

DC Electric Field Characteristics considering Thermal Effect for HVDC Slip-on Type Outdoor Termination

HVDC 슬립 온형 기중 종단접속함에 대한 열 영향 반영 DC 전기 특성 평가

Ik-Soo Kwon†, Jae-Sang Hwang, Jae-Hong Koo, Kuniaki Sakamoto, Bang-Wook Lee
권익수†, 황재상, 구재홍, 사카모토 쿠니아키, 이방욱

* HVDC Electric Power Lab. Hanyang University, Sa 3-dong, Sangrok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea
† clanss@hanyang.ac.kr

Abstract

기중종단 접속함은 지중케이블과 가공송전선을 연결하기 위한 접속함으로써 옥외 변전소 등의 대기 중에 설치된다. 이는 21세기 핵심기술로 여겨지고 있는 대륙 간, 국가 간, 육지-섬을 잇는 HVDC 송전선로의 DC 그리드 송전망 형성을 위해 반드시 개발되어야 하는 전력기기이다. 그러나 AC용 접속함의 개발 사례는 다수 존재하는 반면, DC용 접속함의 개발 사례 및 기술은 일본과 중국 등에 일부 존재할 뿐 국내 기술은 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 기존 AC용 슬립 온형 기중 종단접속함을 초기모델로 선정하여 HVDC 전력기기로의 적용 가능성을 평가하였다. 먼저 실제 운전 시 기중종단 접속함 내 도체에서 발생하는 열에 의한 내·외부의 온도편차를 고려한 DC 전기해석을 수행하였으며, AC 전기분포 및 열 해석이 반영되지 않은 DC 전기분포와 비교하였다. 또한 DC 전계는 정상상태 뿐만 아니라 과도 구간도 포함하기 때문에 이를 고려한 전기해석을 수행할 필요가 있기 때문에 정상상태와 더불어 극성반전 후 전기분포 역시 비교, 분석하였다. 마지막으로, 기존 AC용 슬립 온형 기중 종단접속함 초기모델을 DC에 적용하기 위해 다양한 형상 변환을 통한 요소 설계를 수행하였다. 기중종단 접속함 구조 내 전계가 가장 집중될 것으로 사료되는 부분을 선정하여 그 지점들의 최대 전계강도 $E_{n,max}$ 와 $E_{t,max}$ 를 측정하였다. 해석 결과, 정상상태 시 개선모델의 삼중점 최대 전계강도는 기준모델 대비 2.01% 개선되었으며, 연면 최대 전계강도는 기준모델 대비 36.68% 개선되었다. AC 전기해석 결과인 연면 전계강도 1.11 kV/mm보다는 33.3% 감소하였지만 삼중점 최대 전계강도 8.23 kV/mm보다는 아직 43.6% 크다는 점에서 부분적인 형상 변환이 아닌 DC 환경에 적합한 전혀 다른 근본적인 설계 개념의 변화가 반드시 필요할 것으로 사료된다.

A outdoor termination installed at the outdoor substation is required to connect underground cables and overhead transmission lines. The joint box for AC transmission system is already developed and widely used to interconnect overhead and underground systems. But the development of the joint box for DC transmission system was only introduced from China and Japan, but their development status and core technologies were not fully reported. In order to implement HVDC systems connecting overhead transmission lines and underground cables, a outdoor termination should be developed, but the detailed specifications and information of this device were not reported. It is estimated that the development of the joint box for DC environment has some technical obstacles including insulating materials, electric field mitigation, thermal temperature rise, and space charge accumulations. Among this, the most important one is the DC electrical insulation design. Therefore, in order to investigate the DC electrical insulation design of outdoor termination, the design of AC slip-on type outdoor termination is referred, and DC electric field analysis is performed to verify the possibility of application of AC joint box into DC joint box. Especially for DC electric field analysis, temperature rise of insulating materials of a joint box was considered, because the conductivity of materials could be changed due to temperature rise. Furthermore, DC electric field analysis considering transient state, and polarity reversal state were also investigated to verify which state is the most severe condition for the DC joint box. From the simulation results, it was shown that the value and the position of maximum electric field was obtained comparing AC state, DC state without temperature rise, and DC state with temperature rise. And it was confirmed that severe DC electric field was observed considering temperature rise. Finally, in order to reduce DC electric field intensification, different configuration of the joint box was applied and it was not possible to obtain satisfactory results. It means that the slight change of configuration of AC joint box was not the suitable solution for DC joint box. It is essential to establish novel DC insulation design skills and method for DC joint box to commercialize this product in the near future.

Keywords : Outdoor termination, End-box joint in air, DC electric field, electrical conductivity, thermal effect

I. 서론

HVDC 송전방식은 기존 교류방식 대비 여러 가지 장점을 가지고 있다. 동일 전력 전송 시 송전손실 저감이 가능하며 요구되는 전선량과 부지면적이 적기 때문에 경제성 확보에 용이하다. 또한 전압이나 주파수가 다른 두 계통 간 비동기연계가 가능하며 송전거리 제약 문제 해결을 통한 장거리송전이 가능하다. 이러한 장점들을 활용하여 HVDC 송전선로를 이용한 대륙 간, 국가 간, 육지-섬을 잇는 DC 그리드 송전망 형성을 기대할 수 있다. 이러한 DC 그리드 송전망 형성을 위해서는 기중 중단접속함의 개발이 선행되어야 한다. 그러나 AC 기중 중단접속함의 개발사례는 다수 존재하는 반면, DC 용 기중 중단접속함 개발 기술은 일본, 중국 등에는 일부 존재하지만, 기술적 사항이나 제품에 대한 소개는 거의 없는 실정이며, 국내에서는 관련 기술 및 경험이 전무한 실정이다.

기중 중단접속함은 가공선과 지중 혹은 해저케이블 간의 연결을 위한 접속장치를 의미한다. 기중 중단접속함은 스트레스 콘 형상에 따라 조립형과 슬립 온형으로 구분된다. 조립형은 복잡한 구조로 인해 시공자의 작업 능력에 따라 성능이 좌우되는 단점을 가지는 반면, 슬립 온형은 이러한 단점을 보완하기 위해 구조를 간단히 하여 시공자의 작업능력에 의해 크게 영향을 받지 않도록 하였다. 두가지 구조를 대상으로 전계해석 및 관련연구를 수행하였지만, 본 논문에서는 상대적으로 DC전계 특성이 우수한 슬립 온형 모델에 대해 연구 결과를 제시하고자 한다.

우선적으로, DC 기중 중단접속함 연구를 위해서 기존 교류형으로 개발된 기중 중단접속함을 대상으로 AC와 DC 정상상태 및 극성반전 전계해석을 수행하여 어떤 운전상태에서 가장 가혹한 전계강도가 나타나는지 분석하였다. 그 다음으로 슬립 온형 기중 중단접속함 내부의 온도편차를 고려하여 DC 전계해석 시 열 해석 반영 여부에 따른 전계분포를 비교하였다. 전계해석 결과, 열 해석 반영 시 최대 전계강도가 크게 증가하였으며 이로 인해 기존 AC용 슬립 온형 기중 중단접속함을 DC에 곧바로 적용할 수 없다고 판단하였다. 따라서 본 논문에서는 기존 AC용 슬립 온형 기중 중단접속함의 DC 적용을 위해 전계집중을 완화시킬 수 있는 형상변화를 통해 최대 전계강도를 낮추는 방안을 제시하고자 하였다.

