

모터코일의 절연기술

한세원 · 강동필 · 황돈하 (한국전기연구원)

1 서론

전체 전력에너지의 55~57%를 사용하고 있는 모터의 효율향상은 중대한 국가적 과제이다. 모터의 형상/구조 설계, 철심코아, 다이캐스팅, 절연소재 등의 다양한 기술개발을 통하여 효율증대가 진행되어 지난 30년간 모터효율은 60%에서 90%에 이를 정도로 크게 향상되어 왔지만, 그림 1과 같이 향후 슈퍼프리미엄급 모터를 개발하기 위해서는 보다 혁신적 소재의 도입이 요구된다.

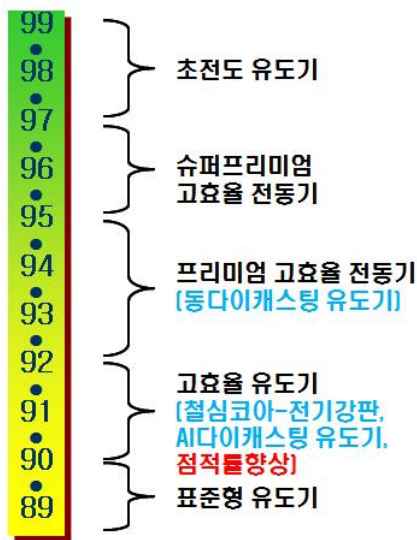


그림 1. 모터의 효율향상과 전망

최근 모터의 사용용도가 다양해져 수송/운송 (EV, Elevator, 고속전철 등), 이송장치(자동화 생산설비) 등 모터 자체를 장착한 상태로 움직이는 경우가 증가하고 있어 모터의 소형 경량화가 중요해지고 있다. 모터의 소형 경량화를 위하여 코일의 고집적화가 필수적이다. 이때 절연소재의 고절연성, 고열전도성(열발산성), 고강도, 절연의 장기신뢰성이 더욱 중요하게 되며, 열확산성 증가로 도체의 운전온도가 낮아지면 도체저항의 감소(금속도체의 저항은 온도가 높아지면 증가)로 효율이 증대되고 절연재료의 수명이 향상되는 효과가 있다. 모터의 정밀제어와 효율개선을 위해 인버터와의 시스템화가 불가피한데 제어과정에 모터가 서지전압에 노출되면서 절연의 신뢰성 확보가 어려워지고 있는 실정이다.

모터코일을 감을 때 집적도를 높이기 위해 높은 장력으로 와인딩하며, 생산성 향상을 위해 고속도 작업이 이루어지는데 코일의 절연피막 손상이 문제되므로 절연소재는 유연하면서 고인성과 윤활성을 가져야 한다. 미세한 금속선(1mm 내외)이지만 코일도체의 각형화시 코일의 집적도 향상 효과가 높아 모터의 소형/고출력을 위해 코일 각형화의 중요성이 부각되고 있다. 모터 제작과정에 와인딩된 스테이터를 고접착성 바인더 수지에 함침한 뒤 건조/경화를 시켜야 하는데 장시간이 소요되므로

대규모 열설비를 구축해야 하고 유증기 환경에서의 운영이 불가피하며 에너지 사용량도 많아 이러한 공정을 개선하기 위한 노력도 이루어지고 있다. 본 고에서는 모터의 효율과 성능을 개선하는데 필요한 코일의 최근 절연기술에 관해 간단히 기술하고자 한다(1).

