

## 슬롯조합에 따른 유도전동기의 공간자속분포

이동주\*, 이은웅\*, 오영수\*, 김종겸\*\*, 손홍관\*\*\*  
 충남대학교\*, 원주전문대학교\*\*, 한국전기연구소\*\*\*

### Harmonic Flux Distribution of Induction Motor by Slot Combinations

Lee, Dong-Ju\* Lee, Eun-Woong\* Kim, Jong-Gyeum\*\* Sohn, Hong-Kan\*\*\*  
 Chungnam University\* Won-Ju Junior College\*\* KERI\*\*\*

#### Abstract

In this paper, we analyze the harmonic flux distribution of squirrel cage induction motor with the different stator/rotor slot combination(36/42 and 36/44) using Finite Element Method and fast Fourier transform. These result will be used to obtain dips & cusps (harmonic torque) in torque characteristic curve.

파와 그로 인해 공극자속분포에 포함된 고조파 성분의 해석이 요구된다.

그래서 고정자와 회전자의 슬롯조합이 다른 두 전동기를 모델로 선정하여 무부하시와 정적부하시의 공극자속분포를 유한요소법(FEM)으로 구하고 이것을 FFT(fast Fourier transform)로 해석하여 공극자속에 지배적인 영향을 주는 고조파 성분을 구하였다.

## 1. 서 론

유도전동기는 자체로는 구조가 간단하고 저가인 장점을 지니고 있으나 정속도 특성을 가지고 있어 속도제어하기 어려운 단점이 있다. 그런데 최근 전력전자기술의 발전에 힘입어 점차 가변속 운전, 토크 제어, 고효율 운전 등 성능이 보완되고 있다.

또한, 유도전동기는 자화전류를 작게하여 효율을 높이고자 다른 전동기에 비해서 공극을 작게 설계한다. 그래서 유한개의 슬롯에 위치한 권선전류에 집중되는 기자력에 의한 권선 고조파(Winding Harmonics)나 고정자/회전자의 슬롯 개방쪽에 의한 슬롯 고조파(Slot Harmonics)와 같은 고조파가 존재하게 된다. 이러한 고조파들은 비동기토크(Asynchronous Torque)를 발생시켜 토크곡선에 dips과 cusp를 유발시키며 추가적인 손실을 유발시킨다. 하지만, 이러한 영향은 고정자/회전자의 슬롯조합, 사구(Skew), 권선 코일피치등을 적절히 조절하여 어느정도 감소될 수 있다.<sup>[1][2]</sup>

그러나 고효율, 저소음 전동기를 설계하기 위해서 유도전동기의 토크 특성 향상을 위한 연구가 많이 진행되어 왔다.

많은 연구중, R. Belmans, S. Williamson, C.G. Hong 등은 유한요소법을 통하여 등가회로의 회로정수를 구하고, 유도전동기의 전체적인 토크특성을 구하였으나 낮은 슬립에서 발생하는 토크의 맥동은 얻지 못하였다.<sup>[3][4][5]</sup>

그러나 Rastko Fiser는 2극 유도전동기를 유한 요소법으로 해석하여 얻은 공극자속분포와 고정자/회전자의 전압방정식을 이용해서 토크 곡선의 dip과 cusp를 얻었다.<sup>[6]</sup>

그래서 본 연구에서는 유도전동기에서 발생하는 고조파 토크를 구하기 위한 선행단계로서 고조파 토크발생의 주요원인으로 예측되는 슬롯조합에 의한 슬롯 고조

## 2. 슬롯 고조파

### 2.1 해석모델의 선정

우선 고정자와 회전자의 슬롯고조파를 해석하기 위해서 상용으로 사용되는 두 전동기를 해석모델로 선정하였다. 이 두 전동기에 관한 자세한 사양은 표1과 같다.

