

육상시추용 드릴링 추진체의 실증시험 데이터를 활용한 전산구조해석에 관한 연구

A Study on the Computational Structural Analysis Using the Field Test Data of Onshore Drilling Mud Motor

박성규¹, 김승찬^{2*}, 권성용³, 신철순⁴

Sung-Gyu Park¹, Seung-Chan Kim^{2*}, Seong-Yong Kwon³, Chul-Soon Shin⁴

〈Abstract〉

Bottom hole assembly(BHA) is a key component of the drilling system, consisting of various components and tools(including the drill bit and mud motor) which operate at the bottom of the wellbore and physically drill the rock. This paper investigates the dynamic characteristics of the mud motor which is a drilling propulsion tool. And computational structural analysis is performed to calculate the von-Mises stress and the safety factor of components constituting the mud motor. In this process, the field test data of onshore drilling are used for analysis.

Keywords : Mud Motor, Onshore Drilling, Bottom Hole Assembly, Structural Analysis, Modal Analysis

1 주저자, 한국조선해양기자재연구원, 선임연구원

2* 교신저자, 한국조선해양기자재연구원, 책임연구원
E-mail: sckim@komeri.re.kr

3 한국조선해양기자재연구원, 책임연구원

4 한국조선해양기자재연구원, 선임연구원

1 Main Author, Korea Marine Equipment Research Institute, Senior Researcher

2* Corresponding Author, Korea Marine Equipment Research Institute, Principal Researcher

3 Korea Marine Equipment Research Institute, Principal Researcher

4 Korea Marine Equipment Research Institute, Senior Researcher

1. 서론

방향성 시추(directional drilling)라 함은 지하의 목표 지점까지 수직 또는 수평 궤적(경로)을 3차원적으로 변경하여 천공하는 기술로 비전통자원 개발에 있어서 많은 장점을 가지는 기술이다. 일례로 하나의 플랫폼으로부터 다수의 유정을 시추하여 경제성 확보가 가능하며, 수직 시추로는 접근이 용이하지 않은 부분도 해결이 가능하다.

방향성 드릴링 시스템의 추진체인 머드모터(mud motor)는 Fig. 1의 [1] BHA(bottom hole assembly)에 포함되는 장비로 BHA에서도 가장 하부에 위치하여 드릴비트(drill bit)와 직접 연결된다. 머드모터는 PDM(positive displacement motor) 원리[2]로 이수(mud)에 의한 동력을 만들어내는 파워섹션(power section) 부와 동력을 비

트에 전달하는 역할을 하는 베어링섹션(bearing section) 부로 구성된다.

본 논문에서는 머드모터 베어링섹션부를 대상으로 개발 시제품의 현장실증 데이터를 토대로 동특성을 파악하고 전산 구조해석을 수행하여 안전율(safety factor)을 도출하였다.

