



친환경 변압기 개발 현황



백병산 수석연구원 (현대중공업(주) 전기전자시스템연구소)

1. 친환경 변압기 개요

변압기 분야에서 친환경 관련 연구개발 분야는 크게 네 가지로 구분된다. 첫째는 식물성 절연유나 대체 절연매질을 사용함으로써 환경 유해물질인 절연유를 대체하기 위한 연구개발 분야이고, 둘째로는 변압기 운전 시 발생되는 소음을 저감시키기 위한 저소음 변압기 연구개발 분야가 있다. 셋째는 풍력발전, 태양광 발전과 같은 신재생에너지 발전시스템에 적합한 변압기를 연구개발하기 위한 분야이며, 마지막으로는 고효율변압기 연구개발 분야가 있다. 변압기가 환경규제 주요 가스인 CO_2 나 SF_6 를 직접 사용 또는 배출하지는 않지만, 전력 전송과정에서 발생하는 변압기의 손실이 간접적으로 CO_2 를 배출하는 것으로 간주하기 때문에 타 전력기기/시스템과는 달리 고효율변압기를 친환경 변압기 범주에 포함시킨다. 본고에서는 이와 같은 네 가지 연구개발 분야에 대한 국내·외 동향에 관하여 기술하고자 한다.

2. 국내·외 개발 현황

2.1 절연유 대체 변압기

일반적인 유입식 변압기에서 절연 및 냉각 매질로 사용되고 있는 광유 (Mineral oil)

가 환경오염물질로 인식되고 있으므로, 이를 대체하기 위하여 식물성 절연유 변압기와 케이블 변압기에 관한 연구가 수행되어 제품화가 이루어지고 있다. 식물성 절연유는 생분해도가 높아 환경 친화적이고, 인화점과 발화점이 높아 화재 위험도가 낮은 것이 특징이며, 현재 미주지역을 중심으로 배전용 변압기 약 15,000대 정도에 적용되었다. 전력용 변압기의 경우에는 최대 230 kV, 200 MVA 변압기에 기존 광유 대신 식물성 절연유를 적용한 사례가 있으나 배전용 변압기에 비해 아직 실적은 미미하다.

식물성 절연물 외에도 광유 대체품으로 전력 용 케이블을 이용한 케이블 변압기도 있다. 이 변압기는 우수한 절연성능을 가진 케이블 외피 절연물이 권선간 절연을 담당하고 주변의 공기가 냉각 역할을 한다. 케이블 변압기는 현재 170 kV, 150 MVA까지 개발되어 생산되고 있다.

(1) 식물성 절연유 변압기

식물성 절연유는 앞서 언급한 장점들이 있는 반면 광유와 비교해서 점도가 높아 냉각성능이 열등하고, 유동점 ($-15\sim-20^{\circ}\text{C}$)이 상대적으로 높아서 극지방과 같이 매우 낮은 온도에서 운전을 시작하는 Cold start 운전 시 과열이 우려되는 단점이 있다. 따라서 식물성 절연유 적용 변압기 제품 설계 시 이와 같은 특징

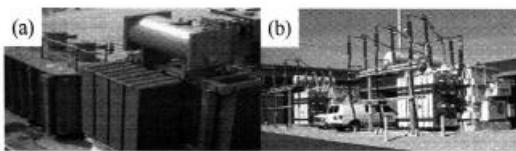


그림 1. 식물성 절연유 변압기 (a) Areva社 제품, (b) Waukesha社 제품.

을 설계에 반영해야 한다.

최근 Areva社에서는 식물성 절연유를 사용하여 132 kV, 90 MVA 전력용 변압기를 제작하였으며, Waukesha社에서는 식물성 절연유를 적용한 230 kV, 200 MVA 전력용 변압기를 제작하였다. ABB社와 Siemens社에서도 이와 유사한 수준의 개발 사례가 있으며 특히, ABB社는 Cooper power systems社와 함께 식물성 절연유 분야의 주요 제조업체이기도 하다.