Table 1. Specification of Motor A and Motor B

	Motor A	Motor B
pole	4	4
ouput power	1.5[kW]	1.5[kW]
rated voltage	220[V]	220[V]
rated current	6.2[A]	6.6[A]
length of air-gap	0.3[mm]	0.3[mm]
stator	number of slot	36
	number of turn	33[turn]
rotor	number of slot	42

### 2.2 고정자의 슬롯 고조파<sup>[1]</sup>

고정자의 슬롯에 의한 슬롯 고조파는 식(1)과 같다. 따라서 매상매극당 슬롯수가 2, 3, 4인 경우, 발생하는 주요한 슬롯 고조파 차수는 표2와 같다.

$$f_s = 6Aq \pm 1 \quad (1)$$

여기서, A : 임의의 정수

q : 매상매극당 슬롯수

Table 2. Slot harmonic components of Stator

q	number of slot	harmonic order
2	24	11th, 13th
3	36	17th, 19th
4	48	23th, 25th

### 2.3 회전자의 슬롯 고조파<sup>17)</sup>

슬립에 따른 회전자의 슬롯 고조파의 주파수는 식(2)와 같이 주어진다.

$$f_r = f_1 \left[ Z_2 \frac{(1-s)}{p} \pm 1 \right] \quad (2)$$

여기서,  $f_1$  : 고정자의 기본파 주파수  
 $Z_2$  : 회전자 슬롯수  
 $s$  : 슬립  
 $p$  : 쌍극수

식(2)는 회전자의 슬롯 고조파가 슬립에 따라서 변화함을 나타내고 있다. 따라서 회전자의 슬롯이 42, 44인 경우의 슬롯 고조파성분을 나타내면 표3과 같다.

Table 3. Slot harmonic components of Rotor

number of slot	harmonic order
42	20th, 22th
44	21th, 23th

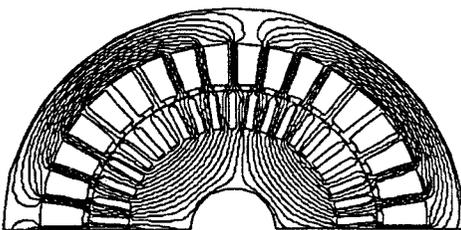
그러나 표3는 낮은 슬립(정격속도 근방)에서만 적용되며 큰 슬립(저속)에서는 점차 낮은 차수의 고조파가 발생하게 된다. 본 연구에서는 표2와 표3과 같은 고조파가 정격속도 근방에서 공극자속에 첨가됨을 검증하였다.

## 3. 슬롯 고조파해석

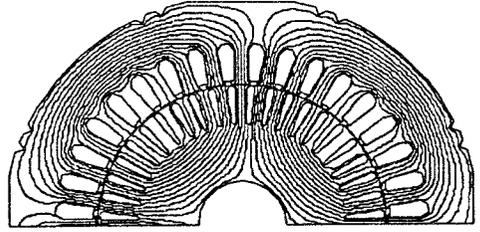
위에서 선정한 두 모델의 전동기A와 B를 무부하시와 정격슬립( $s=6\%$ )에서 해석하였다. 이를 위해서 Magnet 5.03 FEM 소프트웨어로 공극자속분포와 공극자속밀도를 구하였다.<sup>[8]</sup>

### 3.1 무부하시(No Load)

무부하시에는 전동기의 회전자의 도체에 유기되는 전류가 없으므로 정자계문제(magnetostatic problem)로 풀어 2극에 대해 나타낸 자속분포는 그림1과 같고, 공극의 기계각도 위치에 따라 분포하는 공극자속밀도는 그림2와 같다.



