

고속전철에 의한 통신 선로에서의 유도전압 분석

Induced Voltages on Telecommunication Lines Due to AC High-Speed Electrified Railway System

오호석 · 강성용 · 윤주영 · 김학철*

Ho-Seok Oh · Seong-Yong Kang · Ju-Young Yun · Hak-Chul Kim*

요 약

본 논문에서는 고속전철 운행에 따라 인접 통신 선로에서 발생하는 유도전압을 국내 고시에 제시된 측정 회로에 따라 측정하고 유도전압의 특징을 분석하였다. 고속전철 선로와 2 km 병행하는 2개 루트의 시험용 통신 선로를 구성하여 이격 거리, 병행 거리에 따른 유도전압을 측정 및 분석하고, 측정 회선 단말 접지 위치의 레일과의 거리에 따라 측정값에 대한 영향 여부를 검토하였다. 또한 1일간 시간에 따른 변화, 요일별 변화 등을 분석하였으며, 유도전압에 포함되어 있는 고조파 성분을 확인하였다. 이론과 같이 이격 거리에 따른 유도전압의 차이를 보였으며, 단말의 접지 위치는 측정값에 큰 영향을 주지 않음을 확인하였다. 또한 특정 시간대 및 특정 날짜에 상대적으로 큰 유도전압이 나타남을 확인하였다.

Abstract

This paper analyzed the induced voltages on a telecommunication line due to high-speed a.c. electrified railway system. The induced voltages were measured by domestic regulation. 2 test lines with 2 km length were installed near railway in parallel to compare the influence for distance from disturbing line. The analysis was made on the induced voltages with the distance from railway, line length, and the different earthing point, and also on the waveform and spectrum distributions. The statistical induced voltages for the time for a day and dates was analyzed.

Key words : Telecommunication Line, Power Induction, Induced Voltage, Electrified Railway

I. 서 론

전력선 및 교류 전기 철도 시스템의 전압·전류는 전철 선로와 인접하여 병행 설치되어 있는 통신선에 전자기 결합으로 유도전압을 발생시킨다. 이러한 현상은 인명의 안전, 장치의 고장, 통신 품질과 관련되어 있다. 국제전기통신연합(ITU-T)에서는 유도전압 제한값 및 관련 표준이 K계열 권고서와 총 9권의 지침서^[1]에 기술되어 있다. 우리나라 기술 기준에서는 이상시 유도위험전압, 상시유도 위험중 전압(이하 상시유도전압), 기기 오동작 유도중 전압과

잡음 전압에 대한 기준값이 마련되어 있으며^[2], 유도전압 산출 방법 및 측정 방법은 전파연구소 고시에 제시되어 있다^{[3],[4]}.

본 논문은 고속전철 운행에 따라 철도에 인접한 통신선에 나타나는 유도전압의 발생 양상을 분석한 것이다. 특히, 전철 선로와 통신 선로와의 이격 거리에 따른 영향 그리고 유도전압을 측정하기 위해 접지되는 측정 회선 단말의 위치가 레일과의 거리에 영향을 미치는지 여부를 검토하였다. 또한 1일중 시간에 따른 유도전압의 변화, 1주간 요일에 따른 유도전압의 발생 양상을 분석하였으며, 기본 주파수

(주)KT(KT Corporation)

* (주)동남 TDS(Dongnam TDS)

· 논문 번호 : 20090730-10S

· 수정완료일자 : 2009년 9월 10일

(60 Hz) 이외에 나타나는 고조파 발생 범위를 확인하였다.

II. AT 전철에 의한 전력 유도

우리나라 고속전철은 그림 1과 같은 구성의 AT (Auto Transformer) 급전 방식을 사용하고 있다. AT 방식은 대용량 열차 부하에서도 전압 변동, 전압 불평형이 적어 안정된 전력 공급이 가능하여 고속전철에도 이 방식이 채택되고 있다. 레일에 흐르는 전류는 차량을 중심으로 각각 반대 방향의 AT쪽으로 흐르고 단권 변압기 작용에 의해 레일에서 대지로 누설되는 귀로 전류를 감소시켜 다른 급전 방식에 비해 양호한 통신 유도 장애를 경감시키는 기능을 갖는다. 통신 품질에 영향을 주는 고조파 잡음에 관해해서는, 전철의 구동 시스템에는 컨버터와 인버터가 포함되어 있으며, 위상 제어 및 펄스 폭 변조 방식 등에 의하여 제어되기 때문에 기본 주파수보다 높은 고조파를 발생시킨다고 알려져 있다^{[5]~[7]}.

