

펌프카의 붐대 결함에 의한 사고원인과 방지대책

조춘환^{1,*}

경기대학교 일반대학원 건설안전학과, 한국환경산업기술원

Causes of accidents and preventive measures due to defects in pump car booms

Cho Choonhwan^{1,*}

¹Department of Construction Safety, Kyonggi University, KEITI

Abstract : Pump car is an equipment that transports concrete products as needed to the place where they are poured. In order to pour a large amount of concrete in a short period of time, using a pump car is the most efficient in terms of economic efficiency and quality control. However, recently, many casualties have occurred due to boom damage during concrete pouring, so this study suggests that improvements are needed in the equipment manufacturing stage, inspection standards for old equipment, and equipment rental system. The reason is that, as a result of the finite element analysis of the pump car, the significant stress acting at the second stage of the boom and the maximum stress at the top of the boom were found to be 895.39 MPa, and M.S. Since it was evaluated the lowest at 0.04, the need for reinforcement was recognized. And it was confirmed that the 2nd stage boom was the most stressful and vulnerable part of the 1st to 5th stage booms. Therefore, it is necessary to increase the thickness and rigidity of members at the design and manufacturing stage, and to reinforce the steel plates of currently used equipment. In addition, it is urgent to establish a system that makes non-destructive testing mandatory for all general construction machinery and holds inspection agencies responsible for missing boom defects during non-destructive testing and regular inspections.

Keywords : Concrete pump car, equipment defect, boom break, safety accident, equipment accident, regular inspection, non-destructive inspection

1. 서론

1.1 연구 목적 및 배경

펌프카는 콘크리트를 호퍼(Hopper)에서 2차 교반 및 압송하는 기능을 수행하고 있으며, <Fig. 1>과 같이 펌프카는 믹서트럭으로부터 운반된 콘크리트를 타설 장소까지 이송하여 쏟아붓는 장치들로 구성되어 있다. 빠른 시간에 많은 양의 콘크리트 타설 작업을 수행하기 위해서는 콘크리트 타설용

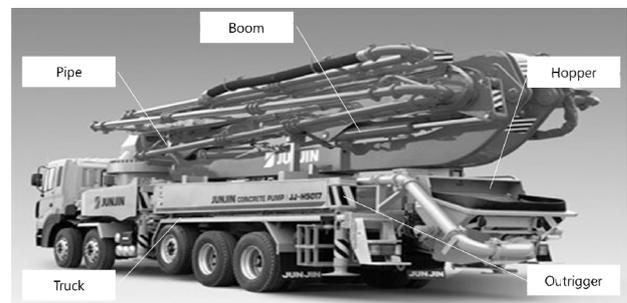


Fig 1. Concrete pump car

펌프카를 사용하여 작업하는 것이 가장 효율적인 방법으로 알려져 있다. 그러나 최근 몇 년간 콘크리트 타설 작업 중 붐대 파손으로 장비사고와 인명사고가 다수 발생하고 있으며,

* Corresponding author: Cho Choonhwan, Department of Construction Safety, Kyonggi University, KEITI, Seoul Korea
E-mail: cho387@naver.com
Received December 13, 2023
Revised December 27, 2023
Accepted December 28, 2023

건설사에서 노후 장비 불안감으로 사용 장비의 연식 제한을 검토하고 있다. 이러한 현실에서 사고 원인을 규명해야 할 국토교통부와 장비 제조사, 장비 대여(임대)업체는 장비에는 문제가 없다고 뒷집지고 있으며, 오히려 노후장비에 대하여 사용제한과 검사기준 강화를 검토하는 건설사에 자제하라고 압박하고 있다. 그러나 장비 설계/제작 단계와 노후 장비의 검사기준, 장비 대여하는 제도를 개선하지 않고 장비사고를 막기 어려운 현실이며, 특히 타설 과정에서 가장 많은 하중이 작용하는 2nd Booms에 대한 장비의 기계적 결함원인 검사제도 문제에 대한 개선책 제시가 목적이다.

