

工學博士 學位論文

이중 농형 특성을 갖는 외측 회전형
유도전동기에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Double Squirrel
Cage Outside Rotor Type Induction Motor

指導教授 金 成 煥

2002年 2月

韓國海洋大學校 大學院

機 關 工 學 科

金 炫 秀

本 論 文 을 金 炫 秀 의 工 學 博 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

委 員 長 金 潤 植 印

委 員 李 相 泰 印

委 員 李 成 根 印

委 員 朴 永 算 印

委 員 金 成 煥 印

2001年 12月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

機 關 工 學 科

金 炫 秀

目 次

Abstract	iv
Nomenclature	vi
List of Tables	viii
List of Figures	ix
제 1장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구내용	2
제 2장 유도전동기의 특성	4
2.1 등가회로	4
2.2 손실과 전력의 흐름	5
2.3 등가회로 정수 결정	6
2.3.1 고정자 저항시험	7
2.3.2 무부하시험	8
2.3.3 회전자 구속시험	10
2.4 특수 농형 유도전동기	13
2.4.1 심구 농형 유도전동기	14
2.4.2 이중 농형 유도전동기	15

제 3장 외측 회전형 유도전동기	18
3.1 사각형(“□”형) 슬롯 외측 회전형 유도전동기	18
3.1.1 사각형 슬롯 유도전동기의 제작	18
3.1.2 실험장치의 구성	25
3.1.3 실험 및 고찰	27
3.2 원형(“○”형) 슬롯 외측 회전형 유도전동기	34
3.2.1 원형 슬롯 유도전동기의 제작	34
3.2.2 실험 및 고찰	38
3.3 사각형 및 원형 슬롯 유도전동기의 성능비교	43
제 4장 내측형 및 외측형 회전자 유도전동기의 성능비교 ...	48
4.1 무부하 손실 비교	49
4.2 토크-속도 특성 비교	51
4.3 역률 특성 비교	52
4.4 효율 특성 비교	52
4.5 출력 특성 비교	53
제 5장 결 론	55
참 고 문 헌	57
Appendix	59

Appendix list	59
Appendix A	60
Appendix B	64
Appendix C	68

A Study on the Characteristics of Double Squirrel Cage Outside Rotor Type Induction Motor

Hyun-Soo Kim

*Department of Marine Engineering, Graduate School,
Korea Maritime University*

Abstract

Induction motor is the most widely used electric machine. There are two types of induction motor rotors which can be placed inside of the stator. One is called a squirrel cage rotor, while the other is a wound rotor.

The squirrel cage rotor consists of conducting bars which are laid into slots carved in the face of the rotor and shorted at either end by large shorting rings. Because of simple and durable structure, low cost for operation and high efficiency, the squirrel cage induction motor has extensive application in the industry fields.

In recent years, the use of that motor for various fans has been also

on an increasing trend.

This paper presents a newly developed double squirrel cage induction motor for the fan and the facilities like that. All of the existing induction motors are composed of two parts, rotor and stator, and the position of rotor is exclusively the inside of stator. However, the rotor of the developed induction motor is located outside the stator.

The outside rotor type brushless dc motor has been often used for VTR's head drum and PC's cooling fan these days, but this kind of induction motor has not been developed yet.

It is believed that the outside rotor type induction motor is suitable for the fan due to its large inertia which can reduce the change of air flow rate resulting from input power or load fluctuation.

In this paper, two tests for obtaining the electrical parameters of the outside rotor type induction motor, which are locked rotor test and no load test, are described and those parameters are measured. Then, to find torque-speed curve, load test is carried out using a dynamometer and the program for motor performance.

And, the developed induction motor is compared with the existing one in terms of torque, efficiency, power factor and output characteristics.

The results of this paper are supposed to be used for the exploitation of the outside rotor type induction motor.

Nomenclature

IM	:	Induction motor
I_1	:	Stator current [A]
I_2	:	Rotor current [A]
R_{LR}	:	Locked-rotor resistance [Ω]
R_1	:	Stator resistance [Ω]
R_2	:	Rotor resistance [Ω]
P_{AG}	:	Air-gap power [W]
P_{core}	:	Core loss [W]
$P_{F\&W}$:	Friction and windage loss [W]
P_{in}	:	Input power [W]
P_{out}	:	Output power [W]
P_{conv}	:	Converted power [W]
P_{rot}	:	Rotational loss [W]
P_{RCL}	:	Rotor copper loss [W]
P_{SCL}	:	Stator copper loss [W]
$P_{misc.}$:	Stray loss [W]
s	:	Slip
V_ϕ	:	Phase voltage [V]
V_T	:	Terminal voltage [V]
X'_{LR}	:	Locked-rotor reactance at test frequency [Ω]

- X_{LR} : Locked-rotor reactance at normal operating frequency [Ω]
 X_M : Magnetizing reactance [Ω]
 X'_1 : Stator reactance at test frequency [Ω]
 X_1 : Stator reactance at normal operating frequency [Ω]
 X'_2 : Rotor reactance at test frequency [Ω]
 X_2 : Rotor reactance at normal operating frequency [Ω]
 Z_{LR} : Locked-rotor impedance [Ω]

List of Tables

Table 2-1 Empirical distribution of leakage reactances in induction motor. ...	13
Table 3-1 Specification of Dynamometer.	26
Table 3-2 Specification of Power Analyzer.	26
Table 3-3 Specification of Dynamometer Controller.	27
Table 3-4 Parameters of □ slot type IM.	28
Table 3-5 Results of no load test of □ slot type IM.	28
Table 3-6 Parameters of ○ slot type IM.	38
Table 3-7 Results of no load test of ○ slot type IM.	39
Table 4-1 Specification of 3 phase IM.(Hitachi Ltd.)	48
Table 4-2 Parameters of IMs.	49
Table 4-3 Comparison of no load test.	49

List of Figures

Chapter 2

Fig. 2.1 Per-phase equivalent circuit of an induction motor.	4
Fig. 2.2 Power flow diagram of an induction motor.	5
Fig. 2.3 Circuit diagram for the measurement of the stator resistance.	7
Fig. 2.4 Circuit diagram for no load test.	8
Fig. 2.5 Circuit diagram for the locked rotor test.	10
Fig. 2.6 Leakage flux of deep slot squirrel cage IM.	15
Fig. 2.7 Leakage flux of double squirrel cage IM.	16

Chapter 3

Fig. 3.1 Stator of developed IM.	19
Fig. 3.2 Dimension of \square slot.	19
Fig. 3.3 Dimension of rotor core of \square slot type IM.	21
Fig. 3.4 Sectional diagram of rotor and stator of \square slot type IM.	21
Fig. 3.5 Rotor core of \square slot type IM.	22
Fig. 3.6 Laminated rotor of \square slot type IM.	23
Fig. 3.7 Sectional diagram of developed IM.	23
Fig. 3.8 Inside view of developed IM.	24
Fig. 3.9 Assembly of developed IM.	24
Fig. 3.10 Schematic diagram of load test.	25
Fig. 3.11 Variation of input power and no load loss of \square slot type IM.	29
Fig. 3.12 Characteristics of torque of \square slot type IM.	30
Fig. 3.13 Characteristics of P.F of \square slot type IM.	31

Fig. 3.14 Characteristics of input and output power of □ slot type IM.	32
Fig. 3.15 Characteristics of efficiency of □ slot type IM.	34
Fig. 3.16 Dimension of ○ slot.	35
Fig. 3.17 Dimension of rotor core of ○ slot type IM.	35
Fig. 3.18 Sectional diagram of rotor and stator of ○ slot type IM.	36
Fig. 3.19 Rotor core of ○ slot type IM.	37
Fig. 3.20 Laminated rotor of ○ slot type IM.	37
Fig. 3.21 Variation of input power and no load loss of ○ slot type IM.	39
Fig. 3.22 Characteristics of torque of ○ slot type IM.	40
Fig. 3.23 Characteristics of P.F of ○ slot type IM.	41
Fig. 3.24 Characteristics of input and output power of ○ slot type IM.	42
Fig. 3.25 Characteristics of efficiency of ○ slot type IM.	43
Fig. 3.26 Comparison of torque in different slot type.	44
Fig. 3.27 Comparison of P.F in different slot type.	45
Fig. 3.28 Comparison of input and output power in different slot type.	46
Fig. 3.29 Comparison of efficiency in different slot type.	47

Chapter 4

Fig. 4.1 Comparison of no load loss in developed IM and Hitachi IM.	50
Fig. 4.2 Comparison of torque in developed IM and Hitachi IM.	51
Fig. 4.3 Comparison of P.F in developed IM and Hitachi IM.	52
Fig. 4.4 Comparison of efficiency in developed IM and Hitachi IM.	53
Fig. 4.5 Comparison of output power in developed IM and Hitachi IM.	54

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

최근 우리나라 소비전력의 18%가 전등부하인 반면 60%가 전동기 부하라는 통계에서 전동기의 중요성을 알 수 있다. 이들 전동기가 소비하는 전력의 80% 이상이 유도전동기의 구동에 사용된다. 이와 같이 산업현장에서 사용되고 있는 전동기의 대부분을 유도전동기가 차지하고 있는 주된 이유는 가격이 저렴하고 기계적인 정류기와 브러시가 없어서 정기적인 보수가 필요 없기 때문이다^[1].

유도전동기의 회전자는 권선형과 농형의 두 가지가 있다. 회전자의 형태에 따라서 권선형 유도전동기와 농형 유도전동기로 분류된다. 권선형 유도전동기는 농형 유도전동기에 비해 적은 전류로 큰 기동토크를 낼 수 있으며, 정상 작동상태에서 효율이 높다는 등의 우수한 특성으로 인해 대형 유도전동기에 많이 사용되고 있으나 매우 비싸며, 브러시나 슬립 링의 마모 때문에 지속적인 유지관리가 필요하고, 농형 유도전동기보다 아주 복잡한 자동제어회로가 요구된다.

산업용 및 공조용 팬 동력원의 대부분이 농형 유도전동기를 사용하고 있으며 그 구조는 외측 고정자에 의해 내측 회전자가 회전하는 형태이다. 이와는 반대로 내측 고정자에 의해 외측 회전자가 구동되는 외측 회전형 방식의 유도전동기는 적은 전류로 지속적인 큰 토크가 필요한 팬 등에 적합한 형태라고 할 수 있다. 즉, 외측이 회전함으로써 큰 관성력을 얻을 수 있으므로, 일단 회전하게 되면 큰 토크를 지속적으로 발생시킬 수 있다. 그리고, 일시적인 입력 전압의 변동이나 부하 변동시에도 외측 회전자의 큰 관

성력에 힘입어 송풍량을 고르게 해주는 역할을 할 수 있으리라 사료된다.

내측 고정자에 의해 외측 회전자가 회전하는 방식은 VTR의 헤드 드럼 및 일부 PC의 냉각 팬에 사용되는 브리시리스 직류전동기가 있다. 그러나, 외측 회전형 유도전동기는 아직까지 개발되거나 실용화되었다고 보고된 적이 없다.

1.2 연구내용

본 논문에서는 팬 또는 이와 유사한 특성을 가진 부하의 동력원으로 사용할 목적으로, 이중 농형의 특성을 나타내는 외측 회전형 유도전동기의 회전자를 설계, 제작하여 고정자 저항시험, 무부하시험 및 회전자 구속시험을 통해 등가회로 정수를 측정한다. 그리고, 부하시험을 행하여 얻은 토크-속도, 출력, 역률 및 효율 특성곡선을 분석함으로써 외측 회전형 유도전동기 개발과 관련된 기술적인 토대를 마련하고자 한다. 이중 농형 유도전동기는 일반적으로 슬롯의 상·하부에 서로 다른 저항을 가진 도체를 사용하므로 제작비가 비싸진다. 본 논문에서는 제작상의 문제로 슬롯의 상·하부에 같은 저항의 도체를 사용하여 회전자를 제작하였다.

반면에, 회전자 철심의 슬롯 형상에 따라 전동기의 특성이 어떻게 변화하는지를 살펴보고자 다른 형상을 가진 회전자 두 종류를 제작, 시험함으로써 슬롯 형상에 따른 등가회로 정수 및 제반 특성을 비교하였다. 또한, 시험제작된 외측 회전형 유도전동기의 성능을 확인하기 위해 동일 마력의 기존 내측 회전형 유도전동기와 토크, 역률, 효율 및 출력특성을 상호 비교하였다.

개발된 유도전동기의 등가회로 정수는 유도전동기의 시험방법에 대해 기술한 IEEE 표준규격 112의 시험방법을 토대로 실험하여 결정하였다^[2]. 그리고, 부하시험은 전기동력계를 이용하여 실험하였다^[3].

본 논문의 구성은 다음과 같다.

2장에서는 유도전동기의 손실 및 등가회로 정수 결정방법에 대해 간략히 기술하고

3장에서는 다른 형상을 가진 외측 회전형 유도전동기의 회전자 두 종류를 제작하여 2장의 이론을 바탕으로 등가회로 정수를 구하였으며, 등가회로 정수와 부하시험을 행하여 얻은 특성곡선을 분석하였다.

4장에서는 시험제작된 유도전동기의 특성을 확인하고자 동일 마력의 기존 일반 유도전동기와 토크, 역률, 효율 및 출력특성을 비교하였다.

5장에서는 본 논문의 결론을 기술한다.

제 2 장 유도전동기의 특성

2.1 등가회로

유도전동기는 회전자에 전압과 전류를 유도시키며 동작하므로 변압기와 같이 1차측(고정자)은 2차측(회전자)에 전압을 유도하지만 변압기와 달리 2차측 주파수는 1차측 주파수와 같지 않다. 유도전동기의 등가회로는 회전자 권선의 전류 및 주파수의 변동 때문에 직접적으로 유도되지는 않는다^[4]. 먼저 정지중의 유도전동기는 단락회로를 가진 변압기와 유사하다. 또한, 전동기가 회전하고 있을 경우의 출력은 기계적 동력이므로 이 동력에 상당하는 에너지를 소비하는 부하저항으로 바꾸어 놓고 생각하여야 되는 점이 변압기와 다르다. 유도전동기의 최종적인 각 상당 등가회로를 만들기 위해서는 회전자부분을 고정자 측으로 환산하는 것이 필요하다.

일반적인 변압기에서 2차측의 전압, 전류 및 임피던스는 권수비를 이용하여 1차측으로 환산할 수 있는데 이를 유도전동기에 적용하여 상당등가회로를 그리면 Fig. 2.1과 같다^[2].

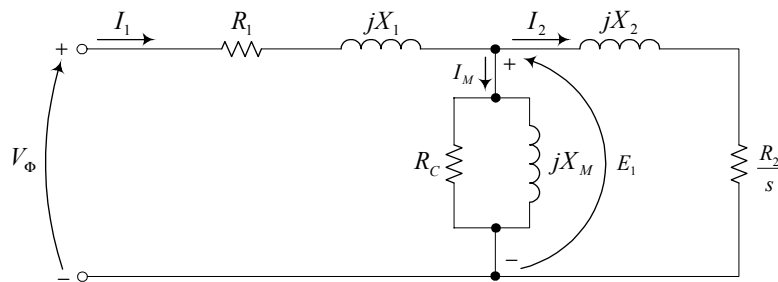


Fig. 2.1 Per-phase equivalent circuit of an induction motor.

2.2 손실과 전력의 흐름

일반적인 변압기의 경우에 출력은 2차측 권선으로부터 나오는 전기적 에너지이다. 유도전동기의 2차측 권선(회전자)은 단락되어 있으므로 전기적 출력은 존재하지 않고 대신, 기계적 출력이 발생한다. 유도전동기의 전기적 입력과 기계적 출력사이의 관계는 Fig. 2.2에 나타내었다.

