

고소작업차 부품 손상 평가에 관한 법공학적 연구

김 의 수*†

* 국립과학수사연구소

Forensic Engineering Study on Assessment of Damage to Aerial Lifter Parts

Eui Soo Kim*†

* National Institute of Scientific Investigation

(Received February 22, 2010 ; Revised August 27, 2010 ; Accepted August 27, 2010)

Key Words : Forensic Engineering (법공학), Instrumented Indentation Technique (계장화압입시험법), Failure(파괴), Fractography (파단면검사), Accident Investigation (사고조사)

초록: 고소작업차는 최근 건물이 초고층화됨에 따라 그 필요성이 더욱 커지고 있으나 그 이용에 따른 사고가 빈번하게 발생하고 있다. 고소작업차 붐대 및 유압기기를 구성하는 부품 손상은 탑승인원이 많은 경우 다수의 피해자가 추락으로 인해 사망에 이를 수 있다는 점에서 큰 문제를 안고 있으며 또한 유사 사고가 다시 발생할 수 있는 점이 내재되어 있어 그 심각성은 매우 크다고 할 수 있다. 이에 법공학적인 측면에서 좀 더 전문화되고 체계적인 사고조사와 원인 규명을 통해서 사전에 예방대책을 마련함으로써 유사 및 동종재해의 발생을 최소화해야 한다. 본 연구에서는 파단면 검사를 통한 부품 파손형태 검사 및 재료 물성평가 등을 통해 기계부품 파손에 의한 추락 사고에 관한 정확한 사고 원인을 규명함으로써 동일 형태의 안전사고 예방에 기여하고자 한다.

Abstract: Forensic engineering is the area of expertise of people qualified to serve as engineering experts in courts of law or during arbitration proceedings. An aerial-lifter can lift and carry load, including people, using power. Recently, failure of aerial-lifter internal parts while working and sweeping causing injuries and damage to property almost always generates conflict between the automaker and customer. Hence, the investigation of such events generally involves an engineering analysis. One of the possible reasons for accidents, such as a vehicle catching fire is the failure of oil pressure machine and the supporting pin. The results of formal inspections and engineering tests can reveal the cause for the failure of the mechanical parts. Therefore, the failure mechanism is analyzed by adopting fractography methods and by applying an instrumented indentation technique to compare the material properties of the reference part with those of the malfunctioning part.

1. 서 론

법공학(Forensic Engineering)은 각종 사고에 관한 법적 문제에 대해서 이를 공학적으로 해명하는 학문 분야로 공학과 관련된 분야에서 사고가 발생했을 경우 이 분야의 전문지식과 경험을 갖추고 있는 전문가가 법적인 관점에서 문제점을 규명하는 학문이다.^(1,2) 사고 원인 규명 과정에 있어서 일반적인 공학적 관점이 사고가 발생하는 메커니즘을 설명하고 파악하는데 주안점을 둔 반면 법공학은

안전사고 및 재난사고에 대한 법적 책임문제를 해명하는 목적 외에 전문지식을 가지고 있는 법공학 조사관들의 정확한 원인분석을 통해 원인을 규명하고 이를 예방하기 위해 각종 제도와 법적 규제에 대한 규격 및 정책을 제안하여 안전하고 안정된 사회를 실현하는데 공헌하는 것이라 할 수 있다. 사회가 점점 고도한 기술사회로 접어들고 국내 공판중심주의 도입으로 인해 공학과 법이 함께 관련된 문제들을 다루는 법공학에 대한 필요성은 더욱 대두되고 있다. 본 연구에서는 법공학에서 다루는 내용 중 유압 관련 부품 및 체인 금구 등의 파단으로 인해 기계 구조물이 붕괴되면서 추락으로 이어져 큰 인명피해를 가져올 수 있는 고소작업차의 유압 실린더 고정핀의 파단 원인분석에

† Corresponding Author, es92kim@nisi.go.kr
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