2. 이론 및 선행연구 고찰

2.1 유한요소 모델링(finite-element model)

유한요소 해석을 통하여 펌프카에 작용되는 정적인 구조 안전성을 평가하는 방법으로 선행연구 Baek (2020)은 ANSYS Workbench 19.0을 이용하여 구조해석을 수행한 자료를 보면 펌프카 제작에 사용된 소재는 구조용강(Strenx 700)으로 소재의 인장시험과 피로시험을 수행하므로 구조적 물성과 S-N 선도가 획득되는지 알 수 있었다. 본 연구에서는 콘크리트 펌프카의 정해석과 각 붐의 M.S(Margin of safety) 평가로 구조적 안전성이 확보됨과 가장 응력을 많이 받는 부재를 확인할 수 있는 점을 고려하여 2nd Booms의 하중을 재검토하였다.

2.2 상당 응력(von Mises stress)

2nd Booms에 작용하는 상당응력(Von Mises stress) 분석으로 종종 복합하중을 받는 정방성과 연성 금속의 항복 조건의 판별과 상당 응력을 계산한 후 재료의 항복응력을 분석하였으며, 수직 및 전단 응력의 조합과 상관없이 복합 3-D하중 조건에서 금속의 항복 조건이 전개될 때 활용되는 상당응력의 복합응력 상태를 단일 스칼라값으로 변환하여 항복강도(yield strength)와 비교함으로써 Booms에 작용하는 최대응력과 항복강도를 분석하였다.

2.3 사고사례 조사(case study)

최근 1~2년 발생한 사고 현황을 보면 모두가 2nd Booms에서 파단 사고가 발생하였으며, 연식이 10년 이내의 대형 펌프카(L= 55m 이상)에서 발생했다. 그리고 매년 법적인

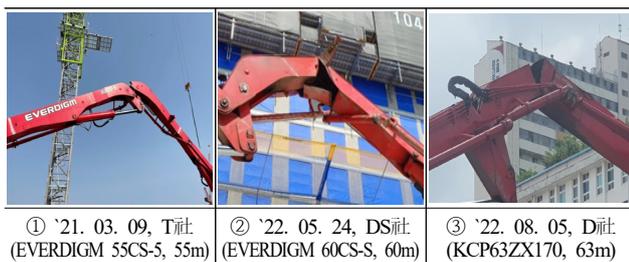


Fig 2. Accident status during concrete pouring

정기 검사는 물론 자비(비용)를 들여 비파괴검사까지 실시했으며, <Fig. 2>에 제시한 건설 3社 모두 안전하다는 검사기관의 검사 결과를 믿고 사용했던 장비로 조사되었다.

3. 연구 방법 및 분석

3.1 장비사고 조사분석

최근 발생한 펌프카 장비 사고분석은 언론 및 인터넷 기사와 사고관계자(社) 설문, 종사자 인터뷰 방법을 선택했으며 조사 내용 및 특징을 다음과 같이 4가지로 요약 정리했다.

첫째, 장비의 규모와 길이가 증가하는데 장비의 안전성의 보장하는 기술적·제도적 규제와 장치가 부족하다. 그리고 국토교통부 보도내용에 의하면 최근 5년간 펌프카 사고는 총 17건이며, 그 중 전도 사고가 12건이고, 붐대 파단 사고는 5건이 발생하였고, 이 사고로 5명의 노동자가 숨졌으며 노동자 2명이 부상한 재해가 있었다. 이 사고의 특징은 압송 배관을 지지한 붐대가 파단되었고, 붐대가 떨어지면서 중대산업재해로 이어졌다. 해당 장비는 매년 법적으로 정기 검사를 받은 펌프카임에도 붐대가 부러지는 사고가 발생한 것이었고, 그리고 장비의 연식 10년 이내의 대형 펌프카(L= 55m이상)에서 발생했다는 것을 확인하였다. 건설공사 초고층화로 인하여 요구되는 장비 규모와 길이가 증가한 것인데, 여기에 비하면 매년 실시하는 정기 검사와 비파괴 검사기관(업체)의 검사 인력과 검사장비는 발전하지 못한 것이 원인이다.

