

철도 차량 배선의 전압강하에 대한 고찰

A study of Voltage Drop in Electrical Wiring System for Railway Vehicles

손민규†
Son, Min-Kyu

정호영*
Jung, Ho-Young

박두만**
Park, Du-Man

ABSTRACT

To meet the demand increasing passengers in railway vehicles, railway transportation service companies are increasing the numbers of cars per train-set. Two solutions, Variable train-set formations and Multiple train-set operation, are common way to increase the transportation capability. These kind of long distance train-set can effect train-set command and control system, and sometimes the digital signals using train line from master cabin can not reach to the systems located the other extremity slave car. This is so called Voltage Drop. This phenomenon is originated from the electrical power consumption and electrical cable resistance, and cause to the equipments or cars located end of the electrical cable way, malfunction or abnormal operations. This voltage drop happens not only in train lines but also Battery Power Lines. The purpose of this investigation is to design high reliability railway vehicles by clarifying the possibility of happening these events case by case, by analyzing the reasons, and finally by finding the best solutions.

1. 서 론

최근 철도차량의 운용은 승객수요 증대와 더불어서 국내에서는 주로 증편운전이 보편화되고, 해외에서는 다중편 운전이 보편화 되고 있는 추세이다. 이는 차량의 전체 길이를 증대시켜서 차량 간의 신호전달에 영향을 주게 된다. 차량제어 장치(TCMS)의 경우는 각 차량로 콘트롤러가 설치되어 있기 때문에 차량의 길이가 길어지더라도 직렬로 연결된 네트워크로 정보의 전달이 이루어지므로 신호의 전달이 확실하고 신호 감쇠로 인한 차량제어의 문제 발생 소지가 크지 않지만, 인통선을 사용하여 운전실의 명령(디지털 신호)을 각 차로 전달하는 방식의 차량에서는 차량의 길이가 늘어남으로 인한 신호의 감쇠가 일반적으로 발생하게 된다. 이는 인통선에 연결된 부하의 크기에 따른 부하전류와 그 신호를 전달하는 케이블의 저항에 의해서 결정되며, 일반적으로 선로의 전압강하라고 통칭한다. 전압강하에 의해서 차량의 말단에 연결된 차량 또는 장치는 낮은 전압으로 인해서 운전실의 명령을 제대로 인식하지 못하게 되어서 오동작, 미동작의 결과를 초래하기도 한다. 이러한 현상은 비단 인통선에서만 발생하는 것이 아니고 배터리 인통선에도 대전류로 인한 동일한 현상이 발생하여서 차량 전체의 제어전압이 낮게 형성되고, 이로 인해 개별 장치의 오동작/미동작, 등구류의 경우는 조도 감소현상을 만들기도 한다. 본 연구는 차량에서 전압강하로 인해 발생이 가능한 문제점들의 경우를 짚어보고 원인들을 분석하고 대책을 만들어서 좀 더 신뢰성이 있는 차량을 설계함에 그 목적이 있다.

† 책임저자 : 현대로템 기술연구소, 선임연구원
E-mail : mrson@hyundai-rottem.co.kr
TEL : (031)596-9479 FAX : (031)596-9758

* 현대로템 기술연구소, 책임연구원

** 현대로템 기술연구소, 수석연구원

2. 본 론

동일한 소비전력을 보이는 회로에서 전압강하(Voltage Drop)가 철도차량에 문제를 일으키는 경우는 사용 전압이 낮은 경우가 대부분이며, 다양한 현상을 설명하기 위해서, DC 24[V] 제어전원을 사용하고 디젤엔진을 사용하여 추진/보조 전원을 공급하는 디젤동차로 기준 차량을 정의한다. 국내 전동차에서 주로 사용중인 DC 100[V] 제어전원인 경우 동일한 선로조건에서는 DC 24[V]에 비해서 전류치가 약 1/4로 줄기 때문에 전압강하도 1/4 정도로 줄어들게 되고 전압강하로 인한 일반적인 현상이 적게 발생하므로 논의치 않기로 한다.

