

# 동복강선을 적용한 고속선용 조가선의 성능 및 평가 방안

## Performance and Evaluation of the Messenger Wire stranded by Copper-Clad Steel Conductors for High Speed Electric Railway

이창영\*    백승구\*\*    권성태\*\*    김정국\*\*    창상훈\*\*

Lee, Chang-Young    Baek, Seung-Koo    Kwon, Sung-Tae    Kim, Jeong-Guk    Chang, Sang-Hoon

---

### ABSTRACT

Due to increasing demands for environment-friendly railway system, bronze wires with cadmium, which is a potential environmental hazard, have been no longer permitted as messenger wire for electric railway system. One of materials being considered as the replacements is copper-clad steel conductor(CCSC), which is currently used as contact wire for high speed operation in the Japanese shinkansen. However, there have been few studies for the application as messenger wire by the CCSC.

This study deals with requirements and performances of the messenger wire stranded by the CCSC, especially for high speed electric railway. And the tentative evaluation items and methods to be specified as the Korean railway standard(KRS) are proposed.

---

### 1. 서론

국내 전차선로에 적용되고 있는 조가선은 전기적 성능을 확보하면서도 전차선을 조가하는 충분한 기계적인 강도를 얻기 위하여 동에 카드뮴을 합금한 청동연선(Bz) 및 카드뮴 합금선이 적용되고 있다. 그러나 환경 유해 물질로서 배출 규제 대상으로 분류된 카드뮴은 교토협약 및 몬트리올 협약에 따라 카드뮴을 사용한 제품의 생산 및 판매가 점차적으로 금지됨에 따라, 현재 전차선로에 사용 중인 카드뮴 합금 조가선을 대체하는 친환경 조가선의 개발이 시급한 실정이다.

이에 따라 강심에 동을 용착한 구조의 동복강선(CCSC : Copper Clad Steel Conductor)으로 연선했던 조가선을 국내의 한 중소기업이 개발 진행 중에 있으며, 개발이 성공할 경우 특히 고속선에 사용되는 청동연선(Bz)을 우선적으로 대체할 예정에 있다. 동복강선은 우수한 도전특성이 요구되면서도 기계적 강도가 필요한 통신선 및 전력선용 소재로 이용되고 있으며, 전차선로용으로는 현재 일본의 신칸센에서 고속 집전을 위해 전차선으로 적용되고 있다. 그러나 동복강선을 이용한 조가선의 적용 사례는 해외에서도 드문 실정이다. 본 연구에서는 고속선용으로 설계 진행 중인 동복강선 조가선의 기본 성능 및 허용 전류를 기존 Bz조가선과 비교 평가한 결과와, 향후 고속선의 Bz조가선을 대체할 경우 성능검증에 필요한 평가 항목 및 시험방법에 대해 논하고자 한다.

### 2. 본문

#### 2.1 동복강선 조가선의 설계 및 성능 비교

---

\* 한국철도기술연구원 시험인증연구센터, 주임연구원, 정희원  
E-mail : [cylee@krri.re.kr](mailto:cylee@krri.re.kr)

TEL : (031)460-5525 FAX : (031)460-5539

\*\* 한국철도기술연구원 시험인증연구센터, 정희원

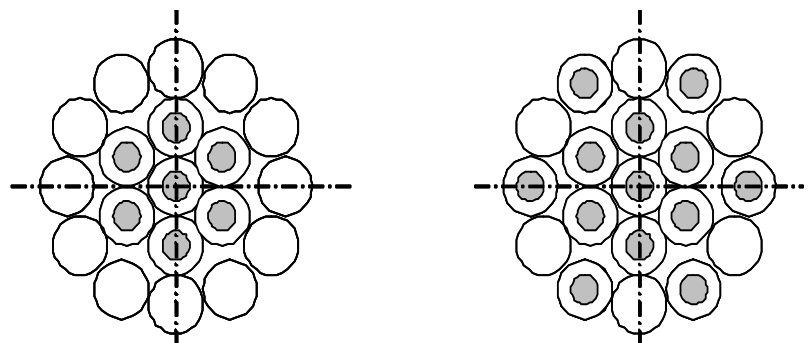
동복강선은 그림 1에서와 같이 강심에 동을 일정 두께로 피복한 구조를 가진 소선으로서, 전기전도도 뿐 아니라 기계적 강도가 요구되는 전력선 및 통신선의 소재로 이용되어 왔다. 동복강선의 기계적 강도는 강심에 의해 결정되고 피복되는 동의 재질이나 두께에 따라 소선의 도전율이 정해진다. 동복강선의 제조 방법은 동의 피복 및 신선 방법에 따라 크게 4가지가 있으며, 각각의 특징은 표 1과 같다. 제조 방법은 동복강선의 적용 목적에 따른 설계 형상과 제조에 따른 경제성 등을 고려하여 선정되며, 조가선용으로는 전차선로에 요구되는 충분한 전기전도도의 확보와 상시 외부 환경의 노출에 따른 장기 신뢰성을 고려하여 충분한 두께의 동 피복이 가능한 용착법으로 제조되었다.

