

콘크리트 펌프카의 구조적 안전성 평가

백소정*, 김남진**, 최형규**, 최진호*.#

*경상대학교 기계항공공학부, **KCP중공업

Structural Safety Evaluation of Concrete Pump Cars

So-Jung Baek*, Nam-Jin Kim**, Hyoung-Gyu Choi**, Jin-Ho Choi*.#

*ReCAPT, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National Univ.,

**KCP Heavy Industries

(Received 7 January 2020; received in revised form 16 January 2020; accepted 9 February 2020)

ABSTRACT

Concrete pump cars are a type of construction equipment that continuously supplies concrete using hydraulic pressure. When manually casting concrete, there may be a problem in the final quality of the concrete due to differences in the degree of cure between the pre-poured and subsequent concretes. Concrete pump cars are the most efficient machines to supply concrete in the shortest time; however, it is difficult to calculate their margin of safety during operation. In this paper, we verified the structural safety of the concrete pump car using a static/dynamic analysis at various position angles. Next, these results were compared with experimental results; strains using strain gages were compared with the strains measured using FEM software to verify the static analysis. In addition, the maximum displacement during the pumping was measured and it was used for fatigue analysis to evaluate the dynamic structural safety.

Key Words : Concrete Pump Car(콘크리트 펌프카), Static Analysis(정해석), Dynamic Analysis(동해석), Margin of Safety(안전율)

1. 서 론

콘크리트 펌프카는 콘크리트 믹서장비로부터 수급 받은 콘크리트를 트럭에 장착된 콘크리트 펌프의 유압으로 이송관을 통하여 원하는 위치에 원하는 양만큼을 타설하는 장비다.

수작업으로 콘크리트를 타설하는 경우, 먼저 타설된 콘크리트와 이후에 타설된 콘크리트 간 경화도

차이로 인하여 최종적으로 콘크리트의 품질에 문제가 발생할 수 있으므로, 최단시간 내에 작업을 수행하기 위하여 콘크리트 펌프카 이용하여 타설하는 방법이 가장 효율적이다. 건설현장에서 콘크리트 펌프카의 구조적 안전성을 확보하는 것은 매우 중요하며, 실제 타설 중인 콘크리트 펌프카의 안전율을 평가하는 것은 현실적인 여러 가지 제한조건으로 인하여 많은 한계를 가지고 있다.

본 논문에서는 콘크리트 펌프카의 정/동 해석을 수행하여 구조적 안전성을 검증하였으며, 이를 실험 결과와 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다.

Corresponding Author : choi@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1634, Fax: +82-55-772-1578



Fig. 1 Concrete pump car

2. 펌프카의 정적 구조건전성

2.1 유한요소 모델링

콘크리트 펌프카의 정적 구조 건전성을 평가하기 위하여 ANSYS Workbench 19.0을 이용하여 콘크리트 펌프카의 정적 구조해석을 수행하였다. 펌프카 제작에 사용된 소재는 구조용 강 (Strenx 700)으로, 소재의 인장시험과 피로시험을 수행하여 Table 1의 구조적 물성과 Fig. 2의 S-N선도^[1]를 획득하였다. 정적 해석은 Fig. 3 (a)와 같이 펌프카 붐이 완전히 접혀진 상태에서 붐이 완전히 펼쳐진 Fig. 3 (b) 형상으로 전개되는 과정에서 발생하는 하중의 최대값을 적용하였다. 펌프카 붐이 완전히 접혀진 상태에서 붐 3, 4, 5는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 하부 구조물에 지지된 상태이므로, 하부 구조물의 강성값을 계산하여 스프링 요소로 근사화하여 해석하였다. 붐의 전개과정을 모사하기 위하여 Fig. 5와 같이 ANSYS에서 제공하는 Joint 조건^[2]을 부여하였다. 그림에서 보는 바와 같이 29개의 붐 연결부는 회전 자유도를 가진 Revolute Joint로 지정하였으며, 9개의 실린더는 직선운동이 가능한 Translational Joint로 지정하였다. 또한, 이송관 내부 콘크리트의 질량은 분포하중으로 가정하였으며, 트럭무게를 Point Mass로 근사화시켰고, Outrigger 하부를 고정 지지하여 해석을 진행하였다.

