

## 와전류 커플링의 특성 실험 및 설계

장석명, 조성국, 이성호, 지승근\*, 류기현\*\*  
충남대학교 전기공학과, (주)동양전기\*, 대한전기공사협회\*\*

### Design and Characteristic Experiment of Eddy Current Coupling

Seok-Myeong Jang, Seong-Kook Cho, Sung-Ho Lee, Seung Kun Ji\*, Ki-Hyeon Ryu\*\*  
Chungnam National University, Dong Yang Co., KECA\*\*

**Abstract** - Electric control of eddy coupling offers many new possibilities in process control and other industrial control applications. And a form of speed control for the load is affected for a system driven by constant frequency induction motor.

This paper analysis speed-torque characteristic of the eddy-current coupling by using the 3-dimensioal analytical method. Characteristic experiment is put into operation for the claw pole type eddy currnet coupling. Design procedure is presented based on the analysis.

### 1. 서 론

유도전동기는 가격이 저렴하고, 힘이 좋으며, 간단하여 유지보수가 편리한 등의 탁월한 장점에도 불구하고 속도제어가 불리하다는 단점이 있어 제어계통의 구동력 발생장치로는 직류전동기가 대부분 사용되었다. 최근에는 전력반도체 및 회로 설계 기술의 발전으로 산업현장에서 인버터, 컨버터와 같은 가변속 전원 시스템이 거의 일반화 되고 있다.

그런데 인버터등은 펄스폭 변조(PWM) 또는 진폭변조(PAM) 기술에 의하여 파형을 바꾸어 전력을 제어하므로 이 과정에서 고조파의 발생이 필수적이다. 따라서 모터의 과열, 소음발생은 물론 역을 및 효율의 악화로 전원계통의 전력품질을 악화시키는 등의 치명적인 단점을 발생한다. 그러나 전동기에 와전류형의 커플링을 사용하여 감속제어를 하는 경우에는 저렴한 가격으로, 인버터를 전원으로 하는 전동기에서 가장 큰 문제인 고조파발생 및 영향이 전혀 없도록 할 수 있기 때문에 큰 장점이 있게 된다. 즉 전동기의 축에 와전류 커플링을 직결하면 와전류 커플링에서 발생하는 자속에 의하여 전동기에 부착한 드럼의 속도에 비례하는 와전류가 유도되고, 또 이 와전류와 자속에 의하여 발생하는 힘에 의하여 전동기의 속도제어가 가능하게 된다.

따라서 와전류 커플링에 의한 전동기의 속도변화 및 제어는 인버터 전원을 사용하는 시스템과는 달리, 모터의 비효율운전의 결정적인 원인이 되는 고조파를 전혀 발생시키지 않는다. 그러면서도 전동기의 속도에 비례하여 힘이 발생하도록 하여 일정한 속도로 변속이 가능하므로, 부드러운 제어가 가능하여 전동기와 부하에 큰 무리를 주지 않는 것이 큰 장점이다.

이에 본 논문에서는 유도자의 형상과 재질을 고려하여 3차원 해석적인 방법을 통하여 와전류 커플링의 전자기적인 특성을 해석하고자 한다. 또한 특성식을 바탕으로 하여 자기동가회로를 구성하고 형상을 고려하여 설계를 하고자 한다. 또한 특성 실험을 통하여 제작된 모델에 대한 성능을 검토하고 해석결과와 비교 검토하고자 한다.

### 2. 설계 및 특성 해석

#### 2.1 구조 및 동작원리

그림1은 드럼에 동판이 씌워진 claw-pole 와전류 커플링의 형상을 보여준다. 와전류 커플링은 드럼과 유도자 크게 두 개의 부분으로 구성되어 있다. 드럼은 유도전동기의 출력축에 연결되어 일정한 출력속도로 회전한다. 유도자내에는 직류 여자코일이 감겨져 있다. 유도자가 직류 여자 전류에 의하여 여자되었을 때, 유도자 풀에서의 자속는 공극을 지나 드럼을 쇄교하게 되고 드럼 내부에 와전류가 유도된다. 이때, 드럼의 입력 축 속도가 일정하게 회전을 하게 되면, 인덕터와 드럼사이에서 유도된 와전류와 인덕터에서 발생한 자계의 상호 작용에 의하여 유도자는 드럼의 회전을 따라가게 된다. 와전류 커플링의 출력 축 속도 제어는 드럼에서 소모되는 슬립 에너지의 양을 조절함으로써 가능하다.