관한 연구를 진행하고자 한다. 흔히 사다리차, 고소작업차 라고 불리우는 이삿짐 운반용 리프트는 화물자동차등의 차량 위에 탑재되며 끝단이 건축물 등에 지지되어 연장 및 축소가 가능한 구조의 사다리형 붐을 따라 동력을 사용하여 움직이는 운반구를 매달아 화물을 운반할 수 있는 설비 또는 이와 유사한 구조 및 성능을 가지는 것으로 이삿짐을 수직으로 운송하는 수단이며 최근 건물이 초고층화됨에 따라 그 필요성이 더욱 커지고 있다. 그러나 우리들의 생활에 없어서는 안 될 시설임에도 불구하고 유압기기 등의 주요 부품에 대해 안전인증을 득할 필요가 없어 최근 그 이용에 따른 사고가 빈번하게 발생하고 있다. 고소작업차 붐대 및 유압기기를 구성하는 부품 손상은 탑승인원이 많은 경우 다수의 피해자가 추락으로 인해 사망에 이를 수 있다는 점에서 큰 문제를 안고 있으며 또한 유사 사고가 다시 발생할 수 있는 점이 내재되어 있어 그 심각성은 매우 크다고 할 수 있다. 이러한 고소작업차 기계 구조물의 파손으로 인한 안전사고를 예방하기 위해서는 범공학적인 측면에서 좀 더 전문화되고 체계적인 사고조사와 원인 규명을 통해서 사전에 예방대책을 마련함으로써 유사 및 동종재해의 발생을 최소화할 수 있다. 본 연구에서는 프랙토그래피를 이용한 용기의 파손형태 검사와 계장형 압입시험법을 이용한 재료 물성평가 등을 통해 고소작업차 부품 파단에 대한 정확한 사고 원인을 규명함으로써 동일 형태의 차량 안전사고 예방에 기여하고자 한다.

2. 사고개요 및 구조 이해

2.1 사고개요

본 사고는 Fig. 1 에서 보듯 공장 내에서 노후 철판 교체작업을 위해 고소작업차 탑승함에 작업자가 타고 붐대가 상승하던 중 유압실린더와 붐대 연결부분의 고정핀이 파단되면서 실린더가 뒤로 밀리고 붐대 위 탑승함에 있던 작업자가 지상으로 추락해 인명피해를 입은 사고이다. 사고 고소차량은 총 7 단 붐으로 구성되어 있으며 붐대 인출시 1 단 붐에 설치되어 붐대 상승의 동력을 제공하는 유압기기의 유압실린더 지지 고정핀이 파손되면서 붐대의 피스톤이 차량의 상부를 관통하고 노면을 충격하였다. 붐대 상승 작업시 다른 기계 부품에 특이 결합 및 회로 오작동 없이 정상 운행된 점을 고려할 때 본 추락 사고의 근본 원인은 고정핀의 파단 문제에서 찾을 수 있을 것이다. 본 연구에서는 고정핀의 손상원인을 프랙



(a) Side view of aerial lifter



(b) Front view of aerial lifter



(c) Failure pin in the aerial lift



(d) Fracture section of failure pin

Fig. 1 The scene of falling accident

토그래피(Fractography)를 이용한 사용환경적 측면(부식, 열, 피로)과 재료분석을 통한 제조적 측면(용접, 열처리)으로 나누어 이를 평가하고 종합하여 유압실린더 지지 고정핀의 손상 요인을 진단하였다.

2.2 고소작업차 장치 구조도

사고 고소작업차의 전체적인 구조 및 주요 부분의 명칭을 Fig. 2 에 나타내었다.