국내에서는 동남석유공업에서 식물성 절연유를 개발하여 배전용 변압기를 대상으로 시험을 완료하였으며, 현재 전력연구원에서는 전력용 변압기에 대해 식물성 절연유 적용에 관한 연구를 수행하고 있다. 또한, 풍산전기는 2003년 식물성 절연유 변압기의 개발을 마치고, 한전 전력연구원과 함께 2006년 한전 규격을 만족하는 주상변압기 단상 100 kVA와 지상변압기 3상 300 kVA 등 2종류의 제품을 만들어 상용화에 성공하였다.

(2) 케이블 변압기

최근 해외 변압기 제조업체들이 개발한 변압기 중 가장 주목 받고 있는 제품이 ABB社가 개발한 케이블 변압기 (Dryformer)이다. 이 변압기는 기존 전력용 변압기에서 권선부의 주요 절연물로 사용되는 절연지, 고체성형절연물, 절연유 등을 사용하지 않고 전력용 케이블을 적용한 것이 주요 특징이다. ABB社의 케이블 변압기 개발 현황을 살펴보면 1997년에 세계 최초로 개발하였고, 1999년에 140 kV, 20 MVA 케이블 변압기를 개발하였다. 현재 170 kV, 150 MVA까지 개발 성

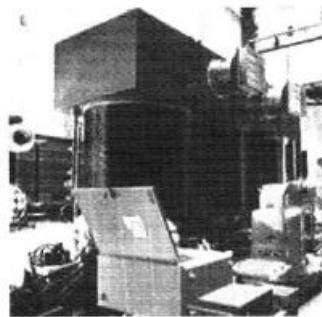


그림 2. ABB社 케이블 변압기.

공하였으며, 세계에서 유일하게 케이블 변압기를 개발하여 판매하고 있다.

국내의 경우 2005년도에 효성에서 22.9 kV, 1 MVA 케이블변압기를 연구용 시제품으로 제작한 사례는 있으나 국내에 개발 및 납품 실적은 전무한 것으로 파악되고 있다.

(3) 송전급 몰드변압기

도심지내에 위치한 변전소에서는 화재 또는 폭발의 위험을 방지하기 위하여 난연성 SF₆ 가스 절연 변압기가 주로 설치되고 있다. 그러나 이 SF₆ 가스 또한 환경 유해물질이므로 새로운 개념의 난연성 변압기 개발이 요구되어 송전급 대용량 몰드변압기 개발에 관한 연구가 착수되었다.

특히, 중국 JMC社에서는 도심지 내의 변전소에 설치할 목적으로 110 kV, 63 MVA 송전급 몰드변압기를 2000년도에 개발하였으며, 2004년에 산동 곤주전력청에서 상업운전을 시작하였다. 송전급 몰드변압기는 기존 SF₆ 가스 절연 변압기에 비해 사이즈가 작고 친환경적이라는 장점이 있으나, 가격은 SF₆ 가스 절연 변압기와 동등한 수준이지만, 기존의 유입식 변압기에 비해 수배로 고가인 단점이 있다. 이 제품의 특징을 표 1에 정리하였다.

본 제품과 관련하여 국내에서는 아직 시장이 불투명하여 개발 필요성이 다소 낮은 것으로 판단된다. 이로 인하여 변압기업체에서는 해외 개발업체 제품에 대한 벤치마킹을



표 1. 송전급 몰드변압기의 특징.

항목	JMC社 몰드변압기
Resin	Pure resin (충진재 사용 안함)
권선 도체	Copper wire (Round edge 채용)
Air duct	HV/LV 권선에 모두 적용 (HV에만 Metal screen)
냉각장치	자동 팬 냉각시스템

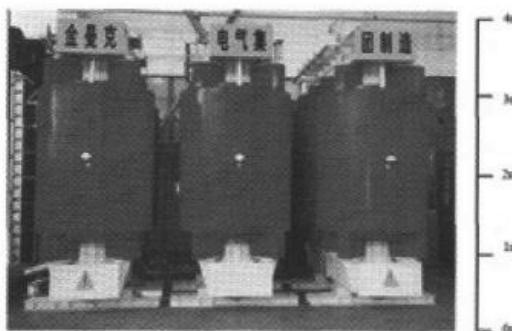


그림 3. JMC社 송전급 몰드변압기.