표 1. 제조 방법에 따른 특징 비교

방 법	제 조 방 법	특 징
용착법	용융 동속에 강선을 통과시켜 연속 주조	- 연속 생산 가능 - 동 피복 두께 제어 용이 - 주조 공정 관리 어려움
용접법	강선에 동관, 동리본을 용접 피복 후 Roll로서 압착	- 동 피복 두께 제한적임
봉합법	동관에 강선을 삽입하여, 인발 다이스에 의해 압착 봉합	- 동과 강심의 박리 특성 취약. - 산 처리 비용 과다
전기 도금법	강선에 전기전해법으로 동을 도금	- 동층 두께 제한적이다. - 동층이 손상 받기 쉬우며 부식에 취약함.



그림 1. 동복강선 단면도



(a) Type A

(b) Type B

그림 2. 동복강선 조가선 설계

동복강선 조가선의 설계는 기존 고속선용 전차선로에 요구되는 전기저항과 최소파괴강도를 형상 설계의 기본 요소로 하고 있으며 동복강선과 연동선을 복합한 동심 집중구조로 설계되었다. 복합되는 각각의 소선 개수는 목표하는 전기저항 및 최소파괴강도를 만족할 수 있는 가능한 조합으로 하였으며, 최적 설계에 앞서 기존 Bz조가선과의 성능 비교를 목적으로 두 가지 형상으로 초기 시제품을 설계하였고 그 형상은 그림 2와 같다. 제작된 동복강선의 형상, 전기저항, 그리고 최소파괴강도를 기존 Bz조가선과 비교한 결과를 표2에 나타내고 있다.

Type A는 7(동복강선)/12(연동선) 복합 구조로서 Bz조가선의 최소 인장파괴강도특성을 설계 기준으로 하고 있으며, 저항율에 있어서는 Bz조가선에 비해 약 35% 낮다. 반면 Type B는 13/6 복합구조로서 Bz조가선의 저항율을 설계기준으로 하였으며, 최소인장파괴강도에 있어서 Bz조가선에 비해 10% 높은 특성을 보여주었다. 그러나 두 Type 모두 질량 및 크기 측면에서 Bz조가선에 비해 다소 크게 제작되었으나, 향후 위의 초기 특성을 토대로 복합되는 소선의 크기를 조절할 경우 최적설계가 가능할 것으로 판단된다.

표 2. 동복강선 조가선 및 Bz 조가선 성능 비교

구 분	강심 동연 조가선		청동연선(BzII)
	Type A	Type B	
공칭단면적[SQ]	76.2(7/12)	76.2 (13/6)	65.49
소선경[mm]	2.26±0.01(동복강선) 2.30±0.01(연동선)		1.5
외경[mm]	11.7±0.2	11.9±0.2	10.5
질 량 [kg/m]	0.69	0.749	0.605
최소인장파괴강도[N]	43400	46600	42200
저항율[Ω/km, 20℃]	0.295	0.429	0.439

## 2.2 허용전류의 산정

조가선의 허용전류산정은 전차선로의 급전설계에 중요한 요소이다. 따라서 조가선의 허용전류는 전차선의 설계에 영향을 미치기 때문에 기존 Bz 조가선 대비 동복강선 조가선의 허용전류에 대한 비교 검토가 필요하다. 전선의 최대허용전류는 주변 기후 환경에 따라 영향을 받게 되는데, 사용자의 입장에서는 최악의 환경을 가정하여 최대 허용전류를 규정하고 있다. 본 연구에서는 동일한 환경 조건을 가정하여 조가선 Type별 상대적인 연속허용전류를 비교하였다. 허용전류의 계산은 IEEE Standard 738 『IEEE Standard for Calculating the Current -Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors』을 따랐으며, 계산 과정은 다음과 같다.