둘째, D社는 반입되는 장비에 대해서 매년 정기검사는 물론 자비(비용)를 들여 비파괴검사까지 했으며, 안전하다는 검사기관의 결과를 믿고 사용했는데 인명사고까지 발생한 억울한 사례다. 그리고 해당 펌프카도 해당 연도 1월과 5월 두 차례에 걸쳐 비파괴검사를 마쳤고, 법적 정기검사를 했지만 장비의 결함을 발견하지 못한 것이 중대재해로 이어졌다. 결함을 발견하지 못한 원인으로 비용 문제가 열거되었는데 일반 자동차 종합검사비용의 경우 65,000원, 펌프카 검사비용 82,500원이다. 법적 정기검사 검사료를 현실화시켜야 제대로 된 검사가 이뤄질 수 있다. 또한 비파괴검사를 의무화해야 한다. 물론 현실화 된 비용에 대해서 정기검사와 비파괴검사 업체에서 결함을 놓칠 경우는 그에 상응하는 책임을 검사기관(업체)에게 물어야 할 것이다. 그리고 국회 국토교통위원회 민홍철 의원이 기계안전관리원으로부터 받은 자료에 따르면 국내 펌프카 최근 5년 동안 정기검사에서 부적합 판정을 받은 펌프카는 총 5,648대인 것으로 조

Table 1. Data submitted to the National Assembly (Unsuitable for regular inspection of pump cars)(2018. 1~2022. 7)

Sortation	2018	2019	2020	2021	2022 (~7M)	Total
Inconsistence	1,324	1,310	1,190	1,149	675	5,648
Ratio	17.9%	18.0%	16.9%	16.7%	16.6%	17.22%

사됐고, 매년 16% 이상의 펌프카는 안전에 문제가 누적된다는 것은 (Table 1.)을 통해서도 알 수 있었다.

셋째, 펌프카 설계/제작 단계에서 가장 취약한 2단 부분을 강성과 철판 보강을 추가해야 하는 이유는 3가지 사례로 증명된다. 펌프카 붕대 파단 부위가 모두 2번째 Boom에서 발생했다. 즉 사고 현장 3대의 펌프카 모두 2번째 Boom에서 파단 되었다면 펌프카의 구조상 이 부분이 가장 취약한 부위로 확인된다. D社에서 사고이후 다른 펌프카(Boom 길이 68m)를 K제작사에 입고시켜 점검한 결과 2단 붕대에서 균열(Crack)이 8군데 발견되었고, K제작사는 자사 제품을 구매자에게 해당 장비는 4년이 지나면 2단 붕대가 타설 충격에 의한 내부 균열이 발생할 수 있다고 수리받으라는 안내문과 부재의 강성을 키우는 조치가 필요하다고 내부적으로 판단이 이루어진 것을 보면 알 수 있다.

3.2 구조 안전성 분석

유한요소 해석 프로그램을 통하여 펌프카 Boom의 구조적 안전성 평가 모델링을 재분석하였으며, 선행연구 Baek (2020)의 결과를 바탕으로 붕대의 1단~5단에 작용하는 응력에서 2단 붕대에 최대응력이 발생하는 것을 확인했고, 이를 통해 펌프카 붕대에서 가장 취약한 부분을 2단 Boom으로 가정하고, 작용하는 최대응력과 안전한계를 확인한 결과 파단사고를 방지하기 위해서는 Booms 2st elbow의 상부에 보강판 부착 및 부재의 강성 증가가 필요하다고 분석되었다. 그리고 (Table 3)와 같이 2단 Boom에 작용하는 최대응력 및 상당응력은 붕대 상단부에서 895.39MPa로 최대응력이 발생했으며, M.S는 0.04로 가장 낮게 평가되었고, 이는 1~5단의 붕대 중에도 가장 많은 응력과 하중은 2단 붕대가 받고, 안전한계가 거의 없는 것이 확인되었다. 펌프카의 정적해석으로 1~5단 붕대의 구조적 안전성을 나타내는 자료에서도 2nd Booms 에 Stress가 가장 높고 안전한계가 가장 낮은 수치로 2단 붕대의 보강에 대한 필요성을 재확인할 수 있었다.