2. 모터코일의 절연기술 동향

2.1 절연기술과 모터효율

2006년부터 전면 도입되고 있는 모터 최저소비효율기준(MPES) 정책으로 고효율 모터의 보급이 가속화될 전망이다(현재 고효율 모터 보급율은 10% 미만). 최근 선진국의 경우 고성능 하이브리드 절연코팅(hybrid insulation coating) 수지를 적용한 고효율 모터의 개발이 활발하지만, 국내에서는 최근 이에 대한 연구개발이 이루어지고 있다. 인버터 구동형 모터의 경우 점적율을 개선하여 효율 향상과 임펄스에 의한 코로나 방전 사고를 억제할 수 있는 내구형 절연코팅 기술개발이 중요하다. 국내 산업모터의 경우 권선 점적율(space factor)은 약 60% 수준으로 국외 고성능 모터의 권선 점적율인 65% 수준과 차이가 있다. 최근 고성능 나노융합 절연기술이 발전하면서 이를 코일에 적용하는 경우 코일의 점적율을 최고 70% 이상 높여 제작하는 것이 가능하다. 이와 같이 모터의 점적율을 약 20% 정도 향상시키는 경우 동손 50%, 철손 20% 감소로 효율은 최대 2% 정도 개선을 기대할 수 있으며, 점적율 개선으로 인한 컴팩트형 모터 개발이 가능하다.

2.2 유무기하이브리드 절연기술

기존 모터용 권선은 폴리우레탄계(PUE), 폴리에스터계(PE), 폴리에스테이미드계(PEI) 및 폴

리아미드이미드계(PAI) 등을 단층 또는 이중으로 에나멜을 처리하여 용도에 따라 선택할 수 있게 제작되고 있다. 냉동기 또는 에어컨 컴프레셔용의 고온(200℃), 내구형에 적합한 자기 윤활형(self lubricated type) 권선이 국내에서도 개발하고 있으나, 전동기 점적율 향상을 위한 기술적 접근은 아직 미진하고 모터 구동시 발생하는 코로나 침식에 대한 내구성에 적극적으로 대처하는 기술은 매우 중요하다. 최근 모터의 점적율을 향상시킬 수 있는 기능성 수지와 코로나 내구성을 향상시킬 수 있는 무기물 필러(Micro or Nano filler)가 분산된 절연 바니쉬 수지를 하이브리드로 코팅된 코일을 개발하여 고효율 모터에 적용하고 있다.

세라믹 첨가제를 혼합하여 고분자 소재의 열전도율을 향상시키면서 기계적/전기적 특성을 만족시키는 것이 어려운 일이지만 모터에 있어서 운전온도의 저하는 에너지 효율과 수명(신뢰성) 측면에서 중요하기에 최적의 절충점을 찾는 것이 중요하다. 이러한 융복합 소재에서 세라믹의 분산상태는 바니쉬 소재의 코팅 작업성, 열전도율, 절연특성 등에 크게 영향을 주며 수지용액에 안정하고 효과적으로 분산이 가능한 세라믹들은 주로 나노급 콜로이드상 줄이며 표면의 물리적/화학적 개질방법들이 연구되고 있다. 세라믹 소재 중에서 실리카와 알루미늄은 절연특성이 우수하고 저가이며 표면에 처리가 가능한 다양한 반응성 커플링제들이 개발되어 있어 절연 바니쉬용 나노융합 소재개발로 가장 많이 활용된다. 초고속/고압 모터로 발열량이 많아 고온에 노출되고, 인버터 제어 모터는 고주파 서지에 빈번히 노출되어 절연재료의 고온절연성 및 방전내구성의 향상이 요구된다. 코일을 이용하여 모터를 제작할 때 코일이 유연하고 표면이 윤활특성을 가지면 와인딩이 용이하여 점적률이 향상되므로 탑코팅 재료의 표면 물성이 중요하다.

2.3 고점적화 기술

모터 설계 및 제작 시 점적율을 20% 향상시키면 2%의 효율 개선과 10% 정도의 컴팩트화 효과가 발생한다. 점적율을 20% 향상시키는 경우 동손 50%, 철손 20%의 감소가 가능하다(전동기 손실의 약 40%가 동손, 25%가 철손이므로 하이브리드 권선 기술의 도입으로 전동기 고효율화의 기여는 동손 20%와 철손 4%를 절감하므로 약 25% 정도의 기술적 비중을 갖는 것으로 분석). 현재 인버터 구동 모터의 경우 임펄스에 의한 코로나 방지대책으로 과절연 설계를 하는 경우가 많아 기술적, 경제적 소비 신뢰성(nano filler 강화 PEI 코팅을 적용하는 경우 코로나 내구성으로 인해 신뢰지수(코로나 수명시험))을 1.5배 강화시킬 수 있는 것으로 기대하고 있다[2-3].

