

**Turbo Compressor용 초고속 전동기 개발**

김영관\*, 최문창  
LG전자 Digital Appliance연구소 Compressor Group

**Development of Ultra-High Speed Motor for Turbo Compressor**

Young-Kwan, Kim, Moon-Chang, Choi  
Compressor Group, Digital Appliance Lab., LG Electronics

**Abstract** - In this paper, a brief overview of problems related to the electromagnetic, mechanical design criteria is reported. Also, we described the results about the comparisons between BLDC motor and induction motor for Turbo Compressor considering motor cost, efficiency and reliability. As a result, we select an induction motor for 12.5RT Turbo compressor for the application of small building's air-conditioning system. Finally, a prototype induction motor was manufactured and tested under compressor set. The test results were successfully met the mechanical, thermal and electromagnetic point of view.

**1. 서 론**

일반적인 밀폐형 압축기는 가정용, 상업용의 소용량 냉동시스템에 주로 이용되고 있으나 Turbo Compressor는 주로 산업용의 대형 공조시스템에 사용되어 왔다. 이러한, 대형의 Turbo Machinery는 일반적인 유도전동기의 축단에 증속기어를 적용한 고속운전을 하였으나 기계적인 Gear를 이용한 증속에는 한계가 있어 가정용이나 작은 빌딩용에 필요한 정도의 작은 소형 Turbo Compressor의 실현은 요원한 것으로 인식되어져 왔다. 그러나 최근 초고속 운전이 가능한 고속 Bearing 기술 및 고주파 스위칭 소자등의 부품기술의 발전, 저철손 자성재료, 고성능 영구자석재료 등의 구동시스템 기술의 발전에 힘입어 직접구동 방식의 전혀 새로운 개념의 초고속화 기술이 가능해짐에 따라 분당 수만에서 수십만에 이르는 초고속회전이 가능한 Turbo Compressor를 가정 혹은 작은 빌딩 공조용에 적용하기 위한 기반기술 연구가 활발히 진행되고 있다. 한편, 소형 Turbo Compressor가 최근 각광을 받고 있는 이유는 단순한 압축 메카니즘 및 소형화에 장점이 있기 때문이다. 또한, 동일 용량의 기존 일반 압축기에 비하여 소형화에 따른 고속회전으로 인하여 체적이 적은 Motor로 큰 Power를 낼 수 있으므로 출력/체적의 비가 높고 Low Cost의 가능성이 매우 높은 장점이 있기 때문이다. 이러한 Turbo Compressor구동용 초고속 Motor는 영구자석재료, 저철손 자성재료의 발전에 힘입어 고속화가 가능하게 되었으며 공작기계추축구동용 스피들, Turbo 분자펌프등의 직접구동 분야로의 적용이 확대되고 있는 실정이다. 예를 들면, 선진 외국에서는 0.5~15kW, 180,000rpm의 저용량에서부터 250Hp, 100,000rpm의 대용량 고속Motor의 개발완료가 보고되고 있다. 미국의 Carrier사의 경우, 30Hp급의 25RT의 공조용 Turbo Compressor의 시제품의 개발을 완료한바 있다. 그러나, 초고속 Motor를 탑재한 제품이 상품화되기 위해서는 아직 해결해야할 과제가 많이 남아 있는 실정이다. 본 논문에서는 빌딩의 공조용 시스템으로서 12.5RT급의 Turbo Compressor구동용 고속 Motor로서 부하, 효율, 신뢰성의 측면을 고려한 구동 Motor의 선정 및 상세 설계등에 관하여 논하고자 한다.

