

다물체 동역학 시뮬레이션 기반 4단 배수 타워의 동적 특성 연구 Study on Dynamic Characteristics of 4-Step Drainage Tower Based on Multi-body Dynamics Simulation

박승운¹ · 한영환² · 전호영² · 이철희^{1*}

Seungwoon Park, Yeong Hwan Han, Ho Young Jeon and Chul-Hee Lee

Received: 24 Aug. 2023, Revised: 25 Sep. 2023, Accepted: 20 Nov. 2023

Key Words : Centrifugal Force(원심력), Dynamics Analysis(동역학 해석), Multi-body Dynamics Simulation(다물체 동역학 시뮬레이션), Structural Analysis(구조해석), Topology Optimization(위상 최적화)

Abstract: This paper analyzed a drainage tower used to drain water in flooded areas. Multi-body dynamics simulation was used to analyze the dynamic behavior of the drainage tower. Structural analysis, flexible-body dynamic analysis, and rigid body dynamic analysis were done to study the maximum Von-Mises stress of the drainage tower. The results showed that the maximum Von-Mises stress occurs at the turn table, and it decreases when the angle of the boom is increased. Also, the rate of the change of angle affects the maximum stress so that the maximum stress changes more when the angular velocity of the boom increases. Based on the rigid body dynamic analysis and the theoretical analysis results, the centrifugal force from the angular velocity makes the difference in the maximum stress at the turn table because of the difference in their direction. Consequently, it was concluded that the centrifugal force should be considered when designing construction machinery that can rotate.

기호설명

c : distance from center to end of cross-section of boom, mm

g : gravitational acceleration, m/s^2

t : time, sec

m_1, m_2, m_3, m_4 : mass of n _th boom, kg

m_p : mass of drainage pump, kg

m_t : mass of turn table, kg

m_r : mass of rest parts of drainage tower, kg

F_c : centrifugal force, N

I : area moment of inertia of booms, mm^4

L : total length of booms, mm

W_1 : weight of booms and rest parts, N

W_2 : weight of drainage pump, N

δ : deformation of the end of booms, mm

θ : angle of booms, $^\circ$

σ_1 : bending stress from bending moment, MPa

σ_2 : tensile stress from centrifugal force, MPa

σ_3 : compressive stress from weight, MPa

ω : angular velocity of booms, rad/s

1. 서론

집중호우 등 호우 관련 재난 발생 시 터널 및 고지가 낮은 지대에 존재하는 지하철, 지하 주차장 등에서 침수 재난이 발생하는 위험이 존재한다. 침수는 단순히 물에 의해 불편을 초래하는 것이 아닌 해당 지역에 배수가 원활히 이루어지지 않아 지역의 차량, 장비 등에 물에 의한 고장을 입히거나 감전 사고를

* Corresponding author: chulhee@inha.ac.kr

1 Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

2 Junjin Construction & Robot Co. Ltd, Chung Buk 27632, Korea

Copyright © 2023, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

유발할 수 있는 위험한 재난 중 하나이다. 이를 방지하기 위해 도로, 건물 등에서 침수 발생 가능성이 높은 구역에 빗물이 빠져나갈 수 있도록 배수 시스템을 설치하여 사전에 사고를 예방하고 있다. 배수 시스템이 설치되어 있지 않은 시외 지역에서는 침수 발생 시 물이 빠져나갈 방법이 없으므로 해당 지역에 있는 물을 효과적으로 제거할 수 있도록 수중에 설치하는 수중펌프 및 배수펌프를 개발 중이다. 또한 이동형 배수 시스템을 개발하기 위해 배수펌프를 설치할 배수 타워 및 차량도 개발 중이다. Fig. 1은 (주)전진건설로봇에서 개발 중인 침수지역에서 운용 가능한 이동형 배수 타워의 예를 보여준다¹⁾. 크레인이 설치된 차량과 같은 형태이며, 일자형 크레인이 아닌 여러 개의 붐이 서로 회전부로 연결되어 각각 회전이 자유롭게 이루어지는 것이 특징이다. 이와 같은 장비는 펌프의 유동 해석과 같이 해석을 기반으로 설계가 진행된다. 선행 연구로 펌프의 유동 해석과 구조해석을 진행하며 펌프의 유동 특성, 진동 특성, 안전성 등을 연구한 사례가 있으며²⁻⁸⁾, 유사한 방식으로 움직이는 타워인 등에 대해 연구를 진행한 사례가 존재하며⁹⁻¹¹⁾, 시뮬레이션을 이용하여 해석을 진행한 연구와¹²⁻¹⁴⁾, 기계 장치나 차량에 대해 동역학 해석을 진행한 사례 또한 존재한다¹⁵⁻¹⁶⁾. 기존 연구들은 펌프에 대한 구조해석 및 유동해석을 진행하거나 본 연구에서 해석할 배수 타워와 유사한 크레인 타워에 대해 해석을 진행하여 안정성을 분석하였지만 차량에 탑재되는 배수 타워는 무게, 작동 속도 등 동적 특성이 달라 구조해석과 동해석이 동시에 진행되는 추가적인 연구가 진행될 필요가 있다. 배수 타워는 단순히 고정되어 있지 않고 빠른 회전 운동을 하므로 회전 운동에 의한 응력 변화가 발생할 것으로 예상할 수 있으나, 이러한 배수 타워에 대해 동적 특성 연구가 진행된 사례는 불충분하여 본 연구는 상기한 선행 연구를 바탕으로 배수 타워의 동적 특성을 분석하는 것을 목적으로 진행하였다.

