

CSJ 개발을 위한 캐리어 파이프의 변형해석

이양창¹, 이준성^{2*}, 이호정², 류정현³
¹대림대학 산학협력팀, ²경기대학교 기계시스템공학과, ³일진전기(주)

Deformation Analysis of Carrier Pipe for Cold Shrinkable Joint

Yang-Chang Lee¹, Joon-Seong Lee^{2*}, Ho-Jeong Lee² and Jeong-Hyun Ryu³,

¹Dept of Industry Academic Cooperation, DaeLim College

²Dept of Mechanical System Engineering, Kyonggi University

³ILJIN ELECTRIC Co., Ltd.,

요 약 본 논문은 초고압 전력케이블의 접속재 개발을 위한 연구결과로써, 접속시스템의 핵심기술인 고절연 고무슬리브의 현장 접속 작업의 용이성을 위한 Carrier Pipe의 구조해석과 주요부의 전기적 특성과 전계의 집중을 완화하기 위한 수치해석 등을 실시하여 구조적 안정성을 평가하려 한다. 절연설계 및 전계완화 해석에 의한 검증과 접속재의 수축거동 해석에 의한 Carrier Pipe의 최적화된 형상으로 두께가 최소 9mm 이상을 갖는 Carrier Pipe가 필요하며, 전기적 전계완화 해석결과 고절연 고무슬리브의 중앙매립전극 경계면으로써, 접속재 수축거동 해석 결과와도 일치함을 검증할 수 있었다.

Abstract This paper represents the results of study on Extra High Voltage Power Cable Connection System Development. The purpose is to evaluate structural safety by numerical analysis for the relaxation of electric field concentration and by structural analysis of Carrier Pipe for easy installation of High Insulating Rubber Sleeve in the field, which is core technique of connection system. According to the results, the thickness of Carrier Pipe needs at least 9mm by optimization analysis of deformation behavior and insulating design & relaxation of electric field concentration. The result of contraction behavior of the connection part can be demonstrated with the same result of electric field relaxation analysis at the boundary of the electrode inserted into the insulating rubber sleeve.

Key Words : Cold Shrinkable Joint(CSJ), Carrier, Optimization, Pre-Molded Joint(PMJ), Voltage Power

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 시공기술의 중요성이 강조되고 있다.

초고압 XLPE 전력케이블과 더불어 초고압 지중선로 건설의 핵심인 전력 케이블 접속재는 현재 3세대인

Pre-molded Joint (PMJ) Type이 세계 표준으로 자리 잡고 있다. 1세대는 TMJ(Tape Molding Joint) 또는 TJ(Taped Joint)로써 154kV급까지 사용되고 있으며, 2세대는 PJ(Prefabricated Joint)로써 400kV급까지 사용 중에 있다. 3세대인 PMJ 역시 400kV급까지 사용 중에 있으나 고 절연 성능에 따른 전기적 안정성과 일체형 접속재로써 시공의 편의성 등에 의하여 현재는 전 세계적으로 초고압 접속재의 PMJ Type 적용이 대부분을 차지하고 있다.

2세대 PJ는 구조가 복잡하고 많은 부품을 필요로 하여 제품의 무게가 상대적으로 무겁고 접속함의 크기가 커서 작업공간을 많이 필요로 한다. 그러나 PMJ는 고무슬리브

*교신저자 : 이준성(jslee1@kyonggi.ac.kr)

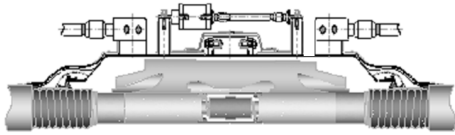
접수일 09년 09월 26일

수정일 09년 12월 21일

게재확정일 10년 01월 20일

부분이 일체형으로써 구조가 간편하고 시공이 용이하다 [1]. 이와 같이 고 절연성능, 제품자체의 높은 신뢰성, 전기적 안정성, 시공의 편의성 등 기술, 경제적 장점에 의하여 PMJ의 세계시장 점유율은 절대적 우위를 차지하고 있으며 전 세계적으로 더욱더 PMJ에 대한 기술개발에 박차를 가하고 있다. 그림 1은 초고압 전력 케이블의 접속 시스템을 나타내고 있다.