유도전동기에서 고정자의 입력전력중 첫 번째로 나타나는 기기의 손실은 고정자 권선의 동손 P_{SCL} 이다. 고정자 철심의 자화재료에서는 히스테리시스손 및 와전류손이 발생한다. 고정자 입력전력에서 이러한 손실을 제외한 전력은 고정자와 회전자 사이의 공극을 통해 회전자로 전달되는데 이 전력을 공극전력 P_{AG} 이라 한다. 전력이 회전자에 전달된 후에, 전달된 전력의 일부분은 회전자 동손 P_{RCL} 으로 없어지고 나머지가 전기적 에너지에서 기계적 에너지의 형태로 변환된다(P_{conv}).

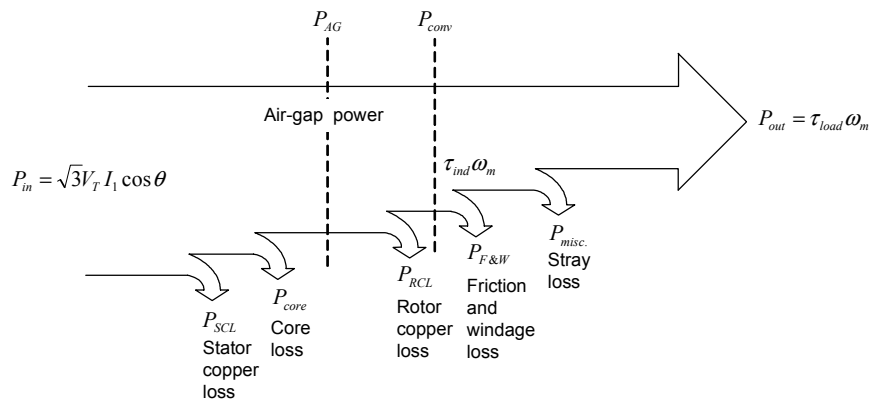


Fig. 2.2 Power flow diagram of an induction motor.

마지막으로 마찰손 및 풍손 $P_{F\&W}$ 과 포유손 $P_{misc.}$ 이 발생한다. 이러한 손실들을 제외한 에너지가 전동기의 출력 P_{out} 이 된다. 회전자 철심에서도 회전자 철손이 발생하는데 회전자 주파수가 작은 정격속도에서는 무시해도 좋다^[5].

2.3 등가회로 정수 결정

등가회로의 상수 R_1, R_2, X_1, X_2, X_M 은 무부하시험, 회전자 구속시험의 결과치와 고정자 권선의 직류 저항을 측정함으로써 결정할 수 있다.

유도전동기의 무부하시험은 변압기의 개방 회로 시험과 비슷하며 여자 전류와 회전 손실에 관한 정보를 제공한다. 이 무부하시험은 정격 주파수의 평형 다상 전압을 유도전동기의 고정자 권선에 공급하여 행한다. 이때 회전자에는 어떠한 기계적 부하도 걸지 않아야 한다. 무부하시 유도전동기의 전력 손실은 철손, 풍손 및 마찰손에 의해 발생한다. 정격 전압, 정격 주파수의 전원이 공급되는 유도전동기에 부하를 걸 때 발생하는 회전 손실은 일반적으로 일정하며 그 값은 무부하시의 총 손실과 같다.

유도전동기에 대한 회전자 구속시험은 변압기의 단락 회로 시험과 같으며 누설 임피던스에 대한 정보를 제공한다. 이 시험에서는 회전자를 고정시키며 평형 다상 전압을 고정자 단자에 공급해야 한다. 회전자 구속시험을 행할 경우 일반적으로 정격운전시의 전류 및 주파수와 비슷한 조건하에서 행해져야 한다.

2.3.1 고정자 저항시험

DC 전압을 유도전동기의 고정자 권선에 인가한다. 전류가 DC이기 때문에 회전자에 유도전압이 없고 결과적으로 유도전류도 흐르지 않으며, 전동기의 리액턴스도 직류 전류에서 영이다. 그러므로 전동기에 흐르는 전류를 제한하는 양은 고정자 저항이며, 이 저항을 결정할 수 있다. Fig. 2.3과 같이 회로를 구성하고 유도전동기의 3단자 중 2단자에 DC 전원을 연결한다.

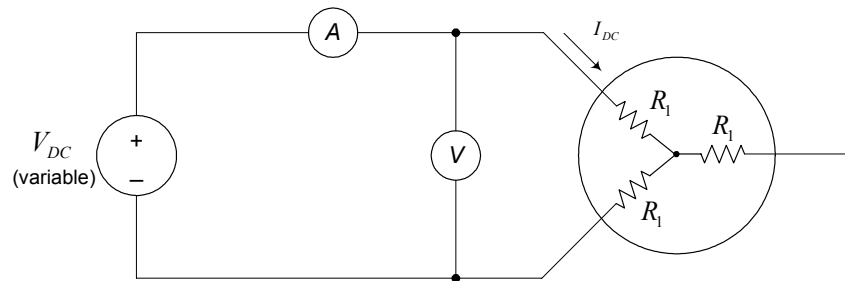


Fig. 2.3 Circuit diagram for the measurement of the stator resistance.

전류는 두 권선을 통해서 흐르므로 전류경로의 저항합은 $2R_1$ 이다.

$$2R_1 = \frac{V_{DC}}{I_{DC}}$$

$$\therefore R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \quad (2-1)$$

R_1 은 권선에 AC 전류가 흐를 때 일어나는 표피효과(skin effect)를 무시했기 때문에 정확한 값은 아니며 온도와 표피효과의 보정은 IEEE 표준규격 112에 따르면 식 (2-2)에 의한다.

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \cdot \frac{234.5 + T}{234.5 + t} \quad (2-2)$$

여기서,

T : 절연계급에 따른 규정값

t : 측정시 주위온도

2.3.2 무부하시험

유도전동기의 무부하시험을 위한 결선도는 Fig. 2.4와 같이 구성할 수 있다.

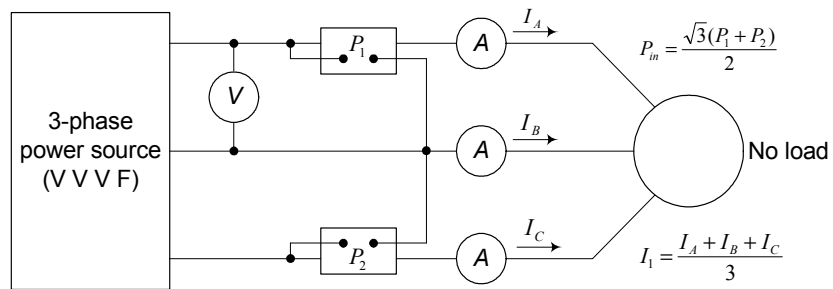


Fig. 2.4 Circuit diagram for no load test.

전동기를 무부하로 운전할 때 전동기의 유일한 부하는 마찰손과 공기에 의한 풍손이다. 전동기의 모든 변환전력은 기기손으로 소모되며, 기기의 슬립은 아주 작다. 회전자속의 회전속도는 일정하므로 회전자의 속도가 증가함에 따라 회전자속과 회전자간의 상대속도가 점점 작게 되고, 2차 도체를 끊는 회전자속의 속도도 감소되어 간다. 따라서 2차 회로에 유도되는 2차 전압의 크기와 주파수도 감소되고, 2차 전류도 이에 따라 감소한다. 그러므로, 전동기가 동기속도 근방에서 회전할 경우 회전자 전류 I_2 가 아주 작기 때문에 무시할 수 있으며, 고정자 동손은 다음과 같이 구할 수 있다^[2].

$$P_{SCL} = 3 I_1^2 R_1 \quad (2-3)$$

전동기의 입력전력은 식 (2-4)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{in} &= P_{SCL} + P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc} \\ &= 3 I_1^2 R_1 + P_{rot} \end{aligned} \quad (2-4)$$

여기서, P_{rot} 는 전동기의 회전손실로 아래 식과 같다.

$$P_{rot} = P_{core} + P_{F\&W} + P_{misc} \quad (2-5)$$

즉, 전동기의 입력전력이 주어질 때 기기의 회전손을 결정할 수 있다.

2.3.3 회전자 구속시험

유도전동기의 구속시험도 Fig. 2.5와 같이 무부하시험과 동일하게 결선하되 단지 회전자가 회전하지 못하게 하는데 이는 변압기의 단락 시험에 해당된다. 이 시험은 회전자를 회전하지 않도록 구속하고 전압을 인가한 상태에서 그 때의 전압, 전류 및 전력을 측정한다. 회전자 구속시험을 하기 위해 AC 전압을 고정자에 인가할 때 정격전류가 흐르도록 조정한다.

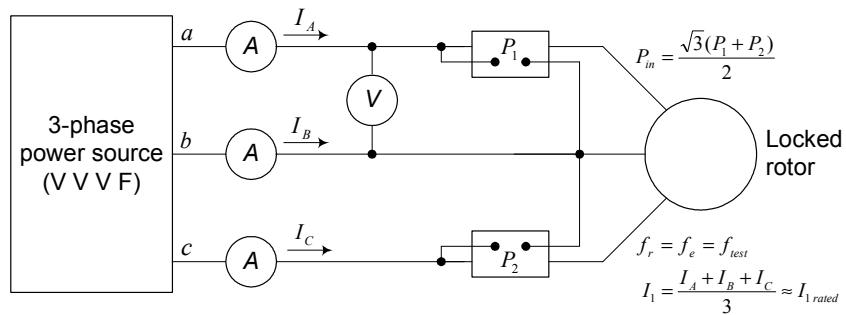


Fig. 2.5 Circuit diagram for the locked rotor test.

Fig. 2.1의 등가회로에서 회전자가 움직이지 않기 때문에 슬립 s 은 1이고, 회전자 저항 R_2/s 는 R_2 와 같아진다. R_2 와 X_2 가 작기 때문에 보다 큰 자화 리액턴스 X_M 에 흐르기 보다 R_2 와 X_2 를 통해서 대부분의 입력전류가 흐른다. 그러므로 회로는 X_1 , R_1 , X_2 그리고 R_2 의 직렬 결합처럼 보인다.

정상동작에서 고정자 주파수는 전력시스템의 선로주파수(50Hz 또는 60Hz)이다. 기동상태에서 회전자도 선로 주파수와 같다. 그러나 정상적인 동작상태에서 대개의 전동기의 슬립은 단지 2~4%이고 결과적으로 회전자 주파수의 범위는 1~3Hz이다. 이 때문에 선로주파수가 회전자의 정상적인 동작

조건을 나타내지 못하는 문제가 발생한다. 유효 회전자 저항은 B, C 등급^[2]의 전동기설계에서 주파수의 함수이기 때문에 정확하지 않은 회전자 주파수는 이 시험의 결과를 잘못 유도할 수 있다. 전형적인 형태는 주파수의 25% 또는 정격주파수보다 낮은 주파수를 사용한다^[9].

입력된 전력은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{in} = \sqrt{3} V_T I_1 \cos \theta \quad (2-6)$$

그러므로 회전자 구속 역률은 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$PF = \cos \theta = \frac{P_{in}}{\sqrt{3} V_T I_1} \quad (2-7)$$

그리고, 임피던스 각 θ 는 $\cos^{-1} PF$ 와 같다.

전동기회로의 전체 임피던스의 크기는 식 (2-8)로 나타낼 수 있다.

$$|Z_{LR}| = \frac{V_\phi}{I_1} = \frac{V_T}{\sqrt{3} I_1} \quad (2-8)$$

또한, 전체 임피던스는 아래와 같다.

$$Z_{LR} = R_{LR} + j X'_{LR} = |Z_{LR}| \cos \theta + j |Z_{LR}| \sin \theta \quad (2-9)$$

위 식에서 회전자 구속 저항 R_{LR} 은 식 (2-10)이 되며 회전자 누설 리액턴스 X'_{LR} 는 식 (2-11)이다.

$$R_{LR} = R_1 + R_2 \quad (2-10)$$

$$X'_{LR} = X'_1 + X'_2 \quad (2-11)$$

여기서,

X'_1 : 시험주파수에서의 고정자 리액턴스

X'_2 : 시험주파수에서의 회전자 리액턴스

회전자 저항 R_2 은 아래 식에 의해 구할 수 있다.

$$R_2 = R_{LR} - R_1 \quad (2-12)$$

리액턴스는 주파수에 직접 비례하기 때문에 정상적인 동작 주파수에서의 전체 등가 누설 리액턴스는 식 (2-13)이 된다.

$$X_{LR} = \frac{f_{rated}}{f_{test}} X'_{LR} = X_1 + X_2 \quad (2-13)$$

고정자 리액턴스와 회전자 리액턴스 각각을 분리할 수 있는 간단한 방법

은 아직까지 없다. 많은 경험에 의해서 어떤 형태로 설계된 전동기는 회전자 누설 리액턴스와 고정자 누설 리액턴스 사이에 어떤 비를 가진다는 것을 짐작할 수 있을 따름이다. Table 2-1^[2]은 이러한 경험을 요약한 것이다.

Table 2-1 Empirical distribution of leakage reactances in induction motor.

Rotor Design	X_1 and X_2 as functions of X_{LR}	
	X_1	X_2
Wound rotor	$0.5 X_{LR}$	$0.5 X_{LR}$
Design A	$0.5 X_{LR}$	$0.5 X_{LR}$
Design B	$0.4 X_{LR}$	$0.6 X_{LR}$
Design C	$0.3 X_{LR}$	$0.7 X_{LR}$
Design D	$0.5 X_{LR}$	$0.5 X_{LR}$

실제에서 누설 리액턴스는 모든 토크식에서 $X_1 + X_2$ 의 합으로 나타나기 때문에, X_{LR} 을 어떻게 분리하느냐 하는 것은 문제가 되지 않는다^[2].

2.4 특수 농형 유도전동기

정격부하가 인가된 상태에서 정상 운전중인 농형 유도전동기는 슬립과 전류가 작은 반면 역률과 효율은 크다. 그러나, 기동시에는 토크와 역률은 작은 반면 전류는 크다. 부하가 커서 높은 기동 토크가 요구된다면 전동기의 속도는 서서히 증가될 것이다. 따라서, 오랫동안 큰 전류가 흐르게 되므

로 전동기 자체에서 발생하는 열로 인해 문제가 생기게 된다.

회전자 회로 내의 저항은 유도전동기의 특성에 큰 영향을 미친다. 회전자 저항이 크면 전동기의 기동토크는 상당히 높아지고, 정상 동작상태에서 슬립도 아주 높아진다. 슬립이 높아질수록 실제로 기계에너지로 변화되는 공급전력이 점점 작아지며, 전동기의 효율이 더 낮아지게 된다. 높은 회전자 저항을 가진 전동기는 좋은 기동토크를 가지지만 정상 동작상태에서의 효율이 나빠진다. 반면에, 낮은 회전자 저항을 가진 전동기는 낮은 기동토크를 가지지만 정상 동작상태에서 높은 효율을 가진다. 기존의 농형 유도전동기는 회전자 저항이 고정되어 있으므로 기동시와 운동시의 특성을 향상시키기 위하여 회전자를 적절하게 설계할 필요가 있다.

2.4.1 심구 농형 유도전동기

슬롯 내의 도체에 전류가 흐르면 슬롯 바닥에 가까운 도체일수록 많은 누설자속과 쇄교한다. Fig. 2.6과 같이 회전자 도체를 회전자의 반경방향의 길이가 두께에 비하여 현저하게 큰 단면을 갖는 것을 사용하면 기동시에는 회전자 주파수가 높으므로 슬롯의 바닥에 가까운 도체부분의 누설 리액턴스는 현저하게 크게 되어, 도체중의 전류분포는 현저하게 불균등하게 되어 회전자의 외주 부근으로 밀집하게 된다. 그러므로 회전자 저항이 크고, 회전자 리액턴스가 작은 농형 유도전동기로서 동작하고 큰 기동토크를 발생하므로 기동특성이 개선된다. 회전자가 가속하여 슬립이 감소하여 정상 운전상태에 도달하면 회전자 주파수는 극히 낮아지므로 표피효과는 거의 없어지고 회전자 도체 내의 전류분포가 거의 균일하게 되어, 회전자 저항이

작은 효율 높은 보통의 농형 유도전동기로서 운전된다. 심구 농형 유도전동기의 기동토크는 보통 전부하 토크의 100~150%정도 된다.

