

## 시추용 육상 드릴링 시스템의 셰일 셰이커 구조 및 진동해석

### Structural and Vibration Analysis of On-shore Drilling System Consisting of Shale Shaker

반임준<sup>1</sup>, 임채옥<sup>1</sup>, 신성철<sup>1\*</sup>

Im-jun Ban<sup>1</sup>, Chae-og Lim<sup>1</sup>, Sung-chul Shin<sup>1\*</sup>

#### 〈Abstract〉

Shale shaker which is one of the mud circulation systems is composed of a basket, a vibrator and a screen. Its purpose of a shale shaker is to induce drilling fluid to flow through a screen, transport solids across a screen surface, and discharge solids off the end of the screen. The new shale shaker for the on-shore drilling system is designed to be smaller than the original shale shaker which has the same capacity with the new one to enable to transport and to operate on the trailer. In this study, structural and vibrational analysis of shale shaker was carried out to evaluate the appropriateness of the design in terms of the structural stability.

*Keywords : Shale shaker, On-shore drilling system, Structural analysis, Modal analysis, Harmonic analysis, Mud treatment system*

---

<sup>1\*</sup> 정회원, 교신저자, 부산대학교 조선해양공학과, 교수  
E-mail:scshin@pusan.ac.kr



<sup>1\*</sup> Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

## 1. 서론

육상에서 시추작업을 진행할 때, 많은 시추와 이수순환 장비들이 설치 및 운반되며, 이로 인해 많은 부대비용과 시간이 소요된다. 본 연구의 셰일 셰이커는 트레일러에 탑재되어 운송 및 운용이 가능하여 이로 인해, 비용과 시간을 절감할 수 있다. 시추작업을 진행할 때, 윤활유 작용과 과열된 장비의 냉각을 위해 머드가 사용된다[13]. 사용된 머드는 불필요한 입자들을 포함하게 되며, 이를 재사용하기 위해 여과시키는 장비가 필요하다. 육상 시추용 드릴링 시스템에서의 머드를 여과해주는 장비 중 하나인 셰일 셰이커는 가장 먼저 머드를 여과시키는 장비이며 바스켓, 진동기, 스크린으로 구성된다. 바스켓을 통해 유입되는 머드는 불필요한 입자들을 포함하고 있다. 머드는 가진원에 의해 진동하는 계단식 스크린을 통과하여 불순물이 제거된다.

본 연구에서는 Table. 1과 같이 셰일 셰이커가 제한된 크기의 컨테이너에 탑재되어 차량으로 운송 및 운용이 가능하도록 기존보다 축소 설계되었다.

Table 1. Transportation method of Shale shaker

Flat rack container type	Modularized equipment
	

셰일 셰이커 제작 및 시험에 앞서 범용 유한요소해석 도구인 ANSYS[15]를 이용하여 작동 시 발생하는 이수와 압력 하중들에 대한 구조적인 안정성 측면과 진동기 가진력에 의한 공진 발생가능

평가를 위해 진동해석을 수행하였으며, 해석결과를 바탕으로 컴팩트화된 셰일 셰이커 설계안의 적절성을 평가하였다.

## 2. 해석모델 및 경계조건

### 2.1 해석모델 및 격자생성

본 연구의 셰일 셰이커 모델은 트레일러에 탑재하여 운송 및 운용가능하게 축소 설계되었으며 주요치수는 Table 2에 표기하였다.

Table 2. Principal dimension of shale shaker

Model	Principal of dimensions (mm)			
	Length	Width	Height	Capacity (m <sup>3</sup> /h)
On shore shale shaker	2368	1725	1380	120

육상 시추용 드릴링 시스템의 셰일 셰이커 모델은 Solidworks[14]를 활용하여 모델링 하였다. 사용된 소재는 Table 3과 같이 SS400이며, Fig. 1과 같이 바스켓(Basket), 스크린(Screen), 진동기(Vibrator)로 구성되어 있다. 바스켓은 머드를 스크린으로 전달해주는 역할을 하며 스크린은 진동기로부터 가진을 받아 진동하며 이로 인해 머드에 포함된 70 μm 이상의 입자들이 제거된다.

