철도차량용 전자장비의 잡음처리 기법
Noise of Electronic Equipments Reduction Technology in Rolling Stock

최권희* 이병석** 김국진***
Choi, Kweon-hee Lee, Byung-seok Kim, Kuk-jin

ABSTRACT

Recently, the electronic circuit with microprocessor based control system instead of conventional analog circuit is widely used for rolling stock, and also these circuits are widely adopted for train control and monitoring in modern rapid transit system.

Noise, distortion and attenuation are always present in electronic equipments and strictly limit performance. The purpose of this paper is to propose noise reduction technology for electronic equipments in rolling stock.

1. 서론

철도차량은 그 환경과 차량사이의 모든 관련 장애를 가진 전자기적 환경내에서 강인하게 동작할 수 있도록 설계되어져야만 한다. 철도차량의 전자장비에서 원하는 정보를 갖는 신호 이외의 것은 모두 잡음(noise)이라 할 수 있다.

철도차량에서 전기적 잡음의 발생원은 시스템의 외부와 내부로 분류하여 생각할 수 있다. 외부잡음은 천둥·번개, 태양흑점, 인공위성 등의 자연잡음과 차량내의 추진장치, 보조전원장치, 냉·난방장치, 모터, 냉각팬, 도어, 표시장치 등과 승객이 사용하는 비디오, 방송장치/인터폰, 핸드드라이어, 조명장치, 휴대폰 그리고 열차무선장치, 신호장치 등의 인공잡음을 들 수 있다. 내부잡음은 회로소자 자체에서 발생하는 잡음으로 열잡음, 스위칭 잡음, 드리프트(drift) 등이 있다. 회로 설계 기술자들이 가장 심각하게 느끼는 것은 내부잡음보다 외부잡음의 침입을 어떻게 차단하는가에 더 관심이 있다. 특히 그라운드가 다른 시스템과의 인터페이스 하는 방법이라든가 미세한 신호를 어떻게 처리해야 신호의 감쇄없이 원하는 신호를 추출할 수 있는가 등이다. 특히 신호레벨이 낮을 경우에는 신호와 잡음을 구별하기 어렵고 또 신호처리 과정에서 원하지 않는 성분의 주파수가 발생하기 때문이다.

잡음에 대한 대책으로는 여전히 많은 연구가 진행 중에 있다. 원천적으로는 발생하는 잡음을 봉쇄하고, 잡음의 영향을 받기 쉬운 부분에 대해서는 그라운딩, 차폐, 필터링 등을 이용하여 잡음의 영향을 최소화하며, 그래도 전자기기로 침입한 잡음에 대해서는 적절한 회로설계와 신호처리(반복측정, 평균 등) 알고리즘에 의해서 그 효과를 감쇄시킬 수 있다.

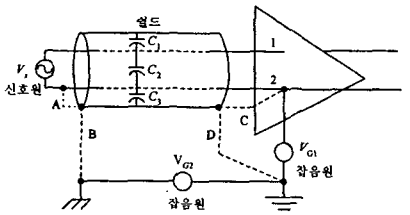
본 연구에서는 철도차량에 탑재된 각종 전자장비들이 전자파환경에서도 그 성능을 충분히 발휘할 수 있도록 설계하기 위한 쉴드선 처리, 차폐와 보호, 평형 전송과 불평형 전송 그리고 실장기술에 대해 소개한다.

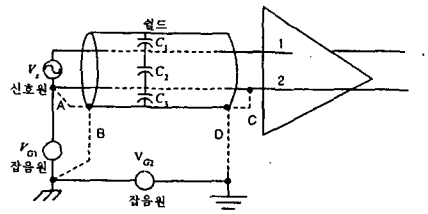
* (주)로템 중앙연구소 선임연구원, 비회원
** (주)로템 중앙연구소 책임연구원, 비회원
*** (주)로템 중앙연구소 수석연구원, 정회원