심구 농형 유도전동기의 회전자 도체는 긴 단면을 갖는 단일도체이므로 회전자 동손에 의한 발열량이 이중 농형과 같을 경우 냉각효과가 큰 장점이 있다. 따라서, 기동 및 정지가 자주 되풀이되는 용도에 적합하다. 그러나, 도체를 너무 길게 하면 기계적으로 약하게 되므로 심구 농형은 주로 중형, 대형의 비교적 저속도의 전동기로서, 기동토크를 증가시키는 경우보다 기동전류를 감소시키고자 할 경우 많이 사용된다^[8].

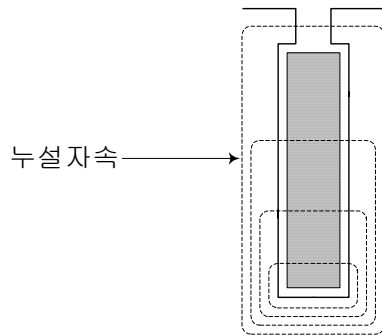


Fig. 2.6 Leakage flux of deep slot squirrel cage IM.

2.4.2 이중 농형 유도전동기

유도전동기에 이중 농형 회전자를 설치함으로써 기동전류를 줄이고 큰 기동토크를 얻을 수 있다. 이러한 형태의 회전자는 슬롯이 상부 슬롯(외측)과 하부 슬롯(내측)으로 구분되어 있으며 상부 슬롯에는 황동 또는 동니켈 합금과 같은 특수합금으로 된 비교적 저항이 높은 도체가 들어있고, 하부

슬롯에는 저항이 낮은 전기동으로 된 도체가 들어간다. 누설자속은 Fig. 2.7
 에서와 같이 하부 도체와 쇄교하는 것이 많고 상부 도체와 쇄교하는 자속은
 적다. 따라서, 회전자 누설 리액턴스는 하부 도체가 크고, 상부 도체에서는
 작게 된다.

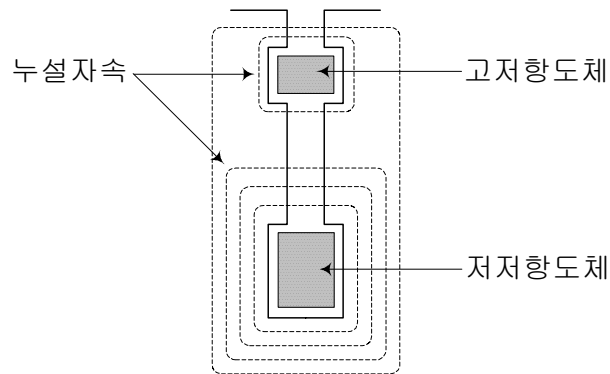


Fig. 2.7 Leakage flux of double squirrel cage IM.

기동시에는 회전자 주파수가 고정자 주파수와 같이 크므로 회전자 전류
 는 저항보다 리액턴스에 의하여 제한된다. 따라서, 리액턴스가 큰 하부 도
 체에는 전류가 거의 흐르지 않고 대부분의 전류는 저항이 높은 상부 도체
 에 흐르게 된다. 기동토크는 회전자 저항에 비례하므로 기동시에는 저항이
 높은 상부 도체에 흐르는 전류에 의하여 큰 기동토크가 얻어진다.

전동기가 가속하여 슬립이 작은 운전상태에 달하면 회전자 주파수가 작
 기 때문에 회전자 누설 리액턴스는 대단히 작게 된다. 따라서, 회전자 전류
 는 거의 저항만에 의해서 제한되고 대부분의 전류는 저항이 작은 하부 도
 체에 흐르게 되어, 보통의 저저항 농형 유도전동기와 같이 우수한 운전특
 성을 얻을 수 있다.

이중 농형 유도전동기는 기동시만 기동토크를 크게 하고 정상 운전상태에서는 보통의 전동기와 같은 특성을 갖기 때문에 상당히 큰 용량까지 직접 전원에 접속해서 기동할 수가 있다. 그러나, 리액턴스가 크므로 과부하 용량이 적고 운전시 역률이 다소 떨어지는 결점이 있다^[8].

제 3 장 외측 회전형 유도전동기

3상 유도전동기는 3상 권선에 의해 회전자계를 만든다. 보통, 전원에 접속되는 3상 권선은 고정된 철심 속에 감겨진다. 이 고정 부분을 고정자라 하는데 본 논문에서는 기존 전동기의 내측 부분인 회전을 고정자로 사용하여 바깥부분이 회전하도록 하였으며 이중 농형 유도전동기의 특성을 갖도록 회전자 철심의 슬롯을 설계하였다.

회전자 철심의 슬롯 형상에 따라 전동기의 특성이 어떻게 변화하는지를 살펴보기 위하여 두 가지의 서로 다른 형상의 회전자 철심의 슬롯을 제작하였다.

3.1 사각형(“□”형) 슬롯 외측 회전형 유도전동기

3.1.1 사각형 슬롯 유도전동기의 제작

1. 고정자

Fig. 3.1은 시험제작된 외측 회전형 유도전동기의 고정자이며, 1마력용 권선형 유도전동기의 회전을 이용하여 외측 회전형 유도전동기의 고정자로 사용하였다. 일반적으로 유도전동기의 1차권선에 사용되는 2층권의 중권으로 코일을 다시 감았으며, 3상의 접속은 Y-결선으로 하였고, 극수는 4극으로 하였다.

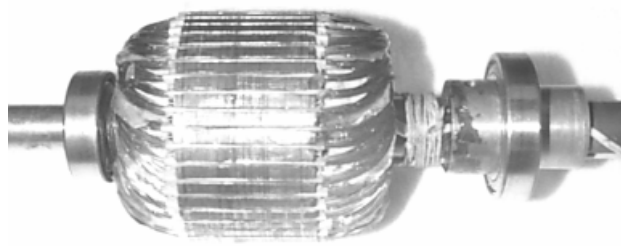


Fig. 3.1 Stator of developed IM.

2. 회전자 철심

Fig. 3.2는 설계된 회전자 슬롯의 형상을 나타내고 있다. 팬에 사용될 목적으로 개발하기 위하여 낮은 기동전류 및 큰 기동토크 특성을 보이는 이중 농형의 회전자로 설계하였다. 편의상 슬롯의 형상에 의해 사각형(“□”형) 슬롯이라 하겠다.

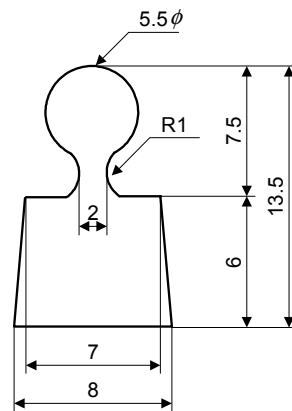


Fig. 3.2 Dimension of □ slot.

시험제작된 외측 회전형 유도전동기의 고정자 한 극에서 발생하는 자속을 쇄교하는 회전자 도체의 수 및 회전자 슬롯의 길이를 결정하고자 농형

유도전동기와 권선형 유도전동기를 분해하여 검사하였다.

먼저, 1마력용 4극 농형 유도전동기를 분해하고, 회전자를 절단하여 회전자 도체의 수를 세었다. 고정자 슬롯은 36개, 회전자 도체는 45개였다. 즉, 4극 유도전동기이므로 고정자 한 극에 감겨있는 슬롯 수는 9개이며, 한 극에서 발생하는 자속을 쇄교하는 회전자 도체 수는 $11\frac{1}{3}$ 개이고, 고정자의 슬롯의 길이는 약 13mm이었다.

다음으로, 1마력용 4극 권선형 유도전동기를 분해하여 검사한 결과 회전자 슬롯 수는 44개였고, 고정자 슬롯 수는 36개였다. 이 경우 4극이므로 고정자 한 극에 감겨있는 슬롯 수는 9개이며, 한 극에서 발생하는 자속을 쇄교하는 회전자 슬롯 수는 11개이고, 고정자의 길이는 약 14mm이었다(이 권선형 유도전동기의 회전자를 시험제작된 외측 회전형 유도전동기의 고정자로 사용하였다).

위의 검사 결과 4극 유도전동기의 경우 고정자 한 극당 고정자 슬롯 수와 회전자 도체 수의 비율은 약 9:11 정도이며, 고정자 슬롯의 길이는 약 13.5mm이었다.

시험제작된 외측 회전형 유도전동기에서 고정자는 권선형 유도전동기의 회전자를 사용하여 재 권선한바, 고정자 한 극에 감겨있는 슬롯 수는 11개이므로, 고정자 한 극에서 발생하는 자속을 쇄교하는 회전자 도체 수는 약 13개로 하여야 한다. 그러나, 외측 회전형 유도전동기의 회전자는 외측이 회전하므로 도체가 들어가는 슬롯 수가 많아질 경우 슬롯의 길이는 상대적으로 길어져, 기계적으로 약하게 될 것으로 사료되어 일반 유도전동기의 고정자 슬롯 수와 회전자 도체 수의 비율을 적용하여 고정자 한 극당 슬롯 수는 11개로 하였고, 회전자 도체 수는 9개로 하였다. 회전자 슬롯의 길이는 일반 유도전동기의 고정자 슬롯의 길이인 13.5mm로 하였다.

Fig. 3.3은 설계된 유도전동기의 회전자 철심이며, Fig. 3.4는 사각형 슬롯 유도전동기의 고정자와 회전자 단면이다.

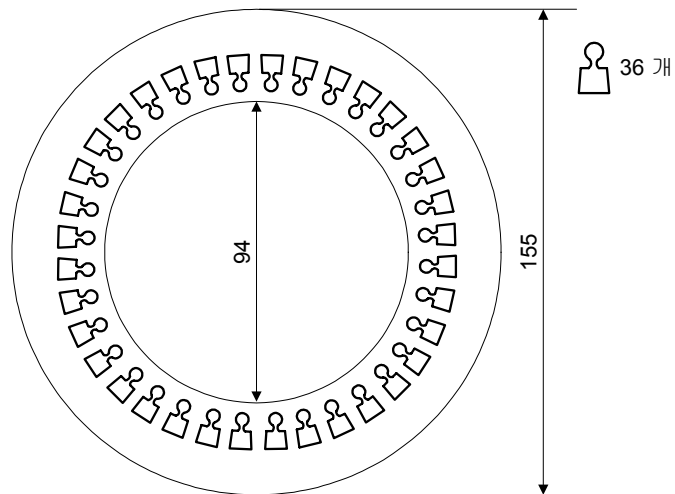


Fig. 3.3 Dimension of rotor core of □ slot type IM.

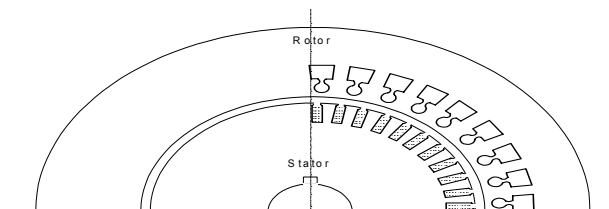


Fig. 3.4 Sectional diagram of rotor and stator of □ slot type IM.

Fig. 3.5는 시험제작된 회전자 철심이며, 강판의 방향에 관계없이 균일한 자기특성을 가지는 무방향성 규소강판으로 규소함유량 3.5%, 두께 0.5mm, 유·무기 복합코팅으로 절연코팅되어 있다.

전동기의 공극에서 가까운 쪽에 위치해 있는 슬롯의 형상은 원형으로 하였으며, 공극에서 멀리 위치해 있는 슬롯의 형상은 공극에서 가까운 쪽보다 상대적으로 단면적이 큰 사각형으로 설계하였다. 슬롯의 수는 36개이다.

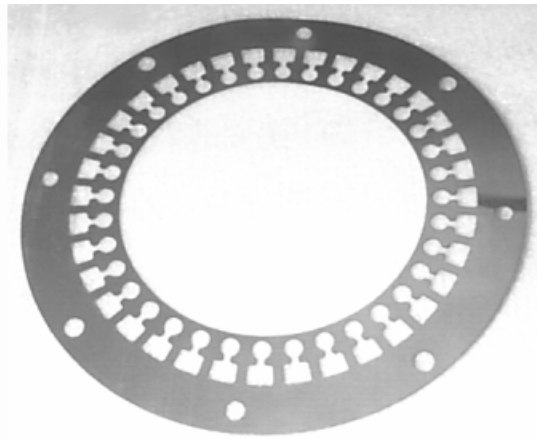


Fig. 3.5 Rotor core of □ slot type IM.

3. 회전자

일반적으로 이중 농형 회전자의 상·하층부의 도체는 서로 다른 저항의 도체를 사용하나 본 논문에서는 제작경비가 많이 들어 상·하층부에 같은 저항의 도체를 사용하였으며, 도체는 알루미늄을 사용하였다.

Fig. 3.6은 시험제작된 회전자로, Fig. 3.5의 회전자 철심 110개를 적층하여 회전자 슬롯 속에 알루미늄을 주입하였으며 양단을 원형의 단락환으로 단락하였다.

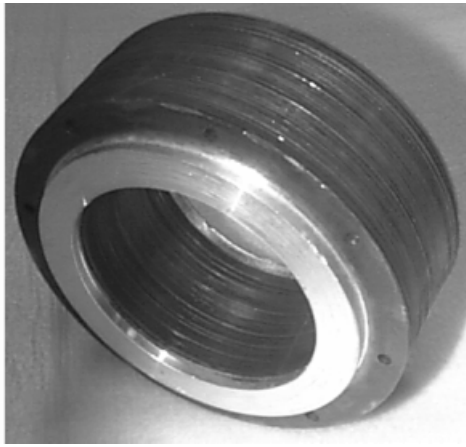


Fig. 3.6 Laminated rotor of □ slot type IM.

4. 외측 회전형 유도전동기 내부

설계된 외측 회전형 유도전동기의 단면을 Fig. 3.7에 보이고 있다.

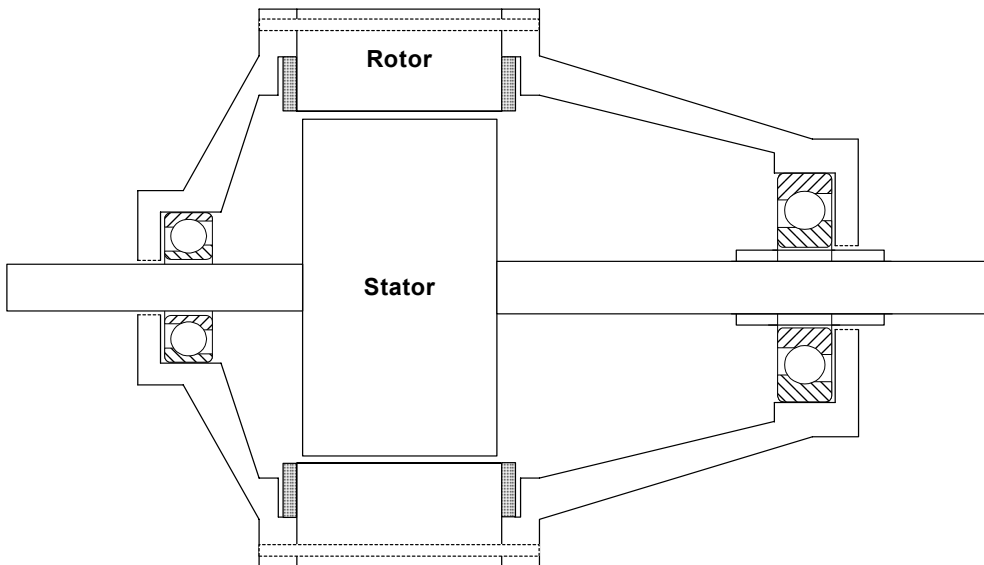


Fig. 3.7 Sectional diagram of developed IM.

Fig. 3.8은 시험제작된 외측 회전형 유도전동기의 내부 모습이다. 바깥쪽에 회전자가 있고, 안쪽에 고정자가 위치한 모습을 볼 수 있다.