4. 연구 분석 결과

4.1 유한요소 모델 해석 결과

본 연구는 펌프카로 콘크리트 타설 과정에서 붕대에 반복되는 진동으로 피로 하중을 받을 수 있으므로 동적해석을 통하여 펌프카 붕대의 구조적 안전성을 재평가하였다. 특히 콘크리트 펌프카의 유한요소 모델링에서 (Fig. 3)의 (A)에

Table 2. Margin of Safety by static analysis

Sortation	Stress [MPa]	M.S.
Boom 1	683.03	0.36
Boom 2	895.39	0.04
Boom 3	462.66	1.01
Boom 4	616.25	0.51
Boom 5	122.08	6.62

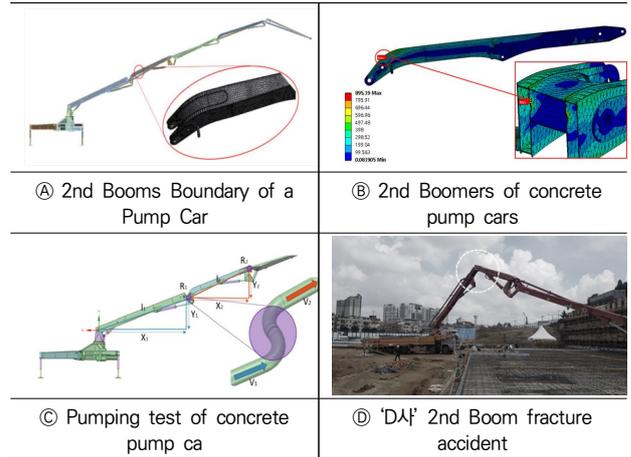


Fig. 3 Stress distribution of boom

Table 3. Margin of Safety by static analysis

Sortation	Stress [MPa]	M.S
Boom 1	4.95	29.71
Boom 2	12.83	10.85
Boom 3	26.83	4.67
Boom 4	34.37	3.42
Boom 5	25.68	4.92

표현되듯이 가장 취약한 부위인 2단 붕대의 엘보 상단으로 확인되었다. 그리고 이송되는 콘크리트가 압송관(Pipe)을 통과할 때는 (C)에 표현된 방향으로 붕대에 충격하중이 발생하며, 이것은 타설 중에 주기적인 붕대의 흔들림과 충격이 발생하고, 입·출구의 속도에 비례하여 진동이 발생하는 것을 동적해석으로 확인하였다.

콘크리트 압송중 배관 충격하중에 대한 분석결과는 (Table 3.)에서 2단 붕대 피로응력이 붕대 상단부에 12.83으로 1단보다 응력은 높으나 M.S)는 10.85로 낮게 평가되었다. 결국 압송중 피로 응력 가장 많이 받는 1, 2단 붕대중 2단 붕을 보강하고, 부재의 강성을 키워야 안전성이 확보된다는 것이고, 이를 보완하기 위해서는 설계·제작 단계에서 부재 두께와 상단부 철판보강 방법을 검토해야 한다.

4.2 장비 관계자 인터뷰

철근콘크리트 공사가 진행되는 공동주택(APT) 현장과 골조업체를 방문하여 콘크리트 타설용 펌프카 안전관리에 관한 면담 결과 내용은 (Table 4)에 요약 정리하였다.

4.3 문제점 개선 및 사고예방 방향

본 연구에서는 사고사례 문제점 분석 결과에 따라 다음과 같이 4가지 사고 예방 방향을 제시한다.

2) M.S(margin of safety):

Table 4 Hearing of Opinions for Prevention of Concrete Pump Car Accidents

구분	Interviews with field officials (Summary)
equipment. a mechanical defect	펌프카 붐의 파손된 부분은 모두 2단 붐에서 발생, 구조적으로 가장 취약한 부분이므로 부재의 강성과 철판의 두께를 높여야 한다고 했다.
Inspection method (Non-destructive inspection, regular inspection)	반복되는 붐의 붕괴는 건설기계의 안전을 담보해야 하는 정기점검이 부실한 데다 정기점검을 한마디로 신뢰하기 어렵다고 했다. 검사업체 관계자는 시간 문제와 비용 효율성 등으로 인해 결함 검사는 현실적으로 이뤄지지 않고 있지만 구조적 안전검사는 관리자의 눈을 속이고 각종 편법을 동원해 이뤄지고 있다고 전했다. 모든 건설기계에 비파괴검사를 의무 사항으로 반영하는 것이 시급하다는 의견이다.
an equipment operator	펌프카 사고를 조종사(운전원)의 과오와 오퍼(차주)의 관리 소홀로 책임전가하고, 운전 및 조정을 대형차 면허로 가능토록하고, 별도 교육과 기능교육을 받지 않는 것도 문제점이라고 했다.
Equipment History Management	D社의 현장에서 사고가 난 콘크리트 펌프카가 3개월 뒤 DW社에서도 같은 사고가 발생한 것이 건설시장의 현실이라 했다. 또 인명피해는 없지만 노동부 조사와 언론에 노출되지는 않았지만 펌프카 붐 2단 파해가 빈번하다는 장비 관련 업계 관계자의 설명이다.