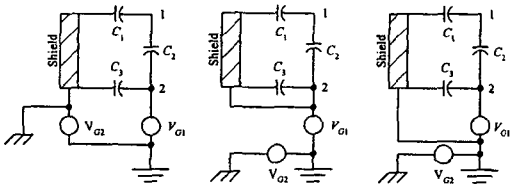
2. 철도차량의 잡음대책 기법

2.1 쉴드선 접지방법

신호를 측정하다 보면 원하지 않은 잡음 때문에 많은 고생을 하게 된다. 대부분의 회로설계 기술자들은 "쉴드선 사용시 그라운드(접지) 루프를 형성시키지 말고, 모든 장비는 가능하면 1점 접지(one-point ground)시켜야 한다" 라는 사실을 알고 있다. 이것은 간단하게 들릴 수 있지만, 현실 세계에서 이것을 만족시키기 위해서는 많은 어려움이 따른다. 본 연구에서는 저주파(수 MHz 이하)에서 쉴드선을 처리하는 방법에 대해 설명된다.

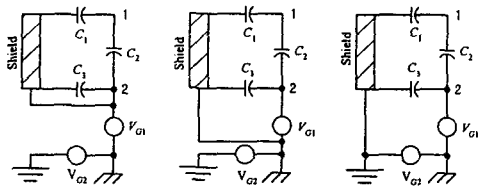






(a) B점에서 연결 (b) C점에서 연결 (c) D점에서 연결

그림 1. 수신측에서 접지



(a) A점에서 연결 (b) B점에서 연결 (c) D점에서 연결

그림 2. 신호원측에서 접지

그림 1은 증폭기가 있는 수신측 2번 핀이 접지된 회로를 나타낸 것이다. 이때 동도 (a)와 같이 쉴드선을 B점에 연결할 경우, V_{12}의 전압은 $V_{12}=\{C_1/C_1+C_2\}(V_{G1}+V_{G2})$이 되고, 동도 (b)는 C점에 연결할 경우, $V_{12}=0$이 된다. 그리고 동도 (c)와 같이 D점에 연결할 경우, $V_{12}=\{C_1/C_1+C_2\}V_{G1}$이 된다. 수신측에서 접지된 경우, B점과 D점은 잡음신호가 입력단자로 흐르므로 불합리하고, C점은 $V_{12}=0$이므로 잡음전압 V_{G1}과 V_{G2}와는 무관함을 알 수 있다. 여기서 V_{G1}과 V_{G2}는 신호선과 접지간의 전위차, 두 접지사이의 전위차를 각각 나타낸다.

그림 2는 센서와 같이 신호원측에서 한쪽 단자가 프레임 그라운드에 접지된 회로를 나타낸 것이다. 이때 동도 (a)와 같이 쉴드선이 A점에 연결될 경우, V_{12}의 전압은 $V_{12}=0$이 되고, 동도 (b)와 같이 B점에 연결할 경우, $V_{12}=\{C_1/C_1+C_2\}V_{G1}$이 된다. 그리고 동도 (c)와 같이 D점에 쉴드선을 연결할 경우, $V_{12}=\{C_1/C_1+C_2\}(V_{G1}+V_{G2})$이 된다. 이와 같이 신호원측의 한쪽 단자가 접지되면, B점과 D점은 잡음신호가 입력단자로 흐르므로 불합리하고, A점은 $V_{12}=0$이므로 잡음전압 V_{G1}과 V_{G2}와는 무관함을 알 수 있다. 즉 신호원측만 접지되어 있으면 그쪽의 쉴드 끝을 신호원과 가깝게 접지시키는 것이 잡음을 최소화하는 방법이라 할 수 있다.

