

초고압 전력 케이블 접속 시스템을 위한 접속재의 최적화 해석

이양창*, 류정현**, 한봉수**, 이준성***, 이호정***, 최윤종***

*대림대학 산학협력팀

**일진전기(주)

***경기대학교 기계시스템공학과

e-mail:ycclee@daelim.ac.kr

Optimization Analysis of Connection Part for Electric Power Cable Connection System Using Extra High Voltage Power

Yang-Chang Lee*, Jeong-Hyun Ryu**, Bong-Soo Han**, Joon-Seong Lee***, Ho-Jeong Lee***, Yoon-Jong Choi***

*Dept of Industry Academic Cooperation, DaeLim College

**ILJIN ELECTRIC Co., Ltd.,

***Dept of Mechanical System Engineering, Kyonggi University

요 약

본 논문은 초고압 전력케이블의 접속재 개발을 위한 연구결과로써, 접속시스템의 핵심기술인 고절연 고무슬리브 및 현장에서 접속 작업의 용이성을 위한 Carrier Pipe의 구조해석과 전기적 절연설계에 의한 주요부의 전기적 특성과 전계의 집중을 완화하기 위해 Simulation Tool을 이용한 수치해석 등을 실시하여 최적화된 제품을 제작하였다. 절연설계 및 전계완화 해석에서는 고절연 고무슬리브 구조에서 전계가 집중될 수 있는 중요 포인트를 백터로 선정하였고 이를 기초로 전계해석을 진행하여 선정된 포인트들에서 전계가 집중됨을 검증하였다. 접속재의 수축거동 해석에 의하면, Carrier Pipe의 구조적 안전성을 확보하기 위하여 고절연 고무슬리브로부터의 압력을 구하여 계산한 결과 최소한 9mm이상의 Carrier Pipe 두께가 필요한 것으로 파악 되었다. 이것은 충분한 강도뿐만 아니라 Carrier Pipe의 변형 발생으로 인한 현장에서의 설치문제까지 고려하게 된 값이다. 고절연 고무슬리브 제품설계 에서는 고절연 고무슬리브의 특성조건을 설정하였고 고절연 고무슬리브 제품 및 Carrier Pipe의 Interface 설계 기준을 파악하기 위하여 기존의 고절연 고무슬리브를 활용하여 Carrier Pipe와의 장착 Test를 진행하였다. 그 결과, 확장비율 110%로 적용하였을 경우는 30시간 후에는 완전 붕괴가 되었고, 붕괴가 시작 되는 지점이 고절연 고무슬리브의 중앙매립전극 경계면으로써, Simulation Tool을 활용한 접속재 수축 거동 해석 결과와도 일치함을 검증 할 수 있었다.

1. 서론

송전용량이 크며, 설비가 간단하고, 유지보수가 용이하여 현재 세계적으로 초고압 전력케이블은 XLPE 케이블이 주종을 이루고 있다. 그러나 1994년부터 2003년까지의 케이블 전력 시스템의 고장분석 자료에 의하면 시공불량이 14.6%로 2000년 이후 증가추세에 있다. 특히 전력시스템의 초고압, 대용량화에 따라 시공기술

의 중요성이 강조되고 있다.

초고압 XLPE 전력케이블과 더불어 초고압 지중선로 건설의 핵심인 전력 케이블 접속재는 현재 3세대인 Pre-molded Joint Type이 세계 표준으로 자리 잡고 있다. 1세대는 Tape molding Joint 또는 Taped Joint로써 154kV급까지 사용되고 있으며, 2세대는 Prefabricated Joint 로써 400kV급까지 사용 중에 있다. 3세대인 Pre

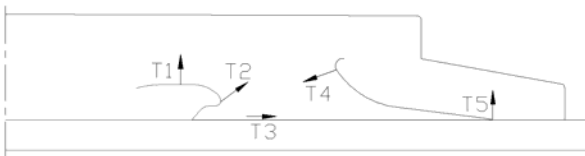
-molded Joint 역시 400kV급까지 사용 중에 있으나 고 절연성능에 따른 전기적 안정성과 일체형 접속재로서 시공의 편의성 등에 의하여 현재는 전 세계적으로 초 고압 접속재의 Pre-molded Joint Type 적용이 대부분 을 차지하고 있다.