**2. 본 론**

**2.1 Turbo Compressor구성**

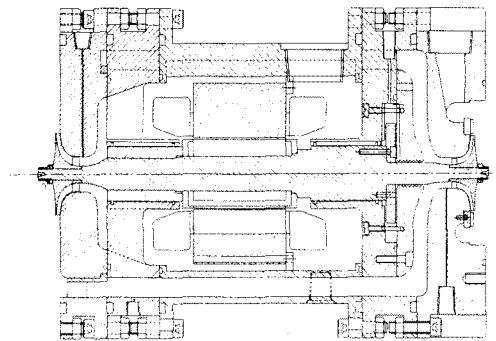


그림 1. Turbo Compressor 구조

그림 1은 현재 개발중인 Turbo Compressor의 구조를 나타낸 것이다. 소형 Turbo Compressor에 요구되는 핵심기술은 크게 3가지로 나누어질 수 있다. 소형 Impeller의 양산기술, 신뢰성있는 고속 Bearing구현, 그리고 고속 Motor & Controller인데 이외에 Balancing도 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 현재 개발중인 Turbo Compressor는 회전자 축의 양단에 Impeller가 취부되어 있는 2단 압축방식이다. Rotor의 양측에 동압 Gas Bearing의 일종인 고속 Foil Bearing을 채택하였으며 축방향 지지를 위하여 마찬가지로 Foil Bearing을 편측에 취부하고 있다. 이러한 Foil Bearing은 고속운전시 신뢰성이 우수한 장점을 지니고 있기 때문에 특히 초고속운전분야의 적용이 확대되고 있다. Motor는 압축기 내부에 설치되어 있으며 Motor에서 발생되는 열은 저온의 흡입 냉매에 의하여 냉각되는 시스템으로 구성되어 있다. Controller는 고속스위칭시 손실이 적은 IGBT를 사용하고 있다.

본 개발중인 Turbo Compressor는 15Hp급, 56,500rpm, 12.5냉동톤의 빌딩용 Compressor로서 증속기어가 필요한 직접구동 방식을 채택하고 있다.

**2.2 고속 Motor설계**

Turbo Compressor등과 같이 수만 rpm이상의 고속운전하는 Motor를 설계하는 경우 다음과 같은 점을 고려해야 한다.

- ▶ 회전자 강성이 높은 회전자 설계기술
- 고속회전으로 인한 큰 원심력에 견디는 회전자 구조일 것.
- 축의 공진주파수를 높이는 회전자 구조일 것.

- 유도전동기의 경우 회전자 슬롯, 엔드링 구조
- Brushless DC Motor인 경우 고성능 영구자석 및 영구자석 취부 구조
- 고속회전에 의한 풍손 저감 구조

- ▶ 고주파 운전에 적당한 저철손의 구조강판 및 고성능의 영구자석재료 채택
- ▶ Motor의 발열을 충분히 냉각시켜줄 수 있는 냉각 시스템

표 1은 현재 개발중인 Turbo Compressor구동용 Motor의 설계 사양으로서 Compressor에서 요구되는 축동력을 고려하여 선정된 기본적인 정격사양을 나타내고 있다.

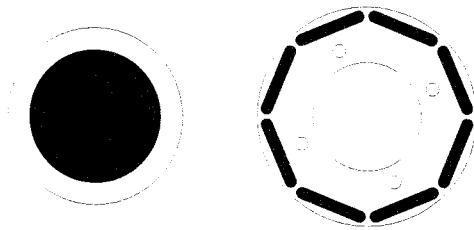
표 1 Motor 정격사양

항 목	사 양
정격출력	12,500 [W]
정격전압	380 [V]
정격회전수	56,500[rpm]

### 2.2.1 Brushless DC Motor

Brushless DC Motor를 설계하는 경우 가장 큰 문제점은 Motor의 출력비와 회전자의 안정성이다. Motor의 출력비를 높이기 위해서는 에너지적이 큰 고성능의 희토류자석을 이용할 필요가 있다. 또한, Motor출력이 큰 대용량의 Compressor인 경우 과도한 전기자 전류에 의하여 영구자석이 불가역감자를 일으키지 않도록 설계하는 것이 요구된다. 이러한 조건을 만족하기 위하여 보자력 및 잔류자속밀도가 큰 Nd-Fe-B자석을 채용하였다.

또한, 고속회전에 의한 과도한 원심력에 의하여 영구자석의 비산을 방지하는 구조로서 여러 가지 회전자 구조가 고려되고 있다. 그림 2는 현재 고려하고 있는 Brushless DC Motor의 회전자 구조이다.