통신선과 대지 사이에 공통 모드로 발생하는 유도전압은 인접한 전기 회로 사이에 저항 성분, 인덕턴스 성분, 커패시턴스 성분과의 결합으로 발생할 수 있는데, 전기 철도의 경우 대부분 회로간의 상호 인덕턴스 성분에 의해 발생된다고 볼 수 있다.

III. 유도전압 측정 및 분석

3-1 이격 거리 및 단말 위치에 따른 유도 전압

상시유도전압은 통신 회선의 한쪽 끝단을 접지한 상태에서 다른 한쪽에서 교류 전압계를 이용하여 측정한다. 여기에 사람의 청각 특성을 반영한 평가 값

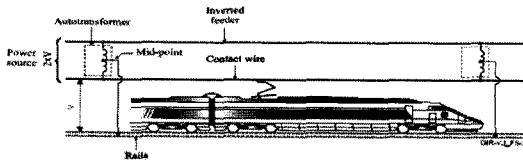


FIGURE 5/3
Diagram of the power feeding system with autotransformers in an a.c. traction line

그림 1. AT 급전 방식의 전기 철도 구성
Fig. 1. Configuration of the electrified railway system with AT feeding system.

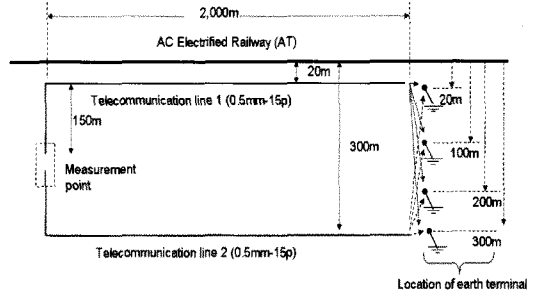


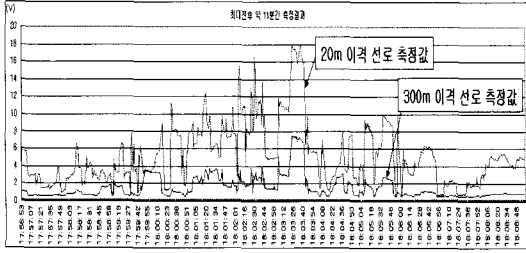
그림 2. 유도전압 측정을 위한 시험 구성
Fig. 2. Test configuration for induced voltage measurement.

음 필터를 통해 측정된 값을 선대지잡음전압이라고 한다. 선대지잡음전압은 통신선의 불평형에 의해 두 심선 사이에 나타나는 선간잡음전압의 원인이 된다.

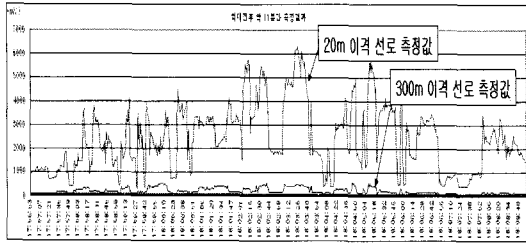
그림 2는 여러 조건에 따른 유도전압을 측정하기 위해 철도 인근에 설치된 통신 선로의 구성이다. 1개 루트는 전철 선로와 약 20 m 이격하여 약 2 km 병행 설치되어 있고, 다른 1개 루트는 전철 선로와 약 300 m 이격하여 역시 약 2 km 병행 설치된 것이다. 상시유도전압 및 선대지잡음전압 측정을 위해서는 통신 회선의 한 쪽 끝이 접지되어야 하는데, 접지 위치에 따른 측정값 변화를 분석하기 위해 그림 2의 우측 부분과 같이 전철 선로로부터 20 m, 100 m, 200 m, 300 m 지점에 접지극을 설치하여 접지 위치별로 유도전압을 측정할 수 있도록 하였다. 측정 점 및 단말에 설치된 접지극의 접지 저항은 약 100 옴이었다. 통신선은 0.5 mm의 심선경을 갖는 통신 회선이 15 쌍으로 구성된 FS(Foam Skin) 케이블이다.