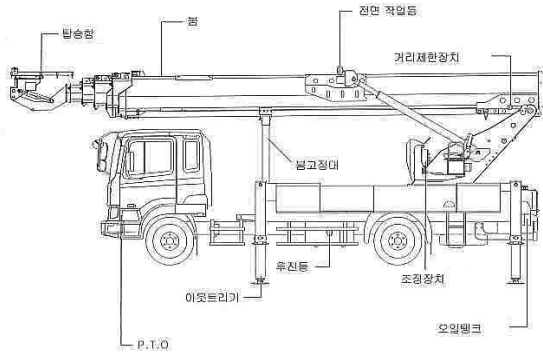


Fig. 2 Structure and part name of the aerial lift

3. 고정핀 손상 평가

3.1 고정핀 파손 형태 평가

Fig. 4 에서 보듯 고정핀의 직경은 약 40 mm 로 유압실린더에 회전조인트 형식으로 피스톤의 체결 홈에 끼워진 면을 따라 파단된 상태이다. Fig. 4(b) 는 고정핀의 파단면을 보여주는 것으로써 ③ 부위 주변에서 균열 시초부와 화살표 방향으로 균열이 방사선 형태로 전파해 나간 균열 전파면상에 해안 자국(Beach mark)이 육안으로 관찰된다. Fig. 4 와 같이 동심원의 중심이 되는 ③ 부위를 주사전자현미경으로 관찰하면 Fig. 5, Fig. 7, Fig. 8 에서 보듯 ① 부위를 균열시작점으로 균열이 시작되고 ② 부위에서 균열 전파에 따른 평활한 원형의 피로균열 전파면이 관찰되고 전체 파단면 중 약 1/3 쯤 진전 후 ③ 부위에서 더 이상 하중을 지탱하지 못하고 과부하에 의하여 찢겨진 벽개파괴(Cleavage)형상이 관찰된다. 이러한 파단면 검사를 통해 고정핀은 수 차례 반복적인 굽힘하중에 의해 피로파괴를 당한 것으로 볼 수 있다. 또한, Fig. 6 에 나타낸 바와 같이 균열시작점인 ① 부위에서 피로 줄무늬(Fatigue striation)가 관찰되는 것으로 보아 고정핀의 파손이 피로에 의한 것임을 재확인 하였다. 광학현미경을 이용하여 파단면의 미세조직을 관찰한 결과 Fig. 9, Fig. 10 과 같이 퀴칭 앤 템퍼드 마르텐사이트(Quenched & Tempered Martensite) 조직이 관찰되는 것으로 보아 열처리 등에는 크게 문제가 없음을 알 수 있다.^(3,4) 피로 균열의 시초는 표면결함, 구조설계효과, 용접결함 등으로 인해 발생할 수 있으나 본 파단 고정핀의 경우는 파단부 주변에 노치 효과를 줄만한 날카로운 각도의 형상이 설계상 존재하지 않고 용접부가 없는 것으로 보아 구조설계 효과 및 용접결함으로 인해 피로 균열이