Table 1 Mechanical properties of Strenx 700

Material property	Density	Young's modulus	Tensile strength
Structural steel	7850 [kg/m ³]	200 [GPa]	900 [MPa]

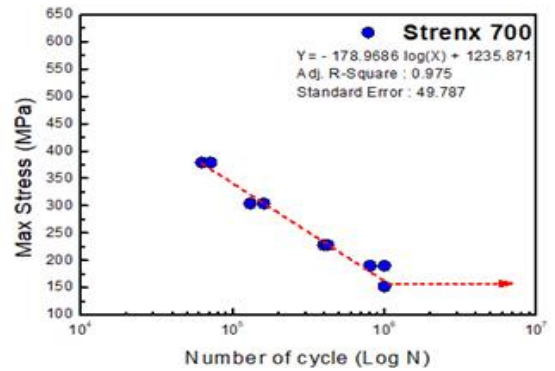


Fig. 2 S-N curve of Strenx 700

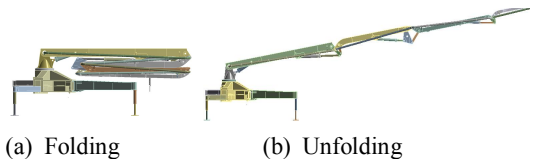


Fig. 3 Folding/Unfolding of concrete pump car



Fig. 4 Supporting structure of concrete pump car

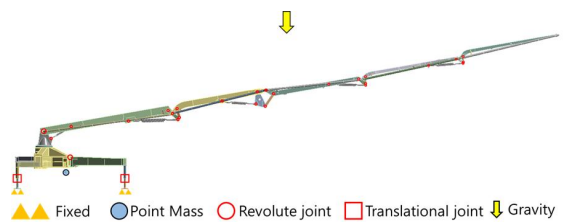


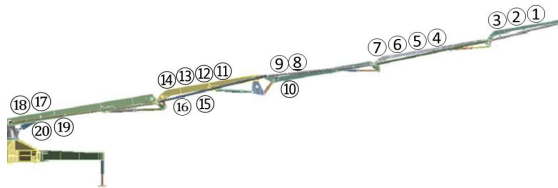
Fig. 5 Boundary condition of concrete pump car

2.2 해석결과 검증

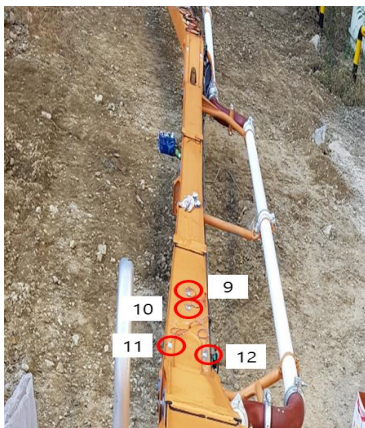
유한요소해석의 타당성을 검증하기 위하여, 붐 전개 전, 후의 변형을 차이를 측정하여 해석 결과와 상호 비교하였다. Fig. 3 (a)와 같은 붐 전개 전 상태에서 각 붐 별로 2개의 Strain gauge를 부착하

Table 2 Strain of analysis and experiment

10°		Strain gauge No.	Analysis strain [$\mu \epsilon$]	Test strain [$\mu \epsilon$]	Error (%)
Boom 1	Top	18	1314	1386	5.25
		17	1130	1486	10.52
	Bottom	20	-1753	-1853	5.42
		19	-1085	-1366	20.56
Boom 2	Top	14	1116	961	16.09
		13	1293	1512	14.17
		12	1246	1594	21.86
		11	978	1267	22.81
	Bottom	16	-1755	-2017	13.00
		15	-855	-1117	23.48
Boom 3	Top	9	1054	935	12.79
		8	1057	960	10.07
	Bottom	10	-1021	-1007	1.39
Boom 4	Top	7	957	1178	18.73
		6	1086	1086	0.04
		5	1070	997	7.39
		4	1080	1253	13.79
Boom 5	Top	3	253	241	5.03
		2	356	398	10.53
		1	361	422	14.30



(a) Location of strain gauges



(b) Photograph of installed strain gauge

Fig. 6 Installation of strain gauges

여 변형률 값을 초기화한 다음, 붐이 완전히 전개 되고 지면으로부터 각도가 10°인 상태(Fig. 3 (b))에서 변형률값을 측정하였다. 유한요소해석에서는 Fig. 3 (a)와 (b)의 변형률을 각각 계산한 다음, 두 자세의 변형률 차이를 평가하였다. 각 붐의 Strain gauge 부착위치는 Fig. 6과 같다. Table 2는 해석과 실험으로부터 구한 변형률 차이를 비교한 표로서, 최대 23%의 오차가 발생함을 볼 수 있다.