2.1 제어용 인통선의 전압강하

철도차량에서 가장 일반적으로 사용하는 인통선은 비상제동을 체결하기 위해서 모든 차의 비상제동 체결 조건을 직렬로 연결하여서 어느 한 조건이라도 만족하지 않을 경우, 연결된 편성의 비상제동을 동시에 체결하게 하는 비상제동 체결용 인통선이다. 12량 연결의 차량 편성에서는 각 차마다 비상제동 전자밸브가 연결되게 된다.(차량은 비접지 방식의 회로구성이다)

아래의 그림과 수식은 이러한 조건에서의 전압강하를 계산하여서 각 차량별로 인가되는 전압을 표시한 것이다. 먼저 차량 인통선과 각 차의 부하를 가장 일반적인 1.5sq 케이블(R2) 및 비상제동 제어용 전자변 부하(R1)를 14W로 적용했을 경우에 R1는 42[Ω]이고, R2는 0.49[Ω]이다.

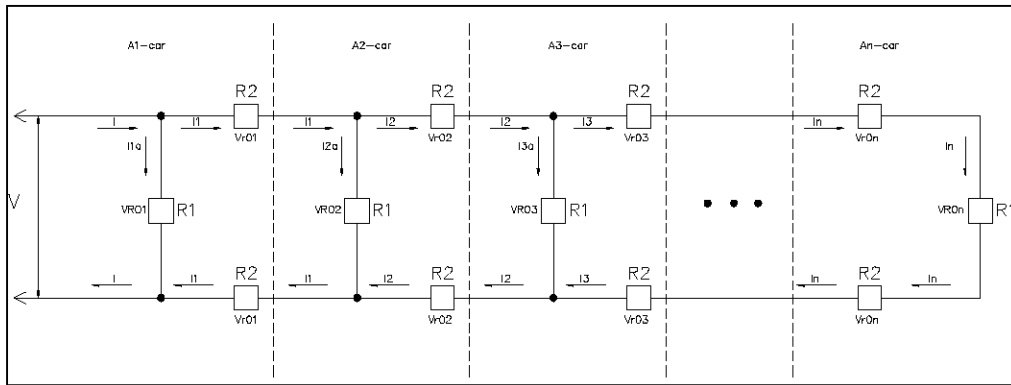
[인통선 저항 계산]			
인통선	저항	케이블 저항/량(R2)	비 고
케이블 size(mm ²)	Ω/km	Ω/량	
1.5	13.70	0.49	
2.0	10.50	0.37	
2.5	8.21	0.29	
3.0	6.58	0.23	

Note

1. 차량길이(UIC 표준차) : 26,400mm
2. 인통선 케이블 표준길이 : 35M/량 적용
3. 적용케이블 : Raychem Zerohal 100G
4. Connector & Terminal Block 전압강하는 케이블 저항의 2%가산
 - Terminal Block에서의 전압강하는 800V인가시 2.6mV이하이다.(저항 : 0.0011Ω)
 - Connector에서의 전압강하는 AC 500V/DC 700V인가시 전류치는 23A이고, 전압강하는 63(74)mV이다.(저항 : 0.003Ω)
5. 전자변 저항(R1) : Electro-Magnetic Valve 적용(Knorr Brake System)
 - 14W : 저항 42Ω

이 경우의 각 차량의 전자변에 인가되는 전압을 계산해 보면 아래와 같다.