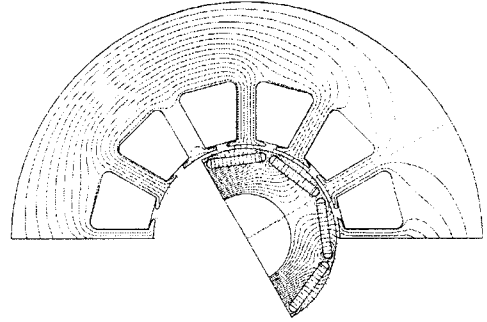


(a) 원통형 (b) 매립형

그림 2. Brushless DC Motor의 회전자 구조

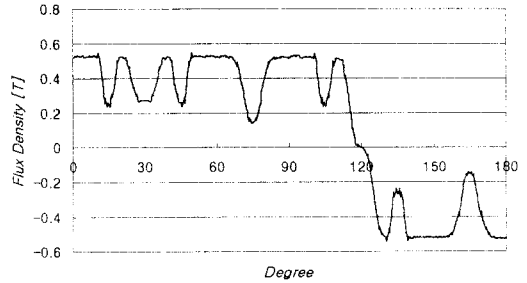
그림 2 (a)는 원통형 영구자석의 외주면에 영구자석의 비산을 방지하는 Ring 형태의 Retainer를 삽입하는 SPM형의 회전자 구조이다. 이 회전자 구조는 Retainer의 강도에 의하여 회전속도를 높이는 한계가 있으며 여기에서 발생하는 와류손 때문에 효율저하 및 발열이 생긴다. 한편, 이 Retainer는 비자성의 재료를 이용하여야 하므로 자기적인 공극으로 되기 때문에 영구자석의 동작점이 낮아지게 되어 공극자속밀도가 낮아진다. (b)는 회전자 철심 내면에 영구자석을 삽입하는 매립형 회전자로서 영구자석간의 누설자속을 최소화하는 것이 주요한 문제이다. 이를 위하여 원심력에 의한 철심의 Stress를 해석하여 문제가 없는 정도의 여유를 두어 Bridge부분의 길이를

정하였다. 본 연구에서는 회전자 강성을 고려하여 동일 극성의 영구자석을 다수개로 분리하여 삽입하는 회전자 구조로 설계하였다.



(a) 자속분포도

Airgap Flux Density



(b) 공극자속밀도

그림 3. Brushless DC Motor 자체해석

### 2.2.2 Induction Motor

유도전동기는 간단한 구조, 견고성, 신뢰성이 우수하기 때문에 범용Motor로서 제조 및 대량생산이 가능한 특징을 지니고 있다. 그러나, 가변전원에 의한 구동시, 공간고조파 및 시간고조파에 의한 고주파 철손, 회전자 표면에 발생하는 표면손등이 증가하게 된다. 또한, 동일한 출력의 저속 Motor와 비교할 때 회전자의 체적이 적으므로 회전자 2차 동손이 증가하여 온도상승을 충분히 고려한 냉각기술이 요구된다. 회전자 이러한 유도전동기를 Turbo Compressor등과 같은 고속운전용 구동원으로 사용하는 경우 고속회전에 의한 과도한 원심력에 의하여 회전자 계철부, 회전자 치 및 Endring등의 강도가 문제가 된다. Silicon Steel등과 같은 경우, 경험적인 결과에 의하면 회전자 주변속도가 약 90~150[m/sec] 정도의 제약이 있다.

### Motor제적

Motor의 출력대비 외형크기는 다음과 같은 관계에 있다.

$$P_o = K_o \cdot L_g \cdot D_g \cdot N$$

- $P_o$  : Motor출력
- $D_g$  : 회전자외경
- $L_g$  : 적층길이
- $K_o$  : 출력상수
- $N$  : 운전속도

$K_o$ 는 전기계의 자기,전기비장하에 의하여 결정되는 상

수로 기존 설계에 기초로 유도되는 상수이다. 이 출력상수에 의하여 결정되는 Motor의 치수는 Motor의 기계적인 안정성을 고려하여 회전자 허용 주변속도의 범위 내에서 선정할 필요가 있다. 이론적인 규소강판의 주변속도는 150~200 [m/sec]이지만, 회전자 Bar 및 Endring 등의 구조측면에서도 고려하여 강도해석을 해야한다.