2. 실증시험 데이터 분석

머드모터 시제품의 실증시험은 캐나다 서스캐처원 벤슨 No.35에서 '21년 9월에 진행되었다

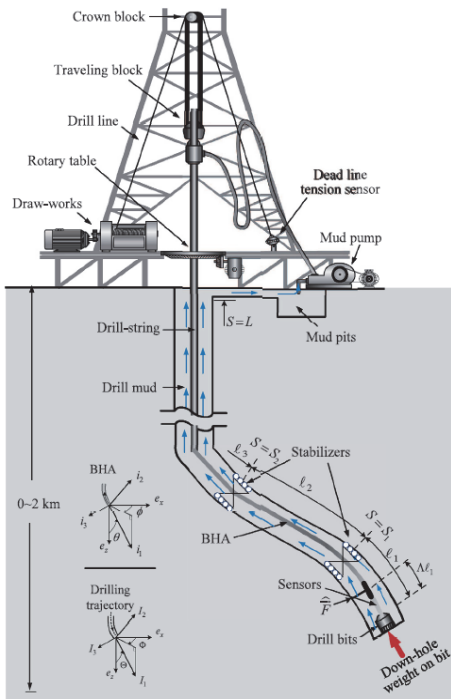


Fig. 1 Directional drilling description

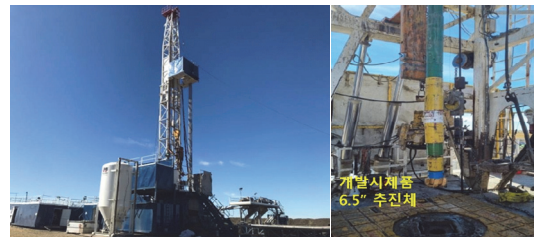


Fig. 2 Field test of drilling mud motor

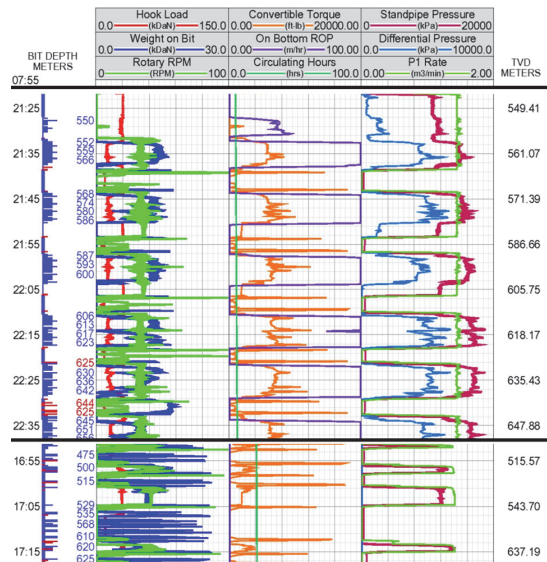


Fig. 3 EDR(electronic drilling recorder) log

(Fig. 2). 드릴링 계측 장비인 EDR(electronic drilling recorder)의 로그 데이터 일부를 Fig. 3에 나타내었다.

실증구간에서 장비의 회전속도는 0~100 RPM 범위로 확인된다. 만일 장비의 1차 모드 고유진동수가 RPM 범위보다 충분히 높다면 정적구조해석을 통해 구조건전성을 검토하여도 무방하다고 판단된다. 이를 확인하기 위해 3장에서는 진동해석을 수행하였다.

시추과정 중에 드릴비트에 가해지는 수직력은 WOB(weight on bit)라 하며, 드릴비트와 물리적으로 연결된 머드모터가 받는 주된 하중은 WOB에 의한 반력이 된다. 실증구간에서 WOB는 최대 30 kDaN(300 kN)으로 계측되었으며, 이를 토대로 하중조건을 산정하였다.

3. 진동해석

드릴링 추진체 머드모터의 동특성을 파악하기 위해 고유진동해석을 수행하였다. 머드모터 장비 무게는 1080 kg이며 길이 9.07 m이다. Fig. 4에 나타나 있듯이 드릴비트가 연결되는 부분과 스테빌라이저(stabilizer)를 경계조건으로 볼 수 있다. 스테빌라이저는 홀 내부에서 측면변형을 막아주는 역할을 한다.

본 사례에서는 머드모터 내부가 이수(mud)로 채워져 있기 때문에 유체의 부가질량으로 인한 고유진동수 감소를 예상할 수 있다. 식 (1)과 같이 부가질량 행렬 $[M^*]$ 이 운동방정식에 포함되고, 고유진동 문제에서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$([M] + [M^*])\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (1)$$

$$[K] - \omega^2([M] + [M^*])\{x\} = 0 \quad (2)$$

등가질량법을 통한 FMA(fluid mass added) model [3]을 적용하여 이수의 총 질량을 단위 길이당 분포질량요소로 해석모델에 길이 방향으로 균일하게 적용하였다. 이수의 질량은 홀(hole) 직경, 이수 밀도, 장비 직경, 장비 내부 유로 체적을 고려해서 계산 가능한 최대값인 300 kg 으로 산정하였다.

수치해석에는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS(v19.2)가 사용되었다.

Fig. 5에 해석결과 도출된 모드형상(mode shape)과 고유진동수를 나타내었다. 1차 모드 고유진동수

Table 1. Design weight and dimension

Tool weight	1080 kg
Tool length	9.07 m
Outer diameter	165 mm
Hole size	200 ~ 250 mm
Mud density	1010 kg/m ³