2.4 각형 모터코일

최근 전기자동차의 상용화가 가속화 되면서 고성능

모터의 개발이 핵심기술로 관심이 높다. 자동차 운전 환경이 열적, 기계적으로 난이도가 높고, 특히 무게와 부피를 줄이는 기술이 무엇보다 중요하다. 2013년 일본 후루가와(주)에서는 전기자동차의 성능과 효율을 대폭 개선하기 위한 방법으로 고점적화를 염두에 둔 각형 나노복합 절연코일을 개발하여 제품에 적용하고 있다. 일본 덴소(주)에서는 그림 2와 같이 하이브리드 전기자동차용으로 나노복합 절연 각형코일을 개발하여 전동기 스테이터의 크기를 대폭 감소시키는 기술을 소개한 바 있다. 여기서 개발된 절연코일은 나노복합 절연소재를 사용하여 점적율을 10% 정도 높이고, 와인딩 방법에 대한 새로운 설계 개념을 도입하여 하이브리드 전동기의 성능과 효율을 크게 개선하였다.

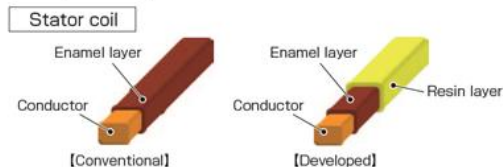
2.5 모터코일의 열절연 등급

모터 절연코일의 선택기준은 우선 열적 성능을 결정하는 등급(thermal class)에서 시작한다. 에

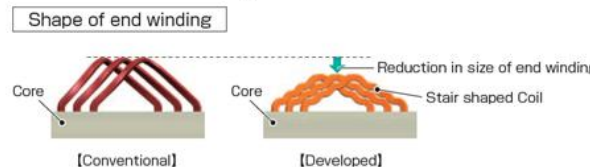
Motor Stator for Small Hybrid Vehicle

Engineering Key Point

Newly developed coil



Coil with stair like shape



Benefit

Downsizing of stator
Width -10%
Height -15%

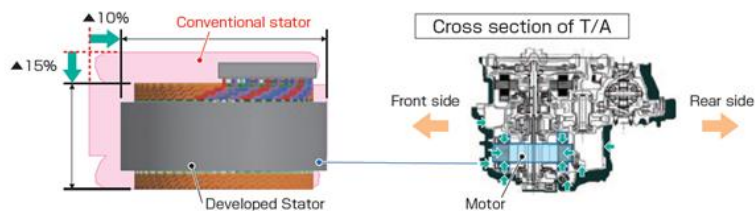


그림 2. 각형 모터코일의 적용

나멜 절연의 경우 표 1과 같이 열적성능을 구분하고 있다. 또한 에나멜 절연은 와인딩 작업 또는 모터 동작 시 기계적 스트레스와 함께 열충격(heat shock)을 받기 때문에 이에 대한 내구성 확인은 NEMA/IEC의 경우 같은 코일 종류에 따라 인위적 신장 후의 절연코팅의 균열 여부로 성능을 판정한다. 일반적으로 열등급에 따른 에나멜 코일용 권장 절연소재는 NEMA/IEC 규격에서 상세히 추천되어 이를 선택하여 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 최근 여러가지 수지의 개발로 복합화와 융합이 이루어진 보다 다양한 절연소재의 개발이 진행중으로 이에 따른 규격의 보완도 이루어지고 있다. 특히 유무기 하이브리드형 절연수지를 사용하는 경우 높은 내열등급을 갖는 모터의 설계 및 제작에 유리하다.