가공선의 열평형식  $q_c + q_r = q_s + I^2 R(T_c)$  으로 부터 최대 도체 온도에서의 연속허용전류는

$$I_{\max} = \sqrt{2} \text{ of } \frac{q_{c(T_{c,\max})} + q_{r(T_{c,\max})} - q_s}{R_{T_{c,\max}}}$$

여기서,

$q_{c(T_{c,\max})}$  : 전도에 의한 열손실량 [W/ft]

$q_{r(T_{c,\max})}$  : 복사에 의한 열손실량 [W/ft]

$q_s$  : 태양광에 의한 흡열량 [W/ft]

$R_{T_{c,\max}}$  : 도체 최대 허용 온도에서의 전기저항 [Ω]

$$\textcircled{1} \quad R(T_{c,\max}) = \left[ \frac{R(T_{High}) - R(T_{Low})}{T_{High} - T_{Low}} \right] \times (T_{c,\max} - T_{Low}) + R(T_{Low})$$

$$\textcircled{2} \quad q_{c(T_{c,\max})} = 0.283 \rho_f^{0.5} \cdot D^{0.75} \cdot (T_{c(\max)} - T_a)^{1.25}$$

$$\textcircled{3} \quad q_{r(T_{c,\max})} = 0.138 D \times \epsilon \left[ \left( \frac{T_{c(\max)} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right]$$

$$\textcircled{4} \quad q_s = \alpha \times Q_s \times \sin(\theta) \times A'$$

조가선의 사용조건은 국내설치를 기준으로 풍속이 0 m/s에서 40℃를 최대 사용 주위 온도로 하였으며, 이에 따라 계산에 필요한 변수값과 계산 결과를 표3에서와 같이 나타내었다. 연속허용전류 측면에서도 두 Type 모두 기존 Bz 조가선에 비해 동등이상의 허용전류를 가짐을 확인 할 수 있었다.

표 3. 연속허용전류 산출 적용 변수

기 호	정 의	단 위	입력값			비 고
			Type A	Type B	Bz II	
T <sub>a(max)</sub>	최대 사용 온도	℃	40	40	40	
T <sub>C(max)</sub>	도체최대허용온도	℃	100*	100	100	
T <sub>Low</sub>	전기저항측정온도	℃	12	12	12	(Low)
R <sub>(T<sub>Low</sub>)</sub>	T <sub>Low</sub> 에서 전기저항	Ω/ft	8.793×10 <sup>-5</sup> (288.4 μΩ/m)	12.79×10 <sup>-5</sup> (419.7μΩ/m)	13.22×10 <sup>-5</sup> (433.7μΩ/m)	
T <sub>High</sub>	전기저항측정온도	℃	60±2	68±2	68±2	(High)
R <sub>(T<sub>High</sub>)</sub>	T <sub>High</sub> 에서 전기저항	Ω/ft	10.06×10 <sup>-5</sup> (330 μΩ/m)	14.72×10 <sup>-5</sup> (483μΩ/m)	14.45×10 <sup>-5</sup> (474μΩ/m)	
δ	저항온도계수	-	0.867	1.13	0.720	
R(20℃)	20℃에서의 전기저항	μΩ/m	295.3	428.7	439.5	
α	Solar absorptivity	-	0.5	0.5	0.5	표면산화 및 오손 가정
Q <sub>s</sub>	Total solar and sky radiated heat flux	W/ft <sup>2</sup>	94	94	94	
ε	Emissivity	-	0.5	0.5	0.5	표면산화 및 오손 가정
C <sub>p</sub>	금속의 비열	W-s/l b-℃	192	192	192	Copper적용
연속 허용 전류 [A]			270	228	220	

### 2.3 동복강선 조가선 성능평가 항목 및 시험방법의 검토

동복강선 조가선의 성능평가는 연선상태에서 전기적·기계적 성능을 확보하고 있는지에 대한 평가와 동복강선이 장기신뢰성을 가지는지에 대한 평가로 나눌 수가 있다. 연선상태에 대한 전기적·기계적 성능의 평가는 기존 Bz조가선에 대한 표준규격인 한국철도표준규격을 토대로 평가항목을 도출했으며, 동복강선에 대해서는 ASTM B227 『Standard Specification for Hard-Drawn Copper Clad Steel Wire』에 따라 평가항목을 선정하였다. 또한 각 평가항목에 대한 시험방법은 관련 국내외 KS시험 규격을 적용하였다. 이상의 국내외 관련 규격을 기초로 하여 동복강선 조가선의 성능검증에 필요한 평가 항목을 종합하면 표 4와 같으며 이에 따른 시험방법은 다음과 같다.

#### 2.3.1 동복강선에 대한 성능 평가

##### 1) 겉모양검사

겉모양검사는 KSC 3002의 3항(겉모양)에 의한다.

2) 구조검사

구조검사는 KSC 3002의 4항(구조)에 의한다.

3) 인장강도 및 신장율 시험

인장강도 및 신장율 시험은 KSC 3002의 5항(인장)에 의한다.

