

# 극수 변환 유도모터의 개발

## Development of the Pole Changing Induction Motor

윤동원<sup>1,✉</sup>, 손영수<sup>1</sup>, 박철훈<sup>1</sup>, 함상용<sup>1</sup>, 김병인<sup>1</sup>  
Dong won Yun<sup>1,✉</sup>, Young Su Son<sup>1</sup>, Cheol Hun Park<sup>1</sup>, Sang Yong Ham<sup>1</sup> and Byung In Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 로봇/지능기계연구실 (Department of Robotics/intelligent machinery, KIMM)

✉ Corresponding author: dwyun@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7769

Manuscript received: 2010.8.30 / Revised: 2010.10.22 / Accepted: 2010.11.15

*In this paper, pole-changing induction motor has been studied. To control the speed of the induction motor, many various methods can be used. Compared to the other speed control method, pole changing method is simple, cost effective, and reliable. From this research, pole changing induction motor with 2 and 4 pole windings are analyzed and designed, of which rated torque is about 2Nm. A real induction motor is also fabricated and some experiment has been performed showing that the analysis and experiment results are similar.*

Key Words: Wiper Motor (와이프 모터), Induction Motor (유도모터), Pole Changing Motor (극수 변환 모터)

### 기호설명

$f$ : frequency

$n$ : rotational speed

$P$ : number of poles

### 1. 서론

유도기(induction machines)는 유도전동기, 유도 발전기, 유도 주파수 변환기, 유도 상변환기, 그리고 전자기적 슬립 커플링을 포괄하는 회전기기의 전체를 말하는 것이다. 이 중, 유도 전동기(induction motor)는 그 구조가 간단하고, 구동 회로가 간단하여 모터 제작 단가가 영구자석형 전동기에 비해 저렴하므로, 오랜 세월 동안 산업 전반에 널리 사용되고 있다. 유도 전동기는 오랜 세월 동안 여러 산업 전반에 사용되어온 범용 모터이며, 대부분 저가의 단순 회전운동을 구현하는 곳에 주로 사용되어져 왔으나, 최근에는 정밀 모터 설계

기술 발달과 제어기술의 발달에 힘입어, 경전철의 추진부에 선형 유도전동기를 도입하거나,<sup>1</sup> 고가의 공작기계의 주축 구동계로 적용되고,<sup>2</sup> 다이내모미터에도 적용되는 등<sup>3</sup> 첨단 시스템 분야에 적용 연구가 수행되기도 하는 등 그 응용은 꾸준히 발전되고 있다.

유도 전동기는 정속회전 기기로 널리 사용 중이나, 속도제어를 통한 가변속 운동에도 사용된다. 유도 전동기가 다른 방식의 전동기에 비해서 여러 장점이 있으나, 속도 변화가 불편한 것이 최대의 단점이다. 유도 전동기의 속도를 제어하기 위해서 사용되는 방법으로는 저항 속도제어(rheostatic speed control), 극수 변환(pole changing) 그리고 주파수 변환(change of frequency) 방법 등이 주로 사용되며, 유도전동기의 속도제어와 관련된 연구는 꾸준히 진행되어 왔다.<sup>4,5</sup> 퍼지 논리를 이용하여 외란과 파라미터 변동에 따른 강인 속도 제어에 관한 연구가 수행되었으며,<sup>6</sup> PWM 기법을 기본으로 인가전류 파형에 의해 모터에서 발생하는 소음을

줄이기 위한 SV-PWM 방식을 활용한 속도 제어에 관한 연구도 수행되었다.<sup>7</sup> 또한, 전문가 제어 알고리즘을 탑재한 PID 제어 방법을 적용하여 시스템의 적합한 매개변수를 찾는 연구 등,<sup>8</sup> 유도 모터의 제어를 위해서 많은 연구가 수행되어 왔다. 하지만, 이러한 방법들은 모두 모터의 제어 입력 파형을 제어하기 위한 부가적인 수단들이 필요하여, 시스템이 복잡해지고 가격이 상승하는 원인이 된다. 시스템에서 필요한 속도의 종류가 고속, 저속과 같이 2 단계에서 4 단계 이하이면, 위의 입력 파형을 변형시키는 방법 이외에 극수 변환을 이용한 방법이 널리 사용된다.

