22.9kV 변압기용 절연커버의 전기적 안전성에 관한 연구

한기붕 · 한운기 · 이대종

한국전기안전공사 전기안전연구원

1. 서 론

현재 소규모 공장, 빌딩 등 대부분의 수용가에서 사용하고 있는 22.9kV 수 · 변전설비에서 발생한 감전사고의 최근 3년간('97~'99년) 통계를 살펴보면, 매년 100여명의 감전재해자가 발생하였고, 이는 전체 감전사고의 11.3%를 차지하고 있어 타 설비에 비해 감전사고 점유율이 높음을 알 수 있다. 이들 사고원인을 분석하였을 때 대부분 COS 2차 모선과 변압기간의 충전부에서 84.4%가 발생한 것으로 나타났다. 이와 같은 감전사고는 노출충전부에 접근 또는 접촉에 의해 발생되고 있는데, 이러한 감전사고를 줄이기 위해서는 수 · 변전설비의 노출충전부에 대한 절연처리가 선행되어야 한다. 최근 신설되는 대부분의 수용가에서는 모선 및 기기간의 접속단자부의 노출충전부를 절연처리 하고 있지만, 감전사고가 줄어들지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 감전사고가 많이 발생하고 있는 변압기의 노출단자 접속부에 감전보호용으로 사용 중인 절연커버에 대한 구조적인 문제점과 절연처리후의 안전성여부에 관하여 모의실험 및 실증실험을 통하여 알아보고 그에 따른 최적의 예방대책(안)을 제시하고자 한다.

2. 실험방법

22.9kV 수 · 변전설비에서 감전사고가 가장 많이 발생하는 변압기 1차 단자접속부에 감전사고 예방을 위하여 사용되는 절연커버에 대해 구조적인 문제점과 실제 설치상태에서의 안전성을 평가하기 위하여 그림 1에 나타낸 바와 같이 감전위험성이 높은 전선 인입부분(A)과 애관과의 접촉부인 하단부분(D), 그리고 전계가 집중되는 나사부분(B)과 연결단자의 하단부분(C)으로 구분하여 변압기 단자간의 섬락전압을 각각 측정하였다.

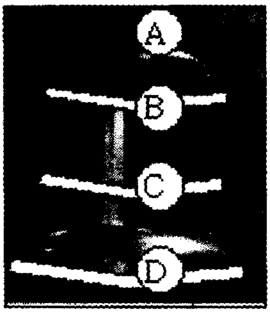


그림 1. 절연파괴 접속부위

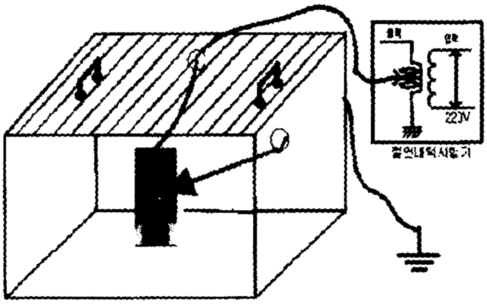


그림 2. 절연파괴 시험 장치

이와 같은 실험은 정상상태와 우수상태 등 환경변화에 따른 실험도 병행하였다. 그림 1에 변압기 단자부간의 섬락전압 측정부위를 나타냈으며, 여기에 사용된 접촉전극은 직경 15(mm)인 둥근 테 모양의 도체로 접촉부위를 중심으로 인체가 접촉되는 상황과 동일한 압력으로 원형 설치하였으며, 그림 2와 같이 구성된 시험 장치를 이용하여 전압을 인가하였다. 그리고 측정된 섬락전압은 접촉되는 모든 방향에 대한 최소 섬락전압을 나타낸다. 접촉부위별 섬락전압은 감전사고에 대한 안전 측면을 고려하여 10회 이상 측정하였으며, 섬락이 발생한 값 중 최저치로 하였다.

그리고 실험에 사용된 시료는 그림 3에 나타낸 바와 같이 현재 22.9 kV 수·변전설비에서 변압기용 절연커버로 사용되고있는 제품을 조사하여 시료로 선정하였다.

