

초고속 특수 전동기 기술

- 베어링리스 전동기 기술을 중심으로 -

안진우*, 이동희**

(경성대 전기전자메카트로닉스 공학부 *교수 **조교수)

1. 서론

초고속 전동기(Ultra high speed motor)는 최근 공작기계 및 신재생 에너지 분야에서 매우 주목받고 있는 연구 분야이다. 초고속 전동기의 연구는 초고속 전동기 설계와 전력변환 장치와 제어 및 비접촉 베어링분야로 크게 구분할 수 있다. 접촉식 베어링을 사용하는 경우에는 베어링의 기계적 마찰에 의해 고속으로 운전하기에는 한계를 가지게 되기 때문이다^{1,2)}.

비접촉 베어링은 응용이나 구조에 따라 에어베어링 또는 자기베어링 구조를 선택하게 되는데, 비접촉 베어링 구조 자체가 복잡하고, 제어가 어려우며 전동기 시스템의 경제성이 크게 감소하는 문제가 발생하고 있다. 따라서, 최근에는 비접촉 베어링 구조를 전동기 자체에서 해결하고자 하는 베어링리스 전동기(Bearingless motor)에 대한 연구가 진행되고 있다³⁻²¹⁾.

베어링리스 전동기는 에어베어링 또는 자기베어링 구조와 달리, 전동기의 회전자계를 이용하여 반경방향의 전자력을 조절하여 주축을 유지시키도록 설계된 전동기이다. 베어링리스 전동기는 전동기와 자기베어링을 일체화하여 전동기를 소형화 시키며, 경제적인 방식으로 비접촉 방식의 주축을 유지시키기 위한 형태로 개발되었다.

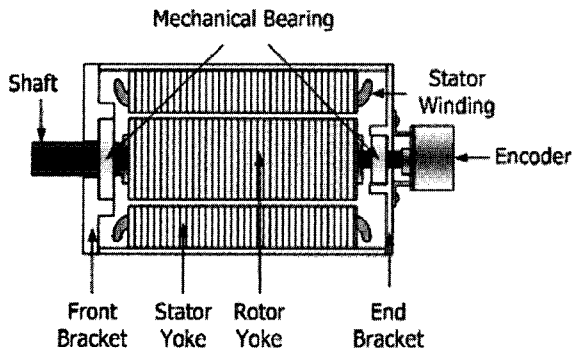
베어링리스 전동기는 그림 1과 같이 종래의 전동기에서 회전자를 기계적인 베어링으로 지지하는 구조와는 달리, 전동기 자체에서 회전력을 발생하는 구동 토크와 회전자를 부상시키기 위한 축방향 부상력을 동시에 발생시키는 형태의 전동기이다. 기존에도 기계적인 베어링의 사용으로 인한 기계적인 마찰과 이로 인한 열 발생 및 고속 운전용 베어링에 요구되는 윤활 문제를 해결하기 위한 자기 베어링이나 에어 베어링 시스템을 사용하는 전동기 구동 시스템이 사용되어 왔다. 하지만, 자기 베어링이나 에어베어링을 적용하고 있는 고속 운전 시스템은 베어링의 장착으로 인한 축방향 길이가 길어지고, 이로 인하여 기계 자체의 임계속도를 높일 수 없는 단점이 있으며, 베어링 시스템 자체의 가격이 매우 높아서 고가의 전동기 구동시스템 이외에는 적용하기 매우 어렵다^{1,2)}.

베어링리스 전동기는 토크 발생과 동시에 자기베어링 기술을 이용하여 회전축을 부상시키도록 함으로써, 기계적인 베어링의 사용을 제거할 수 있고 회전기의 축방향 길이를 종래의 비접촉식 베어링 시스템에 비하여 짧게 할 수 있어서, 자체의 임계속도를 높일 수 있는 장점이 있다.

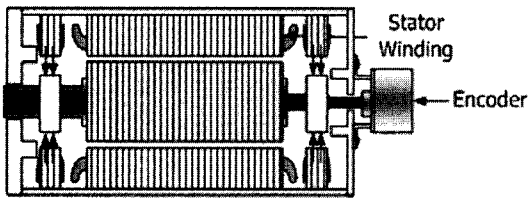
베어링리스 전동기는 자기 부상력과 회전토크를 발생하는 방식에 따라, 베어링리스 유도기, 베어링리스 BLDC 및 베어링리스 SRM 등이 연구되어왔다. 표 1은 현재까지 연구가 진

행된 베어링리스 전동기의 토크와 서스펜션 포스의 발생 원리에 따른 분류를 나타내고 있다.

이 중에서 효율 및 제어성의 이유로 베어링리스 BLDC와 베어링리스 SRM이 최근 많이 연구되고 있다. 여기서는 현재 까지 연구되어진 다양한 베어링리스 전동기의 구조와 특징에 대하여 살펴보고자 한다.

