

다운더홀(DTH) 해머의 모델링 및 실험 Modelling and Test of Down-the-Hole Hammer

황운규^{1*}

U. K. Hwang

Received: 03 Mar. 2015, Revised: 18 Apr. 2015, Accepted: 21 May. 2015

Key Words : Down-the-Hole Hammer(하향천공 해머), Pneumatic Hammer(공압 해머), Rock Drill(락 드릴)

Abstract: Research and development of mineral resource related products has progressed with the increased need to develop mineral resources. The DTH hammer is one a resultant product. However, due to particular work conditions of underground drilling, it is difficult to obtain direct data on the DTH Hammer. A DTH drill rig requires a lot of money and time for actual testing. This thesis aimed to resolve this problem by using CAE. First, the structure of the DTH hammer and the movement was analyzed. Next, a standard model based on simulation was proposed and then experimentation and comparison verification was conducted. In addition, the verified models were applied to products of various sizes, and the models used in simulation were compared by conducting field tests.

1. 서 론

천공장비인 락드릴은 탑해머(Top Hammer), 다운더홀(Down-the-hole Hammer, 이하 DTH), 로터리 드릴방식이 대표적으로 사용되며, 이는 드릴의 타격 및 구동 방식에 따라 나뉘며, 이에 관한 차이가 Fig. 1 에 도식적으로 제시되어있다.⁽¹⁾

탑해머 방식은 드릴 스트링을 회전시키면서 드릴 스트링 상단을 타격하여 충격 에너지는 드릴 스트링을 통해 암반까지 전달하여 천공하는 방식이다. DTH 방식은 드릴 리그가 튜브 전체를 회전시키며, 암반과 접촉하고 있는 공압 DTH 해머가 타격을 하여 충격 에너지로 암반을 파쇄하고 타격 후 배출되는 에어로 암반 쇄설물을 불어내며 천공한다. 로터리 방식은 타격 없이 트라이콘 비트의 회전 연삭 작용으로 천공한다. 따라서 DTH 천공의 경우 타격부가 지반에 직접

적으로 닿아 있는 구조로, 탑해머 방식에 비하여 효율이 높다. 또한 타격부가 없는 로터리 방식에 비하여 상대적으로 빠른 천공이 가능하다. 이러한 이유로 관정 및 광물 채굴 목적으로 DTH 천공방식의 사용이 증가하고 있다. 그러나, DTH 천공방식의 경우 타격부가 지하 수십~수백 미터 아래에 위치하여 이를 직접 측정하는데 상당한 어려움이 있고, DTH 장비를 운용하는데 많은 비용이 발생한다. 이를 보완하기 위해 CAE 모델링과 해석의 필요성이 요구되나, 아직까지 연구 사례가 적고, 일부 관련 사례가 있으나

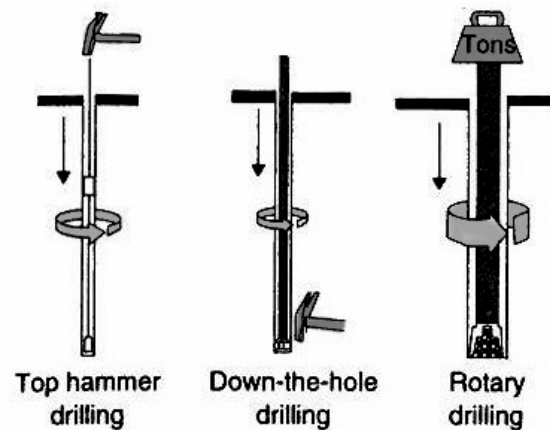


Fig. 1 Difference between drilling methods(1)

* Corresponding author: ukhwang@everdigm.com
1 Proactive R&D, Everdigm, Chungcheongbuk-do 365-802, Korea

Copyright © 2015, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(2,3,4,5) 대부분 해외 제품의 연구 사례로 국내 제품에 대한 연구는 거의 드물다. 본 연구에서는 AMESIM을 이용하여 DTH 천공작업의 핵심부품인 국산 DTH 해머에 관한 표준 모델을 개발하여 DTH 해머의 개발 및 실험비용의 절감에 실제적인 도움이 되고자 하였다.

