

# Analysis of Cracks on Flange Bolts at 154kV Transmission Line Hollow Supporter

## 154kV 송전선로 관형지지물 플랜지 볼트 균열 분석기술 현장적용

Jaehong Lee  
이재홍

### Abstract

관형지지물은 단일 강관 기둥 형태의 송전탑으로 강관은 상하 여러 개의 프레임으로 분할되어 플랜지부에서 볼트로 체결된다. 신설 송전선로 관형지지물 플랜지 연결부에서 가압전 조립 볼트 절손이 발견됨에 따라 강관도괴방지 대책 수립을 위한 손상원인분석 기술지원을 수행하였다. 본 건에 대해 파손면·균열 분석 기술을 통해 제작과정 상의 문제가 있었음을 확인하였다.

**Keywords:** 관형지지물, 플랜지 볼트, 손상원인분석, 용융아연도금, 제작결함, 열처리

### I. 개요

송전 설비는 기본적으로 전력선과 전기적 보호장치 그리고 이를 지지할 수 있도록 하는 기계적 구조물로 구성되어 있다. 송전 구조물은 가장 먼저 전력선의 자중과 장력을 충분히 지지할 수 있고, 태풍 등 외부 영향에 의한 하중을 견딜 수 있는 구조로 설계된다. 가공 송전 설비를 예를 들면 외기 환경에서 운용되므로 계절에 따른 기온 범위나 변화에 대한 영향에서 안전성이 확보되어야 하고, 빗물 또는 염분에 의한 부식에 대한 저항성이 필요하다. 일반적으로 구조용 강은 상온 환경에서 이용 가능한 효율적인 소재이며 외부 부식성 환경에 대한 저항성을 확보하기 위해 보호피막을 도금하여 이용한다. 용융아연도금은 효율적이고 경제성 있는 부식 방지 대책 중 하나로써 전기 설비 기자재에 가장 널리 이용되고 있다. 아연도금층은 반응성이 높아 부식 환경에 노출되면 구조용강 보다 빠르게 부식되며, 희생 양극 작용으로 구조용 강에 전자를 공급하게 되어 궁극적으로 구조용 강은 부식이 억제된다. 따라서, 금속 외표면에 도금층을 균일하게 형성시키는 것이 핵심이라 할 수 있다. 용융아연도금 공정은 금속을 용융된 아연이 담긴 탕구에 주입하여 금속 표면과 반응시켜 도금층을 부착하는 방법인데, 좋은 품질을 확보하기 위해서는 일련의 사전작업이 필요하다. 금속 표면에 불순물, 산화층 등을 제거하기 위한 산세정 과정(pickling), 아연 층이 원활히 부착되게 하기 위한 부착성을 높이기 위한 용제 과정(fluxing) 등이 대표적이다. 산세정과 용제 과정에서는

도금 층 및 금속 표면에 수소 원자가 흡수될 수 있는데[1],재료에서 쉽게 발생하게 되는데, 산세정과정에서 억제제를 적절히 첨가하고, 금속을 일정온도까지 가열시켜 수소를 방출시킴으로써 예방할 수 있다[2]. 잔류응력이 존재하거나 미세 균열 등 높은 응력집중개소를 가진 구조물에서는 액체 아연과 고체 철강 성분의 상호작용 취약성에 의해 급속하게 균열이 진전되는 액체금속취화균열(Liquid Metal Assist Cracking) 현상이 발생할 수 있다. 특히 송전 설비와 같은 대형구조물의 경우 용융된 아연에 도금하는 과정에서 국부적으로 발생하는 온도 구배에 의한 열응력도 매우 크게 되므로 이를 최소화 하기위해 대상 금속을 예열하거나 탕구 주입 시간, 속도의 최적화가 필요하다[3]. 용융아연도금 과정과 무관하게 대형구조물을 고강도로 제작하게 될 때는 열처리 냉각속도에 따라 열충격이 크게 발생해 균열이 발생할 수 있다.

