

전차선로용 곡선당김금구의 성능향상에 관한 연구

김찬영*, 류근배, 정용철
우석대학교*, 철도청

A Study on the Performance Improvement of Pull-off Fitting for Catenary

Chan Young Kim*, Geun Bae Lyu, Yong Chul Chong
Woosuk University*, Korean National Railroad

Abstract - This paper presents the results of materials and mechanical analyses and performance improvement of pull-off fitting used for catenary. The pull-off fitting is supporting the trolley wire which supplies the electricity. However, the pull-off fitting is repeatedly suffered by the mechanical stresses which produce cracks in the swivel clip, resulting in interruption of an electric car. The characteristic analyses of the swivel clip were performed and the improved swivel clip was suggested.

다. 따라서 물림쇠 A보다는 B가 기계적, 구조적으로 취약하였거나, 선로에서 더 큰 하중을 받았던 것으로 판단할 수 있다.

1. 서 론

이 논문은 전차선로에 사용되고 있는 곡선당김금구의 회전클립에 대한 기계적, 재료적 특성을 평가한 결과 및 성능향상에 관한 연구에 대하여 기술하였다. 전차선로에 사용되고 있는 곡선당김금구는 전차에 전기를 공급하는 트롤리선을 지지하는 역할을 하는 것으로써, 트롤리선의 중량에 의한 하중과 전차의 이동에 의한 진동을 반복적으로 받고 있고, 트롤리선과 곡선당김금구 행거이어(이하 회전클립)의 이종금속에 의한 부식과 전류에 의한 전식이 발생하고 있기 때문에, 전기, 기계, 재료적으로 취약한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 트롤리선을 지지하고 있는 회전클립에 대한 재료적, 기계적 특성을 평가하여, 성능을 향상시키기 위한 방안에 대하여 기술하였다.

2. 본 론

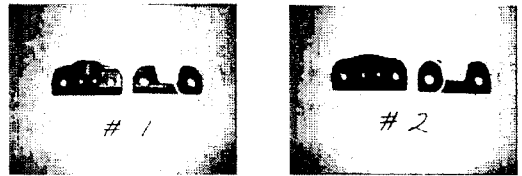
2.1 시료의 재원

분석에 사용된 회전클립의 재원은 표 1과 같이 총 4개의 일반개소에 사용되는 지상용(SC1) 회전클립이다. 이 회전클립들은 실선로에서 사용 중에 균열이 발생한 제품들로서 정기 점검시 균열을 발견하고 교체한 제품들이다.

표 1. 시료의 재원

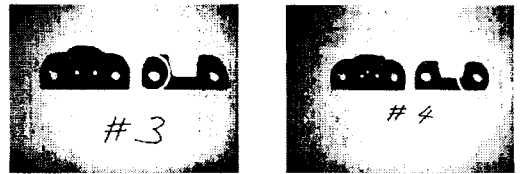
제품 번호	건전유무	사용개소
1	파손품	지상용 (SC1)
2	"	
3	"	
4	"	

그림 1에 균열이 발생된 위치를 원으로 표시하였다. 회전클립은 모두 물림쇠 B에서 파손된 것으로 나타났다.



(a) 제품 1

(b) 제품 2



(c) 제품 3

(d) 제품 4

그림 1. 회전클립의 균열위치(왼쪽 물림쇠 A, 오른쪽 물림쇠 B)

2.2 측정 및 분석

2.2.1 경도의 측정

균열이 발생된 회전클립의 특성을 확인하기 위하여 경도를 측정하였다. 경도측정은 균열이 발생되지 않은 물림쇠 A의 일부분을 발체하여 bakelite로 mounting한 후, 샌드페이퍼로 연마(polishing)하고 다이아몬드 페이스트(1 μm)로 재연마하여 경도를 측정하였다. 경도는 Rockwell Hardness Tester로 100kg-1/16" ball 압입자로 9~11회를 측정하여 평균값을 계산하였다. 경도의 측정결과는 표 2와 같다.

