

유한요소법을 이용한 방향성 시추의 굴진율 연구

정태준*, 신영기*†

*세종대학교 기계공학부

A study on the excavation rate of directional drilling using finite element method

Tae Joon Jung*, Younggy Shin*†

*School of Mechanical Engineering, sejong University

ABSTRACT : The equation of motion of the drill string along the excavation trajectory was analyzed using the Lagrangian approach together with the finite element method (FEM). A drill string of circular cross section is constructed by combining a plurality of circular axes each having 12 degrees of freedom (DOF). FEM analysis can observe the vibration and dynamic changes of the entire drill string, and it is easy to apply comprehensive boundary conditions to reproduce the simulation of a realistic drill string. In this study, the constructed FEM model was simulated. In order to apply the FEM program to the actual drill trajectory, the dynamic analysis of the curved beam was verified by comparison with the actual values. The dynamic change over time was observed.

초록 : 드릴 스트링의 진동 문제는 수년간 드릴링 성능 저하의 주요 원인 중 하나로 인식되어 왔으며, 굴착 작업 시 발생하는 과도한 진동은 드릴링의 효율성, 파이프 피로, 비트의 수명 단축으로 인하여 고장을 초래할 수 있다. 이러한 진동의 원인은 드릴 스트링이 굴착 작업 중 궤적에 따라 파이프의 굽힘과 wellbore와의 접촉으로 인해 마찰이 발생하고 이러한 진동은 일반적으로 축 방향, 굴곡 및 비틀림 변형을 일으킨다. 본 연구에서는 Khulief와 Al-Naser[1]가 제시한 모델을 바탕으로 드릴 스트링에 6자유도(DOF)의 구성요소를 갖는 모델을 적용하여 curved beam의 수치해석 값과 Analytical값을 비교하여 검증하고 드릴 스트링에 hookload와 WOB 경계조건을 주어 각 element 마다 동적 거동을 분석하였다. 실제 궤적을 적용하여 드릴 파이프의 굽힘이나 중력으로 인하여 Wellbore와 접촉되는 부분에 마찰을 적용하였고, 또한 마찰 작용 시 일정한 축 방향 속도를 유지하기 위한 PI제어 값을 설계하여 drillstring 전체의 각속도 변화와 실제 드릴 굴착 작업 중 발생하는 stick slip현상을 관찰하였다.

Key words : Finite element method(유한 요소), Drill-string dynamics(동적 드릴 스트링)

-기호설명-

G : 전단 탄성 계수 (N/m²)

M : 질량 행렬

E : 탄성 계수 (N/m²)

C : 감쇠 행렬

K : 강성 행렬

N : 형상 함수

Corresponding author, E-mail: ygshin@sejong.edu

1. 드릴 스트링의 유한요소 모델링

1.1 FEM 모델링

FEM 모델은 포괄적인 경계조건을 통합하고 현실적인 드릴링 시나리오를 재현할 수 있다. 드릴 스트링의 축 방향을 따라 1node에 6자유도의 element로 구성된다.

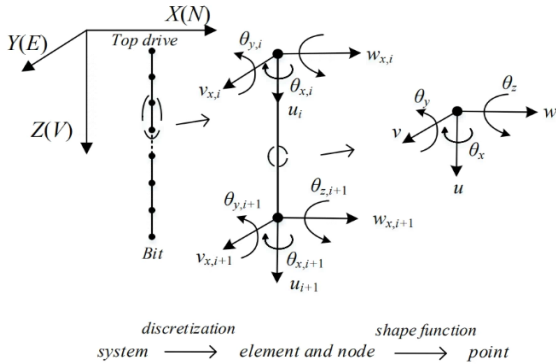


Fig. 1 Vertical drill-string finite element

$$K = \int_0^{l_e} (EA N_u' N_u'^T + G I_p N_{\theta_x}' N_{\theta_x}'^T + E I N_{\theta_y}' N_{\theta_y}'^T + E I N_{\theta_z}' N_{\theta_z}'^T) dx \quad (1)$$

$$M = \int_0^{l_e} \rho [A (N_w N_u'^T + N_v N_v'^T + N_w N_w'^T) + I_p N_{\theta_x}' N_{\theta_x}'^T] dx \quad (2)$$

$$C = \alpha [K] + \beta [M] \quad (3)$$

$$[K]U + [C]\dot{U} + [M]\ddot{U} = F \quad (4)$$

Fig. 1 에 표시된 것처럼 각 요소의 위치는 노드 당 6개의 자유도가 있는 두 개의 인접한 노드에 의해 결정된다. 따라서 요소의 변위vector 를 설명하기 위해 12개의 매개 변수가 필요하고, 식 (1)~(3)은 각각 크기(12x12)인 강성, 질량, 감쇠 행렬에 해당한다. 최종적으로 식 (4)의 방정식의 해를 구하기 위해 newmark[3] 수치 해석을 사용하여 변위, 가속도, 속도를 관찰 하였다.