Table 3. Properties of SS400 alloy

Specification	Value
Density	7.9
Young's modulus	215 GPa
Poisson's ratio	0.26
Tensile strength, yield	220 GPa

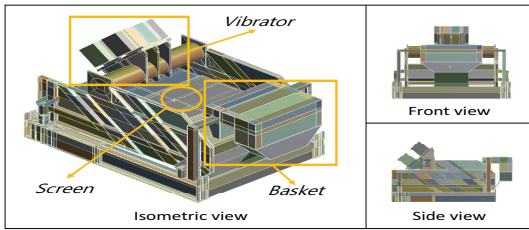


Fig. 1 Shale shaker model

스크린은 Fig. 2와 같이 3개로 구성되어 있으며 각각의 스크린은 층을 이룬 계단식으로 되어있다. 계단식으로 설치된 스크린이 수평으로 설치된 스크린보다 머드 속 불필요한 입자들이 스크린의 구멍을 막는 현상인 플라깅을 방지하는 장점을 가지고 있다[1].

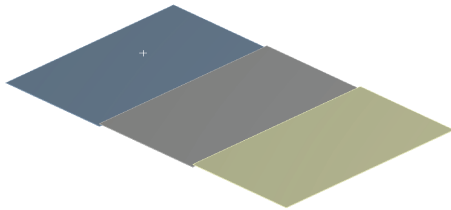


Fig. 2 Screen of shale shaker

셰일 셰이커의 작동방식은 Fig. 3, 4와 같이 바스켓의 후측 하부로부터 머드가 유입되고, 바스켓의 전방으로 전달된 후 스크린으로 떨어지게 된다. 스크린은 전동기의 가진으로 인해 진동하며 불필요한 입자들이 제거된다[2].

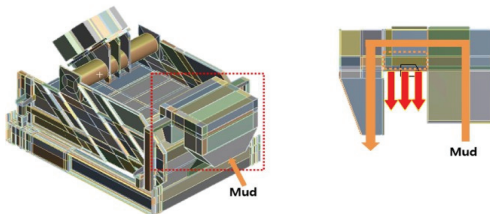


Fig. 3 Mud inflow process of basket in shale shaker

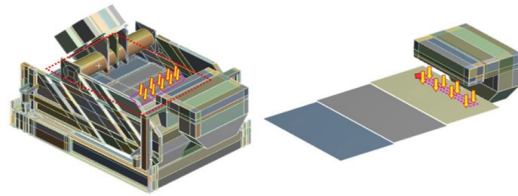


Fig. 4 Mud inflow process of screen in shale shaker

유한요소해석의 경우 연속체를 불연속적인 유한개의 요소로 분할하여 해석을 수행하는 방법이다. 요소의 수가 많을수록 실제 해와 유사해진다는 특징을 가지고 있으므로 ANSYS의 격자 수렴 기능을 활용함과 동시에 해석 시스템이 수행할 수 있는 능력을 검토하여 셰일 셰이커 해석에 적절한 격자 수를 결정하였다. Table 4는 해석 모델의 Node와 Element들의 수를 나타내고 있으며 Fig. 5는 셰일 셰이커의 격자 생성 결과이다[3].

Table 4. Consist of shale shaker mesh

On shore shale shaker	Nodes	Elements
	331,605	238,722

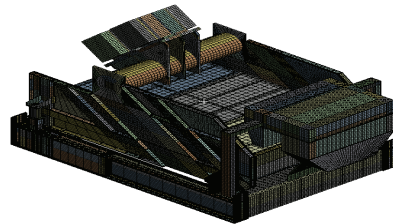


Fig. 5 Finite element model of shale shaker

## 2.2 하중 및 경계조건

Fig. 6, 7, 8, 9는 셰일 셰이커의 구조해석에 필요한 하중조건 및 경계조건을 나타낸다. 구조물

은 트레일러에 고정되어 운용되기 때문에 트레일러에 고정되어 설치되는 바닥면을 고정지지하여 Fig. 6과 같이 구속하였다. 하중조건을 경우 식 (1), (2)와 같이 바스켓과 각각의 스크린에 최대 머드하중을 적용하였다.