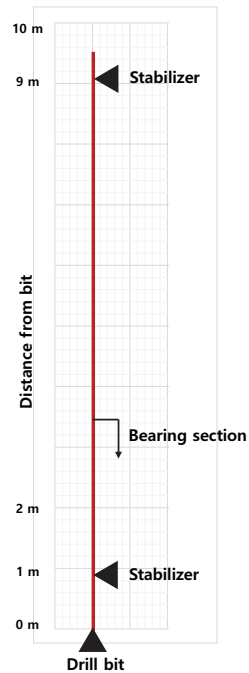
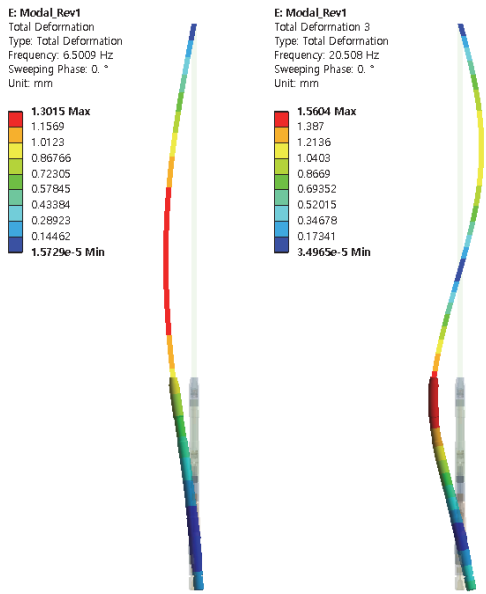


Fig. 4 Boundary conditions for the analysis

는 6.5 Hz로 실증구간 최대 RPM인 1.7 Hz (100 RPM)보다 382% 높게 나왔다. 머드모터의 FRF (frequency response function)는 Fig. 6과 같다. 세로축은 장비의 평균 변위응답을 단위 힘(N)에 대한 비로 나타낸 것이다. RPM 범위에서 동특성에 의한 영향을 거의 받지 않는 것으로 보인다.



(a) 1st mode (6.5Hz) (b) 2nd mode (20.5Hz)

Fig. 5 Mode shape and natural frequency

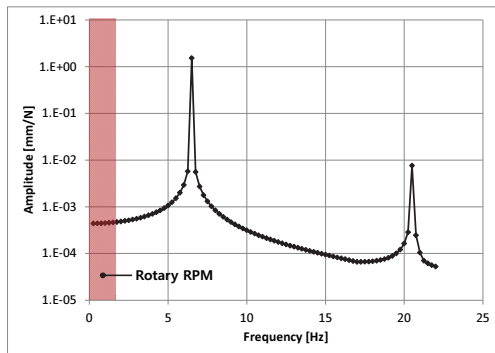
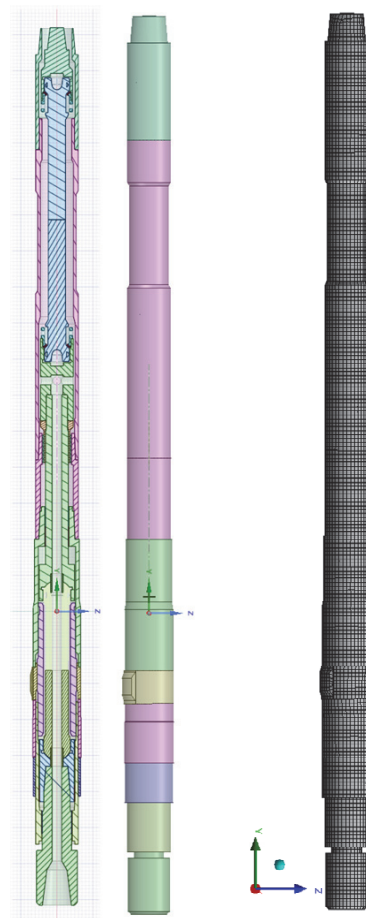


Fig. 6 Frequency response function of the mud motor

이러한 특성을 고려할 때, 머드모터 베어링섹션의 구조건전성 및 안전을 평가를 위해 정적구조해석 수행은 효율적인 방법이라 판단된다.

4. 구조해석

머드모터 베어링섹션의 정적구조해석을 수행하기 위해 Fig. 7과 같이 3D CAD모델 및 유한요소 모델을 구성하였다. 유한요소모델은 8개 절점에서



(a) CAD model (b) FE model

Fig. 7 3-D model of the mud motor bearing section

3-자유도(UX, UY, UZ)를 가지는 육면체 솔리드 요소(ANSYS SOLID185)를 사용하였다[4]. 모델을 구성하는 주요 부품은 Table 2와 같이 SNCM439 재료로 구성된 10개 파트, AISI4140 재료로 구성된 10개 파트이다. 구조해석에 사용된 각각의 재료물성치는 Table 3에 나타내었다.

재료의 항복강도는 시편 인장시험을 통해 도출하였다. Table 4는 SNCM439, Table 5는 AISI4140 재료의 인장시험 결과를 나타낸 것으로 SNCM439 9회, AISI4140 4회 실시하였다. SNCM439 항복강도는 135,000 psi (930 MPa)를 만족하였으며 AISI4140은 항복강도 110,000 psi (750 MPa)를 만족하였다.