그림 3에서 (a)는 1점 접지를 사용하는 경우, (b)는 다중 접지를 사용하는 경우, 그리고 (c)는 혼합 접지를 사용하는 경우를 나타낸 것이다. (d)와 (f)는 수신측 한쪽이 접지되었을 때, 잡음전압을 제거하고, 쉴드선을 처리하는 방법을 나타낸 것이다. 수신측의 차동 증폭기는 두 접지 사이의 전위차에 의해 발생하는 공통모드(common mode) 잡음전압을 제거하기 위해 사용된다. 동도 (e)와 (g)는 신호원의 한쪽이 접지되었을 때 잡음전압을 제거하고, 쉴드선을 처리하는 방법을 나타낸 것이다. 동도 (h)와 (i)는 통신규약에 있는 RS485, RS422 그리고 RS232C 등과 같이 양방향으로 신호를 전달하는 데 많이 사용되는 방법이며, 동도 (j)와 같이 신호원이 대지나 샤시(또는 프레임)로부터 떠있는(floating) 경우, 예를 들면, 노이즈가 매우 심한 곳에 설치되는 장치(비디오, 통신용 안테나 등)나 센서류(자기부상

열차의 gap센서, 열차의 대차에 부착되어 있는 대차 hunting 센서 등)는 송·수신부에 모두 금속 프레임을 사용하고 동축케이블 또는 꼬임선 쉴드(twisted shield)로 연결하여 수신부에서만 접지시키는 것이 좋은 잡음대책 이라 할 수 있다.

회로를 금속 케이스로 싸서 접지시키는 이유는 외부의 정전유도를 막기 위해서 사용하는 것이다. 만일 이와 같은 목적으로 수신부의 금속 케이스를 대지와 접지 했는데, 신호원쪽에서도 대지에 접지되어 있으면 그라운드 루프가 생기게 된다. 이 경우에 그림 3(k)와 같이 2중 보호쉴드(guard shield)가 사용된다. 즉 금속 케이스 내부에 또 하나의 금속 케이스를 사용하고 여기에 신호그라운드와 쉴드선을 연결한다. 이와 같이 쉴드선을 처리하면, 수신측에는 잡음전압이 매우 적게 나타난다. 다만, 비용과 크기가 증가하므로 실제 응용에 있어서는 시스템 사양에 적합한지 면밀한 검토가 필요하다.

