

전차선로 드로퍼 클램프 파단 원인 분석

The Cause Analysis on Fracture of Dropper Clamp in Catenary System

김정남*
Kim, Jung-Nam

권성태**
Kwon, Sung-Tae

강계명***
Kang, Kae-Myung

ABSTRACT

This study investigate the cause analysis on fracture of dropper clamp in catenary system. Dropper clamp is using as a holder between messenger wire and contact wire in catenary system. To analyze the cause analysis on fracture of dropper clamp, we have conducted experiment such as tension withstand strength test, holding strength test of a new products, SEM and EDX of field fractured specimens.

1.서론

Simple Catenary식 전차선로에서 전차선과 pantograph가 습동할 때의 이선을 줄이기 위해 전차선을 일정 높이로 유지시키기 위한 방식으로는 행거방식과 드로퍼방식이 있다. 행거방식은 철사와 같은 가요성이 없는 강체 타입의 부재로 전차선에는 클램프로 연결되나 조가선에는 걸쳐놓는 방식으로 보호cover에 의해 조가선과 전차선이 전기적으로 절연이 되어 방식이고, 드로퍼 방식은 조가선과 전차선이 드로퍼의 양끝 단에서 연결금구로 완전히 체결되어 기계적인 현수지지 역할과 함께 전기적인 통로 역할도 수행하는 방식이다. 행거방식은 유지보수나 시공이 용이하고 설치비가 저렴한 장점이 있으나, 보호cover 이탈시 전위차로 인한 전기적인 손상 우려가 있다. 반면 조가선과 전차선의 전위차를 경감시키고, 균압 설비를 줄일 수 있어 전차선 경점을 저감할 수 있는 드로퍼방식은 단가가 비싸고 설치작업이 번거롭다는 단점에도 불구하고 신규 발주되는 사업에는 드로퍼 방식이 채택되어 시공되어지고 있다^{[1][2][3]}

본 연구에서는 최근 시공되어 사용중인 드로퍼 클램프가 일부 파단되어 이에 대한 원인 검토를 수행하고자 하였다. 이를 위해 신품 드로퍼 클램프의 화학성분 분석 및 인장내하중시험과 장악력시험을 통해 제품이 철도용품 표준규격에 적합하게 제작되었는지의 여부를 확인하였으며, 인장내하중시험 후의 파단면과 현장에서 수거한 파단 제품의 파단면을 광학현미경과 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 검사하였고, EDX(Energy Dispersive X-ray)로 파단 제품의 파단면 원소 성분 분석을 수행하였다.

* 한국철도기술연구원 위촉연구원, 비회원

** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

*** 서울산업대학교 신소재공학과 교수, 비회원

2.본론

2.1 Cu-Sn 합금 및 합금원소의 영향

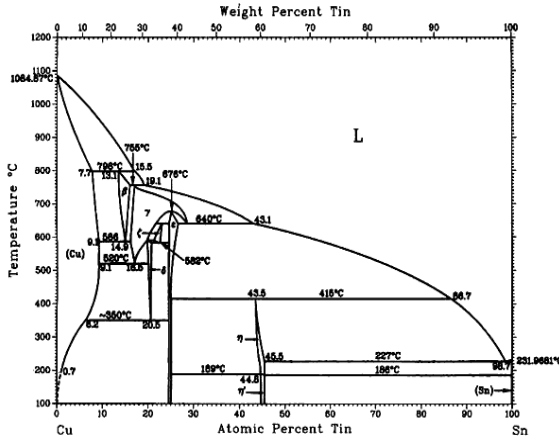


Fig.1 Cu-Sn Equilibrium Phase Diagram

2.1.1 Cu-Sn 합금

Fig.1은 Cu-Sn 평형상태도를 나타낸 것으로서 Cu측에 α고용체가 있고, Sn의 최대고용도는 520°C에서 약 15.8%이다. 그러나 실제 이 합금을 취급할 경우에는 α고용체의 용해도의 감소는 볼 수 없고, 520°C이하에서도 15.8%로 거의 일정하다. 즉 응고 도중 평형의 균질상 생성이 어렵기 때문에 기술적으로 응용되는 가공형 Cu-Sn 합금의 Sn함량은 통상 9%미만이다. 넓은 응고영역으로 인해 Sn농도가 다른 조직이 생기게 된다.