II. 본 문

A. DC 전계해석 기반 절연설계 필요성

AC 전계분포는 절연체의 유전율에 의해 결정되는 특성을 가지고 있다. 복합 절연체로 구성된 전력기기 구조 내에서 두 절연체가 맞닿는 계면에는 등전위선 및 전계의 왜곡이 발생하는데, 이 왜곡의 정도는 두 절연물 간 유전율 비에 의해 결정된다. 즉, 두 절연물 간 유전율의 차이가 클수록 등전위선 및 전계의 왜곡이 두드러지며 상대적으로 낮은 유전율 값을 가지는 절연체 쪽에 전계 및 등전위선이 집중된다. 반면, DC 전계분포는 유전율이 아닌 도전율에 크게 의존하고 두 절연물 간 도

Table 1. Title and Function of Main Component of Slip-on Type Overhead Joint Box

	명칭	매질	주요기능 및 특성
①	도체 인출봉	도체	케이블 도체를 가공선로와 전기적으로 접속하기 위한 도전성 봉
②	외부 애관	SIR	접속함을 외부의 노출로부터 보호하는 절연물
③	절연유	절연유	접속함 내부의 절연 성능 유지
④	스트레스 콘	SIR	케이블 외부 반도체층 끝단에 집중되는 전계를 완화시켜 절연기능이 유지되도록 하는 장치
⑤	반도체층	반도체체	등전위선 분산 및 전계집중 완화를 위한 장치
⑥	고무 실링	SIR	절연유의 누유 방지

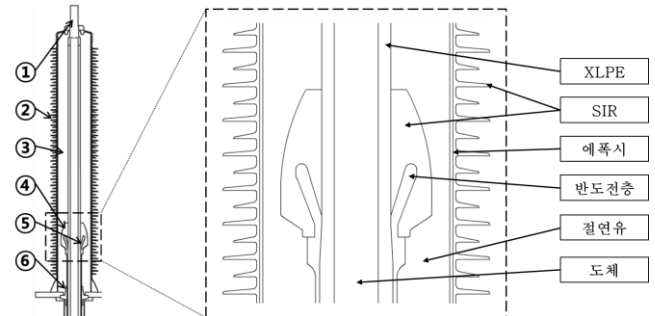


Fig. 1. Initial Model of Slip-on Type Outdoor Termination

전율 비에 의해 결정되며, 상대적으로 낮은 도전율 값을 가지는 절연체 쪽에 전계 및 등전위선이 집중된다 [1]. 물질의 유전율 값은 1에서 10 이하의 범위 내에서 대부분 결정되기 때문에 두 절연체 간 유전율 비는 최대 10 정도에 불과하다. 그러나 DC 전계분포를 결정짓는 도전율은 다르다. 절연체의 도전율 값의 범위는 매우 폭넓기 때문에 두 절연체 간 도전율 비는 크기는 100배, 혹은 그 이상이기 때문에 유전율 비에 비해 훨씬 큰 값을 갖는다. 이로 인해 두 절연체가 맞닿는 계면에서의 DC 등전위선 및 전계분포는 AC 등전위선 및 전계분포보다 훨씬 왜곡이 심한 등전위선 및 전계분포를 형성한다. 즉, 이러한 현상으로 인해서 전력기기의 절연설계는 전압종류에 따라 상이한 설계방식이 요구된다. 따라서 AC용으로 개발된 전력기기를 DC 환경에 곧바로 적용할 수 없기 때문에 DC용 전력기기는 DC 환경에 적합한 절연설계가 선행되어야 한다.

B. 슬립 온형 기중중단 접속함 구조

AC용 슬립 온형 기중중단 접속함의 DC 적용을 위한 절연설계를 수행하기 위해 초기모델의 구조와 절연물의 종류를 파악할 필요가 있으며 이를 Fig. 1에 나타내었다. 슬립 온형 기중중단 접속함은 내부절연물로 슬립 온 스트레스 콘 및 절연유만을 사용하는 간단한 방식을 채택하고 있다. 종래의 콘덴서 콘 방식이나 에폭시 및 스프링 유닛을 사용하는 방식에 비해 시공시간이 단축되었고 접속환경의 영향을 최대한 줄이면서 접속공의 전문 기술력에 따른 접속품질의 편차를 완화하는데 장점이 있다. Table 1에는 슬립 온형 기중중단 접속함의 주

요 요소의 명칭 및 기능이 제시되었다.

C. 도전율과 온도의 관계

기존 AC 기중 종단접속함의 DC 적용 가능성을 평가하기 위한 DC 전계해석을 수행하기 위해서는 기중 종단접속함 내 절연물의 체적도전율에 대한 정보가 필요하다 [2-4]. 기중 종단접속함은 옥외에서 설치되어 외기 조건에 따라 온도 편차가 존재하므로 접속함 내 절연물은 온도에 따라 체적도전율이 다를 수 있다. 즉, 단일 절연물로만 이루어진 구조에서도 온도편차가 발생하여 절연물의 도체 부근 온도는 상승하는 반면, 접지 부근은 상대적으로 낮은 온도를 갖는다. 복합 절연물로 이루어진 슬립 온형 기중 종단접속함도 마찬가지로 내부 도체 부근은 약 90℃까지 상승하는 반면, 기중과 맞닿은 웨드 부근은 상온(20℃)에서 크게 변하지 않는다. 또한 온도편차의 발생으로 인해 도전율 값의 역전이 발생하기도 한다. 도전율 값의 역전으로 인해 전계의 역전현상까지 발생할 수 있기 때문에 반드시 온도분포 편차를 고려한 DC 전계해석이 이루어져야 한다.

따라서 각각의 절연물의 온도별 체적도전율에 대해 문헌 조사가 선행되어야 한다 [2-4]. 기중 종단접속함 내 절연물은 접속하는 케이블 절연물인 XLPE, 스트레스 콘에 사용되는 SIR, 접속함 내부의 절연유, 외부 애관은 에폭시 절연물로 구성된다. 종류가 무수히 많은 에폭시를 제외한 나머지 절연물은 보고된 여러 가지 논문자료에 의해 온도별 체적도전율 수식을 도출할 수 있었다. 각 절연물의 온도별 도전율 정보는 Fig. 2에 제시되었다. 아래의 식 (1)은 온도(T)에 따라 가변하는 도전율을 나타내며 절연물에 따라 다른 K₁, K₂ 값을 갖는다.