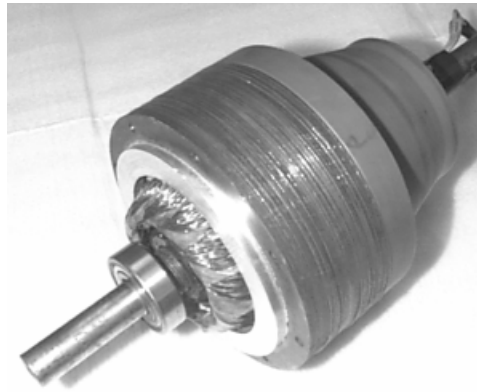


Fig. 3.8 Inside view of developed IM.

5. 외측 회전형 유도전동기

Fig. 3.9는 조립된 외측 회전형 유도전동기이다. 전동기 운전시 고정자 양단을 고정시킨다.



Fig. 3.9 Assembly of developed IM.

3.1.2 실험장치의 구성

시험제작된 유도전동기의 성능시험을 하기 위한 실험장치의 전체 구성을 Fig. 3.10에 나타내었다. 동력계(Dynamometer)와의 연결은 시험제작된 유도전동기는 외측이 회전하므로 직접 연결하지 못하고 타이밍벨트를 이용하여 연결하였다. 3상 전원이 Power Analyzer를 통하여 유도전동기에 인가 되면, Power Analyzer에서 전압, 전류, 전력 및 역률 데이터를 PC로 전송하며, 유도전동기에 연결된 동력계로부터 측정된 토크 및 회전수 데이터는 Dynamometer Controller를 통하여 PC에 전송된다. 전동기 보호목적으로 회전수가 900[rpm]이 되면 시험을 종료하였다.

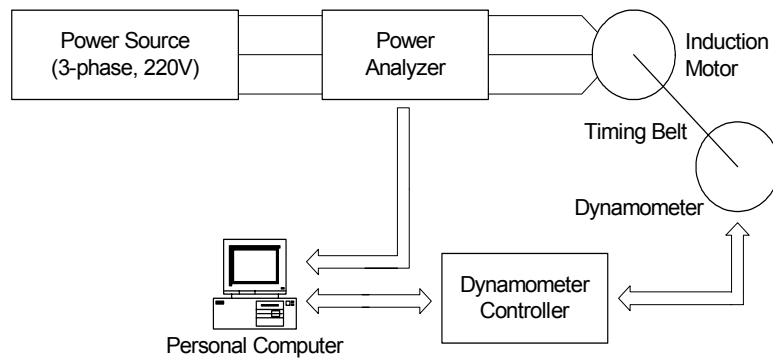


Fig. 3.10 Schematic diagram of load test.

Table 3-1은 Dynamometer의 사양을 나타내며, 전동기에 부하토크를 가하여 그때의 토크 및 회전수를 Dynamometer Controller로 전송한다.

Table 3-1 Specification of Dynamometer.

Maker	MAGTROL
Model	HD-805-7NA
Brake	Hysteresis brake
Torque range	240 kg _f · cm
Maximum speed	6000 rpm
Maximum input power	3600 Watts continuous duty
	6000 Watts < 5 minutes

Table 3-2는 Power Analyzer의 사양을 나타내며, 전압, 전류, 전력 및 역률을 측정하여 측정된 데이터를 PC로 전송한다.

Table 3-2 Specification of Power Analyzer.

Maker	MAGTROL
Model	5300
Voltage	150, 300, 600 Volts DC and Volts rms
Current	5, 25, 100 Amps DC and Amps rms

Table 3-3은 Dynamometer Controller의 사양을 나타내며, Dynamometer에 단계적으로 부하토크를 가하며, 그때의 토크 및 회전수를 PC로 전송한다.

Table 3-3 Specification of Dynamometer Controller.

Maker	MAGTROL
Model	DSP 6000
Accuracy	Speed : 0.01% of reading
	Torque : 0.2% of range($\pm 2V$)
Temperature coefficient	0.001% of range/ $^{\circ}C$

3.1.3 실험 및 고찰

부하시험은 동력계에서 전동기에 단계적으로 부하토크를 가하여 행하였으며, 그 때의 토크 및 회전수의 데이터를 PC로 입력받아 토크-속도 특성 곡선을 작성하였다. 회전자 구속시험은 15Hz에서 시험을 행하였으며 동력계에서 최대토크보다 큰 부하토크(정동토크)를 가하여 회전자를 구속하였다. 회전자 구속시험을 15Hz에서 행하였을 때, 측정계기의 지침이 많이 흔들려 측정에 어려움이 있었다. 측정계기의 입력범위를 높은 것으로 사용하여 지침의 흔들림은 많이 줄었으나, 측정 오차가 있으리라 사료된다.

1. 유도전동기 정수

시험제작된 사각형 슬롯 유도전동기는 이중 농형의 특성을 갖도록 제작하였는데 유도전동기의 설계 기준은 가장 표준화된 NEMA(National Electrical Manufacturer's Association)의 설계등급에 두었다. 부하시험을 통하여 획득된 토크-속도 특성(Fig. 3.12)은 NEMA 설계등급 B급^[2]과 유사한 특성을 나타내어 Table 2-1에서 Design B의 분배비율을 적용하여 회전자 구속 누

설 리액턴스 $X_{LR}=9.62[\Omega]$ 로부터 X_1 , X_2 를 구하였다. 시험제작된 유도전동기의 측정된 정수는 Table 3-4와 같다. 등가회로 정수의 계산 과정은 Appendix A에 첨부하였다.

Table 3-4 Parameters of □ slot type IM.

기 호	실험측정값 [25℃]	기 호	실험측정값 [25℃]
R_1	4.74[Ω]	X_1	3.85[Ω]
R_2	2.36[Ω]	X_2	5.77[Ω]
		X_M	23.59[Ω]

2. 무부하 손실

무부하시험에 의해 측정된 전동기의 입력전력과 무부하 손실에 관한 결과를 Table 3-5에 나타내었다.

Table 3-5 Results of no load test of □ slot type IM.

Input power	338.9[W]
Stator copper loss	290.79[W]
Rotational loss	48.11[W]

Fig. 3.11은 입력전력과 무부하 손실과의 관계를 나타내고 있는데 고정자 동손이 입력전력의 약 86%이고, 회전손실은 약 14%를 차지하고 있다. 이는 입력전력의 대부분이 고정자 동손으로 소모되고 있음을 보여준다.

보통 전동기의 고정자 및 회전자 철심은 프레스 절단을 한다. 프레스 절단은 대량생산이 용이하고 균일한 크기의 철심을 얻을 수 있으나, 소량 생

산의 경우 많은 제작비용이 소요된다는 단점이 있다. 본 논문에서는 높은 제작단가로 인하여 레이저로 회전자 철심을 가공하였는데 철심의 크기 및 슬롯의 형상이 균일하지 못하였다. 이렇게 제작된 철심을 적층하여 회전자를 구성하였으므로 정밀도가 결여되었으며 결과적으로 공극이 커지게 되었다. 큰 공극으로 인한 자기저항의 증가는 일정한 자속레벨을 얻기 위해 훨씬 더 많은 양의 자화전류가 필요하여, 고정자에 흘러 들어가는 전류가 증가함으로써 입력전력의 대부분이 고정자 동손으로 소모되었다.

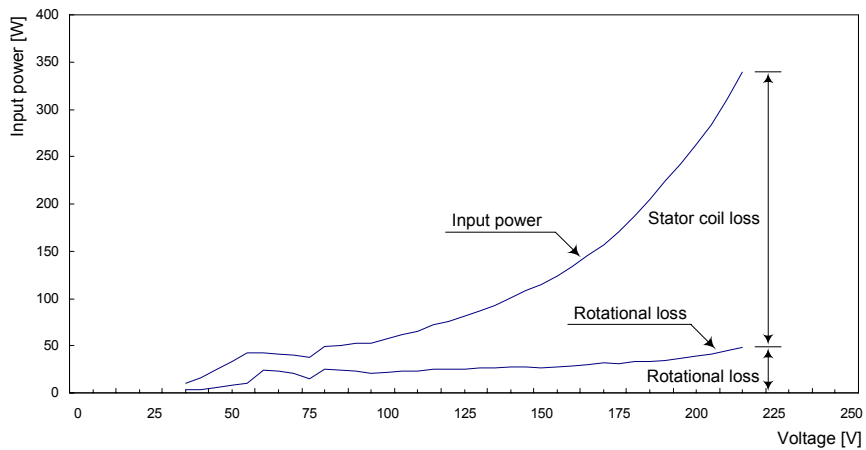


Fig. 3.11 Variation of input power and no load loss of □ slot type IM.

3. 토크-속도 특성

Fig. 3.12는 사각형 슬롯 유도전동기의 토크-속도 특성곡선으로 이중 농형의 토크-속도 특성을 나타내었다. 모든 도체바의 임피던스는 거의 같기 때문에 각 도체바를 통하여 흐르는 평균전류는 같다. Fig. 3.2에서 큰 단면적을 갖는 아랫부분은 회전자 저항을 상당히 감소시키고, 작은 단면적의 윗부분은 회

전자 저항을 증대시킨다. 따라서, 누설자속은 저항이 낮은 도체에서 많이 쇄교하고, 저항이 높은 도체에서 쇄교하는 자속은 적다. 즉, 회전자 누설 리액턴스는 단면적이 작은 쪽이 작게되고 단면적이 큰 쪽은 크게된다. 높은 슬립에서는 2차 주파수가 1차 주파수와 같이 크므로 2차 전류는 저항보다 리액턴스에 의하여 제한되어 리액턴스가 작은, 회전자 저항이 큰 쪽(단면적이 작은 쪽)으로 흐름으로써 기동토크가 커지며, 낮은 슬립에서는 2차 주파수가 작기 때문에 2차 누설 리액턴스는 대단히 작게 되어 2차 전류는 거의 저항만에 의하여 제한되고 대부분의 전류는 저항이 작은 쪽(단면적이 큰 쪽)으로 흐름으로써 보통의 농형 유도전동기와 같은 운전특성을 갖는 것으로 사료된다.

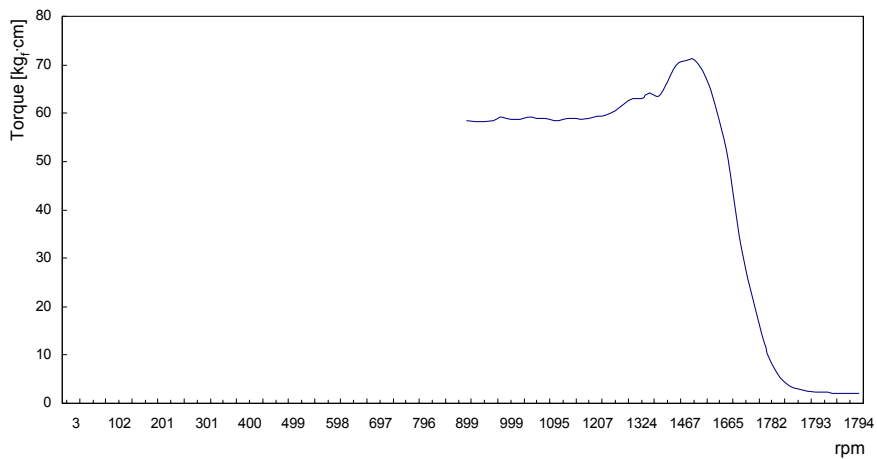


Fig. 3.12 Characteristics of torque of □ slot type IM.

NEMA의 설계등급에 의하면 설계등급 B의 유도전동기는 최대토크는 정격 부하 토크의 200%보다 크거나 같아야 하고, 회전자 슬립은 5%정도이어야 한다. 사각형 슬롯 유도전동기의 최대토크는 1535[rpm]에서 71.06[kg_f · cm]이며, 정격부하 토크의 약 160%이었다. 회전자 슬립은 5.9%이었다.

최대토크가 적은 이유는 유도전동기의 등가회로(Fig. 2.1)에서 적은 자화 리액턴스 X_M 로 인하여 1차측으로 자화전류가 많이 흘러, 2차측 전류가 감소한 것이다. 바꾸어 말하면, 큰 공극으로 인해 자로의 자기저항이 커져 1차측(고정자)과 2차측(회전자) 권선의 자기적 결합력이 떨어져 2차측에 유기되는 기전력의 감소에 의해서 2차전류(회전자 전류)가 적게 흘러 회전자 전류와 회전자속 사이에 발생하는 전자력이 작아져 토크가 낮아진 것으로 사료된다.

4. 역률 특성

Fig. 3.13은 시험제작된 유도전동기의 역률을 나타내고 있다.

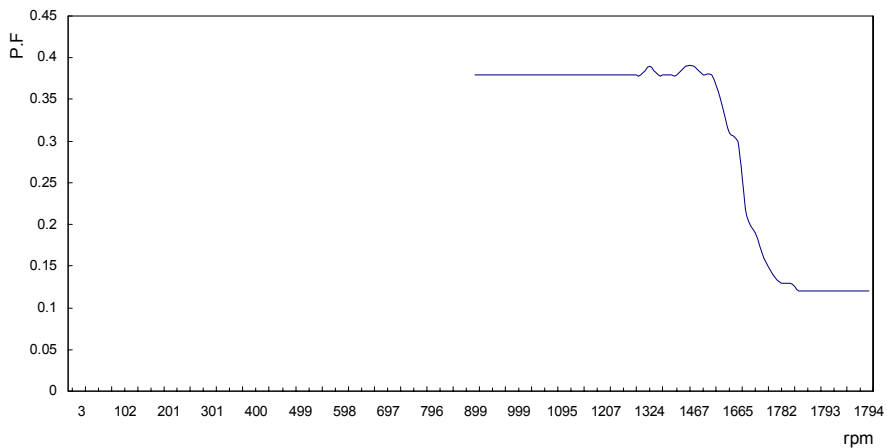


Fig. 3.13 Characteristics of P.F of □ slot type IM.

고정자에 유입되는 1차전류 중 여자전류가 차지하는 비율은 크며, 여자전류의 대부분이 회전자속을 만들기 위한 자화전류로 사용된다. 시험제작된 유도전동기의 공극이 커 일정한 자속레벨을 얻기 위해 많은 전류가 자화전류로 사용되어 1차전류와 전압의 위상각이 커져 역률이 저하된 것으로 사료된다.

5. 출력 특성

Fig. 3.14는 사각형 슬롯 유도전동기의 입력과 출력을 나타내고 있다. 출력은 토크와 각속도의 곱으로 표시할 수 있는데^{[6][7]} 무부하시 고정자 동손이 일정하게 존재하고 부하가 증가함에 따라 출력이 증가하다가 최대토크가 발생하는 곳을 기점으로 하여 토크 및 각속도가 감소하여 출력이 저하되고 있다.

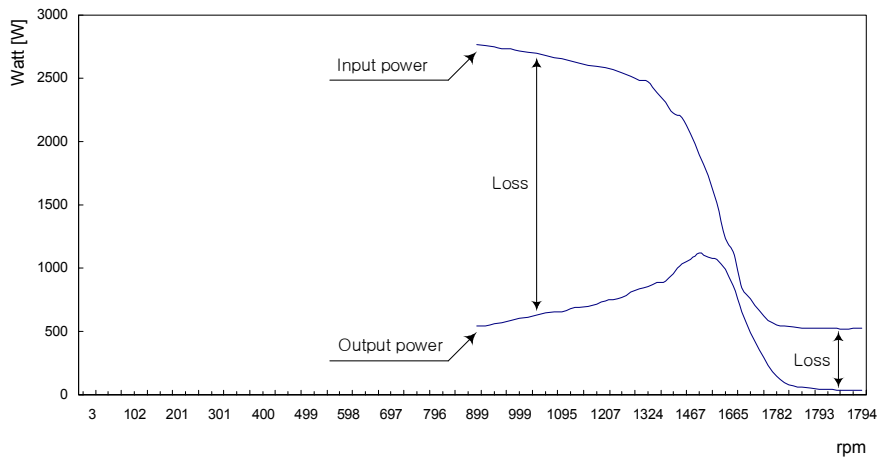


Fig. 3.14 Characteristics of input and output power of □ slot type IM.

