

## 사례연구: 플랜지 드릴 가공 중 발생한 하자의 원인분석

임수림 · 이경화 · 이세린<sup>1</sup> · 김해중<sup>1</sup> · 박성지<sup>1,\*</sup>

충남대학교 평화안보대학원 과학수사학과, <sup>1</sup>대전보건대학교 경찰과학수사과

### Case Study

### Cause Analysis of Defects During Flange Drill Processing

Su Rim Lim, Gyeong Hwa Lee, Se Rin Lee<sup>1</sup>, Hae Jung Kim<sup>1</sup>, and Sung Ji Park<sup>1,\*</sup>

*Department of Scientific Criminal Investigation, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea*

*<sup>1</sup>Department of Police Forensic Science, Daejeon Health Institute of Technology, Daejeon 34504, Korea*

*\*E-mail: trafficar@naver.com*

(Received March 2, 2023; Revised March 2 2023; Accepted March 18, 2023)

**요약:** 본 사례연구는 플랜지를 열간 단조 후 구멍을 뚫기 위한 드릴 가공 시에 드릴 날이 전진되지 않는 현상과 드릴 날에 모재가 박리되지 않고 눌러 붙어서 작업이 진행되지 않는 현상이 발생되어 그 원인을 분석하고자 하였다. 플랜지의 각 부분에 대한 경도 측정과 금속현미경을 통한 조직시험을 진행한 결과, 경도가 매우 높은 공구강의 개재물이 발견되었고 모재에는 비드멘시퇴텐 조직이 출현 되었다. 공구강이 포함된 것은 제강 과정에서 충분히 용융되지 않은 채 공정이 진행된 것으로 판단되었고 비드멘시퇴텐 조직은 현장점검 결과, 열간 단조품을 철재 상자에 방치함에 따라 냉각이 느리게 진행되는 환경이 조성되어 이 조직이 발현된 것으로 판단되었다.

**Abstract:** The purpose of this case study was to analyze the cause of the failure of the drill cutting edge during drill processing after hot forging the flange and the failure of the work due to the failure of the base material to peel off and stick to the drill cutting edge. As a result of measuring hardness of each part of the flange and conducting metallographic tests through a optical microscopy, an interposition of tool steel with a very high hardness was found, and Widmanstätten pattern appeared in the base metal. The inclusion of tool steel was judged to have not melted sufficiently during the steel making process, and the on-site inspection of the Widmanstätten steel showed that the hot forging product was left in the steel box, creating a slow cooling environment.

**Key Words:** Widmanstätten, cutting edge, optical microscopy, metallographic test, hardness

고용노동부의 산업재해현황에 따르면 현재 우리나라의 사업 재해자 수는 2018년도부터 10,000명에 이르기 시작하여 그 수는 점점 오르고 있다.<sup>1</sup> 산업재해는 광업, 제조업, 건설업 등 다양한 업종에서 일어나고 있고 그에 따른 산업재해 사례연구가 진행되고 있으나<sup>2,4</sup> 현장에서 여러 업종의 사건·사고가 일어나기

에 범공학 분야의 사례 연구와 원인규명은 꾸준히 이어져야 할 것이다. 본 사례연구는 가스 밸브관이나 수도관 등 내부의 압력이 높거나 자주 떼어낼 필요가 있는 관의 이음 부분으로 사용되는 플랜지에 관하여 하자 원인 분석연구를 진행하였다. 플랜지의 하자가 발생 되면 관 안에 존재하는 가스 등이 밖으로 누출

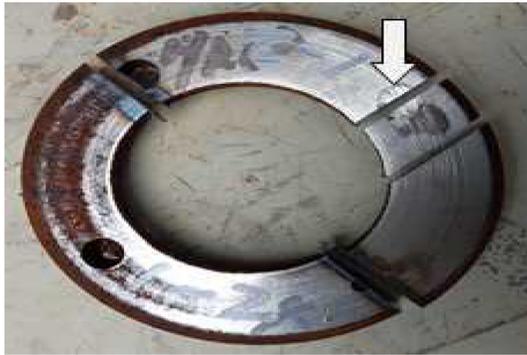


Fig. 1. The appearance of the flange.

되는 사고 등으로 이어질 수 있기에 하자가 발생 되지 않도록 제조 및 가공 환경이 적합한 곳에서 이뤄져야 한다. 본 사례연구는 플랜지의 가공 작업 도중 발생한 하자의 원인을 분석하여 추후에 발생 될 수 있는 사례에 참고할 수 있도록 그 결과를 명시하고자 한다.

