

복합부싱의 최적설계 연구

A Study on Optimized Design of Composite Insulator

*정용수¹, #최성만², 장윤기³, 이동원⁴, 김정배⁵
 *Y. S. Chung¹, #S. M. Choi(zxr001@hyosung.com)², Y. K. Chang³, D. W. Lee⁴, J. B. Kim⁵
¹⁻⁵ ㈜효성 중공업연구소

Key words : Composite Insulator, Flange, FRP Tube, Bonding Force, Bushing, Epoxy

1. 서론

급속한 산업발전과 더불어 세계적으로 전력수요가 급증하고 있으며, 전력산업설비와 그 부속품들의 사용 또한 큰 폭으로 증가하고 있다. 설비에 사용되는 전력기기용 부싱(Bushing)은 그 사용 특성상 절연성과 더불어 우수한 기계적 강도 및 접합 기술이 요구된다. 그러나 국산화의 미비로 많은 양을 일본 및 유럽에서 수입하고 있는 실정이다. 전체적인 부싱 사용량의 대부분을 차지하는 자기부싱(Porcelain Bushing)은 기계적 특성이 약하므로 충격에 의한 크랙이나 파괴 등을 가져올 뿐만 아니라, 정기적인 세척 및 실리콘 코팅에 의한 처리로 추가비용이 지속적으로 소모된다. 이러한 기존 자기부싱의 단점을 보완하기 위해 내오손 성능이 우수하며, 내충격성과 외피의 발수성이 우수한 복합 부싱(Composite Bushing)의 사용량이 최근 증가하고 있다. 본 논문에서는 복합애자의 제작에 있어서 애자를 구성하는 주 요소인 플랜지와 FRP 튜브의 최적설계 연구와 두 요소간 접합력 향상을 위한 가공방법을 제시하였으며, 이것은 복합 애자(Composite Insulator)의 내부기밀유지 및 접합력 향상 측면에서 매우 유용할 것으로 기대된다.

2. 복합애자(Composite Insulator)의 구조

Fig. 1 에 복합 애자(Composite Insulator)의 기본적인 구성을 나타내었다. 전체적인 형상을 유지 하고 강도를 결정하는 FRP 튜브와 다른 구조물과의 결합 및 내부 기밀을 유지하기 위한 알루미늄 플랜지, 외부 절연 및 절연거리 확보를 위한 실리콘 고무(Silicone Rubber)로 구성된다. 본 논문에서는 기계적 강도 및 기밀 유지에 필요한 FRP tube 와 플랜지의 제작 방법 및 두 요소간 접합력을 강화하기 위한 방법에 대해 연구하였다.

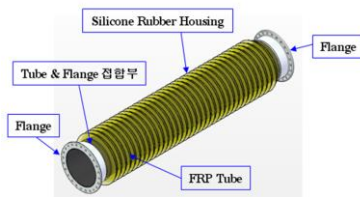


Fig. 1 The Structure of Composite Insulator

2.1 FRP Tube

변전기기 등에 사용되는 복합애자는 내부에서 높은 가스압력을 견뎌야 하기 때문에 내압력이 우수한 필라멘트 와인딩(Filament Winding)으로 제조된 FRP 튜브가 이용된다. 대형 와인딩 작업을 위해 맨드릴(mandrel)이라는 중심축을 제작하고, 그 위에 축방향과 직각방향으로의 힘에 우수한 특성을 나타낼 수 있도록 일정한 각도로 와인딩을 실시하여 제작한다. 평면상의 수직한 두 응력은 한 방향의 힘으로 향하여질 수 있다. F/W 구조에도 이러한 이론을 적용하여 원주방향과 축방향의 두 수직한 힘의 합력이 필라멘트 방향이 되도록 와인딩 각도를 정할 수 있다. 이 두 힘의 합력 방향이 필라

라멘트 방향과 일치하면, 내부압력에 의해 생기는 응력을 필라멘트 인장방향으로 모두 받게 되어 재료의 효율이 최대화 된다. Fig. 2 에 F_h , F_l 및 F 의 관계를 나타내었으며, 내압을 받는 실린더의 와인딩 각도를 결정할 수 있다.

