

### 가변속 와전류 커플링의 특성해석

장석명 조성국 이성호 조한욱 이민명\* 이중호\*  
 충남대학교 한밭대학교\*

### Characteristic analysis of variable speed eddy current coupling

S.M.Jang, S.K.Cho, S.H.Lee, H.W.Cho, M.M.Lee\*, J.H.Lee\*  
 ChungNam National University, Hanbat National University\*

**Abstract** - Coupling drives are shown to be applicable to a wide range of control variables. This paper develops three dimensional theory of the eddy current coupling. It compares experimental results obtained on 5-Hp inductor type eddy current coupling with the theoretical computations. The flux density distributions are also presented using 3-D Finite element analysis.

그림 1은 와전류 커플링의 구조를 보여준다. 인덕터에 DC 여자 전류를 인가하면 인덕터에 자속이 발생하여 드럼을 쇠교하게 된다. 드럼은 shaft를 통하여 유도전동기에 연결되어 있다. 유도전동기가 정격 속도로 회전하게 되면 인덕터와 드럼사이에서 유도전동기와 마찬가지로 슬립이 존재하게 된다. 또한 드럼에는 유도기전력이 유도되며, 드럼에서의 와전류와 인덕터에서 발생한 자계에 의하여 토크가 발생한다. 표 1은 해석에 사용된 인덕터 타입의 와전류 커플링에 대한 설계 사양 및 재질을 보여준다.

#### 1. 서 론

와전류 커플링은 유도전동기와 부하 사이에 와전류를 이용하여 비접촉식으로 속도를 가변할 수 있는 전기-기계 시스템이다. 이는 기계적인 축을 이용하여 속도를 제어할 때 발생하는 마찰 손이나 기타 기계적인 손실을 최소화할 수 있고 DC 여자전류를 통하여 편리하게 속도를 가변할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 대용량의 다이나모 미터의 시험 설비를 구성할 경우 반도체 구동 시스템에 비하여 와전류 커플링을 이용한 설비는 초기 설치 비용이 적게 드는 장점이 있다. 그러나 국내의 와전류 커플링 구동 시스템은 정격 출력 토크에 비하여 사이즈나 중량이 상대적으로 커 앞으로 소형화, 경량화 및 기타 특성 개선을 위한 연구가 이루어져야 한다.

그러므로 본 논문에서는 와전류 커플링의 드럼에 동판을 삽입한 모델에 대하여 동판 두께에 따른 특성을 연구하였다. 또한 Lundell 타입인 Inductor 타입의 와전류 커플링 각각에 대하여 3D FEM을 이용한 해석을 통해 드럼에서 발생하는 자속 밀도 분포 특성을 비교 검토하고자 한다. 또한 3차원 해석법을 통하여 드럼에서 발생하는 손실 및 슬립 속도에 따른 속도-특성을 검토하고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 구조 및 설계 사양

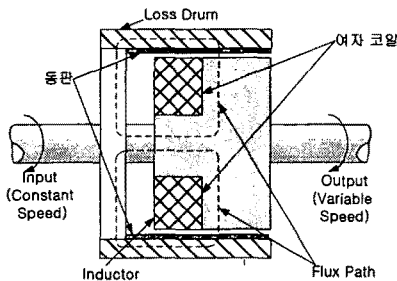


그림 1 와전류 커플링 기본 구조

표 1 해석 모델의 설계 사양

설계 변수	치수
극쌍수	5
드럼의 축방향길이	63.5 [mm]
인덕터의 풀까지의 반경	101 [mm]
공극까지의 반경	158.7 [mm]
공극의 크기	0.25 [mm]
기차력	760AT
폴의 파장	83.1[mm]
동판의 전기저항율	$1.725 \times 10^{-8}$
폴의 축방향 길이	25.4[mm]
인덕터의 전기저항율	$11.2 \times 10^{-8}$
코일 단면적	400 [mm <sup>2</sup> ]