3세대 Prefabricated Joint는 구조가 복잡하고 많은 부품을 필요로 하여 제품의 무게가 상대적으로 무겁고 접속함의 크기가 커서 작업공간을 많이 필요로 한다. 그러나 Pre-molded Joint는 고무슬리브 부분이 일체형으로써 구조가 간편하고 시공이 용이하다[1]. 이와 같이 고 절연성능, 제품자체의 높은 신뢰성, 전기적 안정성, 시공의 편의성 등 기술, 경제적 장점에 의하여 Pre-molded Joint의 세계시장 점유율은 절대적 우위를 차지하고 있으며 전 세계적으로 더욱더 Pre-molded Joint에 대한 기술개발에 박차를 가하고 있다.

이러한 개발경쟁의 시장에 대응하고 나아가 수출경쟁력 확보를 통한 무역수지 개선을 위하여 Pre-molded Joint 기술개발은 필수적이다. 따라서 고품질의 전력케이블 접속재 개발을 위하여 Pre-molded Joint의 기술개발이 절실히 필요로 되어 지고 있으므로, 고절연 고무슬리브의 전기적 절연해석과 작업의 용이성을 위해 내부에 삽입되어 있는 Carrier Pipe[2,3]에 대하여 연구 개발 하고자 한다.

2. 절연설계 및 전계완화 해석

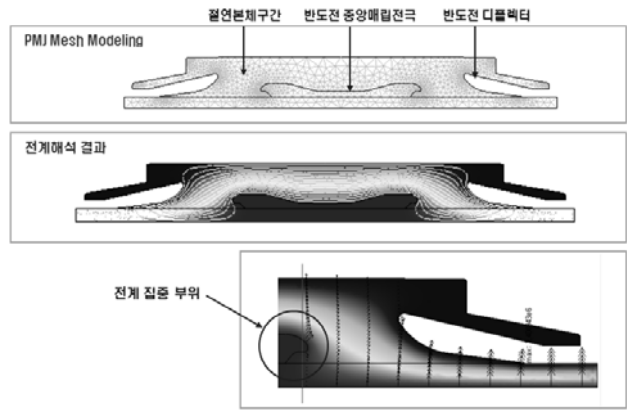
전기적 절연설계는 주요부의 전기적 특성과 전계의 집중현상을 막기 위하여, Simulation Tool을 이용한 수치해석을 실시하였다. Pre-molded Joint의 가장 중요한 사항은 케이블 절연층과 고무슬리브간의 계면압력 특성으로, 고무의 성질을 고려하여 사용 중 접속함의 계면압력을 특정압력 이상으로 유지하는 것이 설계의 중요 포인트 이다.



[Fig. 1] Electric Field Interpretation Plan Important Point

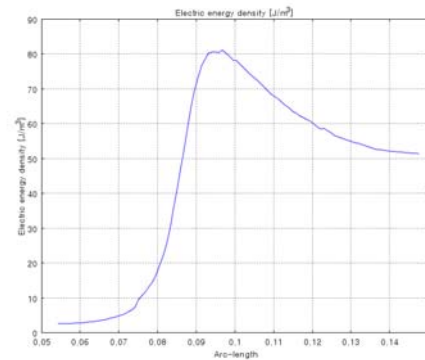
Fig. 1에서 고절연 고무슬리브에서의 전계가 집중될 수 있는 중요 포인트를 벡터로 선정하였다. Fig. 1을 모델로 한 Mesh 분할 및 전계해석 결과는 다음의 그림 Fig. 2와 같다. 그림에서도 알 수 있듯이 최대의 전계가 집중되는 곳은 중요 설계 포인트로 선

정된 곳 중에서도 T2 부분임을 확인 하였다.