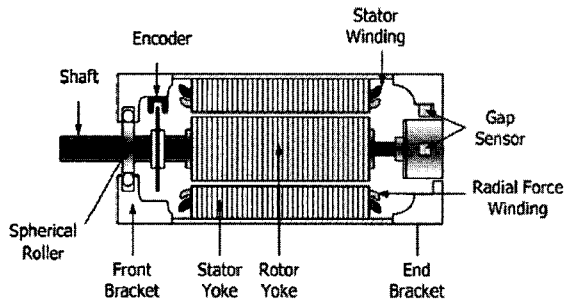


(a) 일반 전동기의 구조



Air or magnetic bearing

(b) 자기 베어링 구조의 전동기



(c) 베어링리스 전동기의 구조

그림 1 일반 전동기와 자기 베어링 및 베어링리스 전동기

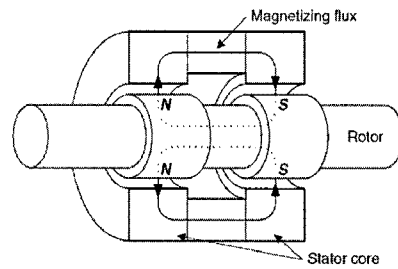
표 1 베어링리스 전동기 분류

| 구분 | 형태 | 종류 |
|-----------|-----------------|---------------------------------------|
| 베어링리스 전동기 | Induction type | Bearingless Induction Motor |
| | PM type | SPM, IPM, BPM, Hybride |
| | Reluctance type | Hompolar, Synchronous Reluctance, SRM |

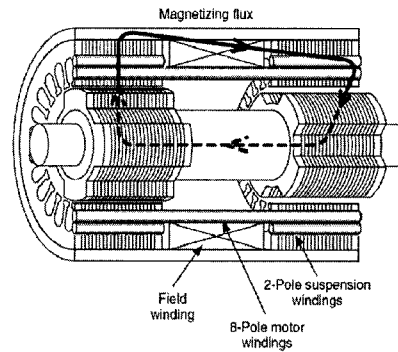
2. 베어링리스 전동기의 구조와 제어

2.1 Homopolar 및 Hybride 베어링리스 전동기⁽³⁻⁵⁾

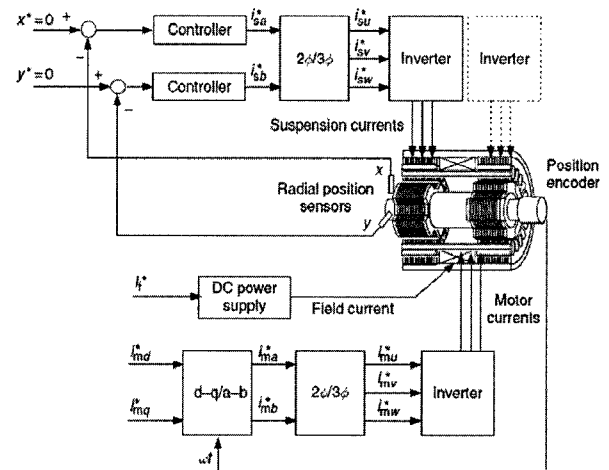
그림 2(a)는 homopolar 자기 베어링의 구조를 나타내고 있으며, 그림 2(b)와 (c)는 이 homopolar 자기 베어링의 원리를 이용한 베어링리스 전동기 구조 및 제어 블록도를 나타내고 있다. 그림 2(a)에서 homopolar 베어링리스 전동기는 2개의 상보적인 회전자 코어와 고정자 코어로 구성이 되며,



(a) homopolar 자기 베어링



(b) homopolar 베어링리스 전동기



(c) homopolar 베어링리스 전동기 제어 블록도

그림 2 homopolar 자기 베어링 및 homopolar 베어링리스 전동기 구조⁽³⁻⁵⁾

각 고정자 코어에는 토크를 발생하는 주권선과, 회전자 주축을 지지하는 서스펜션 권선으로 구성되어 있다. 회전자는 영구자석이나, 권선이 없는 돌극 구조로 설계되어 있다. homopolar 베어링리스 전동기는 회전자의 킬러턴스 토크로 회전력을 발생하며, 서스펜션 포스도 권선과 회전자 돌극의 킬러턴스에 의해 발생하도록 설계되어 있다.

이에 비하여 hybride 베어링리스 전동기는 그림 3과 같이 주자속을 고정자 또는 회전자에 영구자석을 사용하여 발생하는 구조로 설계된다. 영구자석과 고정자의 주권선의 주계자 자속은 회전자와 고정자의 극을 지나서 상호 작용하게 된다. 주계자 자속은 고정자 극에 대하여 대칭 방향으로 작용하게 되며, 회전자 지지력은 주권선과 별도로 분리된 권선과의 킬러턴스력에 의해 발생하게 된다.