본 연구를 수행하기 위해 (주)전진건설로봇에서 개



Fig. 1 Drainage tower installed in a vehicle.

발 중인 이동형 4단 배수 타워를 이용한다. 다물체 동역학 시뮬레이션을 기반으로 해석을 진행하며 구조해석, 동역학 해석을 진행하여 타워 붐의 회전 속도에 따른 응력의 변화를 분석하는 것을 목적으로 한다.

2. 배수 타워 시뮬레이션 모델링

본 논문에서 사용된 배수 타워는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 소개된 것처럼 배수 타워는 턴테이블과 4개의 붐 타워로 구성되어 있고, 각각 링크 시스템으로 연결되어 있어 턴테이블에서는 모든 평면에 대해서, 붐 타워는 각각 x-y 평면에 대해 회전이 가능하다. 각 붐 타워는 인접한 붐 타워끼리 액추에이터가 연결되어 실제 배수 타워 작동 시 액추에이터에 의해 붐 타워가 회전하지만, 본 논문에서는 각 붐 타워에서의 회전부를 중심으로 액추에이터 영향 없이 회전하는 것으로 가정하였다. 배수 타워 모델을 단순화하면 턴테이블, 붐 타워와 각 타워에 설치된 배수 파이프, 그리고 4번째 붐 타워 끝에 설치된 배수펌프로 구성된다. 설계된 배수 타워의 각 부품의 물성은 Table 1에 나타내었다. 붐 타워는 각각 연결된 오일 파이프의 무게와 더해지며, Table 1에 표기되지 않은 부품은 배수 파이프, 링크 시스템, 액추에이터 등 해석 대상이 아닌 부품으로, 전체 배수 타워 질량인 약 12,000kg 중 약 4,400kg를 차지한다. 배수

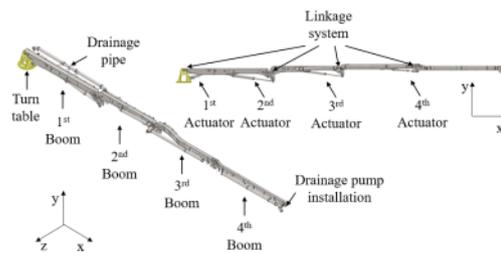


Fig. 2 3D model of the drainage tower.

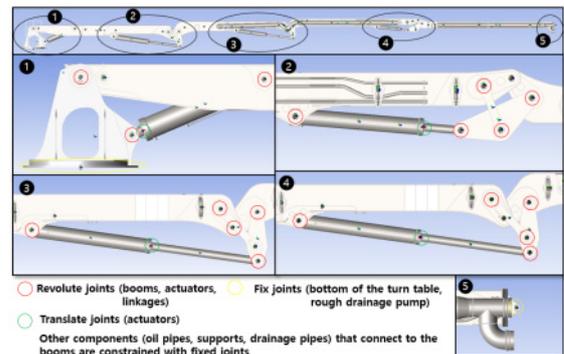


Fig. 3 Simulation model of the drainage tower.

Table 1 Mass information of components of the drainage tower.

부품	질량 [kg]	허용 응력 [MPa]	영률[MPa] 푸아송비 밀도[kg/mm ³]
턴테이블	1,500	900	210,000 0.29 0.29
붐 1	1,900	700	
붐 2	1,500		
붐 3	900		
붐 4	600		
배수펌프	1,200		

타워 해석을 위해 다물체 동역학 해석 프로그램인 ANSYS Motion을 이용하여 해석을 진행하였다.

Fig. 3은 배수 타워의 시뮬레이션 모델링을 나타내었다. 각 부품은 구속조건으로 서로 연결되어 있으며, fix, translate, revolute joints를 이용하여 고정, 이동, 회전 가능하게끔 정의하였다. 이때 배수펌프는 4번째 붐 끝에 위치해야 하고, 시뮬레이션에서는 단순화하여 공 모양의 형태가 끝단에 고정된 것으로 표현하였다. 부품의 물성은 Table 1에 표현된 것과 같이 정의하였으며, 중력가속도는 -y 방향으로 정의하였다.