(a) Motor A (36/42 slot combination)



(b) Motor B (36/44 slot combination)

Fig. 1 Magnetic flux distribution (No Load)

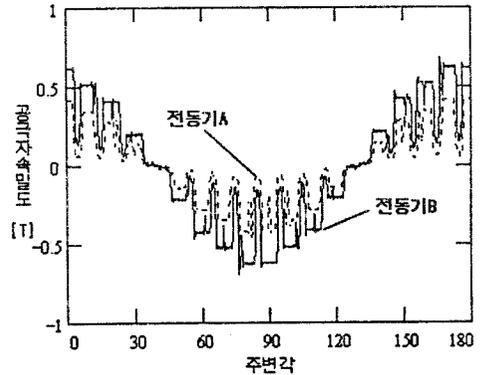
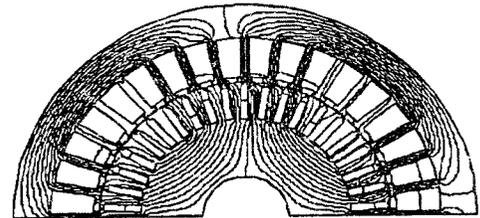


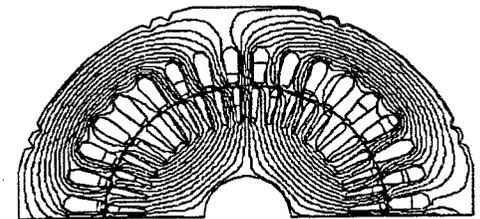
Fig. 2 Magnetic flux density of air gap (No Load)

### 3.2 정격부하시(Rated Load)

정격부하에서는 고정자의 회전자제에 의해서 회전자에 전류가 유기되므로 시변자계문제(time-harmonic problem)로 풀었으며 그에 의한 자속분포는 그림3과 같고 기계각도로 나타낸 공극의 위치에 따라 분포하는 공극자속밀도는 그림4와 같다.



(a) Motor A (36/42 slot combination)



(b) Motor B (36/44 slot combination)

Fig. 3 Magnetic flux distribution (Rated Load)

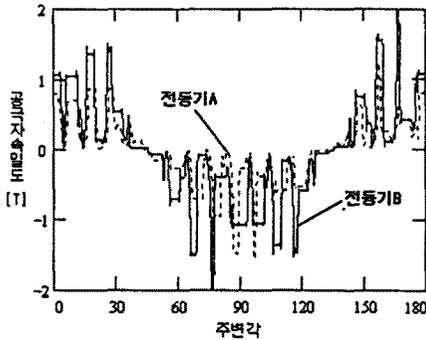
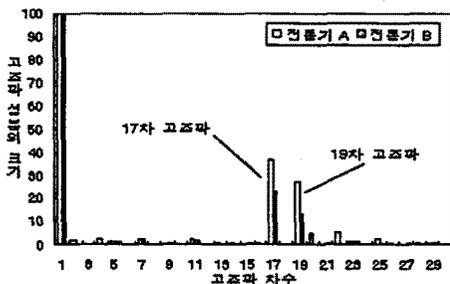


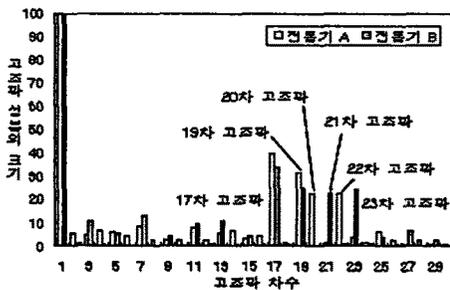
Fig. 4 Magnetic flux density of air gap (Rated Load)

#### 4. 공극자속밀도에 포함된 고조파 성분

위에서 얻은 그림 2와 그림 4의 공극자속밀도 파형을 가지고 FFT해석을 하면 그림 5와 같은 고조파 스펙트럼을 얻을 수 있다.



(a) No Load



(b) Rated Load

Fig. 5 Result of Harmonic Analysis

그림 5(a)는 무부하시의 고조파 스펙트럼을 나타내는 것이다.

전동기A의 경우, 고정자에 의한 17차, 19차 슬롯 고조파가 각각 36.85%, 27.44%씩 함유되어있음을 알 수 있고 회전자에 의한 20차, 22차 슬롯 고조파가 각각 5.13%, 5.305%씩 함유되어 있다.