(a) 시료(1) (b) 시료(2) (c) 시료(3) (d) 시료(4) (e) 시료(5)

그림 3. 실험에 사용된 시료

3 결과 및 고찰

(1) 절연커버의 구조적 문제점

변압기용 절연커버의 구조적 문제점은 그림 4-(a)에서 보는 바와 같이 변압기용 부싱의 애관 크기보다 절연커버의 크기가 작아 절연커버를 변압기 부싱 위에 올려놓은 형태로 사용된다. 이러한 경우 바람 또는 기타 외부 충격으로 인해 절연커버가 고정되지 않아, 유동이 쉽게 발생하여 충전부가 쉽게 노출될 수 있다.

(a) 애관과 절연커버 크기 차이

(b) 전선 인입구의 틈이 발생

그림 4. 절연커버의 구조적 문제점

그리고 그림 4-(b)에서는 전선 인입부분에서 절연커버와 전선 사이의 틈이 넓어서 이러한 틈 사이로 해안가에서는 염분, 공장 지대에서는 철분 등의 분진이 유입되어 절연커버 내부에 축적되기 때문에 자연적 제거가 어렵고, 시간이 지남에 따라 내부에 축

적되고, 단자대를 부식시키는 요인으로 작용하게 되어 절연저항값을 저하시켜 감전사고는 물론 절연커버 및 애자 소손의 원인이 될 수 있다.

(2) 정상 상태에서의 접촉부위별 섬락 특성

그림 3과 같은 5종류의 시료를 대상으로 접촉부위별(A, B, C, D)로 섬락전압을 비교·분석한 결과 분진, 습기 등의 절연성능을 악화시키는 외부 이물질이 축적되지 않는 초기의 정상상태에서는 그림 5에서 보는 바와 같이 섬락전압이 낮은 부분은 전선 인입부분(A)과 하단부분(D)으로 나타났다. 그러나 (4)번 시료는 연결단자의 상단부분(B)에서 20.4(kV)로 가장 낮은 섬락전압을 보였다. 이와 같이 (4)번 시료가 상대적으로 섬락전압이 낮게 나타난 이유는 커버의 구조적 차이점으로 중간부분의 홈을 통하여 절연파괴가 쉽게 발생하기 때문으로 분석된다.

시료의 접촉부위별 섬락특성을 살펴보면, 접촉부분 A에서는 (1)번 시료가 가장 높은 전압을 보였으며, 그 다음으로 (5), (4), (3), (2)번 순으로 확인되었다. 접촉부분 B에서는 (2), (3), (1), (5)번 시료 순으로 나타났으며, (4)번 시료는 섬락전압이 상대적으로 다른 시료와 많은 차이를 보였다. 접촉부분 C에서는 (5), (3), (1), (2), (4)번 시료 순으로 나타났고, 접촉부분 D에서는 (4)번 시료가 높은 섬락전압을 나타냈고, 그 다음으로 (3), (2), (1), (5)번 시료 순으로 나타났다.

위에서 살펴본 바와 같이 5종류의 시료를 접촉부위별로 섬락전압을 살펴본 결과 최저 20.4(kV)(4)번 시료 B부분에서 최고 39.9(kV)(2)번 시료 B부분의 섬락전압을 보였다. 위의 실험결과로 부터 시료 표면에 절연성능을 악화시키는 이물질이 부착되지 않는 정상적인 상태에서는 절연커버만을 사용하더라도, 22.9(kV) 수·변전설비에 사용되는 변압기의 충전부와 대지사이에 인가되는 13.2(kV)보다 섬락전압이 높게 나타나 변압기의 노출충전부로부터 감전재해를 예방할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 변압기용 절연커버를 사용한 경우, 정상적인 환경 하에서는 감전보호 측면에서는 효과가 있음을 실험을 통하여 확인하였다.

