

특집 : 홈어플라이언스 제품의 기술동향

냉장고 기술개발 동향

조 관 열

(LG전자 디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원)

1. 머리말

식품은 세균이 번식, 증가함으로써 부패되며 온도가 낮아지면 세균의 증가가 억제된다. 이와 같은 원리로써 냉장고내의 식품을 보관하는 것이 식품의 부패를 막을 수 있는 한가지 유효한 방법이 된다. 대상물의 온도를 낮추기 위한 냉동방법에는 혼합열(용해열)의 화학적 변화를 이용하는 방법, 잠열과 감열의 물질적 변화를 이용하는 방법 등 여러 가지가 있다. 예를 들면 얼음 냉장고는 용해열을, 드라이아이스는 승화열을, 열전기 냉장고는 펠티에(peltier) 효과를 이용한 냉동장치이다. 일반적인 우리가 사용하는 전기냉장고(이하 냉장고)는 증발잠열을 이용한 냉동장치이다. 냉장고는 전세계에 연간 6,000만대정도의 수요가 발생하며 표 1은 세계의 지역별 냉장고 수요를 나타낸다. 국내는 IMF 이전에는 연간 약 200만대의 시장규모였으나 IMF 이후 약 100만대 규모로 감소하였고 2000년대 들어 다시 수요가 증가되고 있다. 본고에서는 이러한 전기냉장고의 냉동원리, 구성부품 및 역할, 전력전자와 관련된 기술의 개발동향에 대해 고찰한다.

2. 냉동 사이클의 기본원리

액체는 증발할 때 주위로부터 다량의 열을 흡수한다. 그러한 열을 흡수하는 매개물을 냉매(refrigerant)라 하며 냉장고를 차갑게 하기 위하여 냉매의 증발잠열을 이용한다. 즉 냉매가 증발함으로써 냉동작용을 일으킨다. 그러나 만약 증발 중인 냉매를 공기중에 방출시키면 연속적인 냉동작용이 불가능해져서 냉매의 재순환운동을 할 수 없게 된다. 그러므로 일정한 증발된 기체상태의 냉매를 액체로 응축하여 냉매의 재증발되는 순환이 연속적인 냉동작용을 할 수 있도록 해야 한다. 냉매의 순환수단은 흡수식(암모니아 냉동기)과 압축기

표 1 세계의 지역별 냉장고 수요

구분	1998년	1999년
세계 전체	5,800	6,100
유럽	1,380	1,400
동구/러시아	370	380
아시아	2,006	2,164
중동	185	190
아프리카	80	90
오세아니아	71	72
북미	945	955
중남미	730	750

를 사용한 증발압축식으로 구분할 수 있으며 가정용 냉장고는 증발압축식을 사용한다.

일반적으로 냉매의 상태를 변화시키고 순환시키는 데는 4가지의 과정이 필요하며 이 사이클을 냉동사이클이라고 한다. 냉장고의 냉동사이클은 압축과 응축, 팽창(감압)과 증발 과정을 반복함으로써 냉동실 및 냉장실의 온도를 일정하게 유지한다. 냉매는 일정한 압력하에서 액체의 온도가 상승함에 따라 어떤 온도점에서 기화되고(증발) 온도가 내려감에 따라 액화된다(응축). 이 증발온도 및 응축온도를 (증발/응축) 포화온도라고 하며 포화온도에서 액체는 가스가 되고 가스는 액체가 된다. 예를 들어 물의 증발온도(포화온도)는 대기압하에서 100℃이다. 그러나 대기압보다 기압이 낮은 높은 산에서는 물의 증발온도는 더 낮게되고 압력이 높으면 높을수록 증발온도는 더 높아진다. 냉동작용에 있어서 냉매의 증발온도는 항상 대기온도보다 낮기 때문에 대기온도에서 액화시키기 위해서는 증기냉매를 어떻게 해서든지 변경시켜야 한다.