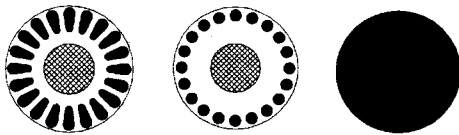
**기본설계**

본 논문의 고속 유도전동기는 운전주파수가 1000[Hz]의 고주파수이므로 주파수 증가에 따른 고정자 철손이 일반 범용 Motor에 비하여 상당히 증가한다. 그러므로 철손저감의 측면에서 고주파 운전시 철손이 적은 박판의 Silicon Steel을 채용할 필요가 있다. 이러한 조건을 만족하는 강판으로서 규소함유량 6.5%, 0.1t 두께의 Super E Core를 적용하였다. 이러한 강판은 기존의 저철손 0.35t 두께의 규소강판에 비하여 철손이 약 25%정도이다. 이러한 규소강판은 철손이 적은 장점이 있지만 포화자속밀도가 낮기 때문에 자기회로 설계시 자기회로포화 회피설계를 하여야 하며 이에 대한 설계기준은 다음의 표 2와 같다.

한편, Cost상승의 주 원인이 되며 철심의 경도가 크기 때문에 대량생산등의 제조성 측면에서 적용시 충분한 고려가 이루어져야 한다. 고주파수로 운전되기 때문에 기본파 주파수에 의하여 발생하는 철손 이외에 공극부분의 자속맥동에 의한 손실이 크게 증가한다. 이러한 손실은 표유부하손에 포함되는 것으로서 고정자치, 슬롯 개구부 폭, 고정자 슬롯수 및 회전자 표면가공정도에 의하여 결정된다. 이러한 손실은 고속운전시 전체손실중에서 상당한 부분을 차지하게 되므로 이에 대한 충분한 고려가 이루어져야 한다.

위에서 언급한 것처럼 손실을 저감하기 위한 방법으로 고정자 슬롯수를 가능한한 많게 하는 것이 좋다. 고정자수가 많게 되면 치 및 개구부의 자기저항이 다르기 때문에 발생하는 공간고조파에 의한 손실을 적게 할수 있으며 공극의 기자력분포를 정현적으로 할 수 있기 때문에 고조파 손실을 저감할 수 있다. 또한, 권선설계에 있어서도 고조파를 적게 하는 적절한 권선 피치를 선정하여야 한다. 일반적으로 2층권의 5/6피치의 경우가 고조파 손실을 적게 한다. 회전자 슬롯수는 고정자 슬롯수와의 조합을 고려하여 진동, 소음, 토오크 맥동등의 측면에서 유리한 슬롯조합을 선정하여야 한다. 슬롯조합은 24/17로 선정하였다.

**회전자구조**



(a) 깊은홈슬롯 (b)원형슬롯 (c) Solid-rotor  
그림 4. 고속유도전동기 회전자구조

Turbo Compressor구동용 유도전동기의 회전자구조는 과대한 원심력에 견디는 구조로 하여야 하므로 그림 4와 같은 구조가 고려되고 있다. (a)는 일반 범용 유도전동기의 깊은홈슬롯형으로서 회전자 바 및 Endring은 알루미늄 다이캐스팅에 의하여 제작된다. 알루미늄의 경우 고속용 회전자로서 충분한 강도를 지니고 있지만 알루미늄의 저항률이 동에 비하여 크므로 2차동손 증가로 인한 발열 및 효율저하의 문제가 있다.(c)는 2차도체가 없는 철심 일체형의 구조로서 회전자의 강도가 우수한 장점을 지니고 있어 초고속운전에 적합하며, 2차도체가 없으므로

고속운전영역에서 토오크가 적은 공작기계주축구동에 적합하지만 역률이 적은 단점이 있다. 본 논문에서는 효율향상 및 토오크 발생등에 있어 유리한 (b)와 같은 원형슬롯의 동바를 적용하는 회전자를 채용하였다.