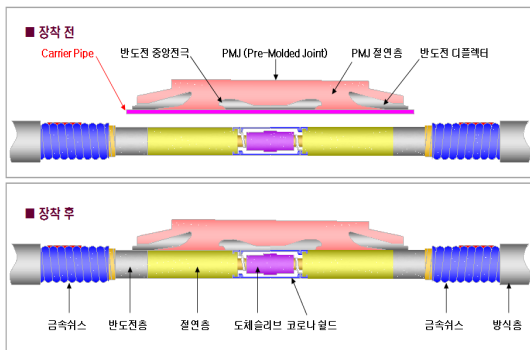
이러한 개발경쟁의 시장에 대응하고 나아가 수출경쟁력 확보를 통한 무역수지 개선을 위하여 PMJ 기술개발은 필수적이다. 따라서 본 연구에서 수행한 CSJ(Cold Shrinkable Joint)[2,3] 개발을 위한 구조적 안정성 평가는 PMJ 기술을 한 단계 향상시킬 수 있는 신기술이라 할 수 있다.



[그림 1] 초고압 전력 케이블 접속 시스템

2. CSJ 구조

CSJ(Cold Shrinkable Joint)는 기계적으로 전력케이블과 전력케이블 간을 연결하며, 전기적으로는 전력케이블 연결구간의 절연유지 및 전계 집중을 완화하기 위하여 PMJ와 Carrier Pipe로 결합 되어 있는 제품 구조이다.



[그림 2] CSJ 구조

CSJ는 다음과 같은 분류에 의해 정의할 수 있으며, 제품구조를 그림 2에 나타내었다.

- 기계적 : 전력케이블과 전력케이블 간을 연결

- 전기적 : 전력케이블 연결구간 절연유지 및 전계 집중 완화
- 구조적 : PMJ와 캐리어 파이프의 결합구조
- 시공적 : PMJ 조인트 블록 내부의 나선 Carrier Pipe 해체에 의한 PMJ조립

[표 1] 세대별 접속재 비교

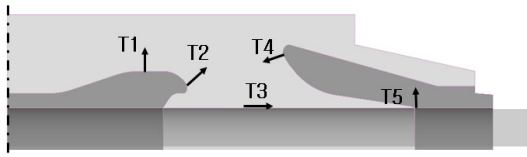
구분	1세대	2세대	3세대	4세대
명칭	- TJ:Taped Joint - TMJ:Taping Molded Joint - EMJ Extrusion Molded Joint	PJ (Prefabricated Joint)	PMJ (Pre-Molded Joint)	CSJ (Cold Shrinkable Joint)
전압등급 (Max)	TJ:220kV, TMJ:154kV, EMJ:500kV	Max 500kV	Max 500kV	Max 220kV
절연구조	주요부품 (절연구조) - TJ:EPR 테이프 - TMJ:미가류 XLPE or EPR 테이프 - EMJ:미가류 XLPE 컴파운드	에폭시 유니트, 스트레스 콘, 압축장치	Stress relief rubber unit	Stress relief rubber unit
품질관리	부품의 품질관리	난(현장관리)	용이	용이
	고도의 품질관리	난(현장 절연성형)	중 (현장 조립)	중 (현장 조립)
	고전계 부위에 휴먼 팩터	고 (현장 절연성형)	중 (현장 조립)	중 (현장 조립)
시공품질	휴먼에러 발생확률	고	저	저
	관리 수준 (공정수)	다/난	다/용이	중/용이
	관리레벨	고	중	저
	작업환경 관리	고	중	중
	공정별 체크여부	불가	가능	가능
	부적합발생시 대응성	불가	가능	가능
이물 혼입 관리	난	중	용이	
작업시 문제발생	고	중	중	

표 1은 기술적으로 기존의 세대별 접속재 대비 CSJ의 특징 및 장점을 보여 주고 있다. 표에서 알 수 있듯이 CSJ는 제품의 품질, 시공의 품질 등 전반적으로 기존 접

속재보다 많은 기술적 우위성을 갖고 있다. 따라서 이러한 CSJ 개발을 위해 고절연 고무슬리브의 전기적 절연해석과 작업의 용이성을 위해 내부에 삽입되어 있는 캐리어 파이프에 대한 거동해석을 필요로 한다.

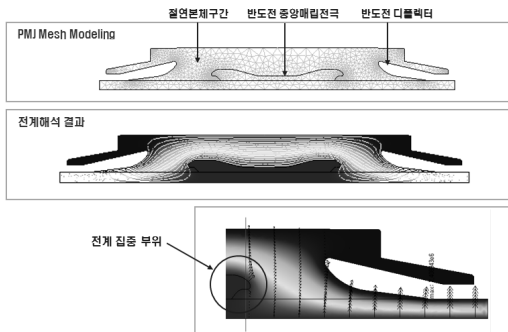
3. 절연설계 및 전계완화 해석

전기적 절연설계는 주요부의 전기적 특성과 전계의 집중현상을 막기 위하여, 시뮬레이션도구[4]를 이용한 수치해석을 실시하였다. 절연체의 전계완화 설계를 위하여 초고압 지중선 케이블 설계기술과 접속부의 절연층 두께 변화에 따른 열 변화 등의 갖가지 연구결과 등이 있다 [5,6]. PMJ의 가장 중요한 사항은 케이블 절연층과 고무슬리브간의 계면압력 특성으로, 고무의 성질을 고려하여 사용 중 접속함의 계면압력을 특정압력 이상으로 유지하는 것이 설계의 중요 포인트이다.