그러므로 기체냉매는 온도와 압력을 높이기 위하여 압축기에서 압축시킨 후(압축) 열교환기능을 가진 응축기를 대기중에 접촉으로써 응축잠열을 방출시키고 냉매는 액화된다(응축). 즉 압축의 목적은 기체냉매의 온도를 대기온도보다 높게 할 뿐 아니라 압력을 상승시키고 액화 포화온도(응축온도)를 동시에 대기온도보다 높게 한다. 액화된 냉매는 다시 냉각기(증발기)에서 증발한다(증발). 이때 냉동작용을 하기 위해서 포화온도(증발온도)는 대기온도보다 떨어져야 하며 더 낮은 증발온도를 만들기 위해서 모세관은 냉매유량을 조절함으로써 냉매의 압력을 감소시킨다(팽창, 감압)

그림 1은 냉장고의 기본구성도를 나타낸다. 냉장고의 주요 구성요소는 압축기(compressor), 응축기(condenser), 모세관(capillary tube), 증발기(evaporator), 냉기순환 및 응축기 팬모터 등으로 구성된다. 압축기는 인간의 심장과 같은 역할을 하는 부품으로 냉매가스를 순환시키고 압축하여 냉매가스의 온도와 압력을 높게 하는 역할을 한다. 냉장고에 사용되는 압축기에는 왕복동식(reciprocating), 회전식(rotary), 스크류(screw)식 등이 있으며 계속 새로운 형태가 개발되어지고 있으며 현재 냉장고에 주로 적용되고 있는 압축기는 왕복동식이다 왕복동식 압축기의 압축기와 모터는 용기(shell)내에 밀폐식으로 되어 있으며 모터의 회전운동을 피스톤의 왕복운동으로 바꾸어 이 왕복운동에 의해 냉매를 압축한다. 압축기 구동용 모터는 정속(constant speed)으로 운전되는 단상 유도기가 주로 사용되고 있으며 가변속(variable speed) 제어용 브러쉬없는 직류전동기(brushless dc motor)의 적용이 점차 증대되고 있다.