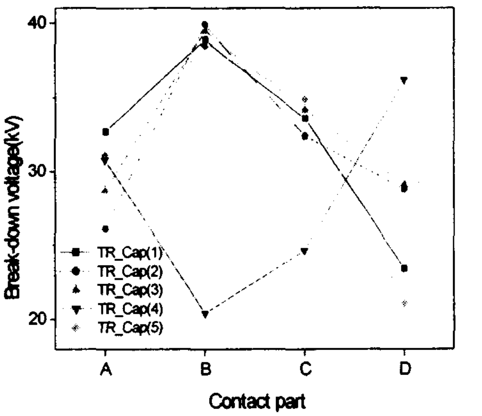


그림 5. 정상상태 접촉부위별 절연파괴전압

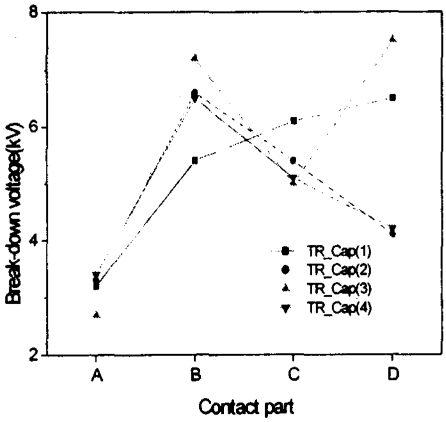


그림 6. 우수기 상태 접촉 부위별 절연파괴전압

(3) 우수기 조건하에서의 접촉부위별 섬락 특성

실제 절연커버를 사용하는 현장의 환경은 염분, 분진, 물·습기에 노출된 곳이 많기 때문에 이러한 환경 요인에 의한 절연내력의 저하정도 및 감전위험성에 대한 검증의 필요성이 있어, 가랑비가 내리는 조건과 유사한 조건에서 절연커버의 절연성능 분석 및 문제점을 파악하고자 한다. 이를 위해 그림 2의 절연파괴 실험장치에 시료상단 400(mm) 높이에서 가랑비 조건과 흡사한 5(㎖/min)의 수도물을 시료위에 균등하게 분사하였고, 시료에 전압이 인가되는 시점은 물의 분사가 시작된 1분 후에 전압을 인가하였다.

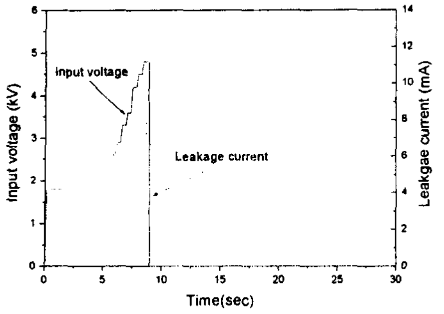
그림 6에서는 (1), (2), (3), (4)번의 시료에 수도물이 분사된 후 접촉부위별 섬락전압을 비교·분석하여 나타냈다. 그림 6에서 나타난 바와 같이, 섬락전압이 가장 낮게 나타난 부위는 전선 인입부분인 (A) 부분으로, 최저 2.7(kV)에서 최고 3.4(kV) 사이에서 섬락이 일어남을 알 수 있다. 그리고 섬락전압이 가장 높은 부분은 (3)번 시료의 하단부위(D)이지만, 이 부분에서도 역시 인가전압 7.5(kV)에서 섬락되어 감전사고 예방에는 효과가 없음을 알 수 있다.

이와 같이 우수기에 섬락전압이 급격히 감소하는 이유는 전선 인입부인 시료 상단부분으로 흘러 들어간 빗물이 전선의 피복을 매체로 하여 단자 접속부에 흘러 들어가고, 최종적으로 애자를 거쳐 외부로 흘러 나가는 구조로 되어 있기 때문으로 분석된다. 따라서, 시간이 경과함에 따라 절연커버 내·외부에 충분한 빗물이 침입하여 절연커버의 절연성능이 약화되어 감전보호 기능을 상실하게 되므로 이 부분에 대한 세밀한 검토가 요구된다.

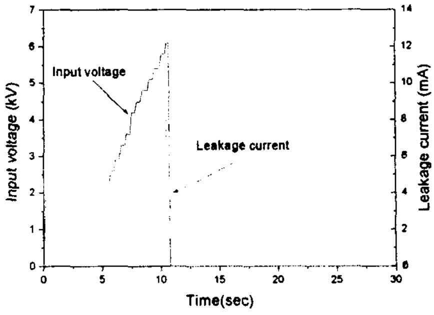
(4) 절연커버 상단부분의 방수처리후의 섬락 특성

실제 외부의 악한 환경과 유사한 조건하에서는 시료 상부를 통한 이슬 또는 물방울이 침투하여 절연내력 저하로 인체가 절연커버에 접촉할 때 감전사고 발생 우려가 있음을 실험을 통하여 확인하였다. 따라서, 위험정도와 문제점을 알아보기 위하여 시료 상단에 물기가 침투되지 않도록 절연테이프로 방수처리 한 후, 이에 따른 섬락전압에 대한 변동특성을 분석하였다. 실험에 사용된 시료는 애관을 완전히 덮은 그림 4의 (1)번 시료를 대상으로 하였으며, 측정부위로는 우수기 조건하에서 섬락전압이 낮게 나타나는 상단부분(A)과 애자와 접촉되는 하단부분(D)을 선정하였다.

