는 Drum 타입의 와전류 브레이크가 출력토크 향상에 좋다는 것을 알 수 있고, 공극 길이는 제작성을 고려하여 선정해야한다.

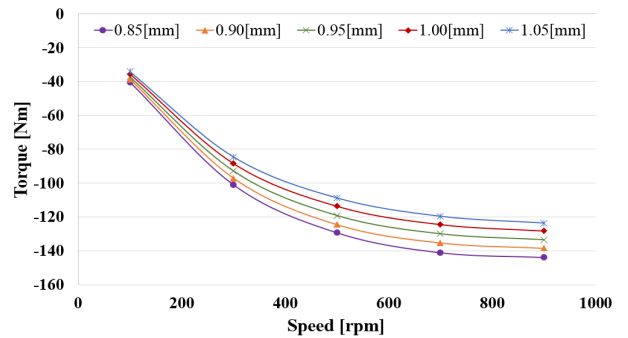


그림 9 공극길이에 따른 출력토크
Fig. 9 Output torque according to the air-gap length

2.2.3 Drum 두께에 따른 영향

와전류 브레이크의 Drum 두께에 따른 영향을 고려하기 위하여 Drum 내경은 고정된 상태에서 Drum의 외경을 증가시켜 FEM 해석을 한 결과는 다음과 같다.

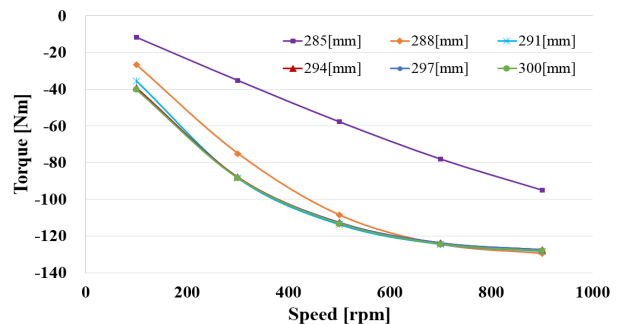


그림 10 Drum 두께에 따른 출력 토크
Fig. 10 Output torque according to the Drum width

그림 10을 보면 Drum의 외경을 증가시켜 Drum의 두께를 늘린 결과 Drum의 외경이 291[mm] 이상인 경우 출력토크 값 차이가 미비하다는 것을 알 수 있다. 즉, 그림 11에서 나타난 것처럼 일정 두께 이상에서는 자속흐름이 거의 없다는 것을 알 수 있다. 하지만, 285[mm]의 경우에는 Drum에 전체적으로 포화가 발생하여 다른 두께에 비해 출력토크가 작다는 것을 알 수 있다.

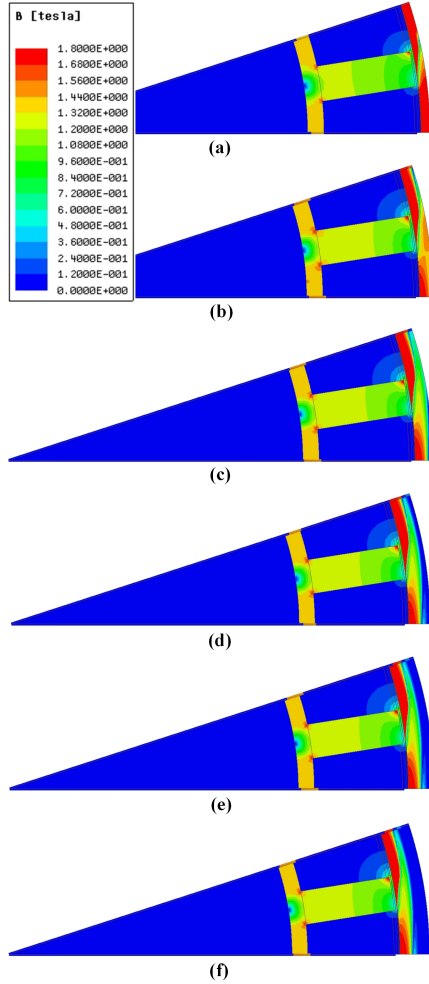


그림 11 Drum 외경에 따른 자속 분포 : Drum 외경
Fig. 11 Magnetic flux distribution according to the external diameter of the Drum
 (a) 285[mm] (b) 288[mm] (c) 291[mm]
 (d) 294[mm] (e) 297[mm] (f) 300[mm]

2.3 병렬회로 수에 따른 영향

와전류 브레이크는 제동 시 10~30초 이내 정도로 잠깐 구동되기 때문에 다른 전기기기에 비하여 높은 전류 밀도를 가져갈 수 있다는 장점이 있다. 따라서 병렬회로를 이용하여 전류 밀도를 좀 더 높게 가져간다면 와전류 브레이크의 제동력을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다.

표 3은 전압원 시스템에서 병렬회로 수를 변경 시 전류밀도의 변화를 나타내고, 병렬회로를 이용하여 FEM 해석한 결과 그림 12와 같다.