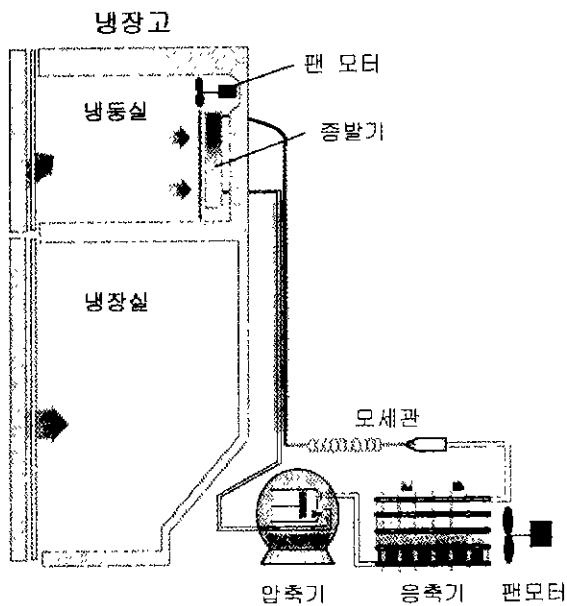


그림 1 냉장고 구성도



(a) Shaded pole 모터

(b) BLDC 모터

그림 2 냉장고 팬용 모터

응축기는 방열장치로 냉매가스를 액체상태로 응축하는 역할을 한다. 즉 증발기에서 흡수한 열과 압축기에서 부가된 열을 방출하는 역할을 하며 이 과정에서 고온의 냉매는 액체상태로 바뀐다 응축기는 냉각제의 종류에 따라 공기를 사용하는 공냉식과 물을 사용하는 수냉식으로 구분된다. 수냉식 응축기는 높은 열전달률을 가질 수 있으나 금속의 부식 및 불순물처리등의 유지보전이 어려운 단점이 있으므로 가정용 냉장고에는 주로 공냉식 응축기를 사용한다. 공냉식 응축기는 응축방법에 따라 팬동에 의해 공기를 불어주는 강제송풍식과 공기의 자연대류에 의해 냉각되는 자연송풍식으로 나눌 수 있다 응축기에서 열이 방출됨에 따라 냉매는 다시 액체로 바뀌지만 그것은 상대적으로 고온, 고압이므로 모세관(팽창밸브)을 이용하여 온도 및 압력을 떨어뜨린다. 즉 고온의 냉매가 모세관의 작은 틈새로 지나갈 때 급격한 압력강하가 발생하여 냉매의 일부가 기체로 변하며 기화된 냉매는 액체로부터 열을 빼앗아 모세관을 통과하는 냉매의 온도는 급격히 떨어지게 된다

증발기는 냉방하고자 하는 곳으로부터 열을 흡수하는 장치이다. 즉 증발기는 냉동하고자 하는 곳에 위치하며 주위의 물, 공기 및 기타의 물질로부터 열을 제거한다. 냉매는 액체상태로 증발기에 들어가서 기체상태로 변한다. 증발기는 열전달을 향상시키기 위해 핀(fin)을 관 주위에 설치하며 이 핀은 접촉면적을 넓혀서 열전달률을 높이며 열전달을 위해 공기를 사용하는 증발기는 대부분 핀을 사용한다. 공기의 순환에 의해 열전달을 하기 위해 냉기순환용 팬을 사용하는 경우에는 저온의 관(핀)으로 공기를 순환시키기 위한 것으로 이 장치는 냉동공간에 위치하며 자연대류보다 더욱 균일한 온도로 유지시킬 수 있다.

팬은 증발기의 냉매증발이 잘 이루어지도록 하기 위한 냉기순환용 팬과 응축기의 열전달을 위한 송풍용 팬으로 구분된다. 기존에는 정속으로 운전되는 단상 Shaded pole 모터가 주로 사용되고 있으나 최근 소비전력저감을 위해 고효율의 브러쉬없는 직류전동기의 적용이 증대되고 있다. 그림 2는 단상

Shaded pole 모터 및 3상 브러쉬없는 직류전동기의 구조이다.

3. 인버터 냉장고의 기술동향

우리나라 가정 내의 전기사용 비율을 보면 냉장고가 전체의 약 20%를 차지하고 있다. 이에 따라 정부는 전력수요 억제와 위해 전기요금 인상, 효율등급의 상향조정, 환경마크제 도입 등을 통해 고효율 기기개발 유도정책을 실시하고 있다. 유럽은 1999년 9월부터 에너지 등급을 상향 조정하였으며 에너지 라벨 부착을 의무화하고 있다. 미국은 2001년 7월부터 1993년 대비 에너지소비량을 30% 저감하는 에너지 규제를 실시할 계획이다. 일본은 1999년 4월부터 톱러너(top-runner)제도를 도입, 제품의 용량별로 최고 수준의 효율을 기준으로 설정한 목표치보다 효율이 낮은 제품에 대해 향상 권고, 공표, 명령, 벌금 등의 제반 규제를 가하고 있다. 이러한 각국의 에너지 규제에 대응할 수 있도록 제품의 효율을 향상시키려면 냉장고를 구성하는 요소부품들의 효율을 높이거나 새로운 냉동시스템을 개발해야 한다. 현재 이를 위한 방법으로 제시되고 있는 것 중 가장 효과적인 방법이 인버터 기술이다. 모터 회전수를 가변제어하는 인버터를 냉장고에 적용함으로써 에너지 및 소음저감 등 환경규제 대응은 물론 제품의 기본기능 향상과 급속냉각, 신선도 증대 등 부가기능도 구현할 수 있다¹⁻³⁾