3. 시뮬레이션 해석

3.1 구조해석 결과

Fig. 4는 배수 타워의 구조해석 결과 중 등가응력 (Von-Mises stress)을 나타내었다. 응력은 붐에서 구멍이 많이 존재하는 링크 시스템이 존재하는 부위에서 크게 발생하였으며, 턱테이블의 바닥이 고정된 상태이므로 턱테이블에서 멀수록 응력이 작아지는 경향을 보였다. 이때 붐의 단면적에 따라 응력이 크기가 변화할 수 있기 때문에 상대적으로 단면적이 작은 3, 4번째 붐 사이의 링크 시스템에서 응력이 크게 관측되었다.

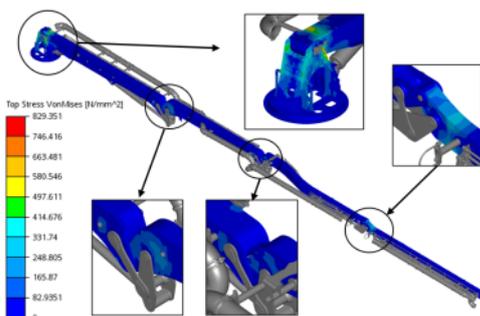


Fig. 4 Result of structural analysis (Von-Mises stress).

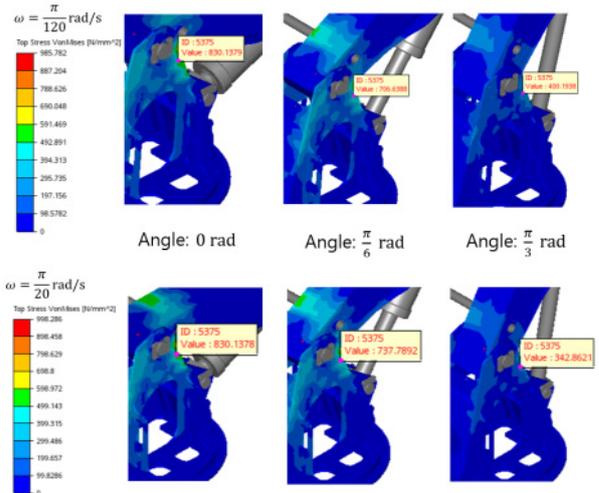


Fig. 5 Result of flexible body dynamic analysis (Von-Mises stress): (a) $\omega = \frac{\pi}{120} \text{ rad/s}$; (b) $\omega = \frac{\pi}{20} \text{ rad/s}$.

등가응력은 턱테이블에서 크게 관측되었고, 턱테이블과 첫 번째 붐 사이의 회전부 부근에서 약 830MPa의 최대값이 관측되었다. 이는 턱테이블이 모든 붐에서 발생하는 힘에 의한 모멘트를 받으면서 특히 회전부에서 응력집중이 발생하기 때문이다.

3.2 유연체 동해석 결과

동해석에서 배수 타워는 원래 위치에서 90도까지 상승하게 하였으며, 서로 다른 두 가지의 속도로 움직일 때의 결과를 확인하였다. Fig. 5에서 각도 변화에 따른 타워 최대 응력의 변화를 보여주며, Fig.5의 상단은 회전 속도가 $\frac{\pi}{120} \text{ rad/s}$ 일 때, 하단은 $\frac{\pi}{20} \text{ rad/s}$ 일 때이며, 0 rad , $\frac{\pi}{6} \text{ rad}(= 30\text{deg})$, $\frac{\pi}{3} \text{ rad}(= 60\text{deg})$ 일 때의 해석 결과를 나타낸다. 구조해석과 같이 최대 응력은 턱테이블에서 발생하면서 붐에서의 응력은 끝단에 가까워질수록 약해지는 경향성은 같지만, 붐의 위치가 올라갈수록 전체적인 응력의 크기는 작아지는 것을 확인하였다.

한 편, 붐의 상승 속도에 따라 응력의 변화 속도 또한 다른 것을 확인하였다. Fig. 5에 의하면 두 경우 처음 정지 상태에서 걸리는 최대 응력의 크기는 약 830MPa로 같지만, $\frac{\pi}{120} \text{ rad/s}$ 속도에서는 $\frac{\pi}{6} \text{ rad}$ 일 때 약 706MPa, $\frac{\pi}{3} \text{ rad}$ 일 때 약 400MPa였으며, $\frac{\pi}{20} \text{ rad/s}$ 속도에서는 각각 738, 342MPa로 측정되어