[차량제어회로 전압강하 계산표(12R 비접지), 제어전원 DC 24V]



Description		초기조건	
VR0n	: 릴레이에 인가되는 전압	V[V]	24 제어전압 DC
Vr0n	: 케이블 및 접속저항에 의한 전압강하	R1[Ω]	42 전자변 14W/42Ω
R1	: 릴레이의 저항	R2[Ω]	0.49 1.5sq 케이블 적용
R2	: 케이블 및 접속저항	부하[A]	3.8181636
V	: 인가전압(차량제어전압)		
I	: 선로의 전류		

전체 저항계산(ex : 12량계산)						
	릴레이전류	[A]	인통전류	[A]	릴레이전압	[V]
A(12)-car	42.98 Ω		I12	0.1886222	VR12	7.92
A(11)-car	21.48 Ω	I11a	0.1974246	I11	0.1886222	8.29
A(10)-car	14.63 Ω	I10a	0.2064324	I10	0.3860468	8.67
A(9)-car	11.38 Ω	I9a	0.2202569	I9	0.5924792	9.25
A(8)-car	9.55 Ω	I8a	0.2392207	I8	0.8127361	10.05
A(7)-car	8.42 Ω	I7a	0.2637664	I7	1.0519568	11.08
A(6)-car	7.68 Ω	I6a	0.2944666	I6	1.3157232	12.37
A(5)-car	7.18 Ω	I5a	0.3320377	I5	1.6101897	13.95
A(4)-car	6.83 Ω	I4a	0.3773563	I4	1.9422274	15.85
A(3)-car	6.59 Ω	I3a	0.4314799	I3	2.3195837	18.12
A(2)-car	6.41 Ω	I2a	0.4956714	I2	2.7510637	20.82
A(1)-car	6.29 Ω	I1a	0.5714286	I1	3.2467351	24.00
			I	3.8181636		

위의 테이블을 분석해보면, 운전실 차에는 24[V]의 전압이 인가되지만, 12번째인 마지막 차량에는 7.92[V]의 제어 전압이 인가되어서 회로를 정상적으로 동작시키는 것이 불가능하다는 결론에 이르게 된다. 일반적인 제어전원의 전압 범위는 0.7 ~ 1.25배의 정격 전압(24[V] 제어전원의 경우는 16.8[V] ~ 30[V])에서 유지해야 개별 장치의 동작에 이상을 주지 않는다. 위와 같은 고정된 전압, 부하를 제어해야 하는 경우에 선로의 전압강하를 줄이는 해결방안은 R2, 즉 케이블 저항을 줄이는 방법밖에는 없다. 그래서 병렬로 적용 케이블을 2.5sq x 3가닥으로 변경하게 되면,

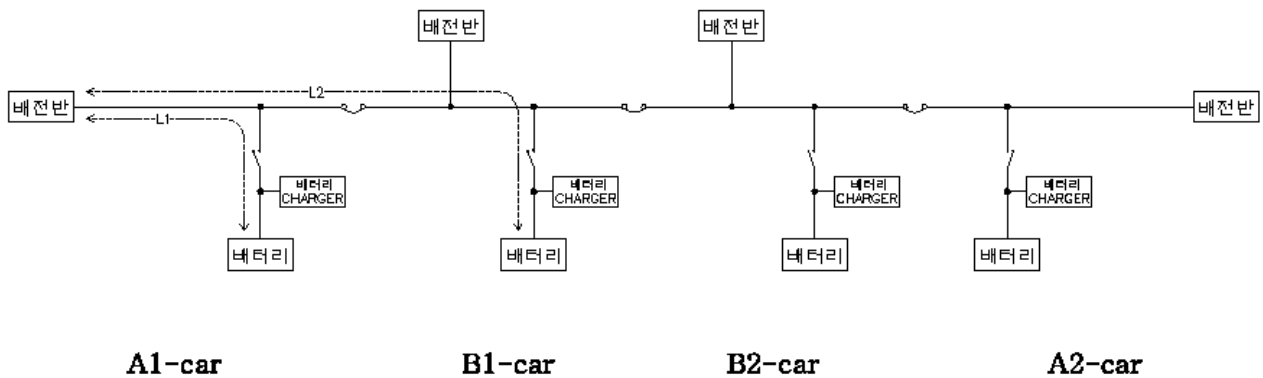
Description		초기조건	
VR0n	: 릴레이에 인가되는 전압	V[V]	24 제어전압 DC
Vr0n	: 케이블 및 접속저항에 의한 전압강하	R1[Ω]	42 전자변 14W/42Ω
R1	: 릴레이의 저항	R2[Ω]	0.097 2.5sq 케이블 병렬 3가닥 적용
R2	: 케이블 및 접속저항	부하[A]	5.7821469
V	: 인가전압(차량제어전압)		
I	: 선로의 전류		