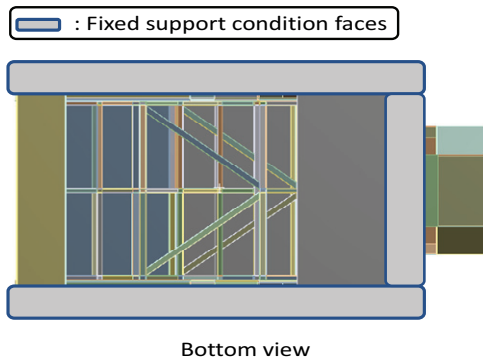


Fig. 6 Fixed support condition for analysis

식(1)은 바스켓에 적용된 하중의 식이며, 바닥면이 존재하여 바스켓에 머드가 쌓일 수 있는 부피는 Fig. 7과 같이 0.00362 m<sup>3</sup>이다.

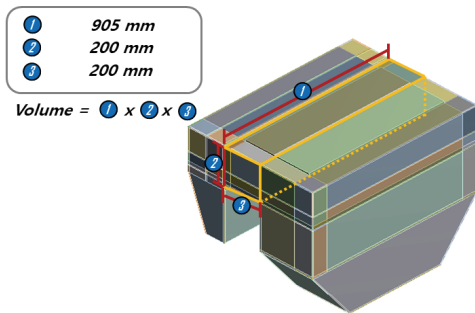


Fig. 7 Volume of load applied to basket

계산된 부피와 머드의 밀도 2,200 kg/m<sup>3</sup> 및 중력가속도 9.8 m/s<sup>2</sup>을 곱하여 하중의 총합이 78.047 N 만큼 등 분포 하중을 Fig. 8과 같이 적용하였다.

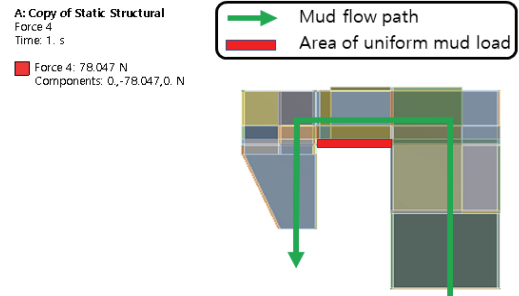


Fig. 8 Basket load condition for analysis

*Load(Basket)*

$$= 0.00362m^3 \times 2,200kg/m^3 \times 9.8m/s^2$$

$$\approx 78.047N$$

Where

(1)

*Volme of basket* : 0.00362m<sup>3</sup>

*Mud density* : 2,200kg/m<sup>3</sup>

*Gravitational acceleration* : 9.8m/s<sup>2</sup>

식(2)는 각 각의 스크린에 적용한 하중 식이며, 총 3개의 스크린이 계단식으로 구성되어 있다. 바스켓을 통해 유입된 머드는 스크린으로 떨어지게 되며, 스크린은 진동기로 인해 진동이 발생한다. 진동으로 인해 스크린의 머드와 이수들은 스크린 밑으로 떨어지며 70 μm 이상의 불필요한 입자들은 스크린의 끝으로 이동하여 떨어지게 된다. 전체 스크린의 부피는 Fig. 9와 같으며 스크린에 쌓

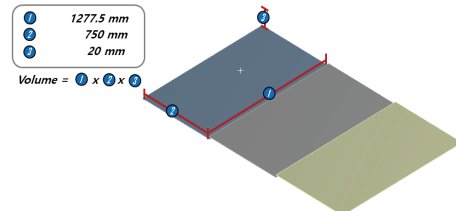


Fig. 9 Volume of load applied to screen

이는 머드의 높이의 경우 입자의 크기를 고려하여 20mm로 가정하였다.

스크린에 적용된 하중은 부피 0.01916 m<sup>3</sup>, 머드의 밀도 2,200 kg/m<sup>3</sup> 및 중력가속도 9.8 m/s<sup>2</sup>을 곱하여 413.25 N이다. 구조물의 안정성을 살펴보기 위해 발생 가능한 최대 하중 413.25 N을 등 분포 하중조건으로 Fig. 10과 같이 각 스크린마다 적용하였다.