본 사례 제강 과정을 거친 플랜지는 Fig. 1과 같이 원형의 형상이고 조립을 위한 4개의 구멍을 뚫는 작업 중에 가공이 불가한 현상이 발생하였다. 화살표 부분을 보면 경계가 있는 원형의 이물질이 박혀있는 것을 확인할 수 있고 드릴 작업용 3개의 구멍은 가공 중 뚫리지 않은 채 작업이 중단된 상태이다. 박스 화살표 부분의 이물질을 시험하기 위하여 이물질의 중간 부분을 걸쳐서 잘랐고 이 부분에 대해 경도측정 및 조직분석을 하였다. Table 1은 플랜지 모재에 대한 화학 성분시험 결과인데, KS D 3752<sup>5</sup> 기계구조용 탄소강의 화학성분 범위 내에 있고 재료 기호는 SM20C가 사용되었다.

Fig. 2는 경도시험 결과로 플랜지에서 1 mm 간격으로 10개소를 시료 추출한 값이다. 불순물로 보이는 부분의 경도를 측정한 결과 비커스 경도 HV1000의 매우 높은 경도 값이 측정되었고<sup>6</sup> 박스화살표를 보면 불순물 경계에서 경도 값은 HV1000, 경계를 지난 지

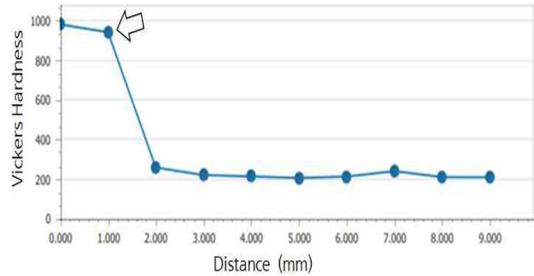


Fig. 2. Vickers hardness test the hard substance.

Table 2. Results of EDS for the hard substance

Elements	Wt %	At %
Si	00.90	01.85
Mo	08.95	05.37
V	00.98	01.11
Cr	03.71	04.11
Mn	00.57	00.60
Fe	74.99	77.30
Co	09.90	09.67

점부터 HV200~250의 경도가 측정되었다. 해당 측정 값을 통해 시료는 경계가 있고 경도가 매우 높은 불순물이 포함된 것으로 판단할 수 있다. Table 2는 경질의 이물질을 EDS (Energy Dispersive Spectrometer)로 분석한 결과인데 몰리브덴이 8.95 %의 높은 수치로 포함되어 있어 이 이물질은 고속도 공구강<sup>7,8</sup>으로 추정된다. 해당 물질은 전기로 제강과정에서 걸러지지 않고 투입된 고철 중에 포함되어 있던 고속도 공구강이 용해 과정에서 완전히 용융된 합금이 되지 못하고 남아있던 것으로 판단된다.

Fig. 3은 금속현미경을 통해 모재 시료를 200배율로 확대한 사진이며 해당 사진을 살펴보면 빛금이 쳐져있는 조직이 광범위하게 출현 되었다. 해당 조직은 비드덴시티텐 이라 불리며 비드덴시티텐 조직은 저탄소강을 1,500°C 전후의 온도로 가열한 후 600°C 전후

Table 1. Results of chemical composition test (KS D 3752)

No. of specimen	Chemical composition				
	C	Si	Mn	P	S
1	0.20	0.22	0.48	0.018	0.015
2	0.19	0.26	0.40	0.009	0.002
3	0.20	0.22	0.34	0.009	0.015
Reference	0.18~0.23	0.15~0.35	0.30~0.60	≤0.030	≤0.035

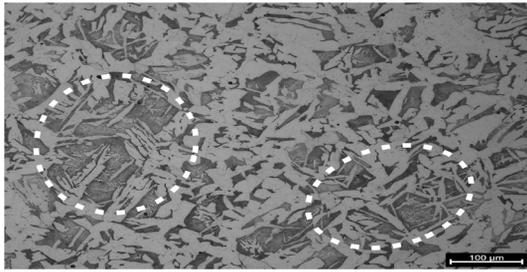


Fig. 3. Widmanstätten ferrite metal structures.

의 온도로 방치하거나 고온에서 분당 5°C 전후의 속도로 냉각하는 경우 형성 된다.<sup>9,10</sup> 인장강도와 연성이 등방성 조직과 이종조직에 비하여 낮으나 파괴인성과 피로 균열전파에 대한 저항성은 가장 우수하다. 톱기계에 의한 절삭 가공의 경우 연성 및 인장강도가 낮아 용이하게 절단할 수 있으나 드릴이나 바이트에 의한 가공에서는 가공 팁의 선단에서 균열이 전파되면서 절삭이 되는 과정을 거치게 되나 이 조직은 파괴인성과 균열전파에 대한 저항성으로 인하여 드릴 가공과 선반 가공이 어렵게 된다<sup>11</sup> Fig. 4는 항온변태 곡선인데 비드멘시퇴텐 조직은 베이나이트 시작점 위쪽에서 서냉 할 경우 발생된다.<sup>12-14</sup>