2. 모델링

2.1 DTH 해머의 구조

DTH 해머는 각 제조사 별로 구조 및 동작 원리가 서로 상이하다. 본 논문에서는 국내 대표적인 DTH 해머를 기준으로 연구를 진행하였다. 기준이 된 DTH 해머의 구조는 다음과 같다. 드릴 튜브와 연결되는 백헤드, 압축된 에어를 단속하는 체크밸브, 왕복운동을 하는 피스톤, 피스톤의 타격 에너지를 암반에 전달하는 비트 에어의 유동을 제어하는 디스트리뷰터와 실린더, 그리고 이러한 부품을 보호하며 피스톤 운동을 안내하는 웨어슬리브로 구성되어 있다. 이것에 대한 개략도가 Fig. 2에 나타나 있다.

2.2 DTH 해머의 작동 원리

DTH 해머의 동작은 크게 4 step으로 구분될 수 있으며, 각 개념도가 Fig. 3에 나타나 있다.

Step 1에서 피스톤은 초기에 비트와 접촉한 상태로 하단에 위치한다(그림에서 우측방향). 백헤드에서 에어가 유입되고 체크 밸브를 거쳐 대부분은 웨어슬리브 중간 V_{IN} 챔버로 고압의 압축 에어가 공급된다. 소량은 체크 밸브와 디스트리뷰터의 흡동면을 통해 V_T 로 직접 유입된다. V_{IN} 으로 공급된 고압의 에어는 하단포트를 거쳐 V_L 챔버에 불어넣어지게 된다. 그러면, 피스톤의 수압면 차이에 의해 피스톤은 상승(그림에서 좌측 방향)한다. 그때 V_T 챔버는 디스트리뷰터와 피스톤상단이 빠져있어, 모든 에어는 피스톤과 비트의 가운데 뚫려있는 유로를 따라 빠져나가게 된다. 따라서 V_T 챔버는 저압으로 유지된다. 피스톤이 상승함에 따라 V_{IN} 을 거쳐 V_L 챔버로 들어오는 하단 포트는 닫히게 된다.

Setp 2에서 하단 포트가 닫히더라도 피스톤은 관성에 의해 상승한다. 결과적으로 디스트리뷰터는 피스톤 상단과 결합되며, V_T 에서 피스톤-비트의 메인 유로를 빠져나가는 길이 차단된다. 이로 인하여 V_T 는 밀폐되고 압축이 시작된다. 또한 피스톤 하단은 베어링에서 나와 하단의 V_L 챔버가 개방되기 시작하며,

동시에 저압으로 전환되기 시작한다. 이로 인하여 피스톤의 상승 속도는 점차 감소한다.

Setp 3에서 피스톤은 관성에 의해 계속 상승하여 최종적으로 상단의 포트를 열게 되며, 고압의 에어가 V_T 에 직접 공급 된다. 또한 V_L 챔버의 에어는 완전히 빠져나가 저압이 되며, 피스톤은 하강을 시작한다.

Setp 4에서 피스톤이 하강을 하게 되면 디스트리뷰터와 피스톤 상단의 결합이 해제된다. 그로 인하여 V_T 챔버는 개방되며 압축 에어가 피스톤-비트의 메인 유로를 거쳐 빠져나오게 되어 압력이 낮아지게 된다. 또한 피스톤 하단이 베어링과 결합되어 V_L 챔버는 밀폐되어 압력이 상승하게 된다. 따라서 피스톤의

