

고압회전기 권선용 에폭시 VPI 절연물의 개발과 평가

이창용, 최영찬

(주) 현대중공업 기계전기연구소

Development and Evaluation of Epoxy VPI Insulation for High Voltage Rotating Stator Windings

Chang-Ryong Lee and Yong-Chan Choi

HEMRI, HYUNDAI HEAVY INDUSTRY, Ltd.

Abstract

The use of VPI impregnated mica tape as high voltage insulation for large rotating electric machines requires a careful balance of processes and materials to obtain the desired electrical, mechanical and thermal characteristics. The stator insulation systems such as epoxy bonded high voltage mica tape have been produced for many years. One such system employing an epoxy and anhydride impregnating resin developed by Hyundai Heavy Industries, Co. (hereafter, HHI), to satisfy customer requests for an epoxy bonded insulation system. HHI applies the following electrical and thermal evaluations such as dielectric breakdown, voltage endurance, dissipation factor vs. temperature, isothermal weight loss, and so on. A detailed laboratory evaluation can describe specific physical limitations for an insulation system and permit development of long-term operation guidelines that permit full utilization of the proposed system. HHI has found these evaluations very helpful in qualifying insulation system for the repair of both large motors and generators.

Key Words : VPI, HHI, dielectric breakdown, voltage endurance

1. 서 론

고압 회전기는 기기 용량의 증대와 고전압화의 추세에 병행하여, 고신뢰성, 소형 경량화, 유지 및 보수의 간소화 등이 요구되고 있다. 또한 사용환경이 다양화됨에 따라 더욱 운전환경은 가혹해져 내열성, 내구성 등이 향상된 절연시스템의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

근년 국내의 일부 회전기 제조메이커에서는 고압 회전기가공가압함침(vacuum-pressure impregnation; VPI)용 수지로, polyesterimide수지를 베이스로 하는 절연시스템을 적용하여 왔다. 그러나 선진사의 경우, 1980년대부터 에폭시수지와 마이카 테이프를 구성되는 에폭시 절연시스템으로 대체하여 왔으며, 전기적·기계적 특성이 우수한 것으로 보고되고 있다. 또한 미국, 유럽시장에서는

API (American Petroleum Institute) 541 등과 같은 일부 규격으로 에폭시 절연시스템을 의무화하고 있는 추세이다. 고압회전기의 수명에 큰 영향을 미치는 절연시스템에 있어서, 대부분의 선진사에서는 에폭시계열의 고온함침용 수지를 주로 적용하고 있으나, 공정이 복잡하며 고온에서의 함침을 요하기 때문에 heating loss가 발생하는 문제 등을 내포하고 있다.

그러므로 본 연구에서는 고온함침의 단점을 보완하고 기존의 함침설비 및 공정을 활용할 수 있는 상온함침이 가능하고 성능이 우수한 에폭시절연시스템을 개발하고자 하였다. 연구내용으로는 에폭시수지를 선정하고 설비 및 공정과의 호환성 등을 고려하여 절연시스템을 선정하였으며, 선진사의 절연시스템과의 특성분석과 내구성평가를 실시하

표 1. 수지의 종류와 경화제의 종류에 따른 물성 비교

| | 산무수물 계열 | | 방향족 아민 계열 | |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Bisphenol A | Bisphenol F | Bisphenol A | Bisphenol F |
| 굴곡강도 (kgf/mm ²) | 13.8 | 14.7 | 9.9 | 11.3 |
| 굴곡탄성을 (kgf/mm ²) | 309 | 322 | 222 | 290 |
| 인장강도 (kgf/mm ²) | 4.5 | 4.6 | 4.9 | 5.6 |
| 인장신율 (%) | 1.8 | 1.7 | 3.5 | 10.1 |
| 인장탄성을 (kgf/mm ²) | 262 | 272 | 172 | 228 |
| 압축강도 (kgf/mm ²) | 12.4 | 13.0 | 11.9 | 11.0 |
| 경도 | 104 | 106 | 108 | 101 |
| 충격강도 (kgf/cm) | 0.28 | 0.48 | 0.28 | 0.48 |
| 흡수율 (%) | 0.099 | 0.089 | 0.189 | 0.098 |
| 유리전이온도 (°C) | 146.5 | 135 | 155.4 | 162.2 |

여 적합성 여부를 확인하였다.