2. 시뮬레이션 검증

2.1 Curved beam 분석

Fig. 2에 표시된 것처럼 왼쪽 끝이 고정되었고 오른쪽에는 x, y 및 z 방향으로 100kN 외력이 가해지고 있다. 실제 드릴 궤적의 경우 직선이 아닌 임의의 각도로 형성된 curved beam에 가깝기 때문에 Fig. 2처럼 curved beam의 Analytical변위 값과 프로그램 값을 Tianheng Feng[4] 결과와 비교하였다.

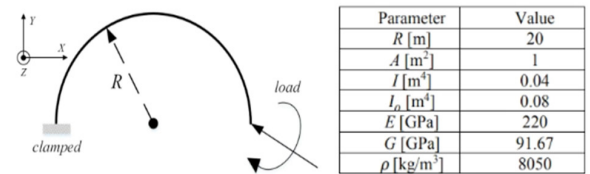


Fig. 2 Structure for static and dynamic analysis and Simulation parameters

Table 1 Put table title put table title Put table title

	analytical	Numerical analysis	Error rate
displacement in x direction [m]	0.03246	0.0323611	0.311%
displacement in y direction [m]	0.061021	0.0610352	0.0221%
displacement in z direction [m]	0.065687	0.0656861	0.0027%

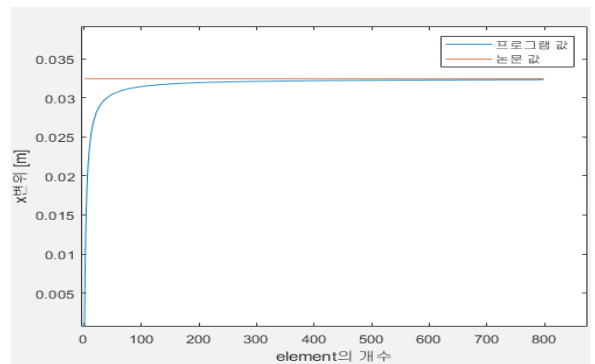


Fig. 3 Displacement change according to the number of elements

Table 1 와 같이 가장 큰 오차율은 0.311%로 허용할 수 있는 오차범위이다 또한 Fig. 3과 같이 element의 수가 증가할수록 참고한 논문 값에 수렴하였다.

2.2 Straight beam 분석

Fig. 4는 드릴 스트링이 hook에 매달려 있고 지상의 Top 는 일정한 속도로 회전하고 있다. 전체 길이 2000m에 대하여 중량이 664.89KN인 경우, bottom부분에 WOB 425KN을 경계조건을 주어 분석하였다.

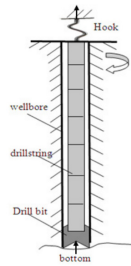


Fig. 4 FEA of vertical well drilling

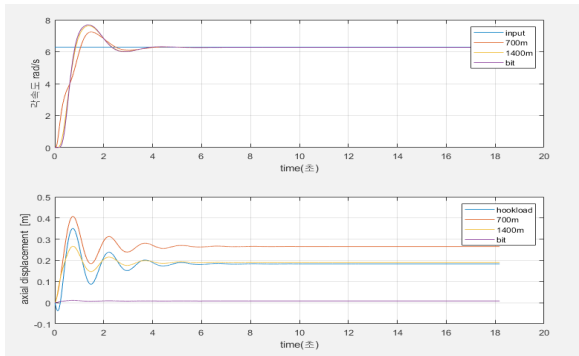


Fig. 5 The axial displacement and rotary speed

Fig 5의 상단 그래프는 지상 Top에 6.28rad/s (60RPM)로 회전속도를 고정하였을 때의 700m, 1400m, bit의에서의 회전속도 거동이다. 지상에서 bit로 비틀림이 전달되는 과정은 거리에 비례하기 때문에 그래프의 4가지 관찰 지점 중 700m가 가장 빠르게 반응하였다. 또한 Fig 5의 하단 그래프는 Hook load와 WOB 및 각 node마다 중력이 작용하였을 때 축 방향 변위를 나타낸다. Hook load의 경우 총 중량에서 WOB를 뺀 239.89KN값이다. 또한 프로그

램의 hook load 결과는 238.22KN이고 오차율 0.39%로 허용 가능한 오차이다.

