

사례연구: 대형 폐기물 유압파쇄기의 가동 중 사고에 관한 손상원인 분석

서채연 · 박성지*

대전보건대학교 과학수사학과

Case Study

Analysis of the Causes of Failure Related to Accidents During Operation of the Hydraulic Crushing Machine for Large-sized Waste

Chae Yeon Seo and Sung Ji Park*

Department of Forensic Science, Daejeon Health Institute of Technology, Daejeon, 34504, Korea

*E-mail: trafficar@naver.com

(Received August 28, 2020; Revised September 1, 2020; Accepted October 12, 2020)

요약: 본 사례는 대형폐기물을 분쇄하는 유압파쇄기의 내부 기어가 파손되면서 발생한 사고이다. 유압파쇄기는 유압모터에 의해 구동되며 유압모터의 회전력이 피니언기어와 스퍼기어 및 커터에 전달되어 커터가 폐기물을 파쇄시키는 구조이다. 원고는 유압파쇄기를 납품받아 사용하던 중 유압파쇄기가 정지하였고 분쇄하여 점검하던 중 피니언기어가 파손되었다는 것을 발견하였다. 현장조사에서 피니언기어의 구조가 설계도면과 다르다는 것을 확인하여 피고에게 질의하였으나 제조회사인 피고는 설계도면과 다르다고 하여 문제될 것이 없다고 주장하였다. 일반적으로 설계도면과 달리 제작되는 경우 법정에서는 하자로 추정하지만 본 사례의 경우 설계자와 현장맞춤으로 제작한 작업자가 모두 같은 회사 직원이므로 그들의 주장을 신뢰하기 어려운 상황이고 객관적으로 현장맞춤한 제작방법이 하자가 있다는 것을 증명할 필요가 있었다. 본 사례 연구에서는 현장맞춤으로 용접으로 제작한 부분에 대하여 금속현미경을 이용한 관찰과 경도시험을 통하여 마르텐사이트 조직이 출현되었음을 알 수 있었고, 유한요소해석을 이용한 강도해석결과 응력집중부에서 항복강도 수준의 응력이 발생되는 것을 확인하였다. 그러므로 손상의 원인은 용접으로 인한 취성조직의 발생과 항복강도에 근접하는 응력으로 인하여 손상된 것으로 판단되었다.

Abstract: The case is about the accident occurred by the damage of the internal gear of hydraulic crushing machine. Hydraulic crushing machine is operated by hydraulic motor; the mechanism is: after the torque of hydraulic motor is delivered to pinion gear, pinion gear transmits it to spur gear, and the cutter crushes the wastes connected by spur gear. Certain part that didn't follow the original design but on-site customized in manufacturing process was damaged. Generally it is considered as defect if it's made different from the original design, yet it was claimed that the customized way didn't seem to cause any problem in this case. This investigation of the on-site customized part, including hardness test and the observation with metallographic microscope, found out the martensite was formed in welding area. Finite Element Analysis found out that the stress concentration is occurred at welding area and the stress is almost its yield stress. The cause of this failure was brittle material during welding and yield stress level at welding area.

Key Words: Hydraulic crushing machine, Martensite, Hardness test, Stress concentration, Brittle material, Welding failure

서 론

2014년부터 2018년까지 5년간 산업현장에서 매년 1000명의 작업자가 사고로 사망하고 있다.¹ 특히, 보일러가 폭발하여 작업자가 사망하는 경우, 저장용기가 폭발하거나 화재가 발생하는 경우, 자동차와 항공기 등 수송기계의 결함으로 인하여 많은 사람들이 위험에 처하는 경우가 빈번히 발생하고 있다.^{2,4} 이와 같은 인사사고가 발생하는 경우 수사기관에서는 법공학 분야 전문가의 부족으로 사고발생 원인을 분석하는데 한계가 있는 것이 사실이며 법공학 분야 사고에 대한 사례 연구가 더욱 필요한 실정이다.

