

유한요소법에 의한 CSJ 캐리어 파이프에 대한 변형거동 해석 Deformation Behavior Analysis for CSJ Carrier Pipe by Finite Elements Method

이양창², 이은철¹, 김형택¹, *이준성¹, 최윤종¹, 한봉수³, 류정현³
Y.C. Lee², E. C. Lee¹, H. T. Kim¹, *J. S. Lee(jslee1@kgu.ac.kr)¹, Y.J. Choi¹, B. S. Han³, J. H. Ryu³
¹ 경기대학교 기계공학과, ²대림대학, ³일진전기(주)

Key words : Cold Shrinkable Joint(CSJ), Silicon Block, Spiral Carrier Pipe

1. 서론

자기수축형 접속재(CSJ)는 전력케이블 약세사리 중의 하나로 크게 실리콘으로 된 블록과 그 내부에 관형태로 삽입된 나선 캐리어 파이프로 이루어진다. 기존에 사용하던 테이프 절연형 직선 접속재(TJ)나 테이프 몰드형 접속재(TMJ), 프리 몰드형 직선접속재(PMJ) 등과 비교하여 여러 가지 장점을 가지고 있다.¹ CSJ는 현장에서 전력 케이블 설치 시 조인트 블록 내부에 있는 나선 캐리어 파이프의 한쪽 끝을 실을 풀어내는 것처럼 끌어냄으로써 손쉬운 조립을 가능하게 해준다. 설치 효율의 개선, 설치장비의 간소화, 설치 시간의 단축, 조인트 크기의 감소, 재료비와 설치비의 감소라는 측면에서 기존의 조인트와 비교하여 많은 장점을 가지고 있다. 이를 위해 미리 실리콘 블록을 확장하여 나선 캐리어 파이프를 삽입한 뒤 필요한 시기에 사용할 수 있도록 보관한다. 캐리어 파이프는 실리콘 블록으로부터 긴 기간 동안 압력을 받게 되는데 그 기간 동안 큰 변형 없이 충분한 강도를 가져야 한다.² 따라서 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 CSJ 캐리어 파이프에 대한 변형거동 해석을 수행하고자 한다. 결과를 통하여 최적의 캐리어 파이프 두께와 구조를 설계하는데 기본자료로 사용하고자 한다.

2. CSJ의 구조

Fig. 1은 실리콘 블록과 캐리어 파이프의 결합을 보여준다. 실리콘 블록을 캐리어 파이프의 외경만큼 확대하여 삽입한 모습이다. 실리콘 블록은 고탄성 재료로 되어있고 두 가지 종류의 실리콘이 접합되어 있다. 캐리어 파이프는 PP재료³로 된 나선 모양이다.

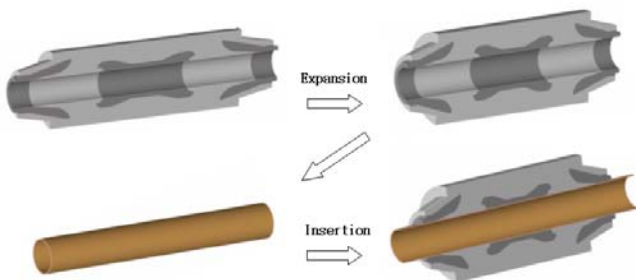


Fig. 1 Insertion of the carrier pipe into the silicon block

3. 실리콘 블록의 해석 절차 및 조건

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

- (1) 1차 해석 : 절연과 반도체 재질이 복합되어 있는 구조로 해석(내부 직경확대를 위해 내부 반지름 방향 이동값을 지정하여 해석)
- (2) 2차 해석 : 절연과 반도체 재질을 동일 재질로 해석(내부 직경확대를 위해 내부 반지름 방향 이동 값을 지정하여 해석)
- (3) 3차 해석 : 절연과 반도체를 재질을 동일 재질로 해석(내부 직경 확대를 위한 억지끼움 해석)
- (4) 4차 해석 : 절연과 반도체 재질이 복합되어 있는 구조로