본 연구는 선박에 사용되는 와이퍼 모터의 개발에 관한 것이다. 선박용 와이퍼 모터는 선박 항해실의 전면 윈도우에 사용되는 모터로써, 비와 눈으로부터 시야를 확보하기 위한 수단으로써 사용된다. 와이퍼 모터의 경우 반복적인 운동을 지속하고, 앞서 언급한 바와 같이 신뢰성이 확보되어야 하므로, 구조가 간단하고, 부품수가 적은 유도모터가 주로 사용되고 있다. 이와 같은 목적으로 주로 극수 변환 방식으로 속도제어가 이루어진다. 본 연구에서는 선박용 와이퍼 모터로써 가장 널리 사용되고 있는 극수 변환 3 상 유도 모터를 채택한 선박용 와이퍼 모터의 개발을 연구 목표로 하고 있다.

본 연구에서는 2Nm 급, AC 220V 3 상 50/60hz, 극수 변환방식에 대한 모터 특성 해석을 수행하고, 해석결과를 바탕으로 프로토타입 모터 설계와 웬기어/기어박스 설계, 시제작 및 wiper 구동성능시험을 통하여 wiper 모터 국산화 개발에 필요한 제반 연구를 수행하는 데 본 연구의 목적이 있다.

## 2. 이론적 배경

본 연구의 대상인 선박용 와이퍼 모터는 유도 전동기 방식으로 구동되게 된다. 유도전동기는 그 입력전류의 특성에 따라 단상 유도기와 3 상 유도기로 나뉘어 지며, 본 연구의 대상인 선박용 와이퍼 모터는 3 상 유도 전동기이다.

3 상유도 전동기는 바깥쪽의 고정자(固定子)와 안쪽의 회전자(轉子)가 모두 얇은 강판(鋼板)으로 쌓아올려 만들어져 있으며 거기에 각각 슬롯을 내고 있다. 주로 얇은 구조강판을 성층하고 산화물이나 광칠로 코팅을 하게 된다. 이러한 얇은 강판의 구

조는 로터 또는 스테이터에서 발생하는 와류손(eddy current loss)을 줄여 전동기의 효율을 증가시키는 역할을 한다. 그리고 고정자를 성층할 때, 각 층마다의 위치를 약간씩 회전하면서 성층하여, skew 라는 것을 만들게 되는데, 이런 구조가 되면, 크롤링(crawling: 동기속도 아래의 속도에서 회전하는 현상)을 방지할 수 있고, 진동을 억제하는 효과가 있다. 고정자 슬롯에는 코일을 넣는다. 3 상의 각 상(相)이 1 개의 코일인 예는 없으며 적어도 몇 개의 코일을 사용하기 때문에 고정자의 슬롯 수는 24, 36, 48, 64 ... 등이며 많은 것은 수백에 달한다. 각 상의 코일은 공간에서 120° 씩 이동시켜서 배치한다. 회전자에는 피복(被覆)되지 않은 동봉이나 알루미늄의 주물을 슬롯 속에 넣는 농형이라 불리는 것과 3 상 권선으로 하는 권선형이 있다. 특히, 농형 회전자의 경우 알루미늄으로 주조를 하거나 용접을 하는 방식 등이 있다.<sup>4,5</sup>

유도 전동기가 다른 전동기에 비하여 여러 가지 점에서 장점이 있으나, 속도 변화가 불편한 것이 이러한 전동기의 최대 단점이다. 이러한 유도 전동기의 속도 제어를 하는 방법으로는 저항 속도 제어(rheostatic speed control), 극수 변환(pole changing) 그리고 주파수 변환(change of frequency) 방법 등이 있으나, 본 연구의 대상인 선박용 와이퍼 모터에는 극수변환 모터방식을 채용하였다. 유도 전동기의 동기속도

$$n_0 = 120f/P \quad (1)$$

에서,  $f$  를 일정하게 할 때  $P$  를 변화시키면 동기속도가 변화하고, 따라서 회전 속도도 변화한다. 이 방법에 의하여 속도를 변화시킬 수 있는 것은 4 단계 정도이고, 그 이상은 사용하지 않는다.

## 3. 와이퍼 모터의 설계

본 절에서는 연구의 목적인 2Nm 급, AC 220V 3 상 50/60hz, 극수 변환방식 유도 전동기를 설계하기 위하여 해석을 수행해 보기로 한다. 해석을 위해서 유한요소법을 사용하기로 하였으며, 이를 위하여 상용코드인 Maxwell/Rmxprt 를 사용하였다.