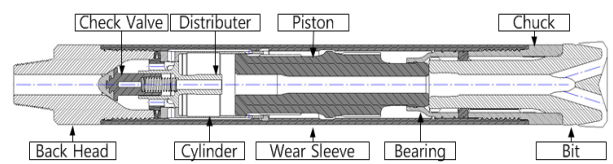


Fig. 2 Structure of DTH hammer

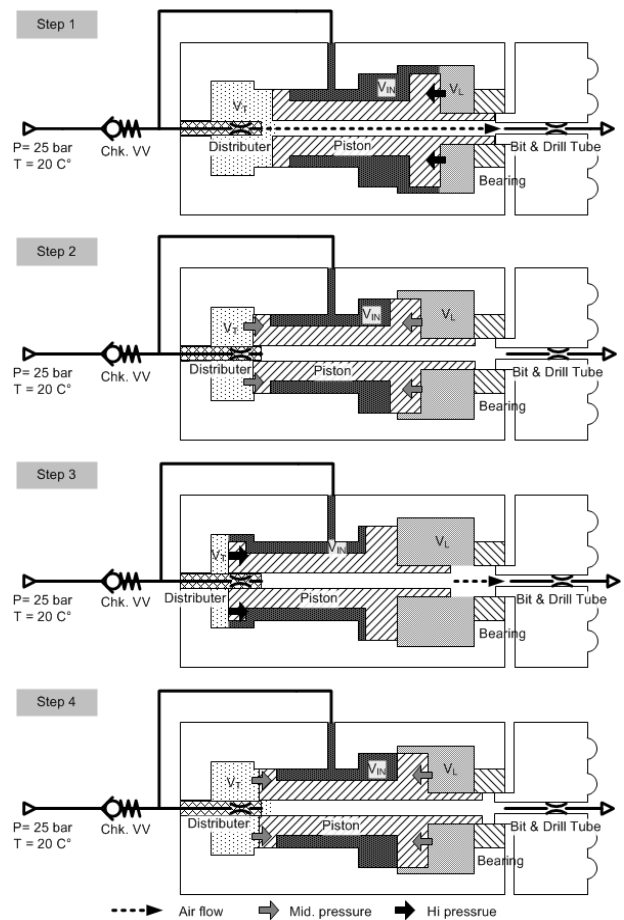


Fig. 3 Motion of DTH hammer

하강속도는 점차 감소한다. 그러나 관성과 중력의 영향으로 피스톤은 비트를 최종적으로 타격하게 되고

Step 1의 상태로 돌아가게 된다.

2.3 DTH 해머 모델링

일반적으로 DTH 리그의 에어 컴프레셔는 일정한 유량을 지속적으로 공급하며, 회로의 최대 압력은 릴리프 밸브로 제어된다. 시뮬레이션은 DTH 리그 컴프레셔가 정상상태 조건이 된 것으로 가정하여, 에어가 일정한 압력과 온도를 가지고 입력되는 것으로 가정하였으며, 이를 메인 밸브로 제어하여 DTH 해머에 공급하는 것으로 하였다. 시뮬레이션 초기에 과도응답을 고려하여 0.1초의 안정화 시간 이후 밸브를 작동시켜 DTH 해머에 에어를 공급하였다. DTH 해머는 지하 수십~수백 미터 이하에서 천공이 가능하므로, 이를 반영할 수 있는 에어 튜브 및 천공구멍을 파이프 모델링 하여, 필요 시 이를 반영할 수 있도록 하였다.

DTH 해머의 타격수는 비트 및 암반 특성에 영향을 받는다. 본 논문에서 이를 스프링-댐퍼 모델로 단순화하였다. Stiffness는 암반의 강성에 해당하는 값¹⁾을 이용하였으며, Damping값은 피스톤 상사점에 관여하나, 이론적으로 정확히 얻는 것이 어려움이 있어, 필드테스트 후 제품을 분해하여 마모위치 측정을