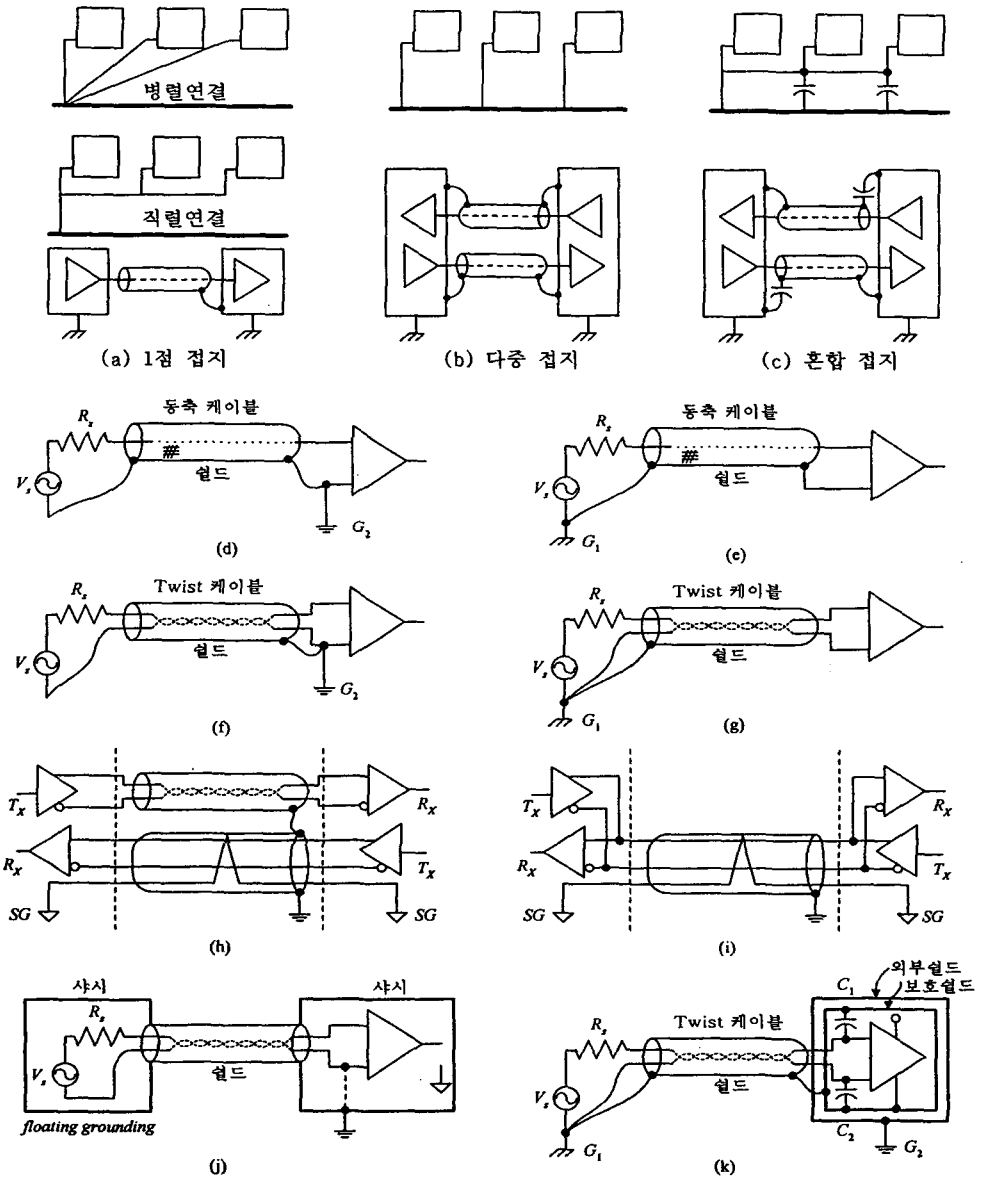


그림 3. 쉴드선 처리방법

2.2 절단된 쉴드선 처리방법

만일 쉴드 케이블이 커넥터를 사용하여 접속된다면, 그림 4와 같이 쉴드선이 중간에 부득이하게 절단되는 경우가 발생한다. 이때 쉴드선은 시스템에 따라 2가지 방법으로 처리할 수 있다. 터미널 블록과 같이 접속이 용이하고, 절단된 편조선의 길이가 매우 짧은 경우에는 인접한 다른 쉴드선과 직접 연결하고, 절단된 편조선의 길이가 긴 경우, 그라운드 루프가 형성되지 않도록 구간별로 각각 접지하는 방법이 있다.

쉴드선이 절단된 곳에는 외부로부터 잡음의 영향을 쉽게 받기 때문에 이 부분을 처리하는 작업은 또 하나의 기술적 문제로 대두된다. 일반적으로 케이블이 절단되는 간격을 스텁의 길이(length of stub)라고 하며 다음과 같이 계산된다.

무손실시 케이블 선로의 특성방정식은

$$Z_o=\sqrt{\frac{L_o}{C_o}} \quad (\because jwL \gg R,\ \ jwC \gg G) \tag{1}$$

이 되고, 무손실시 위상속도 근사식은 다음 식과 같다[3].

$$v_p=\frac{1}{Z_o\times C_o} \tag{2}$$

그리고 스텁(stub)의 길이는 다음과 같이 경험식으로 주어진다[5].

$$t_{pd}=\frac{t_{tD}}{10} \quad \text{and} \quad L_s=t_{pd}\times v_p \tag{3}$$

여기서 t_{pd}는 전파지연시간(propagation delay time), t_{tD}는 전이시간(transition time) 그리고 v_p는 위상속도(phase velocity)를 각각 나타낸다.

그림 5는 시스템에서 분리된 여러 개의 쉴드선이 각각의 기준전위에 연결된 것을 나타낸 것이다. 시스템에서 접지1과 접지2 사이에는 공통모드(common mode) 잡음이 발생하므로 각각의 쉴드선은 자신의 그라운드 전위에 연결해야 한다.