기존 냉장고의 경우 압축기가 항상 일정한 속도로 운전, 정지를 반복함으로써 부하에 대응한 최적의 사이클 운전이 어려웠다. 그러나 인버터를 사용할 경우 많은 양의 식품을 저장하거나 외부환경에 의해 냉장실, 냉동실의 온도가 상승할 때 압축기를 4200rpm 이상의 고속으로 운전, 식품을 급속냉동시킬 수 있고 일반 운전시에는 1800~2400rpm의 낮은 속도로 운전해 냉장실, 냉동실의 온도변화 폭을 작게 해 식품의 신선도를 향상시킬 수 있다. 그림 3은 단상유도기를 사용한 정속형 냉장고와 가변속으로 운전되는 인버터냉장고의 운전 특성을 나타낸다. 인버터 냉장고는 압축기의 저속시 고효율 특성을 이용하여 저속으로 운전함으로써 냉장고의 소비전력을 기존의 정속유도기를 사용하는 냉장고에 비해 30~40% 가량 절감할 수 있다 또한 인버터 냉장고는 특히 압축기의 소프트 기동, 정지 알고리즘과 저속운전에 의해 기동소음과 운전소음을 대폭 줄일 수 있다. 실제로 인버터 냉장고는 97년 일본의 마쓰시다, 미쓰비시에서 출시한 이후 현재는 일본의 대부분의 업체가 적용하고 있으며 양면여닫이형 냉장고가 주류인 미국에서는 GE가 지난 97년 가변속 팬모터를 적용한 냉장고를 출시한 데 이어 강화된 에너지 규제에 대응하기 위해 인버터를 적용할 것으로 예상되고 있다. 국내에서는 1999년 LG전자가 압축기와 팬모터에 인버터를 적용한 냉장고를 출시하였고 대우전자와 삼성전자는 팬모터에 적용하였다.

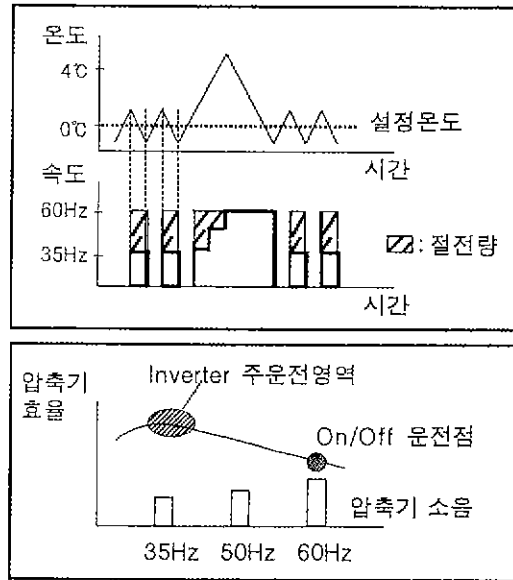
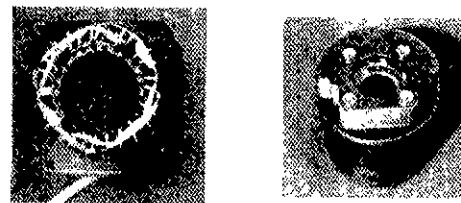


그림 3 냉장고 운전특성



(a) 고정자 (b) 회전자

그림 4 압축기용 BLDC 모터

인버터를 구성하는 핵심부품인 모터는 유도기에 비해 효율이 높은 BLDC 모터를 대부분 사용하고 있으며 페라이트(ferrite) 자석에서 에너지 밀도가 높은 희토류계(rare earth) 자석(NdFeB)을 적용함으로써 고효율 및 compact한 구조로 진행될 것으로 예상된다. 또한 회전자의 구조는 영구자석 표면부착형(SPM, Surface Permanent Magnet) 구조에서 밀력토크를 이용할 수 있는 매립형(IPM, Interior Permanent Magnet) 구조로 대체되고 있으며 모터의 효율 향상을 위해 다양한 영구자석의 형상 및 배치에 대한 연구가 계속되고 있다.⁴⁻⁶⁾ 그림 4는 압축기용 BLDC 모터의 고정자 및 회전자 구조를 나타내며 그림 5는 표면부착형과 매립형 BLDC 모터의 특성비교이다.