본 사고는 가수와 같은 대형폐기물을 파쇄하는 기계를 가동하던 중 내부 기어가 파손되면서 정지하는 고장이 발생한 경우이다. 기계를 발주한 원고 측은 정상적으로 사용하였으나 유압파쇄기에 하자가 있기 때문에 정지되었다고 소송을 제기하였고 유압파쇄기를 제작 및 납품한 피고 측은 원고가 무리하게 사용하다가 손상시켰다고 주장하는 사안이다.

파쇄기의 기본 구조를 보면, Fig. 1과 같이 대형폐기물을 투입하는 곳이 상부에 설치되어 있고 폐기물이 아래쪽으로 내려가면 유압모터에 의해 구동되는 두 개의 절단기에 장착된 날에 의해 분쇄가 되어 좌측으로 이동되는 구조이다. 절단기의 구동력은 Fig. 2와 같이 두 개의 유압모터에서 발생하는 회전력이 피니언 기어에 전달되고 두 개의 피니언 기어가 한 개의 큰 스퍼기어를 회전시키는 구조이며 스퍼기어에 연결된 두 개의 축에 장착된 다수의 커터에 의해 폐기물을 분쇄하는 구조로 구성되어 있다.

분해 점검 결과, 동력을 발생시키는 유압모터와 스퍼 기어 사이의 피니언 기어가 파손되었고 제작도면과 비교한 결과 도면과 다르게 제작되었음을 확인하였다. 그러나 유압파쇄기를 제작한 측에서는 설계자와 제작자가 같은 회사 직원이고, 도면과 다르다는 이유만으로 결함이라고 할 수 없으며 사용자가 금속물체 등 파쇄할 수 없는 물품을 무리하게 파쇄하는 과정에서 손상되었다고 주장하였다. 일반적으로 도면과 다르게 제작한 경우에는 제작결함으로 간주할 수 있으나 설계자와 제작자가 같은 회사 직원인 경우에는 현장에서 임의의 변경하여 제작한 방법을 설계자가 인정하게 되어 사고의 원인을 명확히 할 수 없고 설계결함 및 제작결함 여부를 모두 분석하여야 한다.

본 사례 연구는 설계 도면과 다르게 제작되었음에도 불구하고 다르게 제작되었다고 하여 사고의 원인



Fig. 1. View of hydraulic crushing machine.

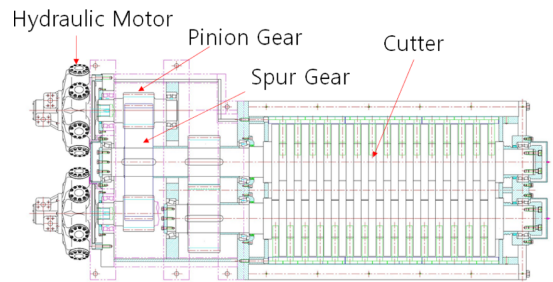


Fig. 2. Plane view of hydraulic crushing machine.

으로 단정할 수 없다고 주장하는 사안에서 사고의 원인을 명확히 규명한 결과를 제시하고자 한다.

재료 및 방법

1. 파손된 기어와 일체형 기어

파손된 피니언 기어의 좌측 끝단의 모습을 Fig. 3에 나타내었다. 피니언 기어의 안쪽은 스플라인 가공되어 있고 유압모터의 좌측의 스플라인 축과 연결된다. 도면에는 피니언 기어의 동력 입력축 내경과 외경사이의 두께는 40 mm였으나 제조과정에서 두께 30 mm를 제거하고 이 부분에 별도 제작품을 나사형태로 조립한 후 끝부분에만 마무리 용접하여 제작하였다. 나사로 조립한 후 빠져나오지 못하게 용접으로 제작하는 것은 현장에서 사용되는 방법이다. 별도 제작하여 나사형식으로 조립 한 부품(이하 “별도가공품”이라 한다.)이 Fig. 3에서 보듯 용접라인이 파손되면서 약 10 mm 이상 이탈된 상황이다. 원주방향으로 용접된 부분의 용접 깊이는 6~10 mm 정도이다. Fig.