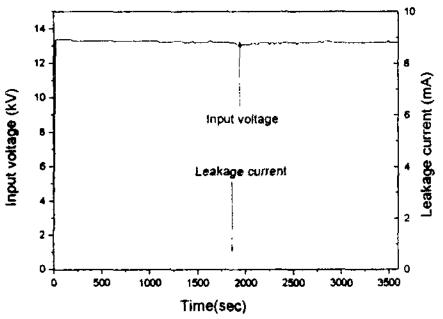
시료의 방수처리 전·후의 성능특성을 분석하기 위해 단자대와 접촉부분 사이에 대지전압 13.2(kV)를 인가하면서 시간대별로 누설전류 및 섬락전압을 측정하였다. 그림 7에서는 가랑비가 내리는 조건과 유사한 환경 하에서 시간경과별 인가전압 및 누설전류 측정결과를 나타냈다. 그림 7-(a), (b)에서 알 수 있는 바와 같이, 상단에 방수처리를 하지 않는 시료에서는 인가전압 13.2(kV)에 도달하기 전인 실험시작 약 8초 후에 4.7(kV)에서 섬락이 발생하였고, 절연커버 하단(D)부위는 실험시작 약 11초후, 6.1(kV)에서 섬락이 발생함을 확인할 수 있었다.



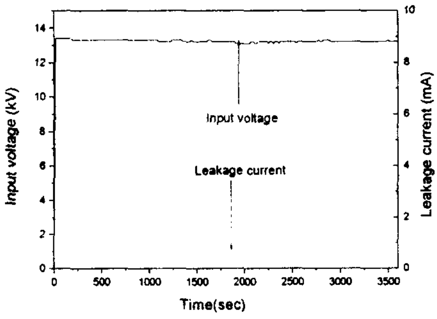
(a) 방수처리전(접촉부위 : A)



(b) 방수처리전(접촉부위 : D)



(c) 방수처리후(접촉부위 : A)



(d) 방수처리후(접촉부위 : D)

그림 7. 우수기 절연커버 절연성능 평가

이와 달리, 그림 7-(c), (d)에서 보는 바와 같이 시료 상단부분을 방수처리한 경우 1시간 이상 가랑비가 내리는 조건하에서도 절연파괴가 발생하지 않았을 뿐만 아니라, 누설전류도 큰 변화가 나타나지 않았다. 이 결과로부터 변압기용 절연커버인 경우 전선 인입부분(절연커버상단)을 방수처리하면 우수기에 절연내력 저하 방지로 감전보호 측면에서 개선효과가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

2.9kV 수 · 변전설비에서 변압기 충전부에서 발생하는 감전사고 예방을 위하여 사용되는 절연커버를 대상으로 절연특성에 따른 안전성 평가를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 외부 환경(분진, 물 · 습기 등)에 영향이 없는 정상적인 상태에서 접촉 부위별 섬락실험을 한 결과, 최저 20.4(kV)의 섬락전압으로 나타나 실제 변압기의 대지전압이 13.2(kV)인 것을 고려해 볼 때 감전보호 차원에서는 효과적임을 알 수 있었으나, 습도

3.2 접지설비

무대음향설비의 접지는 인체의 감전, 기기 손상 등으로부터 보호하기 위한 피뢰 및 강전의 계통접지, 기기접지라는 소위 보안용 접지도 중요하지만 전자기기, 약전기기에 필요한 기능용 접지도 설비의 안정동작환경의 제공이라는 측면에서 요구된다.

본 조사에서는 기기 외함접지, 신호회로접지, 신호회로접지의 독립 유무에 대한 사항을 수행하였으며 이를 그림 5에 나타낸다.