위 측정 회로에서 이격 거리가 서로 다른 두 개 루트의 통신 선로에서 나타나는 유도전압은 그림 3과 같다. 그림 3(a), (b)는 동시에 측정된 값으로서 그래프의 변화 양상은 유사하며 그림 3(b) 선대지잡음 전압은 평가 잡음 필터를 사용하였기 때문에 (a)의 크기에 비해 작고, 유도전압에 포함되어 있는 주파수별 고조파 함유율에 따라 크기가 달라지기 때문에 상시유도전압에서 보인 이격 거리가 서로 다른 두 통신 선로간의 유도전압 크기 비율과는 동일하지 않다.

유도전압을 1초 간격으로 4시간동안 측정하여 총 14,396개의 데이터 중에서 상위 5%에 해당하는 데이터를 평균하여 이격 거리에 따라 크기를 비교한



(a) 상시유도전압
(a) Longitudinal voltage

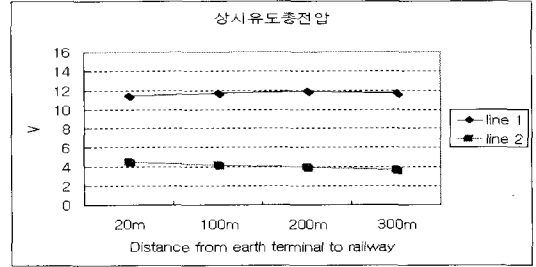


(b) 선대지잡음전압
(b) Longitudinal noise voltage

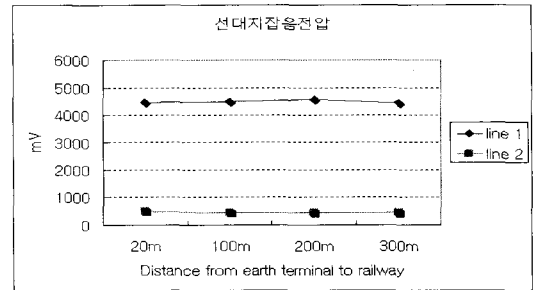
그림 3. 이격 거리에 따른 유도전압
Fig. 3. Induced voltage with distances between rail and telecommunication lines.

결과, 상시유도전압의 경우 300 m 이격 통신선의 유도전압이 20 m 이격 통신선에서 측정된 값의 35.9 %, 선대지잡음전압의 경우에는 10.3 %로 나타나, 결과적으로 칼슨-폴라체크 수식을 이용한 이격 거리에 따른 상호 인덕턴스 비율과 유사한 결과가 나타났다.

단말 접지 위치가 전철 선로로부터 20 m, 100 m, 200 m, 300 m 거리에 있는 경우에 대해 이격 거리로서 다른 두 개 루트의 통신 선로에서 유도전압을 동시에 측정한 결과를 그림 4에 보였다. 상시유도전압의 경우 20 m 이격 통신선은 단말 접지 위치에 따라 평균 11.7 V, 표준편차 0.2 V로 분석되었고, 300 m 이격 통신선의 경우 평균 4.1 V, 표준편차 0.3 V로서 단말 접지 위치에 따른 변화는 거의 없었으며, 선대지잡음전압의 경우에도 20 m 이격 통신선은 평균 4,480 mV, 표준편차 60 mV, 300 m 이격 통신선은 평균 463 mV, 표준편차 23 mV로서 역시 단말 접지 위치에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 이상으로부터 유도전압에 크게 영향을 주는 요소는 전철 선로와의 상호 인덕턴스이고, 전자 유도 현상임을 확인할 수 있다.



(a) 상시유도전압
(a) Longitudinal voltage



(b) 선대지잡음전압
(b) Longitudinal noise voltage

그림 4. 단말 접지 위치에 따른 유도전압 비교
Fig. 4. Induced voltage for location of earth terminal.