$$\sigma(T) = K_1 \exp(K_2 \cdot T) \tag{1}$$

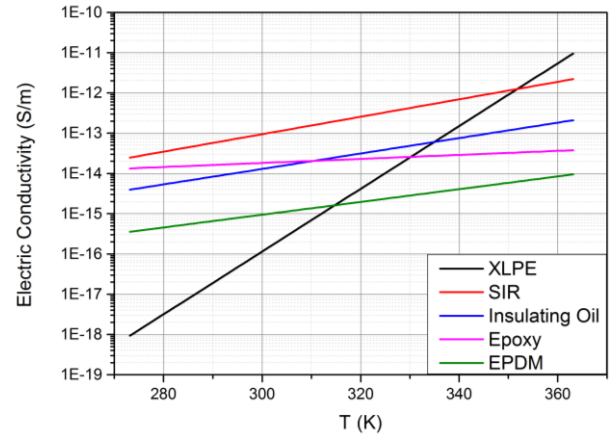
D. 시뮬레이션 결과 및 분석

1) AC와 DC 전계분포 비교

먼저 슬립 온형 기중 종단접속함 초기모델의 AC와 DC 전계해석을 시뮬레이션을 통해 수행하였다. 추가적으로 온도변화를 고려한 열 해석 반영 여부에 따른 정상상태 시와 극성반전 후의 DC 전계분포를 비교하였으며 시뮬레이션 툴로는 Comsol Multiphysics를 활용하였다. 전계해석을 수행하여 확인하고자 하는 점은 다음과 같다.

- AC/DC 전계해석을 수행하여 AC 전계와 DC 전계 특성 비교 분석
- 열 해석 반영 여부에 따른 정상상태 및 극성반전 시 DC 전계 특성 확인

모든 AC/DC 전계해석에서 고압부에는 AC 선간전압 154 kV를, DC는 AC 선간전압 154 kV에 상응하는 상전압 DC 89 kV를 케이블 도체 측에 입력하였고, 접지는 반도체층에 지정하였다. 전계해석 시 극심한 전계집중이 발생할 수 있는 부분을 선정하여 최대 전계강도 값을 측정하였다. 전계집중이 극심한 부분은 기중 종단접속함



	K ₁	K ₂
XLPE	4.84E-40	1.79E-07
SIR	2.96E-20	4.99E-08
Epoxy	5.71E-16	1.15E-02
Insulating Oil	2.29E-20	4.42E-02

Fig. 2. Electrical Conductivity considering Temperature of Insulating Material

이 실제 운전 시 절연과괴로 이어질 수 있기 때문이다. 상기 슬립 온형 기중 종단접속함 구조에서 전계가 가장 집중될 것으로 사료되는 부분은 삼중점과 스트레스 콘의 연면이다. 일반적으로 전계는 도체와 가장 가까운 위치의 삼중점에 가장 집중되기 때문에 최대 전계강도 E_{n,max}의 측정지점으로써 케이블 절연체 XLPE와 스트레스 콘, 반도체층이 동시에 만나는 삼중점을 선정하였다. 또한, 도체와 접지역할의 반도체층 사이에 등전위선의 왜곡 정도를 확인하기 위해 도체와 반도체층 사이에 존재하는 스트레스 콘의 계면을 선택하여 연면 최대 전계강도 E_{t,max}를 측정하였다. E_{t,max}가 높을수록 등전위선이 밀집한 형태를 보인다. 두 가지 최대 전계강도 측정지점은 Fig. 3에 나타내었다.

슬립 온형 기중 종단접속함의 AC 및 DC 전계해석 결과는 Fig. 4에 나타내었다 제시된 Fig. 3의 전계해석 결과의 대칭축을 기준으로 좌측은 전계분포를, 우측은 등전위선 분포를 나타내며, 그림 좌측 상단부의 값은 도체와 도체를 감싸고 있는 절연체 XLPE, 반도체층을 감싸고 있는 스트레스 콘 SIR로 구성된 삼중점 부근의 최대 전계강도를 나타낸다. 전계분포의 범례범위는 0~5 kV/mm로 설정하였으며 등전위선 분포는 인가전압 대비 10~90%의 전압값을 10% 간격으로 나타내었다.

AC 전계해석 결과, Fig. 4(a)와 같이 SIR의 스트레스 콘이 전계완화 역할을 함으로써, 스트레스 콘을 기점으로 등전위선이 넓게 분포함을 확인할 수 있었다. 삼중점에서의 최대 전계강도 E_{n,max}는 8.23 kV/mm, 스트레스 콘 연면 최대 전계강도 E_{t,max}는 1.11 kV/mm이었다.

DC 전계해석은 열 해석 반영 여부에 따른 차이점을 비교 및 분석하기 위해 두 가지 모두 수행되었으며, 해석결과는 그림 fig. 4(b), (c)에 제시되었다. 먼저 열 해석을 반영하지 않은 DC 전계해석 결과, E_{n,max}는 4.23 kV/mm, E_{t,max}는 0.05 kV/mm이었으며 AC 전계분포의 최대 전계강도보다 낮은 값을 가졌다. XLPE 내부에 전계

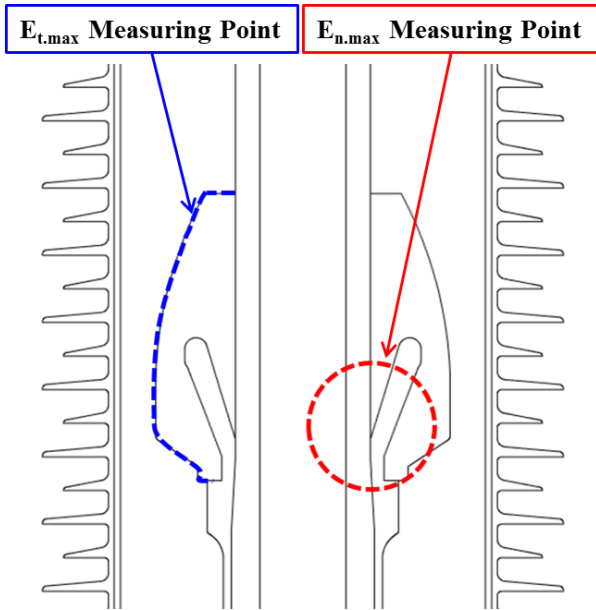


Fig. 3. Measuring Point of Maximum Electric Field Intensity

가 모두 집중되어 삼중점이나 연면 경로에는 크게 영향을 주지 않는다고 판단하였다. 등전위선이 전부 케이블 절연물인 XLPE에 밀집되어 있는 이유는 XLPE가 모든 절연물 중 도전율이 가장 낮을 뿐만 아니라 전계완화 역할을 해야 하는 SIR의 스트레스 콘 도전율이 XLPE 대비 약 2,300배 크기 때문에 AC 전계해석 결과와 같이 전계 완화 역할을 수행하지 못하였다. 비록 최대 전계강도는 AC 대비 낮게 나왔지만 전체적인 등전위선 분포를 봤을 때 전계의 방향이 반경방향이 아닌 하강방향이기 때문에 종단접속함 상부 도체로부터 XLPE 연면을 타고 절연과괴가 발생할 확률이 높다. 연면 절연내력이 관통 절연내력의 1/25 수준이라는 점에서 이러한 전계분포는 더욱 취약한 전계특성이라고 볼 수 있다.

