

Composite Insulator 구성 부품에 대한 최적 설계 연구

정용수[†] · 최성만* · 장윤기* · 이동원** · 김정배**

Study on Optimum Design for constitution part of Composite Insulator

Young-soo Chung, Sung-man Choi, Yoon-ki Jang, Dong-woen Lee and Jeong-bae Kim

Key Words : Composite Insulator(복합 애자), Bushing(부싱), FRP Tube(FRP 튜브), Flange(플랜지), Bonding Force(접합력)

Abstract

Insulators which are used in the domestic electrical industries are mostly depended on importation from some advance countries. Even though insulators which are made of ceramic material have been mostly used domestically, the ratio of usage on composite insulators is recently being increased because of difficulties in manufacturing and high cost regarding ceramic stuffs. In this research, we are trying to develop the composite insulators which are very efficient in insulation regardless of the matter of weight. Even though the technique of manufacturing composite insulator are quite generalized worldwide at the moment, one of the most important issue is to keep security on the know-how that an ingredient of insulated material named 'SF6 gas' is included. Therefore, The aim of this paper is to improve the bonding force and air tight property between two components of composite insulator, Flange and FRP Tube.

기호설명

- F: 섬유방향하중(kgf)
- α : 와인딩 각도($^{\circ}$)
- X: 축방향 길이(mm)
- Y: 원주방향 길이(mm)
- S: 섬유방향 응력(kgf/mm²)
- S_h : 원주방향 응력(kgf/mm²)
- S_l : 축방향 응력(kgf/mm²)
- W: 밴드 폭(mm)

1. 서 론

산업의 급속한 발전에 따라 세계적으로 전력 수요가 급증하고 있으며, 이에 절연성능이 우수한 제품이 요구되고 있다. 전력산업설비에 사용되는 전력기기용 부싱(Bushing)은 그 사용특성상 우수한 절연 성능이 요구되고 있으나, 국산화의 미비로 많은 양을 일본 및 유럽에서 수입하고 있는 실정이다.

이 중 자기부싱(Porcelain Bushing)은 기계적 특성이 약하므로 충격에 의한 크랙이나 파괴 등을 가져올 뿐만 아니라, 가장 큰 문제점인 오손에 의한 섬락 등을 고려하여야 하기 때문에 누설거리가 한정되어 중오손 지역에서의 사용이 제한되며, 정기적인 세척 및 실리콘 코팅에 의한 처리로 추가비용이 지속적으로 소모된다.

기존 자기부싱의 단점을 보완하기 위해 내오손 성능이 우수하며, 내충격성과 외피의 발수성이 우수한 복합 부싱(Composite Bushing)의 사용량이 최근 증가 하고 있다.

[†] (주)효성 중공업 연구소
E-mail : ryos73@hyosung.com
TEL : (055)268-9097 FAX : (055)268-9098

* (주)효성 중공업 연구소

** (주)효성 중공업 연구소

복합 부싱(Composite Bushing)의 외관을 구성하고 있는 복합 애자(Composite Insulator)는 크게 플랜지(Flange) 금구, 실리콘 고무(Silicone Rubber), FRP 튜브의 3가지로 이루어져 있으며, 사용특성상 내부에 고압의 SF₆ 가스를 포함하기 때문에 기밀 및 강도의 유지가 중요한 제작 기술이며, 이를 위해 각 부분의 긴밀한 접합기술이 필요하다.

본 논문에서는 복합애자의 제작에 있어서 애자를 구성하는 주요소인 플랜지와 FRP 튜브의 최적 설계 연구와 두 요소간 접합력 향상을 위한 가공 방법 등을 제시하였으며, 이것은 복합 애자(Composite Insulator)의 내부기밀유지 및 접합력 향상 측면에서 매우 유용할 것으로 기대된다.

2. Composite Insulator 의 구조

2.1 Composite Insulator 의 구성

Fig. 1 에 복합 애자(Composite Insulator)의 기본적인 구성을 나타내었다. 전체적인 형태를 유지하고 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.