표 1. 모터 절연코일 열절연 등급 (NEMA/IEC)

| 등급 | 온도(°C) |
|--------|----------|
| O | 90 |
| A | 105 |
| E | 120(IEC) |
| B | 130 |
| F | 155 |
| H | 180 |
| 200(K) | 200 |
| 220(M) | 220 |
| C | 240++ |
| 250 | 250(IEC) |

3. 유무기하이브리드 절연기술

3.1 고밀착 프라이머 수지

기본적으로 코일 코팅에 쓰이는 고분자는 열내구성

과 열전도성이 매우 낮기 때문에 절연특성과 열전도성이 우수한 실리카 나노입자를 분산시켜 복합재료로써 자체 물성을 향상시킨다. 이와 같은 복합재료를 사용해서 절연재료의 열전도율을 향상시키면 코일에서 발생하는 열을 효과적으로 발산시켜 도체의 운전온도를 낮추게 되고, 도체저항이 감소하여 효율을 증대시킬 뿐만 아니라 신뢰성 및 수명을 향상시킬 수 있게 된다.

그리고 점적을 개선으로 인한 효율 향상을 꾀하기 위해 각형코일을 사용함으로써 코일 굴곡부의 기계적 접촉력과 굴곡 스트레스에 대한 내구성을 향상시키는 연구가 더욱 필요해졌다. 하지만 수지에 세라믹질의 첨가량이 증가되면 기계적 특성 중 하나인 유연성/인성 등이 크게 저하되고, 코팅제의 구리에 대한 밀착력이 낮아지는 문제점이 생긴다. 한 예로 이를 보완하기 위해 구리도선과 가장 인접한 Primer층이 필요하다. Primer용 바니쉬를 개발하기 위해 첫째, PAI 수지의 화학적 구조에서 Imide 대비 Amide기의 비율을 늘리고, 둘째, PAI 수지 터미널을 수산기 또는 에테르기로 Capping하여 수지의 극성과 유연성을 높여 구리판에 대한 밀착력을 증가시키는 등의 선도적 연구가 이루어지고 있다.

3.2 유무기하이브리드 주절연 수지

최근 모터코일용 주절연 코팅소재는 PAI/Silica를 근간으로 하여 이로부터 PAI 변성 및 Silica 표면개질, Alumina, BN 등의 고열전도성 소재 등을 융합하는 것이다. 따라서 안정된 Silica 나노입자 합성이 가장 기초가 된다. 유무기하이브리드 절연소재 합성은 상용 Silica 제품에서 벗어나 그림 3과 같이 Sol-gel 방법에 의하여 합성한 실리카를 사용하며 전구체인 TEOS(Tetraethyl Orthosilicate)로부터 염기촉매 하에서 가수분해 및 축합반응을 통하여 나

노입자를 형성시키는 기술이다. 그 다음 단계로 커플링제를 사용하여 표면개질을 통해 유연성과 굴곡강도를 향상시킨다.

한편 실리카 입자의 분산성 뿐만 아니라 실리카 입자와 구리도선 및 고분자인 폴리아미드이미드 (PAI) 간의 계면강도를 향상시키기 위해 첫째, 적합한 계면 커플링제를 선정 또는 개발이 중요하나, 이때, PAI 하이브리드의 밀착성을 향상시키기 위해 표면개질 즉, 커플링제의 실리카와의 화학적 결합이 전제가 되어야 하며, 커플링제의 양적 조절, 종류의 변화 등을 통해 어떤 조건이 실리카의 PAI 내의 분산성에 적합한지, 또한 열적, 전기적, 기계적 효율이 향상될 수 있는지를 확인할 수 있어야 한다. 둘째, 계면간 결합력을 높여 계면 불일치에서 생기는 유연성, 밀착성 저하 현상을 줄이기 위해 하이브리드 성을 높여야 하고 PAI 수지의 터미널을 다양한 수산기와 에테르기로 Capping하여 Si-OH, Si-O-Si를 가지는 실리카졸과 수소 결합 또는 극성-극성 상호작용 등을 통한 계면간 결합력을 높이고 기존 7만 Da. 크기의 PAI를 단독으로 사용하던 것에서 2만~10만 Da. 크기의 PAI를 다양한 비율로 섞어서 실리카졸과의 상호작용을 더욱 원활하게 하고 코팅

층의 인성(toughness)을 높일 수 있도록 제조하는 것이 핵심이다.