결론적으로, 가공 불량률의 플랜지에 대해 화학조성 성분시험, 경도시험, 금속조직 시험을 진행한 결과, 화학적 조성은 KS D 3752 (기계 구조용 탄소강재)의 SM20C 규격을 모두 만족하는 것으로 판단되었다. 그러나 경도시험 결과 모재와는 달리 이물질이 포함된 부분에서는 HV1000의 높은 경도 값을 보였는데 고속

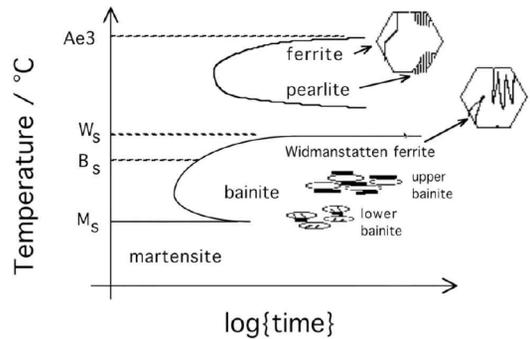


Fig. 4. The occurrence process of Widmanstätten ferrite.

도공구강이 일부 포함된 것으로 판단된다. 결국 공구강이 제강 과정에서 충분히 용해되지 못하고 생산된 것으로 보인다. 또한 비드멘시퇴텐 조직이 발생 되었다는 것은 현장 점검 결과 열간 단조 이후 플랜지를 철재 박스에 쌓아 둔 결과, 서냉 조건이 형성되었고 이로 인하여 비드멘시퇴텐 조직이 출현 된 것으로 판단 되었다.

본 사례의 하자 원인은 제강 과정에서 충분히 용해 되지 않은 공구강이 포함되었다는 것과 열간 단조 후 박스 내부에 방치하여 서냉의 조건이 형성되어 비드멘시퇴텐 조직이 출현 되었다는 것이다. 비드멘시퇴텐 조직은 열처리 공정<sup>15</sup>을 거치면 절삭성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되나 공구강 등이 충분히 용해되지 않았다면 다른 부분에 용해되지 않은 경질의 개재물이 남아있을 가능성이 있으므로 플랜지 전체는 사용이 불가한 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. 산업재해현황 (2021), 전체 재해 현황 및 분석-업종별(산업별 중분류), 고용노동부(www.kosis.kr).
2. 박성지, 이홍석, 박종진, 김근호 (2012), 항공기 열화상장비 파손원인에 관한 연구, 한국법과학회지, 13(1); 29-34.
3. 박성지 (2013), 항공기 조항장치 파손원인 사례연구, 한국안전학회지, 28(3); 29-32.
4. 서채연, 박성지 (2021), 대형 폐기물 유압파쇄기의 가동 중 사고에 관한 손상원인 분석, 과학수사학회지, 15(1); 68-73.
5. 산업표준심의회, 기계 구조용 탄소 강재, KS D 3752: 2019.
6. 산업표준심의회, 고온 비커스 경도 시험 방법, KS B 0800: 1995.
7. 산업표준심의회, 고속도 공구강 강재, KS D 3522: 2008.
8. 이정환, 임응남, 유승현, 방홍인, 오성훈 (2019), EDS 분석을 통한 A182강의 절삭 특성에 관한 연구, 한국기계기술학회지, 21(1); 176-181.
9. 홍영환, 박정웅, 이대용, 이병엽 (2003), 탄소강 열처리, 원창출판사, pp 300-301.
10. Sixin Zhao, Na Min, and Wei Li (2022), Formation of Widmanstätten Ferrite and Grain Boundary Ferrite in a Hypereutectoid Pearlitic Steel, *Metals*, 12(493); 493.
11. 허재영, 강익수, 윤일채, 김동규, 김연오, 정윤철

- (2022), 기계구조용 탄소강(SM20C, SM45C)의 기계적 성질과 절삭 특성, *Proceedings of the KSMPE Conference*, 249.
12. Fabio Miani (2022), Steels: Widmanstätten ferrite, *Universit  Degli Studi Di Udine* (<https://www.youtube.com/watch?v=VrMNDYnnVH4>).
  13. Lin, Chen, Wan, Jianquan, and Ruan, Haihui (2018), Phase field modeling of Widmanstätten ferrite formation in steel, *J Alloys and Compounds*, 69; 620-630.
  14. Grewal Rupanjit, Aranas Jr. Clodualdo, Chadha Kanwal, Shahriari Davood, Jahazi Mohammad, and Jonas John J (2016), Formation of Widmanstätten ferrite at very high temperatures in the austenite phase field. *Acta Materialia*, 109; 23-31.
  15. SH Kang, and YT Im (2007), Thermo-elasto-plastic Finite Element Analysis of Quenching Process of Carbon Steel, *J Materials Processing Technology* 192-193; 381-390.

<저자정보>

임수립(대학원생), 이경화(대학원생),  
이세린(학부생), 김해중(교수), 박성지(교수)