[그림 3] 전계 집중 중요 포인트 및 벡터

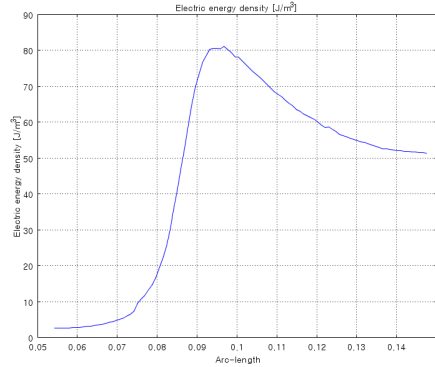
그림 3에서 고절연 고무슬리브에서의 전계가 집중될 수 있는 중요 포인트를 벡터로 선정하였다. 그림 3을 모델로 한 요소 분할 및 전계해석 결과는 다음의 그림 4와 같다. 그림에서도 알 수 있듯이 최대의 전계가 집중되는 곳은 중요 설계 포인트로 선정된 곳 중에서도 T2부분임을 확인하였다.



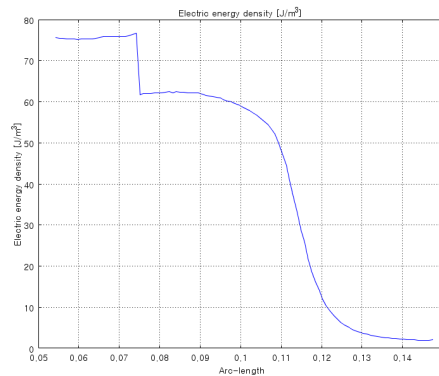
[그림 4] 메쉬 모델 및 해석 결과

그림 5와 그림 6은 각각 전계가 가장 많이 집중될 수

있는 T2와 T4부분의 원주방향의 단면 전압분포를 나타내고 있다. 다음 그림 4를 보면, 원주방향 단면중심에서 T2부분에 가까워질수록 전계가 집중되는 것을 알 수 있으며 그 구간을 벗어나 외각의 접지부분으로 벗어나면 전계의 집중이 완화됨을 알 수 있다.



[그림 5] T2의 원주방향의 단면 전압분포도



[그림 6] T4의 원주방향의 단면 전압분포도

그림 6에서는 단면중심에서 T4부분까지는 전계가 비슷한 강도로 집중되어 있으나 T4를 벗어나면서부터는 큰 기울기로 전계집중현상이 없어지고 있다.

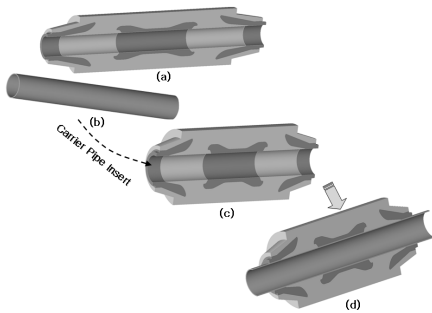
4. 고절연체 및 Carrier Pipe 해석

그림 7은 고절연 고무슬리브와 캐리어 파이프의 결합을 보여준다. 고절연 고무슬리브를 캐리어 파이프의 외경만큼 확대하여 삽입한 모습이다. 고절연 고무슬리브는 고탄성 재료로 되어 있고 두 가지 종류의 실리콘이 접합되어 있다. 캐리어 파이프의 구조 최적화 설계를 위하여 캐리어 파이프가 고절연 고무슬리브 내부에 삽입되었을 때

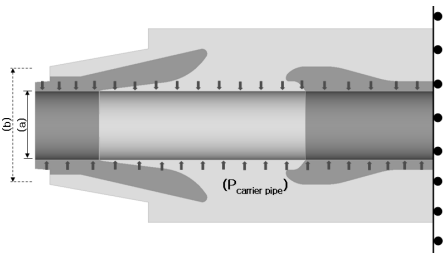
고절연 고무슬리브의 내부 압력 값을 먼저 해석하고 그 값을 캐리어 파이프의 외부 하중 값으로 적용하여 안정된 캐리어 파이프를 설계하고자 한다.