머드모터에 작용하는 주된 하중은 WOB로 실증구간에서 최대 300 kN 이하로 예측되었다. 모델 상에서 드릴비트가 결합되는 아웃풋 맨드릴(output mandrel) 하단부에 300 kN 하중을 수직

(y축) 방향으로 적용하였다(Fig. 8).

구조강도는 von-Mises 항복기준에 따라 평가하였다. von-Mises 항복기준은 최대비틀림에너지(maximum distortion energy) 이론[5]에 기반하는 것으로, 조합응력 상태의 비틀림에너지가 단순인장 시험의 비틀림에너지와 같아지면 항복이 발생하는 것으로 판단한다. 연성재료 실험과 가장 잘 일치하며 보수적인 평가가 가능하다. von-Mises 등가응력은 식 (3)과 같이 정의된다. 여기서 σ_1 , σ_2 , σ_3 는 주응력(principal stress)이다.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (3)$$

구조해석 결과, 가장 높은 von-Mises 응력이 도출되는 3개 파트의 응력분포를 Fig. 9에 나타내었다. Output mandrel에서 58 MPa, connecting rod에서 57 MPa, straight housing에서 43 MPa의 최대응력이 발생하였다. Table 6에는 전체 해

Table 2. Main components of the FE model

Material	Part
SNCM439	Upper universal joint, split ring, connecting rod, lower universal joint, upper mandrel, lower connecting rod, output mandrel, radial mandrel, adjustable mandrel, adjusting crown
AISI4140	Universal joint cap, flow restrictor, seal sleeve, service sub, straight housing, thread protector, bushing, piston housing, adjustable thrust housing, offset radial housing

Table 3. Material properties

	SNCM439	AISI4140
Young's modulus [MPa]	200,000	200,000
Poisson's ratio	0.3	0.3
Yield strength [MPa]	930	750

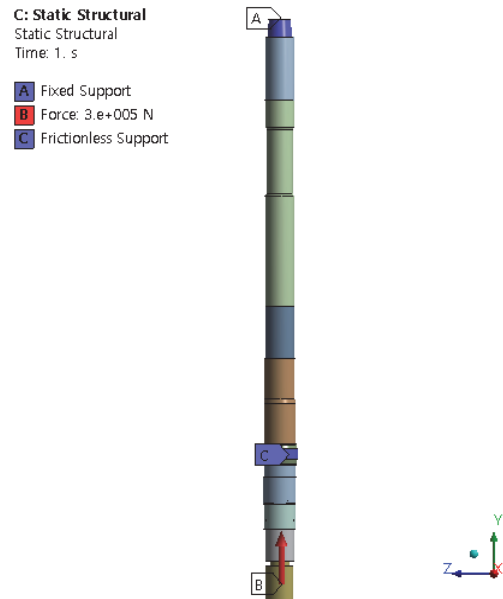


Fig. 8 Load and B.C. for structural analysis

Table 4. Tensile test result of the SNCM439

No.	Yield strength [psi]	Tensile strength [psi]
A-1	136,677	156,753
A-2	149,495	166,025
A-3	138,042	156,142
A-4	155,742	169,790
A-5	155,416	168,537
A-6	166,421	178,917
A-7	151,638	164,610
A-8	147,411	164,115
A-9	153,295	168,008

Table 5. Tensile test result of the AISI4140

No.	Yield strength [psi]	Tensile strength [psi]
B-1	147,458	163,412
B-2	140,166	155,926
B-3	112,350	139,924
B-4	120,153	144,163

Table 6. Analysis result summary

Part	Maximum von-Mises stress [MPa]	Safety factor
Upper Universal Joint	38	24.5
Universal Joint Caps	5	150.0
Split Rings	6	155.0
Connecting Rod	57	16.3
Lower Universal Joint	37	25.1
Flow Restrictor	24	31.3
Upper Mandrel	27	34.4
Lower Connecting Rod	26	35.8
Seal Sleeves	15	50.0
Output Mandrel	58	16.0
Radial Mandrel	33	28.2
Adjustable Mandrel	24	38.8
Service Sub	41	18.3
Straight Housing	43	17.4
Adjusting Crown	18	51.7
Thread Protector	15	50.0
Bushings	37	20.3
Piston Housing	31	24.2
Adjustable Thrust Housing	34	22.1
Offset Radial Housing	27	27.8