첫째, 펌프카는 현행 산안법에 유해하거나 위험 기계·기구로 분류되지 않아 안전인증은 필요치 않는다고 분류되어 있다. 그러나 계속해서 장비는 대형화되고 있으며, 사고 발생시 피해의 규모가 상당히 크다는 특징으로 안전인증 대상인 위험 기계·기구로 편입하여 안전장치와 철판 두께를 보강하고, 부재의 강성을 키우는 것을 산업안전보건법의 테두리 안에서 다루어져야 하고 관련 제도 마련도 필요하다.

둘째, 장비의 대형화에 따른 장비 중량을 줄이고자 한다. 즉 펌프카 붐대 길이 및 장비 규모는 커지는데 도로교통법의 통과 중량 50ton 제한을 피하고, 장비의 하중을 맞추기 위하여 철판 두께를 감소시키는 등 안전성 저하 행위는 예방되어야 하는데 그 이유는 (Fig. 4)와 같이 2번 붐대가 부러진 부위 확대 사진은 응력과 충격하중을 견디지 못하고 붐대가 완전히 직선으로 절단되었고, 모재철판의 Crack 발생으로 녹이 쓴 상태(흰색 점선부분)를 사고 직후 바로 확인할 수 있었다.

셋째, 건설 현장에서 장비를 사용하다 보면 아무리 소중



Fig. 4. A sectional photograph of the pump car boom breakage of company D社 (death 2).

하게 사용해도, 시간이 흐를수록 성능이 떨어지고, 충격이 가해지면서 최초 출고시 장비의 성능을 100% 유지될 수 없다. 장비의 안전성을 정기적으로 확보하고자 건설기계관리법에 장비검사를 실시하고, 장비 안전성 확보를 위해 장비 비파괴 검사하고 있으나 이런 행위들이 형식적인 경우가 많다. 하루하루 일대(당일) 장비를 불러서 사용하는 공사관계자는 장비 등록증의 검사 결과와 비파괴 검사 성적서만 믿고 작업을 진행할 수밖에 없으므로 결함을 놓친 검사(업체)기관의 경우는 그에 상응하는 책임을 지우는 제도와 비파괴 검사의 국가표준(KS) 마련이 필요하다.

넷째, 장비사고조사위 '22. 8/5 D社 사고내용 자료를 보면 해당 장비는 사고 발생 23일 전 7/13일 법적인 정기검사 실시했고, 검사소로부터 이상 없음이 확인되었다. 정부 검사기관에서 검사받고 23일 만에 붐대가 부러져 근로자 2명이 사망한 것이다. 현재 검사제도를 확인해 본 결과 펌프카 검사비용은 82,500원이었으며, 이를 받고 법에서 요구하는 모든 항목을 검사할 수 있을지 의문이므로 하루빨리 소요되는 검사비용을 현실화와 책임의 공정화를 해야 한다.