실시하는 수준이며 구체적인 개발 계획은 없는 것으로 파악되고 있다.

(4) VPI (Vacuum Pressure Impregnated) 변압기

VPI 변압기는 우수한 내열특성을 지닌 아라미드 절연지와 기타 고온 절연물을 주요 절연물로 적용하고 있어 220°C 연속운전이 가능한 것이 주요 특징이며 큰 장점이다. 또한, 이 변압기는 다른 전식 변압기와는 달리 권선이 고체 수지에 의해 몰딩 되어 있지 않으므로 보수가 용이하며 몰드변압기와 비교하여 냉각성능이 우수할 뿐만 아니라, 동일 용량에 비해 사이즈가 작고 가볍다. 이에 반하여, 장기적인 신뢰성이 낮아 시간경과에 따라 부분방전이 발생할 우려가 증가하고, 단락기계력에 취약한 단점이 있다.

VPI 변압기는 그 특성상 초고압화가 어려워 배전용 변압기로만 활용되며, 35 kV급 30 MVA 용량까지 개발되어 있으며, 변압기의 소형화 및 고신뢰성 요구 추세에 따라 선박 내부에 설치하여 운용되는 선박용 변압기로 많

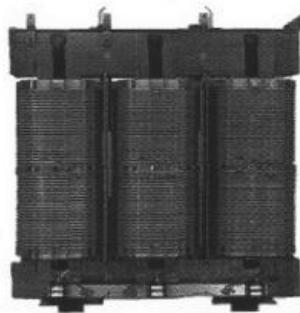


그림 4. ABB社 VPI 변압기.

이 활용되고 있다. 이 외에 광산, 원자력발전소, 정류기와 인버터 설비 등에 전원을 공급하는 용도로 사용되고 있다.

2.2 저소음 변압기/리액터

전력손실을 저감하고 공급 신뢰도의 향상을 위해서 변전소가 도심지에 설치된 경우에는 변압기의 화재와 폭발 위험을 방지하기 위한 난연성 변압기와 함께 저소음 변압기가 주요 관심 사항이다. 일본은 1968년 소음규제법 시행을 계기로 변압기 및 분로리액터의 저소음화를 위한 연구를 시작하였으며, 현재 코아의 재질과 결합 방식을 개선하고, 고효율 차음판과 조립식 철판 방음실을 적용하여 525 kV, 400 MVA 변압기의 소음을 50 dB까지 저감시킬 수 있는 설계/제작 기술을 보유하고 있는 것으로 알려져 있다. 분로리액터 소음의 경우, 변압기 무부하 운전 시 발생되는 소음과 유사한 것으로 알려져 있으나, 변압기에 비해서 수요가 적어 이에 관한 연구 결과는 상대적으로 많지 않은 것으로 파악되고 있다.

(1) 저소음 변압기

일본에서는 1970년대에 도시의 소음방지 조례가 강화되어 변압기 저소음화가 일반화되어 있다. 또한, 변전소의 GIS화가 추진되면서 변전소 부지가 기존의 기중 변전소에 비하여 대폭 축소됨에 따라 보다 강화된 저

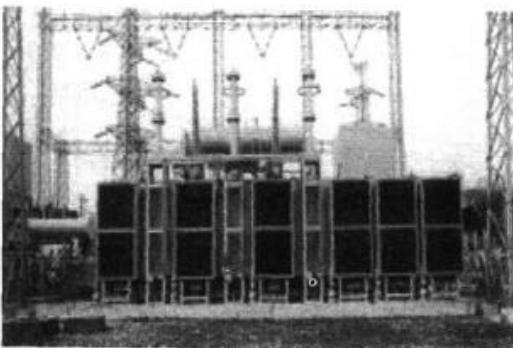


그림 5. 히타치社 300 MVA 저소음 변압기 (1992년).