2. 에폭시수지 개발

2.1 에폭시수지선정

일반적으로 에폭시수지는 비교적 점도가 높아 고온합침(60°C) 방식을 채택하여야 하기 때문에 설비가 복잡하고, 수지 관리기술이 요구되는 것으로 알려져 있다. 반면 최근 일부 업계에서는 이러한 단점을 개선하여 저점도의 에폭시수지 및 Capsule type 촉매를 개발하여 저온 또는 상온(30~35°C)에서 합침이 가능하고, 회전건조로가 필요 없는 절연 시스템을 적용하고 있음을 고려 할 때, 당사 제품의 세계시장에서 경쟁력 향상을 위하여 개발이 시급하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 주제로 사용되는 에폭시수지 선정을 위해서 bisphenol A와 bisphenol F 계열의 두 종류의 수지를 베이스 수지로 선정하여 합침수지로서의 물성을 비교평가하고자 하였다. 또한, 경화제의 종류에 따른 영향을 살펴보기 위해서 산무수물 계열 경화제 및 방향족 아민 계열 경화제(DDA)를 동일한 양의 경화촉진제와 함께 각각 적당량 혼합하여 경화조건을 달리하면서 시료를 제조하였다. 표 1에 이와 같이 제조한 4가지 시료의 물리적 성질을 측정된 결과를 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이, 동일한 경화제를 사용한 경우 에폭시수지의 종류에 의한 영향을 평가하면, bisphenol F 계열이 bisphenol A 계열보다 우수한

물성을 나타내는 결과를 얻었다. 또한 경화제의 종류에 따른 물성변화를 살펴본 결과, 굴곡강도를 비교하면 산무수물 계열의 경화제를 사용한 시료가 방향족 아민 계열의 경화제를 사용한 시료보다 더 우수한 물성을 나타내는 것으로 보인다.

2.2 특성분석

물성분석결과로부터 산무수물계열의 경화제를 선정하고 VPI용 에폭시수지로서의 process에 적합성을 살펴보고자 표 2와 같은 bisphenol F 계열인 두 종류의 수지를 선정하여 각각 HER-1과 HER-II로 명명하였다. 이들 중 HER-II가 이핵체의 순도가 높은 고순도의 수지로 저점도의 특징을 가지고 있으며, 혼합된 시료의 점도와 gel time 등의 가공성, 장기보관성 등을 비교하였다.

표 2. HER-I 및 HER-II의 base resin의 사양

| | HER-I의 수지 | HER-II의 수지 |
|----------------|-----------|------------|
| 에폭시 당량 (g/eq) | 160~180 | 155~165 |
| 점도 (cps, 25°C) | 2000~5000 | 500~2000 |
| 가수분해성 염소(%) | 0.1 이하 | 0.08 이하 |
| 이핵체순도 (%) | 80 이상 | 98 이상 |

1) 점도

그림 1에 기존 당사의 polyesterimide수지와 표

2의 HER-I, HER-II 및 선진사 수지의 온도에 따른 점도 변화를 나타내었다. 선진사 수지는 그림에서 A company로 나타내었으며, 상온에서 HER-I과 HER-II는 기존의 polyesterimide수지보다 높은 점도를 나타내지만, 온도가 상승하면 모두 유사한 점도를 나타내는 결과를 얻었다. 이 측정결과로부터 HER-I과 HER-II의 적정 함침온도는 30~40℃ 사이로 여겨진다. 그리고 60℃에서 경화반응이 일어나는 Capsule type 촉매를 적용하여 건조과정에서 발생하는 수지 흘러내림 현상을 억제하였다.

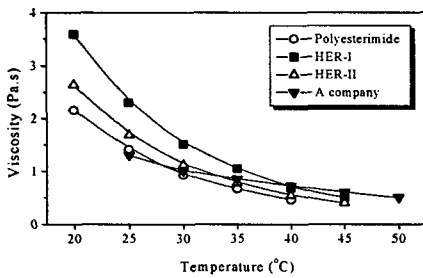


그림 1. Viscosity-온도 특성

2) Gel time

에폭시수지의 경화시간을 나타내는 척도인 gel time은 경화제의 종류에 따라서 변화하는 것으로 알려져 있다. 경화시간은 생산성과 밀접한 관련성을 가지기 때문에 적절하게 선정해야 하지만 본 연구에서는 선진사 수지와 동등한 수준을 목표로 개발을 진행하였다. 그림으로는 나타내지 않았으나 기존의 polyesterimide와 에폭시수지와는 큰 차이를 나타내지만, 에폭시시간 차이는 나타나지 않았다. 이는 HER-I, HER-II 및 선진사 수지는 거의 유사한 경화제를 사용하는 것으로 여겨지므로, gel time도 동일한 결과를 얻어진 것으로 보인다.