표 2 전류밀도 및 자속밀도 비교

항 목	범용Motor	고속Motor	
자속밀도 [T]	공극	0.5~0.9 [T]	0.3~0.7 [ T]
	고정자치	1.4~2.1 [T]	<1.4 [T]
	고정자 요크	1.3~1.65 [T]	<1.3 [T]
	회전자치	1.5~2.2 [T]	1~1.5 [T]
	회전자 요크	0.4~1.6 [T]	0.4~1.6 [T]
전류밀도 [A/mm2]	고정자 권선	3~8 [A/mm2]	3~4 [A/mm2]
	회전자 권선	3~8 [A/mm2]	-
	Endring	3~6.5 [A/mm2]	-

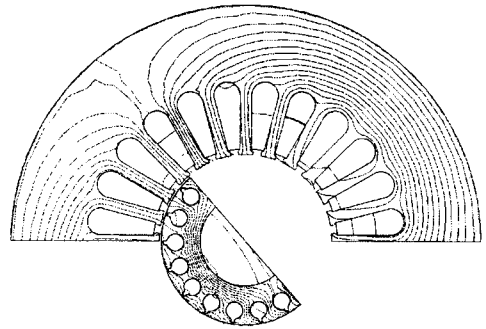


그림 5. 고속유도전동기 자속분포도

**2.2.3 설계결과**

표 3은 Brushless DC Motor 및 유도전동기의 설계결과를 나타내었다.

표 3 설계 결과 비교

항 목	IM	BLDC
극수	2	2
고정자외경	130 mm	130 mm
고정자내경	51.6 mm	51.6 mm
고정자슬롯수	24	12
회전자슬롯수	17	-
적층길이	74 mm	60 mm
회전자외경	49.6 mm	49.6 mm
회전자내경	25 mm	25 mm
권선턴수	2층권/12턴	28 턴

**2.3 고속 Motor 선정**

위에서 서술한 것처럼 Turbo Compressor 구동용 Motor로서 압축기 부하특성, Cost, 신뢰성 및 생산성등을 전부 고려하여 가장 적당한 Motor를 선정하여야 한다.

Speed-Efficiency Characteristics

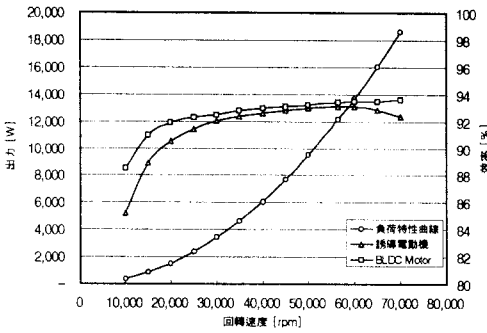


그림 6 고속 Motor의 효율특성 비교 (계산결과)

그림 6은 Turbo Compressor의 부하특성으로서 2중저감 부하특성을 지니고 있으며 각 속도영역에서 효율특성을 나타낸 것이다. 유도전동기의 경우 정격부하, 정격회전수에서 최대효율을 나타내지만 속도가 변함에 따라서 효율이 조금씩 저하되는 경향을 보인다. BLDC Motor의 경우 유도전동기에 비하여 전체적으로 효율이 높은 특성을 지니고 있지만, Turbo Compressor 운전영역에 있어서는 효율차이가 크지 않음을 알 수 있다. Cost 측면에 있어서는 BLDC Motor의 경우가 유도전동기에 비하여 약 40~50%정도 높게 나타난다. 그러므로 Turbo Compressor 구동용 Motor로서 신뢰성, 제작성, 가격경쟁력의 측면에서 유도전동기가 BLDC Motor에 비하여 우위를 차지하고 있으므로 유도전동기를 선정하였다.