표 2. 변압기 저소음 설계를 위한 필요기술.

변압기 내부	탱크 외부
· 고배향성 규소강판 자제특성 분석기술	· 탱크의 기계적 보강기술
· 코아 가공/적층/조립 기술	· 진동방지 보강재 설계기술
· 코아 적층구조 배치 기술	· 차음판 및 방음벽 설계/제작기술
· 코아의 공진 방지 기술	· 저소음 송유펌프 및 냉각팬 설계기술
· 권선 작업 시 권선기의 장력조절 기술	
· 권선 절연물의 가공 및 조립기술	

소음을 요구하게 되었다. 1980년대에는 차음판이나 방음실과 같은 방음구조를 적용하여 소음을 저감시키는 데 주력하였으나, 그 이후 자제특성이 우수한 코아 재질이 개발되고 이에 관한 지속적인 연구를 통하여 고배향성 규소강판과 스텝랩(Step-lap) 적층방식 등을 적용하여 소음을 크게 저감시킬 수 있었다. 그 결과, 대용량 전력용 변압기의 소음을 60 dB 이하로 낮출 수 있어 추가적으로 설치된 방음구조는 점차 없어지게 되었다.

그림 5는 방음벽 없이 60 dB의 저소음을 달성한 300 MVA 변압기이며, 표 2에는 변압기 소음 저감을 위한 필요기술을 정리하였다.

국내의 저소음 변압기 개발과 관련된 연구 동향을 살펴보면, 한전 전력연구원과 변압기 업체 3社(현대중공업, 효성, 일진중공업)가 공동으로 저소음 변압기를 개발하기 위하여 "저소음 변압기 개발을 위한 기초 조사연구

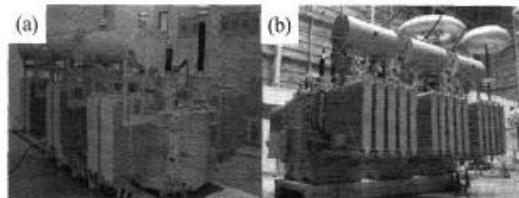


그림 6. 154 kV, 60 MVA 저소음 변압기 (a) 현대중공업 제품, (b) 효성 제품.

(2003.08~2004.07)"를 수행하였으며, 이를 통하여 국내 저소음 변압기 개발 및 연구추진 방향을 수립하였다. 이와 같은 연구결과를 토대로 "환경친화형 저소음 변압기 개발(2005.03~2008.02)" 연구에 착수하였고, 주요 연구결과로 각 제작사에서는 55 dB를 만족시키는 154 kV, 60 MVA 저소음 변압기를 각각 개발하였다. 그림 6에는 현대중공업과 효성에서 개발한 저소음 변압기가 나타나 있다.

(2) 저소음 분로리액터

분로리액터는 계통의 폐란티 효과에 의한 수전단의 전압 상승을 방지하기 위해서 변전소에 설치되는 전력기기로서, 송전계통에서 송전선에 직접 병렬로 설치되거나 변압기의 3차 권선에 연결되어 설치된다. 이 제품은 변압기처럼 전력을 변환/전송 하지는 못하지만 구조와 자제특성이 변압기와 매우 유사하여 일반적으로 변압기 범주에 포함시킨다.

분로리액터의 소음은 코아 패킷과 패킷간 공극을 관통하는 자속에 의하여 발생되는 전자기력이 주원인이다. 분로리액터와 변압기를 비교하였을 때, 분로리액터의 주요 특징은 그림 7과 같이 코아 사이에 공극이 존재하는 것이며, 이로 인하여 소음이 상대적으로 크게 발생한다. 따라서 국외 Siemens社와 ABB社 등 변압기/리액터 제작업체에서는 분로리액터의 소음 저감을 위한 코아 형상 및 배치에 관한 설계기술을 지속적으로 연구하고 있다. 그림 8에서는 Siemens社에서 개발

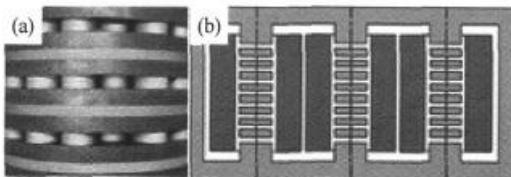


그림 7. 분로리액터 구조 (a) 코아 패킷, (b) 3상 분로리액터 코아 단면도.