전체 저항계산(ex : 12량계산)						
	릴레이전류	[A]	인통전류	[A]	릴레이전압	[V]
A(12)-car	42.19 Ω		I12	0.4308594	VR12	18.10
A(11)-car	21.10 Ω	I11a	0.4348397	I11	0.4308594	18.26
A(10)-car	14.13 Ω	I10a	0.4388384	I10	0.8656991	18.43
A(9)-car	10.68 Ω	I9a	0.4448641	I9	1.3045375	18.68
A(8)-car	8.64 Ω	I8a	0.4529447	I8	1.7494016	19.02
A(7)-car	7.30 Ω	I7a	0.4631174	I7	2.2023463	19.45
A(6)-car	6.36 Ω	I6a	0.4754293	I6	2.6654637	19.97
A(5)-car	5.67 Ω	I5a	0.4899373	I5	3.1408931	20.58
A(4)-car	5.14 Ω	I4a	0.5067083	I4	3.6308304	21.28
A(3)-car	4.74 Ω	I3a	0.5258197	I3	4.1375386	22.08
A(2)-car	4.41 Ω	I2a	0.54736	I2	4.6633583	22.99
A(1)-car	4.15 Ω	I1a	0.5714286	I1	5.2107184	24.00
			I	5.7821469		

위와 같이 전체 회로의 저항이 감소하고 소비전류는 늘어나지만 전압강하는 정상적인 회로를 동작하게끔 줄어들게 되어 마지막 차량에서도 18.10[V]의 정상전압이 인가되게 된다. 다른 방안으로 차량의 제어전압을 높이는 방법도 있으나, 이는 배터리의 충전전압과 연관되어 있으므로, 면밀한 계산이 필요하다. 설계 초기 단계에서는 케이블의 저항을 감소시키는 동시에 부하를 저 소비전력 전자변(릴레이)으로 적용하는 것을 동시에 검토해야 한다.

2.2 배터리 인봉선의 전압강하

일반적인 철도 차량의 제어 전원은 배터리를 사용하며, 제어전원의 배선은 차량의 모든 배터리를 병렬로 연결하여서 비상시에도 배터리가 남아있는 차량의 전원을 모든 차량에서 공유 할 수 있게끔 설계되어 있다. 이러한 배선방식은 어느 한 차량의 고장 또는 비상부하가 집중된 차량을 다른 차량의 배터리로 유지할 수 있게끔 하여서 배터리 전원의 지속시간이 길어지고, 비상시 대처능력을 향상 시킨다. 배터리 인봉선의 배선은 일반적으로 아래와 같다.



위의 그림은 기본 4량 편성 차량을 기준으로 각 차마다 배터리가 설치된 경우를 표현하였다. 정상적인 경우의 전원공급은 A1-car의 경우는 A1-car의 배터리로부터 공급받게(거리:L1), A1-car의 배터리가 사용할 수 없게 된 경우에는 B1-car의 배터리로부터 공급받게(거리:L2)된다. 케이블의 길이 L1, L2의 일반적인 거리는 차량의 길이(UIC 표준차 : 26,400mm)를 어렵하여 계산해보면 L1(20m), L2(50m) 내외이고, A1-car의 배터리 부하는 정상시 약 2.4[kW]/DC24[V]/100[A]정도이다. 이러한 개략적인 수치에서 배터리 인봉선에서의 전압강하를 계산해보면, 아래와 같다.