3. 드릴 스트링 회전속도 제어

3.1 PI 제어

Fig 6과 같이 실제 궤적을 적용하여 wellbore 와 접촉 시 접촉 마찰이 작용하는 상태에서 목표 값을 55RPM으로 적용하고 PI제어에 의한 토크를 상단 Top 경계조건에 적용하였다.

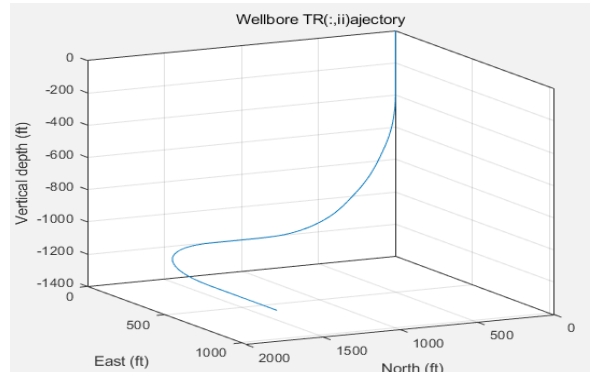


Fig 6 Drilling trajectory

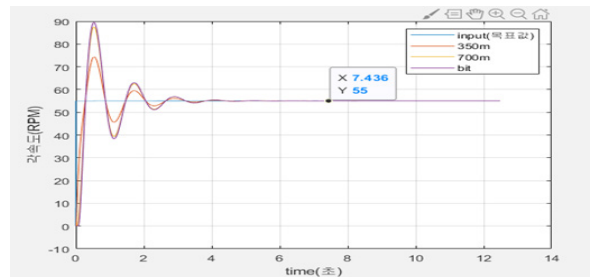


Fig 7 Angular speed change process using PI control

Fig 7의 그림은 PI제어를 통하여 beam의 회전속도를 목표 값으로 제어한 결과이다. bit부분이 가장 큰 overshoot가 발생하였으며 최종 목표 값인 55RPM에 모든 드릴 element가 제어되었다. 이때의 감쇠 비는 0.2358 고유진동 수는 5.5491rad/s 이다.

3.2 Stick slip 현상

Tianheng Feng[4]에 따르면 RPM이 낮을수록, WOB가 클수록 stick slip 현상이 발생한다. stick slip의 발생 여부는 드릴의 마찰 상황과 시추 궤도에 따라 달라지고, 현재 프로그래밍은 30RPM으로 줄인 결과 stick slip이 발생되었다.

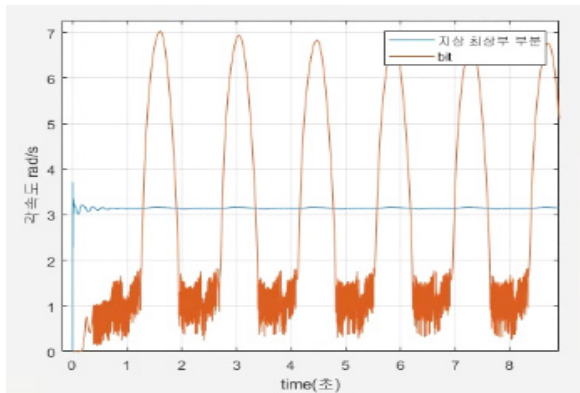


Fig 7 Angular velocity graph when stick slip occurs

Fig 7의 그래프는 드릴 스트링의 지상과 bit부분의 각속도 그래프이다. 지상 부분은 일정 한 속도로 회전하고 있지만 bit부분은 속도에 대한 변화가 주기적으로 발생하고 있고, 이 속도 차이로 인하여 드릴 스트링의 내력으로 비틀림이 주기적으로 발생하고 있다. Tianheng Feng[4]에 따르면 주기적인 Stick slip발생은 드릴 스트링의 피로파괴, ROP(침투율)저하의 직접적인 원인이다.

