

영구자석을 이용한 Shield moving형 와전류 제동기의 철도시스템 적용연구

The Study on Shield Moving ECB with PM for Application of Railway Vehicle

이 장 무[†] · 한 경 희* · 최 유 영**
 (Chang-Mu Lee · Kyung-Hee Han · Yu-Young Choi)

Abstract - The railway ECB(Eddy Current Brake) is used for high speed vehicle of railway like as TGV, ICE, JR-500 because it has stable braking force at high speed. But it is not effective at low speed and it is difficult to save energy due to the excitation of electro-magnet. Although ECB with permanent magnet is used for roller-coaster, it can not control the braking force without clutch.

In this paper, the shield moving ECB with PM is proposed for application of railway vehicle. The angle of shield can be changed for various braking force. It changes the flux amount from PM, then the braking force will be reduced. The brake of 800W is simulated by using the software, "Ansoft Maxwell". The characteristics of braking will be shown by the shapes of magnet, disk and various speeds.

Key Words : Eddy Current, ECB(Eddy Current Brake), Railway vehilce, PM(Permanant Magnet)

1. 서 론

열차를 안전하게 운전하기 위해서는 기동, 가속, 정지 등의 제어장치와 속도제한 및 정차 등을 위한 제동장치(Brake)가 구비되어야 한다. 제동이란 운동하는 물체의 에너지를 다른 에너지(전기, 마찰, 열)로 변환하여 발생한 열차의 움직임에 반발하거나 열차를 정지 상태로 유지하기 위해 어떤 힘이 생성되는 과정을 말한다.

제동장치는 제동형태, 제동매개체, 제동방식별로 분류할 수 있다. 우선 제동형태에 따라 분류하면 Drum Type과 Disk Type이 있으며, 일반적으로 방열 효과가 큰 Disk Type의 제동력이 Drum Type보다 크고 설치 면적이 적은 장점을 갖는다. 더불어 제동장치는 매개체에 따라 유체에 의한 공기제동, 유압제동, 증기제동, 진공제동으로 분류한다. 또한 전기/전자적 매개체에 의해서는 발전제동, 회생제동, 와전류제동이 있으며, 기계적 매개체에 의해서는 수동(Hand)제동이 있다. 제동방식을 분류하는 방식으로는 차륜과의 점착, 즉 미끄러지지 않는 상태를 이용하는 방식과 점착력에 의존하지 않는 비점착 방식으로 나뉘며 이에 대한 분류는 아래 그림과 같으며, 용도에 따라 각기 사용하는 형식을 달리한다. 최근에는 전기제동(회생제동)과 공기제동의 병용식이 주로 사용되고 있다.

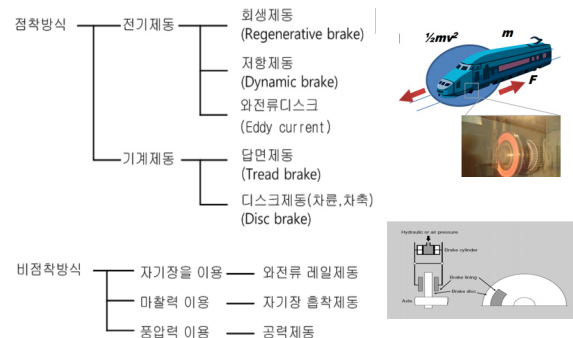


그림 1 제동방식의 분류
 Fig. 1 Braking Methods

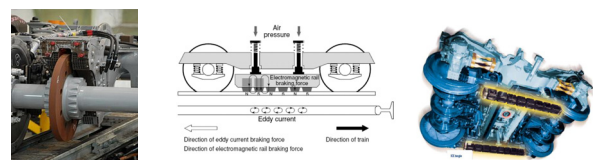


그림 2 와전류 제동 방식
 Fig. 2 ECB Methods

공기제동의 경우, 국내에 적용되고 있는 철도차량의 공압식 제동시스템은 오랜 사용기간을 바탕으로 그 안정성과 신뢰성이 검증되었음에도 불구하고, 컴프레서, 탱크 등 공압부품이 차지하는 공간이 너무 크고, 높은 유지보수비용, 공기배관 노후화 공기누설 및 압력 저하에 의해 발생하는 제동력 저하와 제습 및 먼지제거 장치의 잦은 고장유발, 고속/고중량화 되는

[†] Corresponding Author : Korea Railroad Research Institute, Korea.