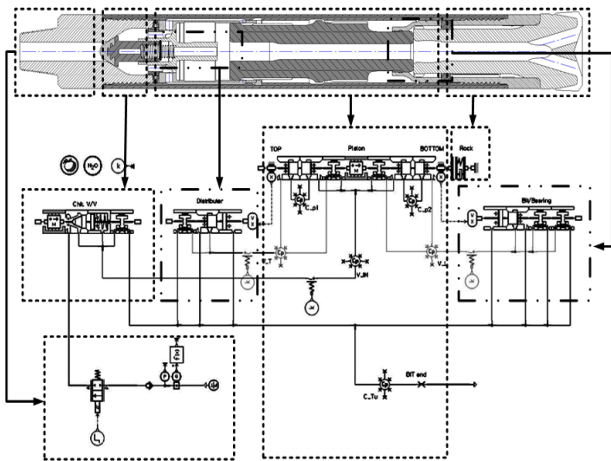


Fig. 4 Simulation model of DTH hammer

Table 1 Simulation parameter

| | | |
|-----------------------|--------|-------|
| Simulation time | 1 | [sec] |
| Sampling time | 0.0001 | [sec] |
| Input air pressure | 25 | [bar] |
| Input air temperature | 20 | [°C] |
| Ground temperature | 17 | [°C] |

통해 스트로크를 측정하고 여기에 대응 하도록 입력하였다.

DTH 해머는 공압기기이므로, 시뮬레이션 또한 이를 반영하여 작성되어야 하며, 공압모델의 경우 기체 방정식에 의해 각 부분 챔버의 부피변화와 온도변화는 밀접한 상관관계를 가진다. DTH 해머의 경우 지하수 또는 플러싱에어 등의 영향으로 표면 냉각이 이루어지는 것을 고려할 필요가 있다. 시뮬레이션에서 냉각에 관한 고려가 없는 경우, 에어 압력 또는 체적의 변화로 발생한 열이 발산되지 못하므로, 각 챔버에서 과도하게 팽창되어 에어소모량은 실제보다 작게 계산된다. 본 논문에서는 이를 고려하여 DTH 해머의 평균 작동온도를 유지할 수 있도록 냉각요소를 추가하였다. 이때 모델이 Fig. 4와 Table 1에 나타나있다.

3. 시뮬레이션 검증

앞서 구성된 모델은 DTH 리그에 장착돼 정상상태 상황에서 유량을 공급받는 것을 가정한 모델로 DTH 리그의 실제 동작 조건의 근사로는 적합하나, 중요 변수인 에어소모량을 측정하는 실험이 어렵다. 이에 관한 시뮬레이션 모델의 검증을 위해 간이 실험 장치를 Fig. 5와 같이 구성하였다. 밀폐된 에어탱크를 이용하여 에어소모량과 타격수를 실험과 비교하여,

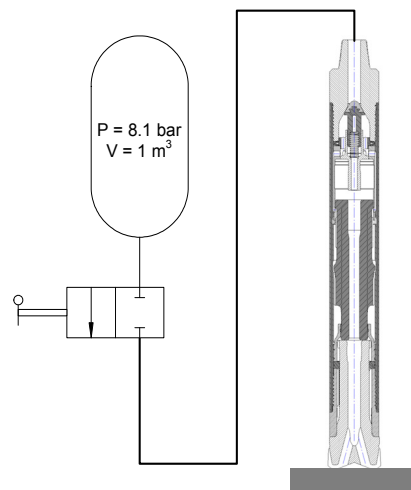


Fig. 5 Simplified test of DTH hammer

Table 2 Test condition of DTH hammer

| | | |
|---------------------------|-----|-------------------|
| Test time | 120 | [sec] |
| Air tank volume | 1 | [m ³] |
| Air tank initial pressure | 8.1 | [bar] |
| Operating temperature | 20 | [°C] |