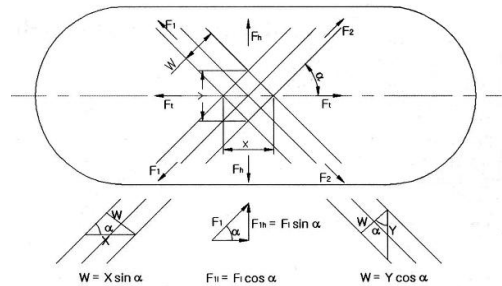


Fig. 2 General Filament Winding Method

$$F_h = 2F \sin \alpha$$

$$S_h = \frac{F_h}{X_t} = \frac{2F}{X_t} \sin \alpha = S_f \sin^2 \alpha$$

$$S_l = \frac{F_l}{Y_t} = \frac{2F}{Y_t} \cos \alpha$$

$$\therefore S_l = S_f \cos^2 \alpha$$

$$\frac{S_h}{S_l} = \frac{S_f \sin^2 \alpha}{S_f \cos^2 \alpha} \tan^2 \alpha = 2$$

$$\tan \alpha = \sqrt{2}$$

$$\alpha = 54.75$$

2.2 알루미늄 플랜지(Flange)

Table 1 에 복합 애자에 사용되는 플랜지의 기능에 대해 간략히 설명하였다.

Table 1 Characteristic of Flange

요소	특성
재질	FRP Tube 와의 접합성과 경량화 측면에서 알루미늄 합금을 주로 이용
기능	- 복합부싱(Composite Bushing)의 기기고정 - 부싱(Bushing) 내부 절연매질(SF ₆ 가스 등)의 실링(sealing) 기능

Fig. 3 은 Al 합금의 Si 함량에 따른 열팽창계수와 비중의 차이점을 나타낸 것으로 Si 함량이 증가함에 따라 열팽창계수가 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서, 미소한 값이지만 Si 함량조절을 통해 열팽창률을 조절할 수 있다. 단, 성분변화에 따른 특성변화가 발생하지 않도록 주의해야 한다. 시험에 사용된 알루미늄은 AC4C-T6 이며, 비중 2.68, 용융점 555~610° C, 열전도도 159W/m·K 를 갖는다. 열전도율이 높은 금속에 일정한 온도가 작용하는 경우를 확인하기 위하여 3D 로 설계한 플랜지 형상에 특정온도가 내부에 작용할 경우 플랜지 내경의 확대를 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 일반적으로 플랜지에 사용되는 AC4C-T6 의 변형량을 살펴보면 Fig. 4 와 같다

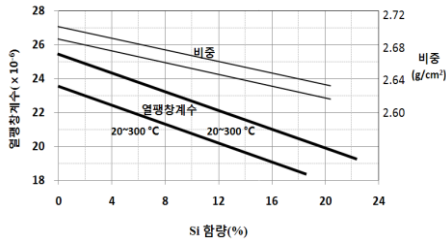


Fig. 3 A coefficient of Thermal expansion and specific gravity for Al-Si

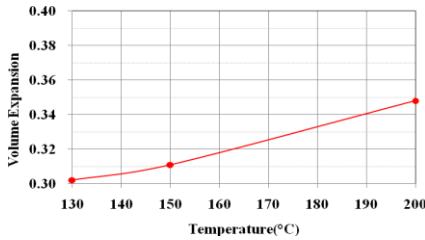


Fig. 4 Volume Expansion of Flange for Temperature

2.3 FRP 튜브 - 플랜지 결합 조건 결정

일반적으로 열수축법(Heat Shrinking Method)이 주로 사용되며, 이는 열에 의해 팽창하는 금속성질을 이용하여 플랜지를 가열 후 FRP 튜브를 결합, 다시 서냉에 따른 플랜지 수축과정에서 두 물질을 결합하는 기술이다.

결합된 FRP 튜브와 플랜지 사이는 에폭시 접착제에 의해 결합력이 유지되게 되는데 단순히 접착제의 성능에만 의존하는 것이 아니라 플랜지의 내부에 일정한 크기의 홈 형상을 가공하여 접착력을 향상시키고 있다.

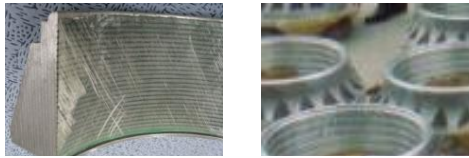


Fig. 5 A shape of groove

3. 최적 형상 결정

Fig. 3에 나타난 형상에 대해 그 크기나 간격에 따른 접합력의 차이를 확인하기 위하여 홈 깊이-홈 간격 0.5 mm-3 mm의 제품을 기준으로 각각 1 mm에서 6 mm까지 홈 깊이와 간격을 늘여가며 해석을 진행하였다.