도체에 90°C와 접지에 20°C를 적용한 열 해석을 반영한 DC 전계해석 결과, 전체적인 등전위선은 마치 AC 전계해석 결과와 유사하였지만, 스트레스 콘에 등전위선이 AC보다 조밀하게 분포하였다. 이러한 이유는 90°C일 때 XLPE의 도전율이 모든 절연물 중 가장 높기 때문에 전계가 가장 낮아져 등전위선이 분포하지 않고, 70~80°C 온도 구간에 위치하는 스트레스 콘 SIR의 도전율은 예 폭시 다음으로 도전율이 낮아 전계집중을 유발하기 때문에 스트레스 콘 쪽에 등전위선이 밀집하여 분포하였다. $E_{n,max}$ 는 11.82 kV/mm, $E_{t,max}$ 는 1.17 kV/mm로써, 열 해석을 반영하지 않았을 때 보다 각각 179%, 2,240% 높은 전계 집중정도를 보였다. 이와 같이 AC 및 열 해석 반영 여부에 따른 DC 전계해석은 매우 상이한 결과를 나타낸다. 실제 기중 종단접속함은 옥외에 설치되어 운전되기 때문에 외기 온도조건을 고려한 절연설계를 수행해야 한다. 따라서 열 해석을 고려한 DC 전계해석을 통해 최적 절연설계를 적용해야 한다.

또한, DC 전압은 정상상태 외에도 극성반전 상황이 존재하므로 정상상태와 극성반전 시 전계해석을 모두 수행하여 전계강도를 비교하여 어느 구간이 더욱 극심한 지 확인해야 한다. 따라서 슬립 온형 기중 종단접속

함은 어느 구간에서 전계집중이 더욱 극심한지 알아보기 위해 DC 정상상태, 스위칭 오프, 극성반전 시의 전계 및 등전위선 분포를 비교하였으며 Fig. 5에 제시하였다. 정량적으로 비교했을 때, 정상상태 시 $E_{n,max}$ 및 $E_{t,max}$ 는 극성반전 시 보다 큰 값을 보였다. 이러한 결과로부터 정상상태 DC 전계가 절연설계 시 우선시 되어야 한다는 사실을 확인할 수 있었다.

결과적으로, 열 해석을 반영한 DC 정상상태 시 전계강도가 AC 정상상태와 비교했을 때 대략 1.4배정도 높음으로써 기존 AC용 슬립 온형 기중 종단접속함은 곧바로 DC 환경에 적용할 수 없음을 알 수 있었다. 슬립 온형 기중 종단접속함의 DC 적용을 위해서는 절연 형상 수정을 위한 요소설계를 수행하여 AC 정상상태와 비슷한 전계강도를 보일 수 있도록 해야 한다. 요소설계 시에는 최대 전계강도 $E_{n,max}$ 와 $E_{t,max}$ 가 상대적으로 극성반전 시 보다 높은 정상상태를 기준으로 최대 전계강도를 낮추는 방향으로 진행하였다.

2) 요소설계

기존 AC용 슬립 온형 기중 종단접속함 초기모델의 열 해석을 반영한 DC 정상상태 시 최대 전계강도 $E_{n,max}$ 와 $E_{t,max}$ 는 각각 11.82 kV/mm, 1.17 kV/mm이었다. 이는 AC 정상상태 시에 비해 최대전계강도가 약 3.5 kV/mm, $E_{t,max}$ 는 약 0.5 kV/mm 정도 DC의 최대 전계강도가 다소 높았다. 따라서 DC 환경에 실제 적용하여 사용하기 위해서는 최적 형상 설계를 위한 요소 설계를 수행함으로써 최대 전계강도를 낮출 필요가 있다. 또한 진술한 바와 같이, 정상상태 시 최대 전계강도 값이 극성반전 시 전계강도보다 더욱 높았기 때문에 DC 정상상태 최대 전계강도 값을 낮추는 방향으로 연구를 수행하였다. 기존 AC용 슬립 온형 기중 종단 접속함 초기모델을 기준모델로 설정하여 총 4 가지의 요소설계를 수행하였다. 4 가지 요소설계는 반도체층 각도 조절, 반도체층 스케일 조절, 스트레스 콘 스케일 조절, 반도체층 및 스트레스 콘 조합 위치 조절을 통해 수행하였으며 Fig. 6에 나타내었다. 각 요소 설계에 대한 과정과 전계해석 결과는 해당 항에 제시하였다.

a) 요소 I: 반도체층 각도 조절

첫 번째로는 반도체층 각도 조절을 통해 삼중점 및 연면 최대 전계강도 값을 낮추기 위한 요소설계를 수행하였다. AC 전계해석 결과, 스트레스 콘을 기점으로 등전위선이 넓게 분포하였다. 그러나 열 해석을 반영한 DC 전계해석 결과에서는 등전위선을 급격하게 스트레스 콘 쪽으로 집중시켰으며 이로 인해 오히려 삼중점의 최대 전계강도 $E_{n,max}$ 를 크게 증가하였다. 따라서 삼중점을 통과하는 등전위선 분포의 변화를 주고자 기준모델 대비 반도체층의 각도를 -17°, -8.5°, +8.5°, +17°로 가변시켜 최대 전계강도 $E_{n,max}$, $E_{t,max}$ 를 측정하였으며 전계해석 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 전계해석 결과, 기준모델 대비 반도체층 각도를 양의 방향으로 증가 시킬수록 $E_{n,max}$ 와 $E_{t,max}$ 모두 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 반대로 각도를 양의 방향으로 증가 시킬수록 $E_{t,max}$ 는 모두 감소하였지만, $E_{n,max}$ 는 -8.5°인 경우에만 개선되었다. 한편, 반도체