4. ROP 침투율

Soares[5]에 따르면 ROP(침투율)에 사용되는 3가지 모델을 비교하였고 Hareland and Rampersad[6]의 ROP(침투율)계산 모델이 가장 오차가 작음을 검증하였다. 따라서 Hareland and Rampersad[6]의 침투율 모델을 사용하여 Stick slip이 발생한 경우와 발생하지 않은 경우에 대하여 ROP속도를 비교하였다.

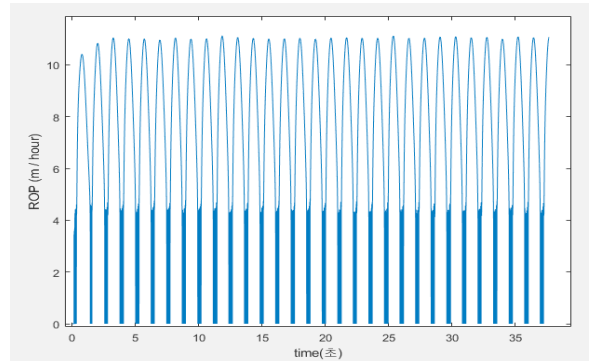


Fig 8 ROP when stick slip occurs

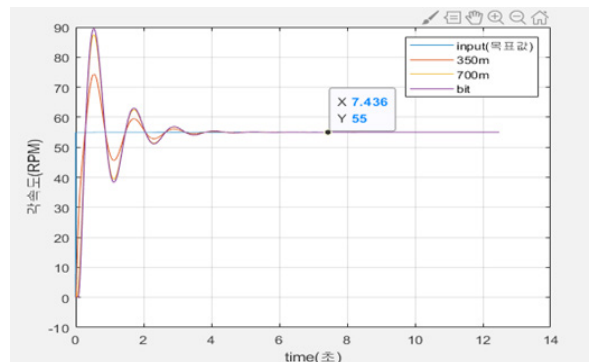


Fig 9 ROP when no stick slip occurs

Fig 7,8는 stick slip현상이 발생하였을 때와 발생하지 않았을 때의 ROP변화 그래프이다. stick slip현상의 발생 여부만 차이가 있고 나머지 변수들의 값은 동일하다.

Table 2 Average ROP comparison

Average ROP	
Stick slip occurrence	7.6373m/hour
No stick slip	8.1770m/hour

Table 2의 경우 stick slip발생 여부에 따른 평균 ROP비교 그래프이다. 비교 결과 stick slip현상이 발생하지 않았을 때가 7% 침투 깊이가 높은 결과가 도출되었다

5. 결론

Khulief 와 Al-Naser[1]가 제시한 시추의 모델에 newmark[3] 수치해석법을 사용하여 동적 거동을 분석하였다. 본 연구에서는 시추의 각 노드마다 분포하중과 Hookload, WOB하중의 적용과 wellbore와의 접촉으로 인한 마찰이 적용되었다. 또한 접촉 마찰 시 회전속도 제어에 필요한 PI제어를 적용하였고 수치해석 비교는 다른 논문과 비교하였다. 시추 현장에서 발생하는 stick slip현상을 프로그램으로 구현한 것을 바탕으로 지상의 Hookload와 지상의 회전모터의 제어기능을 추가하여 stick slip현상을 방지하고 시추가 최적의 상태로 굴착되는 것을 시뮬레이션으로 구현할 것이다.

후기

이 논문은 2020년도 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20IFIP-B133624-04, Hybrid 방향성 추진체 제어 및 시뮬레이션 평가 연구)

참고문헌

1. Khulief, Y.A. and Al-Naser, H., 2005. Finite element dynamic analysis of drillstrings. Finite elements in analysis and design, 41(13), pp.1270-1288
2. J.J. Bailey, I. Finnie, An analytical study of drillstring vibration, J. Eng. Ind. ASME Trans. 82 (2) (1960) 122-128.
3. B. Bathe, FEM Procedure in Electrical Engineering Analysis. Prentice Hall, Inc., 1982.
4. Tianheng Feng, (2019) Modeling and control of Drillstring dynamics for Vibration Suppression, Ph. D. Thesis, The university Texas at Austin, U.S.A.
5. Soares, C., Daigle, H. and Gray, K., 2016. Evaluation of PDC bit ROP models and the effect of rock strength on model coefficients. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 34, pp.1225-1236.
6. Hareland, G., and P.R. Rampersad, "Drag Bit Model Including Wear," paper SPE 26957 to be presented at the m LACPEC Conference, Buenos Aires, Argentina, Apr. 27-29,1994 