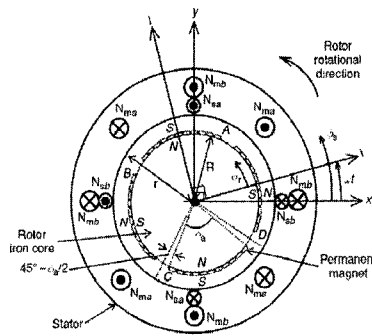
homopolar 및 hybride 베어링리스 전동기는 구조의 특성상 회전자의 임의의 위치에서 균일한 서스펜션 포스를 발생할 수 있는 장점이 있는 반면에, 전동기의 구조가 다소 복잡하며, 서스펜션 포스를 제어하기 위한 제어 회로가 복잡해지는 단점을 가지고 있다.

2.2 베어링리스 SPM 및 베어링리스 BPM⁽⁶⁻¹²⁾

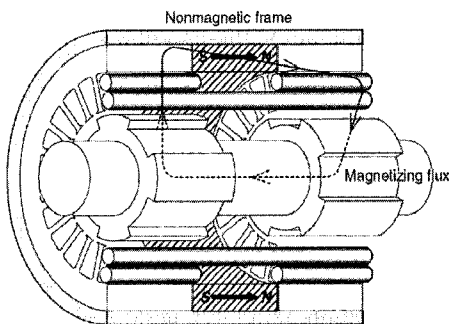
그림 4는 표면자석 부착형(SPM, Surface mounted Permanent Magnet) 베어링리스 전동기 구조를 나타내고 있다. 회전자의 구조는 영구자석 동기전동기와 유사한 형태

로 구성이 되며, 고정자의 권선이 그림 4와 같이 각 상권선인 N_{ma} , N_{mb} 및 N_{mc} 로 구성되고, 서스펜션 권선이 N_{sa} 와 N_{sb} 로 정현적인 분포로 구성된다. 각 상권선의 회전자계와 회전자에 부착된 영구자석의 주계자 자속에 의해 회전력이 발생하게 되며, 회전자 지지력은 서스펜션 권선과 영구자석의 상호작용에 의해 발생한다. 이때, 회전자를 공극에서 일정하게 유지시키기 위해서는 회전자 자속의 반대 방향으로 서스펜션 권선에서 자속을 발생하게 되므로, 영구자석이 감자(減磁)하는 문제가 발생할 수 있다.

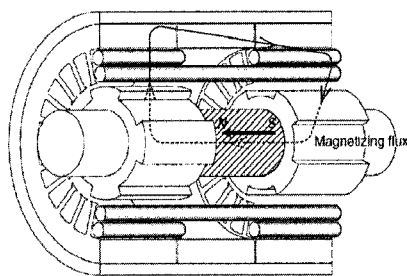
SPM형 베어링리스 전동기는 영구자석 동기전동기의 구조를 차용하였기 때문에 비교적 효율이 높고 제어성이 우수하다는 장점이 있지만, 회전자 지지력 발생에 있어서 영구자석의 감자 문제로 인하여 설계가 어렵고, 회전자 지지력에 제한이 발생하는 문제가 존재한다.



(a) SPM형 베어링리스 전동기의 구조

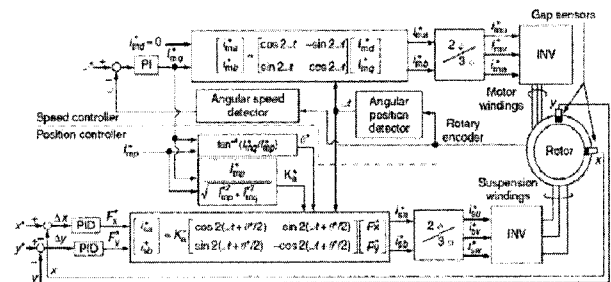


(a) 고정자 자석형 hybride 베어링리스 전동기



(b) 회전자 자석형 hybride 베어링리스 전동기

그림 3 Hybride 베어링리스 전동기⁽¹⁾



(b) SPM형 베어링리스 전동기 제어 블록도

그림 4 SPM형 베어링리스 전동기와 제어 블록도⁽⁶⁻¹²⁾

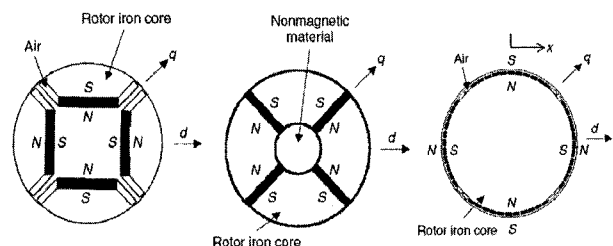


그림 5 BPM형 베어링리스 전동기의 회전자 구조⁽¹⁾

그림 5는 BPM(Buried Permanent Magnet)형 베어링리스 전동기의 회전자 구조를 나타내고 있다. BPM형 베어링리스 전동기의 고정자 구조는 SPM형과 동일하게 구성되나, 회전자의 영구자석을 내부에 삽입함으로써, 서스펜션 자속에 의한 감자(減磁) 문제를 해결할 수 있다. 따라서 SPM형 구조에 비하여 높은 회전자 지지력을 구현할 수 있으며, 고속 회전에 유리한 장점을 가지게 된다.