2.1.2 Cu-Sn 합금에서의 합금원소의 영향

드로퍼 클램프의 재질인 인청동은 용해주조시에 탈산제로 사용하는 P의 첨가량을 많게 한 합금으로써 합금 중에 0.05~0.5%정도의 P를 남게 하면 용탕의 유동성이 좋아지고 합금의 경도, 강도가 증가하며 또 내마모성, 탄성이 개선된다. P는 극소량 Cu중에 고용하나 그 이외는 경하고 취약한 Cu₃P상으로 존재하고, 또 P함량에 의하여 Sn의 고용도가 저하하므로 조직중에 δ상이 증가하여 Sn을 증가한 때와 같이 경도가 커지는 효과가 있다. 반면에 전기전도도와 열간가공성은 낮아진다. Zn은 α상 영역 경계를 Sn 함량이 낮은 쪽으로 이동시켜 Cu-Sn의 가공성을 향상시킨다. 그 외 Zn 첨가에 의한 기술적 장점은 없고 다만 경제적인 측면에서 많이 사용된다. Cu-Sn 합금에 0.1% 까지 첨가될 수 있는 Fe는 미량이지만 가공경화능을 높이고 또한 입자를 미세화 시킨다. 함량이 0.2%를 초과하면 Fe입자가 조직상에 나타나서 자기적 특성을 변화시킨다. Pb는 절삭성을 좋게 하지만 열간가공시에는 미량이라도 열간취성을 야기시키므로 유해하다. 따라서 Cu-Sn 합금계에 있어서 Pb의 함량은 0.05% 이하로 제한되어 있다.^[4]

2.2 화학분석

본 연구에 사용된 시험편은 신품 3개와 현장 파단품 2개로 그 화학성분은 아래 Table 1과 같으며, 철도용품 표준규격(철도 5975-3340)에 규정된 재질 분석 기준은 Table 2와 같다.

Table 1. Chemical composition of test specimens

specimen #	Chemical composition elements (wt.%)					
	Cu	Pb	Fe	Sn	Zn	P
product #1	Balance	0.01	0.023	7.60	0.008	0.224
product #2	Balance	0.00	0.022	7.97	0.005	0.197
product #3	Balance	0.01	0.022	8.26	0.005	0.170
fracture #1	Balance	0.03	0.066	7.95	0.029	0.184
fracture #2	Balance	0.03	0.021	7.83	0.007	0.167

Table 2. Chemical composition of KRS 5975-3340 standard

Chemical composition elements (wt.%)					
Pb	Fe	Sn	Zn	P	Cu+Sn+P
□□0.05	□□0.10	7.0~9.0	□□0.20	0.03~0.35	□□99.7

화학분석은 발광분광분석기(spark emission spectrometer)로 분석하였으며, 분석결과 신품 3개와 현장 파단품 2개의 화학조성 모두 철도용품 표준규격(철도 5975-3340)의 기준에 만족하는 것으로 조사되었다.

2.3 인장하중시험 및 장악력시험

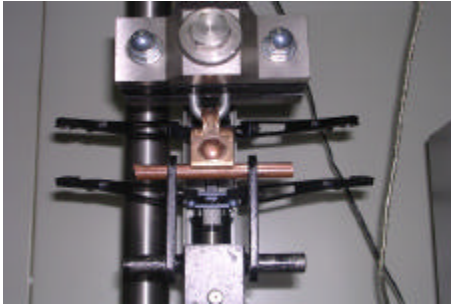


Fig.2 Tension Withstand Strength Test

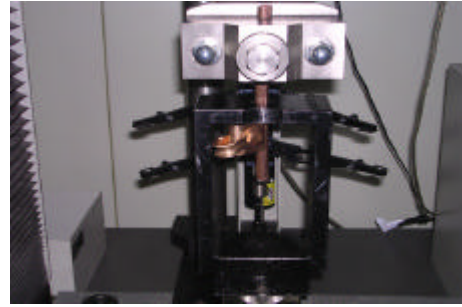


Fig.3 Holding Strength Test

철도용품 표준규격(철도 5975-3340)에 따라 신품 시험편에 대한 인장하중시험 및 장악력시험을 행하였다. 인장하중시험은 Fig.2와 같이 클램프를 사용상태로 설치하여 볼트,너트를 600kg·cm의 체결력으로 조인 후 수직방향으로 인장하중을 가하는 시험이며, 장악력시험은 Fig.3과 같이 클램프와 적용전선과의 물림상태를 파악하기 위한 시험으로 두 시험 모두 기준하중 이상에서 적용전선 및 클램프 각 부분의 물림상태에 이상이 없어야 한다.^[5]