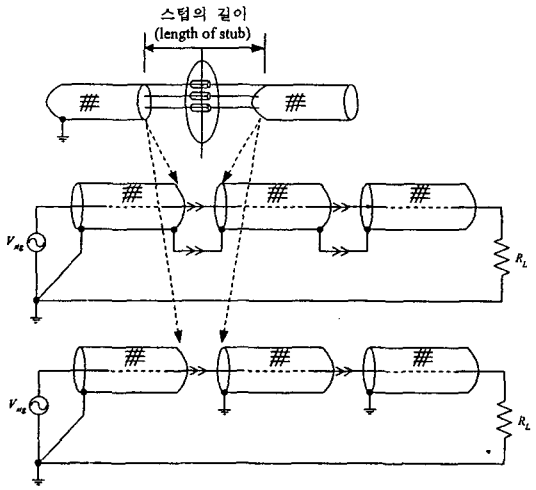


그림 4. 절단된 쉴드선 처리

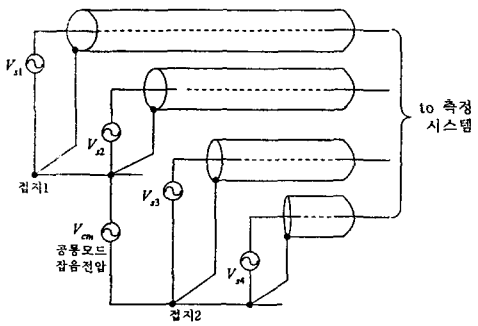


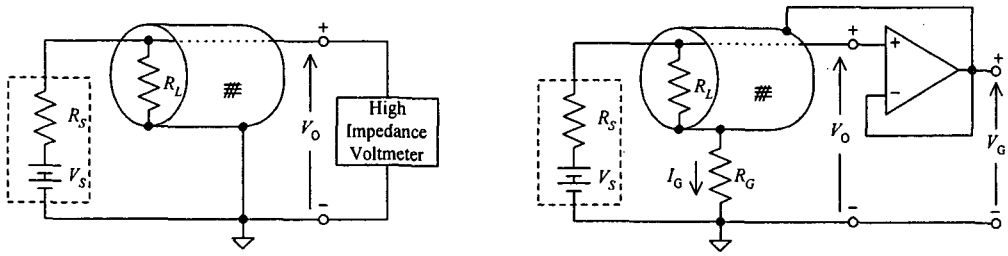
그림 5. 분리된 쉴드선 처리

2.3 차폐와 보호

철도차량에서 간섭과 잡음문제는 차폐와 보호(shielding and guarding)에 의해 대부분 해결할 수 있다. 쉴드선은 잡음을 차단하고, 절연감소에 의한 오류를 줄일 수 있다. 만일 쉴드된 꼬임선(twisted

pair shielded cable)이 변압기와 같은 전자장 근처에 설치된다면, 이것은 자기유도에 의해 신호가 감쇠되는 것을 최소화 할 것이다. 꼬임선을 사용하는 이유는 자속-유도전류가 꼬인 부분에서 역으로 변환되어 상호 상쇄되는 효과를 지니기 때문이다. 따라서 철도차량의 계측시스템에서는 거의 예외 없이 쉴드된 꼬임선을 사용하고 있다. 그리고 계측시스템에서 보호(guarding)는 쉴드 만큼이나 중요하다. guard는 아날로그 전기 회로를 둘러싸고 있는 금속 프레임이고 쉴드와 접속하여 사용한다.

또한 보호쉴드는 연산증폭기의 입력임피던스를 높이는 데 사용할 수 있다. 인터폰의 마이크로전극이나 커패시턴스 트랜듀서 등과 같이 내부 임피던스가 매우 높은 센서를 신호원으로 사용할 때, 수 pA정도의 입력전류는 케이블의 절연저항이나 수 pF의 부유 커패시터에도 큰 부하효과를 나타낸다.