2.2.1. A1-car 배터리 정상시 배전반-배터리간의 전압차

배터리 전압 : DC 24[V](충전시 DC 27[V])

선로의 길이(L1) : 40m(비접지 방식)

적용 케이블 : 35sq(Raychem 100G cable, 저항 : 0.57Ω/Km)

선로의 저항 R(35sq, 40m) : $(0.57 \times 40)/1000 = 0.0228[\Omega]$

선로의 전류 : 100[A]

선로의 전압강하(Vd) : $I(100[A]) \times 0.0228[\Omega] = 2.28[V]$

배전반의 전압 : DC 21.72[V](충전시 DC 24.72[V])

2.2.2. A1-car 배터리 완전 방전시 배전반-배터리간의 전압차(B1-car 배터리 사용)

배터리 전압 : DC 24[V](충전시 DC 27[V])

선로의 길이(L2) : 100m(비접지 방식)

적용 케이블 : 35sq(Raychem 100G cable, 저항 : 0.57Ω/Km)

선로의 저항 R(35sq, 100m) : (0.57 x 100)/1000=0.057[Ω]

선로의 전류 : 100[A]

선로의 전압강하(Vd) : I(100[A]) x 0.057[Ω] = 5.7[V]

배전반의 전압 : DC 19.30[V](충전시 DC 21.30[V])

위에서 언급한 2.2.1 및 2.2.2항의 각각에 대해서 문제점을 열거해 보면,

2.2.1항의 경우 문제점

2.2.1.1. A1-car의 배전반에서 차량 제어전압이 감소하여 인통선으로 제어하는 하위 기기의 제어에 문제를 발생("2.1"항의 "제어용 인통선의 전압강하" 참조)

2.2.1.2. 전압 강하에 의한 헤드라이트 조도감소.(아래 전압별 조도측정치 참조)

헤드라이트 조도측정 결과						
구분	전압(V)	전류(A)	소비전력(W)	조도(Lux)	광도(cd)	비 고
1	19	5.18	98.42	1,310	47,160	
2	20	5.33	106.6	1,605	57,780	
3	21	5.46	114.66	1,860	66,960	
4	22	5.6	123.2	2,200	79,200	
5	23	5.74	132.02	2,560	92,160	
6	24	5.88	141.12	2,980	107,280	
7	25	6.02	150.5	3,430	123,480	
8	26	6.13	159.38	3,850	138,600	
9	27	6.26	169.02	4,370	157,320	
10	28	6.4	179.2	5,020	180,720	
11	29	6.53	189.37	5,580	200,880	
12	30	6.65	199.5	6,110	219,960	

Note>
 1) 조도 계산식 : 광도(cd) = 거리² (12) × 조도 (Lux)
 2) SEALED BEAM 시료 : 30V 200W 품명 - 6620 (금호전장 카다로그 참조)
 3) 측정거리 : 광원에서 6M지점.

차량의 조건에 따라서 배전반의 전압은 21.72V(67,000cd)까지 강하할 수 있으며, 27V(157,000cd)에 비해서 밝기는 절반 이하로 감소하게 된다. 이러한 상태는 야간에 심각한 문제를 야기할 수도 있다.

2.2.2항의 경우 문제점

2.2.2.1. A1-car의 배전반에서 차량 제어전압이 감소하여 인통선으로 제어하는 하위 기기의 제어에 문제를 발생("2.1"항의 "제어용 인통선의 전압강하" 참조)

2.2.2.2. 전압 강하에 의한 헤드라이트 조도감소.(상기 전압별 조도측정치 참조)

2.2.2.3. A1-car의 배터리에서의 배터리 충전 불가.

차량의 선로에서 일정 수준의 전압강하가 일어난 상황에서 인접차의 배터리로 전원이 연결된 경우 충전을 진행할 수 있는 전압에 도달하지 못하면 계속적으로 방전이 되고 충전은 불가능하게 된다. 일반적인 차량의 Ni-Cd 축전지 충전전압은 Cell당 1.45 ~ 1.5V이다. 평균셀인 18Cell을 고려하면, 충전전압은 26.1V ~ 27V이다. 그러므로, 위와 같이 인접차에 21.3[V]를 전달 할 수 있는 조건에서는 인접차의 배터리를 충전시키기는 불가능한 조건이다. 즉 고장차의 배터리가 차량과 분리되지 않은 상태로 지속되면 고장차의 배터리는 완전방전에 이르게 된다.