시뮬레이션의 정확성을 판단 하고자 하였다. 에어탱크는 밀폐되어 있으므로 압력 변화는 에어소모량과

비례하게 되며, 실험 전후의 압력변화의 비교로 에어 소모량의 유사성을 판단할 수 있다. 이때 실험 조건은 Table 2에 정돈되어 있다. 실험은 2분간 에어탱크의 밸브를 열어 에어 소모량과 평균 타격수를 측정하였으며, 타격부는 철재로 되어있다. 타격수의 취득은 타격이 초기 변동구간을 충분히 지나, 안정화될 수 있도록, 실험 시작 후 10초 지점에서 취득하였다. 실험시 피스톤은 웨어슬리브 내부에 있어, 실측이 어려우므로, 타격음을 샘플링하고 이를 분석하여 타격수를 측정하였다. 타격음은 노이즈가 있어 이를 노이즈 필터 및 스무딩처리 후 측정하였으며, 측정시 오차를 줄이기 위해 10여회 타격시간을 측정하여 평균값을 취득하였다.

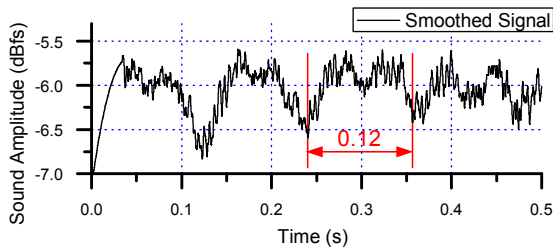


Fig. 6 Test result of Impact sound wave of DTH hammer

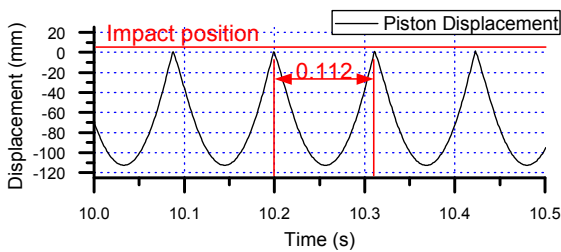


Fig. 7 Simulation result of displacement of DTH hammer piston

Table 3 Comparison of test and simulation

| | test | simulation | unit |
|--------------------|------|------------|-------|
| Final air pressure | 5.4 | 5.45 | [bar] |
| Impact rate | 500 | 535 | [BPM] |

이에 관한 결과가 Fig. 6에 제시되어 있다. 시뮬레이션에서는 피스톤 변위를 직접 취득할 수 있으므로 이를 이용하였다. 이에 관한 결과가 Fig. 7에 제시되어 있다. 두 값을 비교한 결과가 Table 3에 정돈되어 있다. 에어 소모량, 최종 압력, 타격수 등이 실험 결과와 시뮬레이션 결과가 서로 유사함을 알 수 있다.

타격수의 경우 7% 오차가 있으나, 이는 실험 시 DTH Hammer가 타격면에 완전히 밀착된 상태를 유지하지 못해 발생하는 것으로 생각된다.

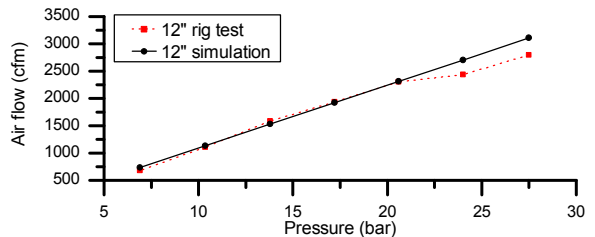
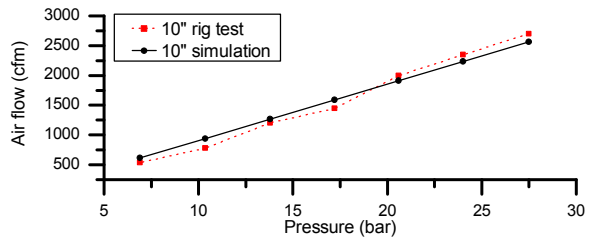
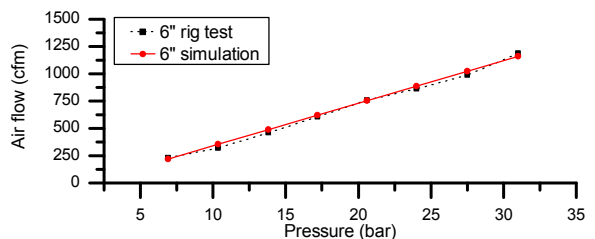
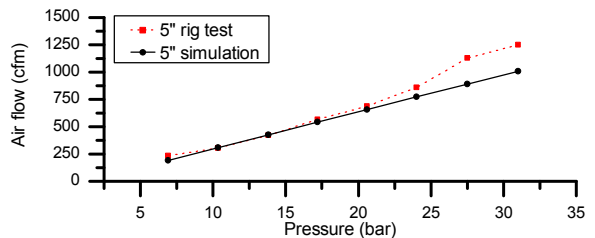
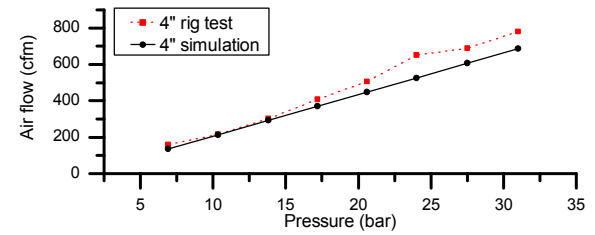