Fig. 1 The Structure of Composite Insulator

2.2 FRP Tube

변전기기 등에 사용되는 복합 애자는 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, 작업 후 이탈 및 사용시 내부 보호를 위해 폴리에스테르 필름을 코팅한다. 그 위에 축방향과 직각방향으로의 힘에 우수한 특성을 나타낼 수 있도록 일정한 각도로 와인딩을 실시하여 제작한다.

Table 1 Characteristic of FRP Tube

요소	특 성
재질	- 대다수의 경우 E-glass 섬유와 에폭시계 수지를 이용
기능	- 내압, 굴곡의 기계적 강도를 분담 - 중심도체 등을 통과하는 공간 보호 - 고전압부와 접지부 사이의 거리 확보
형상	- 대량생산에 적합한 원통형과 내부 절연매질의 충진량을 절감하는 cone 형



Fig. 2 Mandrel & FRP Tube

2.3 알루미늄 플랜지(Flange)

Table 2 에 복합 애자에 사용되는 플랜지의 기능에 대해 간략히 설명하였다. 플랜지의 형상은 일반적으로 'L' 형태의 단면을 갖는 형상에서 애자의 제품 설치위치 및 사용특성상 받게 되는 모멘트를 견디기 위해 리브(Rib)를 설계하여 제작한다.

Table 2 Characteristic of Flange

요소	특 성
재질	- FRP 튜브와의 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

3. FRP 튜브와 플랜지의 제작기술

3.1 플랜지의 제작

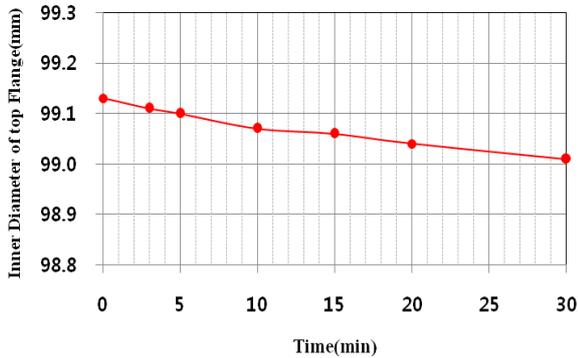
3.1.1 플랜지의 온도 조절

대부분의 물체는 온도의 변화에 따라 내,외부로 수축 또는 팽창하려는 성질을 가진다. 길이가 L 인 물체의 길이 변화율 $\Delta L/L$ 은 온도변화 ΔT 에

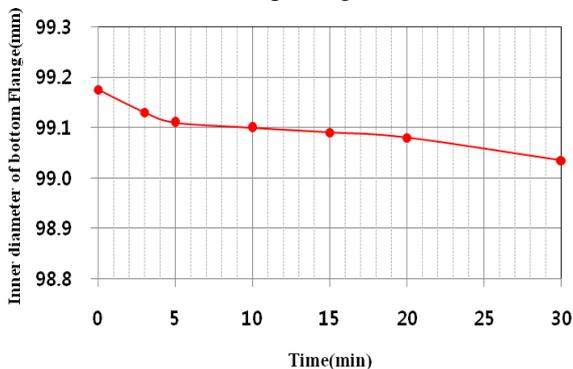
비례하며, 체적 V 도 같은 특성을 가진다.

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \cdot \Delta T, \quad \frac{\Delta V}{V} = \beta \cdot \Delta T$$

위 식에서 비례상수 α 를 선팽창계수, β 는 부피 팽창계수이며, 일반적으로 $\beta=3\alpha$ 의 관계가 성립한다. Fig. 3 은 154kV 급 단로기용으로 개발된 플랜지 상, 하부의 온도변화에 따른 내경 변화를 나타낸 것이다.



(a) Top Flange



(b) Bottom Flange

Fig. 3 Flange Inner-diameter's Changes for temperature

플랜지의 온도를 150°C 까지 가열한 후 상온에서 서서히 냉각시키면서 내경의 변화를 측정하였으며, 전체적인 내경 변화는 0.1 mm 내외로 나타난다. 여기에서 우선적으로는 플랜지와 FRP 튜브를 결합할 때 어느 시점에서 작업을 시작하여 종료할 것인가를 Fig. 4 를 통해 결정할 수 있다. 이렇게 결정된 작업 조건에서 실링(Sealing)과 접착의 목적으로 FRP 에 접착제를 도포하고 플랜지와 접합을 진행하게 된다.