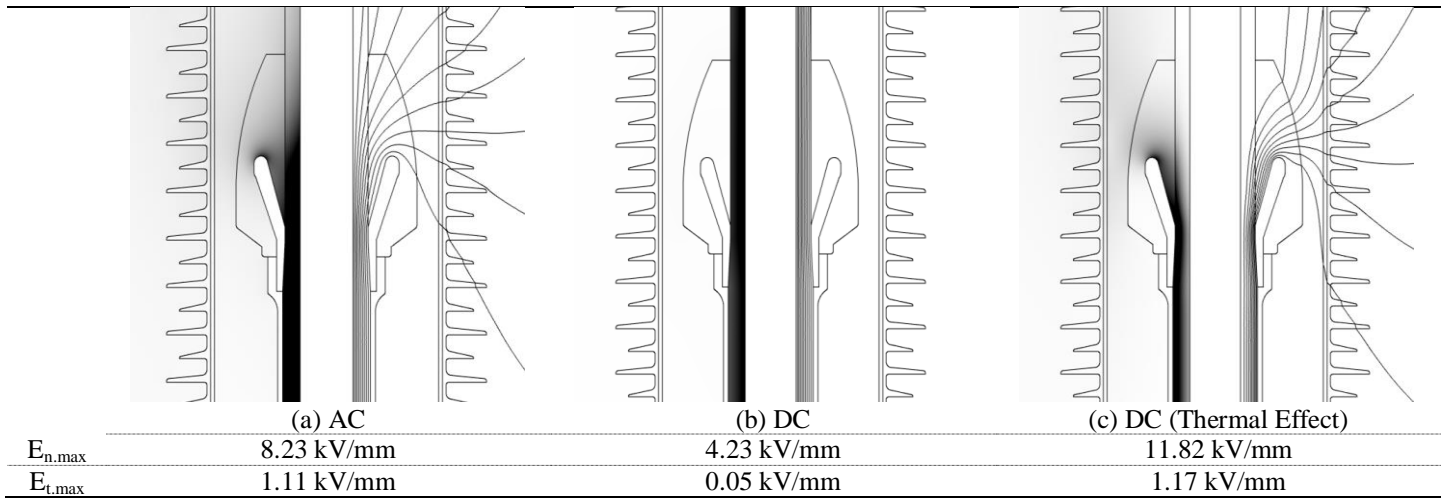


Fig. 4. AC/DC Electric Fields of Initial Model

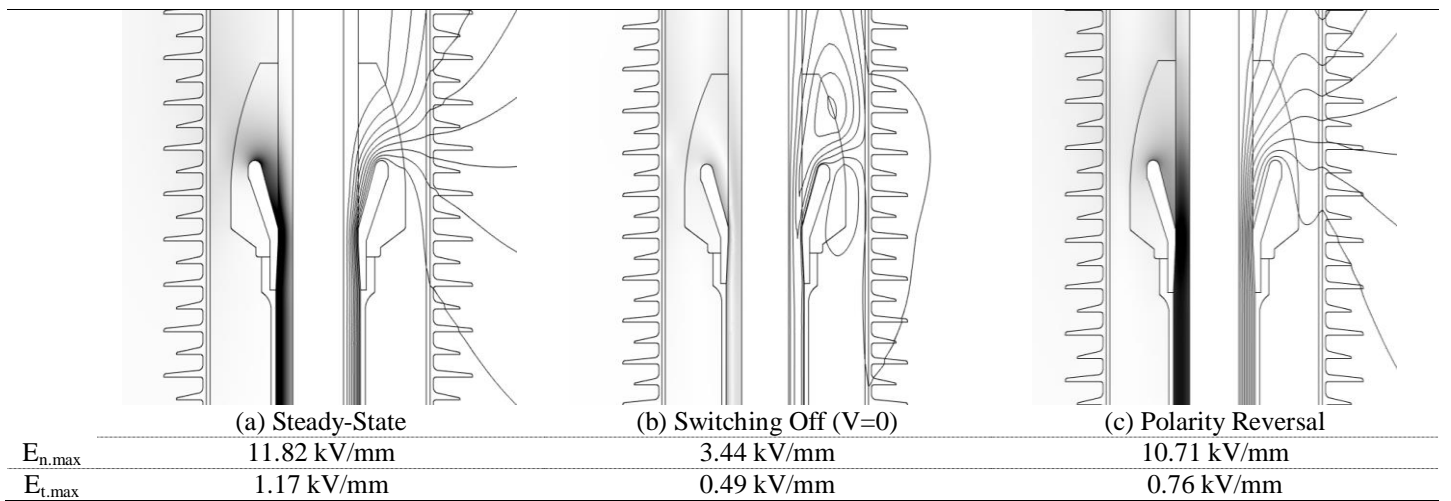


Fig. 5. Comparison on DC Steady-State and Polarity Reversal

전층의 각도를 가능한 한 감소시켜 케이블 절연체인 XLPE와 평행을 이룰 때는 오히려 최대 전계강도 $E_{n,max}$ 가 증가하는 경향을 보였다. 따라서 개선모델 형상 설계시에 반도체층 각도는 -8.5° 인 경우가 전계집중을 최소화할 수 있는 방법이라고 판단하였다.

b) 요소 II: 반도체층 스케일 조절

두 번째로는 반도체층 스케일 조절을 통해 삼중점 및 연면 최대 전계강도 값을 낮추기 위한 요소설계를 수행하였다. AC 전계해석 결과, 반도체층은 스트레스 콘을 기점으로 등전위선을 넓게 분포시키는 역할을 수행하였다. 그러나 열 해석을 반영한 DC 전계해석 결과에서는 등전위선을 급격하게 스트레스 콘 쪽으로 집중시켰으며 이로 인해 오히려 삼중점의 최대 전계강도 $E_{n,max}$ 를 크게 증가하였다. 따라서 삼중점을 통과하는 등전위선 분포의 변화를 주고자 기준모델 대비 반도체층의 스케일을 80, 90, 110, 120%로 가변시켜 최대 전계강도 $E_{n,max}$, $E_{t,max}$ 를 측정하였으며 전계해석 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 전계해석 결과, 삼중점 최대 전계강도의 큰 개선은 없었다.

반도체층 스케일을 80%로 적용한 도면을 제외한 나머지 요소는 오히려 삼중점 최대 전계강도 값이 증가하

였다. 또한, 스케일이 상승할수록 연면 최대 전계강도 $E_{t,max}$ 값 역시 증가하는 경향을 나타냈다. 80%의 반도체층 스케일 적용 시 $E_{n,max}$ 와 $E_{t,max}$ 의 감소폭이 각각 0.40%, 14.97%로써 전계 및 등전위선의 집중을 가장 큰 폭으로 완화시켜주었다. 반도체층 스케일이 작을수록 등전위선이 스트레스 콘에서 넓게 퍼져 분포되므로 $E_{t,max}$ 의 감소폭이 매우 컸다. 따라서 80%의 반도체층 스케일이 가장 전계집중을 최소화할 수 있는 방법이라고 판단하였다.

c) 요소 III: 반도체층 및 스트레스 콘 조합 위치 조절

세 번째로는 반도체층 및 스트레스 콘 조합 위치 조절을 통해 삼중점 및 연면 최대 전계강도 값을 낮추기 위한 요소설계를 수행하였다. 본 항에서는 반도체층 및 스트레스 콘 조합 위치 조절을 기준모델 대비 -240, -120, +120, +240 mm로 가변시켜 최대 전계강도 $E_{n,max}$, $E_{t,max}$ 를 측정하였으며 전계해석 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 전계해석 결과, 반도체층 및 스트레스 콘 조합 위치 조절은 최대 전계강도의 완화에 아무런 영향을 미치지 못하였으며 모든 도면에서 삼중점 및 연면 최대 전계강도 값의 변화가 나타나지 않았다. 모든 요소에서 $E_{n,max}$ 와 E 값이 거의 일정하게 측정되었다. 이는 단지 반도체

