

22.9kV 폐쇄 배전반내의 사고모델을 통한 실험적 검증

Experimental Verification According to an Accident Model in a Metal-Clad Switchgear at 22.9kV

宋 佶 穆[†] · 韓 雲 基* · 崔 忠 錫**

(Kil-Mok Shong · Woon-Ki Han · Chung-Seog Choi)

Abstract - This paper describes the accident analysis by modelling the current transformer mounting in a metal-clad switchgear at 22.9kV. In analyzing the accident, the reconstruction at the current transformer mounting(VCB connecting guide) has to be taken into account. The accident was modelled as a 3-phase ground fault occurring between the end plate of 22.9kV lines and the safety shutter at the current transformer mounting of the VCB inside the metal clad switchgear.

Since the outside maintenance of the metal clad switchgear is restricted by the enclosed compartments, its circumference has to be kept clean. Through the reconstruction results, it was confirmed that the fault of the enclosed switchboard could be reduced when the shutter made of Fe material was changed into an insulation.

Key Words : Metal-clad switchgear, Safety shutter, Current transformer mounting, Experimental verification

1. 개 요

전기에너지는 다양한 형태로 변환이 용이하기 때문에 산업이 발달하면서 인간생활을 영위하는데 중요한 에너지로 인식되고 있다. 최근 화석연료와 더불어 핵연료, 바람, 태양광 등 다양한 에너지원을 이용하여 전기에너지를 생산하고 있으며, 수요전력은 나날이 증가하고 있는 추세이다.

산업자원부와 전력정보센터에서 발표한 국내 전력통계에 의하면, 총 발전량이 1994년에는 약 183,366GWh이었던 것이 2004년도에는 약 367,581GWh로서 10년 동안 약 두 배 증가한 것으로 나타났다. 이는 1984년 58,352GWh와 비교하면, 약 6.3배 증가한 것으로 증가량이 많아짐을 알 수 있다. 따라서 향후 산업이 발달하면 할수록 전기에너지의 수요는 크게 증가할 것으로 예상된다. 전기에너지는 산업을 발전시키는 원동력이 되나, 전기설비 등의 제작이나 설치가 불량하거나, 과도한 사용, 관리소홀 등으로 전기재해가 발생하면 많은 인적 물적 피해를 가져다준다[1].

2005년도 한국전기안전공사 전기설비사고에 대한 통계에 의하면, 2004년도 총 5,076건이 조사되었으며, 이중 부하설비에서 발생한 사고건수가 3,905건으로 76.9%, 수전설비에서 발생한 사고가 969건으로 전체 19.1%, 송배전선로에서 발생한 설비사고가 202건으로 4.0%의 점유율을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 자체 해결되었거나 조사에 누락된 사고를

합한다면 전기설비사고는 통계보다 많이 발생하였을 것으로 판단된다. 설비의 다수는 부하설비에서 발생하였으며, 설비 사고를 고전압과 저전압설비로 나누었을 경우 고전압설비에서 발생한 건수는 1,188건으로 총 23.4%로 나타났다[2].

고전압 전기설비사고는 사고자체만으로 종결되기보다 감전이나 화상 등 2차 재해를 유발시킬 가능성도 있다. 또한 설비사고 중에는 설비의 대부분이 소손 또는 소훼되었거나, 인지되지 않은 곳에서의 사고발생 등도 있으므로 이들 사고에 대한 원인 분석이 요구된다. 따라서 이들 사고에 대한 원인분석은 향후 사고예방을 위한 중요한 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

폐쇄배전반은 철제 외함(box) 내부에 피뢰기, 차단기, 계기용변성기 등을 수납하도록 구성되어 있다. 본 설비의 장점은 공간 활용을 극대화하기 위해 우수한 절연재료를 사용함으로써, 설비의 콤팩트화가 가능하다는 것을 들 수 있다. 설비내부에는 진공차단기를 착탈할 수 있도록 삽입구가 마련되어 있으며, 미사용시 이를 인출하여 보관하도록 되어 있다. 본 사고는 인출된 삽입구 내부의 전극과 진공차단기를 분리하여 차단된 안전 셔터(safety shutter) 사이에서 발생한 것으로 정전사고를 유발시켜 생산라인이 중단되고 설비를 교체하는 등 많은 물적 피해를 야기시켰다. 따라서 사고원인을 정밀 분석을 통한 향후 유사사고의 재발방지과 설비개선이 필요하다.