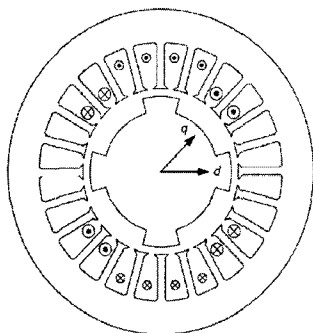
2.3 Synchronous Reluctance 베어링리스 전동기⁽¹³⁻¹⁶⁾

그림 6은 synchronous reluctance 베어링리스 전동기의 구조를 나타내고 있다. synchronous reluctance 베어링리스 전동기는 회전자에 계자 권선이나 영구자석을 사용하지 않으므로, 고속 운전 및 고온 환경에 유리한 장점이 있다. 그림 6은 3상 synchronous reluctance 베어링리스 전동기의 한상에 대한 토크 권선과 서스펜션 권선의 구조를 나타내고 있다. 즉, 회전자의 돌극성과, 각 상권선의 $d-q$ 축 전류에 의해 회전 토크를 발생시키고, $x-y$ 축에 대칭 방향으로 서스펜션 권선을 위치시켜서 회전자 지지력을 발생하는 구조로 설계된다.

주 토크의 제어 방식은 기존의 synchronous reluctance 전동기와 같은 방법으로 제어되지만, $d-q$ 축의 전류에 따라 서스펜션 포스가 변동하게 되므로, 이를 고려하여 회전자의 공극제어가 이루어져야 한다.

2.4 베어링리스 SRM(Switched Reluctance Motor)⁽¹⁷⁻²¹⁾

SRM(Switched Reluctance Motor)는 회전자와 고정자 돌극의 릴럭턴스 토크를 이용한 전동기구조로써, 토크 발생 메커니즘상 Radial force를 쉽게 구현할 수 있는 구조로 설계되어 있다. 따라서, 베어링리스 전동기의 구현에 매우 유리하며 영구자석이나 회전자 권선이 없는 구조이므로 내환경성이 매우 우수하다. 또한, SRM의 고토크 특성으로 인하여 순간 가속성이 매우 좋아서 고속 회전에 유리한 장점을 가지고 있다.



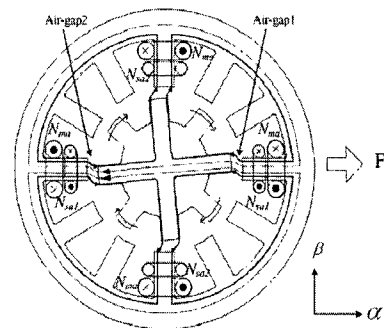
⊗ ⊗ Suspension conductors
⊙ ⊙ Motor conductors

그림 6 Synchronous Reluctance형 베어링리스 전동기⁽¹³⁻¹⁶⁾

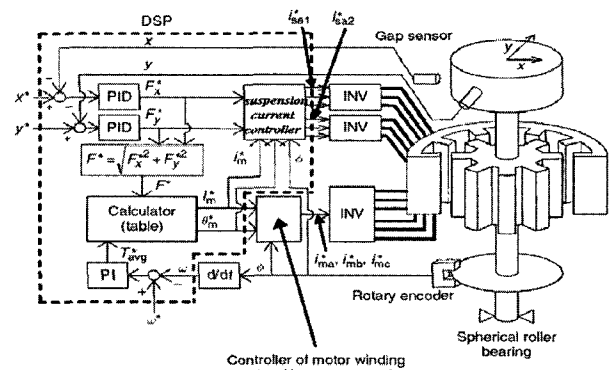
베어링리스 SRM에서 회전축을 지지하는 자기 부상력의 발생원리는 그림 7과 같이 설명될 수 있다.

그림 7에서 N_{ma} 는 회전토크 발생을 위한 A상의 주권선을 나타내고, N_{sa1} 과 N_{sa2} 는 축방향 부상력을 발생하기 위한 A상의 보조권선을 나타내고 있다. 그림 7에서 주권선 N_{ma} 는 4개의 코일이 직렬로 연결되어 있으며, 보조권선 N_{sa1} 와 N_{sa2} 는 각각 2개의 코일이 직렬로 감겨져 있다. A상과 마찬가지로 B상 C상에 대해서도 주권선과 보조권선이 A상과 같은 방식으로 감겨져서 정렬된다.