3.3 고유효율 탑코팅 절연수지

하이브리드 바니쉬가 코일 코팅에 유리하기 위해서는 Top Coating층의 바니쉬가 고유효율/셀프본딩 특성을 가져서 내마모성을 높이고 함침 공정없이 코일을 감아 고정할 수 있어야 한다. PAI는 극성을 가지는 Amide와 Imide기가 반복적으로 있는 구조이다. 이러한 PAI의 유효성을 높이기 위해 첫째, 표면 에너지가 낮은 PDMS를 Graft시키는 방법과, 둘째, PDMS와 PAI를 반복적으로 결합시켜 PDMS-PAI Copolymer를 만드는 방법이 있다. 그리고 고유효율 특성을 가지는 PDMS-PAI에 셀프본딩 특성을 부여하기 위해 PDMS 변성 에폭시를 Blending하여 사용할 수 있다. 그 첫 번째 단계로 PDMS 변성 에폭시를 합성하였고 PDMS가 들어가 탄성을 나타내는 것을 확인하였다. 탄성을 나타내는 에폭시를 이용하는 경우 코일 코팅 후 와인딩에 유리하다.

절연체의 수명은 아레니우스 식(Arrhenius

■ Synthesis of high-purity colloidal silica(SiO₂) by sol-gel method

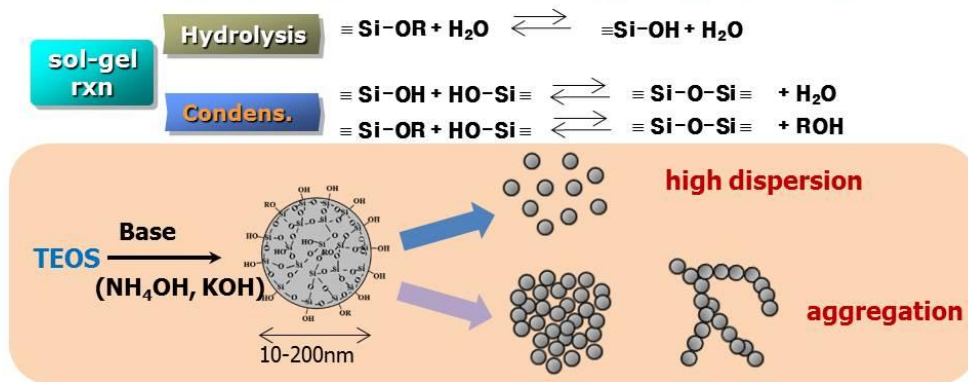


그림 3. 주절연 수지의 유기하이브리드 기술

equation)에 따라 온도가 10°C 높아질 때 수명이 절반으로 감소한다. 따라서 모터의 내부 열전달 및 열유동이 뛰어난 소재를 사용하여 모터의 열을 제어하여 수명과 신뢰성을 높이기 위한 연구가 이루어져 왔다. 방열 재료의 소재 성분을 살펴보면 탄소재료나 세라믹 소재 같은 고열전도성 필러 소재와 고분자 소재가 혼합된 복합 소재가 대부분이다. 고분자는 열내구성과 열전도성이 매우 낮기 때문에 단일재료로는 물성에 한계를 보이고 무기 필러 소재는 열전도성이 우수하나 접착력이 없어 단독으로 사용하기 어렵다. 열전도성 고분자 복합체는 기존 고분자 재료의 장점인 용이한 가공성, 저비용, 경량화, 제품형태의 다양성 등을 유지하면서 금속과 세라믹 재료의 특성을 부여할 수 있다. 또한 세라믹 재료의 우수한 열전도성과 고분자 소재의 접착력을 동시에 부여하여 방열소재를 만들기에 유리하다.