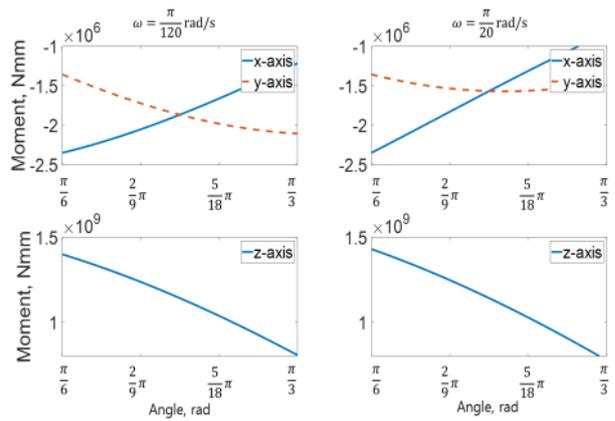
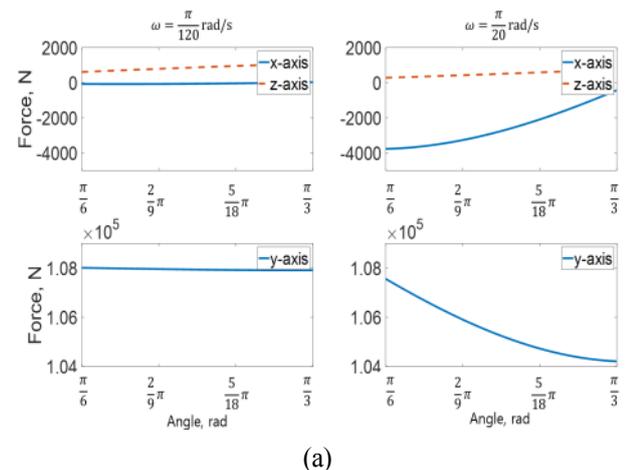
Table 2 Result of the flexible body dynamics simulation.

뿔 회전각도	뿔 회전 속도	
	$\frac{\pi}{120} \text{ rad/s}$	$\frac{\pi}{20} \text{ rad/s}$
	최대 등가응력 (MPa)	
0	830	830
$\frac{\pi}{6} \text{ rad}$	706	738
$\frac{\pi}{3} \text{ rad}$	400	342

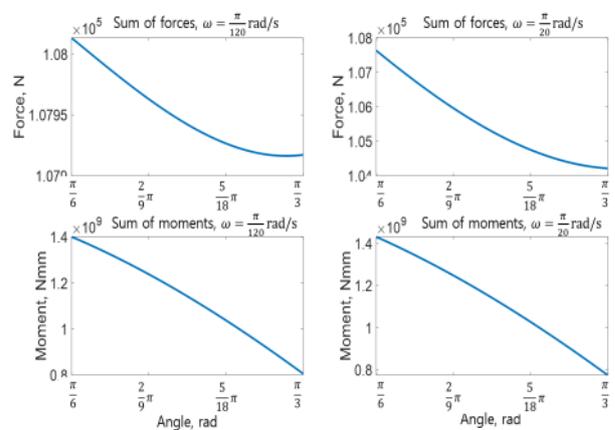
회전 속도가 빠를 때 응력의 변화 또한 더 빨라지는 것을 확인할 수 있었다. Table 2에서 유연체 동해석 결과를 요약하였다.

3.3 강체 동해석 결과

3.2절의 동해석에서 뿔의 회전 속도에 따라 응력의 변화가 변하는 것을 확인하였다. 응력 변화의 원인을 찾기 위해 배수 타워의 모든 부품을 강체로 정의하였고, 첫 번째 뿔과 턴테이블 사이의 회전 구속조건이 정의된 회전부에서 힘과 모멘트의 크기를 분석하였다. Fig. 6은 턴테이블의 첫 번째 뿔 회전부에서 힘과 모멘트가 뿔이 $\frac{\pi}{6} \text{ rad}$ 에서 $\frac{\pi}{3} \text{ rad}$ 로 회전하는 동안 걸리는 값을 그래프로 표현하였으며, Fig. 6의 (a)는 힘, (b)는 모멘트, (c)는 x, y, z축에 대한 힘과 모멘트의 합을 비교하였다. Fig. 6에 따르면 턴테이블의 회전부에서 걸리는 힘과 모멘트는 회전 속도가 더 빠른 $\frac{\pi}{20} \text{ rad/s}$ 일 때 변화량이 더 큰 것을 알 수 있다. 특히 모멘트를 비교하면 모멘트의 크기에 따라 굽힘 응력이 발생하여 그 크기만큼 회전부 부근에서 걸리는 응력이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다.



(b)



(c)

Fig. 6 Result of rigid body dynamic analysis about the revolte joint of the turn table: (a) Forces; (b) Moments; (c) Sum of forces and moments.

