

파라메트릭 기법에 의한 전력케이블의 파이프에 대한 최적화해석 Optimal Analysis for Electric Cable Pipe by Parametric Methodology

#이준성¹, *이양창², 최윤종¹, 이호정¹, 한봉수³, 류정현³

#J. S. Lee(jslee1@kgu.ac.kr)¹, *Y.C. Lee², Y.J. Choi¹, H. J. Lee¹, B. S. Han³, J. H. Ryu³

¹ 경기대학교 기계시스템공학과, ²대림대학, ³일진전기(주)

Key words : Pre-molded Joint(PMJ), Silicon Block, Spiral Carrier Pipe

1. 서론

초고압 XLPE 전력케이블과 더불어 초고압 지중선로 건설의 핵심인 전력 케이블 접속재는 현재 3세대인 Pre-molded Joint Type이 세계 표준으로 자리 잡고 있다. 고 절연성능에 따른 전기적 안정성과 일체형 접속재로써 시공의 편의성 등에 의하여 세계적으로 초고압 접속재의 Pre-molded Joint Type 적용이 대부분을 차지하고 있다.

기존에 사용되던 2세대 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 해석을 수행하고자 하였다.

2. Pre-Molded Joint의 구조

Fig. 1은 Pre-molded Joint의 구조를 보여주고 있고, 내부에 고 절연체인 실리콘 블록의 현장 작업의 용이성을 위하여 실리콘 블록 내부에 캐리어 파이프를 삽입하여 사용하게 된다. Fig. 2 실리콘 블록을 캐리어 파이프의 외경만큼 확대하여 삽입한 모습이다. 실리콘 블록은 고탄성 재료로 되어 있고 두 가지 종류의 실리콘이 접합되어 있다. 캐리어 파이프는 PP재료로 된 나선 모양이다.

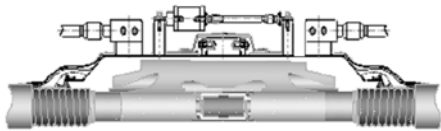


Fig. 1 Electric power cable connection system

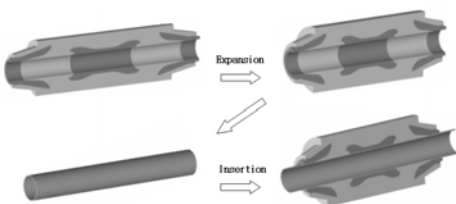


Fig. 2 Insertion of the carrier pipe into the silicon block

3. 고 절연재의 전계완화 해석

전기적 절연설계는 주요부의 전기적 특성과 전계의 집중현상을 막기 위하여 유한요소 해석법을 이용하여 전계해석을 하였다. Pre-molded Joint의 가장 중요한 사항은 케이블 절연층과 고무슬리브간의 계면압력 특성으로, 고무의 성질을 고려하여 사용 중 접속함의 계면압력을 특정압력 이상으로 유지하는 것이 설계의 중요 포인트이다. Fig. 3은 전계해석을 위한 해석모델과 해석결과들이다. 그림에서 알 수 있듯이 최대의 전계가 집중되는 곳은 원형 부분인 것을 확인할 수 있다.

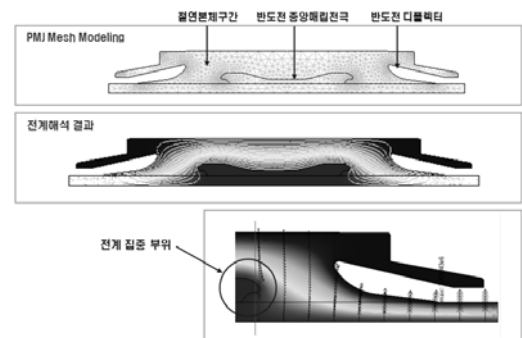


Fig. 3 Analysis model and result

전계가 집중되는 부분의 원주방향 단면 전압분포도를 보면 원주방향 단면중심에서 안쪽으로 가까워질수록 전계가 집중되는 것을 알 수 있으며 그 구간을 벗어나 외각의 접지부분으로 벗어나면 전계의 집중이 완화됨을 알 수 있다.