Table 3은 신품 시험편에 대한 인장하중시험 결과로서 모두 기준 하중 이상의 값을 나타내었다. 본 시험에서는 클램프의 걸림쇠 부분이 모두 파단되었으며 특히 product #1 시험편의 경우 현장 파단품과 유사한 부위에서 파단이 발생했다. 본 시험의 기준하중은 드로퍼 클램프의 체결 성능과 관련된 하중이다.

Table 3. Tension Withstand Strength Test Results

specimen #	Max.braking load (N){kg}	test standard load (N){kg}	remarks
product #1	13,216{1,348}	□□2,942{300}	fractured
product #2	13,813{1,409}		fractured
product #3	11,305{1,153}		fractured

Table 4는 신품 시험편에 대한 장악력시험 결과로서 인장하중 시험과 마찬가지로 모두 기준 하중 이상의 값을 나타내었다. 시험 결과의 하중은 클램프가 전선으로부터 빠져나오기 시작하는 하중이다.

Table 4. Holding Strength Test Results

specimen #	Max.load (N){kg}	test standard load (N){kg}	remarks
product #1	3,186{325}	□□981{300}	slipped
product #2	3,611{368}		slipped
product #3	3,923{400}		slipped

2.4 파단면 분석

인장하중 시험후 파단된 신품 시험편과 현장 파단품의 미세구조를 관찰하여 파단 원인을 규명하고자 광학현미경과 SEM으로 파단면을 검사하였으며, EDX분석을 통하여 현장 파단품의 원소 성분을 분석하였다.

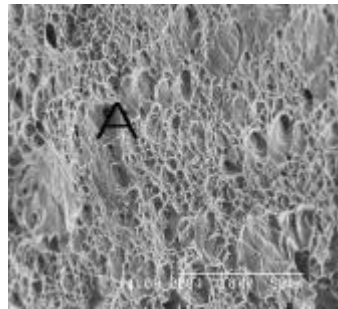
Table 5에 SEM과 EDX분석에 사용된 시험편의 개요를 나타내었다.

Table 5 Analysed specimens by SEM and EDX

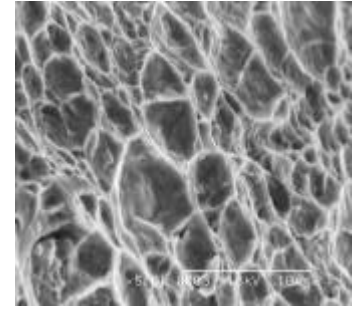
specimen #	specimen explanation	Analysed methods
product #1	product	SEM
fracture #1	fractured surface	SEM and EDX
fracture #2	fractured surface	SEM and EDX



(a) Optical micrograph ($\times 16$)



(b) SEM micrograph of A ($\times 1,000$)



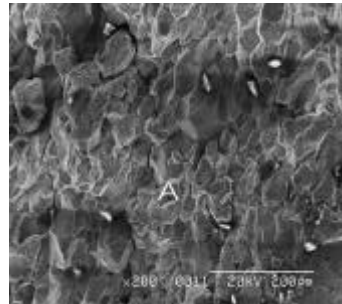
(c) SEM micrograph of A ($\times 5,000$)

Fig.4 Micrographs of product #1

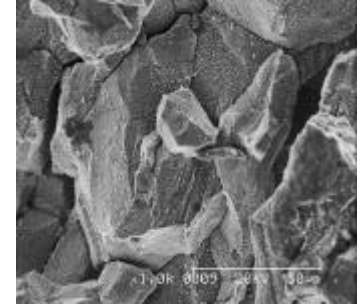
Fig.4는 인장하중시험 후 파단된 신품 시험품(product #1)의 파단면을 SEM으로 분석한 결과로서 (c)의 형상을 보면 미세적인 다수의 분화구 형태로 구성되고 있는 Dimple 형태가 발견되고 있다. 즉 파단 부위에 연신과 단면 수축 현상을 동반하는 연성 파괴로 Slip면 분리 또는 미소 공동의 합체에 따른 것이다. 또한 Dimple형상이 등축인 것으로 보아 파면에 대해 수직방향으로 균일한 인장응력이 작용했음을 알 수 있다.