시험제작된 유도전동기의 출력이 비교적 저하된 것을 알 수 있는데 이는 고정자 동손의 증가, 2차주파수가 상승함에 따라 회전자 동손 및 회전자 철손의 증가 그리고, 표류부하손으로 인한 손실로 회전자 전류가 감소함으로써 회전자 전류와 회전자속 사이에 발생하는 전자력이 작아져 토크가 낮아짐으로 출력이 감소함을 알 수 있다.

제작상의 과정에서 공극이 커져 고정자 동손이 증가하였으며, 회전자 구

속시험중 각 상에서 측정된 전류 값이 상이하였다. 이것은 회전자의 공극이 일정하지 않다는 것을 의미하며, 이로 인한 전동기의 표류부하손이 증가하였다. 측정된 전류 값은 Appendix A에 나타내었다. 회전자 철손의 증가는 철심을 적층할 때 전기강판의 절연체가 파괴되어 전동기에서 와전류 손실이 많이 발생한 것으로 사료된다. 전기강판의 경우 강판표면 상·하부에 절연코팅이 되어있다. 회전자 슬롯에 도체봉을 넣거나, 다이캐스팅(die casting)하여 철심의 절연체의 파괴를 최소화하여야 한다. 도체봉 삽입과 다이캐스팅은 제작경비가 많이 들어 본 논문의 경우 적층된 회전자 슬롯에 알루미늄을 주입하기 위하여 적층된 철심을 알루미늄의 녹는점(660.4℃)보다 높은 온도로 예열 시킨 후 중력으로 알루미늄을 주입하였다. 절연코팅 자체는 약 800℃까지 견디지만 절연성 관점에서 보면 600℃가 넘어가면 공장에서 출하될 때보다 절연성이 저하되기 시작한다. 이 과정에서 일부 철심의 절연체가 파괴되어 단락 됨으로써 와전류손실이 커진 것으로 사료된다.

6. 효율 특성

유도전동기의 효율은 출력과 입력의 비로 나타낸다. Fig. 3.14에서 출력과 입력의 비를 구하여 작성한 것이 Fig. 3.15의 효율 특성곡선이다. 무부하시는 여자전류가 매우 커 손실이 많이 발생되어 효율이 낮다. 부하가 증가함에 따라 효율이 높아지다가 최대토크가 발생한 곳을 기점으로 하여 앞에서 언급한 손실들로 인하여 효율이 낮아짐을 알 수 있다.

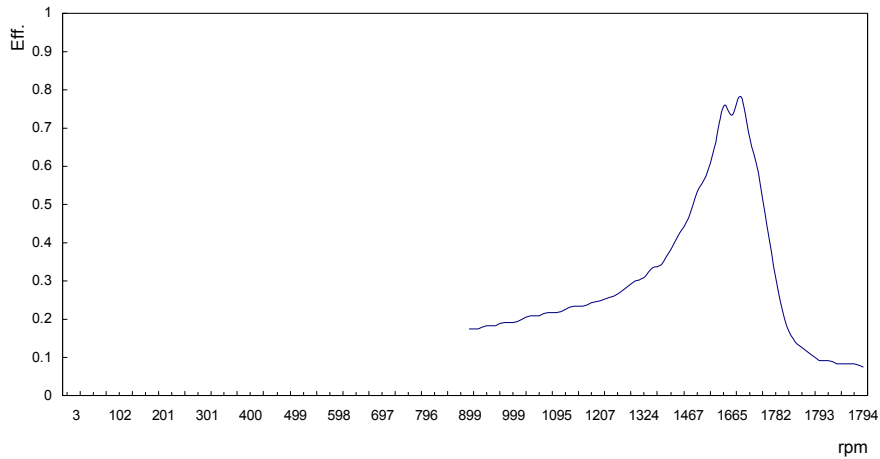


Fig. 3.15 Characteristics of efficiency of □ slot type IM.

3.2 원형(“○”형) 슬롯 외측 회전형 유도전동기

3.2.1 원형 슬롯 유도전동기의 제작

1. 고정자

사각형 슬롯 유도전동기의 고정자를 사용하였다.

2. 회전자 철심

회전자 슬롯의 형상이 바뀌면 동일한 고정자에서 토크-속도 특성이 어떻게 변하는지 알아보려고 사각형 회전자 슬롯과 다른 형상의 슬롯을 설계하였다. Fig. 3.16은 설계된 회전자 슬롯의 형상을 나타내고 있으며, 이중 농

형의 회전자로 설계하였다. Fig. 3.17은 설계된 유도전동기의 회전자 철심이다. 편의상 슬롯의 형상에 의해 원형(“○”형) 슬롯이라 하겠다.

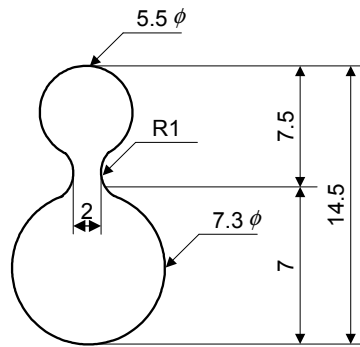


Fig. 3.16 Dimension of ○ slot.

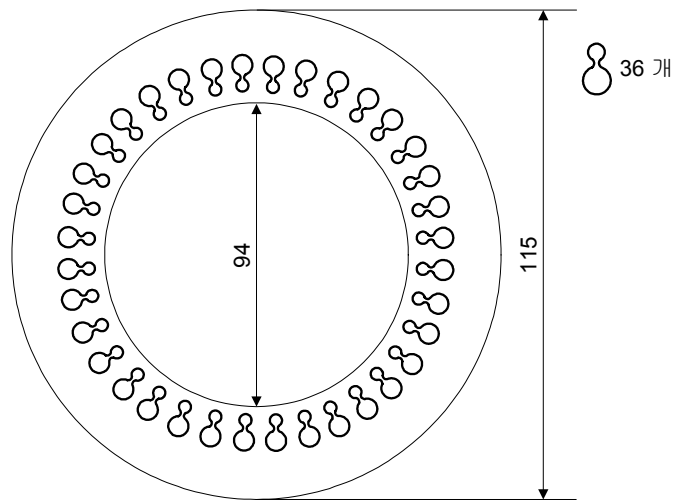


Fig. 3.17 Dimension of rotor core of ○ slot type IM.

Fig. 3.18은 설계된 유도전동기의 고정자 및 회전자 단면이다. 고정자 한 극당 슬롯수는 11개로 하였고, 고정자 한 극에서 발생하는 자속을 쇄교하는 회전자 도체 수는 9개로 하였다. 회전자 슬롯의 길이는 14.5mm로 하였다.

Fig. 3.18 Sectional diagram of rotor and stator of \circ slot type IM.

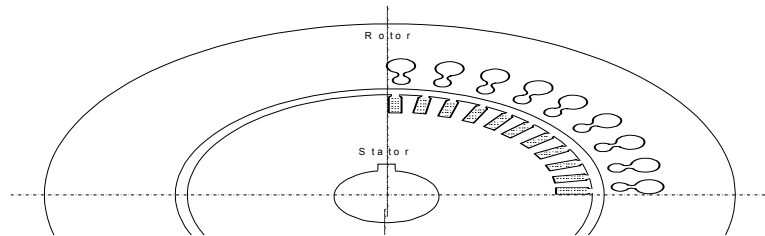


Fig. 3.19는 시험제작된 회전자 철심이며, 회전자 철심은 강판의 방향에 관계없이 균일한 자기특성을 가지는 무방향성 규소강판으로 규소함유량 3.5%, 두께 0.5mm, 유·무기 복합코팅으로 절연코팅되어 있다. 전동기의 공극에서 가까운 쪽에 위치해 있는 슬롯의 형상은 원형으로 하였으며, 공극에서 멀리 위치해 있는 슬롯의 형상은 공극에서 가까운 쪽보다 상대적으로 단면적이 큰 원형으로 설계하였다. 슬롯의 수는 36개이다.

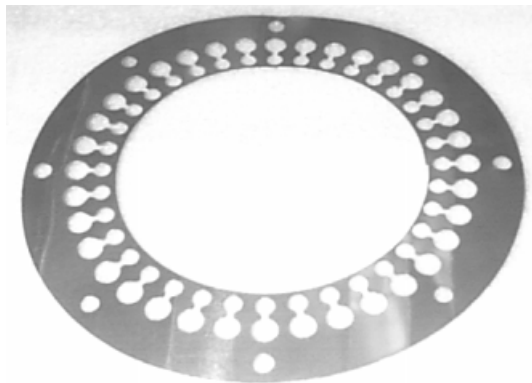


Fig. 3.19 Rotor core of \circ slot type IM.

3. 회전자

Fig. 3.20은 시험제작된 회전자로, Fig. 3.19의 회전자 철심 110개를 적층하여 슬롯의 상·하층부에 같은 저항의 도체인 알루미늄을 주입하였고, 양단을 원형의 단락환으로 단락하였다.

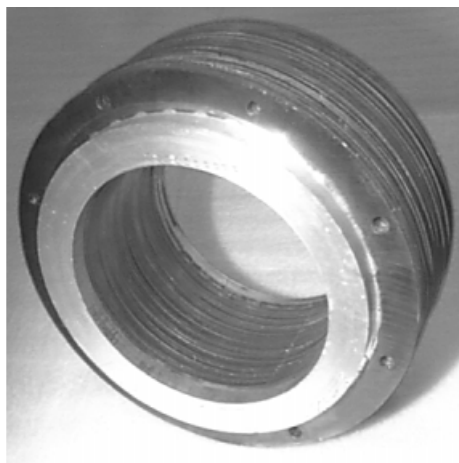


Fig. 3.20 Laminated rotor of \circ slot type IM.

3.2.2 실험 및 고찰

제작된 유도전동기에 대한 실험은 사각형 외측 회전형 유도전동기에서 시행했던 것과 같은 동일한 시험을 행하여 등가회로 정수 측정 및 성능곡선을 구하였다.

1. 유도전동기 정수

시험제작된 원형 슬롯 유도전동기의 고정자 권선 저항 측정, 무부하시험 및 회전자 구속시험 결과 측정된 정수는 Table 3-6과 같다. 원형 슬롯 유도전동기는 이중 농형의 특성을 갖도록 제작하였는데 유도전동기의 설계기준은 가장 표준화된 NEMA의 설계등급에 두었다. 부하시험을 통하여 획득된 토크-속도 특성(Fig. 3.22)은 NEMA 설계등급 B급과 유사한 특성을 나타내어 Table 2-1에서 Design B의 분배비율을 적용하여 회전자 구속 누설 리액턴스 $X_{LR}=7.88[\Omega]$ 로부터 X_1 , X_2 를 구하였다. 측정하여 계산된 과정은 Appendix B에 나타내었다. Table 3-4의 사각형 슬롯 유도전동기의 자화 리액턴스 X_M 와 Table 3-6의 원형 슬롯 유도전동기의 자화 리액턴스 값이 비슷한 것은 시험제작된 두 전동기의 회전자 철심 및 회전자 제작과정이 동일하여 공극이 거의 같기 때문이다.

Table 3-6 Parameters of \circ slot type IM.

기 호	실험측정값 [25°C]	기 호	실험측정값 [25°C]
R_1	4.71[Ω]	X_1	3.15[Ω]
R_2	1.51[Ω]	X_2	4.73[Ω]
		X_M	22.96[Ω]

2. 무부하 손실

무부하시험 결과 측정된 전동기의 입력전력과 무부하 손실에 관한 결과를 Table 3-7에 나타내었다.

Table 3-7 Results of no load test of ○ slot type IM.

Input power	333[W]
Stator copper loss	273.93[W]
Rotational loss	59.07[W]

Fig. 3.21은 입력전력과 무부하 손실과의 관계를 나타내고 있는데 고정자 동손이 입력전력의 약 82%이고, 회전손실은 약 18%를 차지하고 있다. 이는 제작상의 과정에서 공극이 커져 입력전력의 대부분이 고정자 동손으로 소모가 되어 전력소비가 많아 졌다.

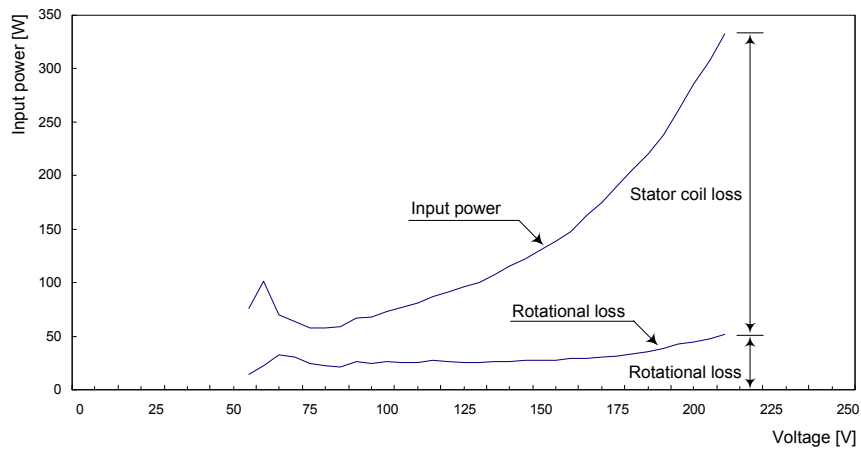


Fig. 3.21 Variation of input power and no load loss of ○ slot type IM.

3. 토크-속도 특성

Fig. 3.22는 원형 슬롯 유도전동기의 토크-속도 특성곡선으로 이중 농형의 토크-속도 특성을 나타내었다. 사각형 슬롯 유도전동기에서 언급된 것처럼 제작비용이 많이 들어 본 논문의 경우 회전자 상·하부 슬롯에 같은 저항의 도체를 사용하였으나, 슬롯의 단면적 차이에 의한 회전자 저항의 변화로 누설 리액턴스가 달라져 이중 농형 유도전동기의 토크-속도 특성을 보이는 것으로 사료된다. NEMA의 설계등급에 의하면 설계등급 B의 유도전동기는 최대토크는 정격부하 토크의 200%보다 크거나 같아야 하고, 회전자 슬립은 5%정도이어야 한다. 원형 슬롯 유도전동기의 최대토크는 1517[rpm]에서 81.43[kg_f · cm]이며, 정격부하 토크의 약 180%이었다. 회전자 슬립은 5.7%이었다. 최대토크가 적은 이유는 사각형 슬롯 유도전동기와 같이 적은 자화리액턴스 X_M 로 인하여 1차측으로 자화전류가 많이 흘러, 2차측 전류가 감소하여 회전자 전류와 회전자속 사이에 발생하는 전자력이 작아져 토크가 낮아진 것으로 사료된다.

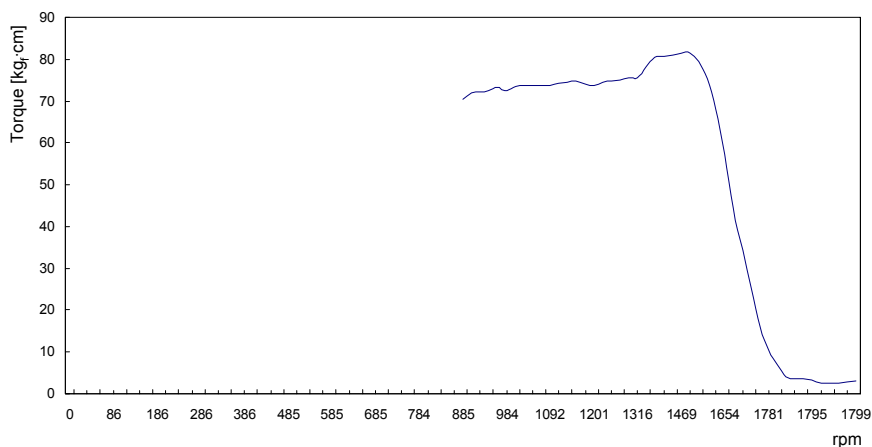


Fig. 3.22 Characteristics of torque of ○ slot type IM.