본 논문은 실험적 검증을 위해 폐쇄배전반 삽입구를 모델링하고 고전압을 인가하여 절연과피 전압을 측정하였으며, 다양한 열화조건에서 사고로 이어지는 과정을 고속카메라에 의해 분석하였다. 본 실험을 통해 폐쇄배전반의 전기안전 관리 지침과 향후 개선사항에 대한 중요한 자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

[†] 교신저자, 正會員 : 電氣安全研究院 先任研究員
E-mail : natasder@kesco.or.kr

* 正會員 : 電氣安全研究院 研究員

** 正會員 : 電氣安全研究院 首席研究員

接受日字 : 2006年 2月 17日

最終完了 : 2006年 4月 27日

2. 설비 사고통계 및 사고분석시스템

2.1 설비사고 통계분석

국내에서 생산되는 전력량에 대한 연도별 총 발전량과 1인당 전력소비량을 나타내면, 그림 1과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 총 발전량과 1인당 전력소비량이 매년 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 1980년대 말을 기점으로 총 발전량과 1인당 전력소비량이 이전보다 증가하는 경향을 보였다. 이는 국가의 경제적 수준과도 무관하지 않으며, 총발전량의 증가에 따른 전기안전서비스의 중요성이 커지고 있음을 알 수 있다.

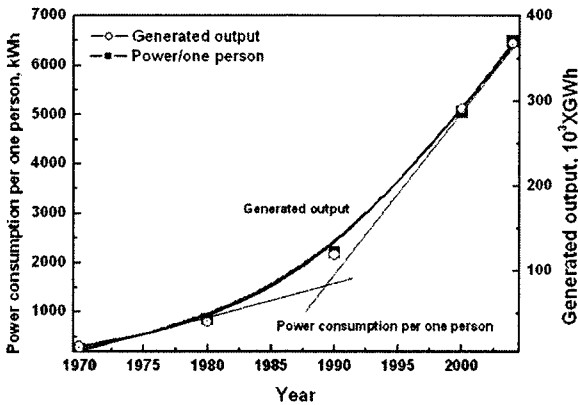


그림 1 연도별 발전설비 용량과 1인당 소비전력량
Fig. 1 Annual generated output and power consumption per one person

총 발전량의 증가에 따라 부하설비까지의 전기설비는 대용량화, 콤팩트화 되면서 증가하였다. 전기설비에서 발생하는 사고 중 지락에 의한 것이 전체 5,076건 중 1,185건으로 가장 많았으며, 그 다음 보호 장치의 동작으로 인한 정전, 기기소손, 결상 및 단선사고 등의 순서로 나타났다[1].

2.2 사고분석시스템

전기설비사고, 전기화재, 감전 등 전기재해로 인해 발생하는 인적 물적 피해를 줄이기 위해 현재 다양한 연구가 진행 중에 있으며, 특히 전기재해의 명확한 원인규명은 동일재해를 예방하기 위한 중요한 자료로 이용될 수 있다. 2002년 7월 1일부터 시행된 제조물책임법(product liability)은 전문에서도 나와 있듯이 제조물의 결함으로 인해 발생한 손해에 대해서는 제조업자가 손해배상을 책임지도록 규정함으로써 피해자의 보호를 우선하였으며, 국민생활의 안전향상과 국민경제의 건전한 발전에 기여할 수 있도록 하고 있다. 따라서, 최근 발생되고 있는 법적 분쟁의 해결을 위한 전문적 자문과 대단위 전기설비를 갖춘 공장이나 빌딩에서의 사고원인 분석 의뢰가 증가하는 추세에 있다. 이는 경제적으로 안정된 선진국형 전기안전 전문서비스로서의 인식이 확산되고 있음을 반증하는 것이다[3-5].