4. 이론적 분석

배수 타워 시뮬레이션 해석에서 확인한 뿔의 회전 각도와 속도에 따른 응력 차이의 원인을 분석하기 위해 Fig. 7과 같이 수학적 모델링을 하였다. Fig. 7은 턴테이블 및 뿔이 하중을 받을 때 생기는 응력을 설명하며, m_n 은 n번째 뿔의 질량, m_r 는 뿔과 턴테이블 이외의 배수 파이프, 오일 파이프 등의 질량, m_p 는 배수펌프의 질량, g 는 중력가속도, L 은 전체 뿔의 길이, θ 는 뿔의 회전 각도이다. 이론적 해석 시 본 시스템의 형상은 복잡한 형태로 되어있어 수학적 모델링을 계산하여 분석하는 것이 아닌 각 응력이 턴테이블에 끼치는 영향에 대해 분석하는 것을 목적으로 진행되었다.

뿔이 회전한 상태에서 모두 고정되어 있다고 가정

하면 회전부에 작용하는 모멘트의 크기는 식 (1) 과 같다.¹⁷⁾

$$M = \left(\frac{1}{2} W_1 + W_2\right) L \cos \theta \quad (1)$$

회전부에 작용하는 굽힘 응력의 크기는 식 (2) 와 같다.

$$\sigma_1 = \frac{Mc}{I} = \frac{c}{I} \left(\frac{1}{2} W_1 + W_2\right) L \cos \theta \quad (2)$$

회전 속도를 ω , 회전 시간을 t 로 두면 식 (3) 으로 굽힘 응력이 표현된다.

$$\sigma_1 = \frac{c}{I} \left(\frac{1}{2} W_1 + W_2\right) L \cos \omega t \quad (3)$$

한편 붐이 회전하면서 원심력에 의한 응력 또한 발생하게 되는데, 배수펌프의 질량만을 고려하면 배수펌프에서 발생하는 원심력은 식 (4) 와 같다.

$$F_c = L m_p \omega^2 \quad (4)$$

단순히 원심력에 의해 붐이 인장응력을 받는다고 하면 인장응력은 식 (5) 와 같이 표현된다.

$$\sigma_2 = \frac{L^2 m_p \omega^2}{EA} \quad (5)$$

또한 붐과 배수펌프의 무게에 의해 턴테이블에서 압축 응력 σ_3 을 받는다. 턴테이블과 붐의 형상은 수학적 모델링과 달리 복잡하지만 크게 Fig. 7과 같은 방향으로 세 응력을 받게 된다. 결론적으로 서로 다른 회전 속도에 대해서 같은 붐 회전 각도에서 발생하는 응력 중 굽힘 응력과 압축 응력인 σ_1, σ_3 은 회전 각에 대해서 영향을 받기 때문에 속도가 달라도 회전 각이 같으면 차이가 없지만, 원심력에 의한 인장응력인 σ_2 는 회전 속도에 영향을 받아서 차이가 발생하게 된다. 즉, 원심력에 의한 응력은 다른 응력과 방향성이 다르고 속도가 증가하면서 응력이 상승하기 때문에 Fig. 5와 같은 차이가 발생하게 된다. 또한 붐의 각도가 $\frac{\pi}{6} \text{ rad}$ 일 때 회전속도 $\frac{\pi}{20} \text{ rad/s}$ 보다 3배 빠른 속도로 회전 시 회전부에서 걸리는 x축 방향의 힘은 최대 35,000N까지 상승하는 것을 확인하였으며, 타워 각도 $\frac{\pi}{6} \text{ rad}$ 에서의 최대 하중이 $\frac{\pi}{120} \text{ rad/s}$ 에서 약 500N, $\frac{\pi}{20} \text{ rad/s}$ 에서 약 4,000N

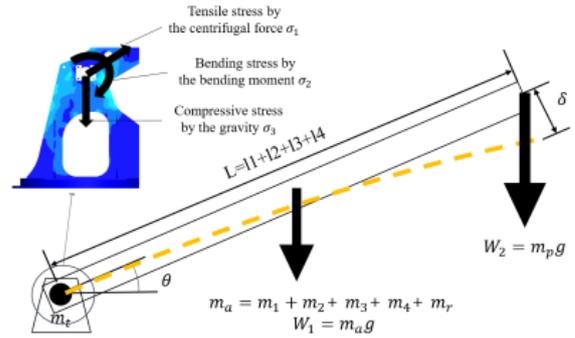


Fig. 7 Rough mathematical model of the drainage tower.

만큼 걸린 것을 비교하면 식 (4)와 같이 회전 속도 제곱에 비례한 원심력이 턴테이블 회전부에 걸리는 응력을 변화시키는 것을 확인할 수 있다. 실제 배수 타워는 위의 경우처럼 매우 빠르게 회전하도록 설계 되지 않지만, 해석 결과는 원심력이 응력을 발생시킴을 보여주어 배수 타워 및 펌프 무게가 가벼워지면 회전 속도가 빨라지면 원심력에 의한 응력이 다른 응력 요소보다 더 큰 영향을 미치게 될 것임을 알 수 있다.

