

지중 원격 음파통신 시뮬레이션 연구

신영기^{*†}

^{*†}세종대학교 기계공학부

A Study on the Simulation of Underground Acoustic Telemetry

Younggy Shin ^{*†}

^{*}Department of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University,

^{*†}School of Mechanical Engineering, sejong University,

ABSTRACT : The conventional communication method using mud flow pressure waves has a speed of 1-2 bps, so it takes a long time to communicate, making real-time control impossible. Although the sound wave communication method for improving the communication speed by 10 times or more has been commercialized, its use is limited due to its high price and there are not many application cases. In this study, the simulator corresponding to the facility was developed to develop performance similar to the actual test results. For simulating sound wave communication through a drill pipe, we proposed a governing equation that can simulate friction damping by mud and developed a numerical analysis model. The attenuation factor was corrected by comparing it with the attenuation rate of sound wave energy at the drilling site. The developed numerical analysis model was applied to the QPSK modulation type communication algorithm to confirm the excellent performance of the communication error rate of 0.04% in the ground. This is the communication performance under the condition that noise has not been mixed yet, and in order to apply it, the technology of reproducing the actual noise signal for mixing by securing the field noise data was established.

초록 : 머드 유동 압력파를 이용한 기존의 통신방식은 속도가 1-2 bps 수준으로서 통신에 소요되는 시간이 길어 실시간 제어가 불가능한 수준이다. 통신 속도를 10배 이상 향상시키기 위한 음파통신 방식은 상용화되기는 하였으나 가격이 비싸 이용이 제한적이고 응용 사례도 많지 않다. 본 연구는 해당 설비에 해당하는 시뮬레이터를 개발하여 실제 시험 결과와 유사하게 성능을 개발하였다. 드릴 파이프를 통한 음파 통신 모사를 위해 머드에 의한 마찰 감쇠를 모사할 수 있는 지배 방정식을 제안하고 수치해석 모델을 개발하였다. 감쇠 계수는 시추 현장에서의 음파 에너지 감쇠율과 비교하여 보정하였다. 개발된 수치해석 모델을 대상 QPSK 변조 방식의 통신 알고리즘을 적용하여 지상부에서 통신 에러율 0.04% 수준의 우수한 성능을 확인하였다. 이는 아직 노이즈가 혼입되지 않은 조건에서의 통신 성능이며 이를 적용하기 위해 현장 노이즈 데이터를 확보하여 혼입을 위한 실제 노이즈 신호를 재생하는 기술을 확립하였다.

Key words : Directional drilling(방향성 시추), Acoustic telemetry(원격 음파통신), Wave equation(음파 방정식), Drill string(드릴 스트링), Modulation(변조)

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

신영기

-기호설명-

m mass coordinate, kg
 Δr mass of segment, kg

t time, s
 u displacement, m
 z acoustic impedance, kg/s

1. 서론

세일가스 채굴을 위한 방향성 시추 시 BHA (Bottom Hole Assembly)의 지하 위치, 굴진 방향 등을 정확히 파악하기 위해서는 감지된 센서 정보를 지상으로 송신할 수 있어야 한다. 현재까지 시추 현장에서 주로 사용되는 통신방법은 순환되는 머드 (mud)의 유로를 개폐하여 발생시키는 유체 압력파에 의한 방식이었다. 이 방법은 1초에 1~2 비트 수준으로 정보를 보낼 수 있는 낮은 통신 속도가 최대 단점이다. 이 점을 극복하기 위하여 20 bps (bits per sec)의 통신이 가능한 음파 원격통신 방식(Acoustic telemetry)(1)가 상용화되었다. 이 방법은 BHA에서 압전소자를 이용하여 드릴파이프 자체에 특정주파수 대역을 가진하고 지상부에서 가속도계로 그 신호를 수신하는 방법이다. 이 방법은 통신 속도가 빠른 대신 가진 대역이 약 700 Hz 근처로서 점성 유체인 머드 및 암반 접촉 등에 의해 신호 감쇠가 크기 때문에 약 1km 내외로 신호 반복기 (repeater)를 설치해야 하는 단점이 있다. 그러나 이 기술이 상용화된다는 점에서 국내에서도 이 기술 획득을 위한 연구개발이 필요하다. 본 연구에서는 핵심기술인 음파 발생기 개발을 위해 극복해야 할 사항들을 검토한다.