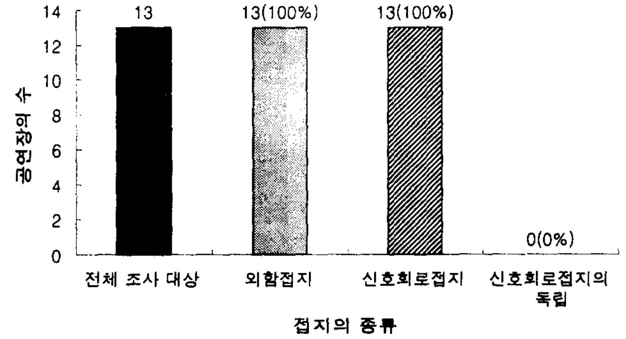


그림 5 무대음향설비의 접지 실태

조사결과 무대음향기기 외함접지 및 신호회로접지는 모두 시설되었으나 신호회로접지는 전부 독립되어 있지 않고 다른 접지와 공용되어 있었다. 무대음향설비는 기본적으로 노이즈장해를 받기 쉬운 성질을 가지고 있고 음질의 향상과 동시에 현저한 출력증강을 요구하기 때문에, 기준전위안정 및 노이즈 방지를 위해 신호회로에 관한 접지는 다른 설비의 접지 및 공연장의 보안접지와 분리한 접지로 하여야 하며, 전력증폭기, 마이크로폰, 스피커 등의 음성회로 신호부에 신호회로에 관한 접지가 시설됨이 적합하다고 사료된다. 보안접지는 전기설비기술기준 및 기타 법규에 규정되어 있지만 신호회로에 관한 접지는 법규에 의한 규제가 없는 실정이다. 따라서, 적합한 신호회로에 관한 접지를 제시하면 특별 제3종 접지공사로 시설하고 접지저항값은 10Ω 이하로 하는 것이 바람직하다.

3.3 배선공사

무대음향설비의 특징을 간략히 기술하면, 오디오신호는 미세전압신호이고 전력증폭기의 증폭율은 대단히 높다고 볼 수 있다.(약 $10^3 \sim 10^5$배) 또한, 스피커배선의 경우 전압강하는 정확한 확성음의 방해가 되며 전선긍장은 긴 편이다. 따라서, 마이크배선, 음향전원반에서 전력증폭기에 달하는 음향설비 전원선은 노이즈의 영향, 타 제어선의 근접 등에 의한 음성장해를 방지하기 위해 금속관 또는 금속덕트로 시공하는 것이 바람직하다. 또한, 음향설비 배선공사는 공연장 내부에서 가장 잡음장해를 받기 쉬운 성질을 가지기 때문에 무대조명, 무대기구 등의 다른 배선들과의 이격거리를 충분히 고려할 필요가 있다. 다음 표 1에 다른 배선들과 오디오신호회로 사이의 적합한 이격거리를 제시한다.

표 1 다른 배선들과 오디오신호회로 사이의 이격거리

시설 상태	이격거리
오디오신호회로가 조명계 또는 동력계 배선과 평행한 경우	1m 이상
오디오신호회로가 조명계 또는 동력계 배선과 교차하는 경우	10cm 이상
오디오신호회로와 음성의 출력계 사이	50cm 이상

실태조사를 실시한 공연장은 그림 6과 같이 모두 금속관 또는 금속덕트로 음향설비 배선이 시공되어 있었으며 그림 7에 오디오신호회로와 다른 배선들 사이의 이격거리에 따른 실태를 나타낸다. 그림 7의 조사결과에 따르면 오디오신호회로와 조명계 또는 동력계 배선이 평행 및 교차하는 경우 만족하는 이격거리의 공연장은 약 77% 정도이고, 오디오신호회로와 음성의 출력계 사이의 만족하는 이격거리를 갖는 장소는 약 61.5% 이다.