E-mail: cmlee@krii.re.kr

* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Halla University, Korea.

** Kinemotion Co., LTD

Received : October 21, 2014 ; Accepted : October 30, 2014

철도시스템에 비교하여 낮은 제동력, 그리고 제동지력 전달의 비효율성 등이 철도시스템의 경량화와 고속화를 방해하는 한계요소로 작용하고 있다. 이를 극복하기 위한 제동방식으로 최근 고속철도에 적용되고 있는 와전류제동기를 들 수 있다.

와전류 제동은 그림 2와 같이 디스크 제동방식과 레일 제동방식으로 크게 나누어 볼 수 있다. 와전류 디스크 제동기는 차축에 장착된 원반(브레이크 디스크)을 전자석 사이에 있는 제동 장치에서 원반이 회전하면 전자석에 의해 원반의 표면에 와전류에 의한 자속이 발생하여 전자석의 자력과 와전류 자속 사이에서 흡인력과 반발력이 작용하여 원반의 회전방향과 반대로 제동력이 생성된다. 과거에는 강력한 대형 전자석을 필요로 하여 무게가 유도전동기보다 무겁기 때문에 차량 전체의 무게가 증가되고, 전자석에 의해 전력을 소모하기 때문에 에너지 절약의 측면에서 어려움이 존재하여 1990년대 중반 도시철도에는 회생제동으로 대체되어 왔다.

반면, 와전류 레일 제동기는 레일에 와류를 발생시킨다는 점이 와전류 디스크 제동방식과의 차이점이다. 최근에는 마찰하는 면적을 줄이면서도 필요한 제동력을 얻기 위하여 종래에 마찰제동방식에 의한 마찰열 변환 방식을 벗어나 회생제동과 와전류 레일방식 제동이 선진 고속전철(독일 ICE, 프랑스 TGV, 일본JR-500)의 제동방식으로 채택되고 있다. 특히 와전류 제동방식의 경우 속도가 높아짐에 따라 매우 크고 안정된 제동력을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있다.[1][2] 그러나 저속에서는 효과가 거의 없기 때문에 정차시키기 위한 브레이크는 사용하지 못하고 다른 브레이크 수단과 병용할 필요가 있다.

최근 경량화와 에너지 절약을 위한 와전류 제동방식으로 전자석이 아닌 영구자석을 사용한 와전류 브레이크가 롤러코스터 등에 사용되기도 했지만 제동력을 조절할 수 없는 한계가 있다.

본 논문에서는 이러한 와전류제동기의 특성을 개선하고자 영구자석을 이용하고 Shield를 부착함으로써 여자에 필요한 에너지 소모가 없고, 제동력 조절이 가능한 새로운 구조의 디스크형 와전류 제동기를 제안하고 영구자석의 구성 및 형상, Shield의 형태 등에 따른 제동기의 특성을 전자장 시뮬레이션을 통해 살펴봄으로써 철도 시스템에서의 적용 가능성을 알아보하고자 한다.

2. 본 론

2.1 제안된 와전류 제동기의 원리 및 구조

본 논문에서 제시한 제동기 형태는 정지용 와전류 제동기로서 영구자석에 의한 시불변 자속이 이동 중인 회전 도체판에 의해 쇄교하여 도체 내부에 와전류(Eddy Current)가 발생하고, 이렇게 발생한 와전류는 로렌츠의 법칙에 따라 자속과의 상호 작용에 의하여 제동토크를 발생시키는 원리로 동작한다.

제동기의 구조, 즉, 고정자의 구조나 회전자의 구조의 변화에 따라 제동기의 특성이 각기 다르게 나타난다는 사실은 서보 모터에서와 마찬가지로 예상할 수 있는 사실이다. 기존 디스크형 와전류 제동기의 경우, 고정자가 영구자석으로 구성된 경우에는 발생 토크의 크기를 결정하기 위하여 회전자와 고정자의 이격거리를 조절하는 기계적 클러치를 추가

설치해야 하는 단점이 존재했다. 이러한 점을 감안하여 본 논문에서는 회전자와 고정자의 이격거리(공극의 길이) 조절 대신 고정자와 회전자의 사이에 동축을 사용하며 각도 조절 기능을 갖는 Shield를 설치하여 쇄교하는 자속량을 조절함으로써 토크의 크기를 결정하는 방식을 선택하였다. 또한 본 논문에서 제안하는 와전류 제동장치는 800[W]급 축소모델을 대상으로 하여 제시하는 형상의 속도별 제동력 특성의 효과를 알아보하고자 한다.