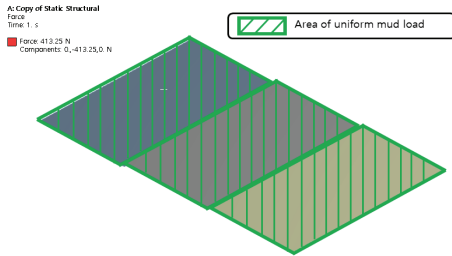


Fig. 10 Screen mud load condition for analysis

*Mud Load(Screen)*

$$= 0.01916m^3 \times 2,200kg/m^3 \times 9.8m/s^2 = 413.25N$$

Where (2)

*Volume of screen* : 0.01916m<sup>3</sup>

*Md density* : 2,200kg/m<sup>3</sup>

*Gravitational acceleration* : 9.8m/s<sup>2</sup>

세일 셰이커에 대한 진동해석은 Fig. 11과 같이 구조해석의 경계조건 결과와 진동기의 가진력을 이용하여 모드 형상을 추출하는 모드해석 (Modal analysis)을 수행한 후, 구조해석의 경계조건과 모드해석의 결과를 바탕으로 진동기에서의 고유벡터를 이용하여 모드 중첩법의 조화해석 (Mode superposition-Harmonic analysis)을 수행하였다[5].

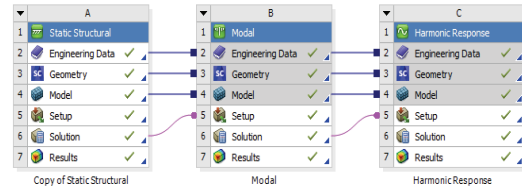


Fig. 11 Vibrational analysis process

세일 셰이커에 사용된 진동기는 Table 5에 표기하였으며, 모델명은 HSRV-224, 가진력은 4,500 kgf이다. 진동수는 30 Hz로 작동되며, 세일 셰이커의 상단에 2개가 설치된다[6]. 운용 시 각각의 진동기가 반대로 작동하여 스크린에 가진력을 제공한다. 스크린의 진동으로 인해 머드가 스크린을 통과하며 물과 70 μm 이하의 입자들은 스크린의 메쉬 아래로 떨어지고, 그 보다 큰 입자들은 스크린의 끝쪽으로 이동하여 앞으로 떨어지는 과정을 통해 제거된다.

Table 5. Specification of vibrator

Type	Frequency	Vibrating force
HSRV-224	30 Hz	4,500 kgf

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 세일 셰이커의 구조해석 결과

구조해석 결과를 이용하여 안전율과 SLS (Service limit state - '사용한계상태')를 이용하여 구조적 안정성을 확인하였다[12]. 사용한계상태는 구조물의 한계 상태 설계법에 의거하여 설계하는 경우 검토하는 한계 상태의 한 구분이며, 구조물 또는 부재가 과도한 변형을 일으켜 정상적인 사용을 할 수 없어지는 상태의 기준이다. 사용한계상태 검증

은 식(3)와 같이 적용하였다[6].

구조해석 결과 검토(SLS)

$$= B(mm) / 200 = \delta_{allow}$$

Where (3)

$B = width$

$\delta_{allow} = allowable\ deformation$

Fig. 12는 경계조건과 하중에 대한 전체모델의 변위량 결과이다. 최대 변위는 0.0698 mm로 바스켓에서 나타났다. 변위가 일어난 부품들에 대해서 구조적인 안정성 검증을 위해 사용한계상태를 사용하였다. Fig. 13~Fig. 16은 변위량과 부품의 폭에 대한 허용 변위량을 나타내었으며 허용 변위량 대비 실제 일어난 변위량을 퍼센트로 나타내었다.