2. 음파 통신 방식의 구조

Fig. 1은 음파 가진에 의한 데이터 전송 원리를 나타낸다. 드릴비트 근처에서 센서들이 수집한 정보를 압전소자를 이용하여 드릴 파이프를 가진하는 형식으로 데이터를 전송한다. 문제는 드릴파이프 내부에 고압의 머드가 압송되고 드릴비트에서 비트 윤회와 파쇄된 암반 제거를

수행하면서 감압된 머드가 시추공과 드릴 파이프 사이의 중공축 공간을 통해 되돌아가는 유로를 유지하도록 송신장치를 설계하고 작동하게 해야 한다는 점이다. 압전소자는 약 700 Hz 근처의 주파수로 파이프를 가진하고 그 에너지

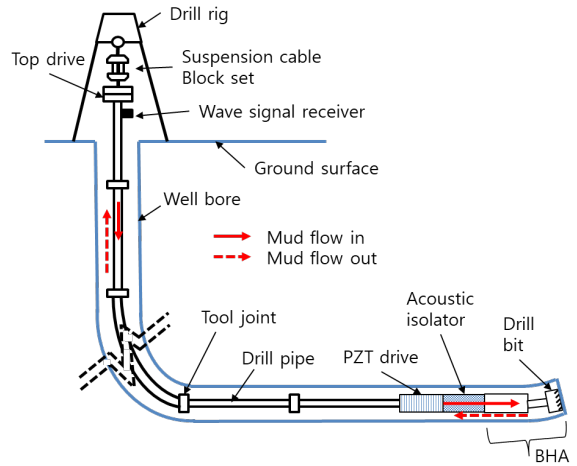


Fig. 1 Data transmission through acoustic telemetry

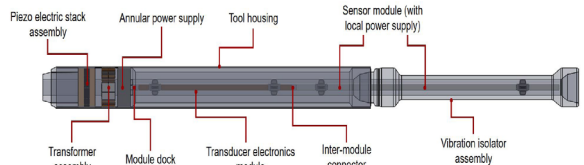
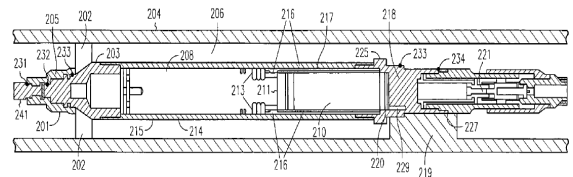


Fig. 2 Schematic of acoustic telemetry transmitter

가 1 km 이상을 노이즈를 극복하며 전달되게 하려면 큰 전력이 필요하고 오랜 기간 전력을 공급할 배터리가 필요하다. 이러한 제반의 장치를 Fig. 2(1-2)와 같이 창의적 설계로 극복해 나가고 있다. 압전소자에 의한 발생 음파는 양방향으로 전달되어 간섭을 일으킬 수 있으므로 데이터 송신 반대 방향측으로는 vibration isolator를 설치하여 발생 음파를 절연해야 한다.

3. 음파 전달 수치해석 모델

압전소자의 파이프 가진에 의한 음파 전달과정은 식(1)과

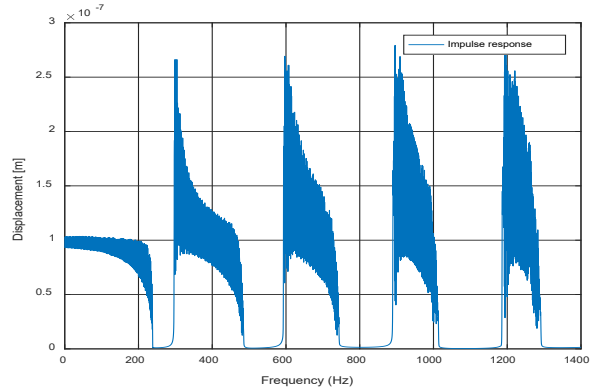
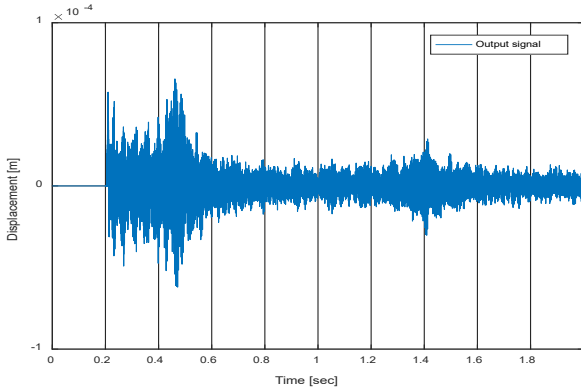


Fig 3 Impulse response in time and frequency domains

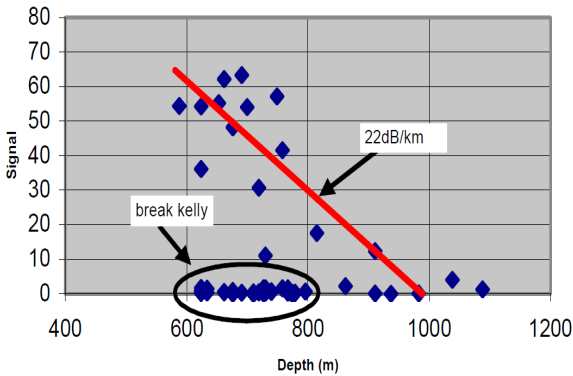


Fig 4 Energy levels versus depth: Test of Neff et al. [4]