2.3 정적 안전성 평가

이상의 유한요소해석 결과로부터 각 붐의 구조적 안전성을 평가하였다. Fig. 7은 붐 1의 Von Mises 상당응력을 나타낸 그림으로, 붐의 상단부분에서 683.03 MPa의 최대응력이 발생하였으며, M.S. (Margin of safety)는 0.36으로 평가되었다.

Fig. 8은 붐 2의 Von Mises 상당응력을 나타낸 그림으로, 붐의 상단부분에서 895.39 MPa의 최대응력이 발생하였으며, M.S.는 0.04로 평가되었다.

Fig. 9는 붐 3의 Von Mises 상당응력을 나타낸 그림으로, 붐의 하단부분에서 462.66 MPa의 최대응력이 발생하였으며, M.S.는 1.01로 평가되었다.

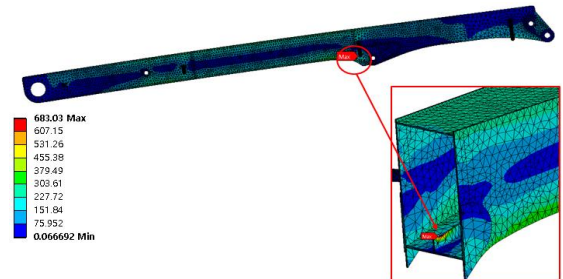


Fig. 7 Stress distribution of boom 1

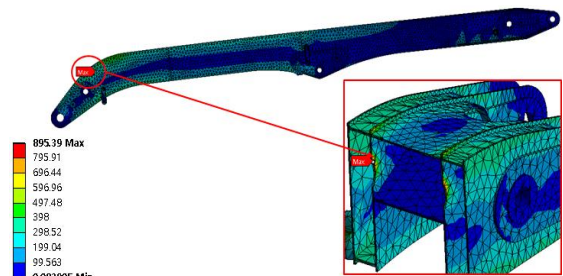


Fig. 8 Stress distribution of boom 2

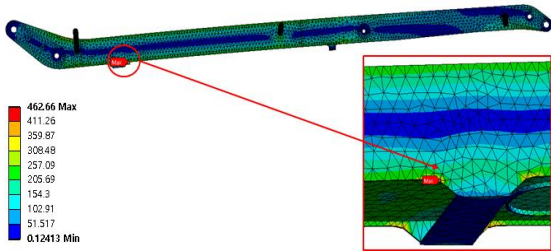


Fig. 9 Stress distribution of boom 3

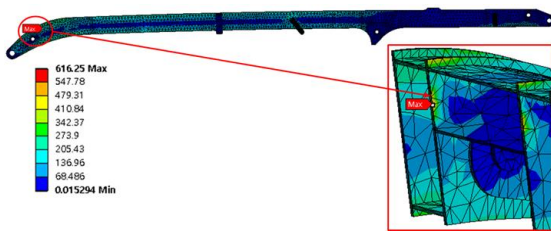


Fig. 10 Stress distribution of boom 4

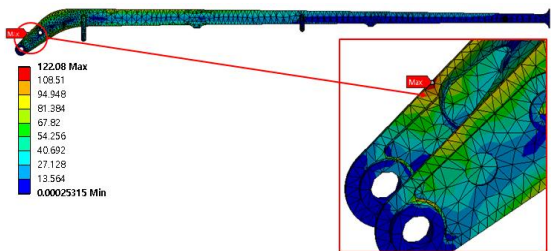


Fig. 11 Stress distribution of boom 5

Table 3 Margin of Safety by static analysis

	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. 10은 붐 4의 Von Mises 상당응력을 나타낸 그림으로, 붐의 상단부분에서 616.25 MPa의 최대응력이 발생하였으며, M.S.는 0.51로 평가되었다.

Fig. 11은 붐 5의 Von Mises 상당응력을 나타낸 그림으로, 붐의 하단부분에서 122.08 MPa의 최대응력이 발생하였으며, M.S.는 6.62로 평가되었다.

Table 3은 콘크리트 펌프카의 정해석 결과로서, 각 붐의 M.S.는 0.04~6.62로 나타나, 구조적 안전성이 확보되었음을 볼 수 있다.

3. 펌프카의 동적 구조조건전성

3.1 타설시험

콘크리트 펌프카의 성능평가를 위하여 타설시험을 수행하여 평균 토출유량과 동적 최대변위를 측정하였다. Fig. 12는 콘크리트 펌프카의 타설시험 사진으로, 콘크리트 펌프의 작동주기를 3 Hz로 고정하였을 때 타설시험 콘크리트 평균 토출량은 $76.6m^3/h$ 로 측정되었으며, 붐 5 끝단의 최대 변위는 257mm로 측정되었다.