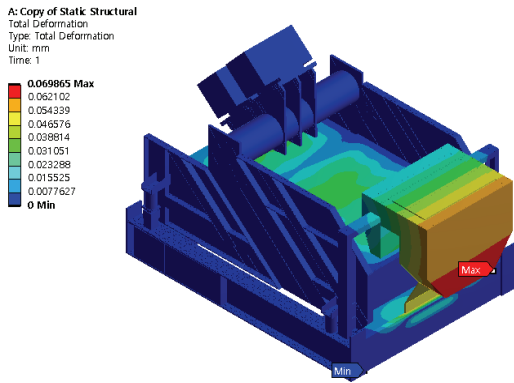


Fig. 12 Deformation result of shale shaker

Fig. 13은 하중에 대한 바스켓의 변화량이며 식 (4)는 바스켓의 폭 길이 500 mm를 이용하여 사용한계상태를 산출한 것이다. 최대 변위량은 0.0698 mm로 허용 변위량의 2.5 mm의 2.7 %로 작은 변위가 일어났다.

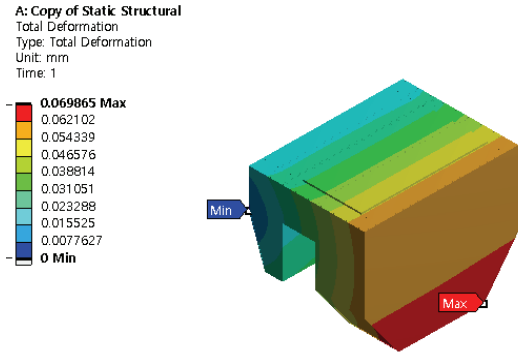


Fig. 13 Deformation result of basket

$$\delta_{allow} = (500mm/200) = 2.5mm > 0.0698mm (2.7%) \quad (4)$$

Fig. 14는 하중에 대한 바스켓 프레임의 변화량이며 식 (5)는 바스켓 프레임의 폭 중 가장 짧은 길이 345 mm를 이용하여 사용한계상태를 산출한 것이다. 최대 변위량은 0.0235 mm로 허용 변위량의 1.7 mm의 1.3 %로 작은 변위가 일어났다.

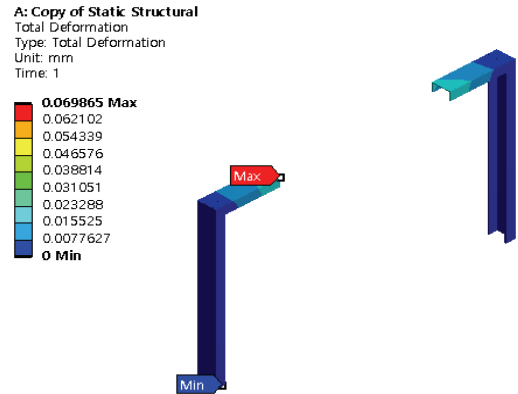


Fig. 14 Deformation result of basket frame

$$\delta_{allow} = (345mm/200) = 1.7mm > 0.0235mm (1.3%) \quad (5)$$

Fig. 15는 하중에 대한 스크린의 변화량이며 식 (6)은 스크린의 폭 길이 700 mm를 이용하여 사

용한계상태를 산출한 것이다. 최대 변위량은 0.0353 mm로 허용 변위량의 3.5 mm의 1.0 %로 작은 변위가 일어났다.

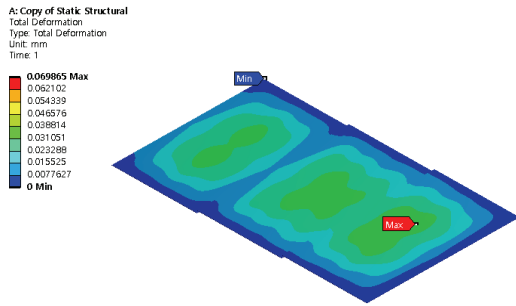


Fig. 15 Deformation result of screen

$$\delta_{allow} = (700mm/200) = 3.5mm > 0.0353mm (1.0\%) \quad (6)$$

Fig. 16은 하중에 대한 스크린 프레임의 변화량이며 식 (7)은 스크린 프레임의 폭 길이 585 mm를 이용하여 사용한계상태를 검증한 것이다. 최대 변위량은 0.0313 mm로 허용변위량의 2.9 mm의 1.0 %로 작은 변위가 일어났다.