추가적으로 고려할 사항은 실제 제품 사용시에는 외부조건이나 내부발열로 인한 온도증가에 따

른 플랜지의 내경 변화를 충분히 고려하여 플랜지 내경 및 FRP 튜브의 접합부 가공이 이루어져야 할 것이다.

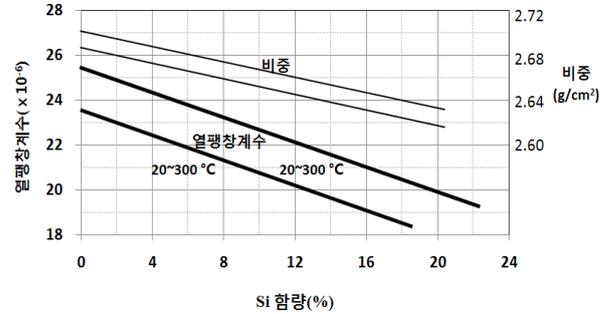


Fig. 4 A coefficient of Thermal expansion and specific gravity for Al-Si

Fig. 4 는 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 특성 변화가 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 변형률을 살펴보면 Fig. 6 와 같다



Fig. 5 The shape of Aluminum Flange

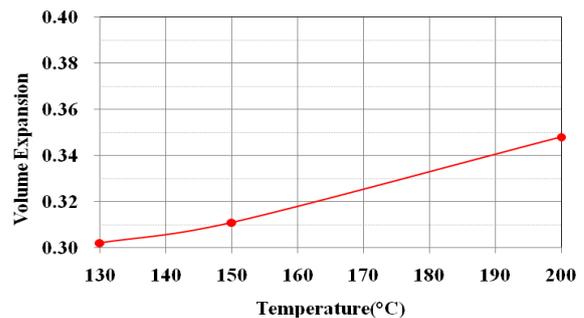


Fig. 6 Volume Expansion of Flange for Temperature

3.1.2 플랜지 가공

플랜지와 FRP 튜브사이에는 접합력 향상과 기밀 유지를 위해 접착제를 도포한다. 일반적으로 평행한 면으로 두 부품을 접합하는 것보다는 Fig. 7 과 같이 홈 형상을 가공한 후 접합했을 때 홈의 형상을 따라 틈니와 같은 형태로 접착제가 굳어지면서 인장 및 굽힘에 더 유리하게 되는 장점이 있다. 그러나, 단순한 홈 형상 이외에도 홈의 크기, 홈 사이의 간격 및 홈의 깊이 등에 따라서 플랜지와 FRP 튜브간의 접합력은 크게 차이가 날 것으로 예상할 수 있다. 따라서 이러한 각각의 요인들을 변화시켜 시험을 통해 인장 및 기밀에 유리한 최적의 형상을 도출할 수 있다.



Fig. 7 Various Bonding Shape

3.2 FRP 튜브 제작법

3.2.1 필라멘트 와인딩(F/W) 기법

FRP 튜브의 제작에는 필라멘트 와인딩기법이 주로 사용되며, 이것은 높은 강성을 나타내기 위해 수지의 함유량을 줄이고 유리(Glass) 함유량을 높이면서 유리섬유(Glass Fiber)를 일방적으로 인발하기 때문에 특히 방향성이 강하다. 따라서 유리섬유의 방향과 직각방향의 강도는 매우 낮다. 이 결함을 보강하기 위하여 유리섬유를 교차하여 성형하는 것이 일반적인 제작 방법이다. 그러나 수지 함량이 낮기 때문에 층간의 접착력이 매우 약화되는데 이것이 필라멘트 와인딩으로 제작한 제품의 최대 결함으로 해결이 시급한 문제이다. 필라멘트 와인딩(F/W)은 많은 종류의 패턴이 있으나 일반적으로 Fig. 8 에서 보는 4 가지 방법이 기본적으로 사용되고 있다.