그림 6은 냉장고용 인버터구동 시스템의 구성도를 나타낸다. 모터는 주로 3상 4극 BLDC 모터를 사용하며 모터제어 및 냉장고 사이클제어를 위한 제어기는 저가의 마이컴(micom)을 사용한다. BLDC 모터를 구동하기 위해서는 회

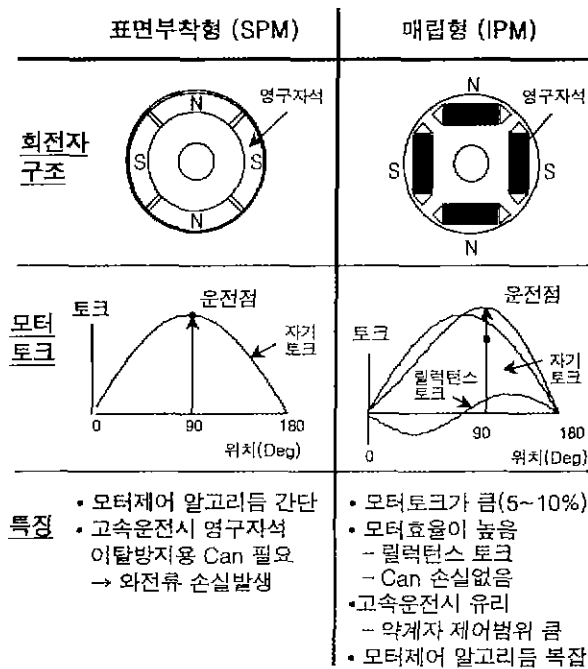


그림 5 표면부착형, 매립형 모터비교

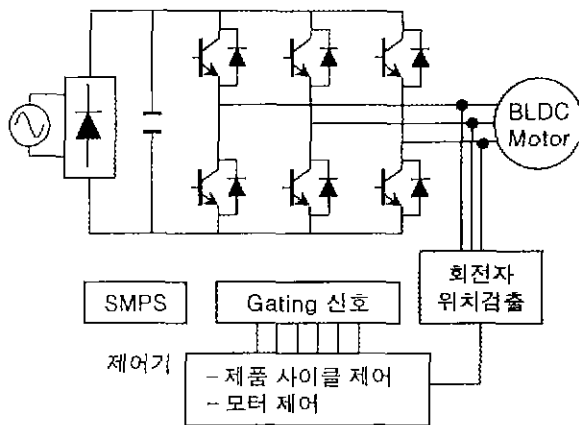
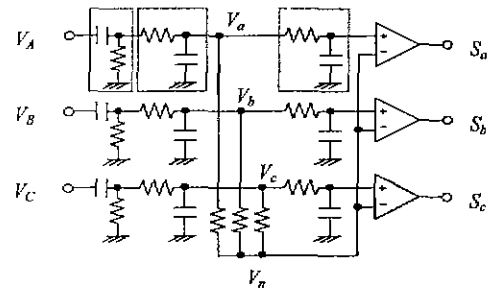
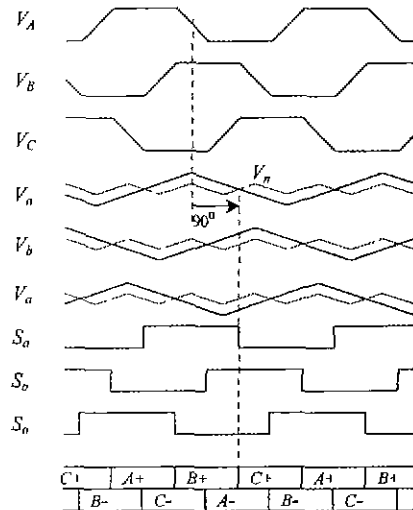