4는 도면대로 다시 제작한 피니언 기어의 모습이며 별도가공품이 없이 스플라인부터 외경까지 40 mm의 두께로 되어 있으며 용접부가 없이 일체형으로 제작되어 있다.

2. 금속현미경 확인

기계의 손상부를 조사하는 경우 열처리 특성을 확인해야 한다. 특히, 본 사고와 같이 기계가공품을 조립한 후 용접으로 마무리하는 경우 용접부의 잔류응력을 최소화 할 수 있는 별도의 열처리가 매우 중요하다고 할 것이다.^{5,6} 시편은 Fig. 5와 같이 절단하였다. 금속현미경으로 용접부의 금속조직을 관찰하기 위해 절단기를 이용하여 피니언 기어측에서 시편을 채취하였다. 절단한 시편을 수지로 마운팅한 후 연마기를 이용해 시험편을 연마하여 추출하였다. 절단부를 보면 별도가공품의 수나사와 피니언기어부 압나사가 손상이 없이 별도가공품이 10 mm 정도 외부로 빠져나온 상태가 확인되므로 별도가공품이 나사산을 따라 풀렸음을 알 수 있었다. 별도가공품을 조립한 후 용접으로 마무리한 용접라인의 깊이는 약 6~10 mm 정도로 관찰되었다.

별도가공품의 소재는 SCM440으로 열처리 공정에 따라서 금속의 균열형태에 변형이 생길 수 있고 탄소가 과포화상태로 고용된 조직인 마르텐사이트 조직이 생길 수 있다,⁷ 또한 마르텐사이트 불연속부에 형성된 균열 등은 불연속적 취성파괴를 일으킨다.⁸ 따라서 강한 내성을 요구하는 기계요소에는 반드시 용접 전후 열처리가 필요하다.^{9,10} 마크로 시험기를 이용한 조직 검사를 통해 Fig. 6의 시험편의 조직에서 모재를 제외하고 액상으로 용접된 부위가 확인되었고 용접과정에서 발생하는 열로 인하여 열 영향부가 구분되었다. 이를 금속 현미경으로 확인한 결과, 열영향부에서 템퍼링 되지 않은 금속 결정 안의 원자가 확산에 의하지 않고 집단적인 근소한 이동에 의하여 변태되어 생기는 조직인 마르텐사이트 조직이 발견되었다. 마르텐사이트 조직은 고온의 오스테나이트(탄소 또는 합금 원소를 포함하는 철의 고용체)상태에서 갑자기 냉각시킬 경우, 발생되며 경도가 높지만 연성이 약하여 쉽게 깨지는 성질을 가진다.

유압파쇄기는 항상 단단한 물체가 내부에 들어갈 수 있다는 가정 하에 제품이 만들어진다. 즉 유압이 과도하게 작용될 경우 유압해제장치가 필수적으로 있고 파쇄될 수 없는 이물질이 들어가서 멈추는 경우 역회전 기능을 사용하여 이물질을 제거하고 다시 정

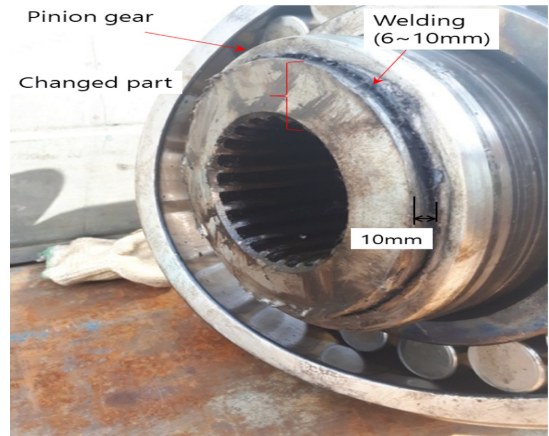


Fig. 3. Failure along the weld line.