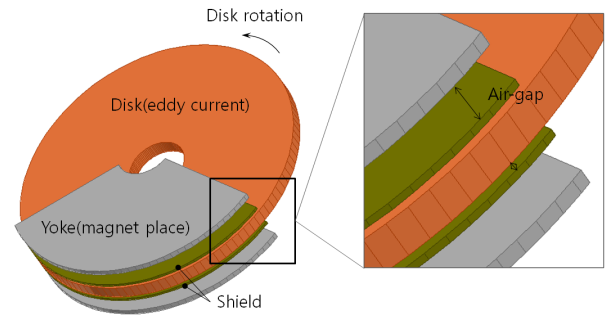


그림 3 Shield moving 와전류제동기 형상(축방향)
Fig. 3 Shield Moving ECB (Axial)

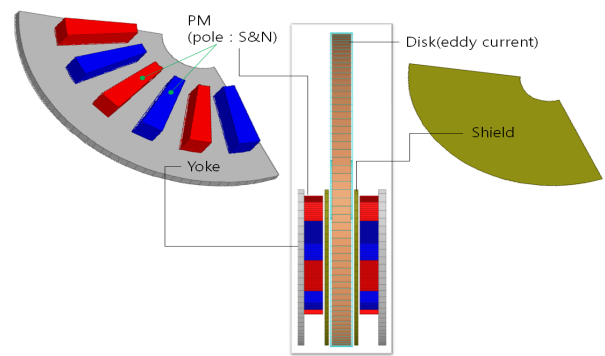


그림 4 Shield moving 와전류제동기 형상(횡방향)
Fig. 4 Shield Moving ECB (Transverse)

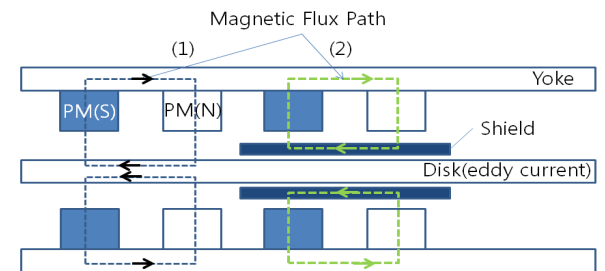


그림 5 와전류 제동기의 Shield에 의한 제동력 제어 원리
Fig. 5 The Principle of ECB (Transverse) by Shield Moving

그림 3과 그림 4는 회전자와 고정자 그리고 Shield의 구조를 나타낸다. 그림 5는 와전류 제동기의 축방향의 측면에서 바라본 제동력 제어 원리를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 본 논문에서 제안한 Shield moving형 와전류 제동기의 고정자에 부착된 영구자석의 자기경로가 모두 (1)의

형태를 갖게 되면 최대 제동력을 갖게 되지만, Shield를 조정하여 영구자석들 중 일부가 (2)의 자기경로를 갖게 되면 제동력이 감소하는 방식이다. 철의 투자율은 구리 혹은 알루미늄의 투자율에 비해 상대적으로 매우 크다 그러므로 영구자석을 지지하는 Yoke의 자기저항과 누설 자속을 무시할 수 있으며, 영구자석(N극)에서 발생하는 자속은 Disk를 통과하여 동일한 Yoke에 부착된 영구자석(S극)을 향해 상대적으로 자기적 저항이 작은 경로를 형성하게 된다.

2.2 제안된 와전류 제동기의 해석방법 및 설계 파라미터

본 논문에서는 와전류 제동기의 일반적 원리를 설명하기 위해 와전류로 인한 전기자 반작용을 무시할 수 있는 저속에서 선형적 토크 특성을 나타내며, 토크특성을 일반화할 수 있는 근사식을 유도하여 그 원리를 개략적으로 설명한다.