4.1. 고절연 고무슬리브의 내압 해석

고절연 고무슬리브의 FE해석을 위해 그림 8과 같이 1/4로 모델링하였고, 경계조건은 우측면과 전면부를 대칭 조건으로 구속하였다. 그리고 하중조건은 그림 8에서 직경 (a)를 직경 (b)만큼의 변위 값을 적용, 강제변위 조건을 이용하였다. 따라서 고절연 고무슬리브의 내부직경을 확대하였을 때 작용하는 압력을 구하고 캐리어 파이프의 외경면에 최대 압력값($P_{\text{carrier pipe}}$)으로 적용하여 캐리어 파이프의 구조해석을 수행하였다.



[그림 7] 고절연 고무슬리브와 Carrier Pipe의 결합



[그림 8] 구조해석 및 경계조건

[표 2] 고 절연 고무 슬리브의 기계적 성질

Names of Material	Young's Modulus	Poisson's Ratio
반도전체	6.2MPa	0.5
절연체	4.0MPa	0.5

[표 3] 고 절연 고무 슬리브의 형상 치수

Type	Inside Diameter	Expansion Diameter	Displacement of Diameter
Type(I)	Ø70mm	Ø148mm	39.0mm
Type(II)	Ø70mm	Ø149mm	39.5mm

각각의 해석을 위한 고 절연 고무 슬리브의 기계적 성질은 표 2에, 표 3은 고 절연 고무 슬리브의 치수를 정리하였다.

4.2. 내압 해석 결과

고절연 고무슬리브의 내압 해석결과는 표 4에 나타나 있고 해석은 절연과 반도체체의 물성치를 적용하여 각각 해석을 하였다. 이는 해석의 신뢰성을 높이고 복합해석을 위한 기초 자료를 얻기 위함이고, 해석 결과에서 각각의 내부압력을 얻어 이 값을 캐리어 파이프의 외부 하중 값으로 하였다.

[표 4] 고 절연 고무 슬리브의 내압력 해석 결과

Result component	반도전 Ø148mm	절연 Ø148mm	반도전 Ø149mm	절연 Ø149mm
Max. equi-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. equi-strain	2.001	1.949	1.979	1.979
Max. contact stress	3.478 MPa	3.369 MPa	3.4361 MPa	2.053 MPa

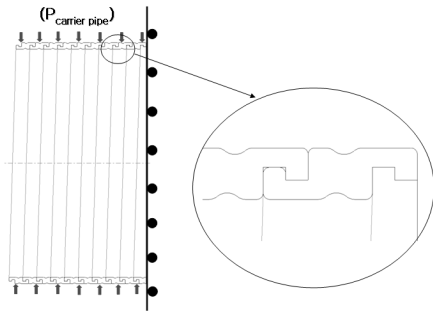
5. Carrier Pipe 구조 해석

캐리어 파이프는 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 확대 시 작용하는 내부 최대압력을 캐리어 파이프의 외면에 적용하였을 때 파이프의 구조적 강도는 기준에 충족되어야 한다.

캐리어 파이프의 구조해석을 위해 그림 9와 같은 경계 조건과 표 4와 같은 기계적 성질을 이용하였다. 그리고 캐리어 파이프의 구조해석을 위한 최대하중은 2.5 ~ 3.1MPa로 하였다. 고절연 고무슬리브를 적용하고자하는 케이블의 경우 외경이 Ø135mm이기 때문에 캐리어 파이프의 직경 방향의 변형량이 Ø135mm이하가 되어서는 안 된다. 그림 10은 캐리어 파이프의 구조해석 결과를 나타낸 것이다.

캐리어 파이프의 구조해석 결과는 작용하는 외부압력에 의한 변형량과 허용응력 값을 계산하여 캐리어 파이프

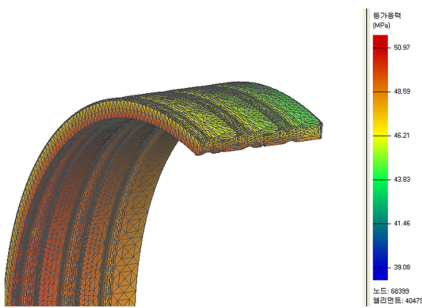
프의 단면형상을 수정하며 반복적 계산을 수행하였다. 외부하중은 2.5MPa, 2.8MPa로 초기 모델은 Ø140mm에 두께 4mm의 경우 허용응력 기준치 이상, 즉 60%가량 증가하였고, 또한 변위가 Ø134.2mm으로 축소되어 케이블 직경 Ø135.0mm 보다 작아져 실제적으로 사용할 수 없음을 알 수 있었다.