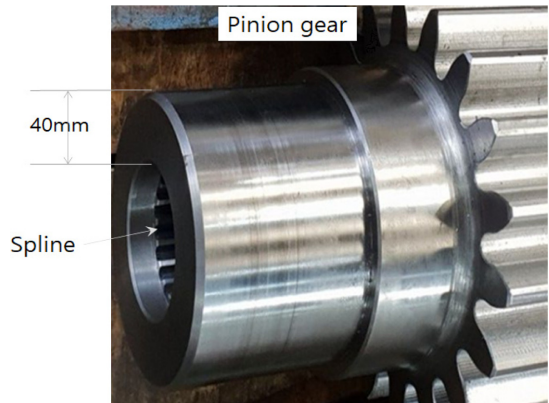


Fig. 4. Pinion gear in original design.



Fig. 5. Extraction for the specimen.

상적인 회전으로 작동시키는 기능이 있다. 그러므로 유압파쇄기는 그 특성상 충격력이 항상 작용한다고

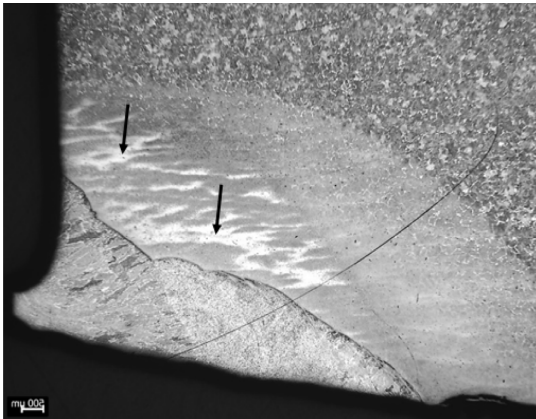


Fig. 6. Metallographic microextraction test.

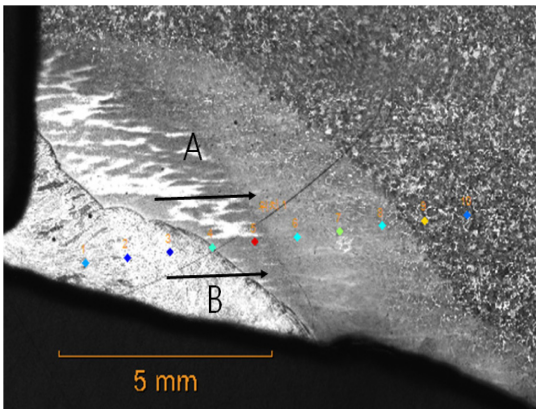


Fig. 7. Vickers hardness test.

보아야 한다. 그러므로 동력전달 부품에서 취성조직인 마르텐사이트 조직이 발견되었다는 것은 충격에 대해 저항할 수 없어 언제든지 파괴될 수 있는 가능성을 내포하고 있다고 볼 수 있다.

3. 경도시험

추출한 시험편을 비커스경도계를 이용하여 Fig. 7의 용접한 부분에서 모재의 방향으로 경도시험을 실시하였다.¹¹ 액상용접부분과 열영향부 및 모재까지 지나면서 A와 B의 경로를 따라 경도를 측정 한 결과 Table 1과 같이 백색조직에서 높은 경도치를 얻었고 이는 템퍼링되지 않은 마르텐사이트 조직이 발생 한 것으로 판단되었다. 별도가공품의 소재는 SCM440 (크롬 몰리브덴 강재)로 중탄소합금강이며, 중탄소강 및 고탄소강은 인성이나 전연성이 작고, 용접 열영향부도 현저하게 경화하기 때문에 용접균열이 발생하기

Table 1. Vickers hardness test results

No.	Distance (mm)	Hardness (HV0.5)	
		Test A	Test B
1	0.0	276.42	284.06
2	1.0	262.09	238.97
3	2.0	565.91	219.02
4	3.0	506.14	326.74
5	4.0	429.91	476.65
6	5.0	308.20	316.28
7	6.0	287.87	353.54
8	7.0	251.08	314.58
9	8.0	268.28	398.22
10	9.0	254.31	268.96

쉬우며 실제 용접부에서 균열이 확인되었다. 따라서 용접 시에는 저수소계 용접재료의 사용이 불가피하다. 그러므로 예열을 통하여 마르텐사이트 생성을 억제하고, 후열을 통하여 잔류응력을 완화하여 사용해야 한다.