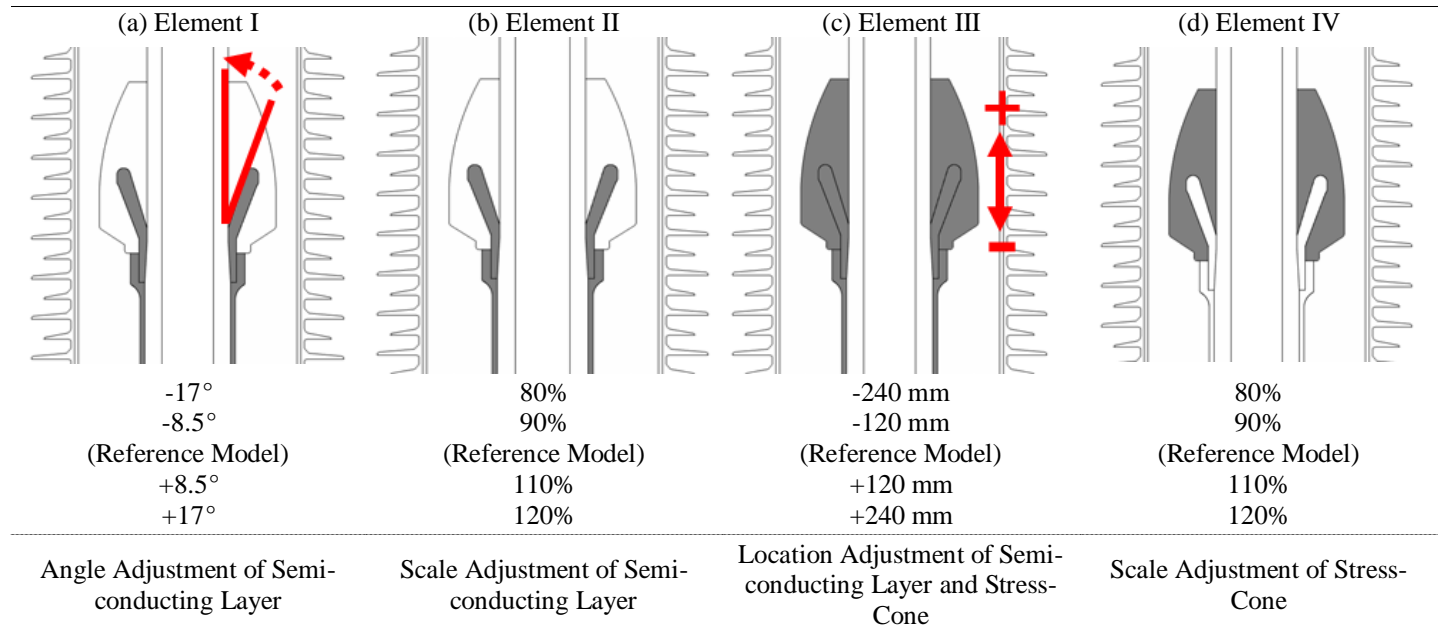


Fig. 6. Element Design Contents

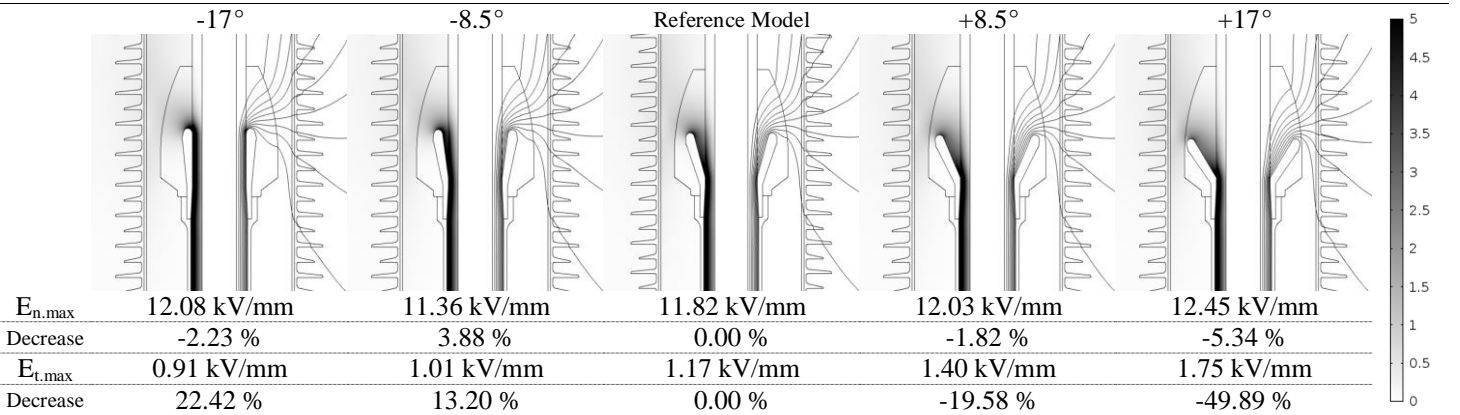


Fig. 7. Electric Field and Equipotential Line (Element I: Angle Adjustment of Semi-conducting Layer)

층 및 스트레스 콘 조합의 높낮이의 차이만 있을 뿐, 등전위선 분포에 아무런 영향을 주지 못하였기 때문이다. 따라서 개선모델 형상 설계 시에 반도체층 및 스트레스 콘 조합의 위치는 변화시키지 않고 기준모델을 그대로 적용하는 것이 전계집중을 최소화할 수 있는 방법이라고 판단하였다.

d) 요소 IV: 스트레스 콘 스케일 조절

마지막으로는 스트레스 콘 스케일 조절을 통해 삼중점 및 연면 최대 전계강도 값을 낮추기 위한 요소설계를 수행하였다. DC 전계해석 결과를 살펴보면, 반도체층을 지나 삼중점을 기점으로 스트레스 콘 쪽으로 크게 쏠린 등전위선이 스트레스 콘 연면에 전체적으로 끌고 루 펼쳐져 진행하지 못하고 일부 지역으로만 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 스트레스 콘 스케일 조절을 통해 스트레스 콘 스케일과 등전위선 분포 간 관계를 파악하기 위해 본 항의 요소설계를 수행하였다. 스트레스 콘 스케일을 80%, 90%, 110%, 120%로 가변시켜 최대 전계강도 $E_{n,max}$, $E_{t,max}$ 를 측정하였으며 전계해석 결과는 Fig. 10에 나타내었다.