앞서 언급한 균열은 용융도금과정이 완료되면 도금층에 의해 덮이게 되므로 도금 후에 비파괴검사를 통해 균열을 발견하는 것은 매우 어렵다. 이러한 균열이 발생한 구조물은 추후 설비 운용 중에 절손 사고를 초래할 수 있다. 최근 신설 송전선로에 설치된 관형 지지물 플랜지부를 연결하는 볼트에서 절손현상이 발생하였다. 전기 가압 전 정기검사서에서 해당 볼트는 머리부분이 절손되어 있었으며, 재발 방지 및 추가 손상 여부를 확인하기 위해 실시한 검사를 통해 다수 철탑 볼트에서 추가적인 균열지시가 확인되었다. 본 보고서에서는 최초 절손 발견품을 포함한 머리부 절손 볼트 및 균열 지시가 발견된 볼트의 손상

저자 이재홍 | 한국전력공사 전력연구원 발전기술연구소 전문기술센터



이재홍 연구원은 2017년부터 한국전력공사 전력연구원에 근무하여 발전설비 및 전력설비의 금속손상해석 분야 기술지원을 담당하고 있다. 금속재료의 파면분석, 미세조직분석, 전산구조해석을 통해 기계구조물의 손상근본원인을 분석하고 재발방지 및 개선을 위한 대책을 수립하는 역할을 맡아 한국전력공사와 전력그룹사 및 민간발전사 기계금속설비 손상원인분석 기술지원을 약 100여 건 이상 수행하였다.



Fig. 1. 분석 대상 볼트 외관사진(볼트 #1~#8)

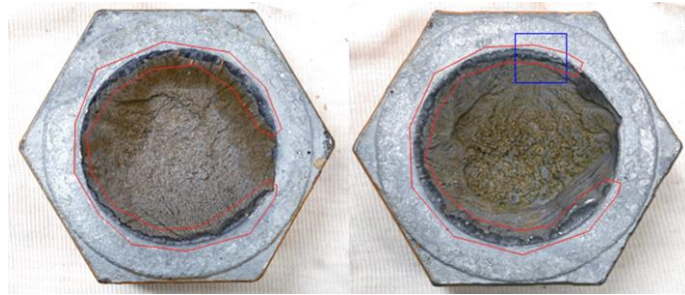


Fig. 2. 볼트 머리 절단 파면 (좌)볼트#1 - 최손상 (우)볼트#2

원인을 금속균열 및 파손분석 기술을 활용해 분석하고 안전사고 예방 방지차원에서 재발방지 대책을 수립하고자 한다.

## II. 균열 발생 원인 분석

### A. 분석 대상 볼트

분석 대상 볼트는 신설 송전선로 관형지지물 1단-2단 플랜지 및 3-4단 플랜지 체결용 볼트이며 Fig. 1에 외관을 나타내었다. 절손 및 균열지시가 발견된 총 8개 볼트를 분석하였으며, 1-2단 조립 볼트 4개, 3-4단 조립 볼트 2개 이외에 균열지시가 존재하는 미조립 볼트 2개를 분석하였다. 해당 볼트의 사양은 M64·310mm, 강도등급 8.8(인장강도 800MPa, 항복강도 640MPa)이며 볼트 규격 KS B ISO 898-1 크기 범위를 초과하는 대형 볼트이다. 재질은 저합금강으로 추정되고, 아연용융도금 처리되었다.

### B. 볼트 머리 절단 원인 분석

머리가 절단된 볼트는 절손면 외표면 쪽 가장자리에 모두 Fig. 2에 표시된 부분(빨강)과 같이 짙은 회색으로 구분되는 영역이 존재한다. 해당 영역은 에너지 분산형 X선 분광법(EDS; Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)을 통해 아연젖음(wetting)이 발생한 영역임이 확인되었다. 아연 젖음 현상은 열처리, 산세정 관련 수소침투 또는 도금작업 중의 액화금속취화 균열에서 발견되며 재질강도가 높을수록, 볼트의 크기가 클수록, 용융도금 공정온도가 높을수록 그 빈도가 높다.