##### 2.2 3차원 해석법에 의한 특성 해석

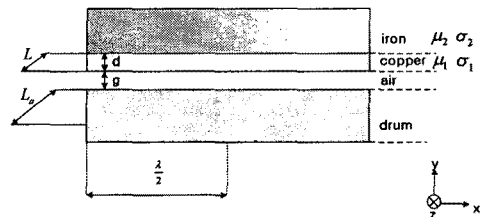


그림 2 해석 모델

그림 2는 드럼에 동판을 삽입한 와전류 커플링 해석 모델이다. 동판이 삽입된 드럼에서 대부분의 토크는 동판에 흐르는 전류에 의하여 만들어지기 때문에 철에 대한 투자율은 일정한 값을 갖으며, 드럼의 Back iron은 y축으로 무한대라고 가정한다. 또한 회전자의 폴은 드럼의 중심부인  $z=0$ 에 위치하고 있으며, 해석시  $y=0$ 과  $z=0$ 은 해석 모델의 중심부에 위치하고 있다.

와전류의 분포에 대한 특성식은 식(1)과 같은 확산 방정식으로 표현된다.

$$\nabla^2 \vec{J} = \mu \sigma \frac{\partial \vec{I}}{\partial t} \quad (1)$$

2차축에 유도되는 와전류는 드럼에서 페루프를 형성하며 발생하기 때문에 그림 2에 나타난 해석 모델에 대한 경계 조건은 식(2)~(5)와 같다.

$$z = \pm L/2 \text{ 일 때, } J_z = 0 \quad (2)$$

$$y = 0 \text{ 일 때, } J_y = 0 \quad (3)$$

$$z = 0 \text{ 일 때, } J_z(x, 0, 0) = \text{Re} \vec{k} J_m e^{j(2\pi x/\lambda - \omega t)} \quad (4)$$

$$y = \infty \text{ 일 때, } \vec{J} \text{ 는 유한한 값} \quad (5)$$

식(1)~(5)로부터 와전류에 관한 특성식을 구할 수 있으며 와전류가 발생하는 실제적인 영역은 동판 및 드럼으로 한하여 이 영역의 성분만을 구한다. 이때, 고조파에 의한 와전류 성분은 고려하지 않는다.

드럼에 발생한 와전류 손실은 기기의 토크 발생에 영향을 미치며 이로 인해 드럼 및 동판에 발생한 총 손실은 식(6)같이 드럼의 총 면적에 대해 적분을 하여 구할 수 있다.

$$P = \iint \rho J^2 dv \quad (6)$$

드럼 발생 손실에 관한 특성식은 식 (7)과 같이 공극 자속 밀도에 관한 식으로 표현된다.

$$P = \frac{\rho \lambda^3 w^2 L}{16\pi^2 \rho_1} B_y \frac{[d + \rho_1 / (2\rho_2 a_2)]}{[1 + (\frac{\lambda}{2L})^2]} \quad (7)$$

여기에서  $\rho$ 는 극 쌍수이며,  $\rho_1, \rho_2$ 는 동판 및 드럼에서의 전기 저항률,  $w$ 는 각 주파수를 나타낸다. 그리고 드럼에 작용하는 토크는 커플링 입력 전력에서 유도자의 출력 전력을 뺀 손실을 통하여 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{T}{p} (W_{in} - W_{out}) = \frac{T w}{p} = P \quad (8)$$

드럼에 작용하는 실질적인 토크는 와전류에 의한 영향을 고려해야한다. 드럼에 발생하는 와전류에 의한 슬립이 증가함에 따라서 공극 자속 밀도를 감소시키며 자속 밀도 분포 특성을 왜곡시킨다. 그러므로 와전류에 의한 리액션 기자력은 실제적으로 발생하는 기자력에 위상 변위를 시키며 리액션 기자력과 공극 기자력의 벡터합에 의해 최종적인 기자력을 알 수 있다. 이를 반영하여 드럼에 작용하는 토크 특성식은 식(9)와 같이 고려할 수 있다.

$$T = \frac{\pi}{4} C_3 \frac{L}{L_a} \rho^2 F_{Ag}^2 \frac{n + C_2 n^{1/2}}{\frac{S^2}{C_1} + \frac{C_1}{C_3} (n + C_2 n^{1/2})^2} \quad (9)$$

여기에서 S는 릴럭턴스이고,  $F_{Ag}$ 는 공극 기자력을 나타내며 n은 슬립 속도이다. 그리고  $C_1, C_2, C_3$ 는 각각 다음 식(10)~(12)와 같다.