전계해석 결과, 기준모델 대비 스트레스 콘 스케일이 감소할수록 $E_{n,max}$ 의 개선이, 스트레스 콘 스케일이 증가할수록 $E_{t,max}$ 의 개선되었다. 다만, $E_{n,max}$ 의 감소폭은 최대 1.72%로써 크지 않았고 $E_{t,max}$ 의 감소폭은 120%의 스트레스 콘 스케일로 설정했을 때 22.86%의 큰 감소폭을 나타냈다. 이러한 이유는 스트레스 콘 스케일이 커짐에 따라 연면 거리가 증가하였기 때문이다. 따라서 개선모델 형상 설계 시 스트레스 콘 스케일 조절은 기준모델 대비 120%로 설정하는 것이 전계집중을 최소화할 수 있는 방법이라고 판단하였다.

e) 요소설계 결과

슬립 운형 접속함의 4 가지 요소설계 항목 중 최대 전계강도 값을 가장 큰 폭으로 감소시킨 도면을 각각 하나씩 선정하였으며, 선정된 도면과 각 도면의 최대 전계강도 및 감소폭은 Table 2에 제시되었다. 요소 I의 반도체층 각도 조절을 통해 $E_{n,max}$ 와 $E_{t,max}$ 를 각각 3.88%, 13.20% 완화시킬 수 있었으며 요소 II의 반도체층 스케일 조절을 통해 반도체층 스케일이 기준모델 대비 80%일 때 최대 전계강도를 감소시키는 것을 확인할 수 있

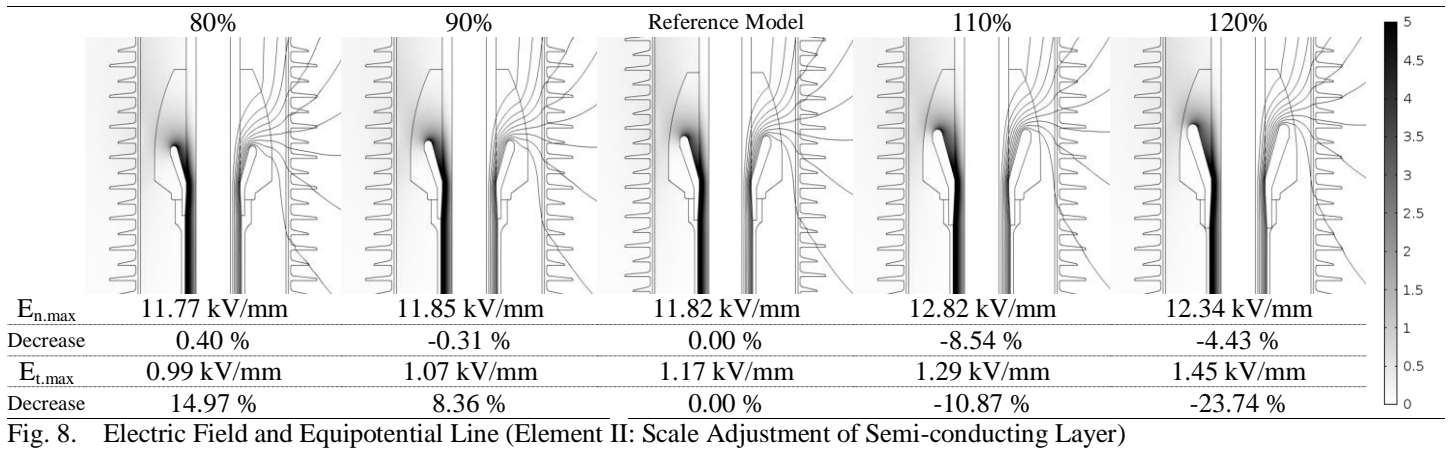


Fig. 8. Electric Field and Equipotential Line (Element II: Scale Adjustment of Semi-conducting Layer)

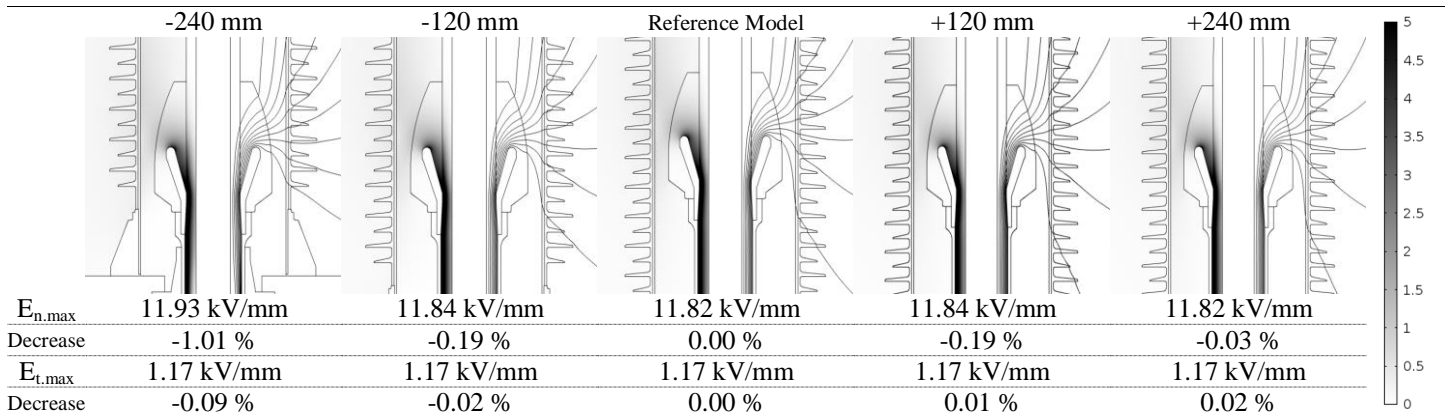


Fig. 9. Electric Field and Equipotential Line (Element III: Location Adjustment of Semi-conducting Layer and Stress-Cone)

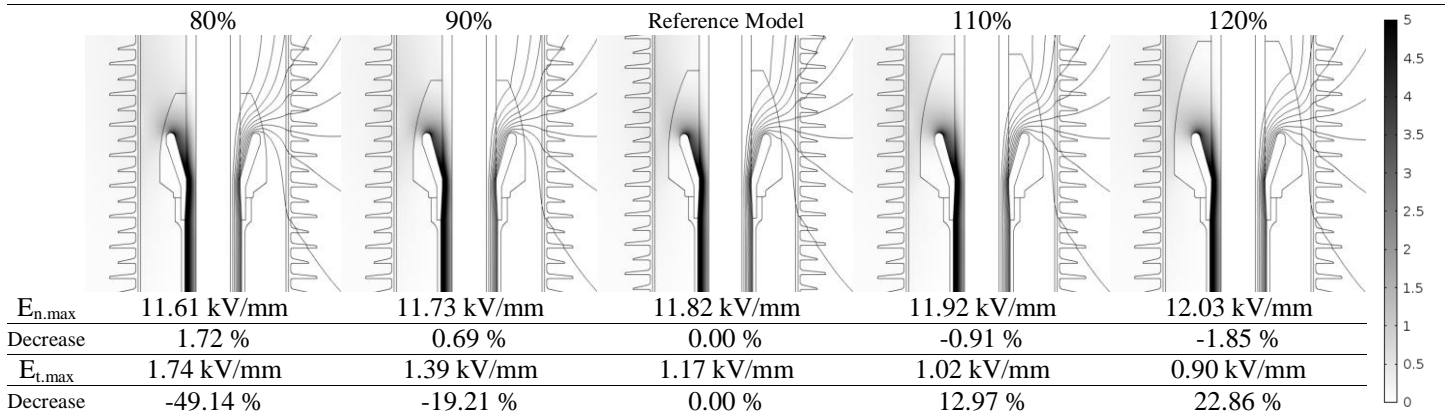


Fig. 10. Electric Field and Equipotential Line (Element I IV: Scale Adjustment of Stress-Cone)