결과 및 고찰

1. 강도계산

유압파쇄기의 동력은 유압모터에서 전달되는 회전력이다. 유압모터의 축과 피니언 기어의 접촉부는 스플라인 가공이 되어있어 큰 기어에 회전력을 전달한다. 피니언은 베어링에 의해 지지되며, 비틀림에 의해 회전하는 구조로, 스플라인은 부하가 걸리면서 비틀림 하중을 받게 되는 구조이다. 유압모터는 상용유압을 210 bar로 설정할 경우 발생하는 회전력은 약 16,500 Nm이다. 파손된 용접부의 반경은 피니언기어 중심으로부터 75 mm이며 회전력을 저항하는 용접선의 폭은 5~10 mm이다. 이를 10 mm로 가정하면 전단 응력은 46.7 MPa로서 일견 매우 낮은 수준의 응력으로 계산된다.

$$\tau = \frac{\left(\frac{T}{r}\right)}{2\pi r \times t} = \frac{\left(\frac{16500}{0.075}\right)}{2\pi \times 0.075 \times 0.01} = 46.7\text{MPa}$$

그러나 이러한 계산은 단순한 구조에서는 무난하게 적용할 수 있으나 3차원적인 구조를 가지는 구조물에서 응력집중여부를 반드시 고려해야 한다.¹²

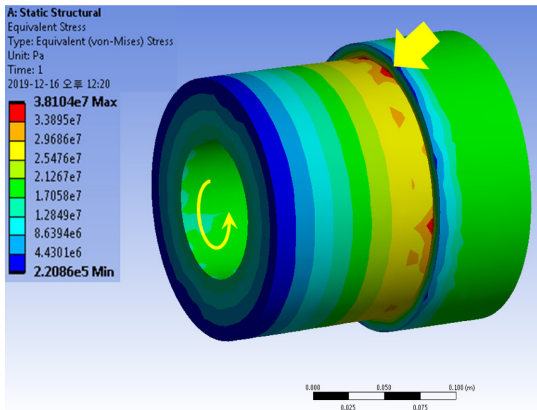


Fig. 8. Stress contour in Ansys (von Mises).

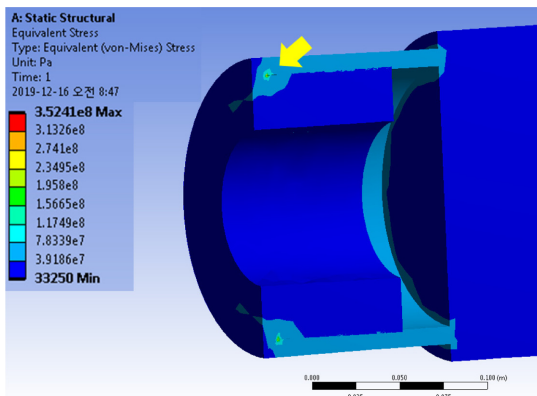


Fig. 9. Stress concentration at weld line.

2. 유한요소 해석

유한요소 해석은 Ansys 2020 R1을 사용하였다. 손상은 피니언 기어의 좌측 끝부분에서 발생하였으므로 피니언기어의 중앙부위를 고정단으로 가정하여 모델 크기를 줄였다. 해석모델이 대칭인 경우에는 대칭축을 기준으로 반을 모델링할 수도 있으나 피니언 기어의 경우 기어 몸체에 비해 손상된 부분의 강도가 훨씬 약하므로 좌측 끝단부분을 잘라서 모델링하고 우측 끝단은 전체 노드(node)의 6자유도를 구속하는 방법을 적용하였다. 스플라인이 조립되는 곳은 유압모터가 장착되는 곳이고 상용 토크(Torque) 16,500 Nm가 작용되므로 이를 모멘트 하중으로 적용하였다.