(a) 고 임피던스 측정 회로 (b) Single Guard 회로

그림 6. 고임피던스(high impedance) 신호원 연결도

그림 6(a)는 내부 임피던스가 매우 높은 센서를 동축케이블(coaxial cable)로 연결한 것을 보인 것이다. 회로에서 R_S는 신호원 저항이고, R_L는 누설저항 그리고 V_S는 신호원 전압이다. 이때, 출력전압은 그라운드에 연결된 동축케이블의 쉴드선 때문에 신호원 전압보다 감쇠되어 나타나게 될 것이다. 만일 신호원 저항이 10MΩ이고 누설저항(온도, 습도 등에 의해 변화)이 1000MΩ을 갖는다고 할 때, 출력전압은 $V_o=\{R_L/R_S+R_L\}V_S=0.99V_S$가 되어 신호원 전압보다 1%가 적게 나타나게 될 것이다. 반면, 동도 (b)의 회로에서 쉴드선과 그라운드 사이의 누설저항을 R_G라하고 여기에 흐르는 누설전류를 I_G라고 할 때, 출력전압은 $V_G=V_0=V_S/\{1+R_S/(R_L+R_G)\}\approx V_S$ ($\because R_L+R_G \gg R_S$)이 된다.

동도 (b)에서 알 수 있듯이 쉴드선을 연산증폭기의 출력에 연결하면, 버퍼단의 높은 입력임피던스와 낮은 출력임피던스의 특성으로 인해서 신호가 거의 감쇠되지 않기 때문에 R_L을 통하여 흐르는 누설전류는 거의 발생하지 않는다. 이와 같이 쉴드선이 연산증폭기에 의해 제어될 때, 케이블의 커패시터는 입력회로에서 무시되어 버리게 된다. 이 기술은 보통 케이블 보호(cable guarding)기법으로 정밀한 계측이 요구될 때 사용될 수 있다. 또한 2중 차폐선을 사용하여 내측 보호망(inner guard)의 수신단을 입력버퍼의 출력에 연결하면 버퍼단의 높은 입력임피던스와 낮은 출력임피던스의 특성으로 인해서 신호가 거의 감쇠되지 않고 연산증폭기를 구동할 수 있다. 즉 외측쉴드를 접지시켜 방해유도신호를 차단할 수 있다.

2.4 평형 전송과 불평형 전송

철도차량에 사용되는 방송설비(인터폰)는 시스템의 인터페이스 과정에서 평형전송과 불평형 전송이라는 용어를 접하게 된다.

불평형 시스템은 간단해서 값싸게 할 수 있으나, 외부로부터의 험(hum)이나 버즈(buzz)같은 잡음의 영향을 받기 쉽다.

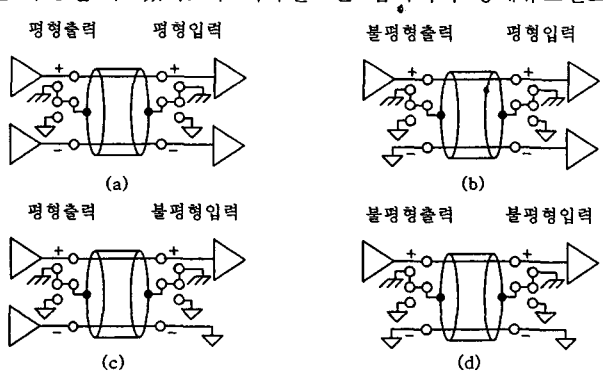


그림 7. 평형 전송과 불평형 전송

특히 마이크로폰 레벨처럼 낮은 레벨에서는 잡음의 레벨이 신호의 레벨 보다 클 경우도 있고, 라인 레벨에서도 무시할 수 없는 잡음이 발생하기 때문에 열차가 고속으로 운행한다든지 터널내에서는 잡음이 매우 심하게 발생할 수 있다. 반면, 평형시스템은 차동 증폭기의 특성을 이용하므로 전송과정에서 발생하는 동상의 노이즈가 소거되는 장점을 가지고 있다. 그럼에도 불구하고 의식적으로나 무의식적으로 쉴드선을 신호그라운드에 접속하면 차량의 시스템에 따라 잡음이 완전하게 소멸되지 않는다. 따라서 그림 7과 같이 쉴드선을 선택적으로 조절하면서 차량의 특성에 맞는 최적의 쉴드선 접지방식을 선택하여야 한다.