(a) Optical micrograph ($\times 16$)



(b) SEM micrograph of A ($\times 200$)

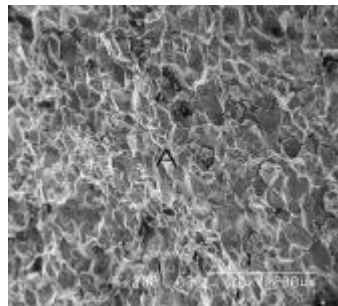


(c) SEM micrograph of A ($\times 1,000$)

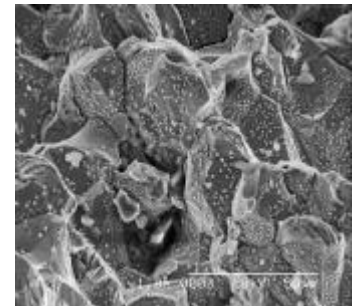
Fig.5 Micrographs of fracture #1



(a) Optical micrograph ($\times 16$)



(b) SEM micrograph of A ($\times 200$)



(c) SEM micrograph of A ($\times 1,000$)

Fig.6 Micrographs of fracture #2

Fig.5,6은 현장 파단품(fracture #1, #2)의 파단면을 광학현미경 및 SEM으로 분석한 결과이다. Fig.5,6의 (b)경우 다수의 파괴 기점을 보여주고 있으며, 검은색 부근에서 부식 흔적이 발견되고 있다. (c)에서는 확연하게 균열 양상을 보여주고 있다.

Table 6과 Fig.7은 현장 파단품(fracture #1, #2)에 대한 EDX 분석 결과로서, 두 시료 모두에서 C와 O가 각각 11%와 15%이상 검출되어 탄화 및 산화현상이 진행되었다는 것을 알려준다.특히 fracture #2에서는 S와 Cl이 검출되었는데 이 원소들은 일반적으로 응력 부식 균열의 손상 원인이 된다. 일반적으로 Cu는 H₂S등 미량의 S화합물에는 내식성을 가지고 있지 않으므로 Fig.5의 (b)에서 보여지는 부식 현상은 S화합물에 상당량 기인된 것이라고 사료된다. 즉, H₂S은 사용 금속과 대기 분위기 중에서 상호 반응하여 수소를 발생시키고 이때 발생하는 수소는 크기가 작아 결정립계를 통하여 결정내로의 확산이 용이하여 제품 내면 깊이까지 확산하게 되며 이로 인하여 입계의 결합력을 떨어뜨리는 입계 수소 취성을 유발하는 매우 위험한 부식손상에 해당된다. 여기에 응력 조건이 가해질 경우 부식 속도는 더욱 가속화된다. 또한 Cl 역시 균열부식(Crevice corrosion)을 가속화시킨다.

Table 6. EDX Analyses of Fractured specimens

spectrum	Chemical composition elements (wt.%)									
	C	O	Al	Si	S	Cl	Fe	Cu	Sn	Totals
fracture #1	11.35	15.26	0.48	0.97	0.46	0.52	4.39	59.75	6.81	100.00
fracture #2	37.85	16.27						45.88		100.00

