

극한지 시추장비 설계를 위한 오거 드릴에 관한 기초연구

배성준*

*한국생산기술연구원

e-mail:sjbae@kitech.re.kr

Basic Study on Auger and Drill for Design of Drilling Equipments at Extreme Regions

Sung-June Bae*

*Korea Institute of Industrial Technology

요약

세계 각국은 자원 확보 및 신성장 동력 발굴 등을 목적으로 극지, 해양 및 우주와 같은 극한지의 자원 탐사 및 개발을 확대하고 있다. 이에 전 세계적으로 극한지 자원탐사에 필수적인 시추장비 연구개발이 활발히 진행 중에 있다. 극한지 자원탐사 시추장비 설계를 위해서는 지반조건, 시추장비 설계변수 및 구동조건에 따른 오거드릴 추력, 토크, 동력값을 미리 추정할 수 있어야 한다. 또한 지반 샘플을 오거에 샘플링하기 위해서는 오거드릴을 지반 샘플링이 가능한 회전속도로 회전하여야 한다. 본 연구에서는 극한지 시추장비 설계를 위한 지반 시추·샘플링 이론을 조사 및 분석하였다.

2.1 지반 시추 이론

1. 서론

세계 각국은 자원 확보 및 신성장 동력 발굴 등을 목적으로 극지, 해양 및 우주와 같은 극한지의 자원 탐사 및 개발을 확대하고 있다.

이에 전 세계적으로 극한지 자원탐사에 필수적인 시추장비 연구개발이 활발히 진행 중에 있다. 미국의 경우, 극지 시추장비 연구개발은 CRREL(미국 육군 극한지 연구 엔지니어링 실험실, Cold Regions Research and Engineering Laboratory)에 의해 주도적으로 진행 중에 있으며, 우주자원탐사 시추장비 연구개발은 NASA(미국항공우주국, National Aeronautics and Space Administration)가 허니비로보틱스社(Honeybee Robotics, Ltd)와 공동 연구를 통해 활발히 진행 중이다. 중국 또한 달 월면토 샘플채취를 위한 시추장비 연구개발을 현재 수행중이며, 일본은 소행성 자원탐사를 위한 시추장비 연구개발을 적극적으로 진행 중이다.

본 연구에서는 극한지 시추장비 설계에 필요한 지반 시추 이론, 샘플링 이론을 조사하고 분석하였다.

극한지 자원탐사 시추장비 설계를 위해서는 지반조건, 시추장비 설계변수 및 구동조건에 따른 오거드릴 추력, 토크, 동력값을 미리 추정할 수 있어야 한다. 왜냐하면 오거드릴 토크·동력값을 통해 구동기 선정이 가능하며, 오거드릴 추력·토크값을 통해 설계된 시추장비 기계요소의 강도·강성을 평가할 수 있기 때문이다. 또한 지반 시추 시물레이션을 위해서도 지반 시추이론식이 관련 프로그램에 반영되어야 한다.

Mellor(1989)에 의하면, 시추작업의 기계적인 절삭은 굽기에 의한 절삭(Cutting by a Scraping Action) 원리와 찍기에 의한 절삭(Cutting by Indentation) 원리에 의존하는데, 지반 시추의 경우는 굽기 절삭방법과 찍기 절삭방법을 병행한 회전타격식(Rotary-percussive Type) 시추방식이 시추속도 측면에서 가장 효율적이어서 시추장비에 널리 채용되고 있다. 일반적인 동력 이론이지만, Zacny et al.(2013)가 회전타격식 시추 동력이론을 아래와 같이 설명하고 있다.