회전자를 사이에 둔 고정자의 상하 2극에 의하여, 회전자에 미치는 힘은 디스크에 발생한 와전류 힘으로 다음과 같이 표현할 수 있다. F_{Disk} 는 회전자에서 발생한 제동력을 표시한다.

$$F_{Brake} = F_{Disk} \tag{1}$$

주어진 가정을 고려하여 매우 낮은 속도에서 영구자석과 공극 및 Disk에서의 자속밀도 B는 일정하며 이를 식으로 표현하면 식 (2)와 같다. 여기서 Air-gap은 공극의 길이, 디스크의 두께는 $Disk_Tk$ 이다

$$B = \mu_o \frac{(MMF)}{(Airgap + Disk_Tk)} \tag{2}$$

식(3)에서 와전류밀도 J는 일정하며 σ 는 도전율이며 v는 회전자의 속도를 나타낸다.

$$J = \sigma Bv = \sigma \mu_o \frac{(MMF)}{(Airgap + Disk_Tk)} v \tag{3}$$

$$F_{Disk} = \sigma \mu_o^2 \frac{(MMF)^2}{(Airgap + Disk_Tk)^2} (s \cdot Disk_Tk) v \tag{4}$$

유효자속이 침투하는 구리 혹은 알루미늄의 부피 $s \cdot Disk_Tk$ (s는 극의 면적)에 J^2 / σ_{Disk} 을 곱하여 소요전력을 계산할 수 있으며 전력을 원판의 회전속도로 나누면 극 당의 힘을 알 수 있다. 식 (4)에서 힘은 $Disk_Tk = Airgap$ 일 때 최대가 된다. 그러나 $Airgap$ 과 $Disk_Tk$ 의 합은 공극의 역할을 하므로 공극 $Airgap$ 와 디스크 두께와의 합이 어느 범위를 넘어서게 되면 $Disk_Tk = Airgap$ 는 의미가 없어진다[3,4].

흡인력을 제외한 제동력을 해석하기 위한 Disk 상의 전류밀도는 다음의 식 (5)와 같이 정의하여 해석하였다[5].

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ec} = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_s + \sigma v \times (\nabla \times \vec{A}) \tag{5}$$

여기서, \vec{J}_s 는 영구자석으로 인한 전류밀도이며, \vec{J}_{ec} 는 속도 변화에 의해 발생하는 와전류 밀도를 나타낸다. 이때 $\sigma, \vec{v}, \vec{B}, r$ 는 각각 Disk의 도전율, 속도, 자속밀도, 반경을 나

타내며, 식 (6)~(8)은 이를 이용한 제동력을 나타낸다.

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \tag{6}$$

$$\vec{F} = \int_V \vec{f} dV \tag{7}$$

$$\vec{T}_{Brake} = r \vec{F} \tag{8}$$

그림 6에서 나타낸 모델에서 와전류가 발생하는 Disk의 재질은 구리(Cu)이며, Yoke와 Shield의 재질은 철(Fe)이다. 영구자석은 NdFe35를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 800[W]급 Shield moving형 와전류 제동기의 설계 파라미터는 표 3과 같다.

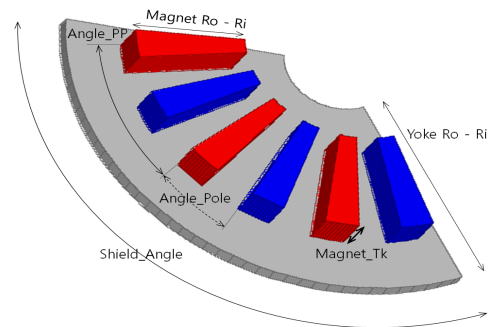


그림 6 Yoke와 영구자석의 주요 파라미터
Fig. 6 Main Design Parameters of Yoke and PM

표 1 Shield moving형 와전류 제동기의 주요 설계 파라미터
Table 1 Main Design Parameters of Shield Moving ECB