한편, ITU-T K.68에서는 전철 선로로부터 5 m 이내를 도전성 결합(conductive coupling) 영향 범위로 보고 있다. 이것은 5 m 이내에 통신 설비가 있을 경우 철도 시설로부터 누설되는 전류에 의해 지전위 상승에 의한 영향을 받을 수 있는 범위를 의미한다. 따라서 이러한 영향을 받지 않기 위해서는 통신설비의 접지 시설뿐 아니라 유도전압을 측정할 때에도 측정 회선의 단말 접지 위치를 전철 선로에 매우 가까이 하는 것은 주의해야 한다. 유도전압 측정시 단말 접지 위치가 레일에 근접한 경우의 영향을 확인하기 위해 그림 5와 같이 20 m 이격된 통신선을 대상으로 측정 점으로부터 1.5 km 지점에서 측정 회선의 단말 위치를 레일로부터 5 m, 10 m, 20 m, 40 m 근접시켜 유도전압을 비교 측정하였다. 이때 1.5 km 지점에 단말 접지를 하고 측정한 이유는 2 km 단말 지점에서는 현장 여건상 레일에 근접시켜 측정할 수 없었기 때문이다. 그림 6은 4개의 통신 회선 단말을 그림 5와 같이 각각 다른 위치에 접지하여 약 30분간 측정된 값의 상위 5 %에 해당하는 값을 평균한 결과이다. 이 경우에도 표준편차가 0.02~0.038 V로 위치별

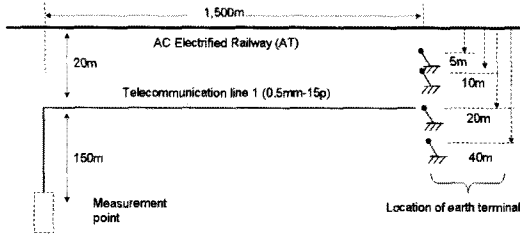


그림 5. 단말 접지를 레일에 근접시킨 구성 회로
 Fig. 5. Test configuration to measure the induced voltage when the earth terminals are closely located to the rail.

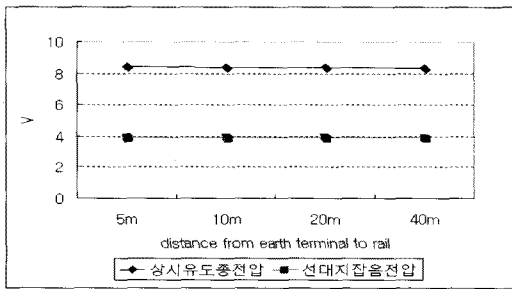
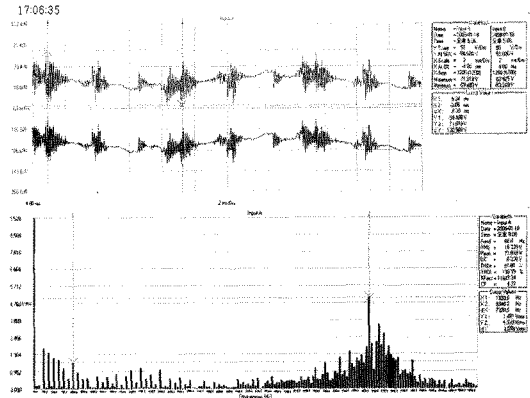


그림 6. 단말 접지가 레일에 근접한 경우 유도전압 비교
 Fig. 6. Induced voltage when earthing terminals are closely located to the rail.

로 차이가 거의 나타나지 않았다. ITU-T K.68의 권고에서 언급한 것처럼 적어도 5 m 이상의 경우에는 측정값에 큰 영향을 주지 않음을 확인하였다.

3-2 유도전압의 변화

고속전철은 60 Hz의 전류를 활용하고 있지만 시스템 구조상 고조파를 발생시킨다. 따라서 유도전압 역시 고조파 성분이 존재하게 된다. 그림 7은 유도전압의 파형 및 10 kHz까지의 스펙트럼 분포를 나타내고 있다. 가로축의 가장 왼쪽 주파수는 60 Hz이다. 시시각각 매우 다양한 고조파 함유 분포를 보이는데, (a)의 경우 가장 큰 고조파 성분이 8.3 kHz에서 발생한 반면 (b)의 경우는 2.1 kHz에서 나타났다. 특히 (b)의 경우에는 기본파 60 Hz 크기에 유사한 크기를 보이고 있다. 현재의 유도전압 예측 계산식은 60 Hz 혹은 800 Hz를 기준으로 작성되었으나, 광대역 통신의 발달로 통신선은 더 많은 대역폭을 사용하므로 전철 등에서 발생하는 고조파가 통신에 영향을



(a) 예 1
 (a) Example 1



(b) 예 2
 (b) Example 2

그림 7. 유도전압의 스펙트럼 분포 예
 Fig. 7. Examples of induced voltage waveform and harmonic.

끼칠 수 있으므로 향후 이에 대한 고려도 필요할 것으로 사료된다.