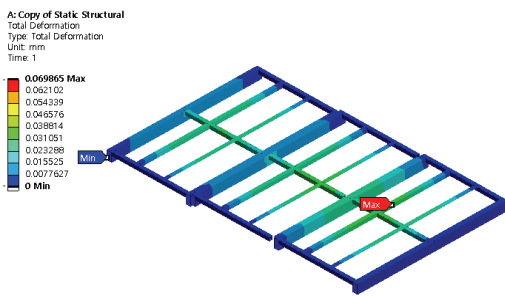


Fig. 16 Deformation result of screen frame

$$\delta_{allow} = (585mm/200) = 2.9mm > 0.0313mm (1.0\%) \quad (7)$$

Fig. 13~16와 식 (4)~(7)을 통해 각 부품에 대한 변위량과 사용한계상태 검증을 하였다. 사용

한계상태 검증에서의 기준이 되는 폭은 가장 짧은 길이를 선택하였다. 바스켓(Basket)에서 최대 변위가 일어났으며, 변위가 발생한 모든 부품들은 허용 변위량에 크게 못 미치는 수준이므로 안정하다고 판단하였다.

Fig. 17은 경계조건과 하중에 대한 셰일 셰이커의 등가 응력 결과이다. 셰일 셰이커에서 나타난 최대 등가 응력은 14.919 MPa이며, 측면 구조물과 하부 구조물을 연결시켜 주는 부재에서 발생하였다. 이는 재료인 SS400의 항복 강도 220 MPa 보다 낮은 결과이다. 또한, Table 6에서 최대 변형과 최대 응력 결과값을 이용하여 안전율(Safety factor)을 계산한 결과 목표 안전율인 1.5보다 큰 14.75로 하중에 대해 구조적으로 안정하다고 판단하였다[7].

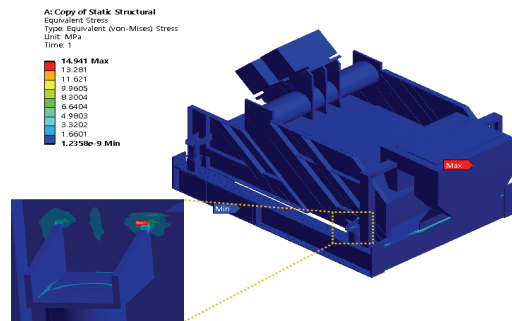


Fig. 17 Equivalent stress result of shale shaker

Table 6. Results of static structural analysis

Maximum deformation (mm)	Maximum stress (MPa)	Safety factor
0.0698	14.919	14.75

### 3.2 셰일 셰이커의 진동해석 결과

진동해석에서는 모드해석과 조화해석을 수행하였다. 모드해석을 통해 모드 형상을 확인할 수 있



는데 자연계에서 구조물이 변형할 수 있는 확률이 가장 높은 쪽부터 1차, 2차 ... N차 순으로 나오며 각 차수에 따른 구조물의 고유 진동수가 표시된다[8]. 본 연구에서는 주파수 영역을 가진 주파수 0 Hz에서 35 Hz까지 설정하였다. 모드해석을 수행한 결과 구조물의 1차부터 26차까지 총 26가지 모드형상을 도출 할 수 있었으며 모드 차수에 대한 고유진동수는 Table 7과 같다.

Table 7. Results of modal analysis

Mode	Natural frequency (Hz)
1	3.984
2	4.950
3	6.580
4	9.258
5	11.276
6	12.109
7	12.451
8	12.881
9	13.441
10	15.048
11	16.525
12	17.641
13	18.039
14	18.122
15	21.436
16	23.776
17	24.789
18	25.743
19	26.561
20	28.088
21	29.660
22	30.527
23	30.727
24	30.781
25	32.273
26	34.528

세일 셰이커에 설치된 진동기의 가진 진동수인 30 Hz와 가장 유사한 고유모드 차수는 Table. 6과 같이 21차 모드에서 29.66 Hz로 가장 근접하게 나타났으며, 21차 모드에 대한 형상은 Fig. 18과 같다. 최대 변위는 4.473 mm로 바스켓(Basket)에서 최대 변위가 나타났다. 공진은 1~3차 모드까지 자연계에서 흔히 발생하며 필요시 최대 10차 모드까지 고려하기도 한다. 21차 모드는 매우 고차모드 이므로, 공진이 일어날 가능성이 매우 낮은 것으로 판단했다[9].