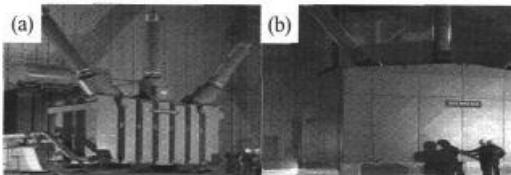


그림 8. Siemens社 345 kV, 150 MVAR 저 소음 분로리액터 (59 dB) (a) Without sound damping hood, (b) With sound damping hood.

한 소음 59 dB 수준의 345 kV, 150 MVAR 분로리액터를 나타내었다.

국내의 경우 저소음 분로리액터의 사양에 따른 소음기준 등이 명확히 제시되지 않아 관련 분야 연구는 미진한 상태이며 제작업체에서는 자체적으로 저소음 분로리액터를 개발하기 위한 기초연구를 수행하고 있는 수준이다. 따라서 해외 선진 경쟁사와의 기술 격차를 좁히고 해외 시장에서 제품 경쟁력을 확보하기 위해서는 저소음 분로리액터 개발에 관한 연구가 적극적이고 체계적으로 진행되어야 할 것으로 사료된다.

2.3 신재생에너지 발전시스템 적용 변압기

이 범주에 속해 있는 변압기는 실제로 신재생에너지를 직접 발전하지는 않지만 친환경 테마의 주요 분야인 신재생에너지 발전 분야에 기여한다는 의미에서 친환경 변압기로 구분된다. 신재생에너지 분야 중 현재 사업화가 활발하고 변압기가 적용되고 있는 분야로는 태양광 발전과 풍력 발전 두 분야이다. 태양광 발전시스템의 경우에는 발전량이 최대 1 MVA급 이하로 상대적으로 작

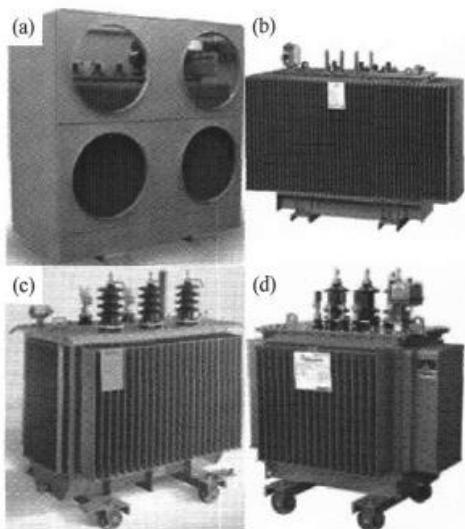


그림 9. 해외 주요 변압기업체의 풍력발전용 유입식 변압기 (a) Pauwels (벨기에), (b) Areva (프랑스), (c) Siemens (독일), (d) France Trafo (프랑스).

아 PCS (Power Conditioning System) 내부에는 저전압 소용량 건식변압기가 주로 사용되며, PCS 출력에는 고조파 함유량이 미미하여 기존에 계통에 설치된 배전급 변압기에 바로 연결하는 경우도 있다. 따라서 주요 변압기업체에서는 태양광 발전시스템 내의 변압기에 대한 관심도는 낮다. 이에 반하여, 풍력 발전시스템에 적용되는 변압기는 용량이 수 MVA 수준으로 상대적으로 크고, 대부분이 수십 m 높이의 너셀 (Nacelle) 내에 설치되기 때문에 Maintenance-free 제품이 요구된다. 이로 인하여, 몰드변압기가 풍력발전용 변압기로서 주를 이루고 있으며, 최근에는 유입식 변압기 제품이 개발되어 판매되고 있다. 초기 단계에서 변압기의 용량은 2~3 MVA 수준이었으나, 현재는 지속적으로 증가하여 5 MVA급 이상 대용량으로 발전하였다. 그림 9는 해외 주요 변압기업체의 풍력발전용 유입식 변압기를 보여 준다.