그림 2는 전기사고분석이 수행되는 순서도를 나타낸 것이다. 사고분석은 과학적이고 체계적으로 접근하기 위해서

현장분석, 재료분석, 실험검증 등 총 3단계로 이루어진다. 현장분석은 사고현장에서 목격자 진술에서부터 시스템 분석, 아크패턴 등을 분석하여 기록한다. 현장 분석 자료만으로 결론이 가능한 경우 실험검증 또는 보고서를 작성하게 된다. 현장분석으로 사고원인을 입증하지 못하는 경우 현장에서 채취한 재료를 이용하여 도전 및 절연재료의 분석을 실시한다. 재료 분석으로 사고원인을 입증할 수 있으면, 보고서를 작성한다. 실험검증이 필요한 경우 검증을 통해 사고재현성을 확보한다. 최근에는 법적 분쟁에 있어서 사고원인의 과학적 입증과 더불어 사고재현성을 확보하는 것이 중요한 판정 자료로 인정되고 있다.[6-7].

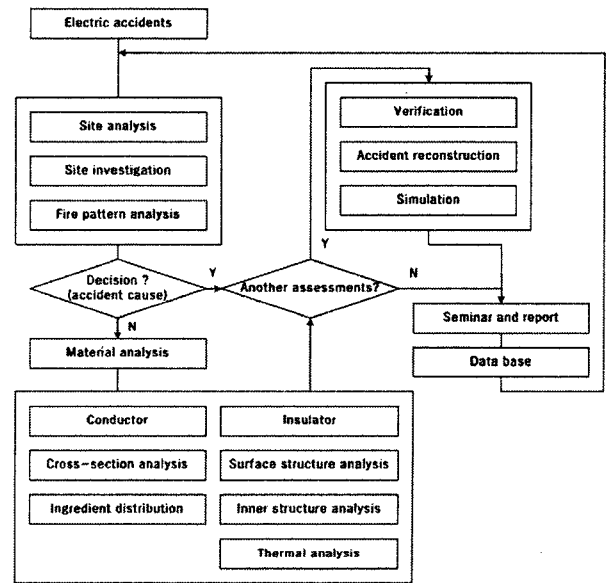


그림 2 전기재해 분석 시스템의 순서도
Fig. 2 Flowchart of electrical disaster analysis system

3. 사고추론 및 실험방법

3.1 사고추론

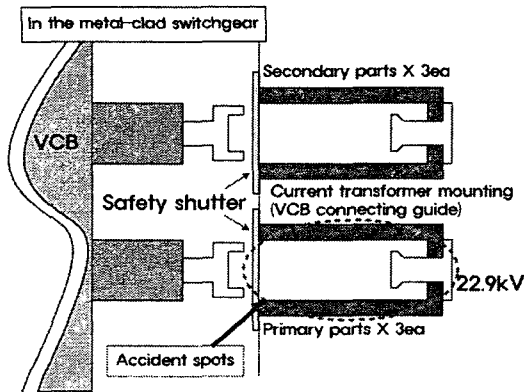
사고추론(An accidental inference)은 기 발생한 설비사고에 대해 다양한 가능성을 제시함으로써 분석기법의 적용과 사고재현을 위한 다양한 검증방법을 선택하는데 의의가 있다[8].

국내에서 조사되고 있는 사고의 특성을 보면, 고전압 이상에서의 방전은 다양한 경로를 통해 가능하다. 일반적으로 전기설비사고가 발생할 수 있는 요인으로서는 이물질 침투, 절연물 배합불량, 미달 등의 제작 불량, 수분침투, 외피손상, 산화 등의 관리 소홀이나 경년열화, 물리적 스트레스에 의한 설치 불량 등이 있다. 절연파괴의 과정은 극간에서 발생할 수 있고, 전극과 대지간에서도 발생할 수 있다. 절연재료가 열에 의하거나 먼지, 수분과 같은 주변 영향 등에 의해 발생되기도 한다.

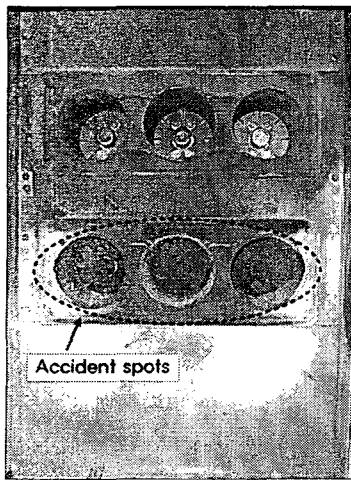
본 사고는 진공차단기를 수납, 활용하는 폐쇄분전반 내부의 진공차단기의 전극을 인입, 인출하는 인출부의 삽입부에서 발생한 것으로, 개략도는 그림 3에 나타났다. 삽입구는 전체적으로 표면이 탄화되어 있고, 서터 역시 세 군데 모두

에서 용융되어 있었다. 사고당시 사용되지 않은 상태였으며, 삽입구에서 차단기가 인출된 상태였다. 방전은 진공차단기 1차 측에서의 안전셔터와 케이블 말단에서 발생하였다.