$$\text{시추동력} = \text{오거구동동력} + \text{항타기 구동동력} \quad (1)$$

$$\text{오거구동동력} = \text{오거모터토크} * \text{오거모터 회전속도} \quad (2)$$

$$\text{항타기 구동동력} = 1\text{회 항타에너지} * 1\text{초당 항타빈도} \quad (3)$$

2. 지반 시추·샘플링 이론 조사, 분석

시추작업에 필요한 타격력을 제공하는 시추장비의 항타기

구동동력은 1회 향타에너지와 1초 당 향타빈도의 곱으로 구해지는데, Bar-Cohen and Zacny(2009)에 의하면 1회 향타에너지는 향타기 설계변수인 피스톤 질량(m_p), 구동조건인 피스톤 속도(v_p)와 상관관계가 있다. 식(4)의 T_r 은 에너지 전달 계수이다.

$$1\text{회 향타에너지} = \frac{1}{2}m_p v_p^2 T_r \quad (4)$$

Mellor and Sellman(1976)은 식(2)의 오거 구동동력을 지반 절삭 작업, 절삭물 제거 작업, 오거 이송 작업 등 3가지 작업에 필요한 동력으로 분해하고, 각각의 동력식을 지반조건, 시추장비 설계변수 및 구동조건과 상관관계를 가지는 이론으로 정립하였다.

$$\text{지반 절삭 작업에 필요한 동력, } P_C = 7.85 \times 10^{-5} D^2 R E_S \quad (5)$$

$$\text{절삭물 제거 작업에 필요한 동력, } P_L = \frac{\pi}{4} D^2 R \gamma_g h \quad (6)$$

$$\text{오거 이송 작업에 필요한 동력, } P_H = w L R_H \quad (7)$$

지반 절삭 작업에 필요한 동력 P_C (kW) 이론식에서 D (m)는 홀직경 또는 오거지름, R (mm/s)은 시추속도, E_S (J/m³ 또는 N/m²)는 절삭에 대한 비에너지이다. 이 이론식을 통해, 지반 절삭 작업에 필요한 동력은 오거지름의 제곱, 시추속도, 절삭에 대한 비에너지와 비례관계가 있음을 알 수 있다. 절삭에 대한 비에너지값은 지반조건과 드릴비트 형상 등에 따라 가변한다. 이러한 이유로 절삭에 대한 비에너지값은 선정된 지반, 드릴비트를 대상으로 기초실험을 해야만 구할 수 있는 단점이 있다. 물론 문헌조사를 바탕으로 절삭에 대한 비에너지값을 추정하여 지반 절삭 작업에 필요한 동력을 계산할 수는 있지만, 이 경우 계산 동력과 실제 동력 사이에 오차가 크다. 절삭물 제거 작업에 필요한 동력 이론식에서 γ_g 는 절삭물 단위 무게, h 는 홀깊이를 나타낸다. 식 (6)을 통해 절삭물 제거 작업에 필요한 동력은 오거지름의 제곱, 시추속도, 절삭물 단위 무게, 홀깊이와 비례관계가 있음을 알 수 있다. 오거 이송 작업에 필요한 동력 이론식에서 w 는 오거 단위 길이당 무게, L 은 오거 길이, R_H 는 오거 이송속도를 나타낸다.

Mellor and Sellman(1976)은 또한 지반 시추 시 절삭작업에 소요되는 토크 이론을 아래와 같이 수립하였다. 아래 수식의 N 은 오거 회전속도를 나타낸다. 식 (8)을 통해 지반 시추 시 절삭작업에 소요되는 토크는 시추속도, 오거지름의 제곱, 절삭에 대한 비에너지에 비례하고, 오거 회전속도에 반비례함을 알 수 있다.

$$T = \frac{RD^2}{8N} E_S \quad (8)$$

2.2 지반 샘플링 이론

극한지 자원탐사 시추장비는 지반 샘플을 오거에 샘플링하여 샘플을 회수하는데, 지반 샘플을 오거에 샘플링하기 위해서는 오거드릴을 지반 샘플링이 가능한 회전속도로 회전하여야 한다. 이에 극한지 자원탐사 시추장비 개발에 있어서 오거드릴 샘플링 회전속도 이론을 확보하는 것은 매우 중요하다.