국내에서는 현대중공업이 34.5 kV, 2.4 MVA의 풍력발전기용 몰드변압기를 개발하

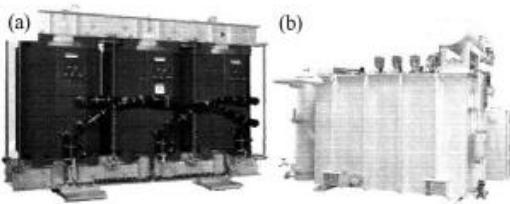


그림 10. 현대중공업의 풍력발전용 변압기 (a) 풍력발전용 몰드변압기, (b) 풍력발전용 유입식 변압기.

여 판매 중이며, 22.9 kV, 6.8 MVA 해상풍력발전용 유입식 변압기 또한, 개발을 완료하였다. 이 두 종류의 변압기는 그림 10에 나타나 있다.

2.4 고효율 변압기

앞서 언급한 바와 같이, 변압기에서 직접적으로 CO₂의 배출은 없으므로, 변압기에 의하여 발생되는 CO₂ 배출량을 고려하기 위해서는 전력 전송과정에서 발생되는 전력손실량을 환산하여 간접적으로 계산하여야 한다. 전체 산업부문에서 발생된 CO₂ 배출량을 기준으로 하여 전력산업이 차지하는 비율, 전력산업 중 송배전 분야가 차지하는 비율, 송배전 분야에서 변전소 내 변압기 손실이 차지하는 비율 등을 고려하여 계산할 수 있다.

참고로, 미국의 경우 변압기의 손실은 변전소 손실 중 77%를 차지하며, 분로리액터의 손실이 약 20% 차지하는 것으로 추산되었다. 그리고 변압기와 분로리액터에서 발생되는 손실을 약 5% 정도 절감시키면, 결과적으로 CO₂ 배출량이 약 125만 ton만큼 저감되는 효과가 발생하는 것으로 보고되어 세계 각국에서는 전력산업분야에서 발생되는 CO₂ 배출량을 저감하기 위하여 고효율변압기 사용을 권장하고 있다. 변압기 제작업체에서는 전력용 변압기 (효율 99% 이상)보다는 상대적으로 효율이 낮은 배전용 변압기 (효율 97~99% 수준)에 대하여 고효율화 (용량과 부하율에 따라 상이하지만 통상 99% 이상)를

추진하고 있으며, 이를 위하여 아몰퍼스 코아를 적용한 변압기와 자구미세화 코아를 적용한 몰드변압기가 개발되어 판매 중이다.

국내에서는 아몰퍼스 코아 변압기 개발과 고효율 에너지 기자재 기준 (지식경제부 고시)에 전력용 변압기 항목이 추가되어 고효율 변압기에 대한 수요가 증가하고 있다. 초기에는 고효율 변압기 인증 기준이 부하율 100%에서의 무부하손실과 효율로 규정되어 아몰퍼스 금속을 코아로 사용해야만 이 기준을 만족할 수 있었으나, 2007년 7월 20~80% 범위의 부하율별로 효율을 규정하는 것으로 인증 기준이 변경되어 아몰퍼스 금속과 더불어 자구미세화 규소강판을 변압기 코아로 사용할 수 있게 되었다. 참고적으로, 최근 지식경제부에서는 부하율 50%를 기준으로 용량별 최저소비효율기준을 만족하는 변압기에 대해서 고효율 변압기로 인증하는 내용의 ‘효율관리기자재 운용규정’을 개정 고시하였다.