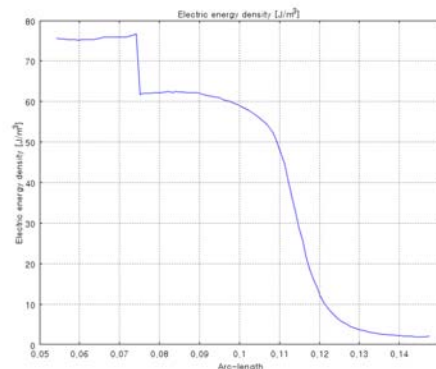


[Fig. 2] Mesh Modeling and Electric Field Interpretation Result

다음의 Fig. 3과 Fig. 4는 각각 전계가 가장 많이 집중될 수 있는 T2와 T4 부분의 원주방향의 단면 전압분포도를 나타내고 있다.



[Fig. 3] Circumferential Direction Voltage Distribution Chart of T2 Parts



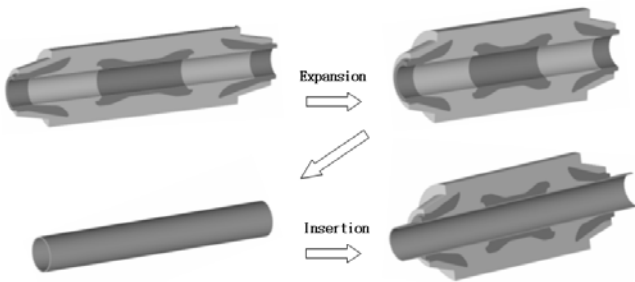
[Fig. 4] Circumferential Direction Voltage Distribution Chart of T4 Parts

위의 Fig. 3을 보면, 원주방향 단면중심에서 T2 부분에 가까워 질수록 전계가 집중되는 것을 알 수 있으며 그 구간을 벗어나 외각의 접지부분으로 벗어나면 전계의 집중이 완화됨을 알 수 있다. Fig. 4에서는 단면중심에서 T4부분까지는 전계가 비슷한 강도로 집중되어 있으나 T4를 벗어나면서부터는 큰 기

울기로 전계집중현상이 없어지고 있다.

3. Carrier Pipe와 실리콘 블록 해석 개요

Fig. 5는 실리콘 블록과 Carrier Pipe의 결합을 보여준다. 실리콘 블록을 Carrier Pipe의 외경만큼 확대하여 삽입한 모습이다. 실리콘 블록은 고탄성 재료로 되어있고 두 가지 종류의 실리콘이 접합되어 있다. Carrier Pipe의 구조 최적화 설계를 위하여 Carrier Pipe가 실리콘 블록 내부에 삽입되었을 때 실리콘 블록의 내부 압력 값을 먼저 해석하고 그 값을 Carrier Pipe의 외부 하중값으로 적용하여 안정된 Carrier Pipe를 설계하였다.



[Fig. 5] Insertion of the carrier pipe into the silicon block

4. 실리콘 블록의 내압 해석

고절연 고무슬리브의 유한요소 해석을 위해 Fig 6와 같이 1/4로 모델링하였고, 경계조건은 우측면과 전면부를 대칭조건으로 구속하였다. 그리고 하중조건은 Fig 7에서 직경 (a)를 직경 (b)만큼의 변위값을 적용, 강제변위 조건을 이용하였다. 따라서 PMJ의 내부직경을 확대하였을 때 작용하는 압력을 구하고 Carrier Pipe의 외경면에 최대 압력값(P_{carrier pipe})으로 적용하여 Carrier Pipe의 구조해석을 수행하였다.

[Table 1] Material Properties of the silicon block

Names of material	Young's Modulus	Pisson's ratio
중앙전극	6.2MPa	0.5
절연본체	4.0MPa	0.5

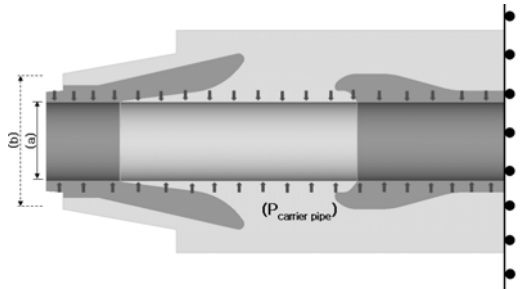
[Table 2] Loading conditions(displacement)