해석 대상 모터는 3 상 유도 전동기로서, 극수 변환형 유도 전동기이다. 즉, 전동기의 속도를 조절하기 위해서 고정자에 와인딩되어 있는 코일에 인가되는 전류의 방향을 스위칭 하여 2 극, 4 극을

조절하여 전동기의 회전속도를 조절한다. 해석의 대상인 3 상유도 전동기의 사양은 다음과 같다.

- 극수: 2, 4 극
- 정격토크: 2Nm
- 주파수: 60Hz
- 정격전압: 250V (210V)
- 3 상 전동기
- 스테이터 : 24 슬롯, 회전자: 30 슬롯

해석을 위해서 우선 RMxpert 를 이용한 lumped method 를 이용하여 모터의 성능 해석을 수행해 보았다. Fig. 1 에 본 연구의 해석 대상인 유도 모터의 단면이 나타나 있다. Fig. 2 에 해석을 위해 만들어진 FE model 을 보여주고 있다.

유도모터의 극의 특성을 고려하여 해석 시간을 줄이고자 1/2 model 을 만들었다. Fig. 3 에 유한요소 해석 결과로써, 자속선 분포와 자속밀도 분포의 결과를 보여 주고 있다. 본 유한요소모델을 통하여 모터의 고정자와 회전자에서 발생하는 자속밀도 분포를 확인하였으며, Fig. 3(a)의 자속선 해석을

통하여 인가전류에 따른 자속의 흐름을 확인하였고, Fig. 3(b)에서 알 수 있듯이 최대 자속밀도는 약 1.3T 이며, 대부분의 영역에서 1T 이하의 자속밀도를 나타냄을 보였다. 이를 통하여 설계된 고정자와 회전자의 치수는 적당함을 알 수 있었다. 만약, 설계가 잘못되어 자속밀도의 값이 너무 크게 나오면 모터는 포화영역에서 작동하게 되며, 이에 따라 손실이 커지게 된다. 유한요소 해석을 통하여 모터내부에서 발생하는 자속밀도의 분포가 적절함을 알 수 있었다.

Fig. 4 는 유도 모터의 권선도와 극수 변환을 위한 접속도를 보여주고 있다. 유도 모터는 저속과 고속에서 일정 토크를 발생시키는 정토크 모드로 설계되었으며, 이를 위하여 저속에서는 Y 결선, 고속에서는 Δ결선으로 작동하도록 하였다. 저속일 때는 4 극이고, 고속일 때는 2 극이므로, 식(1)에서 저속은 1800rpm 이 되고, 고속은 3600rpm 이 되게 된다. 모터의 회전축과 출력축사이에는 웜기어를 이용하여 1:0.12 의 속도비로 감속되게 된다.

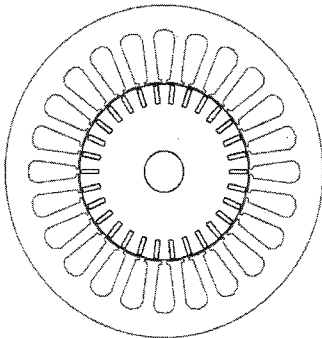


Fig. 1 Section view of induction motor

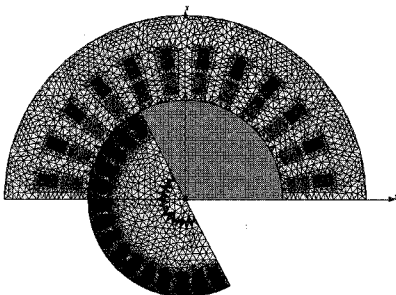
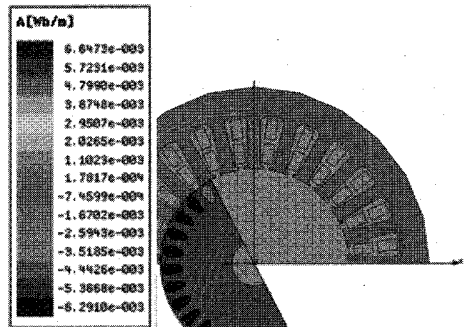
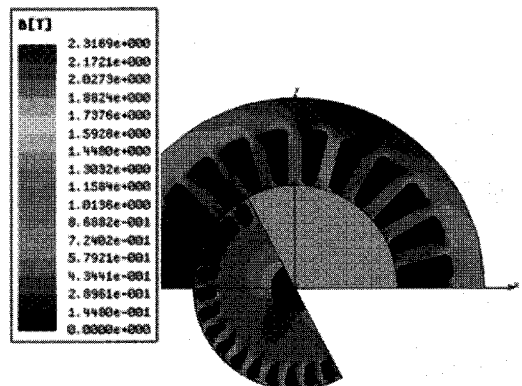