제품 1번~4번의 회전클립의 경도는 기준값인 85이상으로 모두 양호한 것으로 확인되었다. 이것은 회전클립의 경도가 기준 이상이라도 실제 선로에서 사용 중에 균열이 발생할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 회전클립에 균열을 생성시킬 수 있는 하중이 가해지고 있는 것을 의미한다.

2.2.2 화학성분 분석결과

회전클립의 화학성분은 유도결합플라즈마 분광분석기(ICP)로 분석하여 검정곡선법에 의하여 각 성분원소를 정량화 하였다. 시험방법은 ASTM C169-92, C1301-95방법을 따라 정성·정량 분석을 하였다. 균일한 성분 분석을 위해 물림쇠 A의 4곳에서 동일량씩 채취하여 분석한 결과를 표 3에 나타냈다.

표 2. 경도측정 결과

용도 및 기준 측정 회수	지상용(SC1)			
	기준 : HRB 85 이상			
	제품 1	제품 2	제품 3	제품 4
1	84	94	91	90
2	85	94	89	82
3	85	94	88	83
4	86	94	91	85
5	85	93	91	84
6	85	92	89	82
7	84	92	88	84
8	85	93	89	85
9	85	94	90	86
10	86	94	90	84
11	85	-	-	-
평균 값	85	93	90	85
기준 값	85이상	85이상	85이상	85이상
양부	양호	양호	양호	양호

표 3. 정성 및 정량 분석결과(w/w%)

제품 분석 항목	지상형 기준	지상형(SC1)			
		제품 1	제품 2	제품 3	제품 4
Mn	0.1-1.5	1.51	tr	1.83	0.78
Ni	1.0-3.0	4.04	3.88	1.50	1.53
Cr	-	0.04	tr	0.02	tr
Pb	0.1이하	0.26	0.10	0.56	0.09
Fe	2.5-5.0	5.45	0.04	2.49	2.77
Al	8.0-10.5	8.11	0.02	6.88	8.71
Zn	0.5이하	0.61	0.11	9.03	0.12
Cu	80-88.0	79.98	95.85	77.69	86
Mo		tr	tr	tr	tr
Ti		tr	tr	tr	tr

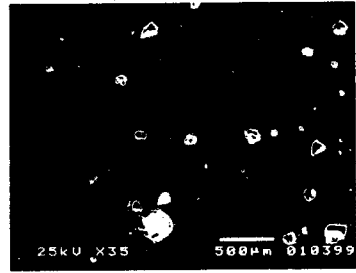
*tr: 0.01%이하

성분분석 결과 제품 1번은 회전클립의 성분 및 함량 기준에 상당히 유사한 것으로 나타났으나, 제품 2번은 성분 및 함량이 기준과 다른 것으로 판명되었으며, 제품 3번은 기준 성분 및 함량이 상당히 미달되는 것으로 나타났으며, 제품 4번은 기준 성분 및 함량에 일치되는 정상적인 제품으로 확인되었다. 제품 1번과 4번의 성분 및 함량은 기준에 적합함에도 균열이 발생되었다. 이 제품은 앞의 경도도 정상적인 제품으로서 균열 발생원인이 재질이 아닌 다른 원인에 의하여 발생하였음을 의미한다.

2.2.3 미세구조 분석

제품에 포함된 기공을 관찰하기 위하여 전자현미경(SEM)으로 미세구조를 관찰하였다. 다이아몬드 연마제로 연마된 표면에서 관찰된 제품 2번과 3번의 기공을 그림 2에 나타냈다. 미세구조 분석결과 제품 1번의 기공크기는 10µm 미만으로 다른 제품과 비교하여 상대적으로 크기가 작았으나, 제품 2번 ~ 4번은 100µm 이상 되는 기공도 관찰되었다.