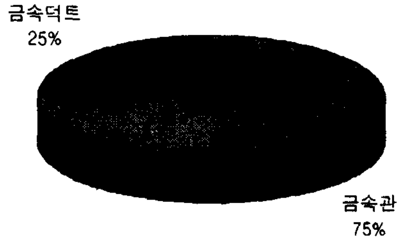


그림 6 무대음향설비의 배선공사 실태

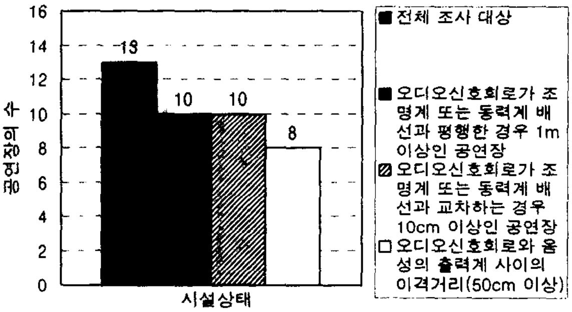


그림 7 오디오신호회로와 다른 배선들 사이의 이격거리 실태

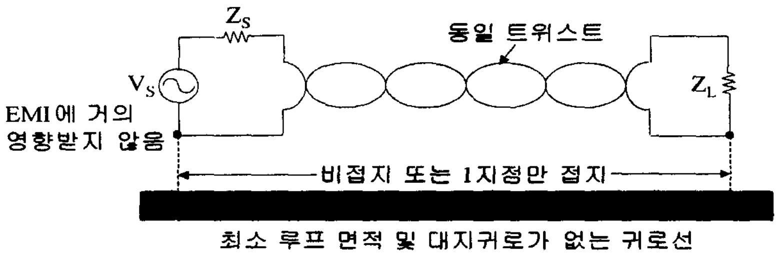


그림 8 평형 및 트위스팅을 통한 노이즈 억제방법

그림 8은 오디오신호회로의 노이즈 억제방법의 일례를 나타낸다. 평형은 차동모드(Differential-mode)신호는 통과시키지만 공통모드(Common-mode)신호는 차단하고, 트위스트 페어선은 짧은 간격으로 반회전 꼬아 엮음에 의해 작은 루프를 만들 수 있고 그 곳에서 생기는 기전력이 서로 반대 방향이므로 유도 노이즈를 방지할 수 있다. 그러므로, 오디오신호회로의 잡음방지를 위해서는 배선공사방법, 이격거리, 접지, 평형 및 트위스팅 등이 복합적으로 고려되어야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 공연장내 무대음향설비의 전원설비, 접지설비, 배선공사 등에 대해 현장실태조사 및 분석을 실시한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

무대음향설비의 전원설비에 있어 60% 정도가 독립된 변압기를 사용하였으며 다른 설비의 변압기와 공용시에는 비상조명부하, 무대조명설비, 다른 홀의 음향설비, 다른 무대설비와 각각 25% 정도씩 함께 사용되고 있었다. 부득이하게 공용되더라도 고조파, 노이즈 등의 영향을 받지 않도록 무대조명전원과는 공용되지 않도록 하는 것이 바람직하다. 접지설비의 경우 외함접지, 신호회로접지는 모두 시설되어 있었으나 신호회로접지의 경우 조사대상 수용가의 100%가 다른 접지와 공용되어 있었다. 기준전위안정, 노이즈 방지를 위해 신호회로는 독립접지 및 특별 제3종 접지공사로 시설되는 것이 적합할 것이다. 또한, 배선공사 실태를 조사한 결과 전부 금속관과 금속덕트로 시설되어 있었으며, 오디오신호회로의 2/3 이상이 조명계 혹은 동력계와 평행 및 교차하는 경우 각각 1m, 10cm 이상 이격거리를 유지하였고 오디오 신호회로와 음성의 출력계 사이가 50cm 이상인 공연장은 약 61.5% 정도이었다.

따라서, 공연장내 무대음향설비에 있어 제시한 시설조건을 전반적으로 만족한다고 볼 수 있지만 신호회로에 대한 접지설비는 적합하지 않게 시설된 장소가 전부이므로 이에 대한 대책이 수립될 필요가 있으며 접지는 배선공사와도 연계되어 그라운드 루프로 인한 노이즈 침입을 방지하기 위해 1개소만 대지와 접속시키는 것이 바람직할 것이다. 향후에 본 연구는 공연장 뿐만 아니라 유사 건축설비에도 전기설비 안정화, 전기재해 예방 등의 측면에서 활용될 것이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 한국전기안전공사, "다중이용시설중 공연장의 전기설비 시설지침(ESG-1008)", 산업자원부, pp.274~312, 448~458, 2002

[2] 日本電氣設備學會, "劇場 等 演出空間 電氣設備 指針", 日本電氣設備學會, pp.160~169, 1999

[3] Philip Giddings, "Audio Systems Design and Installation", pp.58~65, 69~78, 2002

[4] 이복희, 이승칠, "접지의 핵심기초기술", 의제, pp.6~20, 2000

[5] 대한전기협회, "전기관계법령집", 대한전기협회, pp.432~433, 2001