4) 도전율 및 전기저항 시험

도전율 및 전기저항 시험은 KSC 3002의 6항(도전율)에 의한다.

5) 비틀림시험

비틀림시험은 공칭소선 지름의 100배의 길이를 비틀림 시험기로서 15회/분 정도의 속도로 시험하였을 때 표2의 규정치에서 동 피복에 흠, 갈라짐, 벗겨짐 등 결함이 있어서는 안되고 끊어지지 않아야 한다.

6) 동피복 두께시험

동피복 두께는 소선의 수직단면 4개소를 동두께 측정기로 측정하여 표2의 규정치 이상이어야 한다.

7) 훼록실시험(Ferroxyl test)

시료를 지름의 8배의 둥근직경(Mandrel)에 권부하여 3분동안 염산(비중 1.19) 1:1용액에 담근 다음, 증류수로 수세한후 11ml의 황산(비중 1.84)을 첨가한 증류수 1,000ml에 시안화 제2철 칼슘(potassium ferricyanide) 10g으로 조제한 용액에 2분 동안 담근다. 이때 용액의 온도는 15~20℃이어야 하며 시편을 용액에서 꺼내어 육안으로 보아 청색의 변색이 보여서는 안된다. 의심이 생기면 동일시료를 질산액 내에서 10초동안 담근 다음 깨끗이 수세한 후 재시험을 시행해서 이상이 없을시 합격으로 인정한다.

8) 압축시험

10mm정도의 시료를 수평으로 하여 면이 평활한 눌림쇠로 시료의 전 접촉면을 동시에 3,600kg으로 압축한 후 시료의 끝부분(절단면)에서 동피복과 강심이 분리되어서는 안된다.

9) 굽힘시험

30cm의 시료를 바이스(Vise)로 움직이지 않도록 물리고 시료를 좌우방향으로 90°로 구부러 편 후 구부린 부위를 절단 하였을 때 동과 강심이 분리되어서는 안된다. 이때 시료의 한끝에서 바이스의 물리는 길이는 5cm로 하고 바이스(Vise)턱의 곡률반경은 4.8mm로 한다.

### 2.3.2 연선에 대한 성능 평가

1) 겉모양검사

겉모양검사는 KSC 3002의 3항(겉모양)에 의한다.

2) 구조검사

구조검사는 KSC 3002의 4항(구조)에 의한다.

3) 인장강도 및 전기저항 시험

인장강도 및 전기저항 시험은 KSC 3002의 5항(인장) 및 6항(도전율 및 전기저항)에 의한다.

표 4. 평가 항목 종합

구분	시 험 항 목	인정시험	검수시험	구분	시 험 항 목	인정시험	검수시험
동 복 강 선	겉 모 양 검 사	○	○	연 선	겉 모 양 검 사	○	○
	구 조 검 사	○	○		구 조 검 사	○	○
	인 장 시 험	○	○		최소인장파괴강도	○	○
	도 전 율 시 험	○	○		저 항 율	○	○
	비 틀 립 시 험	○	○				
	동 피 복 두 께 시 험	○	○				
	혜 록 실 시 험	○	○				
	압 축 시 험	○	-				
	굽 힘 시 험	○	-				

### 3. 결론 및 정리

본 논문에서는 기존 고속선에 사용하고 있는 Bz조가선의 대체를 목적으로 동복강선을 이용한 조가선의 기본 성능 및 허용전류를 기존 Bz조가선과 비교하였으며, 또한 성능검증에 필요한 평가 항목 및 시험방법에 대해 알아보았다. 현재, 초기 시제품에 대한 평가 결과를 반영하여 동복강선 조가선의 최적 설계가 진행 중에 있다. 아울러 현장에서의 장기간 사용에 따른 신뢰성을 평가하고, 문제점이 발생할 경우 이를 검증할 수 있는 평가항목을 추가하기 위해 시제품에 대한 현장 설치시험이 진행 중에 있다.

#### 참고문헌

1. Friedrich Kießling, Rainer Puschmann, and Axel Schmieder, *Contact Lines for Electric Railway*, PUBLICS: 2001.
2. *Japanese Railway Technology Today*, Railway Technical Research Institute and East Japan Railway Culture Foundation, 2001.
3. *IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors*. IEEE Standard 738-1993.
4. ASTM B227-04, Standard Specification for Hard-Drawn Copper Clad Steel Wire
5. ASTM B229-04, Standard Specification for Concentric-Lay-Stranded Copper and Copper-Clad Steel Composite Conductors
6. 한국철도표준규격 KRS PW0008 청동연선(Bz)