5. 최적화 해석

부가적으로 구조해석 결과를 바탕으로 ANSYS Mechanical에서 위상 최적화를 진행하였다. 위상 최적화는 물체 미소 영역의 밀도를 설계 변수로 두어 목적 함수의 최소화에 도달할 수 있도록 진행된다¹⁸⁾. 턴테이블의 허용응력은 900MPa로 해석에서 측정된 최대 등가응력 830MPa와 크기가 비슷하여 원래 허용응력의 값을 구속조건으로 두면 의미가 없으므로 약 1,100MPa로 허용응력을 설정하여 질량을 설계 변수로 최적화를 진행하였다. 일반적인 구조강보다 더 큰 1,100MPa는 매우 큰 허용응력으로, 열처리가 된 탄소강, 합금강 등이 이와 같은 높은 허용응력을 가진다. Table 3에서 상기한 위상 최적화의 해석 조건을 정리하였으며, Fig. 8은 Table 3의 조건으로 위상 최적화가 된 턴테이블의 형상을 나타내었다. 이때 첫 번째 형상은 위상 최적화가 진행되기 전의 형상이며, 두 번째는 최적화 해석에서 제안한 형상, 마지막 형상은 제안한 형상을 가공할 수 있도록 재설계한 형상이다. 먼저 원래 상태의 모델에서 상기 조건으로 위상 최적화 진행 시 ANSYS Mechanical은 두 번째 형상과 같이 회전부 부근에서 질량 감소화는 최소화 하면서, 바닥의 불필요한 면적을 줄이면서 중앙부의

양옆 회전부를 연결하는 부위 또한 최소화하였다. 실제 제작을 고려하여 재설계한 턴테이블의 형상은 Fig. 8의 세 번째 형상이다. 최적화의 목적은 가공이 가능한 최소 질량의 형상을 얻는 것이 목적이므로, 주조로 제작한 턴테이블 부품이 새로 가공이 될 수 있도록 구멍을 만들거나 불필요한 부위를 제거하는 식으로 세 번째 형상을 도출하였다. Fig. 9는 재설계한 턴테이블과 원래 턴테이블의 응력 및 최대 변형량을 보여준다. Fig. 9의 (a), (c)는 원래 모델의 등가응력과

최대 변형량을 보여주며, Fig. 9의 (b), (d)는 최적화 모델의 등가응력과 최대 변형량을 보여준다. Fig. 9와 같이 최적화된 턴테이블은 원래 질량 약 1,500kg에서 27% 감량되어 약 1,050kg으로 감소하였고 허용응력인 약 1,100MPa를 초과하지 않았다. 원래 모델과 비교하면 최대 등가응력은 830MPa에서 1,100MPa까지 증가하였고 최대 변형량은 약 1.6mm에서 3mm로 증가하였지만, 설계 단계에서 설정한 허용응력 한도를 초과하지 않았기 때문에 위상 최적화가 잘 이루어졌다.

Table 3 Analysis condition of topology optimization.

최적화 대상 모델	턴 테이블
목적 함수	Compliance
설계 변수	질량
구속 조건	최대 허용응력 (1,100MPa)

6. 결론

본 연구는 배수가 잘 이루어지지 않는 침수 지역에서 사용되는 배수 타워의 동적 특성을 분석하는 것을 목적으로 하였다. 다물체 동역학 시뮬레이션을 통해 연구를 진행하였으며, 실제 설계된 배수 타워의 형상을 이용하여 해석을 진행하였다. 해석 결과 붐의 무게와 끝단의 배수펌프 무게에 의한 굽힘 응력을 가장 크게 받는 턴테이블에서 응력이 가장 크게 발생하였으며, 붐의 각도가 커질수록 최대 응력 또한 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 응력 발생 요인은 굽힘 응력, 무게에 의한 압축 응력, 회전 원심력에 의한 인장응력에 의해 발생하는데, 붐의 각도가 증가할수록 굽힘 응력에 의한 영향이 적어져 최대 응력이 감소하는 경향을 보였지만, 회전 속도에 따른 원심력 차이에 의해 회전 속도에 따라 최대 응력의 변화가 달라졌다. 붐의 각도가 변할 시 원심력에 의한 응력 방향과 턴테이블에서 발생하는 응력 방향과의 차이가 발생하여 붐의 회전 속도가 증가할 때 작은 각도에서는 원심력이 턴테이블의 최대 등가응력을 증가시키는 반면 큰 각도에서는 원심력이 턴테이블의 최대 등가응력을 감소시키게 되었다. 결론적으로 본 연구에서 크레인 타워와 같은 건설기계는 느린 회전 속도로 설계되어 원심력에 의한 응력 발생에 대해 안전할 수 있지만 빠른 회전 속도로 설계되면 원심력에 의한 응력이 더 커져 이 응력이 구조해석에서의 최대 응력을 더 크게 만들 수 있음을 알 수 있다.