회전클립은 주물제품이기 때문에 기공이 존재할 가능성이 매우 높고, 분석결과에서도 100µm 정도의 기공도 관찰되었다. 이러한 기공 크기는 기계적 강도에 매우 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 이와 같이 큰 기공이 회전클립에 존재함으로써, 균열이 성장을 도왔던 것으로 판단된다.



(a) 제품 2번(35배)



(a) 제품 3번(500배)

그림 2. 제품 2번과 3번의 미세구조

2.2.4 기계적 응력 해석

지상용으로 사용되는 회전클립의 경도 및 성분이 정상적인 제품에서도 균열이 발생하였기 때문에 그 원인 규명은 반드시 필요한 것으로 판단되어 이에 대한 해석을 실시하였다.

2.2.4.1 균열의 형태

균열은 앞에서 설명하였던 바와 같이 몰립석 B에서만 발생하였다. 균열의 형태는 그림 3에서와 같이 2가지 형태(균열 A, 균열 B)로 나타났다. 균열 A는 상하로 작용하는 하중(그림 4의 F1)에 의하여 발생되고, 균열 B는 좌우로 작용되는 하중에 의하여 발생되는(그림 4의 F2) 것을 알 수 있다.



그림 3. 균열의 형태

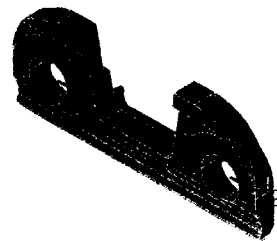


그림 4. 균열을 발생시키는 하중 방향

표 4는 제품 1~4번의 몰림쇠 B의 균열형태를 표시하였다. 모든 제품에서 균열이 A형태로 나타났고, 제품 1과 2는 균열의 B형태의 균열도 함께 발생하였다. 따라서 모든 제품들은 상하로 작용되는 하중을 받았고, 제품 1과 2번은 좌우로 작용되는 하중을 함께 받았던 것을 알 수 있다.

표 4. 회전클립의 균열형태

	제품 1	제품 2	제품 3	제품 4
균열 A	○	○	○	○
균열 B	○	○		

2.2.4.2 균열 발생원인 규명

제품 1번, 4번과 같이 경도 및 성분이 정상인 제품도 균열이 발생한 것은 몰림쇠에 큰 응력이 가해졌다는 것을 의미하고 있다. 따라서 정상적으로 제조된 제품에 응력이 집중되는 원인을 규명하므로써 그에 대한 해결방안을 마련하고자 한다.

상하·좌우의 하중 발생은 몰림쇠 B의 볼트 구멍의 직경(11.5 [mm])이 몰림쇠 A(10 [mm])와 비교하여 크기 때문에 발생하였던 것으로 나타났다. 이것은 외부에서 하중이 인가되었을 경우에 몰림쇠 B가 상하·좌우로 움직이는 원인이 되었다. 또한 하중집중 현상의 발생 원인을 살펴보면 그림 5와 같이 몰림쇠 A는 너트와 면접촉을 하고 있는데 반하여 몰림쇠 B는 볼트와 선접촉을 하여 몰림쇠 B에는 볼트에서 작용하는 힘이 집중적으로 가해진 것으로 판단된다.

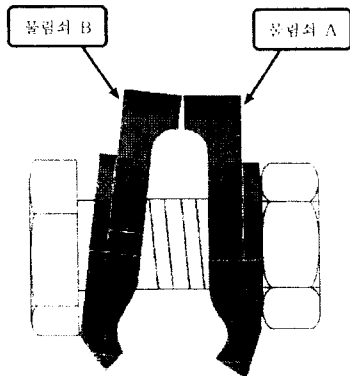


그림 5. 몰림쇠에 가해지는 면접촉(A)과 선접촉(B)

그림 6은 몰림쇠 B의 볼트구멍의 위치를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 구멍의 위치가 바깥쪽에 치우치게 설계되어 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 원인에 의하여 균열이 볼트구멍 바깥쪽과 아래쪽에서 집중적으로 발생된 것으로 판단된다.