그림 7에서 굵은 실선 부분은 주권선 N_{ma} 에 흐르는 전류 i_{ma} 에 의한 각 극에서의 자속을 나타내고 있으며, 점선은 보조권선 N_{sa1} 에 흐르는 전류 i_{sa1} 에 의한 쇄교자속을 나타내고 있다. 주권선 전류와 보조권선 전류에 의한 합성 자속은 그림 7의 공극 1에서는 합성자속이 증가하고, 공극 2에서는 합성자속이 크게 감소하게 된다. 따라서, 각 공극에서의 합성자속의 차에 의하여 α 축 방향으로 자기부상력이 발생하게 된다. 이와 마찬가지로 i_{ma} 와 보조권선 N_{sa2} 에 흐르는 전류 i_{sa2} 에 의한 합성자속에 의한 β 축 방향으로 자기 부상력을 발생시킬 수 있으며, 이러한 자기 부상력의 방향은 회전자 위치에 따라 보조권선에 흐르는 전류의 크기와 방향을 제어함으로써, 일



(a) 베어링리스 SRM의 구조 및 서스펜션 포스 발생원리



(b) 베어링리스 SRM 제어 블록도

그림 7 베어링리스 SRM⁽¹⁷⁻²¹⁾

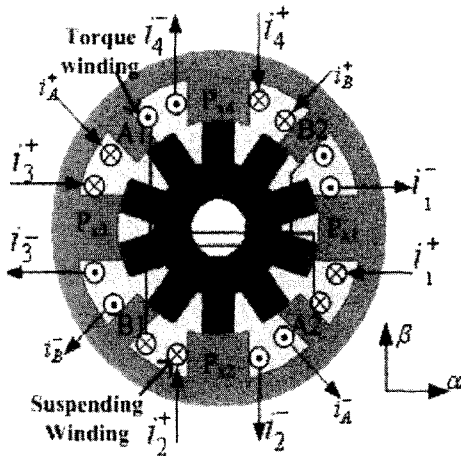


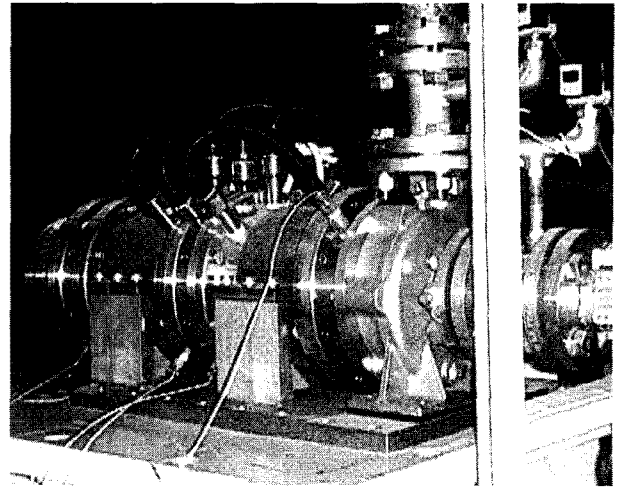
그림 8 분리 돌극 구조의 베어링리스 SRM

정하게 유지시킬 수 있다.

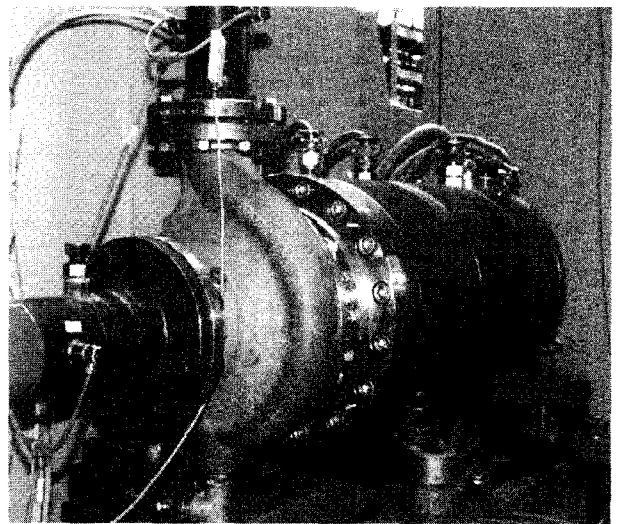
최근에는 서스펜션 포스와 토크를 분리하여 발생할 수 있는 새로운 극 구조의 SRM에 대한 연구가 국내에서 진행되어 기존의 베어링리스 SRM이 가지고 있는 자속의 커플링 문제를 다소 해결할 수 있는 방법이 제시되고 있다. 그림 8에서 제시된 분리 돌극 구조의 베어링리스 SRM은 회전자 토크를 발생하는 극과 서스펜션 포스를 발생하는 극을 별도로 분리하여 설계함으로써, 자속의 커플링으로 인한 토크의 비선형성 및 서스펜션 포스 제어의 어려움을 동시에 해결하고자 하였다.

그림 8에서 제시된 구조에서 각 A와 B는 토크 발생을 위한 극과 권선 구조를 나타내고 있으며, P_x와 P_y는 x-y축 방향의 서스펜션 포스를 발생하기 위한 극 구조와 권선을 나타낸다. 이때, 연속적이며 안정적인 서스펜션 포스의 발생을 위해 고정자와 회전자의 극 구조를 배치함으로써, 기존의 베어링리스 SRM이 가지고 있는 토크의 불연속성이나, 제어의 한계를 극복하도록 하였다.