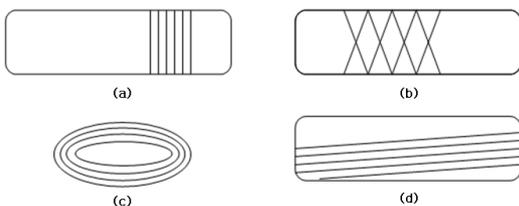


Fig. 8 Various Filament winding method

3.2.2 와인딩 각도 결정

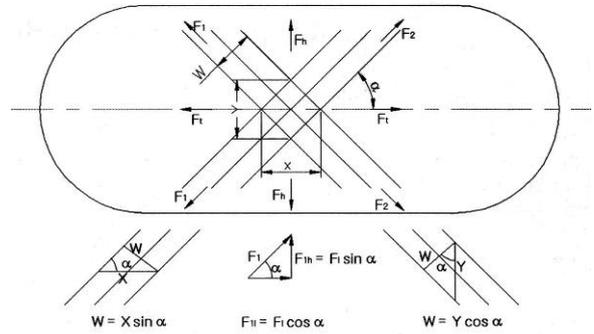


Fig. 9 General Filament winding method

평면상의 수직인 두 응력은 한 방향의 힘으로 향하여질 수 있다. F/W 구조에도 이러한 이론을 적용하여 원주방향과 축방향의 두 수직인 힘의 합력이 필라멘트 방향이 되도록 와인딩 각도를 정할 수 있다. 이 두 힘의 합력 방향이 필라멘트 방향과 일치하면, 내부압력에 의해 생기는 응력을 필라멘트 인장방향으로 모두 받게 되어 재료의 효율이 최대화 된다. Fig. 9 에서와 같이 F_h 와 F_l 이 F 와 관계되며, 내압을 받는 실린더에서는 와인딩 각도를 다음과 같이 결정할 수 있다.

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

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

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

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

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

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

$$\alpha = 54.75$$

3.3 FRP 튜브 - 플랜지 결합 조건 결정

일반적으로 초고압에 사용되는 애자의 경우에 있어서 금구와 FRP 봉의 결합은 기계적인 압착에 의해 이루어진다. 그러나 튜브 형상의 제품인 경우에는 일반적인 기계적 압착시 튜브에 크랙(crack)이 발생하거나 내외부의 실링 문제점 및 강도적인 측면에 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 열수축법(Heat Shrinking Method)이 주로 사용된다. 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. 10 A shape of groove

3.4 최대 인장력을 갖는 홈 형상 선정

Fig. 7에 나타낸 형상에 대해 그 크기나 간격에 따른 접합력의 차이를 확인하기 위하여 Table 3의 내용에 따라 해석을 진행하였다.

기준이 되는 시험 1의 홈 깊이가 0.5 mm, 홈 간격 3 mm는 유럽 A사의 제품을 기준으로 선정하였으며, 각각 1 mm에서 6 mm까지 홈 깊이와 간격을 늘여가며 해석을 진행하였다.

Table 3 Simulation test method

시험순서	홈 깊이	홈 간격
1	0.5 mm	3 mm
2	0.5 mm	6 mm
3	1.0 mm	3 mm
4	1.0 mm	6 mm

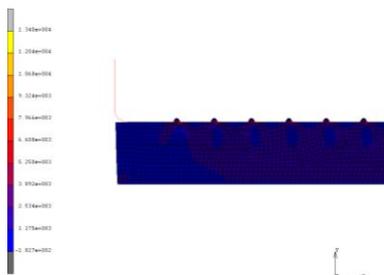


Fig. 11 Simulation for shape of groove

접착제가 굳어진 후에 갖게 되는 물리적 특성값을 적용하여 플랜지에서 접착제가 이탈되는 순간의 힘을 기준으로 하였다. 이 때 Table 3의 시험 1번을 기준으로 하여 각각의 해석 데이터를 백분율

로 나타내면 Fig. 12와 같이 나타낼 수 있다. 홈 간격을 유지하면서 홈 깊이를 1.0 mm로 크게 했을 때 기존의 접합력에 비해 약 30% 이상 향상된 접합력을 나타내는 것을 볼 수 있다. 그러나, 플랜지 내부에 홈 가공시 홈의 크기를 크게 하면 접합력의 향상을 가져올 수는 있으나 반대로 플랜지의 기계적 강도나 구조적인 측면에서는 악영향이 될 수 있으므로, 설계시 충분히 고려되어야 할 사항이다.