그림 3(a)는 사고지점(accident spots)을 기준으로 하여 측면도를 개략화 한 것과 실체사진이다. 안전셔터 부분과 가이드 내부의 케이블 말단에 연결된 전극이 절연파괴된 상태에서 전극이 용융되고, 가이드 내부가 탄화된 것을 확인할 수 있다. 탄화된 형태로 보아 연면 또는 기중 방전에 의한 것으로 추정된다. 국내 검사기준에서는 폐쇄분전반의 경우 22.9kV에서는 200mm 이상의 절연이격거리가 요구되며, 권장사항에서도 220mm 이상 절연이격하면 안전하다고 명시되어 있다. 따라서 본 사고 물품의 경우 전극과 셔터사이의 거리는 약 220mm로 제작상의 문제점은 발견되지 않았다. 따라서 내부 이물질에 의해 절연이 열화되어 방전사고로 이어진 것으로 추정된다. 사고모델로서 금속 이물질, 수분, 그리고 먼지 및 수분이 있는 각각의 경우를 검증하여 가장 가능성이 있는 주변 환경 및 관리 등이 원인이 되는 경우의 사고패턴을 입증하고자 하였다[9].



(a) schematics



(b) stereoscopic photograph

그림 3 VCB 패널 내부의 개략도

Fig. 3 Schematics daigram of Inside VCB panel

3.2 실험조건 및 구성

사고패널에서 발생할 수 있는 열화 조건은 일반적인 사항

(normal), 금속물질 부착상태(Cu wire 150mm(aged 1), Cu wire 200mm(aged 2)), 수분이 표면에 분포된 상태(aged 3), 수분과 먼지 등 이물질이 부착된 상태(aged 4) 등 크게 4개의 조건으로 구성하였다. 실험에 이용된 회로의 구성을 동일하게 한 후 사고모의 챔버 내부에 다양한 사고패턴을 만들어 가장 사고가능성이 높은 조건을 추출하고자 하였다.

그림 4는 사고모의 구성의 개략도를 나타낸 것이다. 전극은 순동으로 제작하였으며, 셔터부분은 철로 구성된 사각평판을 이용하였다. 이때, 순동 전극과 철 평판의 거리는 사고현장에서 설치되었던 케이블말단과 안전셔터 사이의 220mm 길이를 유지하였다. 전압은 1kV/sec의 상승속도로 인가하였으며, 절연파괴 전압을 측정하였다. 챔버에서의 방전과정은 고속카메라(HSIS)를 이용하여 초당 1,000프레임으로 촬영하였다. 실험당시 주변 실험조건은 온도 10℃, 습도 60%의 분위기에서 실험하였다. 절연파괴 전압은 교류 실효값으로 하여 측정되었다.