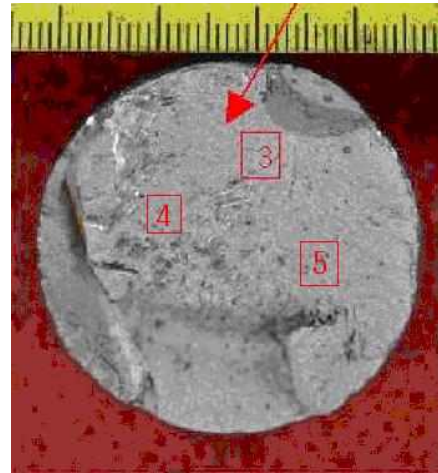


Fig. 4 Condition of failure pin

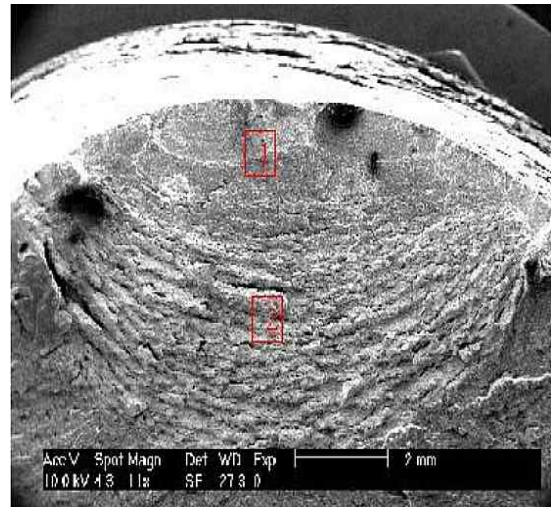


Fig. 5 Fractography of crack start division

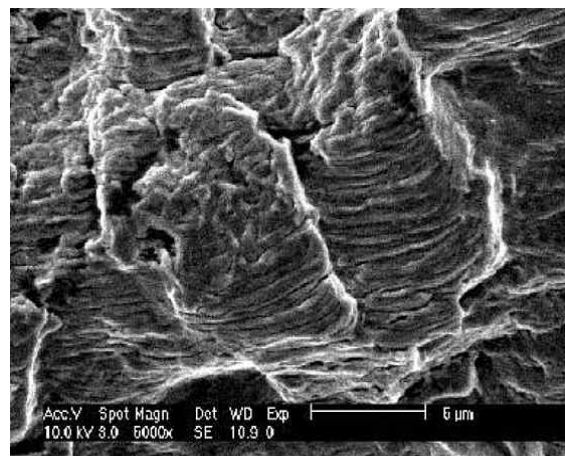


Fig. 6 Fractography of fatigue striation at the region ① in fig. 5

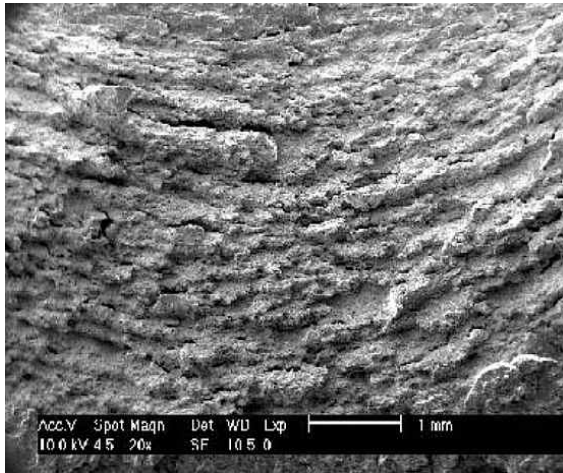


Fig. 7 Fractography of beach mark at the region ② in fig. 5

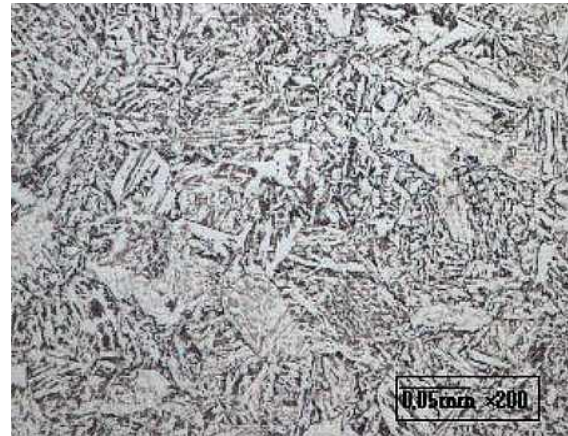


Fig. 10 Optical micrographs (x200) at the region ⑤ in fig. 4

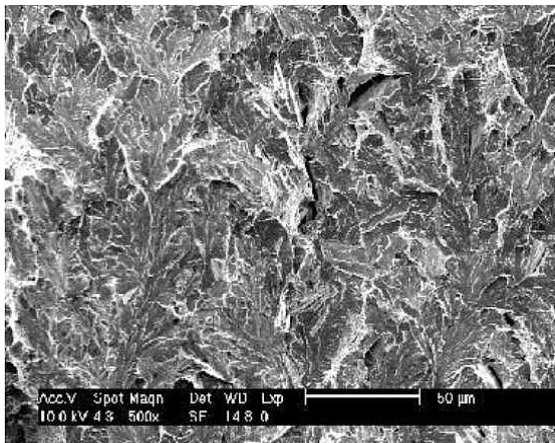


Fig. 8 Fractography of cleavage failure at the region ③ in fig. 4



Fig. 9 Optical micrographs (x100) at the region ④ in fig. 4



Fig. 11 Measurement point for mechanical property

생성되었다기 보다는 표면연마, 표면가공 등의 표면결함에 의해 피로 균열의 시초가 발생된 것으로 판단 되어진다.