Fig. 8 Comparison of DTH rig and simulation

4. 확대적용 및 비교

완성된 DTH 해머의 모델에 4~12 인치 다양한 크기의 DTH 해머의 설계 값을 입력하여, 확대 적용하고 이를 리그 테스트 값과 비교하였다. 이에 관한 결과가 Fig. 8에 정돈되어 있다. 두 값의 비교 결과 시뮬레이션 값이 리그 테스트 값과 유사함을 확인할 수

있다. DTH 리그 값이 균일하지 못한 것은 측정 시 암반의 조성변화, 지하수 발생 등 운전 조건이 균일하지 않아 발생한 오차로 보인다. 전체적으로 두 결과는 유사한 패턴을 보이며, 시뮬레이션 값은 평균 6% 이내 오차를 가지고 있었다. DTH 리그의 운전조건 편차가 큰 부분을 제외하는 경우 4% 정도의 오차를 가지게 되어, 본 논문에서 제시한 시뮬레이션 모델의 결과가 신뢰도가 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 개발 비용과 시간을 감소시키기 위해 실험을 대체할 목적으로 DTH 해머의 시뮬레이션 모델을 연구하였다. DTH 해머 작동 원리를 분석하고, 시뮬레이션 프로그램을 이용한 모델을 제시하였다. 이를 실험을 통해 검증하였으며, 다양한 기종에 적용하고 필드 실험과 비교를 통해 제시된 모델의 시뮬레이션 결과를 신뢰할 수 있음을 증명하였다. 차후 본 모델을 이용하여 DTH 해머의 성능향상 및 최적화에 관한, 추가적인 연구를 진행할 예정이다.

References

- 1) R. R. Tatiya, Surface and Underground Excavations, Balkema, pp. 62~63, 2009.
- 2) Shin D. Y. and Song C. H. , "Performance Optimization of Down-the-Hole Hammer Using Taguchi Method", Journal of KSME A, Vol 36, No. 1, pp. 109~116, 2012
- 3) Bu, C., Qu, Y., Cheng, Z. and Liu, B., "Numerical Simulation of Impact on Pneumatic DTH Hammer Percussive Drilling," Journal of Earth Science, Vol. 20, No. 5, pp.868~878, 2009.
- 4) Chiang, L. E. and Elias, D. A., "Modeling Impact in Down-The-Hole Rock Drilling," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37, pp.599~613, 2000.
- 5) Kim, K. Y., Kim, C. Y. and Kim, K. S., "Assessment of Hydraulic Drilling Data on Homogeneous Rock Mass," Journal of the Korea Society for Rock Mechanics, Tunnel & Underground Space, Vol. 18, No. 6, pp.480~490., 2008.