CASE	Inside diameter	Expansion diameter	Displacement of diameter
CASE(I)	Ø70mm	Ø148mm	39.0mm
CASE(II)	Ø70mm	Ø149mm	39.5mm

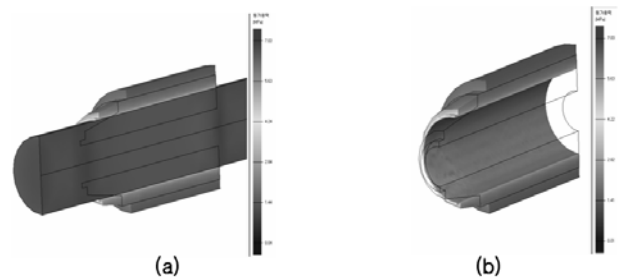
각각의 해석조건과 재료 물성치는 Table 1과 Table 2에 정리하였다.

4.1. 실리콘 블록의 내압 해석 결과

실리콘 블록의 내압 해석결과는 Table 3에 나타나 있고 해석은 절연과 반도체의 물성치를 적용하여 각각 해석을 하였다. 이는 해석의 신뢰성을 높이고 복합해석을 위한 기초 자료를 얻기 위함이고, 해석 결과에서 각각의 내부압력을 얻어 각각에 값을 Carrier Pipe 외부 하중값으로 하였다.



[Fig. 6] Boundary conditions for the structural analysis



[Fig. 7] Shrink fit analysis for the inside diameter expansion

[Table 3] Results of shrink fit analysis(equal materials)

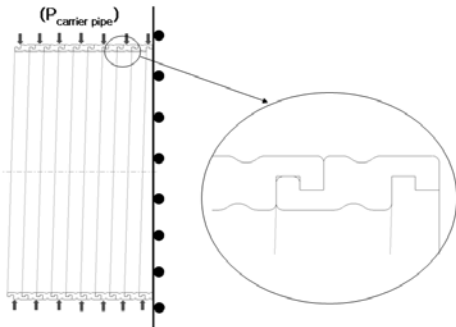
Result component	반도체 Ø148mm	절연 Ø148mm	반도체 Ø149mm	절연 Ø149mm
Max. eqvi-stress	7.031 MPa	3.951 MPa	6.954 MPa	4.012 MPa
Max. displacement	61.41 mm	61.41 mm	62.2 mm	62.19 mm
Max. principal stress	6.927 MPa	3.29 MPa	5.79 MPa	3.34 MPa
Max. equvi-strain	2.001	1.949	1.979	1.979
Max. contact stress	3.478 MPa	3.369 MPa	3.4361 MPa	2.053 MPa

5. Carrier Pipe 구조 해석

Carrier Pipe는 고절연 고무슬리브의 내경을 확대한 후 장기간 보관하면서 고무슬리브의 상태를 그대로 유지하여야 하고 현장작업에 있어서는 고무슬리브가 초고압 케이블 이음부분을 완벽하게 체결할 수 있도록 하여야 한다. 따라서 고무슬리브의 내경 확대시 작용하는 내부 최대압력을 Carrier Pipe의 외면에 적용하였을 때 파이프의 구조적 강도는 기준에 충족

되어야 한다.

Carrier Pipe의 구조해석을 위해 Fig. 8와 같은 경계조건과 Table 4와 같은 기계적 성질을 이용하였다. 그리고 Carrier Pipe의 구조해석을 위한 최대하중은 2.5MPa, 2.8MPa과 2.8MPa, 3.1MPa로 하였다. 고절연 고무슬리브를 적용하고자하는 케이블의 경우 외경이 Ø135mm이기 때문에 Carrier Pipe의 직경 방향의 변형량이 Ø135mm이하가 되어서는 안된다.