그림 6 모터제어 시스템

전자 위치정보가 필요하다. 그러나 압축기 내부에 취부되는 BLDC 모터의 경우 압축기내의 고온특성에 의해 홀센서(hall sensor)와 같은 위치검출 센서를 사용하기 어렵다. 따라서 모터의 전압 또는 전류로부터 회전자의 위치를 검출하는 회로 및 알고리즘이 필요하다. 매립형 BLDC 모터의 경우 고정자 각 상의 인덕턴스(inductance)와 상 유기전압(back EMF)에는 회전자의 위치정보가 내재되어 있으므로 이들의 정보로부터 회전자 위치검출이 가능하다. 냉장고 등



(a) 위치감지 회로



(b) 파형 및 commutation 신호

그림 7 회전자 위치검출 방법

의 가전제품에서는 일반적으로 제어가 간단하고 낮은 분해능(resolution)의 위치정보로도 모터의 제어가 가능한 구형파(square waveform) 전류 구동방식을 사용함으로써 전압이 인가되지 않는 구간에서의 상 유기전압(back EMF)을 검출하여 회전자 위치정보를 검출한다.⁷⁾ 그림 7은 그 한 예로 각 상의 유기전압을 검출하여 적분한 뒤 모터의 가상 중성점 전압과 비교하여 각 상의 전류(commutation) 신호를 발생한다. 그러나 최근 효율향상 및 소음저감을 위해 상전류를 정현파(sinusoidal waveform)로 제어하기 위한 연구가 진행중이다. 이와 더불어 인버터의 전력변환회로에 수반되는 PWM 스위칭 소음을 줄이기 위해서는 일정주파수 PWM 제어에서 랜덤 PWM제어도 적용되고 있다. 그림 8은 일정주파수 PWM 방식과 랜덤 PWM 방식의 전류 FFT(Fast Fourier Transform) 특성을 나타낸다. 이와 같은 랜덤 PWM을 적용함으로써 냉장고의 소음을 1~2dB(A) 저감할 수 있으며 특히 인간이 느끼는 감성소음을 개선할 수 있다.⁸⁾