그러므로 건설기계 크레인 타워와 같이 붐 끝단에 물품을 설치하여 타워 회전을 통해 이송하는 경우 물품 하중에 의한 굽힘 모멘트만을 고려하는 것이 아닌 회전에 의한 원심력에 의한 응력 또한 고려해야 하며, 회전체에 대한 안정성 분석 시 회전 속도가 느리더라도 회전에 대한 응력을 고려하면 최대

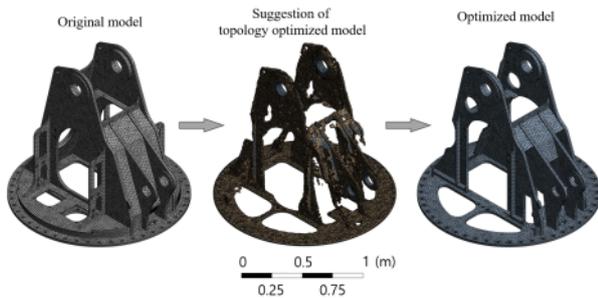


Fig. 8 Model changes by topology optimization.

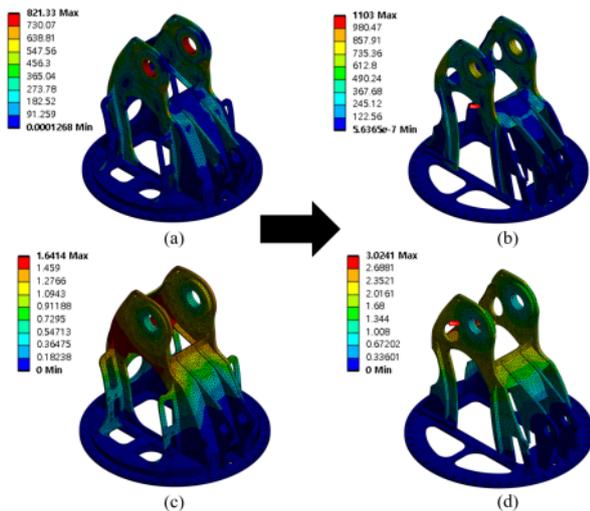


Fig. 9 Simulation results of original and optimized models: (a) equivalent stress of the original model; (b) equivalent stress of the optimized model; (c) total deformation of the original model; (d) total deformation of the optimized model.

회전 속도 제한을 설정할 수 있게 되는 등 더 정확한 안정성 분석이 진행될 수 있다. 또한 본 연구에 설명한 최적화 연구는 터테이블 경량화 시 회전부에서 작용하는 복합적인 하중에 의한 응력이 전부 고려되어 진행될 수 있음을 보여준다. 최적화를 위해 탄소강과 같은 강성이 더 큰 재료를 이용하여 경량화가 이루어질 수 있어 제품 설계 시 재료에 의한 비용 절감과 부피 감소를 통한 공간 확보 등 최적화를 통한 이점을 활용하기 위해 해석이 기반되어 설계되어야 함을 보여준다.

본 연구를 통해 차량에 설치되어 운용되는 배수 타워의 동적 특성을 분석하면서 배수 타워를 지지하는 터테이블에 대한 강제 동해석을 통한 응력 분석을 하였다. 비록 타워 붐이 회전하면서 터테이블에 시간에 따른 응력 변화가 발생하지만 이를 강제 해석을 통해 응력을 분석하여 정적해석으로 분석할 수 있음을 보여주었고, 이를 통해 위상 최적화가 이루어져 질량 저감이 이루어질 수 있음을 알 수 있었다. 탄소강과 같이 최대 허용응력이 1,100MPa 가량으로 큰 재료로 터테이블이 제작되면 약 27%의 질량 최적화가 이루어질 수 있고 질량 저감이 이루어져도 본 시스템의 작동 조건에서 최대 허용응력을 초과하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 마지막으로 타워의 회전 운동은 로터 등 다른 회전체와 같이 회전 속도에 의한 원심력을 발생시키며 회전 속도가 너무 빠를 시 원심력에 의한 응력이 회전부에 심각한 응력을 발생시킴을 알 수 있었고, 건설기계 설계 시 하중에 의한 응력뿐만 아니라 회전 운동 등에 의해 발생하는 응력 또한 고려해야 함을 보여주었으며, 배수 타워와 같은 크레인과 같은 구조물 해석 시 구조해석뿐만이 아닌 동해석 또한 병행되어 안전 설계가 진행되어야 함을 보여주었다.