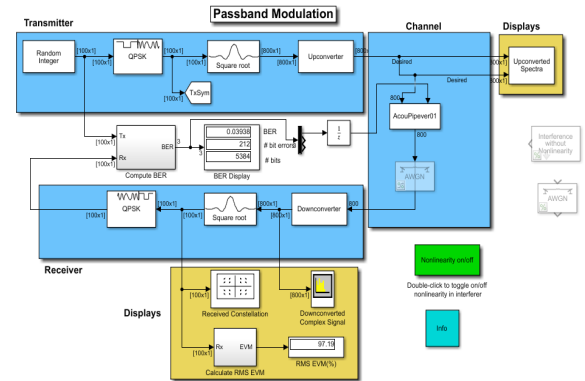


Fig 5 QPSK modulation simulator

같다(3). 마지막 항은 순환되는 머드에 의한 마찰감쇠 효과를 나타낸다. 이 운동 방정식을 식(2)와 같이 수치해석 모델로 변환하였다. 그리고 지중 2 km 깊이에서 압전소자로 임펄스 파를 가한 경우의 수치해석 결과는 Fig. 3과 같다. 주파수 영역의 반응을 보면 음파 에너지가 통과되는 대역과 그렇지 못한 대역으로 명확히 구분된다. 이러한 현상은 약 10 m 길이의 드릴 파이프들과 이들을 연결해주는 이음부 (tool joint)의 단면적과 재질이 달라서 발생한다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial m} \left(z^2 \frac{\partial u}{\partial m} \right) - k \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

$$u_n^{j+1} = -u_n^{j-1} + \frac{2}{(\Delta r_{n+\frac{1}{2}} + \Delta r_{n-\frac{1}{2}})} \left[\Delta r_{n+\frac{1}{2}} u_{n+1}^j + \Delta r_{n-\frac{1}{2}} u_{n-1}^j \right] + \Delta t k_n (u_n^j - u_n^{j-1}) \quad (2)$$

Fig. 4는 음파 에너지의 감쇠 특성을 시추 현장에서 측정 한 사례를 나타낸다. 이와 유사한 감쇠특성이 나타나도록 식(2)의 감쇠 계수를 조정하였다(5). 신호 감쇠 극복을 위해 repeater를 설치하는 것도 방법이지만 이는 매우 복잡하고 비용이 많이 들어 실용적이지 못하다. 가능한 한 repeater 없이 통신이 가능하도록 다양한 노이즈 환경에서도 강인한 데이터 전송 알고리즘을 개발할 필요가 있다.

4. QPSK 변조 방식 통신

빠르고 안정된 데이터 통신을 위해 다양한 통신 알고리즘들이 알려져 있으며 그 중 PSK(phase shift keying) 방식은 위상 변경을 통한 데이터 전달방식으로서 지중 음파통신을 상업화한 미국 Xaxct 사도 DPSK 방식을 적용하였

신영기

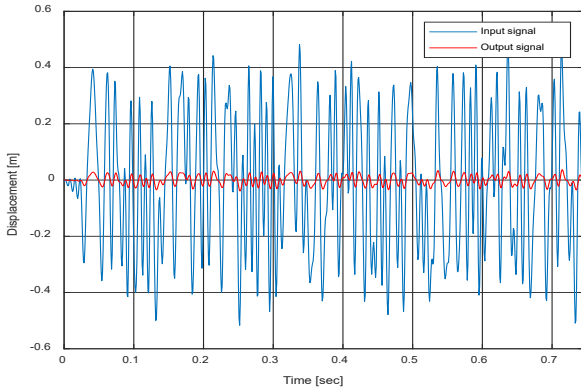


Fig 6 QPSK signals at transmitter and receiver

다. 본 연구에서는 DPSK보다 2배의 위상 정보를 전달할 수 있는 QPSK 방식을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 5는 Mathworks사의 Simulink를 이용한 QPSK 통신 시뮬레이터를 구성한 예이다. 임의의 정수 100개를 발생시켜 얻은 데이터 패킷을 QPSK 변조 후 FIR 필터를 거쳐 Channel로 보낸다. 이 채널이 무선 통신에서는 전파가 퍼져나가는 대기층이 되겠지만 지금은 지중 시추 파이프가 대상이므로 전 절에서 수치해석으로 얻은 가상 음파 시뮬레이터에 압전소자 가진 형식으로 해상 신호가 파이프로 전달된다. 1 km 거리에 걸치 신호 감쇠 후 지상에 해당 신호가 수신되고 FIR 필터를 거치고 QPSK 복조 후 복구된 데이터를 애초에 보냈던 데이터와 비교하여 수신 에러율 (BER; bit error rate)을 산정한다.