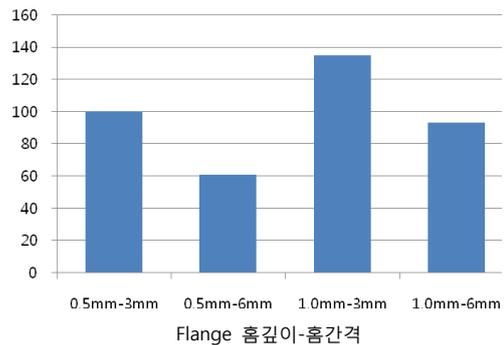


Fig. 12 The rate of bonding force

플랜지 FRP 튜브의 접합력은 이외에도 두 결합물간의 내부결합공차, 접착제의 종류, 접착제의 도포두께 등에 따라 다르게 나타나며, 현재 위의 언급된 접합력에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 변수로 하여 각각의 상호 작용 및 영향에 대한 실험이 진행 중에 있다.

4. 결론

본 논문에서는 복합애자(Composite Insulator)를 구성하는 구성요소들의 제작 방법과 설계기준 및 그 구성품들 간의 결합 및 접착기술에 대해 분석하였으며, 우선적으로 복합 애자의 기계적 특성 및 구조강도를 결정하는 FRP 튜브와 플랜지의 제작에 관하여 고려하였다.

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

또한 제작된 플랜지, FRP 튜브 두 제품간의 접합력 향상 조건을 선정하여 인장 및 기밀유지에 유리한 형상결정을 시도하였다. 그러나 위에서 언급된 조건 이외에도 플랜지의 내경과 FRP 튜브의 외경이 갖는 공차, 접착제의 종류, 사용온도조건 등에 따라 플랜지, FRP 튜브의 접착력은 크게 달

라 질 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, 2002, "Study on 170kV Composite Insulator manufacture technology for Disconnecting Switch," *KIEE*.
- (3) Do Won Seo, Jin Kim and Jae Kyoo Lim, 2004, "Shape design of Adhesive Joints for Strength Improvement of Epoxy Adhesive Structures," *KSME*, A-28, Vol. 6, pp783~790.
- (4) K.H. Park, H.G. Cho, D.H. Han, 2002, "Mechanical intensity analysis and Specific test of 154kV Hollow Composite Insulator," *KIEE*.
- (5) Taeyang IND.co.,Ltd, HYOSUNG Corporation, KERI, 2004, "154kV disconnecting switch design and development of manufacture technology," *Technical Report*, pp. 92~106.
- (6) T. Nakayama, Y. Fukami, M. Kirii, Y. Utsumi and M. Soga, 1999, "Development of Polymeric Hollow-Core Insulators," *NGK Review*, No.58.
- (7) H.G. Cho, 2003, "Study on the design and characteristic of 170kV DS Composite Insulator," *KIEE*.
- (8) 1984, "Test Methods for Evaluating Resistance to Tracking and Erosion of Electrical Insulating Materials used under severe ambient Conditions," *IEC Pub 60587*.
- (9) 1999, "Natural and Artificial Ageing and Pollution Testing of Polymeric Insulators," *CIGRE TF33.04.07, CIGRE Brochure*, No.142.
- (10) K. Naito, K. Izumi, K. Takasu, R. Matsuo, 1996, "Performance of Composite Insulators under Polluted Conditions," *CIGRE Session Paper*, No. 33-301.
- (11) C.H. de Turreil, P.J. Lambeth, 1990, "Aging of Composite Insulators : Simulation by Electrical Test," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3.
- (12) Masami Ueda, Masaki Honda, 1998, "Performance of Contaminated Bushing of UHV Transmission Systems," *IEEE*, Vol. PAS-104, No. 4

- (13) P. Cardano, A. Pignini, R. Berti, M. de Nigris, E. Moal, G. Rocchetti, 2008, "Application of composite housing to high voltage bushing," *GIGRE 2008*, A3-307.