본 연구는 기존 연구에서 고려하지 않은 회전운동이 타워 응력에 미치는 영향에 대해 고찰하였으며 수학적으로 여러 요소에서 발생하는 응력의 방향이 서로 달라 회전 속도에 따라 최대 응력의 크기가 변화하는 것을 확인하였다. 한계점으로 타워의 안전성을 고려한 최대 안전 회전 속도 등 회전 속도에 대한 안전성 평가가 진행되지 않았으며, 타워 등 회전체가 운동할 시 안전율을 고려한 최대 안전 속도를 이론 및 해석적으로 도출하여 향후 연구에는 타워의 자세와 속도에 따른 하중과 응력의 변화뿐만 아니라 자세 및 회전 속도에 대한 안전율을 고려한 안전성 분석을 진행하여 보완하고자 한다.

후 기

이 논문은 행정안전부 자연재난 정책연계형 기술개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2023-MOIS35-005)

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) JUNJIN CO., LTD, "Product Selection", 2021, "https://www.junjin.com/kr/product/product_list.php"
- 2) Zendejboudi, Sohrab, et al. "Dimensional analysis and scale-up of immiscible two-phase flow displacement in fractured porous media under controlled gravity drainage." *Energy & Fuels* 25.4 (2011): 1731-1750.
- 3) Ali, A., et al. "Investigation of energy performance, internal flow and noise characteristics of miniature drainage pump under water-air multiphase flow: Design and part load conditions." *International Journal of Environmental Science and Technology* 19.8 (2022): 7661-7678.
- 4) Si, Qiaorui, et al. "Experimental and numerical study on gas-liquid two-phase flow behavior and flow induced noise characteristics of radial blade pumps." *Processes* 7.12 (2019): 920.
- 5) Gu, Pengtai, et al. "Transient flow field and performance analysis of a claw pump for FCVs." *International Journal of Hydrogen Energy* 46.1 (2021): 984-997.
- 6) Lee, I. Y., and S. R. Choi. "Discharge Flow Characteristics of A Rotating-Cam and Fixed-Cylinder Type Radial Piston Pump." *Transactions of The Korea Fluid Power Systems Society* 8.1 (2011): 10-18.
- 7) Kim, S. H., H. M. Son, and J. C. Lee. "Characteristics of two dimensional flow in an involute gear pump." *Transactions of The Korea Fluid Power Systems Society* 8.2 (2011): 36-41.
- 8) Ko, Seong-Hoon, Kwang-Hee Lee, and Chul-Hee Lee. "Safety Verification of Gantry Cranes using

- Hydraulic Cylinders." *Journal of Drive and Control* 16.2 (2019): 8-14.
- 9) Ju, Feng, and Yoo Sang Choo. "Dynamic analysis of tower cranes." *Journal of engineering mechanics* 131.1 (2005): 88-96.
 - 10) Jiang, Weiguang, Lieyun Ding, and Cheng Zhou. "Digital twin: Stability analysis for tower crane hoisting safety with a scale model." *Automation in Construction* 138 (2022): 104257.
 - 11) Karpe, Ajinkya, et al. "Validation of the use of FEM (Ansys) for Structural Analysis of Tower Crane Jib and Static and Dynamic Analysis of Tower Crane Jib Using Ansys." *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering* 1.4 (2014): 69-75.
 - 12) Choi, Yo Han, Il Hoon Yoo, and Chul-Hee Lee. "Thermal Flow Analysis of an Engine Room using a Porous Media Model for Imitating Flow Rate Reduction at Outlet of Industrial Machines." *Journal of Drive and Control* 19.1 (2022): 62-68.
 - 13) Won, Jonggeun, et al. "Simulation Analysis on Static Safety of 55Hp-Servo-Based Hydrostatic Transmission." *Journal of Drive and Control* 19.1 (2022): 34-42.
 - 14) Choi, Seong Woong, et al. "A Study on Simscape based 6DOF Field Robot Simulation Model." *Journal of Drive and Control* 19.2 (2022): 1-10.
 - 15) Kim, S. H., S. J. Yoo, and K. I. Lee. "Geometric Modeling and Trajectory Control Design for an Excavator Mechanism." *Transactions of The Korea Fluid Power Systems Society* 4.2 (2007): 1-6.
 - 16) Park, Seung Woon, Yo Han Choi, and Chul-Hee Lee. "Review of Regulation for Rollover Test and Evaluation of Safety for Buses by using Simulation of Multi-body Dynamics." *Journal of Drive and Control* 19.3 (2022): 39-46.
 - 17) Lalik, Krzysztof, et al. "Integrated stress measurement system in tower crane mast." *Measurement* 102 (2017): 47-56.
 - 18) Rozvany, George IN. "A critical review of established methods of structural topology optimization." *Structural and multidisciplinary optimization* 37 (2009): 217-237.