전동기B의 경우, 고정자에 의한 17차, 19차 슬롯 고조파가 각각 23.4%, 12.62%씩 함유되어 있다. 그런데 회전자에 의한 20차, 22차 고조파의 크기는 0.0285%,

0.03973[%]로써 매우 작았다. 이처럼 회전자에 의한 슬롯 고조파가 작게 나타나는 것은 전동기B의 회전자의 슬롯 개구폭이 전동기A에 비해서 작기 때문으로 분석된다.

그림 5(b)는 정격부하시의 고조파 스펙트럼을 나타내고 있다.

전동기A의 경우, 고정자에 의한 17차, 19차 슬롯 고조파는 각각 39.55%, 31.16%씩 함유되었는데 이는 무부하시와 유사하였다. 그리고 회전자에 의한 20차, 22차 슬롯 고조파는 각각 22.45%, 22.56%로 무부하시보다 증가하였다.

전동기B의 경우, 고정자에 의한 17차, 19차 슬롯 고조파가 각각 34.06%, 24.66%씩 함유되었고 회전자에 의한 21차, 23차 슬롯 고조파가 22.51%, 24.4[%]로 무부하시보다 증가하였다.

따라서 고정자에 의한 슬롯 고조파는 무부하시나 정격부하시에 유사한 크기였으나 회전자에 의한 슬롯 고조파는 무부하시보다 정격부하시에 큰 영향을 줄 수 있었다. 따라서 정격부하 근방에 전동기를 운전할 경우, 회전자의 슬롯 고조파에 의한 영향이 커서 소음 및 진동을 유발시킬 수 있다.

#### 5. 결 론

유도전동기의 고조파 토오르크를 얻기 위한 선단계로서 슬롯조합이 36/42인 경우와 36/44인 경우의 유도전동기를 해석모델로하여 고정자/회전자의 슬롯조합이 공극자속에 어떠한 영향을 주는지 고찰하기 위해 유한요소법과 FFT를 이용하여 무부하시와 정격부하시 공극자속에 포함된 슬롯 고조파를 검증하였다. 슬롯조합이 36/42인 경우는 17차, 19차, 20차, 22차 고조파가 공극자속에 영향을 주었으며 슬롯조합이 36/44인 경우는 17차, 19차, 21차, 22차 고조파가 영향을 주었다. 그리고 회전자에 의한 슬롯 고조파는 무부하시보다는 정격부하시에 공극자속분포에 더 큰 영향을 주었다.

앞으로 해석한 결과를 기초로 유도전동기의 토오르크 곡선에 나타나는 추가적인 고조파 토오르크에 의한 dips과 cusps를 찾는 것이 필요하다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Essam S. Hamdi, "Design of Small Electrical Machines", pp.128-133, 1994
- [2] Paul W. Franklin, "Advanced theory of design of rotating electrical machinery", pp.88-92, 1976
- [3] R.Belmans, R.D. Findlay, W.Geysen, "A Circuit Approach to Finite Element Analysis of a Double Squirrel Cage Induction Motor", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.5, No.4, December 1990
- [4] S. Williamson, M.J. Robinson, "Calculation of cage induction motor equivalent circuit parameters using finite elements", IEE Proc. Part B, Vol.138, No.5, September 1991
- [5] C.G. Hong, G.J.Hwang, "Nonlinear complex finite-element analysis of squirrel cage induction motor performance", IEE Proc. Part B, Vol.138, No.5, September 1991
- [6] Rastko Fiser, Stanislav Ferkoji, "Simulation of Steady and Dynamic Performance of Induction Motor for Diagnostic Purpose", IEEE International Electric Machines and Drive Conference Record, May18-21,1997
- [7] P. Vas, "Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines", Oxford University Press, pp.308, 1993
- [8] "MagNet 5 User Guide - Using the MagNet Version 5 Package from Infolytica", published by Infolytica, London and Montreal, 1992.