해석(내부 직경확대를 위한 억지끼움 해석)

CSJ의 유한요소 해석을 위해 Fig 2와 같이 1/4로 모델링하였고, 경계조건은 우측면과 전면부를 대칭조건으로 구속하였다. 그리고 하중조건은 Fig 2에서 직경 (a)를 직경 (b)만큼의 변위값을 적용, 강제변위 조건을 이용하였다. 따라서 CSJ의 내부직경을 확대하였을 때 작용하는 압력을 구하고 Carrier Pipe의 외경면에 최대 압력값($P_{carrier\ pipe}$)으로 적용하여 Carrier Pipe의 구조해석을 수행하였다. 각각의 해석조건과 재료 물성치는 Table 1과 Table 2에 정리하였다.

Table 1 Material Properties of the silicon block

Names of material	Young's Modulus	Pisson's ratio
반도전	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

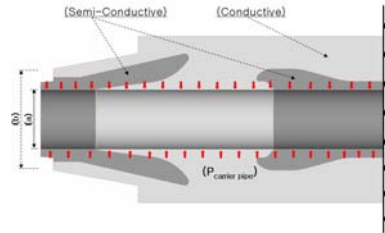


Fig. 2 Boundary conditions for the CSJ structural analysis

4. 실리콘 블록 해석

1차, 2차 해석의 결과를 Table 3, 4에 나타내었다.

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. eqvi-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. equvi-strain	1.961	1.997

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

Result component	반도전 Ø148mm	절연 Ø148mm	반도전 Ø149mm	절연 Ø149mm
Max. eqvi-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. equvi-strain	1.956	1.956	1.981	1.981

3차 해석의 결과는 다음의 Fig 3과 Table 5에 나타내었다.

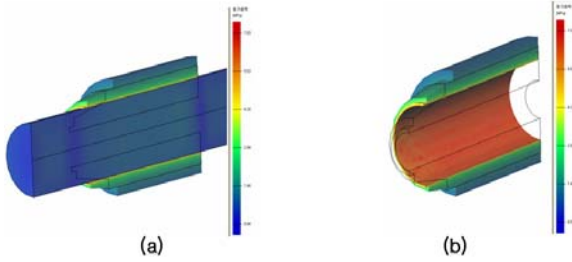


Fig. 3 Shrink fit analysis for the inside diameter expansion

Table 5 Results of shrink fit analysis(equal materials)

Result component	반도전 Ø148mm	절연 Ø148mm	반도전 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

보다 작아져 Type (I , II)는 실제적으로 사용할 수 없다. 이를 개선하기 위하여 Type(III)의 모델을 결정하여 CSJ의 압력을 다시 구한 후 그 값을 Type(III)에 적용하였다. Type (I , II , III)의 해석결과는 Table 8에 나타내었다.

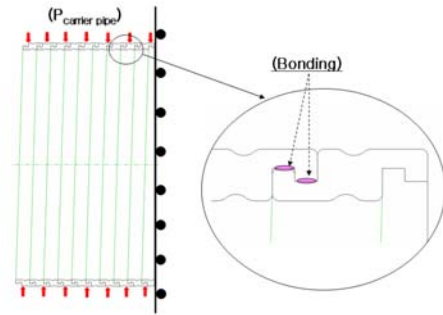


Fig. 5 Boundary conditions and contact conditions of the carrier pipe

Table 6 Material properties of the carrier pipe

Material name	Young's Modulus(E)	Poisson's Ratio(u)	Yield Strength	Specific Gravity
PP재료	1225.831MPa	0.42	35.0MPa	0.9

Table 7 The size of the carrier pipe for structural analysis

Type	Inside diameter of Carrier Pipe	Thickness of Carrier Pipe	Outside diameter of Carrier Pipe	Lead width
Type(I)	Ø140mm	4.0mm	Ø148mm	12.0mm
Type(II)	Ø140mm	4.5mm	Ø149mm	13.0mm
Type(III)	Ø140mm	7.0mm	Ø154mm	13.0mm