유도전압의 크기는 열차의 운행 상황에 따라 변화할 수 있다. 따라서 전력 유도 대책은 최악의 조건을 고려하여 시행하게 된다. 그림 8은 1월 말~2월 초 13일간 낮 시간동안 상시유도전압을 측정하여 각 일별 유도전압의 최고값, 상위값 5%, 상위값 1%, 전체 평균값을 계산하여 비교한 것이다. 일요일에 측정된 값은 없지만 금요일과 토요일에 상대적으로 큰 값이 나타났다. 이것은 다른 요일에 비해 차량 운행이 많기 때문에 전차선 부하 전류의 증가에 의한 현상으로 생각할 수 있다.

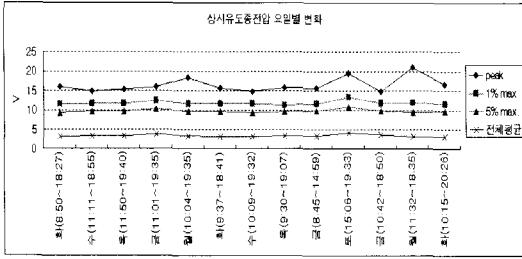


그림 8. 일별 상시유도전압의 변화
 Fig. 8. Statistical results of longitudinal induced voltage for date.

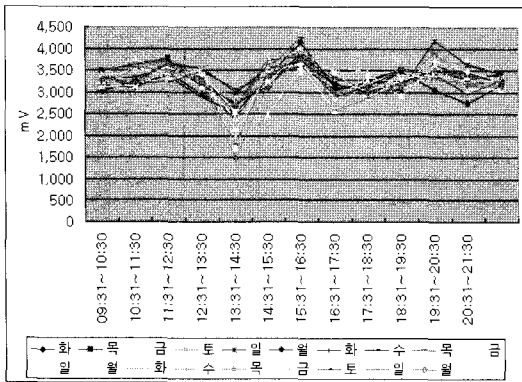
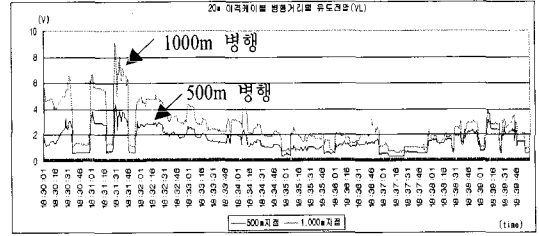


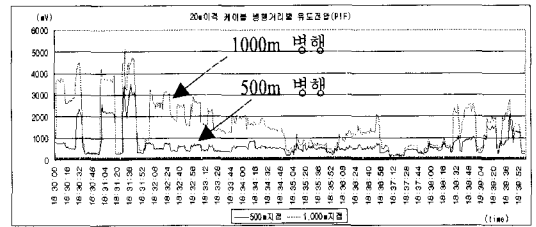
그림 9. 일별/시간별 선대지잡음전압
 Fig. 9. Statistical results of longitudinal noise voltages for date and time.

그림 9는 요일별 시간에 따른 선대지잡음전압(상위 5% 평균값)의 변화를 보인 것이다. 오후 4시, 8시경에 상대적으로 높은 값을 보이고 있고, 오후 2시경 가장 낮은 값을 보이고 있다. 여기에서 최소값과 최대값의 차이는 약 2.5배 이상을 보였다.

한편, 유도전압은 열차의 운행 상황과 더불어 전철 선로와 통신 선로의 병행 거리에 비례한다. 그림 10은 통신 선로와의 병행 거리에 따른 영향을 확인하기 위한 것으로 전철 선로와 이격 거리는 같고 병행 거리가 각각 500 m, 1,000 m인 두 통신 선로에 나타나는 유도전압이다. 병행 길이가 증가함에 따라 유도전압도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 선대지잡음 전압의 경우 상시유도전압과 달리 병행 길이에 따라 정확하게 두 배의 값을 보이지는 않는데 이것은 측정값이 단일 주파수의 값이 아니고 잡음 필터의 주파수별 가중치가 서로 달라 합성 값이 시간에 따라 변화하기 때문에 나타나는 현상이다.



(a) 상시유도전압
 (a) Longitudinal voltage



(b) 선대지잡음전압
 (b) Longitudinal noise voltage

그림 10. 전철 선로와의 병행 거리에 따른 유도전압
 Fig. 10. Example of induced voltage with exposed length in parallel.