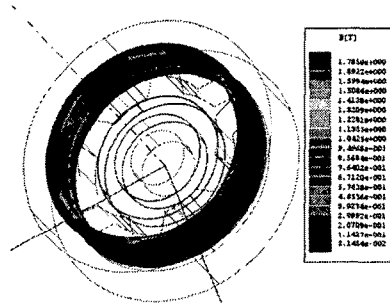
$$C_1 = \frac{2dD \sin(\frac{\pi L_a}{2L})}{\rho \rho_1 L_a [1 + (\frac{\lambda}{2L})^2]} \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{\rho_1}{d \sqrt{(2\pi \rho \mu_2 \rho_2)}} \quad (11)$$

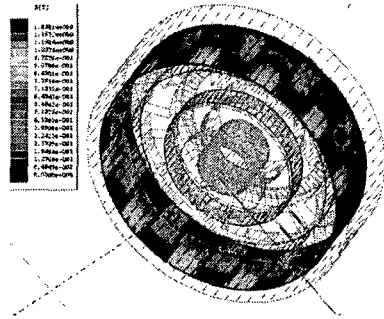
$$C_3 = \frac{4}{\pi} \sin(\pi/2 L_a L) \quad (12)$$

### 2.3 3차원 유한 요소 해석

와전류 커플링은 유도자의 모양에 따라 크게 Lundell 타입과 Inductor 타입으로 나누어진다. Inductor 타입의 와전류 커플링은 그림 3의 (a)에 보여지는 바와 같이 돌극형의 회전자를 가지고 있으며, Lundell Type의 와전류 커플링은 그림 3의 (b)에 보여지는 바와 같이 유도자의 모양이 Claw Pole의 형태를 갖는 커플링을 지칭한다. Lundell Type의 와전류 커플링은 누설 자속 경로를 최소화하여 자기 회로의 효율성을 증대시키는 장점을 갖고 있다. 그림3은 각각의 커플링에 대하여 드럼에서의 자속 밀도 분포특성을 3차원 유한요소 해석에 의하여 도시한 것이다.



(a) Inductor Type



(b) Lundell Type

그림 3 와전류 커플링 두 모델에 대한 드럼에서의 자속밀도 분포 특성

### 2.4 해석 결과

Inductor 형 및 Lundell 형의 유도자를 갖는 와전류 커플링에 대해 방사 방향의 자속 밀도는 그림 4와 같다. 해석 모델에 대한 사양은 표1에 제시하였다.

그림 5는 상대 속도에 따라 드럼에서 나타나는 와전류 손실을 나타낸다. 드럼에서의 와전류 발생 손실은 상대 속도에 의하여 직접적으로 영향을 받는다. 그러므로 드럼에서 발생한 손실은 이 기기의 효율을 산정하는데 있어 매우 중요한 요소이다. 그림 5에서 확인할 수 있듯이 매우 높은 슬립 속도에서는 효율이 매우 낮으므로 운전 전에 있어서 제한적인 영향을 받는다. 그림 6은 2.2절

에서 구한 3차원 해석법에 의하여 구해진 토크 특성식을 바탕으로 하여 드럼과 인덕터의 상대속도(또는 슬립 속도)에 따른 토크 특성을 구하였다. 그리고 동판의 두께를 변화에 따른 특성을 검토하였다. 본 시스템의 속도-토크 특성은 유도전동기와 매우 흡사한 특성을 갖는다. 동판의 두께가 두꺼워짐에 따라서 전동기에 대한 탈출 슬립 속도는 증가하지만 최대 토크는 일정한 것을 확인할 수 있다. 0.4mm의 두께를 갖는 동판에 대한 토크 특성은 기동 시에서부터 400(rpm)의 상대 속도까지 완만하며 선형적인 증가를 갖으며 높은 기동토크 특성을 갖는다. 동판이 두꺼워질수록 낮은 기동 토크 특성을 갖으며 산업체에서 사용되어질 수 있는 범위 또한 좁아진다.