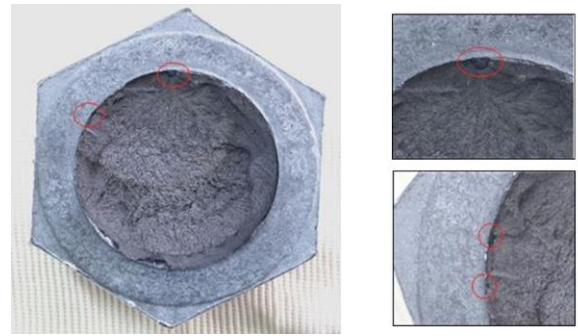


Fig. 3. 볼트#5 머리 절단 파면과 균열 기점 확대 사진



Fig. 4. 조립 상태에서의 너트 위치(최대응력 작용위치 -빨간색화살표)

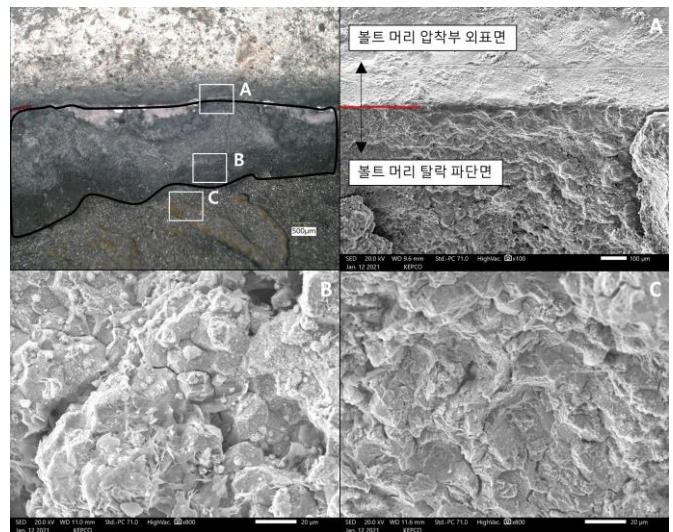


Fig. 6. 볼트 #2 머리 파면 형태 (1) <Fig. 2> 파란색 영역 확대 모습 (2) A - 볼트 절손면 외표면 아연피막 상태 (3) B - 아연피막과 입계파면 (4) D - 모재 입내 취성 파면

Fig. 2의 볼트 머리는 외표면 가장자리에 3~5mm 정도의 아연젖음에 의한 사전균열(pre-crack)이 존재하는 반면 Fig. 3의 볼트 머리 절손부는 사전균열이 매우 작게 형성되었다. 사전 균열이 이렇게 작음에도 볼트 머리가 쉽게 절손에 이르게 된 것은 사전 균열이 단순한 결함이 아니라 잔류응력이나 입계편석, 취화 등과 관련된 균열이기 때문일 것이다. 볼트 머리의 손상원인은 이러한 제조 중 발생한 사전 균열에 의한 것인데, 이는 볼트-너트 결합 구조에서 응력분포 특성을 통해서 알 수 있다. 손상볼트가 플랜지에 조립되었을 때 너트 위치는 Fig. 4와 같은데, 조립 상태에서 볼트가 체결장력을 받게 되면 최대 응력이 빨간색 화살표에 표시된 첫번째 나사산과 맞물리는 볼트 나사산 골 부분에서 발생한다. 해당 응력의 크기는 볼트에 전체적으로 작용하는 응력에 4~10배 이르고 [4], 정상적인 경우 볼트 손상은 이 부위에서 발생한다.