3.2 재료 화학적 성분 및 물성 평가

고정된 부분에 대한 화학적 조성의 특이점을 파악하기 위해 철 및 강의 광전 측광식 발광 분광 분석 방법(KSD 1652 : 2007)에 준하여 성분분석을 수행하였고 그 결과를 설계치와 비교하여 Table 1에 나타내었다. 성분 분석 결과 화학조성은 크롬-몰리브덴강 SCM 430으로 판단되어 지며 KS D 3711 조성과 비교 시 주어진 설계조건을 만족하는 상태이다. 기계적 특성 차이를 비교하기 위해 단면 절단 후 10 개소의 강도 및 인장 물성을 평가하였다. 본 평가에서는 사고 시편의 경우 기존의 기계적 물성 평가법들이 가지는 시편 제작의 단점으로 인해 적용될 수 없었던 다양한 분야들에 대해 폭넓

Table 1 Comparison of ingredient proportion

Pro. (%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Gauge value	0.296	0.199	0.781	0.014	0.014	1.019	0.224
KSD 3711	0.28-0.33	0.15-0.35	0.6-0.85	0.030 이하	0.030 이하	0.90-1.20	0.15-0.30

Table 2 Comparison of mechanical property

Div.	Y.S(kgf/mm ²)	HB	KSD 3711
No.1	89.2	257	Y.S : 85 kgf/mm ² HB : 241~302
No.2	90.1	260	
No.3	87.3	258	
No.4	87.2	261	
No.5	91.1	257	
No.6	87.2	258	
No.7	89.4	261	
No.8	89.2	258	
No.9	87.3	260	
No.10	88.7	261	

게 응용되고 있는 계장화 압입시험법을 이용하였다. 계장화 압입시험법은 다양한 기계적인 특성을 비파괴적으로 측정하는 최신기술로서 재료에 하중 인가 및 제거 과정 중 하중과 변위를 연속적으로 측정하여 획득된 압입하중-변위곡선의 분석을 통해 유동물성, 잔류응력, 파괴 인성 등의 기계적 특성을 평가할 수 있는 방법이다.⁽⁵⁻⁷⁾ 측정 대상 및 측정 위치를 Fig. 11 에, 측정 결과를 Table 2 에 나타내었고 설계조건 항복강도(85 kgf/mm² 이상) 및 경도값 (241~302 HB)과 비교 시 그 값이 모두 설계조건을 만족하였다. 여기서, YS 는 항복 강도, HB 는 브리넬(Brinell) 경도를 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 고소작업차 추락 사고에 따른 지지 고정핀 파손 원인을 규명하기 위해 법공학적 관점에서 프랙토그래피(Fractography)를 이용한 용기의 파손형태 검사 및 계장화 압입시험법을 사용한 재료 물성평가 등을 수행하였고 다음과 같은 결과를 도출하였다. 첫째, SEM 을 이용한 파단면 관찰 결과 균열시작점 부위에서 피로 줄무늬가 관찰되고 미세조직에서 퀴칭 앤 템퍼드 마르텐사이트 조직이 관찰되는 것으로 보아 파손원인이 피로