표 3 병렬회로 수에 따른 전류밀도

Table 3 Current density according to the number of parallel circuits

Content		Value	Unit
공급 전압		128	V
전류 밀도	병렬회로 수 = 1	6.92	A/mm ²
	병렬회로 수 = 2	13.84	A/mm ²
	병렬회로 수 = 3	20.77	A/mm ²

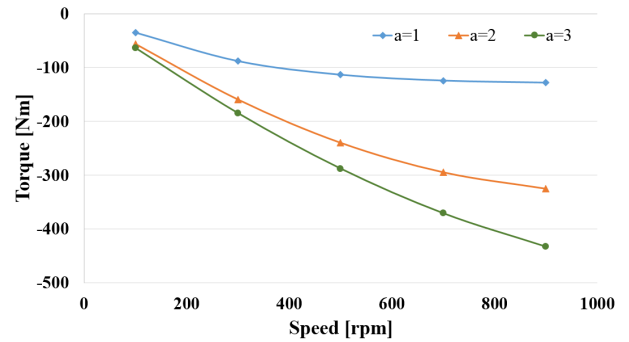


그림 12 병렬회로 수에 따른 출력 토크

Fig. 12 Output torque according to the number of parallel circuits

즉, 그림 12를 보면 병렬회로 수를 증가 시 출력토크가 향상되었다는 것을 알 수 있다. 하지만 실질적으로 코일에 흐를 수 있는 전류밀도의 한계가 있기 때문에 전류밀도를 고려하여 병렬회로 수를 정해야한다.

3. 결 론

본 논문은 철도차량의 공기 제동을 대체하기 위하여 비접촉식으로 제동력을 발휘할 수 있는 와전류 브레이크의 설계 시 영향을 미치는 주요 인자에 대하여 분석을 하였다. 와전류 브레이크는 Pole 폭과 구리 코팅 두께, 공극의 길이 등에 대해 영향을 받게 된다. Pole 폭의 경우 폭이 변화에 따라 릴럭턴스가 바뀌고, 권선의 턴 수와 전류가 반비례 관계로 변한다. 따라서 기자력의 변화보다는 릴럭턴스의 영향을 크게 받고 Pole 폭이 증가 시 출력 토크가 커졌다. 또한, 구리 코팅의 경우 Drum 표면에 자기저항을 줄이고 와전류 발생을 키워 좀 더 자속을 크게 하지만, 너무 두께가 커지는 경우에는 자기저항이 커져 토크를 오히려 떨어트리게 된다는 것을 분석하였다. 그리고 Drum의 두께를 조절하

여 출력토크를 분석한 결과, 자속포화가 풀리는 지점 이상의 두께에서는 두께가 커져도 출력 토크 향상에 기여하지 못한다는 것을 분석하였다. 또한, 전류밀도를 높이기 위하여 병렬회로를 이용하는 방법을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Dangeam, S. and Kinnares, V., "A design of eddy current brake for rail vehicle training set," International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 2294-2299, Oct.2014
- [2] Fanping Bu and Han-Shue Tan, "Pneumatic Brake Control for Precision Stopping of Heavy-Duty Vehicles," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.15, Issue 1, pp. 53-64, Jan. 2007
- [3] S. Sharif, J. Faiz, and K. Sharif, "Performance analysis of a cylindrical eddy current brake," IET Trans. Electric Power Applications, Vol.6, Issue 9, pp. 661-668, Nov. 2012
- [4] Davies, E.J. "General theory of eddy-current couplings and brakes," IET Trans. on Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol.113, Issue 5, pp. 825-837, May 1966
- [5] Gulbahce, M.O., Kocabas, D.A., and Atalay, A.K. "A study to determine the act of excitation current on braking torque for a low power eddy current brake," IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), pp. 1321-1325, May 2013
- [6] Holtmann, C., Rinderknecht, F., and Friedrich, H.E., "Simplified model of eddy current brakes and its use for optimization," Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), pp. 1-8, March-April 2015
- [7] Anwar, S. and Stevenson, R.C., "Torque characteristics analysis of an eddy current electric machine for automotive braking applications," American Control Conference, June 2006

저 자 소 개



이 장 무 (Chang-Mu Lee)

1969년 10월 4일생. 1991년 한양대학교 공대 전자통신공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전자통신공학과 졸업(석사), 2013년 고려대학교 전기공학과 졸업(박사), 1997~현재 한국철도기술연구원 책임연구원
E-mail : cmlee@krri.re.kr



박 현 준 (Hyun-Jun Park)

1957년 6월 24일생. 1981년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기정보 제어공학과 졸업(박사). 1996년 장영실상 수상. 1997년~현재 한국철도기술연구원 수석연구원



조 수 영 (Sooyoung Cho)

1991년 5월 17일생. 2013년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2013년~현재 한양대학교 전기공학과 석박사통합과정.
Tel : 02-2220-0349
E-mail : jsy0593@naver.com



이 주 (Ju Lee)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수.
Tel : 02-2220-0349
E-mail : Julee@hanyang.ac.kr



이 형 우 (Hyung-Woo Lee)

1974년 1월 11일 생. 1998년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 Texas A&M University 졸업(박사). 2004년 Department of Theoretical and Applied Mechanics, Corenll Universiy 박사 후 과정. 2005년 한양대학교 BK division 계약 교수. 2006~2012 한국철도기술연구원 Senior researcher 재직. 2013년~현재 국립한국교통대학교 부교수.
Tel : 070-8855-1652
E-mail : krhwlee@ut.ac.kr