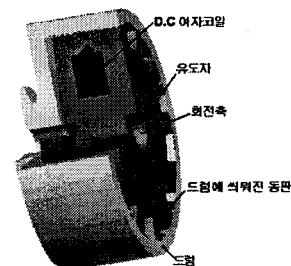


그림1. Claw-Pole 와전류 커플링의 구조

#### 2.2 설계 및 특성 해석

##### 2.2.1 설계

설계 과정은 특성 해석에서 얻어진 특성식을 바탕으로 구할 수 있다. 우선 주어진 정격 속도 및 정격 토크로부터 커플링의 드럼에서 소모되는 슬립 전력을 식(1)에서와 같이 구할 수 있다.

$$\text{슬립 전력} = \frac{sT\omega_{in}}{0.974} \quad (1)$$

드럼의 유효 축방향 길이와 공극 직경과 극쌍수로부터 정격 토크와 정격 속도를 내기 위해 필요한 한극당 자속량을 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$\Phi_{ac} = 1.019 \times \left[ \frac{L^{0.65} \rho^{0.325}}{D^{0.35} p^{0.675}} \right] \frac{T}{n^{0.325}} \quad (2)$$

드럼내에 와전류에 의한 기자력을  $F_R$ 이라 하고,  $F_\phi$ 가  $\Phi_{ac}$ 와 공극 자기저항  $R$ 의 곱이라고 할 때 공극 기자력  $F_g$ 는 식(3)과 같다.

$$F_g = [F_\phi^2 + F_R^2 - 2F_\phi F_R \cos \delta] \quad (3)$$

$$= \left[ C_1^2 \frac{T^{0.7}}{n^{0.65}} + C_2^2 T^{1.3} n^{0.65} + C_1 C_2 C_3 T \right]$$

여기에서  $C_1, C_2, C_3$ 은 각각  $1.019 \times R \times M, \frac{0.9 \times f}{M \times p^2}$ , 약 1.4142이다. 한 극당 공극 기자력에 극쌍수를 곱하면 와전류 커플링에 인가되는 총 공극 기자력이 된다.  $M$ 은 드럼의 축방향 길이와 공극 직경과 전기저항률에 관련된 상수이고,  $f$ 는 총 전기자 기자력에 대해서 실제적으로 작용하는 전기자 기자력에 대한 비율을 나타낸 값이다. 다음으로 커플링에 인가되는 총 기자력을 정격 전류로 나누고 점정률을 고려하여 코일 턴수를 예측할 수 있다.

$$\text{코일턴수} = \frac{F_{ag}}{I_{rated}} \quad (4)$$

제시된 공극 직경으로 부터 유도자의 한 극에 대한 극피치는 식(5)에 의하여 결정된다.

$$\lambda = \frac{\pi D}{p} \quad (5)$$

여기서  $p$ 는 극쌍수,  $D$ 는 공극 직경이고 일반적으로 claw pole 유도자의 플아크/플피치의 약 0.7정도이다.

## 2.2.2 특성 해석

와전류 커플링의 드럼에 전달된 전력은 3차원 특성해석을 통하여 계산되었고 식(6)과 같다.

$$P = \frac{p\lambda^3 \omega^2 L}{16\pi^2 \rho_1} B_y \frac{[d + \rho_1/2\rho_2 \alpha_2]}{\left[1 + \left(\frac{\lambda}{2L}\right)^2\right]} \quad (6)$$

여기에서  $p$ 는 극 쌍수이며,  $\rho_1, \rho_2$ 는 동판 및 드럼에서의 전기 저항률,  $\omega$ 는 각 주파수,  $L$ 은 드럼의 축방향 길이,  $\lambda$ 는 폴의 파장,  $B_y$ 는 방사 방향 공극 자속 밀도이다. 드럼에서 소모되는 전력 손실을 통해  $P = T\omega$ 의 식을 통하여 식(7)과 같은 속도에 따른 토크 특성을 계산되었다.

$$T = \frac{\pi}{4} C_3 \frac{L}{L_a} p^2 F_{Ag}^2 \frac{n + C_2 n^{1/2}}{\frac{S^2}{C_1} + \frac{C_1}{C_3^2} (n + C_2 n^{1/2})^2} \quad (7)$$

여기에서  $S$ 는 총 자기저항이고,  $F_{Ag}$ 는 공극 기자력을 나타내며  $n$ 은 슬립 속도이다. 그리고 계수  $C_1, C_2, C_3$ 은 각각 다음 식(8)~(10)과 같다.

$$C_1 = \frac{2dD \sin\left(\frac{\pi L_a}{2L}\right)}{p\rho_1 L_a \left[1 + \left(\frac{\lambda}{2L}\right)^2\right]} \quad (8)$$

$$C_2 = \frac{\rho_1}{d\sqrt{(2\pi p\mu_2 \rho_2)}} \quad (9)$$

$$C_3 = \frac{4}{\pi} \sin(\pi/2L_a L) \quad (10)$$

## 2.2.3 자기 등가 회로

그림 2는 해석 모델의 자속경로를 고려하여 구성한 자기 등가 회로도이다. 이때 공극영역에서 프린징 효과는 무시하기로 한다. 그림에서  $R_1 \sim R_3$ 은 유도자의 자기저항이고  $R_g, R_L$ 은 각각 공극 및 누설 자기저항이다.