에 의한 것임을 확인하였다. 둘째, 고정핀의 재료 분석에 대해 화학적 조성비 및 기계적 특성치가 모두 설계치를 만족하였다. 셋째, 파단 고정핀의 경우는 파단부 주변에 노치 효과를 줄만한 날카로운 각도의 형상이 존재하지 않고 용접부가 없으며 재료 물성 및 화학적 성분이 만족되는 것으로 보아 구조설계 효과 및 용접결함 등으로 인한 피로 균열 보다는 표면연마, 표면가공 등의 표면결함에 의해 피로 균열의 시초가 발생된 것으로 잠정적으로 판단된다. 단 재료가 변형 및 파손되어 피로한도를 측정하지 못한 관계로 설계 자체의 문제점은 본 연구에서 다루지 못하였다. 법공학적 연구를 통해서 본 사고의 법적 책임소재는 피로균열 기초 원인을 잠재시킨 지지 고정핀 제조사와 사용시 충격 및 표면 결함 등의 환경을 조성시킨 점점자, 운영자에 대해 일정부분을 과실상계하여 최종 판단되어야 할 것으로 사료된다. 고소작업차는 작업을 목적으로 사람이 탑승하여 운행하는 경우가 빈번함으로 기계부품의 안정성이 확보되지 못한다면 대형사고를 발생시킬 수 있는 여지가 있으나 건설 기계관리법에 적용을 받지 않는 장비로 분류되어 있다. 유사사고의 재발을 예방하기 위해 리프트 제작기준, 안전기준, 검사기준에 고소작업차 관련 기준을 상세히 규정하여 그 안전성을 확보할 수 있는 방안이 마련되어야 한다. 또한, 사람의 탑승이 가능한 고소작업차의 기계부품은 동하중 및 반복하중에 의한 동적효과계수 및 피로한도를 고려하여 부품설계시 안전율을 충분히 확보하고 제작된 부품에 대해서도 전수 정밀 검사 등을 의무화하여 그 안전성을 확보할 수 있는 규정이 마련되어야 한다. 더 나아가 부품설계시 재료 선정 및 열처리 방법 등에 대해서도 피로 및 인장 강도확보를 위한 연구가 이루어져야 할 것으로 사료되며 인장시험 외에 비틀림시험, 굽힘시험, 피로시험을 통해 복합하중 및 변동하중에 대한 안정성 검증과정이 수행되어야 한다. 본 사고는 탑승자가 안전장비를 착용하지 않아 인명 피해를 초래하였으므로 고소작업차 탑승시 안전장비 착용에 대한 필요성에 대해 안전교육을 강화할 필요가 있으며 정기적, 상시적 교육이수를 의무화 하여 이용자 과실 및 부주의에 의한 사고를 최소화하여야 한다.

참고문헌

(1) Sam, B., 2007, "Forensic Engineering:Reduction of Risk and Improving Technology," *Engineering Failure*

- Analysis*, Vol. 14, pp. 1019~1037.
- (2) Brian, H. and Mohamed, T. K., 2007, "Non-Destructive Testing Techniques for the Forensic Engineering Investigation of Reinforced Concrete Buildings," *Forensic Science International*, Vol. 167, pp. 167~172.
- (3) Kim, J. H., 2004, "Research of Fracture Analysis by Fractographical Method," *KSHT*, Vol. 17, No. 4, pp. 254~262.
- (4) Han, C. S., 2007, "The Basis and Technique of Fractography," *KSHT*, Vol. 20, No. 2, pp. 98~104.
- (5) Kim, K. H., Choi, Y., Kim, S. H., Lee, J. S. and Kwon, D. I., 2005, "Application of Instrumented Indentation Technique for Nondestructive/Mechanical Properties Measurement of In-service, Components and Materials," *Spring Conference of KSME*, pp. 336~343.
- (6) Kim, S. H., Choi, Y. and Kwon, D. I., 2004, "Determination of Brinell Hardness through Instrumented Indentation Test without Observation of Residual Indent," *KSME*, Vol. 28, No. 5, pp. 578~585.
- (7) Jeon, E. C., Kwon, D. I. and Park, J. S., 2002, "The Optimization of Advanced Indentation Test for Tensile Properties Derivation," *Spring conference of KSME*, pp. 355~360.