Fig. 2 FE mesh

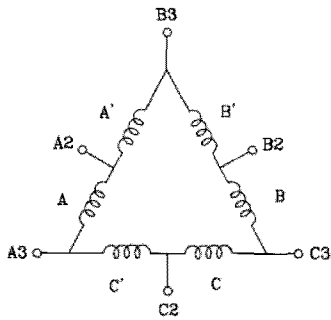


(a) Flux line



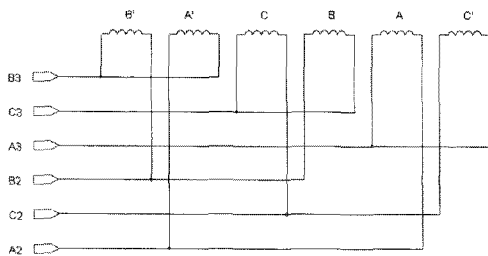
(b) Flux density

Fig. 3 FE results



(a) Windings

정토크형 결선도



고속운전모드	B2, C2, A2 전원공급	B3, C3, A3 공동접점
저속운전모드	B3, C3, A3 전원공급	B2, C2, A2 개방상태

(b) Pole changing mode

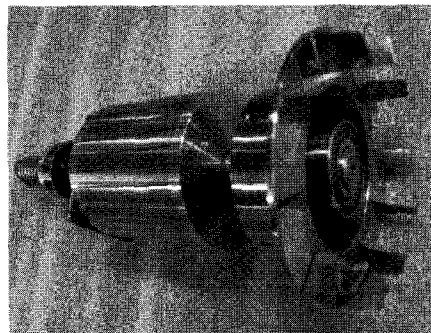
Fig. 4 Winding diagram

#### 4. 와이퍼 모터의 실험

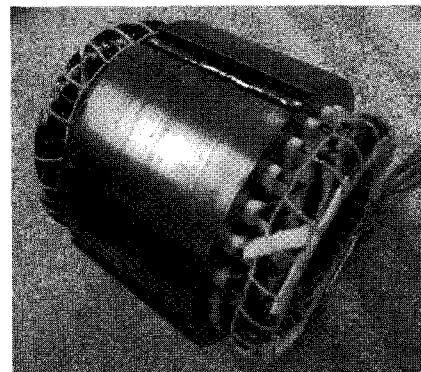
본 절에서는 Maxwell/Rmxprt 를 이용한 해석/설계를 바탕으로 시제품 설계에 대해 기술한다. Fig. 5 에 실제 제작된 극수 변환 유도 모터 시제품의 각 부품과 조립품의 사진이 나와 있다. Fig. 6 에는 실험을 위한 장치들의 모습이 나타나 있다. Fig. 7 에 전동기에 대한 해석 결과가 나와 있다. Fig. 7(a), (b)에는 2 극인 경우의 전동기의 토크와 효율의 해석 결과와 실험 결과가 보이고 있다. 해석 결과에서 알 수 있듯이, 해석치와 실험치가 거의 유사함을 알 수 있었다. 그리고 회전 속도가 380~420rpm 일 때, 토크는 약 2.5~0.2Nm 가량 발생함을 알 수 있었다. 그리고 전동기의 효율은 약 50% 정도이며, 회전 속도가 400rpm 을 넘어서면서 전동기의 효율이 급감함을 알 수 있었다. Fig. 7(c), (d)에는 모터의 극수가 4 극으로 변환되었을 때의 해석 결과와 실험 결과가 나와 있다. Fig. 7(c), (d)에서 알 수 있듯이, 전동기의 회전속도 194 RPM 에서 208RPM 까지 토크가 대략 4~1Nm 까지 변화한다는 것을 알

수 있었으며, 효율 약 40~50%정도임을 알 수 있었다. 그림에서 해석치와 실험치의 차이가 나는 것은 실제 실험에서는 동손, 철손, 풍손 등의 손실항이 존재하기 때문이며, 해석시에 이를 정확히 예상하기는 어렵기 때문이다.