2.4 고속 Motor 제작

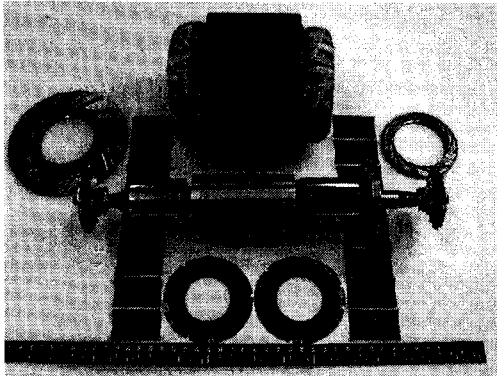


그림 7 고속 유도전동기

그림 7은 시제작한 Turbo Compressor구동용 고속 유도전동기 및 Foil Bearing, Impeller등을 나타내고 있다. 회전자는 동을 사용하여 Endring과 용접하였다. 동은 용융점이 알루미늄에 비하여 상당히 고온이기 때문에 동 다이크스팅 기술은 아직 미비한 실정이다. 과대한 원심력으로부터 Endring의 파손을 방지하기 위하여 Endring의 주면에 Retainer를 삽입하는 구조를 택하였다. 이러한 유도전동기를 Turbo Compressor Set에 조립하여 압축기 성능시험기에 의하여 성능시험을 하였다. 시험결과 압축기로서의 성능은 우수하였으며 Critical Point인 Rotor Dynamics 및 냉각시스템 구성에서 안정성을 확보한 것을 확인하였다.

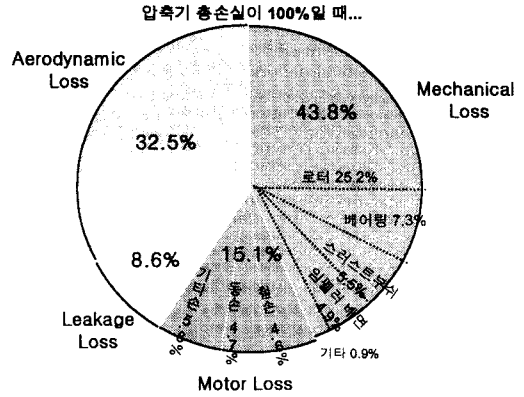


그림 8 압축기 손실 분포

현재, Motor 단품으로서의 성능은 시험장비의 미비로 시행하지 못하였으나 압축기 자체로의 시험결과 그림 8과 같은 압축기 손실분포를 얻을 수 있었다. 그림에서 보는 바와 같이 압축기 손실중에서 Mechanical, Aerodynamic Loss의 차지 하는 비율이 크다. 이러한 결과로 볼 때, 향후 Turbo Compressor의 효율향상을 위해서 Motor 측면에서 볼 때, Motor의 풍손을 저감하기 위해서는 회전자 외경은 가능한 적게하고 적중길이를 늘리는 방향으로의 설계가 이루어져야 할 것이다. Motor의 무부하시 입력값은 정격회전수 56,500[rpm]에서 약 680[W]정도이며 공기상태의 풍손을 고려한다면 철손은 약 300[W]로 추정된다.

3. 결 론

소형 빌딩용 Turbo Compressor구동 Motor로서 유도전동기를 선정, 설계, 시제작 및 압축기 시험 결과 양호한 결과를 얻었으며 고속 Motor의 설계시 설계방향을 정립하였다. 향후, Turbo Compressor의 부하매칭 및 Mechanical Loss저감을 통한 효율 향상 노력이 지속되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] D.C. Brondum, J.E.Materne, F.R.Biancardi and D.R.Pandy, "High-speed, direct-drive centrifugal compressors for commercial HVAC systems" presented at the 1998 Int. Compressor Conf.,Purdue Univ., West Lafayette, IN, July 14-17, 1998.  
 [2] A. Boglietti, P.Ferraris, M.Lazzari, and F.Profumo, "About the design of very high frequency induction motors for spindle applications", Conf.Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 1002, pp.25-32.