었다. 요소 III의 반도체층 및 스트레스 콘 조합 위치 조절은 기준모델 적용 시 가장 전계집중이 덜했으며 요소 IV의 스트레스 콘 스케일 조절을 통해 기준모델 대비 120%로 설정한 요소설계 시 가장 우수한 양상을 띠었다. 따라서 요소설계를 통해 도출한 개선된 도면을 종합하여 개선모델 형상 설계를 수행하였으며, 개선모델 형상을 적용한 DC 전계해석을 다음 항에서 수행하였다.

f) 개선모델 형상설계

1항부터 4항까지 수행한 슬립 운형 기중 종단접속함 요소설계를 기반으로 개선모델 형상을 도출하였다. 4가지의 요소설계를 통해 삼중점 및 연면 최대 전계강도

를 최소화할 수 있는 도면을 종합하여 개선모델 형상을 도출하였으며, 개선모델 형상에 대한 DC 전계해석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 정상상태 시 개선모델의 삼중점 최대 전계강도는 기준모델 대비 2.01% 개선되었으며, 연면 최대 전계강도는 기준모델 대비 36.68% 개선되었다. 요소설계를 통해 전계집중을 감소시킬 수 있는 형상을 설계하였으나, AC 전계해석 결과인 연면 전계강도 1.11 kV/mm보다는 33.3% 작았지만 삼중점 최대 전계강도 8.23 kV/mm보다 아직 43.6% 크다는 점에서 부분적인 요소설계가 아닌 DC 환경에 적합한 전혀 다른 형상 설계를 통한 근본적인 대책이 필요할 것으로 사료된다.

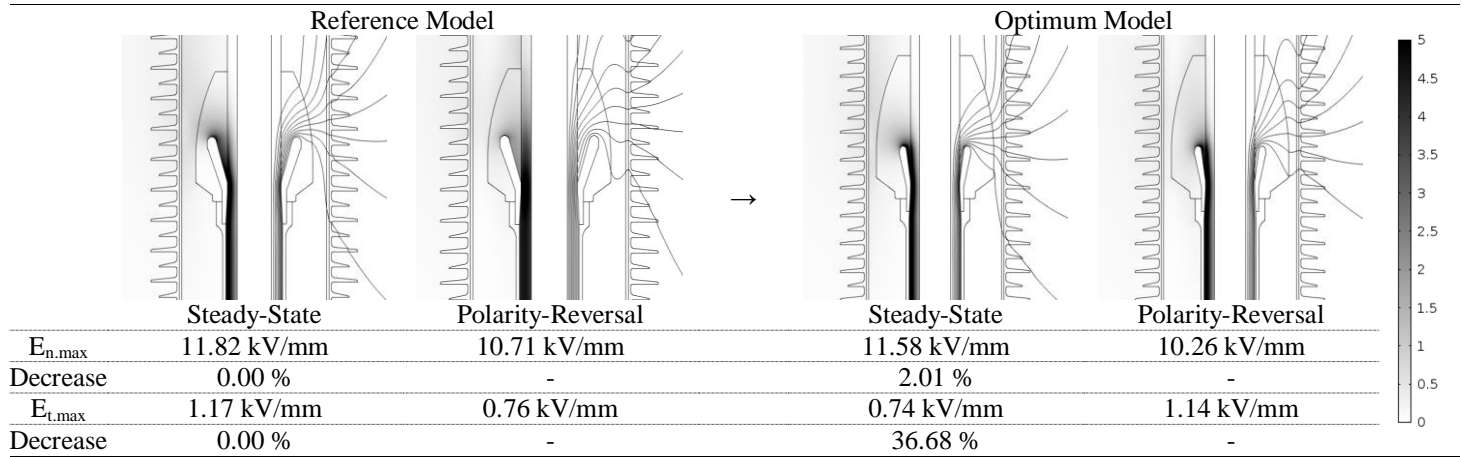


Fig. 11. Electric Field and Equipotential Line of Optimum Model

Table 2. Element Design Results of Slip-on Type Outdoor Termination

Element Design		(a) Element I	(b) Element II	(c) Element III	(d) Element IV
		-8.5°	80%	Reference Model	120%
$E_{n,max}$	Electric Field	11.36 kV/mm	11.77 kV/mm	11.82 kV/mm	12.03 kV/mm
	Decrease	3.88 %	0.40 %	0.00 %	-1.85 %
$E_{t,max}$	Electric Field	1.01 kV/mm	0.99 kV/mm	1.17 kV/mm	0.90 kV/mm
	Decrease	13.20 %	14.97 %	0.00 %	22.86 %

III. 결론

본 논문에서는 슬립 온형 기중 종단접속함의 AC/DC 전계해석 수행과 더불어 열 해석 반영 여부에 따른 DC 전계분포를 비교하였다. 열 해석을 반영한 DC 전계해석 결과, 최대 전계강도가 크게 상승함을 확인할 수 있었다. 따라서 DC 환경에 적용하기 위해서는 최대 전계강도를 낮출 수 있는 형상 변환이 필요하다고 판단되어 4 가지 요소설계를 수행하였으며 이 통해 전계집중을 감소시킬 수 있는 개선된 형상을 도출하였다. 그 결과 $E_{n,max}$ 와 $E_{t,max}$ 는 기준모델 대비 각각 2.01%, 36.68%의 최대 전계강도를 감소시켰다. AC $E_{t,max}$ 보다는 33.3% 감소되었지만, AC $E_{n,max}$ 보다는 아직 43.6% 크다는 점에서 부분적인 형상변환만으로는 한계가 있다고 판단하였다. 따라서 기중 종단접속함 내 베리어 설치, 혹은 케이ابل 절연물을 기존 XLPE에서 MI로 교체하는 등의 설계가 필요할 것으로 사료된다. 또는 문헌조사를 통해 도출한 XLPE 도전을 값이 온도가 증가함에 따라 다른 절연물에 비해 매우 큰 폭으로 상승하여 지나치게 전계를 집중시키기 때문에 허용범위 내에서 낮추는 것도 대안이 될 수 있다. 결과적으로, DC 환경에 적용하기 위해서는 기존 형상의 변환이 아닌 근본적인 설계 개념의 변화가 반드시 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by Korea Electric Power Corporation (KEPCO) through Korea Electrical Engineering & Science Research Institute.(grantnumber: R14XA02-12)

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2013R1A1A2 012288).

REFERENCES

- [1] F.H.Kreuger "Industrial High DC voltage", Delft University Press, 1995.
- [2] I. Beyer, P. H. F. Morshuis, "Conduction Current Measurements on Polycarbonates Subjected to Electrical and Thermal Stress", Proceedings CEDP, 2000, pp. 617-621.
- [3] G. C. Montanai, "The Electrical Degradation Threshold of Polyethylene Investigated by Space Charge and Conduction Current Measurements", IEEE Transaction on DEI, Vol. 7, No. 3, 2000, pp. 309-315.
- [4] B. Sanden, E. Udsrad, R. Hegerberg, "Space Charge Accumulation and Conduction Current in XLPE Insulation", DMMA, Conf Publ 430, 1996, pp. 368-37