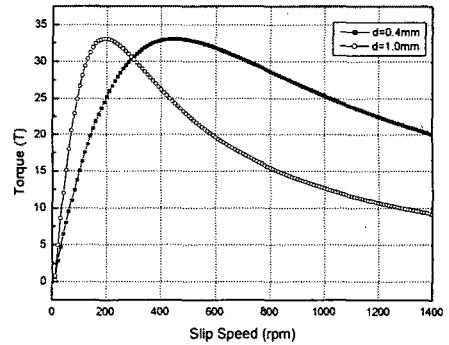


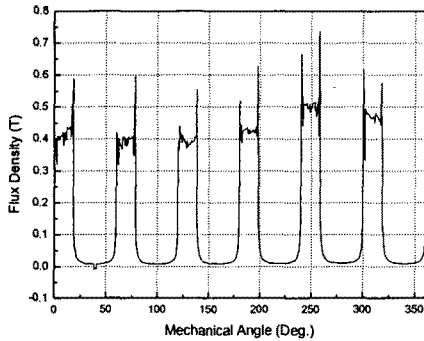
그림 6 상대 속도에 따른 토크 특성 곡선

### 3. 결 론

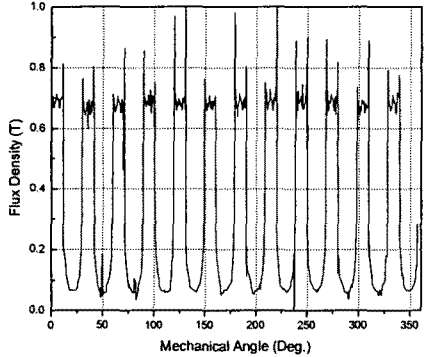
본 논문에서는 기존의 인덕터형 와전류 커플링 구동 시스템의 소형화, 경량화 및 자기 회로적인 성능 향상을 위하여 몇가지 사항을 검토를 수행하였다. 즉, 드럼에 동판을 삽입하여 동판의 두께에 따른 토크 특성을 검토하였다. 2차측에 유도되는 와전류는 침투 깊이에 의하여 동판의 표피에만 흐르게 되므로 적용 가능한 slip 주파수 영역에서 전류가 흐를 수 있는 범위에만 흐르므로 동판의 삽입으로 인해 증가되는 공극의 크기를 고려하여 0.4mm~1mm 범위내에서 슬립 속도에 따른 토크 특성을 비교 검토하였다. 그리고 드럼에서의 와전류로 인해 발생하는 누설 자속을 해결하기 위하여 Lundell Type의 유도자를 갖는 와전류 커플링을 적용하여 자속 밀도를 3차원 유한 요소 해석을 통하여 비교 검토하였고 이로부터 Lundell Type을 갖는 구동 시스템이 자기 회로적인 측면에서 훨씬 우수함을 확인하였다. 본 연구에서 수행한 FEM 및 해석법에 의한 해석 결과는 향후 실험적인 결과를 통해 비교 검토를 할 것이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] E.J.Davies, "Three dimensional theory of eddy-current couplings with copper-faced loss drums", Proc.IEE, Vol 124 DECEMBER 1977
- [2] E.J.Davies, "General theory of eddy-current couplings and brakes", PROC. IEE, Vol. 113, No. 5 MAY 1966
- [3] Malti,M,G "Three dimensional theory of the eddy current coupling",IEEE trans., 1963, PAS-82,pp. 793-800
- [4] E.J.Davies, "An experimental and theoretical study of eddy current couplings and brakes", IEEE trans. on PAS, PAS-67,1963.
- [5] P.iwnaciw,K Ashman, "Application of a high speed, high power speed eddy current coupling on a turbine test stand", 'Electrical Machines and Drives', 11-13 Setember 1995,Conference Publication No.412



(a) 인덕터 타입 와전류 커플링



(b) Lundell 타입 와전류 커플링

그림 4 와전류 커플링 두 모델에 대한 공극 자속밀도 분포특성

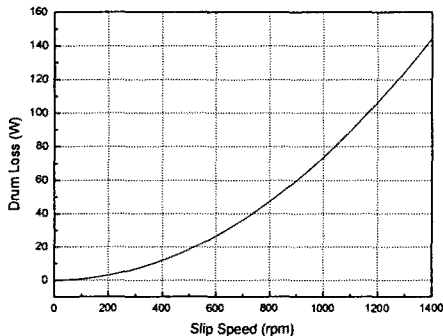


그림 5 슬립 속도에 따라 드럼에서 발생하는 와전류 손실 특성