또한 HER-II와 선진사의 수지는 시간의 증가에 따라서 거의 변화하지 않는 특성을 가지고 있으나, HER-I은 점도가 증가하는 경향을 얻었다. 따라서 HER-I은 장기보관성에 문제가 있으므로 적용이 곤란하다고 판단하고 HER-II의 수지를 평가대상으로 선정하였다.

3. 절연시스템 선정

3.1 기본구성

최근 소선 및 대지절연테이프로 Muscovite 마이

카에 Aramid fibrid(Nomax powder)를 혼재한 Aramid mixed uncalcined Muscovite 테이프가 개발되어 사용되고 있다. 이들 절연테이프는 Aramid fibrid가 혼재되어 porous하게 되어 수지의 결합력이 증대된다. 따라서 절연시스템의 기계적 강도가 우수해지고, Nomax powder를 사용함에 따른 내전압 성능의 향상으로 이어져 결과적으로 절연두께를 감소시키게 되며, 절연시스템의 전기적 특성 향상에도 기여할 것으로 기대된다. 본 연구에서도 6.6kV, 13.8kV 절연시스템에 이들 Aramid mixed uncalcined Muscovite 테이프를 적용하였다.

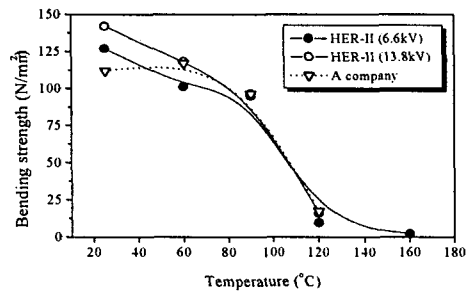


그림 2. 굴곡강도-온도 특성

3.2 특성분석

1) 기계적 특성

HER-II 수지의 굴곡강도를 3-point bending test에서 얻어진 결과로 온도를 증가시키면서 측정된 결과, HER-II를 6.6kV급 절연물과 13.8kV급 절연물로 제작하여 각각의 굴곡강도-온도특성을 선진사 특성과 비교한 결과, 상온에서는 약간의 편차를 나타내지만, 운전온도 근처에서는 거의 유사한 크기를 갖는 것으로 보여, 선진사의 수지와 동일한 물성을 나타내는 결과를 얻었다.

2) 전기적 특성

절연시스템의 전기적 특성을 평가하기 위하여 그림 3에 나타내는 바와 같이 샘플시료(Actual bar coil)을 제작하였다. 기존의 폴리에스테리미드와 6.6kV급, 13.8kV급의 HER-II, 선진사 시스템의 유전손실-온도특성을 비교한 결과(그림 4), 전 영역에서는 폴리에스테리미드보다 에폭시수지가 낮은 유전손실을 나타내며, 선진사의 유전손실과 유사한 크기를 갖는 결과가 얻어졌다.

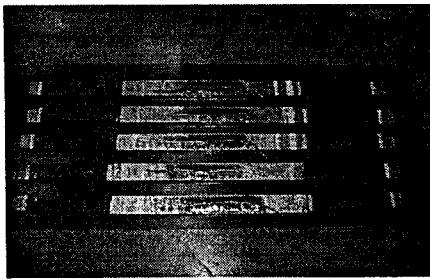


그림 3. 샘플시료 형상

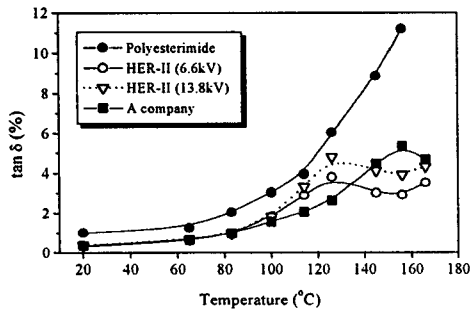


그림 4. tanδ-온도 특성

3) 함침성

절연시스템의 구성에 따른 함침성 검토는 전기적, 기계적 특성과 함께 회전기의 수명을 결정하는 중요한 요소이다. 또한 함침성을 결정하는 요소로는 에폭시수지의 점도와 절연테이프의 구성 및 제조공정 등이 있으며, 이들은 서로 밀접한 관계가 있다. 본 연구에서는 시료(Dog Born)를 제작, 절연시스템 함침성에 대한 검토를 실시하였다. 절연시스템은 정해진 VPI Process후에 테이프 layer별로 육안검사 및 weight를 측정한 결과, 큰 편차없이 함침된 것을 확인할 수 있다.