4. 역률 특성

Fig. 3.23은 원형 슬롯 유도전동기의 역률을 나타낸다. 회전자 제작상의 문제로 공극이 커져 일정한 자속레벨을 얻기 위해 많은 전류가 자화전류로 사용되어 1차전류와 전압의 위상각이 커져 역률이 낮아진 것으로 사료된다.

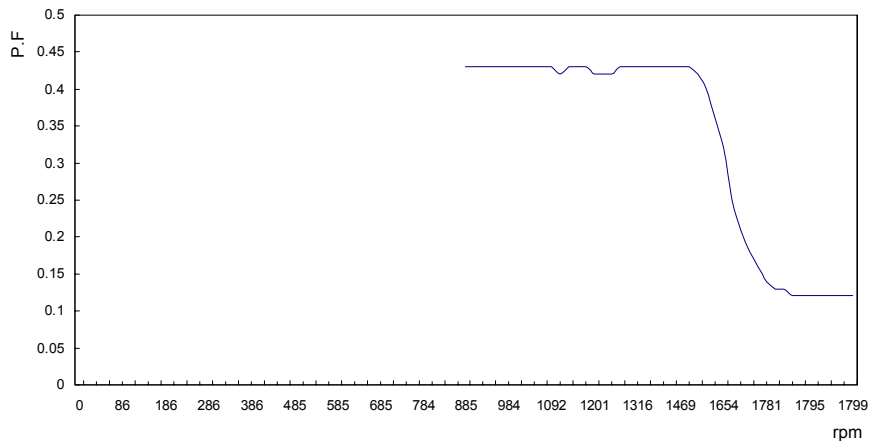


Fig. 3.23 Characteristics of P.F of \bigcirc slot type IM.

5. 출력 특성

Fig. 3.24는 원형 슬롯 유도전동기 입력과 출력을 나타내고 있다. 출력은 토크와 각속도의 곱으로 표시할 수 있는데^{[6][7]} 무부하시 고정자 동손이 일정하게 존재하며 부하가 증가함에 따라 출력이 증가하다가 최대토크가 발생하는 곳을 기점으로 하여 토크 및 각속도가 감소하여 출력이 저하되고 있다. 시험제작된 유도전동기의 출력이 비교적 저하된 것을 알 수 있는데 이는 고정자 동손의 증가, 2차주파수가 상승함에 따라 회전자 동손 및 회전자 철손의 증가 그리고, 표류부하손으로 인한 손실로 회전자 전류가 감소함으로써 회전자 전류와 회전자속 사이에 발생하는 전자력이 작아져 토

크가 낮아짐으로 출력이 감소함을 알 수 있다. 즉, 제작상의 과정에서 공극이 커지고, 일정하지 않아 이로 인한 손실의 증가 및 회전자 철심 절연체의 파괴로 출력이 감소한 것으로 사료된다.

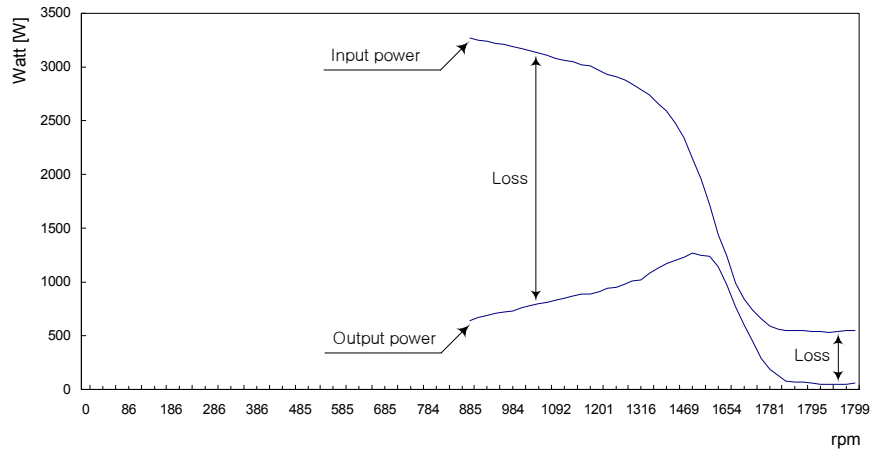


Fig. 3.24 Characteristics of input and output power of \circ slot type IM.

6. 효율 특성

유도전동기의 효율은 출력과 입력의 비로 나타낸다. Fig. 3.24에서 출력과 입력의 비를 구하여 작성한 것이 Fig. 3.25의 효율 특성곡선이다.

무부하시는 여자전류가 매우 커 손실이 많이 발생되어 효율이 낮다. 부하가 증가함에 따라 효율이 높아지다가 최대토크가 발생한 곳을 기점으로 하여 앞에서 언급한 손실들로 인하여 효율이 낮아짐을 알 수 있다.

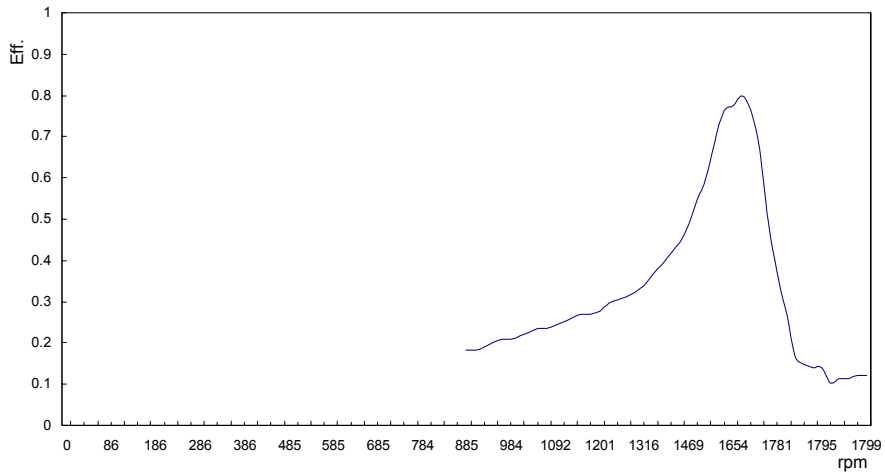


Fig. 3.25 Characteristics of efficiency of ○ slot type IM.

3.3 사각형 및 원형 슬롯 유도전동기의 성능비교

회전자 철심의 슬롯 형상에 따라 유도전동기의 특성이 어떻게 변화하는지를 살펴보고자 시험제작된 유도전동기의 회전자 철심의 형상을 사각형 및 원형으로 제작하여 실험한 결과를 비교하였다.

1. 토크-속도 특성 비교

Fig. 3.26은 시험제작된 유도전동기의 토크-속도 곡선을 비교한 것이다. 원형 슬롯 유도전동기는 사각형 슬롯 유도전동기보다 유도토크는 약간 높으며 최대토크는 $10.37[\text{kg}_f \cdot \text{cm}]$ 정도 크다. 동일한 제작 조건에서 회전자 슬롯의 형상을 바꾸었을 때 회전자 저항과 리액턴스가 다르게 측정되었다. 즉, 도체수와 단면적에 따라 회전자 저항과 리액턴스가 변함을 알 수 있었다. 원형 슬롯 유도전동기 회전자의 낮은 저항과 리액턴스로 인해 회전자

에 유기되는 유기 전압에 의하여 발생하는 회전자 전류가 상대적으로 증가함으로써 회전자 전류와 회전자속 사이에 발생하는 전자력이 커져 보다 큰 토크가 발생된 것으로 사료된다.

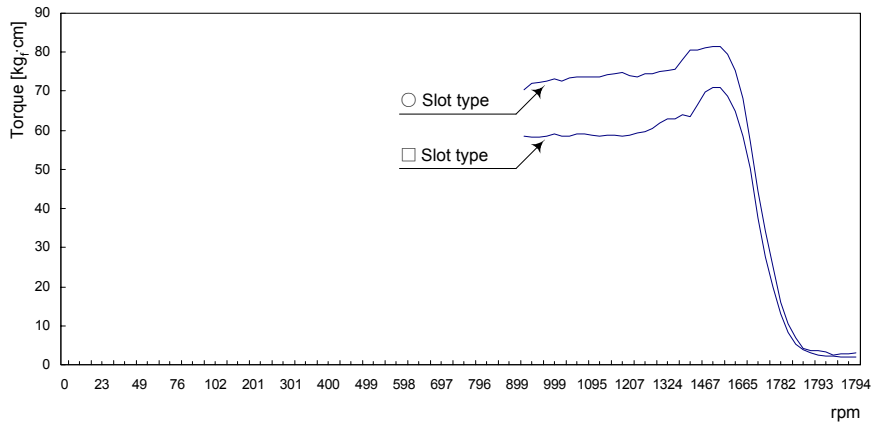


Fig. 3.26 Comparison of torque in different slot type.

2. 역률 특성 비교

Fig. 3.27은 시험제작된 두 전동기의 역률을 나타내는데, 약 0.05정도 차이가 난다. 두 전동기의 낮은 역률은 공극의 영향을 받지만 여기에서 시험제작된 두 전동기 회전자의 공극이 거의 비슷하므로(자화 리액턴스 X_M 의 값이 거의 비슷하다.) 공극에 의한 영향은 무시할 수 있다.

고정자의 회전자계에 의하여 회전자 도체에는 전압이 유기된다. 이 전압으로 인하여 회전자 도체에 전류가 흐르는데 회전자 회로인 코일(도체)에는 저항과 리액턴스를 가지고 있으므로 유기전압과 동상이 되지 못하고 위상각 만큼 전류는 늦게 흐르게 된다. 2차회로에 2차전류가 흐르면 1차측에는 2차전류에 의한 기자력을 상쇄하기 위해 2차전류와 같은 상의 1차부하

전류가 흐르며 1차부하전류와 여자전류의 벡터합이 1차전류가 된다.

시험제작된 사각형 슬롯과 원형 슬롯 유도전동기는 공극이 비슷하므로 여자전류의 크기는 같을 것이며, 원형 슬롯 유도전동기의 회전자는 사각형 슬롯 유도전동기의 회전자보다 작은 회전자 저항 및 리액턴스로 인해 2차 회로의 위상각이 작다. 원형 슬롯 유도전동기는 2차회로의 작은 위상각으로 인해 1차부하전류와 여자전류의 벡터합인 1차전류와 1차전압의 위상각이 작아져 역률이 다소 높은 것으로 사료된다.

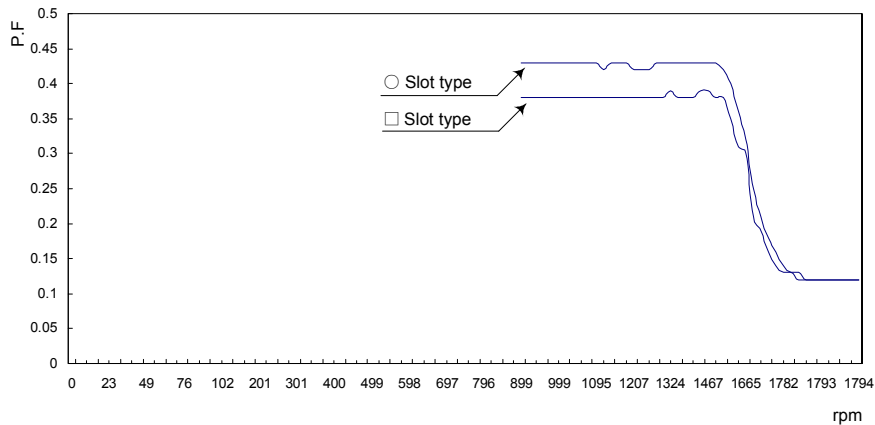


Fig. 3.27 Comparison of P.F in different slot type.

3. 입력 및 출력 특성 비교

Fig. 3.28은 시험제작된 유도전동기의 입력 및 출력을 비교한 것이다. 원형 슬롯 유도전동기는 회전자의 낮은 회전자 저항과 리액턴스 때문에 2차전류가 많이 흐르게 되어 1차측에는 2차전류에 의한 기자력을 상쇄하기 위해 1차부하전류가 더 흐르게 된다. 이로 인한 입력전류의 증가는 두 회전자의 제작과정이 동일하여 유도전동기의 손실은 비슷하나 출력을 증가시켰다.

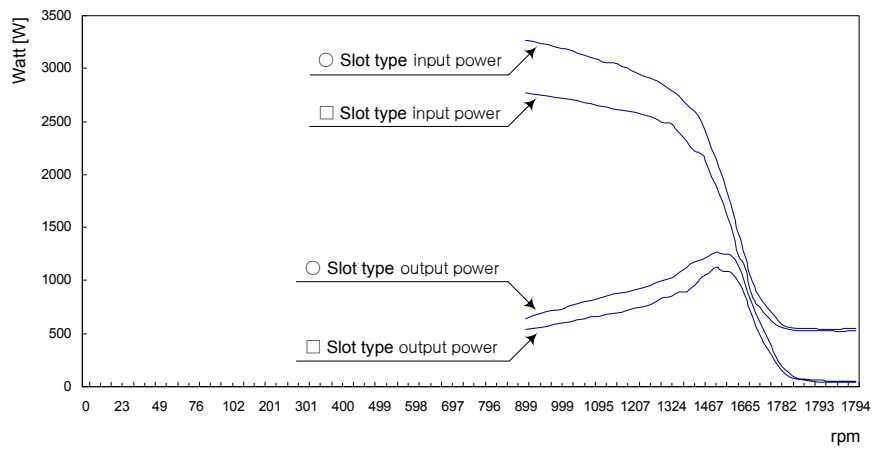


Fig. 3.28 Comparison of input and output power in different slot type.

4. 효율 특성 비교

Fig. 3.29는 Fig. 3.28의 출력과 입력의 비를 구하여 작성한 효율 특성곡선이다. Fig. 3.29에서 두 유도전동기의 손실 정도가 거의 같아 효율이 비슷하였다. 이는 두 회전자의 동일한 제작과정에 의한 것으로 사료된다. 원형 슬롯 유도전동기의 효율이 약간 양호하였다.

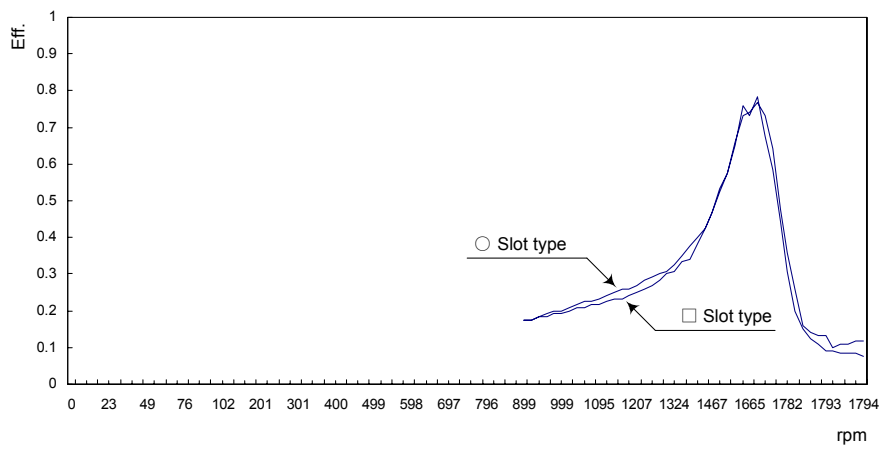


Fig. 3.29 Comparison of efficiency in different slot type.

제 4 장 내측형 및 외측형 회전자 유도전동기의 성능비교

시험제작된 유도전동기의 특성을 확인하고자 동일 마력의 기존 일반 유도전동기와 토크, 역률, 효율 및 출력을 비교하였다.

Table 4-1에 비교 전동기의 사양을 기술하였다.

Table 4-1 Specification of 3 phase IM.(Hitachi Ltd.)