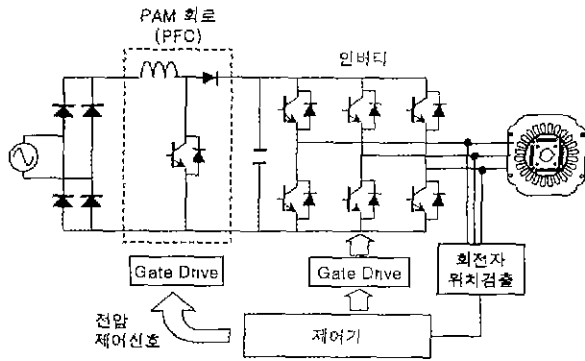


그림 8 PAM(PFC) 제어회로

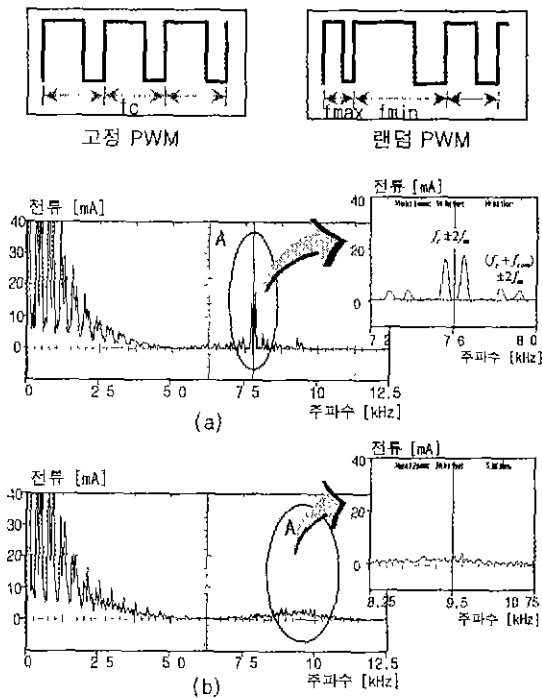


그림 9 고정 PWM, 랜덤 PWM 비교

또한 고조파 규제에 대응하기 위해 역률보상(PFC, Power Factor Correction) 기능을 갖는 PAM(Pulse Amplitude Modulation) 제어. 부하변동에 실시간 대응 운전이 가능한 DSP 등이 적용되면서 인버터의 성능은 한층 더 높아질 것으로 예상된다(그림 8). 그림 9는 PAM 제어를 사용한 인버터 시스템을 나타낸다 이러한 PAM 제어를 사용함으로써 역률(power factor)을 0.99이상으로 향상시킬 수 있으며 DC Link 전압을 더 높게 함으로써 동일모터 사용시에도 더 고속 운전이 가능하게 할 수 있다.

향후 인버터 냉장고는 현재보다 냉동능력이 더 작은 용량의 고효율 압축기 개발 및 600~1200rpm의 낮은 속도로 운전할 수 있는 인버터 압축기를 개발함으로써 기동, 정지를 반복하는 불연속운전이 아닌 연속운전을 통해 효율이 더욱 높아지는 방향으로 발전될 전망이다. 또한 기존 압축기의 모터의 회전운동을 기구적인 직선운동으로 변환시 발생하는 손실을 제거하여 압축기의 효율을 높이기 위해서 직선운동을 하는 리니어(linear) 모터를 적용한 압축기도 적용될 것으로 예상된다.

4. 맺음말

본 고에서는 가정용 냉장고의 냉동사이클 원리, 냉장고를 구성하는 주요부품 및 각 부품들의 기능에 대해 기술하였다. 또한 냉장고의 소비전력 및 소음저감을 위한 인버터 냉장고의 구성부품인 가변속 모터 및 인버터 구동시스템의 주요 기술동향에 대해 기술하였다. 근래 냉장고는 소비전력저감, 인터넷을 통한 냉장고내의 음식물관리, 정보교환 등이 주요 이슈로 등장하고 있지만 냉장고의 기본기능인 신선도유지, 급속냉동/냉장 등에 대해서도 지속적인 연구가 진행될 것으로 전망된다.

참고 문헌

- [1] 黒田 昌寛, "冷蔵庫用 motor, inverter," Motor 技術 Symposium, 日本能率協會, pp. A4-2-1 ~ A4-2-10, 1997
- [2] Koji Hamaoka, "Domestic electric refrigerators," 日本 冷凍空調 學會誌, vol. 74, no. 863, pp 23~28, Sep. 1999
- [3] M. Katsuharu, T. Toshimasa, and M. Masahiko. "latest power electronics technologies in household electrical appliances," Toshiba Review vol. 55, no. 7, pp. 51~54, 2000
- [4] H. Murakami, Y. Honda, and H. Kiriyaama, "The performance comparison of SPMSM, IPMSM, and SynRM in use as air-conditioning compressor," in conf. IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting, pp. 840~845, 1999
- [5] M. Morimoto, "Application specific permanent magnet motors and reluctance motors," in Conf. IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting, pp. 241~246, 1999
- [6] K. Ohyama and M. Kosaka, "High efficiency control for interior permanent magnet

synchronous motor," in Conf IPEC-Tyoko, pp. 614~620, 2000

- [7] J. P. Johnson, M. Ehsani, and Y. Guzelgunler, "Review of sensorless methods for brushless DC," in Conf. IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting, pp. 143~1450, 1999
- [8] K.Y Cho, S.B. Yang, and H.W. Kim, "Improving sound quality of reciprocating compressor using random PWM, in Conf Power Electronics and Variable Speed Drives(PEVD), pp. 431~436, 2000

〈 저 자 소 개 〉



조관열(趙官烈)

1963년 2월 20일 생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1988년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사) 1993년 동 대학원 졸업(공학박) 1993년 ~ 현재 LG 전자(주) 디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원. 당 학회 편집위원.