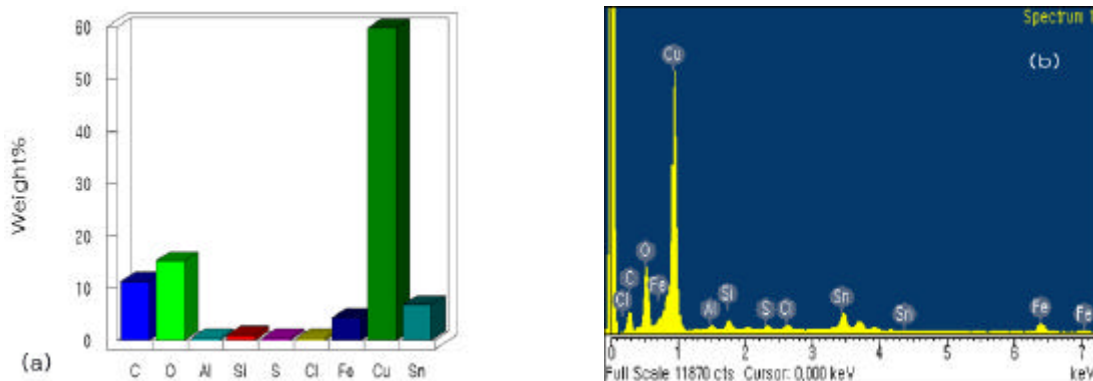


Fig.7 EDX Analyses of Fractured specimen #1

드로퍼 클램프 뿐만 아니라 전차선로의 각종 구성 설비들은 장력 또는 일정 하중을 지탱하면서 대기 중에서 장시간 기능을 유지해야 하는 역할을 담당하고 있다. 따라서 응력 부식 균열 (Stress Corrosion Cracking, SCC) 발생 환경에 쉽게 노출될 수밖에 없다. 응력 부식 균열은 금속 부품에 가해진 응력이 부식 분위기 하에서 부식 균열의 생성과 성장을 가속화하여 파손에 이르게 하는 손상이다. 파손 과정에 있어서 표면의 극심한 부식 현상이나 두께 감소 혹은 치수 변화와 같이 파손을 예측할 만한 외견상 징후를 완전한 파단에 이르기까지 거의 예측할 수가 없다. 이로 인해서 구조물이나 제품이 응력 부식 균열을 당할 경우 갑작스런 파단에 이르게 되어 경제적으로 중대한 손실을 입게 된다.^[6]

응력 부식 균열은 부식 분위기와 응력조건외 두 요인에 기인하므로 재료의 내식성 향상 및 소재 압연시의 일반 성형 공정과 cutting, edging, stamping 등의 성형 후 가공 공정시 잔류하는 응력을 제거하기 위하여 응력제거 열처리와 같은 후처리가 필요하다고 사료된다.

3.결론

- 1) 사용중 파단된 제품과 동일한 신품이 철도용품 표준규격(철도 5975-3340)에 적합하게 제작되었는지 확인하기 위해 화학성분 분석과 인장내하중시험, 장악력시험을 수행한 결과 신품 모두 규격에 적합한 것으로 확인하였다.
- 2) 인장내하중시험 후의 신품 시험편과 현장 파단품의 파단면을 광학현미경과 SEM으로 검사하여 파단 원인을 분석하였다.
- 3) 신품 시험편의 파단면은 등축 Dimple 형상의 연성파단이 발생하였으며, 현장 파단품의 경우는 응력 부식 균열이 발생하였다.
- 4) 현장 파단품의 파단면에 대한 EDX 분석 결과 C가 각각 11.35, 37.85%, O가 각각 15.26, 16.27%가 함유되어 탄화 및 산화현상이 발생하여 부식 환경에 놓여 있었음을 알수 있었다.
- 5) 응력 부식 균열의 손상 원인인 S와 Cl이 각각 0.46, 0.52%가 함유되어 있었다.
- 6) 응력 부식 균열은 부식 분위기와 응력조건의 두 요인에 기인하므로 재료의 내식성 향상과 더불어 소재 압연시의 일반 성형 공정과 cutting, edging, stamping등의 성형후 가공 공정시 잔류하는 응력을 제거하기 위하여 응력제거 열처리와 같은 후처리가 선행되어야 한다고 사려된다.

참고문헌

1. 김연근, (2002), “전차선로 드로퍼 클램프 재질 향상에 관한 연구”, 서울산업대학교, pp.3~6
2. 이기원, (2003), “전차선로용 드롭바 클램프 절손 원인 분석/검토보고서”, 한국철도기술연구원, pp.1~13
3. 한국철도산업기술연구원, (1995.10), “전철설비의 절연열화 진단기법에 관한 연구”, pp.103,164
4. 양동영, (1994.01.10), “신금속재료학“, pp.372~379
5. 철도청, (2003.12.16), “철도용품 표준규격 5975-3340”
6. 최병학, (1997), “금속손상진단”, 진영사, pp.70~73
7. “フラクとグラフィ”, (1976), 北川英夫, 小寺沢良一, pp.39~78
8. “金屬破斷面 写真集”, (1960.07), テクノアイ 出版部, pp.592~649