그림 6. 몰림쇠 B의 볼트구멍 위치

2.2.4.3 회전클립의 균열감소를 위한 설계

회전클립의 취약점을 보완하여 균열을 감소시키기 위한 설계는 다음과 같은 방향으로 추진하였다.

몰림쇠 B와 볼트의 선접촉을 면접촉으로 바꾸기 위한 설계방안으로는 그림 7과 같이 A와 B의 접촉부분(상부)을 증가시켜 몰림쇠가 평행하게 되도록 설계하였고, 이렇게 설계하였을 경우의 추가적인 이점은 회전클립이 트롤리션을 더욱 견지하게 지지할 것으로 판단된다.

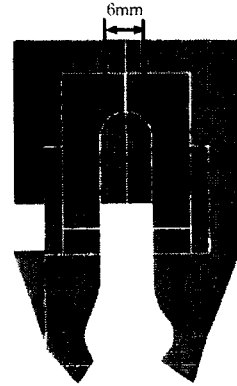


그림 7. 면접촉을 위한 몰림쇠의 구조 변경

균열이 바깥쪽과 아래쪽에 발생하는 것을 방지하기 위한 설계방안은 몰림쇠 A, B의 길이를 각각 증대하고 볼트 구멍을 몰림쇠의 중심으로 이동시킴으로써 해결할 수 있다. 또한 상하·좌우의 응력 발생방지를 위한 설계방안은 몰림쇠 B의 구멍크기를 몰림쇠 A의 구멍크기와 비슷하게 설계하여 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

2.2.4.4 설계변경된 몰림쇠의 응력 해석

회전클립은 가변하중에 의하여 진동되고 있기 때문에 피로(fatigue)가 발생하고 있지만, 피로해석을 위해서는 현장에서 발생하는 모든 응력을 알아야 하므로 본 분석에서는 생략하였다. 대신 몰림쇠에 정적 하중을 고려하여 볼트 조임시의 조임토크 하중을 인가하여 몰림쇠에 작용되는 응력을 분석하였다. 응력을 계산하는 simulation은 두 가지로 실시하였다. 첫째는 현재 사용되고 있는 지상형 회전클립과 설계 변경된 회전클립에 대하여 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 구조해석을 실시하였다.

변경된 회전클립은 앞의 분석결과를 참고로 하여 몰림쇠 A와 B의 접촉부분(상부)을 증가시켜 몰림쇠가 평행하게 되도록 설계하였다. 즉 그림 7에서처럼 몰림쇠 A 및 B를 각각 3 mm씩(6mm) 확대하였다. 균열이 바깥쪽과 아래쪽에 발생하는 것을 방지하기 위한 설계방안으로는 몰림쇠 A, B의 길이를 5 mm씩(10 mm) 확대하고 볼트 구멍의 중심을 위로 3 mm 이동시켜 구멍을 몰림쇠 중심으로 이동시켰다. 또한 상하·좌우의 응력 발생방지를 위한 설계방안으로 몰림쇠 B의 구멍크기를 몰림쇠 A의 구멍크기와 동일하게 설계하였다.

경계조건은 변경 전 모델과 변경 후 모델에 대한 응력 비교분석을 위하여 두 모델에 대하여 같은 조건을 적용하였다. 또한 트롤리션과 몰림쇠가 접촉하는 부분에는 Translation DX, DY, DZ 와 Rotation RX, RY, RZ 6자유도를 구속시켰으며, 몰림쇠 A와 B가 만나는 부분은 DZ 자유도만 구속시켰다.

본 해석은 정적 하중을 고려한 몰림쇠의 균열 원인을 파악하기 위한 구조해설 결과로서 단순히 설계 변경 전과 설계 변경 후의 모델에서 응력 값의 차이를 검토한 것이다.