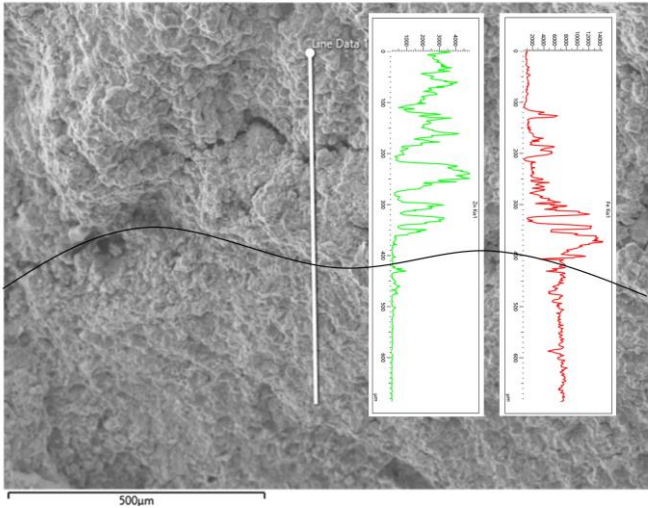


Fig. 7. <Fig. 6>- “B”/“C” 영역 경계부 아연성분 검출상태 변화



Fig. 8. 볼트 #6 불완전나사부 파면. 사진균열 영역 및 균열 진전 패턴

Fig. 6-1은 Fig. 2 파란색 영역을 확대 촬영한 모습이다. 외표면과 절손부 경계인 A영역을 전자현미경으로 촬영한 사진(Fig. 6-2)을 보면 외표면 부착 아연층과 절단면 부착 아연층이 연속적으로 형성되어 있음이 확인된다. 해당 층은 모재를 충분히 두껍게 덮고 있어 모재의 균열면 형태가 드러나지 않는다. 만약 사전 균열(pre-crack)이 없이 볼트 조립과정에서 절손이 발생했다면 파단면 시작 위치에서 아연도금층도 절단되어 균열면에는 아연 피막이 존재하지 않을 것이다. B영역을 고배율로 확인하면 균열이 금속 모재의 결정립 경계를 따라 면 형태로 분리되어 있으며, 2차 균열 또한 존재함이 확인된다. 아연 젖음 영역이 존재하는 입계 형태의 파괴는 액체금속취화균열 또는 수소취화균열의 대표적인 양상이다. C 영역에서는 입계 파괴 성향을 띠는 입내파괴 절손면이 선명하게 드러나는데, 해당 파면에서 연성파괴 패턴(dimple)이 나타나지 않아 저인성 취성파괴가 급속히 진행되었던 정황을 알 수 있다. Fig. 7의 Line을 따라 실시한 성분분석에서 B영역에서 C영역 경계로 진행함에 따라 아연성분이 검출되지 않아 박막층의 성분이 아연임을 확인할 수 있다.

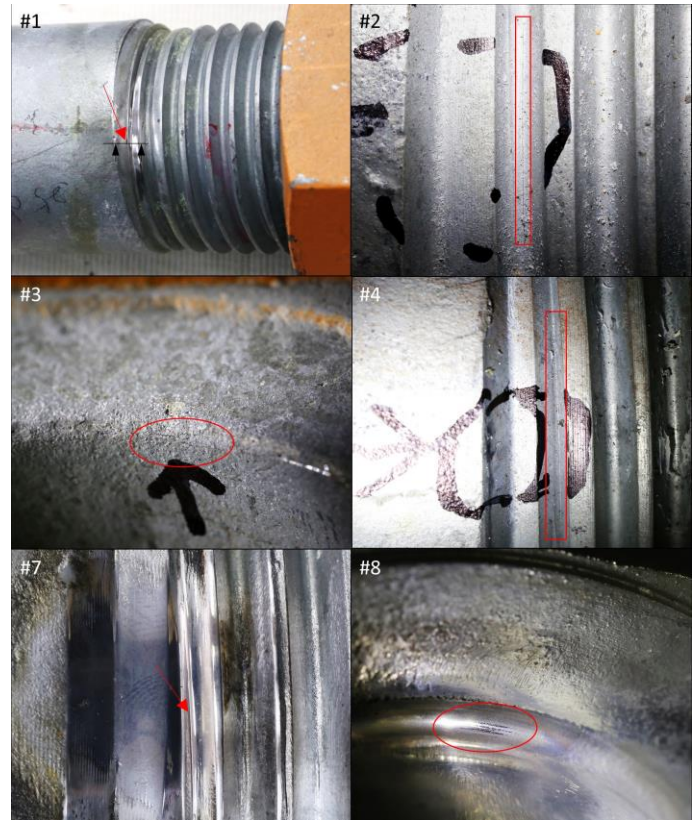


Fig. 9. 비파괴검사 균열지시부 외관사진(볼트 #1~4, #7~8)

### C. 불완전 나사부 절단 원인 분석

볼트#6 에서는 나사산이 시작되는 불완전 나사부에서 절손이 발생하였는데, 절손 파면은 Fig. 8과 같다. 파단면의 기본적인 특성은 볼트 머리 절단부와 크게 다르지 않다.