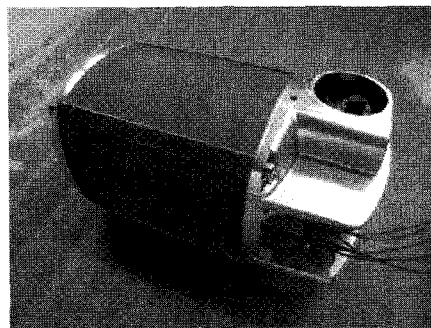
위의 결과는 실험이 이루어진 정격 영역 부근의 토크와 효율을 보여 주고 있다. 여기에서 효율의 계산은 실험에서는 입력은 파워미터를 이용하여 측정하였으며, Fig. 6 의 실험장치를 이용하여



(a) Rotor



(b) Stator



(c) Assembly

Fig. 5 Real view of motor

토크와 회전수를 측정하여 계산하였으며, 해석에서는 Maxwell/Rmxprt 에서 계산되어져 나오는 값을 사용하였다. 실험에서는 기어 박스도 포함되어 실험을 수행하였으며, 해석에서는 이를 고려하여 기계손을 상수로써 입력하였으며, 기존 시제품 실험에서 측정 실험한 결과를 바탕으로 2 극의 경우 마찰손은 15W, 풍손은 35W, 4 극의 경우는 마찰손은 15W, 풍손은 17W 를 사용하였다.

속도가 증가함에 따라, 2 극의 경우는 약 405 rpm 이후에서 효율이 급감하였으며, 4 극의 경우는 약 207 rpm 에서 급감함을 알 수 있었다. 이를 통하여 모터의 정격 속도를 넘어서면서 효율이 감소함을 알 수 있었다.

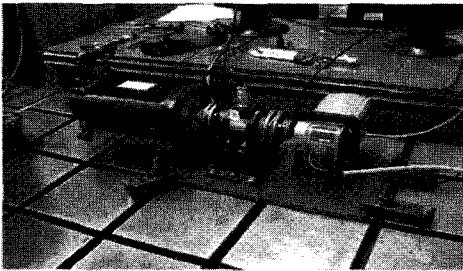
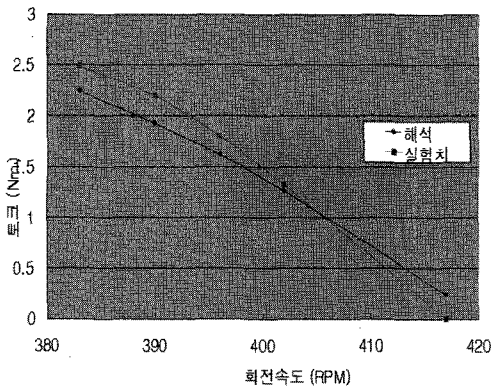
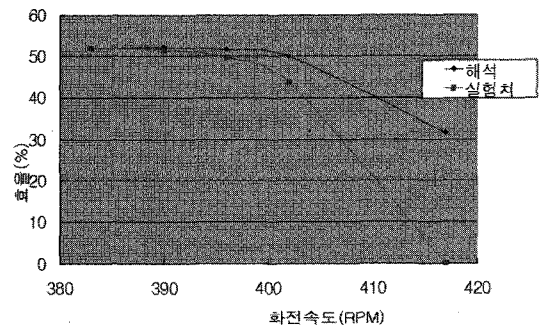


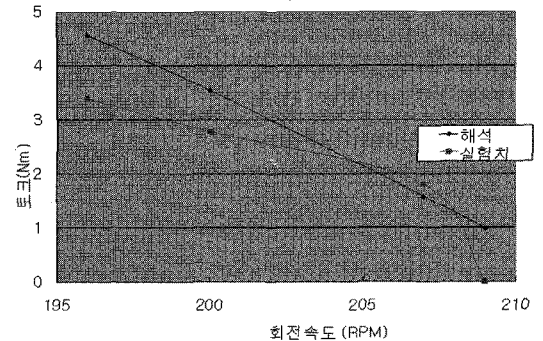
Fig. 6 Experiment set



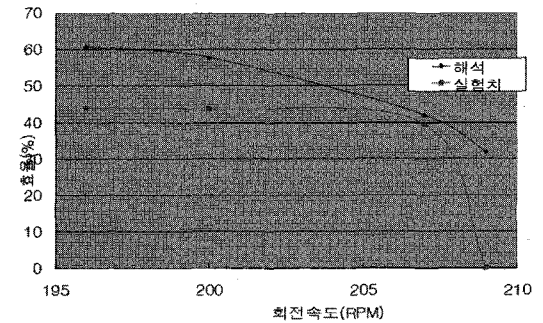
(a) Torque (2pole)



(b) Efficiency (2pole)



(c) Torque (4pole)



(d) Efficiency (4pole)

Fig. 7 Comparison between analysis and experiment

제작된 모터의 신뢰성을 알아보고자, 모터의 장시간 구동동안 온도변화를 측정해 보았다. 온도 측정 부위는 모터의 외부 케이스 부위를 측정하였다. 온도 측정을 위한 실험장치가 Fig. 8 에 나타나 있다. 동작 시간에 대한 온도 변화 결과는 Fig. 9 에 나타내었다. 약 17 시간의 동작 시험결과 초기 온도에 비해 특이한 온도 상승이나 이상 징후 없이 39 도 정도를 유지하면서 안정적인 동작 상태를 지속하였다.