유한요소 모델은 3D Tetrahedron을 사용하였고 응력은 Von Mises로 나타내었다. Fig. 8은 별도가공품을 삽입하지 않고 도면대로 일체형으로 제작한 경우 최대 응력이 나타나는 지점은 베어링이 안착하는 안

쪽 모서리 부분이고 응력 수준은 38 MPa로서, 항복응력의 10분의 1 수준밖에 되지 않는다. 즉 설계도면대로 피니언 기어를 제작하였다면 유압모터의 상용 회전력을 충분히 전달수 있는 구조이므로 파손될 가능성은 없다. Fig. 9는 별도가공품을 나사형태로 조립하여 회전이 가능한 구조에서 끝부분만 용접한 방식을 모델링하였다.

별도가공품과 조립되는 피니언기어는 접촉면을 보면 원주방향으로 넓게 접촉되고 있으나 나사형식으로 조립되기 때문에 실제적으로는 회전력에 대해 저항할 수 있는 구조가 아니다. 결국 접촉은 되어 있으나 미세하게 떨어져 있고 좌측 끝부분에만 용접이 되어있기 때문에 구조적으로 노치(Notch)가 형성되었다. 별도가공품은 스플라인을 통하여 전달받은 회전력을 용접부에 전달할 수밖에 없고 용접부는 구조적으로 노치가 형성되어 응력집중현상이 나타났으며 최대 응력은 352 MPa로서 이는 소재의 항복응력 수준으로서 상당히 높게 나타났다.

3. 손상원인 분석

만약, 별도가공품이 축방향으로 부하를 받는 경우라면 나사형태로 조립한 부분은 축방향으로 저항할 수 있고 풀려나가는 현상은 용접에 의해 막을 수 있으므로 가능한 제작방법이 될 수 있다. 그러나 유압모터에 의해 전달되는 동력은 스플라인으로 연결되어 있고 축방향 부하는 없으며 단지 모멘트로만 동력이 전달된다. 즉, 별도가공품을 나사형식으로 조립한 후 끝부분만 용접한 경우 회전력에 대해 나사 부분은 저항하지 못하기 때문에 용접한 부분이 모두 회전력을 전달하는 구조가 되었다.

용접부에 대한 강도계산으로는 전단응력 수준이 매우 낮아 일견 이러한 방법도 가능할 것으로 보이나 3차원 유한요소 모델에 의한 해석결과 용접부에서 응력집중 현상이 확인되었다. 응력수준은 소재 항복강도의 85% 수준이지만 유압파쇄기의 특성상 역전도 가능할 정도로 파쇄 대상물체에 따라 끼어 정지하는 경우가 많다. 유압파쇄기는 일반 종이파쇄기와 유사하게 파쇄대상물에 의해 걸리는 경우를 대비하여 역회전으로 걸린 물체를 빼내는 기능을 갖추고 있다. 그만큼 충격이 자주 가해질 수 있어 소재에 항복응력이 85% 수준의 응력은 매우 높은 것으로 판단된다.

더욱이 별도가공품과 피니언기어는 끝부분만 용접되어 노치효과를 고려한다면 손상원인은 설계 도면과 다르게 현장에서 임의로 제작하여 조립한 피니언기어

의 제조상 하자로 판단된다. 또한 피니언기어와 별도 가공품을 용접한 부위를 관찰한 결과 열 영향부에서 크랙이 확인되어 용접에 의한 마르텐사이트조직이 형성된 점도 손상에 크게 기여한 것으로 판단된다.