본 연구에서는 지중 음파 시뮬레이터에 아직 노이즈를 반영하지 않은 상태에서 144 bps (bits per sec)로 통신 에러율 0.04%를 달성하였다. Fig. 6는 시뮬레이터 채널의 송신부와 수신부에서의 신호를 나타내고있다. Fig. 7은 후속 연구를 위해 현장의 시추 노이즈를 복원하여 Fig. 5의 통신 시뮬레이터를 추가하려는 연구 결과를 나타낸다. Hill(6)은 시추현장(7)에서 기록된 시간 영역 데이터를 power density spectrum 형식으로 변환한 그래프를 보고하였다. 저자는 이 그래프를 읽어 FFT 신호로 변환하고 누락된 위상 정보는 임의 값을 발생시켜 Fig. 7과 같은 시간 영역 노이즈를 복원하였다. 향후에는 이 노이즈와 전달하고자 하는 음향신호의 상대적 크기를 적용한 SNR (signal-to-noise ratio)를 변화시켜 가며 제안한 QPSK에 의한 데이터 통신의 강건성을 시추 깊이에 따라 분석하고 데이터 수

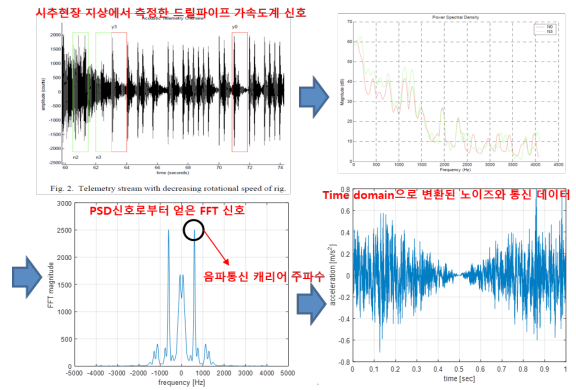


Fig 7 Drilling noise reconstruction from PSD data

신 안정성을 높이기 위한 연구가 진행될 예정이다.

5. 결론

머드 유동 압력파를 이용한 기존의 통신방식은 속도가 1-2 bps 수준으로서 통신에 소요되는 시간이 길어 실시간 제어가 불가능한 수준이다. 통신 속도를 10배 이상 향상시키기 위한 음파통신 방식은 상용화되기는 하였으나 가격이 비싸 이용이 제한적이다. 이러한 한계를 극복하기 위해 repeater 없이 실시간 통신으로 더 깊은 시추 위치까지 통신하기 위한 통신 시뮬레이터를 개발하였고 노이즈가 없는 경우 1 km 시추 깊이에 대하여 성공적인 통신 성능을 확인하였다. 후속 연구에서 노이즈를 추가하고 시추 깊이를 늘려가며 실제 현장의 데이터 포맷 형식으로 데이터를 전송하며 실용 가능한 최대 시추 깊이와 통신 속도를 확보할 것이며 본 연구는 이를 위한 핵심 기반 연구결과가 될 수 있음을 확인하였다.

사사

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

References

1. Reeves, M. E., Camwell, P. L., and McRory, J., 2011, "High Speed Acoustic Telemetry Network Enables Real-Time Along String Measurements, Greatly Reducing Drilling Risk," SPE-145566-MS, pp. 1~12.
2. Shah, V. V., Linyaev, J., Kyle, D. G., Gardner, W. R., and Moore, J. L., 2006, "Drill string incorporating an acoustic telemetry system employing one or more low frequency acoustic attenuators and an associated method of transmitting data," U.S. Patent No. US7,068,183 B2.
3. Y. Shin, 2019, Signal attenuation simulation of acoustic telemetry in directional drilling, Journal of Mechanical Science and Technology 33 (11) (2019) 5189~5197.
4. J.M. Neff and P.L. Camwell, 2007, Field-Test Results of an Acoustic MWD System, 2007 SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, The Netherlands, SPE/IADC 105021 (2007) 1-12.
5. D. S. Drumheller, Attenuation of sound waves in drill strings, J. Acoust. Soc. Am. 94 (4) (1993) 2387-2396.
6. F.N. Hill, 2004, Project Fulfillment for ECE531, Portland State University.
7. D. S. Drumheller, Acoustical Properties of Drill Strings, San-dia Report, SAND88-0502, Printed August (1988).