2.2.3. 선로에서의 전압강하를 줄이기 위한 방안.

일반적인 선로 즉 케이블을 선정함에 있어서 그 기준은 대체적으로 허용전류를 기준으로 하고 있다. 케이블 공급사에서 제공하는 허용전류표에 의해서 적용할 케이블의 크기를 정하게 된다. 그러나, 위의

예에서 보듯이 허용전류도 고려가 되어야 하지만, 추가적으로 전압강하 부분도 고려를 해야 신뢰성 있는 선로를 설계할 수 있게 된다.

상기한 예시에서 100[A]의 전류를 예시하였는데, 이 정도의 전류를 도통하기 위해서는 35sq의 케이블이 무난히 적용될 수 있다. 그러나, 전압강하를 고려하여 안정적인 전압을 장치들에 공급하기 위해서는 케이블의 크기가 허용전류 보다는 훨씬 더 크게 설계가 되어야 한다. 기존의 35sq 케이블 대신에 95sq 케이블을 적용하게 되면,

2.2.3.1 A1-car 배터리 정상시 배전반-배터리간의 전압차

배터리 전압 : DC 24[V](충전시 DC 27[V])

선로의 길이(L1) : 40m(비접지 방식)

적용 케이블 : 95sq(Raychem 100G cable, 저항 : 0.21 Ω/Km)

선로의 저항 R(95sq, 40m) : $(0.21 \times 40)/1000=0.0084[\Omega]$

선로의 전류 : 100[A]

선로의 전압강하(Vd) : $I(100[A]) \times 0.0084[\Omega] = 0.80[V]$

배전반의 전압 : DC 23.20[V](충전시 DC 26.20[V])

2.2.3.2 A1-car 배터리 완전 방전시 배전반-배터리간의 전압차(B1-car 배터리 사용)

배터리 전압 : DC 24[V](충전시 DC 27[V])

선로의 길이(L2) : 100m(비접지 방식)

적용 케이블 : 95sq(Raychem 100G cable, 저항 : 0.21 Ω/Km)

선로의 저항 R(95sq, 100m) : $(0.21 \times 100)/1000=0.021[\Omega]$

선로의 전류 : 100[A]

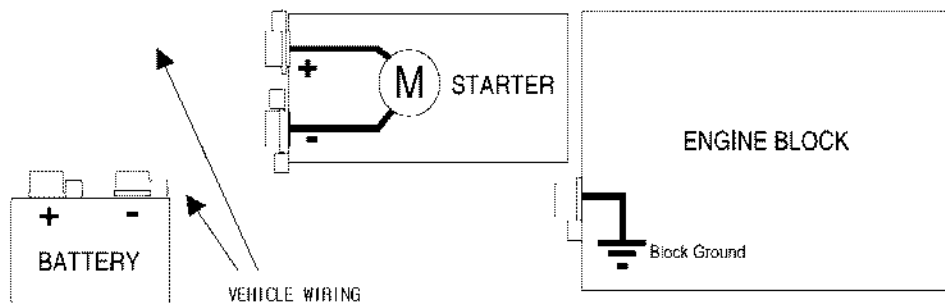
선로의 전압강하(Vd) : $I(100[A]) \times 0.021[\Omega] = 2.1[V]$

배전반의 전압 : DC 21.90[V](충전시 DC 24.90[V])

위와 같이 케이블의 크기를 허용전류 및 전압강하 부분을 모두 반영하게 되면, 간단하게 차량의 전체 전압을 상승시켜서, 제어라인의 문제점들을 미연에 방지할 수 있다.