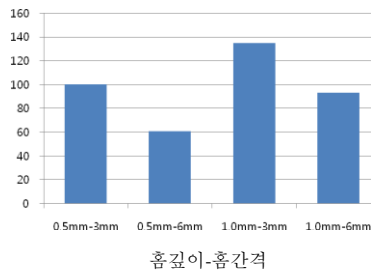


Fig. 6 The rate of bonding force

좌측의 0.5-3mm 제품을 기준으로 홈 깊이-홈 간격에 대한 각각의 해석 데이터를 백분율로 나타내면 Fig. 6과 같다. 홈 간격을 유지하면서 홈 깊이를 1.0 mm로 크게 했을 때 기존의 접합력에 비해 약 30% 이상 향상된 접합력을 나타내는 것을 볼 수 있다. 완제품의 형태로 시험진행을 하기 위해서는 막대한 시간과 금액이 소요되기 때문에 Fig. 7의 시편시험을 통해 내부 홈 형상 및 간격을 우선적으로 검증

하였다. 시험은 미니탭을 이용한 완전요인법을 적용하였으며, 변수로는 홈 간격, 홈 깊이, FRP 튜브의 표면거칠기, 접착제 종류를 선정하였다. 진행된 시험 결과에 따라 플랜지의 최적 홈 형상, 간격 및 접착제를 선정하였다.

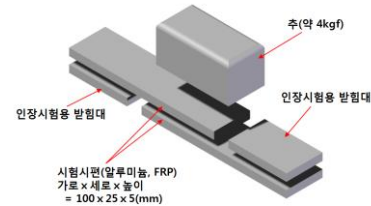


Fig. 7 A method of material test

4. 결론

플랜지의 경우 체적팽창률을 고려하여 가열 후 적합한 결합작업 시점을 결정할 수 있으며, FRP 튜브의 경우는 구조적 측면에서 우수한 와인딩각도를 산출해 낼 수 있었다.

제작된 플랜지, FRP 튜브 두 제품으로는 첫째, 접합력 향상 조건을 선정하여 인장 및 기밀유지에 유리한 형상결정을 시도하였고, Fig. 7과 같은 시편시험을 통해 내부 형상을 결정하였다. 현재 진행중인 완제품 시험을 통해서도 결정된 내부 형상을 통해 FRP 튜브와 플랜지간의 최적 결합내, 외경을 결정할 수 있다.

이외에도 접착제의 종류, 사용온도조건 등에 따라 플랜지, FRP 튜브간의 접착력은 크게 달라질 수 있으며, 차후 이 부분에 대한 추가적인 연구를 계속해서 수행할 필요가 있다.

참고문헌

1. "Composite Insulators-Hollow Insulators for use in outdoor and indoor electrical equipment-Definitions, test methods, acceptance criteria and design recommendation," Technical Report IEC 61462.
2. S.Y. Jin, D.W. Lee, W.P. Song, H.S. Song and H.G. Cho, "Study on 170kV Composite Insulator manufacture technology for Disconnecting Switch," KIEE, 2002.
3. Do Won Seo, Jin Kim and Jae Kyoo Lim, "Shape design of Adhesive Joints for Strength Improvement of Epoxy Adhesive Structures," KSME, A-28, Vol. 6, pp783~790, 2004.
4. K.H. Park, H.G. Cho, D.H. Han, "Mechanical intensity analysis and Specific test of 154kV Hollow Composite Insulator," KIEE, 2002.
5. Taeyang IND. co., Ltd, HYOSUNG Corporation, KERI, "154kV disconnecting switch design and development of manufacture technology," Technical Report, pp. 92~106, 2004.
6. T. Nakayama, Y. Fukami, M. Kirii, Y. Utsumi and M. Soga, "Development of Polymeric Hollow-Core Insulators," NGK Review, No.58, 1999.
7. H.G. Cho, "Study on the design and characteristic of 170kV DS Composite Insulator," KIEE, 2003.
8. "Test Methods for Evaluating Resistance to Tracking and Erosion of Electrical Insulating Materials used under severe ambient Conditions," IEC Pub 60587, 1984
9. "Natural and Artificial Ageing and Pollution Testing of Polymeric Insulators," CIGRE TF33.04.07, CIGRE Brochure, No.142, 1999
10. K. Naito, K. Izumi, K. Takasu, R. Matsuo, "Performance of Composite Insulators under Polluted Conditions," CIGRE Session Paper, No. 33-301, 1996.