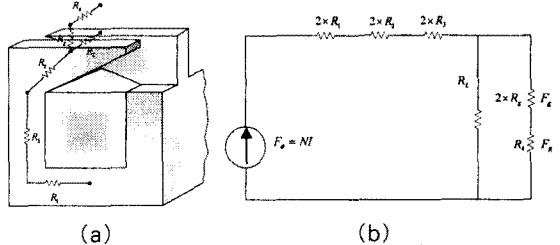


그림 2 Claw-pole 형상을 고려한 자기등가 회로

그림 2의 (b)에서 총 자기저항은 식(7)에서 제시한 값이고  $\Phi_{ac}$ 를 한 극당 발생 자속이라 할 때, 공극 자속 밀도는 식(11)과 같다.

$$B_{av} = \frac{\Phi_g}{A_g} = \frac{2R_g + R_4}{2\sqrt{2}h_5\lambda(2R_g + R_4 + R_L)} \times \phi_{ac} \quad (11)$$

그리고 총 자기저항은 식(12)와 같다.

$$S = 2(R_1 + R_2 + R_3) + \frac{(R_L + R_{L1})(2R_g + R_4)}{R_L + R_{L1} + 2R_g + R_4} \quad (12)$$

식(11)과 식(12)으로부터 와전류 커플링의 인덕터의 형상, 재질, 극 수, 속도, 기자력, 공극, 극의 형상, 두께 등 여러 가지 파라미터에 대한 변화를 고려하여 특성 해석을 할 수 있다. 그리고 총 인가된 기자력에 대하여 공극 기자력의 유도할 수 있고 한 극을 쇄교하는 자속을 예상할 수 있다.

## 3. 특성 실험

### 3.1 구동 특성 실험

그림 3은 와전류 커플링의 부하 특성을 측정하기 위한 실험 구조도이다. 실험은 시스템에 인가되는 3상 전력을 측정하기 위한 PM3300 전력 분석기, 와전류 커플링의 출력 축 속도를 측정하기 위한 Tacho-meter, 출력 토크 측정을 하기 위한 Dynamo meter, Load Cell 및 Indicator, DC 여자 코일에 인가되는 전력을 측정하기 위한 전류계, 전압계 및 오실로 스코프 등으로 구성되어 있다.

본 실험에서는 일정 부하상태에서 커플링의 여자코일에 인가되는 전류의 변화에 따른 출력 속도를 측정하였으며, 부하 토크를 가변하여 매 부하 상태마다 같은 방법으로 실험을 반복하여 출력 속도에 따른 토크 특성을 검토하였다.

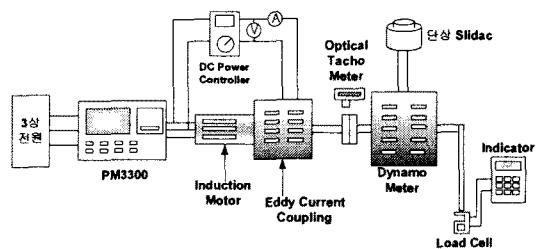


그림 3 특성 시험 구성도

만약 입력속도가  $\omega_{in}$ 이고 입력속도와 출력속도의 차를 슬립 속도라 하면, 슬립  $s$ 는  $(\omega_{in} - \omega_{out})/\omega_{in}$ 으로 정의 된다. 이 시스템은 입력 토크(즉, 유도전동기의 출력토크)와 출력 토크가 같기 때문에 식(13)의 관계가 성립 한다. 전체 시스템에 대한 효율은 측정된 유도전동기에 인가되는 전력 및 유도전동기의 출력축 속도를 통해 식(14)와 같이 산정된다.

$$Slip power = T(\omega_{in} - \omega_{out}) = sT\omega_{in} \quad (13)$$

$$Efficiency = \frac{output power}{input power} = \frac{output speed}{input speed} = 1 - s \quad (14)$$

### 3.2 재질 특성 실험

그림 4는 와전류 커플링의 드럼 및 유도자의 재질특성을 파악하기 위한 자기이력곡선 측정장치 및 시편 제작도를 보여준다. 자기 이력곡선 측정장치는 한국 표준과학 연구소에 있는 MAGNET-PHYSIK 회사의 모델 Dr.Steingroever GmbH, EF5 Electronic Fluxmeter를 사용하였다. 시편은 환형으로 제작되었고 외경은 45mm, 내경은 34mm, 축방향길이는 5.15mm이며 1~2차코일의 턴수는 각각 100번씩 감겨있다.