절연특성과 열전도성이 우수한 모터코일을 사용할 경우 모터내부의 코일선에서 발생하는 열을 효과적으로 발산시켜 도체의 운전온도를 낮추게 되어(도체 저항 감소로 효율증대) 절연재료의 신뢰성/수명 향상에 크게 기여할 수 있다. 대부분의 고분자 재료는 0.1~0.3W/mK 수준의 낮은 열전도도 값을 갖고 있으며 높은 결정성을 갖는 고분자는 비결정성 고분자보다 높은 열전도도 값을 보인다. 대부분의 세라믹도 전기 절연체이므로 열전달은 주로 포논(phonon)에 의해 일어나며 단순한 결정구조에서 포논 전이가 용이하고 높은 열전도도 값을 갖는다. 따라서 열전도도 값이 높은 재료를 사용하는 것이 고분자 복합체에 고열전도성을 부여하기에 유리하다. 그러나 복합체 내부에서 생성되는 기공(void)이나 열전도성 재료의 비연속적인 열전달(thermal pathway)로 인하여 고열전도성 재료를 사용하더라도 각 계면에서 발생하는 포논 산란(phonon scattering)으로 인해 열전도도를 향상시키기에는 어려움이 있다. 따라서 고분자 복합체의 열전도도를 향상시키기 위해서는 열전도성

필러와 고분자가 연속적인 네트워크를 형성하도록 만들거나 인접한 필러 입자들 사이에서 열저항 접합의 수를 감소시키기 위해서 크기가 큰 입자가 사용된다. 또한 열전도성 필러 사이의 열 접촉 저항을 줄일 수 있는 형태의 필러를 사용하여 열전도성 필러의 접촉이 용이해지도록 해야 한다. 기공형성을 줄이기 위하여 계면접착력 및 습윤성(wetting)을 향상시킬 수 있는 용융 점도가 낮은 고분자를 사용하거나 표면개질을 통해 무기 필러와 고분자의 계면저항을 줄여 주는 것 또한 고분자 복합체의 열전도도 향상에 더 효과적이다.

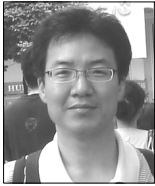
4. 결 론

모터의 효율향상은 중대한 과제이다. 향후 슈퍼프리미엄급 모터를 개발하기 위해서는 보다 혁신적 절연소재의 개발이 필요하다. 코일의 점적율을 높이는 것과 더불어 성능이 개선되기 위해서는 단일 절연수지만 가지고는 한계를 가진다. 따라서 선진기술인 유무기 하이브리드형 절연수지를 개발하여 국내 산업현장에 맞는 고집적이 가능한 고성능의 모터 절연코일의 개발이 필요하다. 최근 전기자동차나 특수 환경에서 높은 효율과 성능이 요구되는 모터를 개발하기 위해서 각형코일이 많이 사용되는데 이때 균일한 절연코팅이 가능한 융복합형 절연코팅 기술도 개발되어야 한다.

참 고 문 헌

- [1] “자동차용 소형모터의 기술동향”, 과학기술부 한국과학기술정보연구원 보고서, 2005.
- [2] “Electric motor thermal management for electric traction drives”, NREN SAE 2014 Symposium, 2014.
- [3] “Fuji electrics top runner motor-loss reduction technology of premium motor”, Fuji Electric Power Review 61(1), 2015.

◇ 저 자 소 개 ◇



한세원(韓世元)

1984년 한양대학교 전기공학과 졸업.
1986년 동대학교 대학원 전기공학과
졸업(석사). 1999년 동대학교 대학원
전기공학과 졸업(박사). 1986년 한국
전기연구원 연구원. 1991년 한국전기연구원 선임연구원.
2004년~현재 한국전기연구원 책임연구원.

Tel : (055)280-1674, Fax : (055)280-1590,

E-mail : swan@keri.re.kr



강동필(姜東弼)

1979년 경상대학교 화학과 졸업. 1982년
부산대학교 대학원 고분자공학과 졸업
(석사). 1989년 부산대학교 대학원
고분자공학과 졸업(박사). 1986년 한국
전기연구원 선임연구원. 1997년~현재 전기연구원 책임
연구원.

Tel : (055)280-1610, Fax : (055)280-1590,

E-mail : dpkang@keri.re.kr



황돈하(黃敦夏)

1991년 영남대학교 전기공학과 졸업.
1993년 영남대학교 대학원 전기공학과
졸업(석사). 2003년 동 대학교 전기공
학과 졸업(박사). 1993년~현재 한국
전기연구원 HVDC 연구본부 전력기기연구센터 책임
연구원.

Tel : (055)280-1544, Fax : (055)280-1690

E-mail : dhhwang@keri.re.kr