Symbol	Machine Parameter	Values	Unit
Eddy_Angle	Spread angle of Eddy current	120	deg
PP	Pole pairs	3	
Disc_Ri	Inner radius of disk	20	mm
Disc_Ro	Outer radius of disk	100	mm
Disc_Tk	Thickness of disk	10	mm
Airgap	Length of Airgap	2	mm
Shield_Ri	Inner radius of shield	20	mm
Shield_Ro	Outer radius of shield	100	mm
Shield_Tk	Thickness of shield	2	mm
Shield_Angle	Spread angle of shield	10	deg
Shield_Gap	Length between shield and disk	1	mm
Magnet_Ri	Inner radius of magnet	40	mm
Magnet_Ro	Outer radius of magnet	80	mm
Magnet_Tk	Thickness of magnet	5	mm
Yoke_Ri	Inner radius of yoke	20	mm
Yoke_Ro	Outer radius of yoke	100	mm
Yoke_Tk	Thickness of yoke	4	mm
Angle_PP	Angle between each pole pairs	Eddy_Angle/PP 40	deg
Angle_Pole	Angle between each poles	Angle_PP / 2 20	deg

2.3 Shield의 각도에 따른 제동력 조절 효과

그림 7은 철(Fe)로 제작된 Shield가 10[deg]만큼만 고정자(Yoke+영구자석)를 가리고 있는 범위에 있다고 가정하고 이때의 Shield의 위치를 각도 4에서 20[deg]로 조절하여 미소하게 변동시켰을 때의 디스크에 분포하는 와전류의 밀도와 쇠교자속밀도(Tesla)의 변화를 나타내고 있다. 동일한 10[deg]의 범위를 갖는 Shield가 Yoke와 겹쳐 있으나 4[deg]의 경우 영구자석을 직접 가리고 있어 Shield를 벗어나는 순간 Disk에서는 시변자속의 급변으로 인해 더 큰 와전류가 발생하는 것을 볼 수 있다. 반면, 20[deg]의 경우 Shield가 yoke와 겹쳐져 있기는 하지만 영구자석을 거의 가리지 못해서 연속적 시변자속을 발생시키므로 disk에 발생하는 와전류는 4[deg]에 비해 작은 값이 분포하는 것을 알 수 있다.

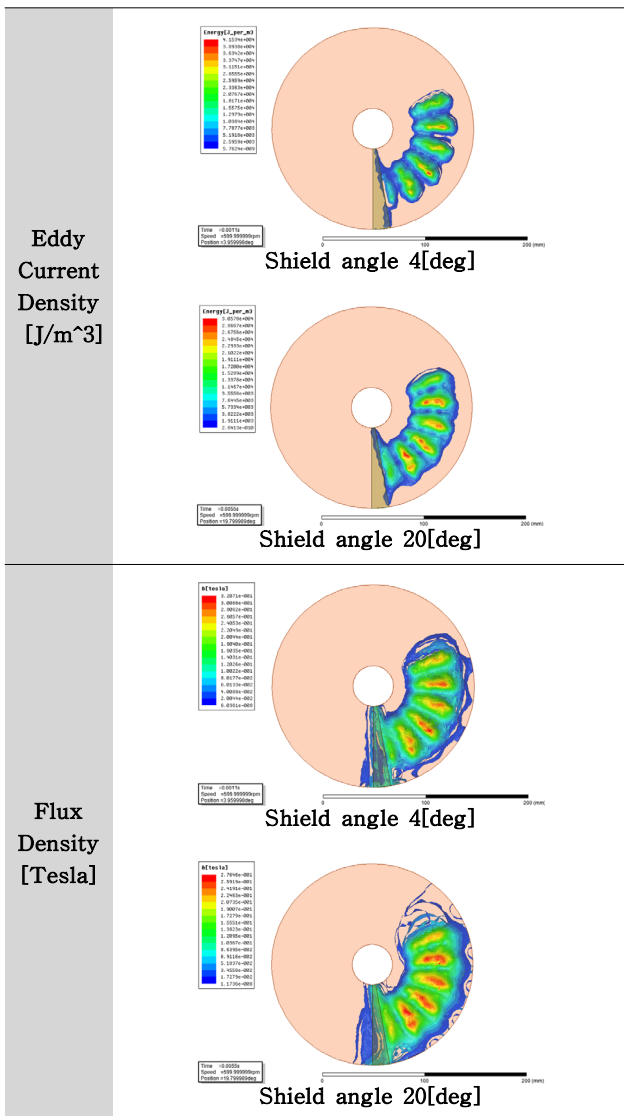


그림 7 Shield 위치에 따른 와전류밀도와 자속밀도의 변화 (10[deg])
 Fig. 7 The Changes of Eddy Current Density and Flux Density by Shield position (10[deg])