결 론

대형 폐기물 유압파쇄기의 가동중지 원인은 유압모터에서 동력을 전달받은 피니언기어의 파손에 있었고 피니언 기어의 형상이 도면과 다르게 별도가공품을 제작한 후 나사형식으로 조립하고 풀리지 않게 용접하였으나 제조회사 측에서는 이러한 방법도 충분히 가능한 방법이라고 주장하는 사안에 대한 분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 별도가공품을 나사형식으로 조립하고 용접으로 마무리함으로 인하여 용접부에서 항복강도 수준의 응력이 발생되었다. 끝부분만 용접함으로 인하여 용접부는 노치형태가 되어 응력집중이 발생하였으며 용접 후 풀림 열처리를 하지 않음으로 인하여 취성을 가진

마르텐사이트 조직이 형성되었고 가동 중 반복적인 부하를 이기지 못하고 파손된 것으로 판단되었다.

2. 스플라인의 특성상 축방향의 하중은 전달하지 못하므로 나사형식으로 조립한 방법은 동력을 전달할 수 없고 오로지 용접부가 동력을 전달함으로써 손상이 발생할 수밖에 없는 구조가 되었다. 만약 축방향의 하중을 전달하는 구조인 경우에는 나사형식으로 조립한다면 나사산의 각 면이 축방향의 하중을 대부분 저항하게 되므로 나사형식으로 조립하고 끝부분에 빠지지 않도록 용접으로 마무리하는 방법은 충분히 가능한 제조방법으로 판단되었다.

3. 설계 도면과 다르게 현장에서 임의 변경하여 시공하는 경우에 있어서 대형 사고가 발생하는 경우 명확한 원인을 규명하기 어렵다. 현재 과학수사 분야는 이러한 법안전분야의 사고를 규명할 인적자원이 부족하여 명확한 사고의 원인을 파악하기 곤란하여 책임 소재를 규명하는 것에 어려움을 느끼고 있는 것이 사실이다. 그러므로 기계안전사고, 건물붕괴사고 및 다양한 범공학적 사고에 대하여 활발한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김상현, 황인성, 강찬규 (2020), 공공기관 산재 사고사망 분석 및 공공기관 작업장 안전강화 대책의 인식도 조사에 관한 연구, 산업안전학회지 18(3): 64-71.
2. 윤상권, 장통일, 임현교 (2003), 사고사례에 기초한 보일러 사고의 원인분석 및 대책, sity, J KIIS, 18(3): 131-140.
3. 임지표, 박수율 (2013), 사고사례 정밀분석을 통한 상업저장탱크의 안전에 관한 연구, 한국안전학회지 34(4): 41-48.
4. 박성지 (2013), 항공기 조향장치 파손원인 사례연구, 한국안전학회지 28(3): 29-32.
5. 전우정, 박성지, 박종찬, 박종진 (2007), 액슬 샤프트의 기계적 물성 검사방법에 대한 연구, 한국안전학회지 8(2): 71-75.
6. 김선용 (1996), STD-11 합금공구강의 뜨임 온도에 따른 동적 파괴특성 연구, 한국산업안전학회지 11(3): 59-65.
7. 류성기, 신용호 (1999), SCM420기어의 피로강도에

- 미치는 열처리 효과에 관한 연구, 한국산업안전학회지 14(4): 13-19.
8. 도영민 (2003), 페라이트-마르텐사이트 이상조직강의 피로파괴거동에 미치는 노치효과, 산업안전학회지 18(3): 46-53.
9. 안민주, 류성기 (2010), SCM415강의 열처리 변형 제어를 위한 냉각 매질의 특성, 한국기계공학학회지 6(6): 59-65.
10. 윤일중, 류성기, 안창우, 안인호 (2006), 열처리공법에 따른 Sleeve의 열처리 변형 특성, 한국안전학회지 21(3): 1-7.
11. 김상철, 김선용 (1993), 부분 열처리한 기계 구조용 탄소강의 피로균열 전파에 관한 연구, 한국산업안전학회지 8(1): 13-20.
12. 김종혁, 김의수, 박우식, 문병선, 고재모, 박남규, 윤기봉, 조성욱 (2018), ANSYS를 이용한 스캐폴딩 시스템 타워 구조 건전성 평가에 관한 범공학적 연구, 한국안전학회지 28(3): 174-181.

<저자정보>

서채연(학부생), 박성지(교수)