2.5 실장 기술

철도차량에 사용되는 전장품의 신뢰성을 높이기 위해서는 성능 좋은 부품을 우선적으로 선별(15%)해야 하겠지만, 그 때문에 코스트가 상승하여 상품의 가치가 떨어진다면 바람직한 설계가 되었다고 말할 수 없다. 신뢰성이 높은 전장품을 설계하기 위한 방법 중의 하나가 실장 기술이라 할 수 있다. 이 분야에 대해서는 많은 연구가 진행되어 방대한 문헌이 소개되고 있기 때문에, 본 연구에서는 PCB(Printed Circuit Board; 인쇄회로기판) 설계시 반드시 지켜야할 몇 가지 항목에 대해 설명된다.

먼저 회로의 부품배치는 고속으로 동작하는 부품은 가급적 전원회로 가까이에 배치하고, 속도가 느린 부품은 먼쪽에 배치하여 과도현상의 영향을 덜 받도록 한다. 또한 신호접지는 신호의 공통기준전위점(signal common ground)을 얻기 위해 사용된다. 가능하면 1점 그라운드(one-point grounding)을 통해서 공통그라운드를 흐르는 수 개의 회로전류에 의해서 생기는 잡음전압을 최소로 해야하며, 잡음에 민감한 부품은 그라운드쪽 가까이에 놓아야 안전하다.

최근 전자회로에 사용되는 부품들은 성능이 향상되고, 바이어스 전류가 nA에서 pA로 극히 낮아지기 때문에 프린트 기판, 커넥터 또는 스위치 등 부품의 절연 재료나 그 표면을 흐르는 누설전류를 무시할 수 없게 되어 누설전류가 흐르게 된다. 이것에 대한 대책의 하나는 확실히 더 좋은 절연물을 사용하고, 절연거리를 길게 잡아 티끌이나 먼지, 습기가 들어가지 않는 구조로 설계해야 한다. 또 하나는 문제가 되는 영역을 패턴으로 둘러싸고 이것을 그라운드로 연결하면, 누설전류는 모두 그라운드쪽으로 유입하여 부품의 입력단자에는 들어가지 않을 것이다. 이와 같이 패턴으로 둘러싸인 테두리를 가드 링(guarding ring) 또는 가드 전극이라 한다. 부득이 수동소자가 많은 회로에서 누설전류를 줄이고 싶은 경우에는 테프론 전선을 사용하면 대부분의 누설전류를 차단할 수 있다.

3 결론

전자장비의 잡음을 억제하기 위한 대책은 제품공정의 기획단계에서부터 설계·제작단계 그리고 품질평가단계에서 고려되어져야 한다. 특히 설계단계에서 고려해야될 기본기술(부품선정, PCB 설계기법, 부품배치, 회로설계)과 대책기술(grounding기법, shielding기법, filtering기법, guarding ring기법 등)은 제품의 성능과 신뢰성을 보증하는데 중요한 역할을 담당한다. 본 연구는 잡음대책 기술에서 50%이상을 차지하는 shielding기법과 일반적인 잡음대책에 대해 소개하였으며, 향후 이러한 기법이 제품설계 및 유지보수에 활용되어지길 기대한다.

참고 문헌

[1] Alan Rich, 'Shielding and Guarding', Analog Device Application Note, AN-347.

[2] Paul Brokaw and Jeff Barrow, 'Grounding for Low-and High-Frequency Circuits', Analog Device Application Note, AN-345.

[3] Data Transmission, TI Data Book, 1993.

[4] IEC 61375 Electric Railway Equipment- Train Communication Network.

[5] A guarding technique for regions containing potential gradients, measurement science conference, February 1998.