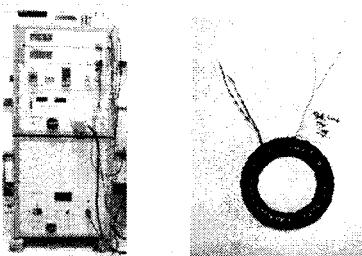


그림 4 자기 이력곡선 측정 장치 및 성분 분석을 위한 시편

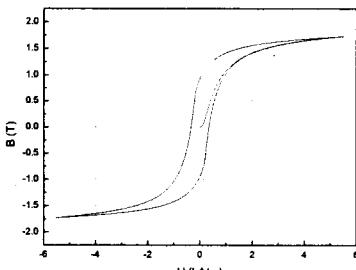


그림 5 드럼의 자기 이력곡선

그림 5는 제시된 모델의 드럼에 대한 재질 B-H 특성 실험 결과이다. 이 시스템의 속도-토크 특성 및 구동 특성은 재질의 비투자율, 포화 및 도전율에 매우 큰 영향을 받는다. 실험을 통해 얻어진 B-H 정보로부터 재질에 대한 비 투자율은 식(15)을 통해 구할 수 있다.

$$\mu_{max} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H} \quad (15)$$

여기에서  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 이고 계산되어진 비 투자율 값은 선형적인 부분에서 약 1082이다.

### 3.3 해석 및 실험 결과

그림 6은 비투자율 및 폴의 형상에 따른 속도-토크 특성을 비교한 값이다. 드럼의 비투자율이 클수록 토크 특성은 개선되며 폴의 단면적이 커질수록 조금씩 성능이 개선됨을 확인할 수 있다. 그림 7은 특성 실험에 의한 성능 결과를 해석에 의한 결과와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 그림 8은 실험에 의한 토크에 따른 효율 특성을 보여준다. 그림 8은 전 부하 상태(약 1.2kg-f)에서 약 78%의 효율을 보여주고 있다.

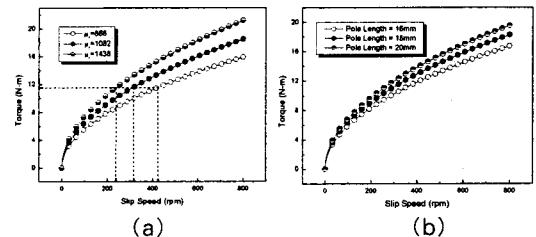


그림 6 비 투자율(a) 및 폴의 형상(b)에 따른 속도-토크 특성 비교(해석치)

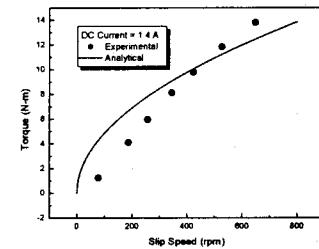


그림 7 측정값에 의한 속도-토크 특성의 검증

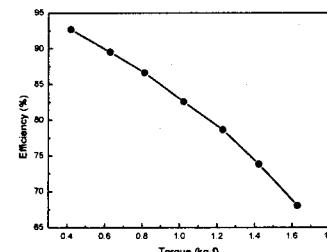


그림 8 토크에 따른 효율 특성 실험 결과

### 4. 결론

본 연구에서는 와전류 커플링의 특성 실험을 통해 제작된 모델에 대한 성능을 확인되었다. B-H 특성 실험을 통해 얻어진 결과를 해석적인 속도-토크 특성식에 대입하여 실험 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 또한 해석 결과를 통해 재질의 투자율이 성능에 크게 영향을 미치는 것을 확인하였다. 자기 등가 회로를 구성하여 유도자의 형상을 고려한 성능을 검토를 하였으며 이를 바탕으로 하여 시스템에 필요한 기자력과 정격 토크 및 정격 속도에 따른 설계 과정을 하였다.

### (참고문헌)

- [1] E.J.Davies, "An experimental and theoretical study of eddy current couplings and brakes", *IEEE Trans. on PAS*, PAS-67, 1963.
- [2] E.J.Davies, "Three dimensional theory of eddy-current couplings with copper-faced loss drums", *IEE Proc.*, vol. 124 DECEMBER 1977