현재까지 제시된 베어링리스 전동기 중에서 베어링리스 SRM은 베어링리스 유도기에 비하여 권선방식이나 제작이 매우 간단하고 경제적이며 효율이 높은 장점을 가지고 있다. 또한 베어링리스 BLDC에 비하여 감자의 위험이 없으며 제어가 용이하여 최근 고속 운전 및 극저온, 유독한 환경과 같은 특수 환경에서의 전동기의 대안으로 떠오르고 있다. 베어링리스 Homo-polar 전동기와 베어링리스 SRM이 경제성 내환경성이 우수하고, 회전축 지지력의 발생이 매우 효율적으로 평가되고 있으나, 베어링리스 Homo-polar형은 기기의 구조상 축방향 크기가 매우 길어지는 단점이 있고, 전체 시스템의 고속 운전 성능은 인버터 구조 및 여자전류의 형상을 고려할 때, 베어링리스 SRM 구조가 매우 우수한 것으로 평가되고 있다.



(a) 2.2kW canned pump(Courtesy : Ebara Resarch Co. Ltd)



(b) 30kW canned pump(Courtesy : Sulzer Pump Ltd)

그림 9 Canned Pump 응용

3. 베어링리스 전동기의 응용 예

현재 베어링리스 전동기가 적용된 응용예는 canned pump, compact pump, bubble bed reactor, blood pump, spindle drive 및 반도체 공정 등에 적용되고 있다.

그림 9는 일본의 Ebara Research사에서 개발된 2.2kW급 canned pump와 스위스의 Sulzer Pump사에서 개발된 30kW급의 canned pump를 나타내고 있다. 이 응용에서는 homopolar 영구자석형 베어링리스 전동기가 적용되었다. canned pump는 유체가 기계적 접촉이나 오염으로부터 완전 보호되기 위하여 밀폐형으로 설계된 펌프이며, 베어링에 의

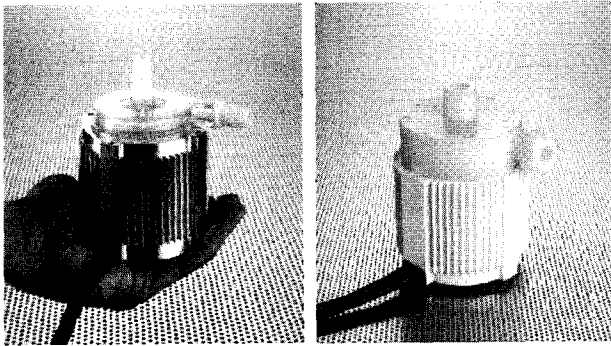


그림 10 Compact Pump 응용(Levitronix GmbH)

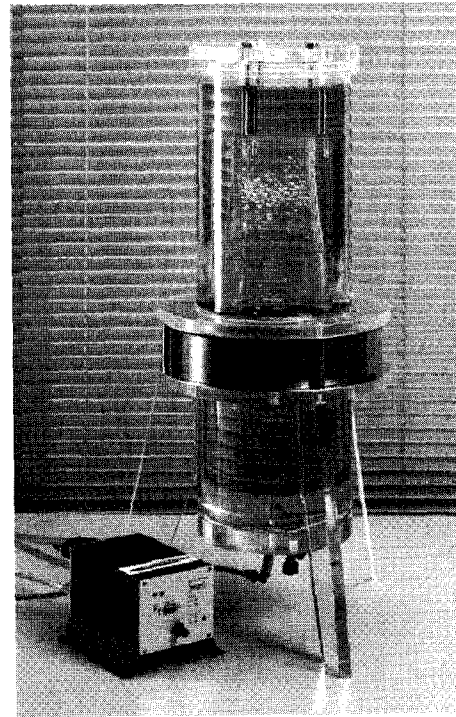
한 기계적인 마찰로부터 유체의 오염을 방지하기 위하여 베어링리스 전동기를 적용하고 있다.

그림 10은 Levitronix GmbH사에서 개발된 50W 및 300W급의 compact pump를 나타내고 있다. 그림 윗 부분의 플라스틱은 pump 부분이며, 아래쪽의 금속 프레임이 베어링리스 전동기를 나타내고 있다. pump의 임펠러는 영구 자석이 부착된 회전자 위에 고정되어 있으며, 회전자의 영구 자석으로부터 $x-y$ 축방향의 서스펜션 포스를 발생하도록 설계되어 있다.