(1) 아몰퍼스 코아 변압기

아몰퍼스 금속은 1960년대 Au-Si (금-규소) 합금의 금속을 급랭 응고시켜 비정질 형태로 생성한 것이 시초이며 현재, 아몰퍼스 코아 변압기에는 Fe-B-Si-C (철-붕소-규소-탄소) 합금이 변압기 코아로 이용되고 있다. 아몰퍼스 코아는 무결정의 비정질 구조에 두께가 얇은 것이 특징이며, 비정질 구조로 인하여 히스테리시스 손실을 저감시킬 수 있고 두께가 얇기 때문에 코아의 와전류 손실을 저감시킬 수 있다.

ABB社는 2000년도에 아몰퍼스 금속을 사용한 고효율 아몰퍼스 코아 몰드변압기를 개발하여 고효율변압기 1세대를 열었다. 당시 이 변압기는 저손실 개념의 변압기로 전력 절감 효과가 탁월할 것으로 예상되었으나, 부하율이 높을수록 에너지 절감 효과가 낮아 대다수 현장에서 실제로 사용하는 부하율 (40~50%)에서는 효과가 적고, 투자회수기간

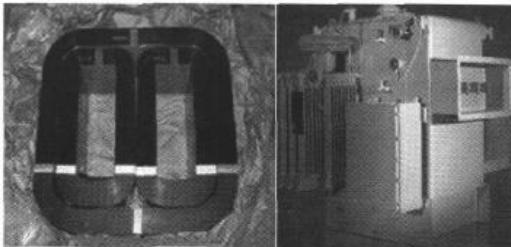


그림 11. 아몰퍼스 코아와 ABB社 아몰퍼스 코아
변압기.

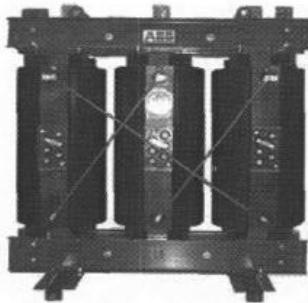


그림 12. ABB社 자구미세화 코아를 적용한 몰드
변압기 (고효율/저소음).

이 길어지는 단점이 발생하였다. 또한 아몰퍼스 코아의 가공 한계성 때문에 용량 1,250 kVA 이상의 변압기에서는 기존의 변압기 대비 철손이 거의 감소하지 않는 문제가 발생하였다. 이와 같은 단점을 보완하여 2004년에 2세대 고효율 몰드변압기를 개발하게 되었다. 이때는 다양한 부하율과 용도, 용량에 적합한 여러 가지 모델로 구분하여 개발되었으며 투자회수 기간도 기존 7년에서 2.5년까지 감소되었고, 소음 또한, 평균 20 dB 만큼 저감된 것으로 알려져 있다.

국내에서는 주로 제룡산업에서 이 제품을 개발하여 판매하고 있으나, 최근 LS산전에서도 아몰퍼스 변압기로 고효율 에너지기자재 인증을 획득했다고 보도된 바가 있다. 제룡산업은 2011년도에 세계 최대 용량 15,000 kVA 아몰퍼스 변압기를 삼성전자에 납품한 실적이 있다.

(2) 자구미세화 코아 변압기

자구미세화 코아 변압기란 변압기의 무부하손실을 저감하기 위하여 자구 (Magnetic domain)를 강제적으로 분할한 규소강판을 사용한 변압기를 의미한다. 규소강판의 자구를 분할하기 위한 방법으로는 레이저를 이용하여 표면을 손상 (Scratch)시키는 방법, 기어드 롤 (Geared roll)에 의한 기계적 방법과 화학적 방법 등이 있다. 그림 12에는 ABB社에서 제작한 자구미세화 코아가 적용된 몰드 변압기를 나타내었으며, 표 3에서는 자구미

표 3. 자구미세화 코아 변압기와 아몰퍼스 코아
변압기 비교.