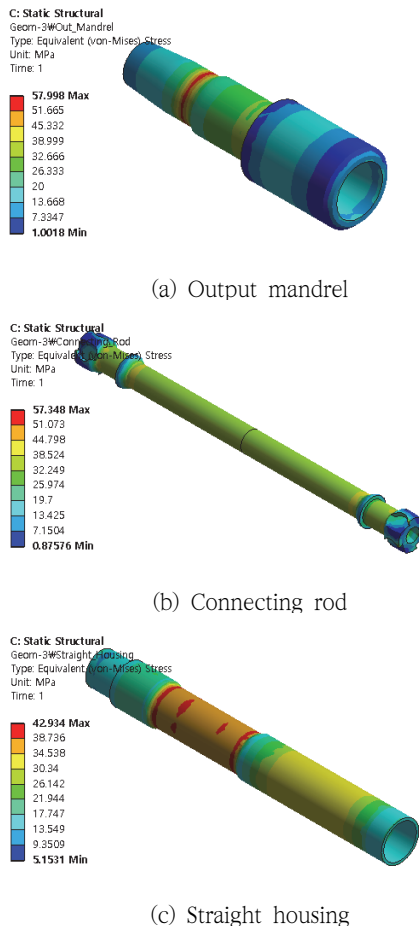


Fig. 9 Von-Mises stress results of the main components

석결과를 정리하였다. 해석모델을 구성하는 20개 주요 부품들에 대해서 안전율을 계산하였다. 안전율의 계산은 아래와 같이 재료의 항복강도를 최대 von-Mises 응력으로 나눈 값이다.

$$Safety\ Factor = \frac{Yield\ Strength}{Maximum\ Von\ Mises\ Stress}$$

Out mandrel 파트에서 16.0 으로 가장 낮은 안전율이 계산되며 connecting rod 16.3, straight housing 17.4 가 계산되었다.

해석모델을 구성하는 모든 파트에서 von- Mises 항복기준에 따라 도출된 최대 응력은 재료의 항복 강도 이하의 값을 가지며, 안전율은 최소 16.0 이상을 만족하는 값이 계산되었다.

5. 결론

본 논문에서는 육상 방향성 시추 장비 중에 BHA(bottom hole assembly) 하부에 위치한 추진체인 머드모터에 대해 진동해석을 수행하여 동특성을 검토하였으며, 전산 구조해석을 수행하여 머드모터를 구성하는 주요 부품의 안전율을 도출하였다.

이 과정에서 시제품 실증시험 데이터를 확보하여 장비 구동 시의 회전속도 범위 및 주요 하중을 분석하여 전산해석에 적용하였다.

결론은 다음과 같다.

- (1) 실증구간에서 측정된 회전속도 범위에서 머드모터는 동특성에 의한 영향을 거의 받지 않으며, 정적 구조해석을 통해 구조건전성을 검토하는 것은 합리적이라고 판단된다.
- (2) 머드모터 베어링섹션을 구성하는 각 부품들은 실증구간 하중 WOB(weight on bit)에 대해 von-Mises 항복기준을 만족하며, 안전율도 최소 16.0 이상 계산되어 구조건전성을 만족한다고 판단된다.

사 사

이 논문은 2022년도 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(22IFIP-C133608-06, Hybrid 방향 추진시스템 모듈 최적설계 연구).

참고문헌

- [1] Zhen Cai, Xuzhi Lai, Min Wu, Chengda Lu, and Luefeng Chen, "Equivalent-input-disturbance-based robust control of drilling trajectory with weight-on-bit uncertainty in directional drilling", ISA Transactions, ISSN: 0019-0578, (2021).
- [2] Haiping Zhang, Yanbin Zang and Jiachang Wang, "Calculation and experimental study on a rotary percussion positive displacement motor", Journal of Physics: Conference Series, ISSN: 1742-6596, 1626, 012100, (2020).
- [3] Chang Kyun Lee, Sang Jeung Lee, Eun Ho Lee and No Cheol Park, "Methodology for time history analysis of piping system contains internal fluid including natural frequency separation effect", Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 30(2), pp. 112-118, (2020).
- [4] ANSYS, ANSYS Mechanical APDL Element Reference 19.2, SAS IP. Inc., (2018).
- [5] Punmia B. C., Ashok Kumar Jain and Arun Kumar Jain, Mechanics of Materials, Laxmi Publications (P) Ltd., New Delhi, p. 238, (2001).

(접수: 2022.06.23. 수정: 2022.07.22. 게재확정: 2022.07.26.)