4. 내구성 평가시험

에폭시 절연시스템의 독자적 개발을 목표로 샘플시료(Actual bar coil과 Motorette)에 대한 검증 시험을 실시하였다. Actual bar coil을 이용하여 현장적용을 위한 전기적, 열적, 기계적응력에 대한 내구성 평가를 실시하였으며, 회전기 고정자를 모의한 Motorette을 활용하여 process에 대한 검증을 실시하였다.

우선 건전한 상태에서의 절연시스템 자체가 갖는 특성을 분석하기 위하여 앞 절에서 설명한 바와 같이 고압회전기를 모의한 Actual bar coil 시료를 제작하여 직류특성, 교류특성, 부분방전특성 등의 전기적 시험을 실시하였다. 인가전압을 정격전압의 1.5배까지 인가하였으나 6.6kV급, 13.8kV급 모두 2%이내의 양호한 유전손실값을 가지고 있는 것을 확인하였다.

그림 5는 6.6kV급 절연시스템의 과전열화 시험 결과를 나타낸다. 과전시험은 운전전압의 3배수, 4배수 전압을 과전한 상태에서 절연파괴가 발생한 시점을 plotting하여 운전전압에서의 수명을 추정하였다. 이 시험결과로부터 KEMA에서 요구하는 3E에서 10시간, 2E에서 1,000시간을 상회하는 것을 알 수 있었으며, 운전전압을 고려할 때 충분한 절연내력을 가진 것으로 확인되었다.

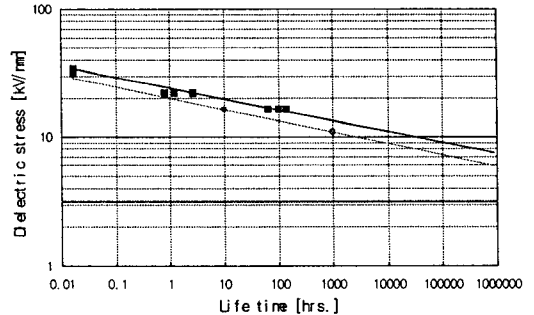


그림 5 Voltage endurance test(V-t) 특성

그림 6은 가열열화 시험결과를 나타내는 것으로, 시험은 180°C에서 1000, 2000, 3000시간동안 가열열화한 후, 각 시점에서 BDV값을 측정하여 초기 절연내력의 40%저하점을 수명점으로 하여 Arrhenius 반응식과 10°C반감의 법칙을 적용하여 가열수명을 추정하였다. 그 결과 가열조건 180°C에서도 6.6kV급, 13.8kV급 절연시스템 모두 수명점이 F중 절연시스템에서 요구하는 내열수명을 만족하는 양호한 결과로 나타났다.

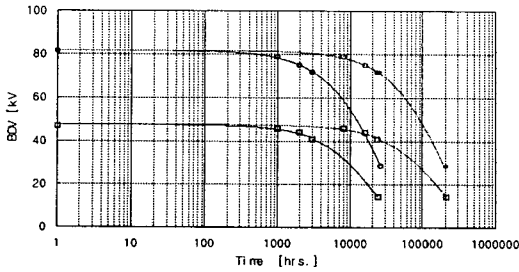


그림 6. Thermal aging test(가열특성)

5. 결 론

본 연구에서 개발한 에폭시 수지의 물성, 전기적 특성이 기존의 폴리에스테리미드 수지에 비해 우수한 결과로 나타났다. Aramid mixed uncalcined Muscovite 테이프를 적용함에 따라 전계강도 향상으로 나타났고, 결과적으로 1차 손실 감소로 효율이 증대되었다. 국제규격(API 541), 원자력 Plant, 세계 주요 고객 요구 조건을 만족하는 에폭시 절연시스템을 보유하게 되었다. 개발한 절연시스템의 유전손실특성이 매우 양호하였으며, 부분방전 측정 결과 부분방전 개시전압이 정격전압 부근에서 나타나는 양호한 결과를 얻었다. 절연시스템 수명평가 결과, 전기적, 열적, 기계적 특성이 고객의 니즈를 만족하는 결과로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] 固体絶縁材料の添加劑・充てん劑効果, 일본전기학회기술보고 제342호, 1990.
- [2] H. Meyer, "Post-impregnated MICALASTIC Insulation for Large Motors and Generators: Recent Experience and Advances", Siemens Review, Vol. XLV, No. 4, 1978.
- [3] M. Takeda, et al., 富士時報, 70(9), pp. 484-488, 1997.
- [4] ANSI/IEEE Std. 434-1973.
- [5] J. A. Leoni, Electrical Rotating Apparatus Testing, 5th Ed., Baker Instrument Company, 1998.