지반 시추작업에서 발생한 지반 샘플은 오거 날개를 따라 수직으로 수송되는데, 이 때 지반 샘플 수직 수송 운동에 저항하는 요소로는 지반 샘플 무게, 오거 날개 표면의 마찰력 등이 있다. 지반 샘플을 수직 수송하기 위해서는 반력이 필요한데 이 때 주요 반력 요소는 홀벽(Hole Wall)의 마찰력이다. 홀벽의 마찰력은 오거드릴 회전에 의한 원심력에 의해 유발되는데, 오거드릴 회전속도가 충분히 크면 홀벽의 마찰력이 지반 샘플 무게 및 오거 날개 표면의 마찰력을 극복하고 지반 샘플을 위로 끌어올린다. 지반 샘플링을 위한 오거드릴 회전속도 이론은 지반샘플을 수송시키는 힘인 홀벽의 마찰력과 지반샘플의 수송을 방해하는 힘인 지반 샘플 무게와 오거 날개 표면의 마찰력 간의 평형방정식에 의해 유도된다(Mellor, 1981; Zhang and Ding, 2017).

$$w_r = \sqrt{\frac{g}{\mu r} \tan(\alpha + \delta)} \quad (9)$$

Zhang and Ding(2017)에 의해 유도된 식 (13)은 오거드릴 임계 회전속도 이론식인데, g (m/s²)는 중력가속도, μ 는 지반 샘플과 홀벽 간의 마찰계수, r (m)은 오거지름, α (rad)은 오거 나선각(Helix Angle of Auger), δ 는 지반 샘플과 드릴틀 간의 마찰각이며, $\tan\delta$ 는 μ_1 과 같다. 여기서 μ_1 는 지반 샘플과 드릴틀 간의 마찰계수를 나타낸다. 오거드릴 회전속도가 ω_c 보다 작으면 지반 샘플이 오거홈에 샘플링되며, 오거드릴 회전속도가 ω_c 보다 크면 지반 샘플이 오거 날개를 따라 위로 수송된다. 이 식을 통해 오거드릴 임계속도는 중력가속도, 오거 나선각, 지반 샘플과 드릴틀 간의 마찰계수와는 제곱근의 비례관계에 가깝고, 지반 샘플과 홀벽 간의 마찰계수와 오거지름에는 제곱근의 반비례관계에 있음을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 극한지 시추장비 설계를 위한 지반 시추 샘플링 이론을 조사 및 분석하였다. 본 연구의 결과물은 추력·토크·동력을 고려한 극한지 자원탐사 시추장비의 최적설계 및 극한지 환경에 따른 지반 샘플링 조건 분석에 활용될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 자체연구사업의 지원을 받아 수행된 연구(오거 드릴링 - 지반 상호작용 기초연구)로, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Malcolm Mellor, "Introduction to drilling technology", *An International Workshop on Physics and Mechanics of Cometary Materials*, 1989.
- [2] K. Zacny, G. Paulsen, C. P. McKay, B. Glass, A. Dave, A. F. Davila, M. Marinova, B. Mellerowicz, J. Heldmann, C. Stoker, N. Cabrol, M. Hedlund and J. Craft, "Reaching 1m deep on mars: The icebreaker drill", *Astrobiology*, Vol. 13(12), pp.1166-1198, 2013.
- [3] Yoseph Bar-Cohen, and Kris Zacny, *Drilling in extreme environments: Penetration and sampling on earth and other planets*, Wiley-VCH, 2009.
- [4] M. Mellor, and Paul V. Sellmann, General considerations for drill system design, In *Ice-Core Drilling*, University of Nebraska Press, pp. 77-111, 1976.
- [5] Malcolm Mellor, *Mechanics of cutting and boring. Part 7: Dynamics and energetics of axial rotation machines*, USA CRREL Report 81-26, 1981.
- [6] Tao Zhang, and Xilun Ding, "Drilling Forces Model for Lunar Regolith Exploration and Experimental Validation", *Acta Astronautica*, pp.190-203, 2017.