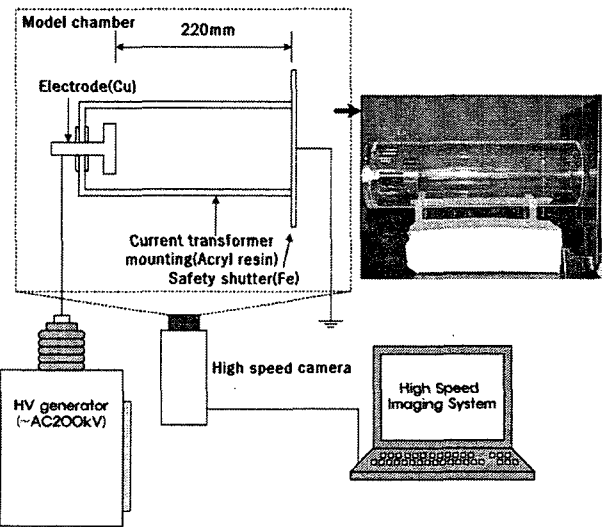


그림 4 사고모의 개략도

Fig. 4 Schematics of the accident simulation

4. 실험결과 및 분석

4.1 절연파괴 전압측정

그림 5는 모델챔버 내에 이물질 종류를 다양하게 하여 절연파괴 되었을 때의 전압을 측정한 값으로 구리전선의 길이를 각각 150mm, 200mm일 때로 하여 나타낸 것이다. 그래프의 경향을 보면, 전선의 길이가 길어질수록 절연파괴전압이 낮아지는 경향을 보였다. aged 3과 aged 4의 측정치는 각각 수분이 챔버내에 있을 때, 수분과 분진이 함께 존재하고 있을 때의 조건에서 절연 파괴된 전압을 측정한 값이다. 그래프에서 알 수 있듯이 수분과 분진이 챔버내에 부착된 경우에서 절연파괴전압이 낮은 것을 확인하였다. 실험결과에서 기중에서보다 오염된 연면에서의 절연파괴가 쉽게 발생하였다. 실험에 이용된 모델챔버를 통해 전극과 안전셔터 사이의 절연이격거리가 전선으로 인해 축소된 경우 낮은 전

압에서 절연파괴가 발생하였으며, 그래프를 통해 20kV 미만에서 발생할 가능성은 약 190mm 이상의 전선이 챔버내에 있을 경우로 추정된다.

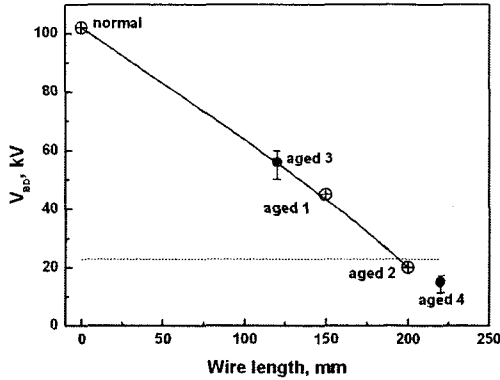


그림 5 열화조건에 따른 절연파괴 전압 비교
Fig. 5 Comparison of breakdown voltages according to deteriorated conditions

4.2 열화조건에 따른 방전과정

그림 6은 정상상태에서의 방전과정을 고속카메라에 의해 초당 1,000프레임으로 촬영한 후 불꽃방전개시부터 5ms간격으로 샘플링한 것이다. 방전개시 전압은 102kV인 것으로 나타났다. 초기 불꽃방전시 전류의 크기가 가장 커 불꽃이 큰 것을 확인할 수 있으며 이들 불꽃에 의해 방전로가 형성된 것을 알 수 있다. 방전로의 형태로 보아 기중에서 방전되고 있음을 확인할 수 있다. 방전개시후 25ms에서 불꽃이 종료되었다. 챔버 내부의 연면을 통해서서는 불꽃이 방전되지 않았다. 방전로가 모의전극과 안전서터 부분에서 가장 가까운 부분에서 시작되었다가 종료에 이른 것으로 판단된다.

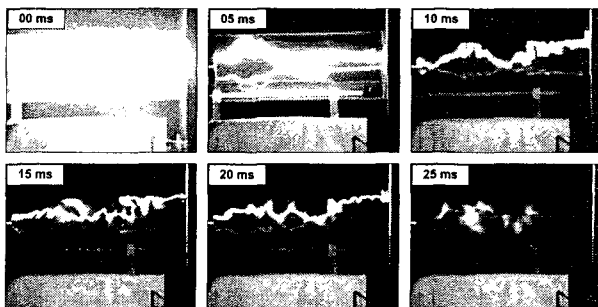


그림 6 건전상태의 방전과정
Fig. 6 Discharge process of normal state

그림 7은 분진과 수분이 챔버 내부 표면에 부착된 상태에서 전압을 인가했을 경우 불꽃방전시점부터 방전되는 과정을 고속카메라에 의해 촬영한 것이다. 5ms의 간격으로 나타낸 과정에서 일반적인 기중 방전과정과는 다르게 나타났으며, 그림에서도 알 수 있듯이 표면에 연면방전과 기중에서의 방전이 번갈아 가며 발생하는 것을 확인하였다. 방전개시전압은 15kV였으며, 방전시간은 25ms보다 긴 시간 동안 이루어졌다. 따라서 사고 후 챔버내부의 표면에 고른 탄화가 발생한 경우 연면방전이 있었음을 추정할 수 있었다.