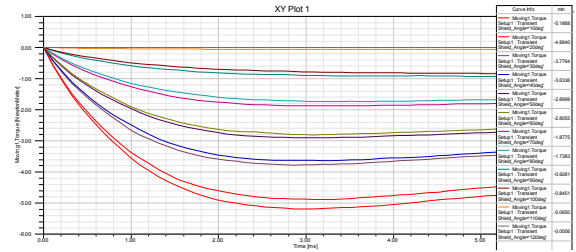


그림 8 Shield angle별 제동력(자석두께 5mm)
 Fig. 8 The Braking Torques by Shield Angle (Magnet Thickness 5mm)

그림 8은 Shield의 각도를 10~120[deg]로 변화하였을 때의 제동력을 표시하였다. Disk회전의 방향을 양의 값으로 표시하므로 그래프에서는 음의 값이 제동력의 크기를 나타낸다. yoke의 영구자석에 의한 자속쇄교가 최대가 되려면 되도록 Shield의 각도가 작아야 하므로 10[deg]에서 약 5.2[Nm]임을 볼 수 있다. 반면 Shield의 각도가 120[deg]로 증가하면 제동력은 0[Nm]에 가깝게 저하되는 것을 볼 수 있으며, 이로써 Shield moving형 와전류 제동기의 Shield 각도에 따른 제동력 조절 능력을 확인할 수 있다.

2.4 제반 설계 파라미터에 따른 제동력 조절 효과

그림 9는 Shield 각도를 120[deg]로 하고 자석의 두께를 각각 5, 10, 15, 20[mm]로 조절하였을 때의 제동력을 나타냈다. 시뮬레이션 결과, 자석의 두께가 늘어날수록 제동력이 증가하였으며, 5[mm]에서 10[mm]로 변화할 때 제동력의 증가가 월등한 것을 알 수 있다.

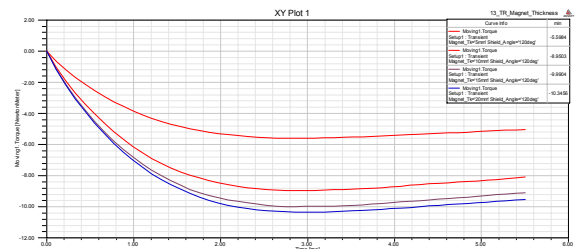


그림 9 자석 두께별 제동력(Shield Angle 120[deg])
 Fig. 9 The Braking Torques by Magnet Thickness (Shield Angle 120[deg])

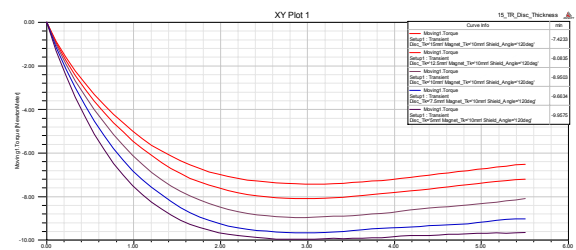


그림 10 디스크 두께에 따른 제동력(자석두께 10mm/Shield angle 120[deg])
 Fig. 10 The Braking Torques by Disk Thickness (Magnet Thickness 10mm /Shield Angle 120[deg])

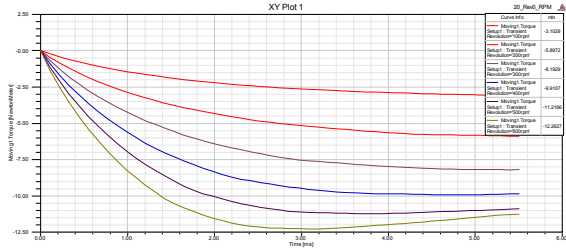


그림 11 회전속도에 따른 제동력(자석두께 10mm/Shield Angel 120(deg))

Fig. 11 The Braking Torques by Speed Variation(Magnet Thickness 10mm /Shield Angle 120(deg))