IV. 결 론

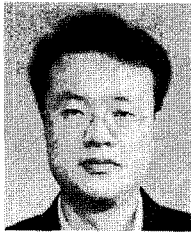
본 논문에서는 고속전철 선로 주변에 시험용 통신 선로를 설치하고 우리나라 고시에서 제시하고 있는 유도전압 측정 회로를 이용하여 고속전철에 의한 통신 선로 전력 유도 현상을 고찰하였다. 이론적으로도 제시된 것처럼 전철 주위에는 전력 유도 현상이 발생하는 것을 확인하였다. 이격 거리 증가에 따른 상호 인덕턴스의 감소로 유도전압도 역시 감소하는 현상을 통해 통신선에서 발생하는 유도전압은 대부분이 전자 유도 결합에 의한 것임을 확인하였다. 또한, 경로를 달리 하는 2개 통신 선로와 유도전압 측정에 필요한 단말 접지 위치를 레일 주변 5 m까지 근접시켜 레일로 귀로하는 전류에 의한 대지 전위 상승으로 유도전압 측정값이 영향을 받는지 여부를 확인해 본 결과 적어도 5 m 이상이 되면 측정값에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 한편, 유도전압에는 다양한 차수의 고조파가 포함되어 있고 유도전압의 크기가 일자별 시간별로 달리 나타나는 현상을 보이고 있으므로 향후 유도 대책에 활용이 가능할 것이다. 전력 유도 현상은 이미 이론적으로 확립

되어 있고 국내외 기준도 제시되어 있지만 합리적인 전력 유도 대책을 수립하기 위해서는 국내에서도 다각적인 연구 분석이 필요하다.

참고 문헌

- [1] ITU-T Directives, "Directive concerning the protection of telecommunication lines against harmful effect from electric power and electrified railway lines", 1989.
- [2] 정보통신부령 제231호, 전기통신설비의 기술기준에 관한 규칙 일부개정령, 2007년 12월.
- [3] 전파연구소 고시 제2007-102호, 전력유도전압의 구체적 산출방법에 대한 기술기준, 2007년.
- [4] 전파연구소 고시 제2005-98호, 전기통신설비의 기술기준에 관한 표준시험방법, 2005년.
- [5] 오광해, 이한민, 장동욱, 김주락, "공동접지방식 급전시스템의 고조파 해석", 한국철도학회 추계 학술대회는논문집, pp. 688-695, 2000년 11월.
- [6] 한문섭, 이장무, 정호성, 김주락, "전기철도 급전시스템의 주파수 기반모델을 이용한 고조파 해석", 한국철도학회 춘계학술대회는논문집, pp. 89-94, 2004년 6월.
- [7] 이장무, 김주락, "교류전기철도 AT 급전계통의 고조파 해석 및 적용사례", 한국철도기술, 2004년 5월, 6월.

오 호 석



1991년: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
 1993년: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
 2008년: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)
 1993년~현재: KT 네트워크연구소

부장

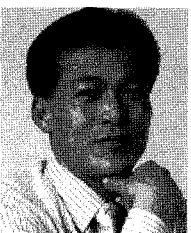
2005년~현재: TTA IT국제표준화전문가
 2005년~2008년: ITU-T SG6(Outside Plant and related indoor installation) Rapporteur
 2008년~현재: ITU-T SG5(Environment and climate change) Rapporteur
 2009년~현재: 한국전기기술기준위원회 접지분과 위원
 [주 관심분야] 통신설비 EMI/EMC, FTTH, OSP

윤 주 영



1993년: 영남대학교 수학과 (이학사)
 1994년~현재: KT 기술지원본부 과장
 [주 관심분야] 전력유도대책, 접지

강 성 용



1991년: 경일대학교 전자공학과 (공학사)
 2005년: 목포해양대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 1984년~현재: KT 네트워크운용단 부장
 2005년~현재: TTA 접지그룹 위원
 [주 관심분야] 통신설비 EMI/EMC, 접지

김 학 철



1976년~1980년: 체신부 서울체신청 근무
 1980년~1987년: 한아통신기술협력(주) 근무
 1990년~현재: (주)동남TDS(구, 동남통신) 대표이사
 [주 관심분야] 통신, EMI/EMC, ITS, BcN, RFID/USN