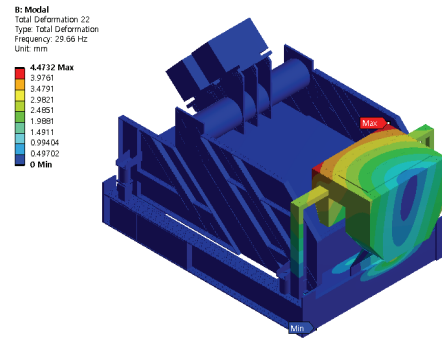


Fig. 18 21<sup>st</sup> Mode shape result of shale shaker

세일 셰이커의 가진에 대한 공진 발생 가능성을 살펴보기 위해 Fig. 19와 같이 진동기에 1 N의 가진력을 진동방향에 대해 부여한 후, 조화해석을 수행하였다[10].

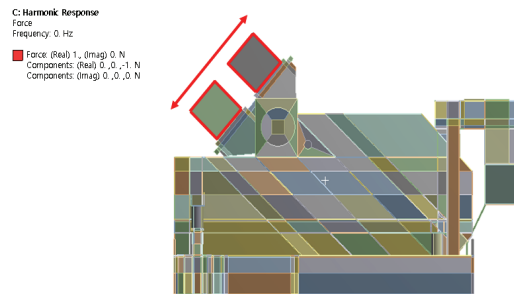


Fig. 19 Vibratory force of shale shaker



주파수 범위는 진동기의 주파수의 1.5배인 0 Hz에서 45 Hz까지 설정하였다. 조화 가진력에 대한 응답으로 Fig. 20과 같이 36 Hz에서 가장 큰 진폭이 발생하였으며 Fig. 21은 36 Hz에서의 주파수 응답에 대한 모델의 변위이다.

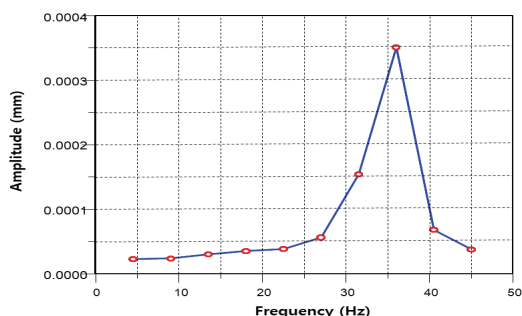


Fig. 20 Frequency response of shale shaker

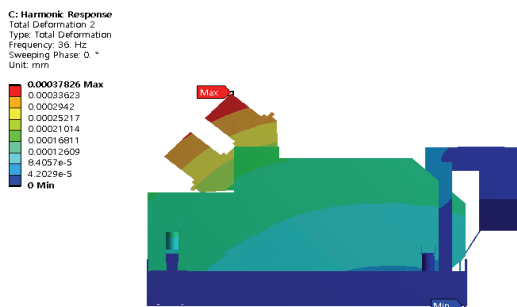


Fig. 21 Harmonic response result of shale shaker

조화해석 결과 36 Hz에서 가장 큰 진폭을 보였으며, 진동기의 주파수인 30 Hz와 20%의 차이를 확인하였다. 이를 통해, 진동에 의한 공진을 회피할 수 있는 설계가 되었다고 판단하였다[11].

#### 4. 결론 및 향후 계획

본 연구는 개발 중인 시추용 육상 드릴링 시

스템의 셰일 셰이커의 구조적 안정성 및 공진회피 설계의 적절성을 평가하기 위하여 수행되었다. 또한, 설치되는 진동기가 작동할 때 발생하는 진동에 의한 구조물의 주파수 응답을 확인하였다.