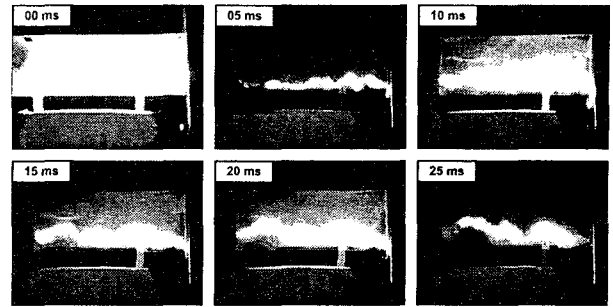


그림 7 열화상태에서 방전과정
Fig. 7 Discharge process of aged state

5. 결 론

사고분석에 있어서 재현성을 확보하는 것은 매우 중요하다. 사고발생 이전에는 설비의 모니터링 시스템을 이용하여 실시간 전기안전 감시시스템을 운영하며, 주기적으로 설비의 다양한 진단을 통해서 열화 유무를 판단한다. 이미 설비사고가 발생한 경우에는 도전재료 및 절연재료의 분석을 통해 과학적으로 입증할 수 있는 자료를 확보해야 하며, 사고모형을 구성하여 재현이 가능하여야 한다. 본 사고는 폐쇄배전반 내부의 진공차단기 전극을 삽입하는 삽입구에서 22.9kV 말단과 서터에서 발생한 3상 지락사고의 재현을 모의한 것이다.

본 논문을 통해 폐쇄배전반의 경우 외부에서 관리할 수 있는 한계가 있으므로 사고 방지를 위해 주변의 청결한 상태를 유지할 수 있도록 관리하여야 하며, 향후 폐쇄배전반 내부에 위치한 서터의 경우 현재의 도전성을 가진 철(Fe)재질에서 절연체질로 개선하였을 경우 전기설비사고로 이어지는 단계를 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 전력정보센터, “주요전력지표”, http://www.epic.or.kr/EPIC/jsp/PIT/EIC_PIT_STD.jsp, 2006
- [2] 한국전기안전공사, “전기해체통계분석”, 14호, 한국전기안전공사, pp.67~74, 2005
- [3] 이덕출, 정성계, “고전압공학”, 문운당, pp.39~108, 1991
- [4] 송길목, 최충석, 노영수, 곽희로, “트래킹에 의해 열화된 페룰수지의 탄화특성”, Trans. KIEE, Vol. 53C, No. 1, pp.1~7, JAN. 2004
- [5] Chung-Seog Choi, Kil-Mok Shong, Hyang-Kon Kim, Dong-Ook Kim, Dong-Woo Kim, “The Analysis of Dendrite Structure of Electric Wire Melted by Fusing Current”, 2003J-K Joint Symp. on ED&HVE, pp.145~148, 2003.

- [6] John D. DeHaan, "Kirk's Fire Investigation", 5th edition, Prentice Hall, pp.305, 2002
- [7] Kil-Mok Shong, Hyang-Kon Kim, Chung-Seog Choi and Hee-Ro Kwak, "A Study on the Electrical Fire Analysis of PVC Insulated Flexible Cord by Over-Current", KIEE 2003spring conference, pp.131~133, 2003
- [8] Babrauskas, V., "Fires due to Electric Arcing: Can 'Cause' Beads Be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing?", Fire and Materials, pp.189~201, 2003
- [9] 전기공사협회, "특별고압가공전선과 지지물 등 사이의 이격거리", 기술기준 제122조, pp.80, 2003

저 자 소 개



송길목 (宋 佶 穆)

1967년 3월 31일생. 1994년 숭실대 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 졸업(석사), 2003년~현재 동 대학원 전기전자재료 및 대전력 수료(박사). 1996년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원

Tel : 031-580-3033
 Fax : 031-580-3045
 E-mail : natasder@kesco.or.kr



한운기 (韓 雲 基)

1973년 6월 20일생. 1997년 목포대 전기공학과 졸업. 2000년 성균관대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 연구원

Tel : 031-580-3037
 Fax : 031-580-3045
 E-mail : power@kesco.or.kr



최충석 (崔 忠 錫)

1961년 9월 19일생. 1991년 인하대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 졸업(석사). 1996년 동 대학원 졸업(박사). 1997년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 수석연구원

Tel : 031-580-3030
 Fax : 031-580-3045
 E-mail : ccseog@kesco.or.kr