항목	자구미세화 코아 변압기	아몰퍼스 코아 변압기
철손 (W/kg)	0.41	0.12
코아 경도	170 ~ 190	900
포화자속밀도 (T)	2.03	1.52
코아 가격	상대적 저가	고가
코아 두께 (mm)	0.23	0.025 내외
코아 공급사	다수	일본 히타치 금속 독점
소음	유리	불리
제작 가능 용량	대용량 제작 가능	대용량 기술적 한계
변압기 수리	가능	곤란



그림 13. 현대중공업의 고효율 몰드변압기.

세화 코아 변압기와 아몰퍼스 코아 변압기의 특징을 비교하였다.

국내 몰드변압기 제작업체 (현대중공업, LS산전, 효성, ABB코리아)에서는 이미 3,000 kVA급 이상 고효율 몰드변압기를 개발하여 판매 중에 있으며, 제품 효율과 신뢰



성 향상을 위하여 지속적인 연구개발을 추진하고 있다. 그림 13에는 현대중공업의 고효율 몰드변압기가 나타나 있다.

3. 향후 전망

전 세계적으로 환경 문제는 심각하게 다루어지고 있어 환경 관련 규제가 점차 강화되고 있으며, 변압기 분야에서도 친환경화에 대한 요구는 증대되고 있다. 본고에서 기술한 네 가지 친환경 분야에 대한 향후 전망을 예측하면 다음과 같다.

첫째, 절연유 대체 변압기와 관련해서 절연유를 대체할 수 있는 신소재 개발과 기존 재료에 대한 특성 평가 및 변압기 적용성 연구에 관한 연구가 지속적으로 진행될 것으로 예상된다. 둘째, 저소음 변압기/리액터 분야에서는 변압기 코아 및 지지구조물의 형상 변경을 통한 소음 저감 설계기술과 능동형 소음 저감 장치 개발과 같이 새로운 개념의 소음 저감 기술개발이 필요할 것으로 사료된다. 셋째, 신재생에너지 발전시스템 적용 변압기는 대용량화와 고신뢰성 확보가 관건이 될 것으로 예상되며, 마지막으로 고효율 변압기 개발 분야에서는 저손실 자성재료와 전기적 특성이 우수한 금속재료 개발 등 신소재 개발이 주요 연구 테마가 될 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] 환경청; 환경백서(평성 12년 판), 2000년 6월.
- [2] 미쓰비시전기기보; 전력기기의 에너지절약 및 이용 합리화, 2003년 7월.
- [3] 전기; 지구환경보호·온난화방지에 기여한 톱러너 변압기, 2004년 9월.
- [4] 전설기술; 전력용 변압기의 기술적 변천, 2004년 11월.
- [5] 전설기술; 환경조화형 채종유 변압기의 개발, 2005년 2월.
- [6] 한국전기안전공사; 전력용 변압기 이용 실태 조사, 2007년 1월.
- [7] 한국전력공사; 에너지산업 환경변화와 전력 산업 글로벌화 전략, 2007년 10월.
- [8] 동남석유 최종보고서; 전력형변압기 식물성 절연유 개발, 2007년.
- [9] 월간전기; VPI 변압기 성능 분석, 2008년 5월.
- [10] 월간전기; 고효율 변압기 국내외 동향과 전망, 2008년 5월.
- [11] 한전전력연구원 최종보고서; 환경친화형 저소음 변압기 개발, 2008년.
- [12] 한국철도기술; 국내 철도부문 CO₂ 배출현황 및 저감방안, 2008년 11월.
- [13] ABB; VPI 변압기 카탈로그, 2009년.
- [14] 현대중공업; 몰드변압기 카탈로그, 2009년.

저자(약)력



성명 : 백병산

◆ 학력

- 1987년 부경대학교 공과대학 전기공학과 공학사
- 1991년 부산대학교 대학원 전기공학과 공학석사
- 2005년 송실대학교 대학원 전기공학과 공학박사

◆ 경력

• 1991년 - 현재

현대중공업(주) 전기전자시스템
연구소 수석연구원
(전력기기연구실장)