셰일 셰이커에 활용할 수 있는 최대 머드 하중이 작용할 때 최대 변위는 바스켓에서 나타났으며, 변위는 0.0698 mm이다. 최대 응력은 14.919 MPa로 나타났다. SS400의 항복 응력과 대응하여 자체 기준 안전율인 1.5보다 높은 14.75를 나타냄으로, 구조적으로 안정하다고 판단하였다.

진동기에서 발생하는 30 Hz의 진동에 대해 모드형상 해석 결과는 21차로 발생 가능성이 작은 고차모드에서 형성되었을 뿐만 아니라 작은 변위를 나타내었다. 또한, 조화해석의 결과로 36 Hz에서 가장 큰 주파수 응답의 결과가 나왔으며, 가장 큰 변위를 나타내었다. 진동기의 주파수와 20%의 차이를 보여 진동에 의한 공진 회피를 확인하였다.

향후 연구에서는 육상 시추용 드릴링 시스템에서의 디샌더(Desander), 디실터(Desilter), 디가서(Degasser), 머드클리너(Mud cleaner)의 통합 시스템에 대한 구조 및 진동해석을 수행할 계획이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2020년도 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원 (20IFIP-B133625-04, 이수 혼합 및 처리시스템 구조 안정성 평가) 과 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국 산업기술평가관리원 산업핵심기술개발사업(20000252)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## 참고문헌

- [1] American Assoc. of Drilling Engineers, "Shale shaker and Drilling Fluids Systems," Elsevier (1999).
- [2] Du. C.L, H.X. Jiang, S.Y. Liu, "Research on variable linear vibration screen with flexible screen face of separator for coal and gangue underground," Journal of China Coal Society, 38, pp. 493-497, (2013).
- [3] J. Y. Kim, "ANSYS 18.0 MECHANICAL. SIGMA PRESS," (2017)
- [4] L. L. Zhao, C. S. Liu, J. X. Yan, X. W. Jiang, Y. Zhang, "Numerical simulation of particles flow on the vibrating screen plate using a 3D discrete element method," Journal of China Mining Technology, 39, pp. 414-419.
- [5] Leonard Meirovitch., "Analytical Methods in Vibrations. Prentice Hall," (1997)
- [6] J. K. Paik, & A. K. Thayamballi, "Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures," (2003).
- [7] J. S. Ha, & G. M. Lee, "A Study on Structure and Vibration Analysis of an Air Suspension Seat," Journal of the Korean Society of Manufacturing Progress Engineers, 16(6), pp. 47-54, (2017)..
- [8] H. C. Dong, Y. Liu, L. Zhao, "Influence of vibration mode on the screening process," Journal of Mining Science Technology, 23, pp. 95-98.
- [9] K. S. Lee, M. C. Gu, "Study on Vibration Analysis of Rising Sector gate using Finite Elementary Method and Prototype Test," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 67-68 (2015).
- [10] L. L. Hoberock, "A study of vibratory screening of drilling fluids," Journal of Petroleum Technology, 32, pp. 1889-1902 (1980).
- [11] J. M. Lee, H. T. Yu., G. J. Park, H. C. Choi, B. K. Choi, "Design for Resonance Avoidance of Mount Through the Modal Analysis," Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 25(7), pp. 481-486 (2015).
- [12] K. D. Kim, "한계상태를 고려한 구조물의 최적화에 관한 연구," 한국산업융합학회 논문집 7.2, pp. 181-186 (2004).
- [13] J. D. Hwang, H. K. Ku, "육상 시추용 머드탱크의 교반성능에 대한 수치해석적 연구." 한국산업융합학회 논문집 23.4, pp. 617-626 (2020).
- [14] S. M. Lee, "솔리드웍스 구조 및 유동 공학해석 기반." 메카피아 (2017).
- [15] TSNE FEA사업부, "ANSYS 18.0 Mechanical." 시그마프레스 (2017).

---

(접수: 2020.11.11. 수정: 2020.11.26. 게재확정: 2020.12.02.)