3.2 유한요소모델

콘크리트 펌프카는 타설과정에서 반복된 진동이 발생하며, 이로 인하여 피로하중을 받을 수 있으므로 동해석을 통하여 펌프카의 구조적 안전성을 평가하였다. 펌프카는 타설과정에서 콘크리트의 주기적인 이송에 의하여 강제 조화운동을 한다고 볼 수 있으므로 이송관의 방향이 변화되는 영역에 조화하중을 부여하여 펌프카의 진동해석을 수행하



Fig. 12 Pumping test of concrete pump car



Fig. 13 Finite element model

였다. Fig. 13은 동해석을 위한 유한요소모델로서, 타설시험과 동일한 형상으로 모델링하였다.

각 붐이 연결되는 Joint부는 정적해석에서 사용된 Fig. 5의 Joint 조건과 동일한 형태를 사용하였으며, 이송관 내부 콘크리트의 질량은 분포하중으로 가정하여 각 붐의 콘크리트 이송관에 적용하였다. 조화하중 R의 크기와 방향은 이송속속의 변화에 의해 발생하며 다음과 같이 표현된다³⁾.

$$\vec{R} \Delta t = m (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)$$

$$\vec{R} = \dot{m} (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) = \rho A v^2 \{ (u_2 - u_1) \vec{i} + (v_2 - v_1) \vec{j} + (w_2 - w_1) \vec{k} \}$$

단, \dot{m} : 질량유량
A : 파이프 단면적
v : 이송속도

위 식에서 입, 출구의 속도 \vec{v}_1, \vec{v}_2 의 방향은 단위 벡터로 표시할 수 있으며, Fig. 14과 같이 각 이송관의 좌표값으로부터 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

$$\vec{v}_1 = v \{ u_1 \vec{i} + v_1 \vec{j} + w_1 \vec{k} \} = v \left\{ \frac{X_1 \vec{i} + Y_1 \vec{j} + Z_1 \vec{k}}{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2}} \right\}$$

$$\vec{v}_2 = v \{ u_2 \vec{i} + v_2 \vec{j} + w_2 \vec{k} \} = v \left\{ \frac{X_2 \vec{i} + Y_2 \vec{j} + Z_2 \vec{k}}{\sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2}} \right\}$$

콘크리트 펌프카는 각 붐의 Joint 및 실린더 부위에서 감쇄값을 가지며, 이로 인하여 타설 중에 진동변위를 감소시킨다. 콘크리트 펌프카의 감쇄값을 결정하기 위하여 붐 5 끝단의 최대 변위가 실험에서 측정된 257mm가 되도록 감쇄값을 변위시켜가며 강제 조화진동해석을 수행하였다. 해석결과, 콘크리트 펌프카의 감쇄값은 0.115로 평가되었으며, Fig. 2의 피로한도($\sigma_a = 152\text{MPa}$)를 기준으로 각 붐의 동

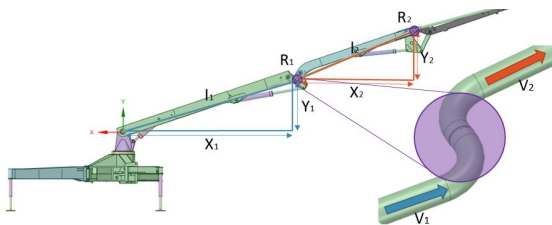


Fig. 14 Velocities of inlet and outlet

적 구조건전성을 평가하였다.

3.3 해석 결과

Fig. 15은 붐 1의 피로응력을 나타낸 그림으로, 붐의 조인트 부분에서 4.95 MPa의 최대응력이 발생하였으며, M.S.는 29.71로 평가되었다.

Fig. 16은 붐 2의 피로응력을 나타낸 그림으로, 붐의 상단부분에서 12.83 MPa의 최대응력이 발생하였으며, M.S.는 10.85로 평가되었다.

Fig. 17은 붐 3의 피로응력을 나타낸 그림으로, 붐의 중앙부분에서 26.83 MPa의 최대응력이 발생하였으며, M.S.는 4.67로 평가되었다. Fig. 18은 붐 4의 피로응력을 나타낸 그림으로, 붐의 조인트 필렛 부에서 34.37 MPa의 최대응력이 발생하였으며, M.S.는 3.42로 평가되었다. Fig. 19는 붐 5의 피로응력을 나타낸 그림으로, 붐의 측면부분에서 25.68 MPa의 최대응력이 발생하였으며, M.S.는 4.92로 평가되었다.