5. 결론

장비 결함으로 발생하는 산업재해 예방은 펌프카 설계와 제작단계에서 2nd Booms elbow 상부에 보강판 부착과 부재 강성 증가의 필요성은 본연구 결과로 증명되었다. 그리고 구조적 안전성 평가 모델링에 따라 2nd Booms에 Stress가 895.39MPa로 가장 높고, 안전한계가 M.S=0.04로 가장 낮은 수치로 2단 붐대 상단부분의 보강(안)이 검증되었다. 그러므로 펌프카 제조사는 가장 취약한 부위에 보강판과 부재의 강성을 높이고, 운행 펌프카는 리콜(recall) 통하여 검사와 안전성을 확보해야 한다. 그리고 계속되는 펌프카와 장비 사고로 고귀한 근로자의 생명을 보호하기 위해서는 정부에서 실시하는 정기검사와 비파괴검사의 문제점을 다시 한번 짚어봐야 한다. 장비검사의 소요되는 시간상 문제와 저가 입찰 등에 따른 비용상의 문제로 정확한 결함부위 검사가 현실적으로 어려운 부분을 개선해야 한다. 그리고 비파괴검사를 의무사항으로 반영하고, 비파괴검사와 정기검사에서 결함을 놓친 경우는 그에 상응하는 책임을 검사(업체)기관에 물을 수 있는 제도 마련을 제안한다.

References

Lee. J. d, Lee. C. y, B. K, A Study on the Analysis of a Main Drive Hydraulic Cylinder for Concrete Pump Car. Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 19, No. 5, pp735-741, 2017.
So. J. B, N. J. Kim, H. G. Choi, J. H. Choi. Structural Safety Evaluation of Concrete Pump Cars. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process

- Engineers, Vol. 19, No. 3, pp57-62, 2020.
- Lee. S. H, Kim. B. I, Analytical Study on Characteristics of von Mises Yield Criterion under Plane Strain Condition. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 16, No. 9, pp6391-6396, 2015.
- S. J. Baek, H. G. Choi, J. H. Choi, Structural Analysis and Safety Evaluation of Mobile Concrete Pump. Proceedings of the KSMPE Conference, Vol. 1, No. 1, pp198-198. 2019.
- J. K. Lee, H. M. Cho, 2022 Plan for Enactment and Revision of Korean Standards(KS) in Non-destructive testing. The Korean Society for Nondestructive Testing Annual Spring Conference 2021, Vol. 1, No. 1, pp29-29, 2022.
- D. H. Kim, S. R. Choi, S. Y. Park, D. R. Kim, Y. W. Chon, A Study on the Subcontracting Structure and Safety Management in Business Site through the Report of the Accident Investigation Committee(Based on Power Generation & Shipbuilding Industry). Korean Journal of Hazardous Materials, Vol. 8, No. 1, pp100-107, 2020.
- Jeon.H.W, Risk Assessment for Reducing Safety Accidents caused by Construction Machinery, Journal of the KOSOS, Vol.28, No.6, pp. 64~72, 2013.
- Park.J.K, The Benefit Cost Analysis of the Accident Prevention Cost in Construction Work, Journal of the KOSOS, Vol. 20, No. 1, pp. 113~118, 2005

요약 : 펌프카는 콘크리트를 타설하는 장소에 필요한 만큼 운반하는 장비로, 짧은 시간에 많은 양의 콘크리트 타설하기 위해서는 펌프카를 사용하는 것이 경제성 및 품질관리 측면에 가장 효율적이다. 그러나 최근에는 콘크리트 타설중에 붐 파손으로 인한 인명피해가 많이 발생하고 있으므로 본 연구에서는 장비 제작단계, 노후장비에 대한 검사기준, 장비대여제도 등의 개선이 필요함을 제언한다. 그 이유는 펌프카의 유한요소해석 결과, 붐 2단에서 작용하는 상당응력과 붐상단에서 최대응력이 895.39MPa로 나타났고, MS. 0.04로 가장 낮게 평가되었으므로 보강의 필요성을 인식했다. 그리고 2단계 붐은 1-5단계 붐대 중 가장 스트레스가 많고, 취약한 부분임을 확인했다. 따라서 설계 및 제작 단계에서 부재의 두께와 강성을 높이고, 현재 사용되는 장비의 강판에 대한 보강이 필요하다. 또한, 일반 건설기계 전체에 대한 비파괴 검사를 의무적으로 반영하고, 비파괴검사 및 정기검사시 붐대 결함 누락에 대한 책임을 검사기관에 부담시키는 제도 구축이 시급하다.

키워드 : 콘크리트 펌프카, 장비불량, 붐파손, 안전사고, 장비사고, 정기점검, 비파괴검사