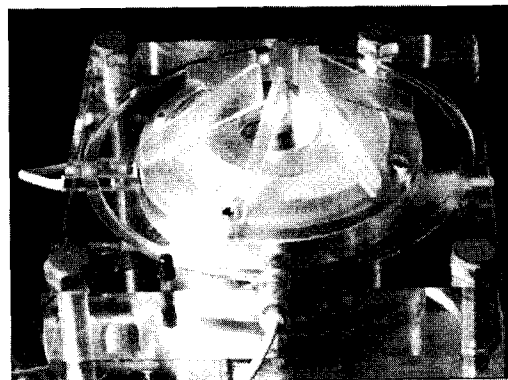
그림 11은 베어링리스 전동기가 적용된 다양한 응용 예를 나타내고 있다. 그림 11(a)는 Levitronix GmbH사에서 개발된 Bubble bed reactor이다. Bubble bed reactor는 반응유체속에서 동물의 세포를 배양하기 위해 유체내에 산소를 지속적으로 공급하는 장치이다. 반응유체가 기계적인 접촉에 의해 오염되는 것을 방지하기 위해 아래쪽에 유체를 회전하는 전동기는 베어링리스 구조로 설계되어 있다. 그림 11(b)는 혈액의 입자를 분해하는 혈액 펌프의 구조를 나타내고 있으며, 그림 11(c)는 CD 및 DVD에 적용되고 있는 고속 스피들 드라이브에 베어링리스 전동기가 적용된 예를 나타내고 있다. 혈액 펌프의 경우에는 bubble bed reactor나, canned pump와 마찬가지로, 내환경적인 요인으로 인하여 혈액의 입자에 오염을 방지하기 위하여 베어링리스 전동기가 적용되고 있으며, 스피들 드라이브의 경우에는 베어링의 마찰로 인한 전동기의 수명이 단축되는 것을 방지하기 위하여 베어링리스 구조가 적용되고 있다.

4. 국내의 관련 연구 현황

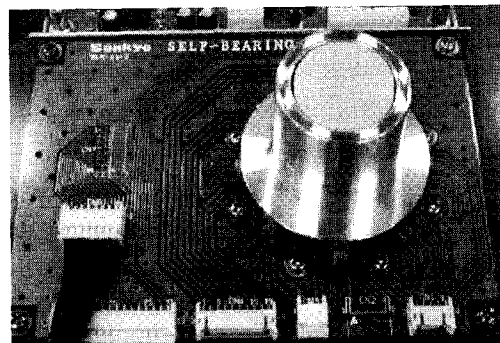
베어링리스 전동기와 관련된 국외 연구는 70년대 중반 이후, 다양한 타입의 베어링리스 전동기 연구가 수행되었다. Chiba는 고정자에 4극 권선과 2극 권선을 추가적으로 감으로써 2극 권선 전류가 반경 방향 힘을 생성하는 다양한 종류의 AC 베어링리스 전동기를 연구하였다. Okada는 고정자와



(a) Bubble bed reactor(Courtesy : Levitronix GmbH)



(b) Blood pump(Courtesy : Ibaraki University)



(c) Spindle drive(Sankyo Seiki Mfg Co.)

그림 11 베어링리스 전동기의 다른 응용 예

회전자의 극수를 다르게 함으로써 반경 방향 힘을 만드는 원리를 이용한 영구자석형 베어링리스 전동기를 연구하였다. Takemoto는 고정자에 반경방향의 힘을 발생하기 위한 코일을 추가함으로써, 릴럭턴스형 베어링리스 전동기를 연구하였다. 특히, 90년대 중반부터 벡터제어이론에 기초한 베어링리스 전동기의 이론체계가 제안되면서, 권선형식이나 극수의 선정에 관하여 많은 연구가 진행되었다.

현재까지 연구된 베어링리스 전동기의 경우 homopolar 베어링리스 전동기와 베어링리스 SRM의 경우에는 상용으로 10,000[rpm] 까지 적용되고 있으며, PM형 베어링리스 전동기의 경우에는 60,000[rpm] 까지 연구가 진행되고 있다.

국내에서는 베어링리스 전동기에 대한 연구가 거의 진행되고 있지 않았으나, 최근에 대학을 중심으로 베어링리스 전동기의 설계와 제어에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히, 국내에서 제시된 새로운 베어링리스 전동기의 구조는 기존의 방식에 비하여 제어 특성이 매우 우수한 것으로 평가되고 있다. 하지만, 전반적인 기술 수준은 외국에 비하여 매우 미약한 편이다.

베어링리스 전동기의 우수성과 장점을 고려한다면, 앞으로 다양한 응용 분야에서의 부가가치 창출이 가능한 기술이므로, 집중적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. ■■■