[Fig. 8] Boundary conditions and contact conditions of the carrier pipe

[Table 4] Material properties of the carrier pipe

Material name	Young's Modulus(E)	Poisson's Ratio(ν)	Yield Strength	Specific Gravity
PP	1425.831MPa	0.45	41.0MPa	0.9

Carrier Pipe의 구조해석 결과는 작용하는 외부압력에 의한 변형량과 허용응력 값을 계산하여 Carrier Pipe의 단면형상을 수정하며 반복적 계산을 수행하였다. 외부하중은 2.5MPa, 2.8MPa로 초기 모델은 직경 140mm에 두께 4mm의 경우 허용응력 기준치 이상, 즉 60%가량 증가하였고, 또한 변위가 직경으로 134.2mm으로 축소되어 케이블직경 135.0mm 보다 작아져 실제적으로 사용할 수 없음을 알 수 있었다.

따라서 직경 142mm에 두께 9mm로 개선하여 고절연 고무슬리브의 압력을 다시 계산한 후 그 값을 적용하였다. 외부압력은 2.8MPa, 3.1MPa로 적용하여 계산한 결과 등가응력은 허용응력 기준치의 96% 가량이며 안전율을 1로 하였을 때 구조적으로는 안전하다는 결론을 얻게 되었다. 그리고 직경변화는 Ø 136.40mm이므로 케이블직경 Ø135.0mm보다 크기 때문에 사용 가능한 조건임을 확인 하였다.

6. 결론

초고압 지중선로 건설의 핵심기술인 전력 케이블 접속재 Pre-molded Joint의 안정적인 구조와 현장작업 용이성을 위하여 실리콘 블록의 확장 파이프인 Carrier

Pipe의 안정적인 구조 설계를 위하여 실리콘 블록의 절연설계 및 전계완화 해석과 접속재의 수축거동 해석 결과를 바탕으로 고절연 고무슬리브 및 Carrier Pipe의 제품설계를 실시하였으며, 각 Component 단독으로써의 Prototype Sample을 제작하였다. 또한 각각 Sample의 Interface Test를 통하여 구조를 선정하고 선정된 구조에 대하여 반복적인 Interface Test를 통하여 설계가 확정되어야함을 알 수 있었다.

절연설계 및 전계완화 해석에서는 고절연 고무슬리브 구조에서 전계가 집중될 수 있는 중요 포인트를 벡터로 선정하였고 이를 기초로 전계해석을 진행하여 선정된 포인트들에서 전계가 집중됨을 검증하였다. 그리고 해석결과를 고절연 고무슬리브 제품설계에 반영하였다.

접속재의 수축거동 해석에 의하면, Carrier Pipe의 구조적 안전성을 확보하기 위하여 고절연 고무슬리브로부터의 압력을 구하여 계산한 결과 최소한 9mm 이상의 Carrier Pipe 두께가 필요한 것으로 파악 되었다. 이것은 충분한 강도뿐만 아니라 Carrier Pipe의 변형 발생으로 인한 현장에서의 설치문제까지 고려하게 된 값이다.

고절연 고무슬리브 제품설계 에서는 고무슬리브의 특성조건을 설정하였고 고무슬리브 및 Carrier Pipe의 Interface 설계 기준을 파악하기 위하여 기존의 Pre-molded Joint를 활용하여 Carrier Pipe와의 장착 Test를 진행하였다. 그 결과, 확장비율 108%로 적용하였을 경우는 30시간 후에는 완전 붕괴가 되었고, 붕괴가 시작되는 지점이 고절연 고무슬리브의 중앙 매립전극과 경계면으로써, Simulation Tool을 활용한 접속재 수축거동 해석 결과와도 일치함을 검증 할 수 있었다.

참고문헌

- [1] H. Kurihara et al., "Development of cold shrinkable joint for 66-kV CV cables," Electrical Review, No. 416, 2000. (in Japanese)
- [2] H. Kurihara et al., "Cold Shrinkable Joint for 66-kV and 110kV XLPE Cables Applied to Practical Transmission Lines," Electrical Review, No. 20, pp. 47-52, 2001.
- [3] Nakamura S, Kuwaki A, Hayashi K, "Development of cold shrinkable joints for 110-230kV XLPE cable," Electrical Review, pp. 186-190, 2002.