4. 실리콘 블록 및 캐리어 파이프 해석

유한요소해석에서 3차원으로 복잡한 해석을 수행할 경우 서로 다른 재료의 접촉경계 부분의 메쉬 Error와 그로 인한 Solver Error가 발생하는 경우가 있어 안정된 해석결과 값을 얻기 위하여 아래의 4가지 방법으로 해석을 수행하였다.

- Case I) 절연과 반도체 재질 → 내경확대 해석
- Case II) 절연과 반도체 재질 동일 → 내경확대 해석
- Case III) 절연과 반도체 재질 동일 → 내경 억지끼움 해석
- Case IV) 절연과 반도체 재질 복합 → 내경 억지끼움 해석

실리콘 블록의 유한소요 해석을 위해 Fig 4는 대칭조건을 이용한 1/4 모델링과 우측면과 전면부를 구속한 상태에서의 하중에 따른 해석결과를 나타낸 것이다. 여기서 실리콘 블록의 내부직경을 확대하였을 때 작용하는 압력을 구하고 Carrier Pipe의 외경면에 최대 압력값($P_{carrier pipe}$)으로 적용하여 Carrier Pipe의 구조해석을 수행하였다. 각각의 해석조건과 재료물성치는 Table 1과 Table 2에 정리하였다.

Table 1 Material Properties of the silicon block

Names of material	Young's Modulus	Pisson's ratio
반도체	5.2MPa	0.48
절연	3.0MPa	0.48

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

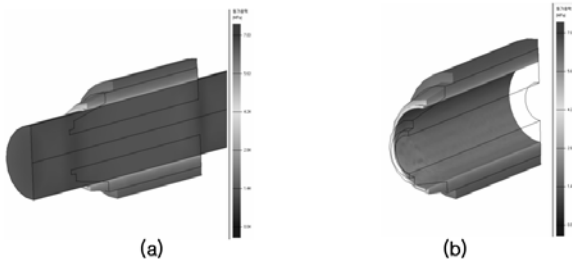


Fig. 4 Shrink fit analysis for the inside diameter expansion

5. 실리콘 블록 해석 결과

실리콘 블록의 해석 결과는 다음과 같이 정리하였다. Table 3은 도전체와 절연체가 복합적으로 성형되어 있는 실리콘 블록의 해석 결과로서 실리콘 내경에 축을 억지끼움형태로 해석한 결과로 실리콘 블록의 평균응력과 내부압력값을 나타낸 것이다. Table 4는 실리콘 블록이 각각 단일 재질로서의 조건으로 해석한 것으로 내경을 확장하는 형태의 해석결과이고, Table 5는 실리콘 내경에 축을 억지끼움하는 형태의 해석 결과들이다. 여기서, 도전체와 절연체가 복합적인 구조되어 있는 실리콘 블록 해석결과의 신뢰성을 확인 할 수 있었다.

Table 3 Results of Analysis for the inside diameter expansion(complex materials of conductive & semi-conductive material)

Result component	Ø148mm (Diameter displacement 39.0mm)	Ø149mm (Diameter displacement 39.5mm)
Max. equi.-stress	6.51 MPa	6.591 MPa
Max. displacement	65.10 mm	66.01mm
Max. principal stress	7.642 MPa	7.643 MPa
Max. contact stress	2.523 MPa	2.674 MPa
Max. equi.-strain	1.961	1.997

Table 4 The value of analysis in equal materials(conductive & semi-conductive material)

Result component	반도체 Ø148mm	절연 Ø148mm	반도체 Ø149mm	절연 Ø149mm
Max. equi.-stress	6.872 MPa	3.965 MPa	6.96 MPa	4.016 MPa
Max. displacement	61.35 mm	61.35 mm	62.13 mm	62.13 mm
Max. principal stress	5.845 MPa	3.372 MPa	5.92 MPa	3.416 MPa
Max. equi.-strain	1.956	1.956	1.981	1.981

Table 5 Results of shrink fit analysis(equal materials)

Result component	반도체 Ø148mm	절연 Ø148mm	반도체 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

6. 캐리어 파이프 구조 해석 결과

캐리어 파이프는 실리콘 블록의 내경을 확대한 후 장기간 보관하면서 실리콘 블록의 상태를 그대로 유지하여야 하고 현장 작업에 있어서는 실리콘 블록이 초고압 케이블 이음부분을 완벽하게 Joint 할 수 있도록 하여야 한다. 따라서 실리콘 블록의 내경 확대 시 작용하는 내부 최대압력을 캐리어 파이프의 외면에 적용하였을 때 파이프의 구조적 강도는 기준에 충족되어야 한다.