그림 10~그림 11에서는 앞의 결과를 바탕으로 Shield 각도는 120(deg), 자석의 두께는 10[mm]로 하고 disk의 두께와 속도를 가변하여 제동력의 변화를 살펴본 결과이다. 그림 10에서는 disk의 두께가 줄어들수록 제동력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 수식 (4)에서 설명하였듯, 공극으로 작용하는 길이가 줄어들어 전체 제동력이 증가한 효과로 해석될 수 있다. 또한 속도에 따른 제동력의 결과(그림 11)도 수식 (4)에서 설명한 바와 같이 속도와 와전류, 속도와 제동력의 비례관계로 해석될 수 있어, disk 속도의 증가에 따라 제동력이 증가함을 확인하였다. 또한 600[rpm](도시철도 차량 기준 약 100[km/h])의 속도 영역에서도 제동력의 제어가 가능함을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 와전류제동기의 특성을 개선하고자 영구자석을 이용하고 공극과 자석 사이에 Shield를 설치함으로써 여자에 필요한 에너지 소모가 없고, 제동력 조절이 가능한 새로운 구조의 디스크형 와전류 제동기를 제안하였다.

Shield moving형 와전류 제동기의 구조와 Shield에 의한 자속쇄교량 조절 원리를 제시하고 와전류 제동기의 일반적 원리를 설명하기 위해 와전류로 인한 전기자 반작용을 무시할 수 있는 저속에서 선형적 토크 특성을 나타내며, 토크특성을 일반화할 수 있는 근사식을 유도하여 그 원리를 개략적으로 설명하였다.

조건을 Shield의 각도별, 영구자석 및 디스크의 형상별, 속도별로 구분하여 전장장 시뮬레이션을 수행한 결과 근사식에 의한 유추결과와 일치하였다. 제안된 Shield moving형 와전류 제동기가 기존의 제동력 조절이 불가능한 영구자석형 제동기의 한계를 극복하고 철도 시스템에서의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

현재 운영되고 있는 도시철도시스템의 제동시스템은 동기기를 이용한 회생제동(0~65[km/h]영역)과 공기제동(65~100[km/h]영역)을 병행 운영하고 있다. 연구결과, Shield moving형 와전류 제동기는 도시철도시스템의 공기제동방식이 담당하는 속도영역에 적용이 가능하며, 향후 도시철도시스템에 적합한 제동기의 최적설계와 더불어 추진시스템과 연계된 제동시스템 연구가 필요할 것으로 보인다.

References

[1] Do-Hyun Kang, Yong-Joo Kim, Soo-Tae Kwak "Conceptual Design of Braking System in High-Speed Train" KIEE Summer Conference 342-345, 1997

[2] D.H.Kang, S.TKwak, J.P.Hong, K.H.Kang, "Eddy Current Brake Design for High Speed Railway Train Simulator", KIEE Summer Conference 390-392, 1998

[3] T.Kuwahara, K.Araki, "Development of Permanent Magnet Type Retarder", JSAE, pp.92-96, Jan. 1992

[4] B.Lequesne, B Liu, T.W.Nehl "Eddy Current Machines with Permanent Magnets and Solid Rotors", IEEE Trans. on Industry App., Vol.133, pp.1289-1294, Sep.-Oct. 1997

[5] Hyeon-Jae Shin , Jang-Young Choi, Han-WookCho, and Seok-Myeong Jang "Analytical Torque Calculations and Experimental Testing of Permanent Magnet Axial Eddy Current Brake", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.49, No7, pp.4152-4155, July 2013

저 자 소 개

이 장 무(Chang-Mu Lee)



1969년10월4일생. 1991년 한양대 공대 전자통신공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전자통신공학과 졸업(석사), 2013년 고려대학교 전기공학과 졸업(박사), 1997~현재 한국철도기술연구원 책임연구원

E-mail : cmlee@krii.re.kr

한 경 희(Kyung-Hee Han)



1978년 8월 31일생. 2001년 한라대학교 전기전자컴퓨터공학부 졸업, 2003년 동국대학교 전기공학과 졸업(석사), 2010년 동 대학원 졸업(공학박), 2011년~현재 한라대학교 전기전자공학과 조교수.

E-mail : h78khh@halla.ac.kr

최 유 영(Yu-Young Choi)



1961년5월21일생. 1983년 한양대 공과대학 전기공학과 졸업. 2013년 한양대 전기공학과 졸업(공학박). 1989년~1996년 삼성전기 전동연구실. 1997~2001년 삼성전자 전동사업부 연구실 연구원. 2001년~현재 (주) 키네모손 대표이사

E-mail : yychoe@kinemotion.co.kr