Table 8 Results of structural analysis of the carrier pipe

Type	Loading condition	Equivalent stress	Max. displacement (diameter)	Reduced diameter of pipe
Type(I)	2.5MPa	45.44MPa	Ø5.00mm	Ø135.00mm
	2.8MPa	50.97MPa	Ø5.80mm	Ø134.20mm
Type(II)	2.5MPa	41.50MPa	Ø4.60mm	Ø135.40mm
	2.8MPa	45.51MPa	Ø5.00mm	Ø135.00mm
Type(III)	2.8MPa	30.51MPa	Ø3.20mm	Ø136.80mm
	3.1MPa	33.79MPa	Ø3.60mm	Ø136.40mm

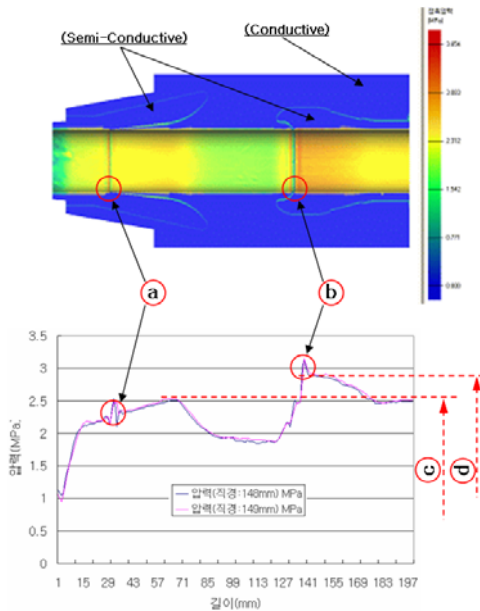


Fig. 4 Pressure distribution (shrink fit for complex materials)

4. 캐리어 파이프의 구조 해석

캐리어 파이프는 CSJ의 내경을 확대한 후 장기간 보관하면서 CSJ의 상태를 그대로 유지하여야 하고 현장작업에 있어서는 CSJ가 초고압 케이블 이음부분을 완벽하게 체결할 수 있도록 하여야 한다. 따라서 CSJ의 내경 확대 시 작용하는 내부 최대압력을 캐리어 파이프의 외면에 적용하였을 때 파이프의 구조적 강도는 기준에 충족되어야 한다.

캐리어 파이프의 구조해석을 위해 Fig. 5와 같은 경계조건과 Table 6과 같은 PP의 기계적 성질을 이용하였다. 그리고 캐리어 파이프의 구조해석을 위한 최대하중은 Type(I , II)는 Fig 4의 구간㉔,㉕이며 2.5MPa~2.8MPa이다. 또한, Type(III)은 2.8MPa ~ 3.1MPa로 하였다. CSJ를 적용하고자하는 전선의 경우 외경이 Ø135mm이기 때문에 캐리어 파이프의 직경 방향의 변형량이 Ø135mm이하가 되어서는 안된다.

캐리어 파이프의 구조해석 결과 Type (I , II)는 작용하는 외부 압력에 의해 허용응력 기준치 이상, 즉 60%가량 증가하였고, 또한 변위가 직경으로 134.2mm으로 축소되어 전선직경 135.0mm

5. 결론

최종적으로 캐리어 파이프의 구조적 안전성을 확보하기 위하여 반대로 실리콘 파이프로부터 압력을 구하여 계산한 결과 최소한 7mm이상의 두께를 가져야 하는 것으로 보인다. 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 있다.

참고문헌

- H. Kurihara et al., "Development of cold shrinkable joint for 66-kV CV cables," Electrical Review, No. 416, 2000. (in Japanese)
- 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.
- Nakamura S, Kuwaki A, Hayashi K, "Development of cold shrinkable joints for 110-230kV XLPE cable," Electrical Review, pp. 186-190, 2002.