출 력	0.75kW	전 류	3.3A
극 수	4P	제조사	Hitachi Ltd.
전 압	220V	Insulation	E
주파수	60Hz	Max. Power	270%

Table 4-2에 시험제작된 유도전동기와 비교 전동기의 측정된 등가회로 정수를 나타내었다. 비교품인 Hitachi사 유도전동기의 부하시험을 통하여 작성된 토크-속도 곡선(Fig. 4.2)을 NEMA 설계등급의 토크-속도 곡선과 비교해보면 설계등급 A급의 토크-속도곡선에서 회전자 저항을 증가^[2]시킨 토크-속도 곡선을 갖는다. 즉, 최대토크가 발생하는 슬립이 높아지고 기동 토크가 증가한 특성을 나타내었다. Table 2-1에서 Design A의 분배비율을 적용하여 회전자 구속 누설 리액턴스 $X_{LR}=8.06[\Omega]$ 로부터 X_1 , X_2 를 구하였다. 측정하여 계산된 과정은 Appendix C에 나타내었다.

Table 4-2 Parameters of IMs.

기 호	측 정 값 [25℃]			단 위
	Hitachi	사각형 슬롯	원형 슬롯	
R_1	3.27	4.74	4.71	[Ω]
R_2	1.77	2.36	1.51	[Ω]
X_1	4.03	3.85	3.15	[Ω]
X_2	4.03	5.77	4.73	[Ω]
X_M	52.67	23.59	22.96	[Ω]

4.1 무부하 손실 비교

비교품인 Hitachi사의 전동기와 사각형 슬롯 전동기의 무부하시험 결과를 Table 4-3에 나타내었다.

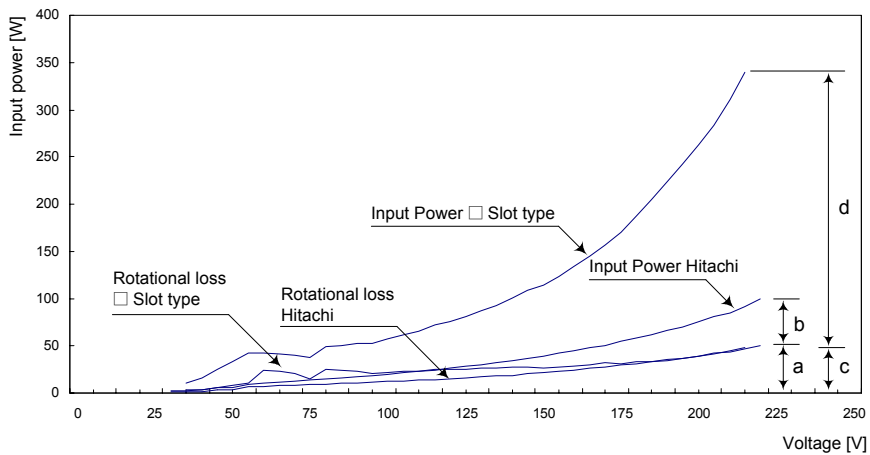
Table 4-3 Comparison of no load test.

	사각형 슬롯	Hitachi
Input power	338.9[W]	99.5[W]
Stator copper loss	290.79[W]	49.26[W]
Rotational loss	48.11[W]	50.24[W]

Fig. 4.1은 비교품과 사각형 슬롯 유도전동기의 무부하 손실을 비교한 것이다. 비교품인 Hitachi사의 고정자 동손은 입력전력의 약 49.5%, 회전손실은 약 50.5%를 차지하고 있다. 두 전동기의 회전손실은 거의 비슷하며, 공

극의 차이로 인한 고정자 동손의 차이가 크다.

비교품인 Hitachi사의 전동기와 시험제작된 전동기에서 측정된 자화 리액턴스 X_M 가 약 2배 이상 차이가 난다. 자화 리액턴스 X_M 의 차이로 인하여 2차측에 흘러가는 전류의 양이 달라진다. 비교품인 Hitachi사의 전동기에 비해 시험제작된 유도전동기의 작은 자화 리액턴스는 2차측 전류를 감소시킨다. 이것은 공극이 크다는 것을 의미하며 큰 공극으로 인한 자기저항의 증가는 주어진 자속레벨을 얻기 위해 훨씬 더 많은 양의 자화전류가 필요하여 고정자에 흘러 들어가는 전류가 많아지므로 입력전력의 대부분이 고정자 동손으로 소모되었다.



Hitachi IM a : Rotational loss b : Stator coil loss
 □ Slot type IM c : Rotational loss d : Stator coil loss

Fig. 4.1 Comparison of no load loss in developed IM and Hitachi IM.

4.2 토크-속도 특성 비교

Fig. 4.2는 토크-속도 특성을 비교한 것이다. 설계등급 A 전동기의 최대토크는 전부하 토크의 200~300%이고, 설계등급 B 전동기의 최대토크는 전부하 토크의 200%보다 크거나 같다. 비교품인 Hitachi사 유도전동기의 최대토크는 전부하 토크의 약 245%이고, 사각형 슬롯 유도전동기는 160%, 원형 슬롯 유도전동기는 180%이었다. Table 4-2에서 각 전동기의 회전자 누설 리액턴스는 비교품인 Hitachi사의 전동기는 4.03[Ω], 원형 슬롯 전동기는 4.73[Ω]로 측정되었다. 설계등급 B 전동기는 A 전동기보다 회전자 누설 리액턴스가 높음에도 불구하고 두 전동기의 회전자 누설 리액턴스가 비슷한 것은 회전자의 도체 수와 관계가 있는 것으로 사료된다. 외측 회전형 유도전동기의 회전자를 제작할 때 기계적인 강도 때문에 회전자 도체 수를 일반 유도전동기의 것에 비해 적게 제작하여 회전자 누설 리액턴스가 적어진 것으로 사료된다. 정상 운전영역에서는 비슷한 토크-속도 특성을 나타내고 있다.

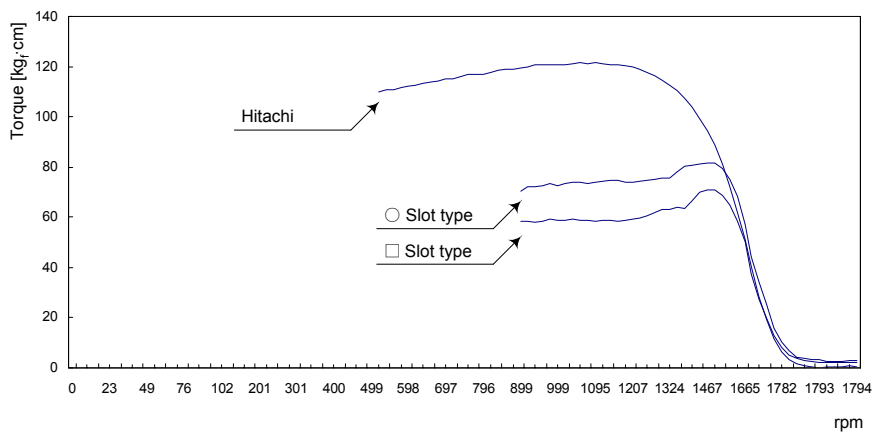


Fig. 4.2 Comparison of torque in developed IM and Hitachi IM.

4.3 역률 특성 비교

Fig. 4.3은 역률을 비교한 것으로, 비교품과 시험제작된 유도전동기로 부터 측정된 자화 리액턴스 X_M 값의 차이로 인하여 시험제작된 유도전동기의 역률이 보다 낮음을 알 수 있다.

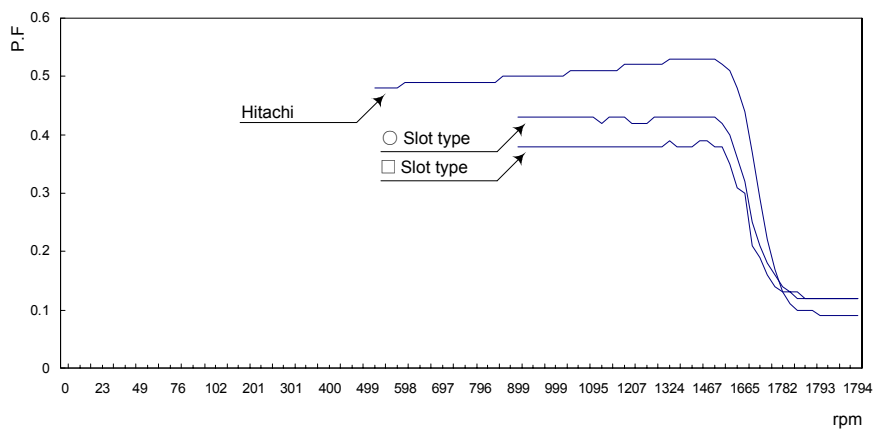


Fig. 4.3 Comparison of P.F in developed IM and Hitachi IM.

4.4 효율 특성 비교

Fig. 4.4는 유도전동기의 효율을 상호비교하고 있다. 시험제작된 유도전동기의 효율이 약간 낮은 원인은, 첫 번째는 큰 공극에 의한 고정자 손실이 많았으며, 두 번째는 사각형 슬롯과 원형 슬롯 전동기의 회전자 구속시험시 각 상에서 측정된 전류 값들이 달랐는데 이는 회전자의 공극이 일정

하지 않다는 것이며 이로 인한 전동기의 표류부하손이 증가하였다. 세 번째 원인은 회전자 철심을 적층할 때 전기강판의 일부 절연체가 파괴되어 와전류손실이 증가한 것으로 사료된다.

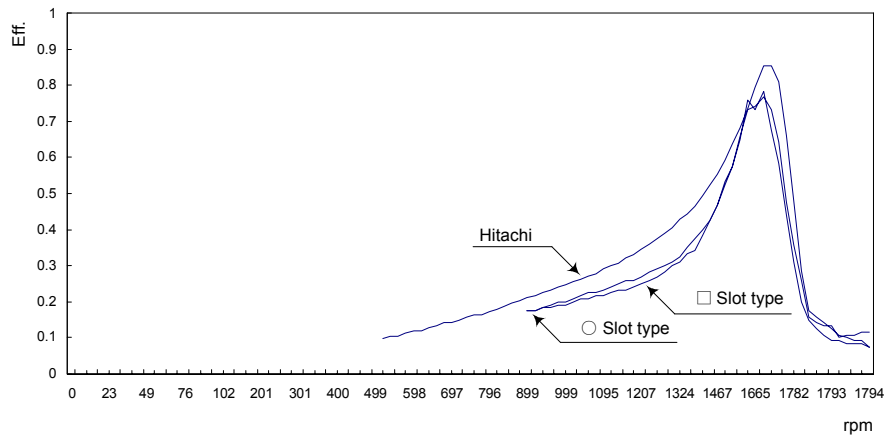


Fig. 4.4 Comparison of efficiency in developed IM and Hitachi IM.

4.5 출력 특성 비교

Fig. 4.5는 전동기 출력을 비교한 것으로, Fig. 4.4에서 알 수 있듯이 시험제작된 유도전동기의 효율이 전반적으로 낮아 전체 출력이 기존 전동기보다 감소하였다.

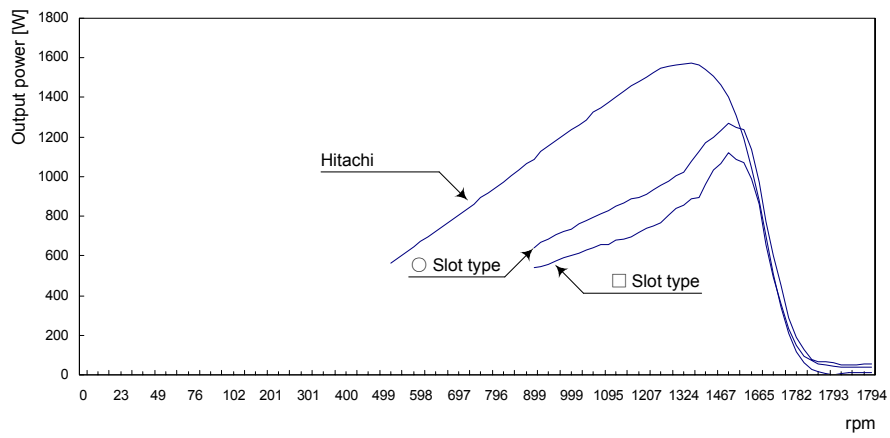


Fig. 4.5 Comparison of output power in developed IM and Hitachi IM.

제 5 장 결 론

본 논문에서는 현재 대부분 사용되고 있는 팬 구동용 유도전동기를 대체할 만한 외측 회전형 유도전동기를 제작하여 등가회로 정수를 측정하였고, 부하 시험을 통하여 산출된 제반 특성곡선에 의해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시험제작된 외측 회전형 유도전동기는 이중 농형의 토크-속도 특성을 나타내었고, 전동기의 외측이 회전함으로써 회전자의 관성모멘트가 증대되어 팬의 동력원으로 적합하리라 사료된다.
2. 이중 농형 유도전동기의 회전자 도체는 일반적으로 서로 다른 저항의 도체를 사용하지만, 높은 제작비용으로 인하여 시험 제작된 외측 회전형 유도전동기는 같은 저항의 도체를 사용하였다. 동일 재질의 도체를 사용하였지만 회전자 도체의 단면적 차이로 인한 회전자 저항 및 리액턴스의 변화로 기동 및 토크-속도 특성 면에서 이중 농형 유도전동기와 유사한 특성을 보였다.
3. 고정자 저항시험, 무부하 시험 및 회전자 구속시험을 통해, 시험 제작된 외측 회전형 유도전동기의 정수 값을 측정하여 기동 및 운전특성 연구에 좋은 참고 자료가 되었다.
4. 회전자 슬롯의 형상에 따른 저항 및 리액턴스의 변화로 인해 전동기의 기동토크와 최대토크가 달라진다는 사실을 확인할 수 있었으며, 차후 회전자 슬롯의 형상과 수에 의한 저항과 리액턴스

변화에 대해 이론적 고찰이 필요하리라 사료된다.