참 고 문 헌

- [1] A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa, M. Oshima, M. Takemoto and D. G. Dorrell, *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*, Elsevier, 2005.
- [2] M. Dussaux, "The industry application of active magnetic bearings technology", *Proc. 2nd International Symposium Magnetic Bearing*, Tokyo, pp. 33-38, 1990.
- [3] C. Michioka, Y. Toyoshima, O. Ichikawa, T. Fukao and A. Chiba, "Radial Force of Homopolar-Type Bearingless Motors in no Load Condition", *IEEEJ Proc. of Meeting of Rotating Machinery*, RM-96-24, pp. 91-00 (in Japanese), 1996.
- [4] O. Ichikawa, A. Chiba and T. Fukao, "Principles and Structures of Homopolar-Type Bearingless Motors", *IEEEJ Proc. IPEC-Tokyo 2000 (International Power Electronics Conf.)*, Vol. 1, pp. 401-06, 2000.
- [5] O. Ichikawa, A. Chiba and T. Fukao, "Inherently Decoupled Magnetic Suspension in Homopolar-Type Bearingless Motors", *IEEE Trans. on IA*, Vol. 37, No. 6, pp. 1668-674, 2001, Nov./Dec.
- [6] Y. Okada, S. Shimura and T. Ohishi, "Horizontal Experiments on a Permanent Magnet Synchronous Type and Induction Type Levitated Rotating Motor", *Proc. of IPEC-Yokohama*, pp. 340-45, 1995.
- [7] B. A. Steele and L.S. Stephens, "A Test Rig for Measuring Force and Torque Production in a Lorentz, Slotless Self Bearing Motor", *Proc. of 7th Int. Symposium on Magnetic Bearings*, pp. 407-12, 2000.
- [8] K. Nenninger, W. Amrhein, S. Silber, G. Trauner and M. Reisinger, "Magnetic Circuit Design of a Bearingless Single-Phase Slice Motor", *Proc. of 8th Int. Symposium on Magnetic Bearings*, pp. 265-70, 2002.
- [9] M. Ooshima, S. Miyazawa, A. Chiba, F. Nakamura and T. Fukao, "Parameter Measurements and Radial Position Control Characteristics of a Permanent Magnet-Type Bearingless Motor Under Loaded Conditions", *Trans. IEE, Japan*, Vol. 120-D, No. 8/9, pp. 1015-023 (in Japanese), 2000.
- [10] T. Ohishi, Y. Okada and S. Miyamoto, "Levitation Control of IPM Type Rotating Motor", *Proceedings of the Fifth International Symposium on Magnetic Bearings*, pp. 327-32, 1996.
- [11] M. Ooshima, S. Miyazawa, Y. Shima, A. Chiba, F. Nakamura and T. Fukao, "Increase in Radial Forces of a Bearingless Motor with Buried Permanent Magnet-Type Rotor", *The 4th International Conference on Movic Proceedings*, Vol. 3, pp. 1077-082, 1998.
- [12] N. Fujie, R. Yoshimatsu, A. Chiba, M. Ooshima, M. A. Rahman and T. Fukao, "A Decoupling Control Method of Buried Permanent Magnet Bearingless Motors Considering Magnetic Saturation", *Proceedings of IPEC-Tokyo 2000*, Vol. 1, pp. 395-00, 2000.
- [13] T. Fukao, A. Chiba and M. Matsui, "Test Results on a Super High Speed Amorphous Iron Reluctance Motor", *IEEE Transactions on IA*,

Vol. 25, No. 1, pp. 119-25, 1989.

[14] A. Chiba and T. Fukao, "A closed-Loop Operation of Super High-Speed Reluctance Motor for Quick Response", IEEE Transactions on IA, Vol. 28, No. 3, pp. 600-06, 1992.

[15] A. Chiba, K. Chida and T. Fukao, "Principles and Characteristics of a Reluctance Motor with Windings of Magnetic Bearing", IEEJ Proc. IPEC-Tokyo 1990 (International Power Electronics Conf.), pp. 919-26, 1990.

[16] A. Chiba, M. A. Rahman and T. Fukao, "Radial Force in a Bearingless Reluctance Motor", IEEE Transactions on IA, Vol. 27, No. 2, pp. 786-90, 1991.

[17] C. M. Stephens, "Fault Detection and Management System for Fault Tolerant Switched Reluctance Motor Drives", in Conf. Record of IEEE-IAS Annual Meeting, pp. 574-78, 1989.

[18] C. A. Ferreira, S. R. Jones, W. S. Heglund and W. D. Jones, "Detailed Design of a 30-kW Switched Reluctance Starter/Generator System for a Gas Turbine Engine Application", IEEE Trans. on IA, Vol. 31, pp. 553-61, 1995, May/June.

[19] A. V. Radun, C. A. Ferreira and E. Richter, "Two-Channel Switched Reluctance Starter/Generator Results", IEEE Trans. on IA, Vol. 34, pp. 1026-034, 1998, Sept./Oct.

[20] R. Krishnan, R. Arumugan and J. F. Lindsay, "Design Procedure for Switched-Reluctance Motors", IEEE Trans. on IA, Vol. 24, pp. 456-61, 1988, May/June.

[21] T. J. E. Miller, "Faults and Unbalance Forces in the Switched Reluctance Machine", IEEE Trans. on IA, Vol. 31, pp. 319-28, 1995, March/April.

〈 필 자 소 개 〉



안진우(安珍雨)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 12월~1996년 2월 영국 글래스고우대 방문연구원. 1998년 8월~1999년 8월 미국 위스컨신대 방문교수. 2006년 7월~2007년 7월 미국 버니지아텍 방문교수. 1992년~현재 경성대 전기전자메카트로닉스 공학부 교수. 2005년~현재 차세대 전동기기술연구센터장.



이동희(李東熙)

1970년 11월 11일생. 1996년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2002년~2005년 OTIS-LG 서보 R&D 선임연구원. 2005년~현재 경성대 전기전자메카트로닉스 공학부 조교수. 당 학회 편집위원.