Table 4는 콘크리트 펌프카의 피로해석 및 실험 결과로서, 각 붐의 M.S.는 3.42~29.71로 나타나, 구조적 안전성이 확보되었음을 볼 수 있다.

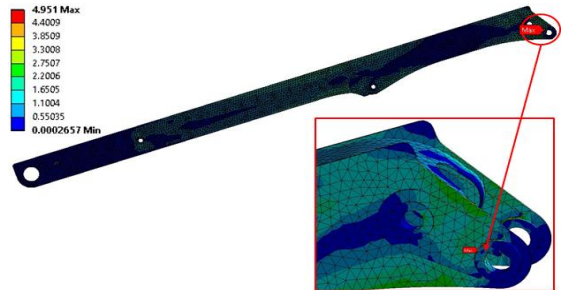


Fig. 15 Stress distribution of boom 1

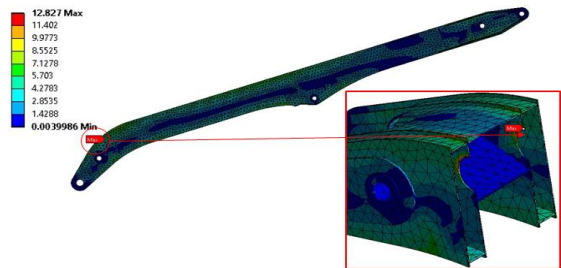


Fig. 16 Stress distribution of boom 2

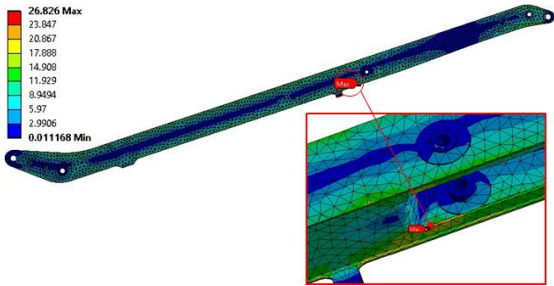


Fig. 17 Stress distribution of boom 3

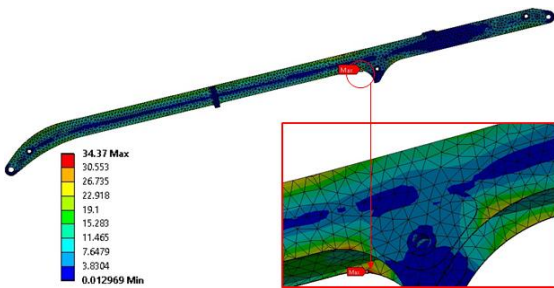


Fig. 18 Stress distribution of boom 4

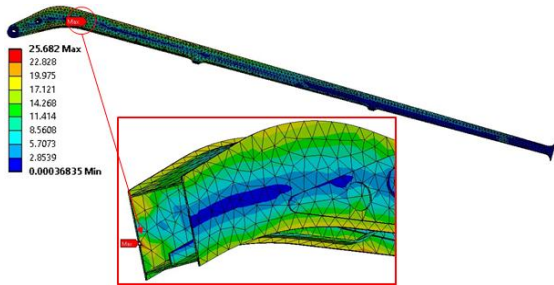


Fig. 19 Stress distribution of boom 5

Table 4 Margin of safety by dynamic analysis

	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

4. 결론

본 논문에서는 콘크리트 펌프카의 정/동 해석을

수행하여 구조적 안전성을 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 콘크리트 펌프카의 정해석 및 실험결과, 해석과 실험으로부터 구한 변형율은 최대 23%의 오차가 발생하였으며, 각 붐의 M.S.는 0.04~6.62로 평가되어 정적 구조건전성을 확보하였음을 확인하였다.
2. 콘크리트 펌프카의 피로해석 및 실험결과, 각 붐의 M.S.는 3.42~29.71로 평가되어 동적 구조건전성을 확보하였음을 확인하였다.
3. 향후, 다양한 타설조건에 대한 구조해석을 수행하여 콘크리트 펌프카의 최적 구조를 제시하여야 한다.

후 기

본 논문은 2019년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원 (NRF-2017R1A5A1015311) 과 2019년도 정부(중소벤처기업부)의 재원으로 한국산업기술진흥원(World Class 300 프로젝트)의 지원(No. 1425132026)을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Bannantine, J. A., Comer J. J. and Handrock, J. L., Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prantice Hall, pp. 2-3, 1990.
2. Lee, H. H., Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 18, SDC Publications, pp. 479-492, 2018.
3. Meriam, J. L. and Kraige, L. G., Engineering Mechanics : Dynamics, John Wiley& Sons, Inc., pp. 288-314, 2012.