캐리어 파이프의 구조해석을 위해 Fig. 5와 같이 캐리어 파이프의 단면의 각 치수를 변수 지정하여 해석하였다. 캐리어 파이프의 구조해석 결과 캐리어 파이프의 적정 두께의 값을 얻기 위해 Parametric Dimension 기법을 활용하여 최적화 해석을 실행하였다. 해석결과는 Table 6과 같이 6가지 Type의 해석결과를 얻을 수 있었다. 해석 조건에서 최대하중은 3.1MPa로 하였다. Fig. 6은 Type(III)의 경우를 나타낸 것이다.

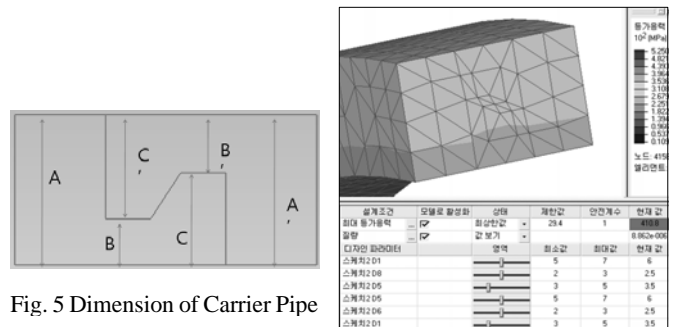


Fig. 5 Dimension of Carrier Pipe

Fig. 6 Analysis results of the type(III)

Table 6 The size of the carrier pipe for structural analysis

Type	A	B	C	A'	B'	C'	Von_Mises Stress
Type(I)	4mm	1.5mm	2.5mm	4.0mm	1.5mm	2.5mm	595.9MPa
Type(II)	5mm	1.5mm	3.5mm	5.0mm	1.5mm	3.5mm	486.6MPa
Type(III)	6mm	2.5mm	3.5mm	6.0mm	2.5mm	3.5mm	410.8MPa
Type(IV)	7mm	3.0mm	4.0mm	7.0mm	3.0mm	4.0mm	359.1MPa
Type(V)	8mm	4.0mm	5.0mm	8.0mm	4.0mm	5.0mm	310.2MPa
Type(VI)	9mm	5.0mm	6.0mm	9.0mm	5.0mm	6.0mm	289.3MPa

캐리어 파이프의 구조해석 결과 Type(I ~ V)는 작용하는 외부 압력에 의해 허용응력 기준치 이상 증가하였고, Type(VI)의 경우는 Von_Mises Stress 값이 캐리어 파이프 허용응력 범위 안에 있으므로 구조적으로 안전하다고 판단된다. 따라서 Type(VI)에 해당되는 Dimension들이 최적화된 값들이라 할 수 있다.

7. 결론

절연설계 및 전계완화 해석에서는 실리콘 블록 구조에서 전계가 집중될 수 있는 중요 포인트를 확인하였고, 그 결과를 실리콘 블록 제품설계에 반영하였다. 실리콘 블록의 수축거동 해석에 의한 캐리어 파이프의 구조적 안전성을 확보하기 위하여 실리콘 블록으로부터의 압력을 적용하였다. 해석한 결과 최소한 8.0mm 이상의 캐리어 파이프 두께가 필요한 것으로 파악 되었다. 이것은 충분한 강도뿐만 아니라 캐리어 파이프의 변형 발생으로 인한 현장에서의 설치문제까지 고려하게 된 값이다. 본 연구를 통해 앞으로 있을 압력센서를 이용한 실질적인 압력측정과 더불어 캐리어 파이프의 기초적인 설계상의 중요한 데이터로 이용할 수 있고 장시간 변형 테스트에도 이용될 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

[생략]