그림 8은 1.0 kgf/mm²의 압력을 설계 변경 전후 모델에 동일하게 적용시킨 Von-Mises 응력을 나타낸 결과이고 표 5와 표6은 응력값을 나타냈다. 표에서와 같이 설계 변경후의 Von-Mises 응력이 변경전의 값보다 약 3배 정도 낮은 것을 보여준다. 따라서 본 연구에서 제시한 설계에 따라 구조를 변경하였을 경우에는 물림쇠의 균열발생을 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

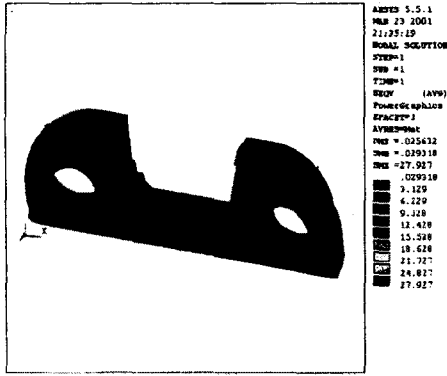
3. 결 론

본 연구는 전차선로에 사용되는 회전클립에 대한 경도, 성분, 미세구조, 기계적응력 해석 등을 통한 회전클립의 파손원인을 규명하고 성능을 향상시키고자 수행하였다.

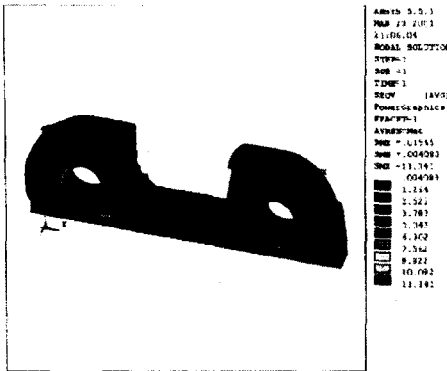
- 가. 회전클립의 균열은 전차가 이동할 때 가해지는 반복적인 하중이 회전클립에 존재하는 기공, 볼트와 물림쇠의 선접촉에 의한 응력집중 현상과 결합하여 발생된 것으로 판단된다.
- 나. 회전클립의 경도 및 재질 성분이 정상인 제품도 균열이 발생된 점으로 미루어, 정상적인 회전클립도 반복적으로 하중이 가해진다면 균열이 발생될 가능성이 있을 것으로 판단된다.
- 다. 기존의 회전클립과 분석결과를 활용하여 변경한 회전클립의 기계적응력 simulation 결과는, 정적인 하중을 기준으로 하였을 경우에, 현재 사용되고 있는 회전클립에 비하여 변경된 회전클립은 약 3배의 응력에 견딜 수 있을 것으로 나타났다.
- 라. 본 연구에서 제시한 설계(안)에 의하여 회전클립의 형상을 변경하였을 경우에는 응력을 분산시키고 보다 큰 응력에 견딜 수 있으므로, 균열성장이 억제되어, 고장 또는 사고를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 정연택, 이덕출, "신선 전기철도", 동명사, pp. 32-42, 1986.
- [2] 김찬영, "전차선로 회전클립 파손원인 정밀분석 및 대책에 관한 보고서", 우석대학교, pp. 1-26, 2001.
- [3] George E. Dieter, "Mechanical Metallurgy", McGraw-Hill Publishing Company, pp.77-80, 1986.



(a) 변경전



(b) 변경후

그림 8. 변경전과 변경후의 Von-Moses 응력

표 5. 1.00 kgf/mm² 압력 적용시 변경전 모델의 최대 응력값(kgf/mm²)

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ	VON-MISES
최대응력	12	16	28	4	7	5	30
허용응력	12	12	12	8	8	8	20

표 6. 1.00 kgf/mm² 압력 적용시 변경후 모델의 최대 응력값(kgf/mm²)

	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ	VON-MISES
최대응력	8	13	13	4	5	3	11
허용응력	12	12	12	8	8	8	20