### D. 균열 지시부 분석

초음파검사를 통해 균열지시(indication)가 확인된 부위에 대해 외관을 확인하고(Fig. 9) 파괴 단면검사를 실시해 실제 균열상태를 확인하였다. 도금과정 중에 발생한 균열의 경우 균열 내부 또한 도금 층으로 덮여있어 표면을 매끄럽게 연마하여도 외관상으로 균열을 발견하기 어렵다. 오히려 도금 층이 덮인 상태에서 빛의 명암을 이용하는 것이 더 효과적이었다. 단면 조직 시험을 통해 Fig. 10과 같이 약 3.5mm 크기의 균열이 존재함을 확인할 수 있었는데, 최초절손볼트(#1) 불완전나사부에서는 언급한 균열 이외에도 또 다른 균열이 발견되었다. Fig. 10(좌) 단면 미세조직 시험에서는 Fig. 11와 같은 동시다발적인 입계 균열이 확인되었는데 이러한 균열은 제품 성형과정에서 발생하는 잔류응력, 재료의 입계취성, 열처리 과정에서 발생하는 열충격과 밀접한 관련이 있다. 또한, 동일 볼트 다른 균열 미세조직 시험에서 주균열 외에도 Fig. 12 빨간색 원으로 표시된 근처 응력집중부위에서 Fig. 13와 같은 미세균열이 발생하였다. 제품 표면에서 발생한 주균열 인접 부위에 또 다른 균열이 발생한다는 사실에서 최초 균열 발생 시기의 응력 분포 특성이 단순하지 않음을 암시하고 이러한 균열은 열처리 등의 제품생산과정에서 발생할 수 있다.