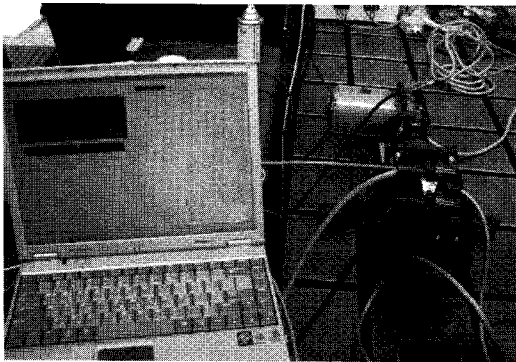


Fig. 8 Temperature measurement set

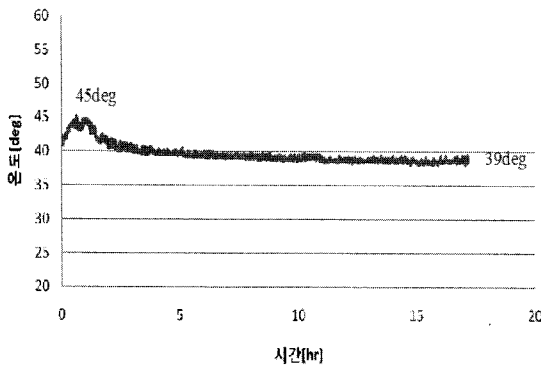


Fig. 9 Running temperature

## 5. 결론

본 연구에서는 선박용 와이퍼 모터로 사용되는 극수변환 유도전동기에 대한 해석과 실험을 수행하였다. 연구결과 초기 계획대로 개발된 전동기는 정격토크 2Nm 로써, 극수 변환에 따라 2 단계의 속도변화가 잘 됨을 확인할 수 있었다. 그리고, 실험과 해석치를 비교하여 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있었으며, 장시간 동작에 따른 온도 변화실험을 수행하여 전동기의 열적 안정성을 확인하였다. 따라서, 와이퍼 모터 등과 같이 2~4 단 정도의 가변속이 필요한 분야에서는 코일 와인딩을 물리적으로 변화시키는 극수 변환모터가 저 비용으로 구현될 수 있음을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Hong, J. S., Ahn, T. G., Paik, Y. N. and Sung, C. W., "Scheduled Speed Research for Linear Induction Motor Type Light Rail Vehicle," Proceeding of

- KSPE Spring Conference, pp. 843-844, 2007.
2. Lee, I. H. and Kwon, W. T., "Development of Torque Monitoring System of Induction Spindle Motor using Graphic-programming," J. of KSPE, Vol. 18, No. 10, pp. 184-193, 2001.
3. Chung, W. J., Yoon, S. H. and Kim, C. S., "Development of the High Speed Dynamometer using the Generator," J. of KSPE, Vol. 25, No. 5, pp. 22-27, 2008.
4. Jung, S. K. and Yi, H. B., "Electric machines," Scitech, pp. 143-151, 2003.
5. Park, M. H., "Induction machine," DongMyung, pp. 386-391, 1998
6. Yi, P. J., Yi, S. Y. and Shin, W. J., "A Robust Speed controller for Induction Motor Drive using Fuzzy Logic," Proc. of IEEK Spring Conference, Vol. 19, No. 1, pp. 183-186, 1996.
7. Wi, S. O., Kim, J. K., Lim, Y. C. and Jung, Y. K., "Induction Motor Speed Control System using Two Phase SRPP-PWM Scheme," Proceeding of KIPE Autumn Conference, pp. 25-28, 2002.
8. Park, W. S. and Oh, H., "Speed Control of Induction Motor by Means of Expert PLC in Variable Load," J. of KIIEE, Vol. 16, No. 2, pp. 54-58, 2002.
9. Kim, K. B., "Speed control technology for large scale induction motor," KIEE, Vol. 40, No. 1, pp. 51-56, 1991.