외측 회전형 유도전동기는 제작상 많은 어려움이 있었다. 즉, 부피와 질량이 큰 외측이 회전하므로 불가피하게 공극의 길이가 증가하였으며 회전자 철심의 정밀 가공 및 다이캐스팅을 할 수 없어 만족할만한 토크-속도 등의 부하특성을 얻을 수 없었다. 시험 제작된 외측 회전형 유도전동기는 NEMA 설계등급 B를 목표로 삼아 개발되었으나 특성이 설계기준에 못 미쳐, 차후 회전자 슬롯의 형상 설계 및 제작에 대한 지속적인 연구가 필요하며 적용분야와 유용성에 대한 검토도 병행되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 김규식, “유도전동기의 동특성 및 효율 향상을 위한 연구동향”, 전자공학회논문지, 제20권, 제3호, pp. 331~338, 1993
- [2] Stephen J. Chapman, “Electric Machinery Fundamentals”, McGraw-Hill Korea, pp. 353~402, 2001
- [3] Magtrol, “User’s Manual 3-Phase Power Analyzer”, Magtrol Inc.
- [4] 김규탁 외 3인, “구속시험에 의한 선형 유도전동기의 등가회로 정수산정 및 특성 계산, 전기학회논문지, 제43권, 제4호, pp. 580~585, 1994
- [5] 전내석, “인버터로 구동되는 유도전동기의 정수 및 특성에 관한 연구”, 한국해양대학교 석사학위논문, 1999
- [6] 노창주, “박용전기”, 아성출판사, pp. 275~279, 1997
- [7] 윤병도, “전기기기”, 문운당, pp. 193~246, 1997
- [8] Paresh C. Sen, “Principles of Electric Machines and Power Electronics”, 회중당, pp. 225~230, 1998
- [9] Paul C. Krause, “Analysis of Electric Machinery”, McGraw-Hill Book Company, pp. 164~188, 1986
- [10] A.E Fitzgerald, Chharles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, “Electric Machinery”, McGraw-Hill Book Company, pp. 321~347, 1992
- [11] Peter F. Ryff, “Electric Machinery”, Prentice Hall, pp. 184~210, 1994
- [12] Chee-Mun Ong, “Dynamic Simulation of Electric Machinery”, Prentice Hall, pp. 167~171, 1998
- [13] Bhag S. Guru Hüseyin R. Hiziroğlu, “Electric Machinery and Transformers”, Hrcourt Brace & Company, pp. 509~541, 1995

- [14] George Mcpherson, Robert D. Laramore, "An Introduction to Electrical Machines and Transformers", John Wiley & Sons, pp. 239~284, 1981
- [15] H. Wayne Beaty, James L. Kirtley, Jr, "Electric Motor Handbook", McGraw-HILL, pp. 41~94, 1998

Appendix

Appendix list

Appendix A

사각형 슬롯 외측 회전형 유도전동기의 등가회로 정수 측정

Appendix B

원형 슬롯 외측 회전형 유도전동기의 등가회로 정수 측정

Appendix C

Hitachi사의 3상 유도전동기의 등가회로 정수 측정

Appendix A

사각형 슬롯 외측 회전형 유도전동기의 등가회로 정수 측정

DC 시험 :

I_{DC}	V_{DC}	R_{DC}
5	0.64	3.91
10	1.29	3.88
15	1.92	3.91
20	2.59	3.86
25	3.02	4.14
30	3.62	4.14
평균		3.97

무부하시험 :

$$V_T = 215 \text{ V}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$I_A + I_B + I_C = 13.57 \text{ A}$$

$$P_{in} = 338.9 \text{ W}$$

회전자 구속시험 :

$$V_T = 58 \text{ V}$$

$$f = 15 \text{ Hz}$$

$$I_A = 4.9 \text{ A}$$

$$P_{in} = 425 \text{ W}$$

$$I_B = 4.2 \text{ A}$$

$$I_C = 4.3 \text{ A}$$

DC 시험에서

$$R_1 = R_{DC} \cdot \frac{234.5 + T}{234.5 + t} = 3.97 \cdot \frac{234.5 + 75}{234.5 + 25} \doteq 4.74 \Omega$$

무부하시험에서

$$I_{1,av} = \frac{13.57}{3} \doteq 4.52 A$$

$$V_{\phi, n1} = \frac{215}{\sqrt{3}} \doteq 124.13 V$$

그러므로,

$$|Z_{n1}| = \frac{124.13}{4.52} \doteq 27.44 \Omega = X_1 + X_M$$

X_1 을 알고 있을 때, X_M 을 구할 수 있다.

고정자 동손은

$$P_{SCL} = 3 I_1^2 R_1 = 3(4.52)^2(4.74) \doteq 290.79 W$$

그러므로 무부하 회전손은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{rot} &= P_{in, n1} - P_{SCL, n1} \\ &= 338.90 - 290.79 = 48.11 W \end{aligned}$$

회전자 구속시험에서

$$I_{1,av} = \frac{4.9 + 4.2 + 4.3}{3} \doteq 4.47 A$$

회전자 구속임피던스는

$$|Z_{LR}| = \frac{V_\phi}{I_A} = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_1} = \frac{58}{\sqrt{3}(4.47)} \cong 7.50 \Omega$$

그리고, 임피던스의 각 θ 는

$$\begin{aligned}\theta &= \cos^{-1} \frac{P_{in}}{\sqrt{3}V_T I_1} \\ &= \cos^{-1} \frac{425}{\sqrt{3}(58)(4.47)} \\ &\cong 18.71^\circ\end{aligned}$$

그러므로,

$$R_{LR} = 7.50 \cos 18.71^\circ \cong 7.10 \Omega = R_1 + R_2$$

$$R_2 = 7.10 - 4.74 = 2.36 \Omega$$

15Hz에서의 리액턴스는

$$X'_{LR} = 7.50 \sin 18.71^\circ \cong 2.41 \Omega$$

60Hz에서의 등가리액턴스는

$$X_{LR} = \frac{f_{rated}}{f_{test}} X'_{LR} = \left(\frac{60}{15}\right) 2.41 \cong 9.62 \Omega$$

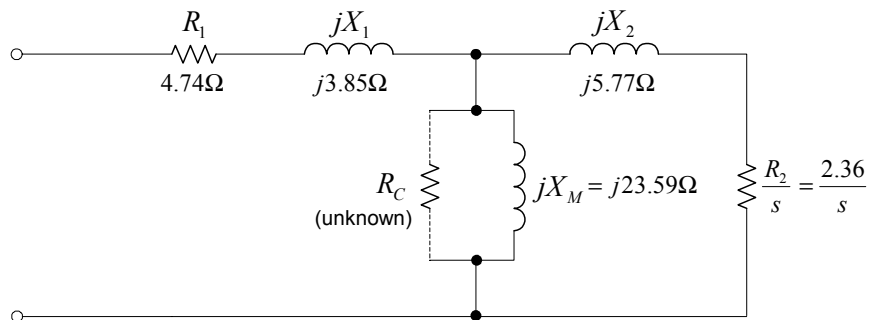
설계등급 B형 유도전동기에서

$$X_1 = 0.4X_{LR} \cong 3.85 \Omega$$

$$X_2 = 0.6X_{LR} \doteq 5.77 \Omega$$

$$X_M = |Z_m| - X_1 = 27.44 - 3.85 = 23.59 \Omega$$

전동기 상당 등가회로는 다음과 같다.



Appendix B

원형 슬롯 외측 회전형 유도전동기의 등가회로 정수 측정

DC 시험 :

I_{DC}	V_{DC}	R_{DC}
5	0.64	3.91
10	1.29	3.88
15	1.92	3.91
20	2.59	3.86
25	3.10	4.03
30	3.65	4.11
평균		3.95

무부하시험 :

$$V_T = 210 \text{ V}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$I_A + I_B + I_C = 13.21 \text{ A}$$

$$P_{in} = 333 \text{ W}$$

회전자 구속시험 :

$$V_T = 52 \text{ V}$$

$$f = 15 \text{ Hz}$$

$$I_A = 4.60 \text{ A}$$

$$P_{in} = 395 \text{ W}$$

$$I_B = 4.30 \text{ A}$$

$$I_C = 4.90 \text{ A}$$

DC 시험에서

$$R_1 = R_{DC} \cdot \frac{234.5 + T}{234.5 + t} = 3.95 \cdot \frac{234.5 + 75}{234.5 + 25} \doteq 4.71 \Omega$$

무부하시험에서

$$I_{1,av} = \frac{13.21}{3} \doteq 4.40 A$$

$$V_{\phi, n1} = \frac{210}{\sqrt{3}} \doteq 121.24 V$$

그러므로,

$$|Z_{n1}| = \frac{121.24}{4.40} \doteq 26.11 \Omega = X_1 + X_M$$

X_1 을 알고 있을 때, X_M 을 구할 수 있다.

고정자 동손은

$$P_{SCL} = 3 I_1^2 R_1 = 3(4.40)^2(4.71) \doteq 273.93 W$$

그러므로 무부하 회전손은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{rot} &= P_{in, n1} - P_{SCL, n1} \\ &= 333 - 273.93 = 59.07 W \end{aligned}$$

회전자 구속시험에서

$$I_{1,av} = \frac{4.60 + 4.30 + 4.90}{3} = 4.60 A$$

회전자 구속임피던스는

$$|Z_{LR}| = \frac{V_\phi}{I_A} = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_1} = \frac{52}{\sqrt{3}(4.60)} \cong 6.53 \Omega$$

그리고, 임피던스의 각 θ 는

$$\begin{aligned}\theta &= \cos^{-1} \frac{P_{in}}{\sqrt{3}V_T I_1} \\ &= \cos^{-1} \frac{395}{\sqrt{3}(52)(4.60)} \\ &\cong 17.56^\circ\end{aligned}$$

그러므로,

$$R_{LR} = 6.53 \cos 17.56^\circ \cong 6.22 \Omega = R_1 + R_2$$

$$R_2 = 6.22 - 4.71 = 1.51 \Omega$$

15Hz에서의 리액턴스는

$$X'_{LR} = 6.53 \sin 17.56^\circ \cong 1.97 \Omega$$

60Hz에서의 등가리액턴스는

$$X_{LR} = \frac{f_{rated}}{f_{test}} X'_{LR} = \left(\frac{60}{15}\right) 1.97 \cong 7.88 \Omega$$

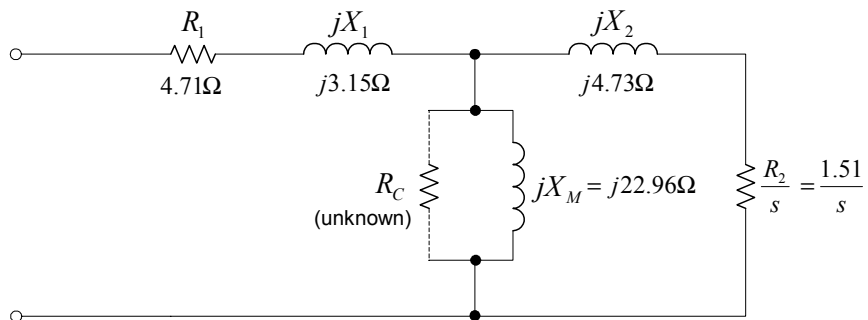
설계등급 B형 유도전동기에서

$$X_1 = 0.4X_{LR} \cong 3.15 \Omega$$

$$X_2 = 0.6X_{LR} \doteq 4.73 \Omega$$

$$X_M = |Z_n| - X_1 = 26.11 - 3.15 = 22.96 \Omega$$

전동기 상당 등가회로는 다음과 같다.



Appendix C

Hitachi사의 3상 유도전동기의 등가회로 정수 측정

DC 시험 :

I_{DC}	V_{DC}	R_{DC}
5	0.92	2.72
10	1.83	2.73
15	2.79	2.69
20	3.65	2.74
25	4.40	2.84
평균		2.74

무부하시험 :

$$V_T = 220 \text{ V}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$I_A + I_B + I_C = 6.72 \text{ A}$$

$$P_{in} = 99.50 \text{ W}$$

회전자 구속시험 :

$$V_T = 32 \text{ V}$$

$$f = 15 \text{ Hz}$$

$$I_A = 3.40 \text{ A}$$

$$P_{in} = 175 \text{ W}$$

$$I_B = 3.40 \text{ A}$$

$$I_C = 3.40 \text{ A}$$

DC 시험에서

$$R_1 = R_{DC} \cdot \frac{234.5 + T}{234.5 + t} = 2.74 \cdot \frac{234.5 + 75}{234.5 + 25} \doteq 3.27 \Omega$$

무부하시험에서

$$I_{1,av} = \frac{6.72}{3} = 2.24 A$$

$$V_{\phi, n1} = \frac{220}{\sqrt{3}} \doteq 127.02 V$$

그러므로,

$$|Z_{m1}| = \frac{127.02}{2.24} \doteq 56.70 \Omega = X_1 + X_M$$

X_1 을 알고 있을 때, X_M 을 구할 수 있다.

고정자 동손은

$$P_{SCL} = 3 I_1^2 R_1 = 3(2.24)^2(3.27) \doteq 49.26 W$$

그러므로 무부하 회전손은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{rot} &= P_{in, n1} - P_{SCL, n1} \\ &= 99.50 - 49.26 = 50.24 W \end{aligned}$$

회전자 구속시험에서

$$I_{1,av} = \frac{3.40 + 3.40 + 3.40}{3} = 3.40 A$$

회전자 구속임피던스는

$$|Z_{LR}| = \frac{V_\phi}{I_A} = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_1} = \frac{32}{\sqrt{3}(3.40)} \doteq 5.43 \Omega$$

그리고, 임피던스의 각 θ 는

$$\begin{aligned}\theta &= \cos^{-1} \frac{P_{in}}{\sqrt{3}V_T I_1} \\ &= \cos^{-1} \frac{175}{\sqrt{3}(32)(3.40)} \\ &\doteq 21.78^\circ\end{aligned}$$

그러므로,

$$R_{LR} = 5.43 \cos 21.78^\circ \doteq 5.04 \Omega = R_1 + R_2$$

$$R_2 = 5.04 - 3.27 = 1.77 \Omega$$

15Hz에서의 리액턴스는

$$X'_{LR} = 5.43 \sin 21.78^\circ \doteq 2.02 \Omega$$

60Hz에서의 등가리액턴스는

$$X_{LR} = \frac{f_{rated}}{f_{test}} X'_{LR} = \left(\frac{60}{15}\right) 2.02 \doteq 8.06 \Omega$$

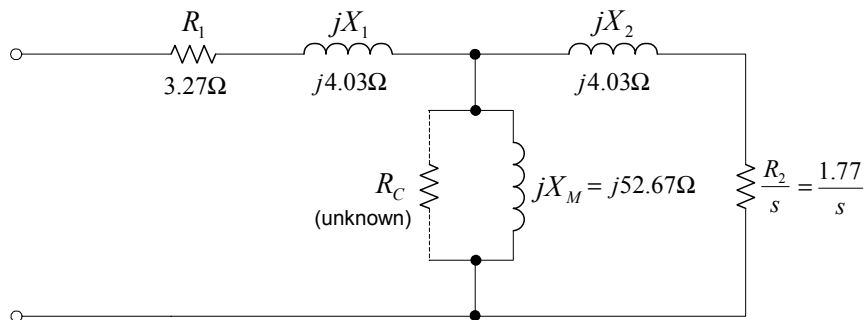
설계등급 A형 유도전동기에서

$$X_1 = 0.5 X_{LR} \doteq 4.03 \Omega$$

$$X_2 = 0.5X_{LR} \doteq 4.03 \Omega$$

$$X_M = |Z_m| - X_1 = 56.70 - 4.03 = 52.67 \Omega$$

전동기 상당 등가회로는 다음과 같다.



감사의 글

그 동안 고마웠던 분들을 마음 속에 깊이 새기어 영원히 간직될 수 있기를 바라는 마음으로 이 글을 적습니다.

오늘의 제가 있기까지 학문의 길로 인도해 주시고, 전공 지식의 전달부터 삶의 지혜까지 깨우쳐 주신 안병원 교수님의 가르침을 항상 기억할 것입니다.

강의와 세미나를 통해 학문의 깊이를 더해 주시고, 본 연구를 수행함에 있어 지도와 격려를 아끼지 않으신 김성환 지도교수님께 깊은 경외와 감사하는 마음을 전합니다.

자상하고 성심으로 논문의 오류를 지적해 주신 김윤식 교수님, 단편적인 지식을 보완해 주신 이상태 교수님, 자상한 보살핌을 주신 이성근 교수님 감사합니다. 그리고, 바쁘신 일정 중에도 기꺼이 목포에서 부산을 오가며 세심한 검토와 조언으로 부족한 점을 보완해 주신 박영산 교수님께 진심으로 감사를 드립니다.

희망과 용기를 주시고 따뜻한 가르침을 주신 최민선 교수님과 김준호 교수님의 은혜에 고개가 숙여집니다. 또한, 실험장치가 완성되기까지 박종식님의 지혜와 땀이 필요하였습니다.

학위과정동안 정대득 교수님, 양원재 선배님, 한원희 선배님, 양형선 선배님의 대화는 삶에 위안을 주었습니다. 많은 시련의 시간을 함께 했던 양창조, 배철오, 백태열 동기생의 앞날에 좋은 결과 있기를 기원하며 연구실에서 함께 했던 엄한성님, 황종구 후배와의 인연을 소중하게 여깁니다.

저에게 늘 큰 기대를 가지시고, 뒷바라지만 하시다 고인이 되신 아버님, 무조건적인 사랑과 근면성실을 보이신 어머니의 거칠어진 손마디와 주름진 얼굴에 조그마한 기쁨이 되었으면 합니다. 큰 매형과 큰 누님, 작은 매형과 작은 누나 그리고, 귀여운 조카들과 함께 기쁨을 나누고자 합니다.

학위과정 중 긴 시간, 고통스러운 시간들을 모두 인내하면서 헌신적인 사랑으로 묵묵히 내조를 다해준 아내 이양님에게 누구보다도 이 기쁨을 함께 하며, 사랑스런 나의 희망 근태와 이 결실의 기쁨을 함께 하고 싶습니다.

2001년 12월

김 현수