[그림 9] 캐리어 파이프의 구조해석 경계조건

[표 4] 캐리어 파이프의 기계적 성질

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



[그림 10] 구조해석 결과

따라서 Ø142mm에 두께 9mm로 개선하여 고절연 고무슬리브의 압력을 다시 계산한 후 그 값을 적용하였다. 외부압력은 2.8 ~ 3.1MPa로 적용하여 계산한 결과 등가응력은 허용응력 기준치의 96%가량이며 구조적으로는 안전하다는 결론을 얻게 되었다. 그리고 직경변화는 Ø136.40mm이므로 케이블 직경 Ø135.0mm보다 크기 때문에 사용 가능한 조건임을 확인하였다.

6. 결론

고절연 고무슬리브의 확장 파이프인 캐리어 파이프의 안정적인 구조 설계를 위하여 구축된 해석시스템을 이용하여 고절연 고무슬리브의 절연설계 및 전계완화 해석과 접속재의 수축거동해석 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고절연 고무슬리브 및 캐리어 파이프의 제품설계를 실시하였으며, 각 부분품 단독으로써의 시제품을 제작하였다. 또한 각각에 대한 샘플의 인터페이스 시험을 통하여 구조를 선정하고 선정된 구조에 대하여 반복적인 테스트를 통하여 설계가 확정되어야함을 알 수 있었다.

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

(3) 접속재의 수축거동 해석에 의하면, 캐리어 파이프의 구조적 안전성을 확보하기 위하여 고절연 고무슬리브로부터의 압력을 구하여 계산한 결과 최소한 9mm이상의 Carrier Pipe 두께가 필요한 것으로 파악 되었다. 이것은 충분한 강도뿐만 아니라 캐리어파이프의 변형 발생으로 인한 현장에서의 설치문제까지 고려하게 된 값이다.

(4) 고절연 고무슬리브 제품설계 에서는 고무슬리브의 특성조건을 설정하였고 고무슬리브 및 캐리어파이프의 인터페이스 설계 기준을 파악하기 위하여 기존의 PMJ를 활용하여 캐리어 파이프와의 장차 실험을 진행하였다. 그 결과, 확장비율 108%로 적용하였을 경우는 30시간 후에는 완전 붕괴가 되었고, 붕괴가 시작되는 지점이 고절연 고무슬리브의 중앙매립전극과 경계면으로써, 시뮬레이션 도구를 활용한 접속재 수축거동 해석 결과와도 일치함을 검증할 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.
- [4] H.J. Lee and J.S. Lee, "Automatic Mesh Generation

System for FE Analysis of 3D Crack," 한국산학기술 학회논문지 제10권 제9호, pp. 2183-2188, 2009..

- [5] G. S. Che, "A Study on the Heat Transfer Analysis based on Insulation Thickness Variation of Cable Splice Part," 전력전자학회논문집, pp. 246~255, 1998.
- [6] Y. S. Kim, K. M. Shong, S. G. Kim, "The Properties of Dielectric Breakdown and Thermal Stresses below 22.9[kV] Class XLPE Power Cable," 조명·전기설비학회논문지 제22권 제4호, pp. 54-60 2008.

이 양 창(Yang-Chang Lee)

[정회원]



- 2002년 2월 : 경기대학교 대학원 기계공학과(공학석사)
- 2007년 2월 : 경기대학교 대학원 기계공학과(공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 대림대학 산학협력팀

<관심분야>
생산자동화, 지능형공작기계

이 준 성(Joon-Seong Lee)

[정회원]



- 1988년 2월 : 성균관대학교 대학원 기계공학과(공학석사)
- 1995년 9월 : 동경대학교(공학박사)
- 1988년 7월 ~ 1991년 7월 : 육군사관학교 교수부 기계공학과 교수
- 1996년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 기계시스템공학과 교수

<관심분야>
최적설계, Neural Network

이 호 정(Ho-Jeong Lee)

[정회원]



- 2009년 2월 : 경기대학교 기계시스템공학과(공학사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 대학원 기계공학과 석사과정

<관심분야>
구조해석, 진전성평가

류 정 현(Jeong-Hyun Ryu)

[정회원]



- 2001년 2월 : 경기대학교 기계시스템공학과(공학사)
- 2003년 2월 : 경기대학교 대학원 기계공학과(공학석사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 일진전기(주) 전선사업부, 기술R&D

<관심분야>
초고압케이블, 전력 Network