2.3 엔진 기동회로의 전압강하

디젤엔진을 사용하여서 추진 및 보조전원을 생성하는 동차의 경우는 엔진을 기동하기 위한 기동 모터(Start Motor)를 사용하게 되는데, 일반적으로 DC Motor를 사용하게 된다. 아래 그림은 배터리와 기동 모터의 배선을 표현한 것이다.



이 DC Motor는 차량에 축적된 배터리 전원을 사용해서 디젤엔진을 기동하게 된다. 이러한 엔진 기동 모터는 단시간 내에 큰 토크를 생성하기 때문에 대전류를 짧은 시간에 소모하게 되고, 이는 바꾸어 말

하면 내부저항이 아주 적다는 결론에 이르게 된다. 내부 저항이 아주 적은 모터에 전원을 공급하기 위해서는 그 선로에서의 전압강하도 검토가 되어야 하며, 일반적인 엔진 기동모터의 요청사항(선로 전압강하 최대치)은 0.0017[Ω]이다. 디젤동차는 비접지 방식이 일반적이며, 선로의 전압강하는 배터리에서 엔진 기동 모터간의 선로 길이와 선로의 저항(케이블의 굵기)에 의해서 결정되어진다. 선로의 전압강하가 실제 요구 수치보다 높을 경우 선로에서의 전압강하가 커지게 되고 이는 기동모터에 인가되는 전압이 감소하게 되어서 기동이 불가능하게 될 수도 있다. 아래는 이러한 관계를 수식화한 참고용 테이블이다.(적용 엔진 : Cummins QSK19-R, 750HP x 2100rpm)

케이블 굵기	선로의 길이	저항[Ω]	비고
95sq	1kM	0.21	
	1M	0.00021	
	8M	0.00168	
120sq	1kM	0.164	
	1M	0.000164	
	10M	0.00164	
150sq	1kM	0.132	
	1M	0.000132	
	12M	0.001584	

각 케이블 사이즈 별로 적용 가능한 거리를 짐작할 수 있다. 95sq는 8M, 120sq는 10M, 150sq는 12M를 적용할 수 있다. 거리가 더 멀어지게 되면 케이블을 병렬로 연결하여서 선로의 저항을 줄이는 것이 경제적이고 유지보수면에서도 이점이 있다.

3. 결 론

지금까지 철도차량의 배선에서 전압강하가 일어나게 되는 여러 가지 경우를 실제 차량에서 찾아서 원인을 분석해보고 해결방안들은 논의해 보았다. 이러한 현상은 케이블(도체)를 사용하여 전력을 전달하거나, 신호를 전달하는 선로에서는 일반적으로 발생하는 현상으로 우리의 일상생활과도 밀접한 관계가 있다. 특히나 철도차량에서는 일반적인 현상들이 차량의 운행에 아주 중요한 영향을 미치게 된다. 차량에 제어부분에 정확한 신호 전달이 이루어지지 않으면, 운행중 심각한 문제에 직면할 수도 있으며, 철도차량의 특성상 많은 승객들을 수송하기 때문에 안전과도 아주 밀접한 관련이 있고, 또한 차량의 가용율에도 많은 영향을 줄 수 있다. 이러한 현상에 대해서는 설계단계부터 면밀한 분석이 이루어져야만 안전한 차량운행을 확보할 수 있다. 기본적인 전압강하의 원리는 옴의법칙으로 간단히 해석될 수 있으며, 케이블의 허용전류와 더불어서 선로가 길어지고 전류치가 증가할 경우는 전압강하도 동시에 고려되어야 한다. 즉 부하의 크기 및 선로의 전압강하를 수식으로 분석하여서 그 결과치를 실제 차량에서 확인하고 문제가 발생한 부분에 대해서는 전압강하의 영향을 최소화 할 수 있는 대안을 찾아서 적용해야 한다.

참고문헌

[1] 금호전장 Catalogue