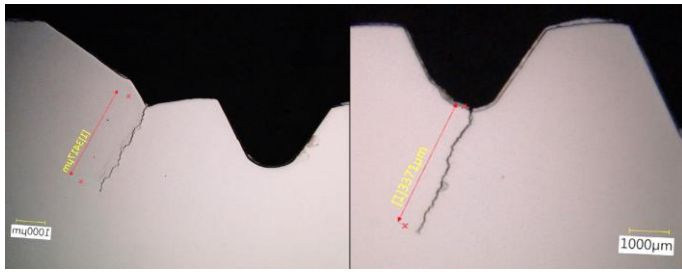


Fig. 10. 볼트#1 과 볼트#2 불완전나사부 발견 균열

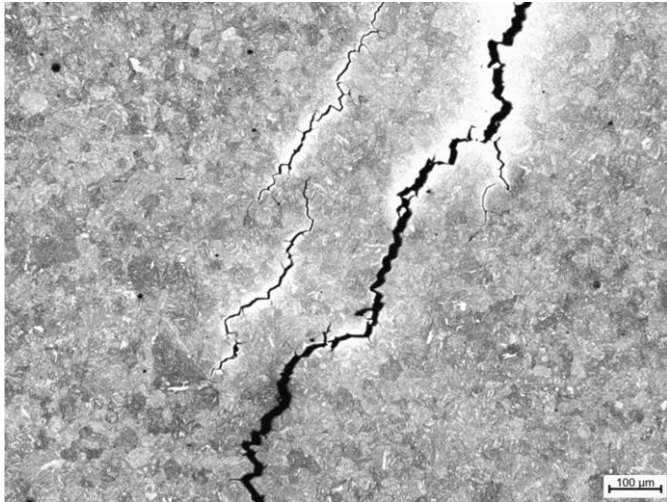


Fig. 11. 최초절손볼트(볼트#1) 불완전나사부의 동시다발적 입계균열 균열 발생 모습

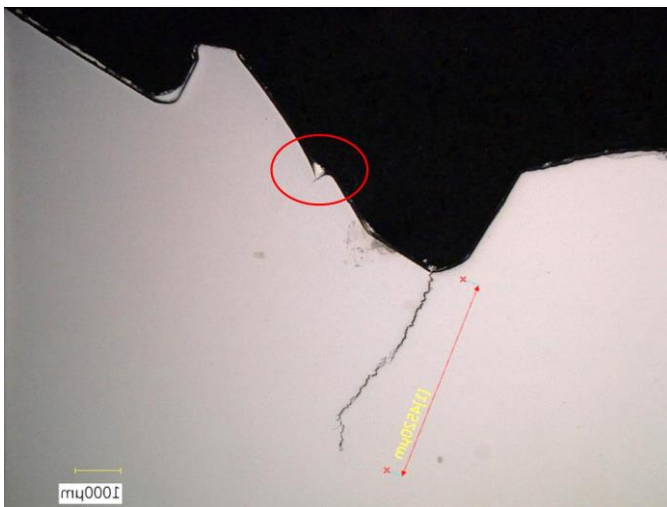


Fig. 12. 최초절손볼트 불완전 나사부 추가 발견 균열

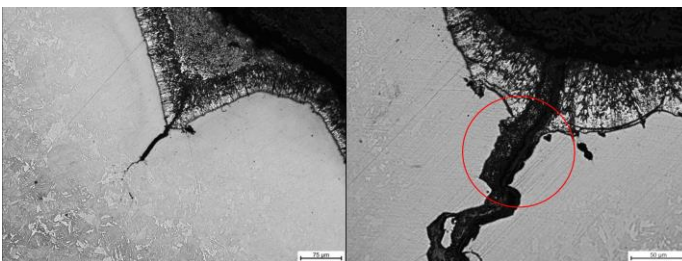


Fig. 13. <Fig. 12> 표시 영역 미세균열과 주 균열부 아연층 부착모습

### III. 결론 및 대책

파면 분석, 미세조직 분석 등 손상원인분석 기술을 통해 154kV 송전선로 관형지지물 볼트 절손 및 균열 손상이 제조과정에서 발생한 선행 균열이 지배적으로 작용한 결과임을 확인하였다.

정상적으로 제작된 볼트가 원활하게 조립된 경우 너트 산과 맞물리는 첫번째 나사산 끝부분에 가장 큰 응력이 작용하고 이 부위가 손상되기 가장 쉽다. 그러나, 해당 분석으로 확인된 8개 볼트 손상품 중에 최고 사용 응력 발생 부위에서 균열이 발생한 경우가 없었다. 따라서, 해당 볼트는 제조과정에서 발생한 사전균열에 의해 손상되었다고 보는 것이 가장 타당할 것이다. 제작 과정에서 발생한 균열결함과 별도로 균열 인근의 재질상태도 문제가 존재하였다. 이번 분석에서 초기 균열 직경이 1~2mm 수준으로 매우 작았음에도 볼트 머리 연결부가 급속 절단된 경우가 있었으며, 다른 절손면에서도 파괴인성이 매우 낮은 상태에서 균열이 진행한 징후가 확인되었다.

용융아연도금을 실시하는 구조물은 도금 공정 이전 사전균열 유무에 대한 철저한 검사가 필요하다. 특히 대형 볼트는 열구배 형성에 의한 열응력에 유의할 필요가 있어 제작자는 열처리공정 및 용융도금 과정에서의 품질관리에 더욱 주의를 기울여야하며, 주문자는 정밀한 검사를 실시하고 검사기준을 강화할 필요가 있다. 또한, 초대형 볼트의 경우 해당 규격에 대한 특별한 검사기준이 확립될 필요성이 있다.

### Acknowledgment

이 보고서는 “한국전력공사 중부건설본부 송변전건설실 송전건설부” 부서의 요청으로 ‘21년 1월 ~ ‘21년 2월까지 기술지원을 수행 결과를 바탕으로 작성되었음.

### References

- [1] Carpio, J., et al. "Environmental factors in failure during structural steel hot-dip galvanizing." *Engineering Failure Analysis* 16.2 (2009): 585-595.
- [2] Brahimi, Salim. "Fundamentals of hydrogen embrittlement in steel fasteners." Cleveland, OH: Industrial Fasteners Institute (IFI)
- [3] Ling, Zhanxiang, Min Wang, and Liang Kong. "Liquid metal embrittlement of galvanized steels during industrial processing: a review." *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing* (2018): 25-42.
- [4] Pilkey, W. D.. "Peterson's Stress Concentration Factors.", 2nd edn. Wiley, New York(1997): 508