

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.6.603>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 실험설계법을 이용한 다운더홀(DTH) 해머의 최적화

황운규<sup>\*†</sup>, 임종혁<sup>\*\*</sup>

\* (주)에버다임 기술연구소 선행개발팀, \*\* (주)에버다임

### Optimization of Down-the-Hole Hammer Using Experimental Design Method

Un Kyoo Hwang<sup>\*†</sup> and Jong Hyuk Lim<sup>\*\*</sup>

\* Dept. of Proactive R&D, Everdigm Corp.,  
\*\* Everdigm Corp.

(Received January 15, 2016 ; Revised March 24, 2016 ; Accepted April 14, 2016)

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

**초록:** 광물시장 성장과 함께, 고효율 DTH 해머 필요성이 함께 증가되고 있다. 그러나 DTH 해머는 지하 천공이라는 작동조건의 특성 때문에, 실험 데이터의 직접 취득이 어렵고, 실제 테스트를 하기 위해서는 DTH 드릴 리그와 많은 운용비를 필요로 한다. 본 연구에서는 이러한 DTH 해머의 제품개발 시간과 비용의 문제점을 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 해결하고자 하였다. 이전 연구에서 DTH 해머구조와 동작 원리를 분석하고, 시뮬레이션을 이용한 표준 모델을 제시하고, 그것을 실험과 비교 검증하였다. 이를 바탕으로 본 논문에서는 실험설계법을 이용하여 DTH 해머의 타격에너지와 효율에 관한 제어인자를 도출하고, 이에 관한 최적화를 시도하였다. 그 결과 타격에너지를 14.9% 효율은 3.3% 높이는 결과를 얻었다.

**Abstract:** Research and development of mineral-resource-related products has progressed with the increased need to develop mineral resources. The DTH hammer is a resultant product. However, owing to particular work conditions of underground drilling, it is difficult to obtain direct data on the DTH hammer. A DTH drill rig requires a significant amount of money and time for actual testing. This thesis aimed to resolve this problem by using CAE. In a previous paper, the structure of the DTH hammer and its movement were analyzed, and a standard model based on simulation was proposed. Then, experimentation and comparison verification were conducted. In this paper, by using an experimental design method, we derived a control factor of the impact force and efficiency of the DTH hammer and attempted to optimize the design. As a result, the impact energy increased by 14.9%, and the efficiency increased by 3.3%.

- 기호설명 -

$C_t$  : 수정항  
 $df$  : 자유도  
 $e$  : 오차  
 $E_n$  : 타격 에너지 [J]  
 $E_f$  : 효율 [%]  
 $F_0$  : F-검정 값  
 $L_{pis}$  : 피스톤 스트로크 [mm]

$M_{pis}$  : 피스톤 질량 [kg]  
 $N$  : 타격수 [BPM]  
 $P_{in}$  : 공급압력 [bar]  
 $R_{st}$  : 최대스트로크 비율 [%]  
 $S$  : 변동  
 $St$  : 총변동  
 $T_{in}$  : 공급온도 [°C]  
 $T_{gr}$  : 지면온도 [°C]  
 $Q_{in}$  : 공급유량 [m<sup>3</sup>/min]  
 $V_{pis}$  : 피스톤속도 [m/s]  
 $V$  : 분산

† Corresponding Author, [ukhwang@everdigm.com](mailto:ukhwang@everdigm.com)  
©2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

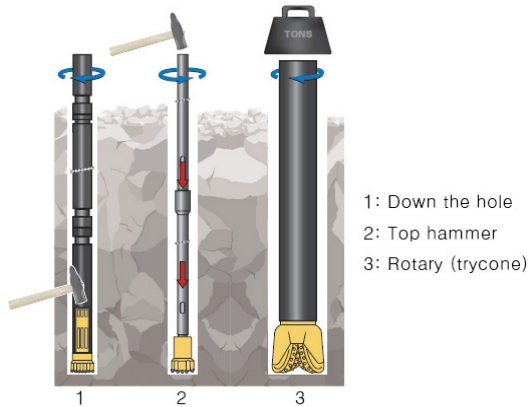


Fig. 1 Difference between drilling methods<sup>(3)</sup>

$W_{in}$  : 입력동력 [kW]

$W_{out}$  : 출력동력 [kW]

1. 서론

천공장비는 광산/광물시장의 성장과 함께 관심을 받으며 성장하고 있다. 광산/광물시장은 채굴비용의 민감성이 높아 상대적으로 지표광산장비가 선호되고 있으며, 관련 락드릴 장비의 고효율화 또한 동시에 요구되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 이러한 요구에 따라 제품개발에 관련한 연구가 계속 요구되고 있다.

이들 중 하나로 대표적 천공장비인 락드릴은 드릴리그에 부착되어 사용되며, 탑해머(Top Hammer: TH), 다운더홀(Down-the-hole: DTH), 로터리 드릴방식이 대표적으로 사용된다. 이는 드릴의 타격 및 구동방식에 따라 나뉘며, 이에 관한 특징이 Fig. 1에 도식적으로 나타나 있다.<sup>(3,4)</sup>

DTH 방식은 드릴튜브 전체를 회전시키며 하단의 DTH 해머가 타격을 통해 암석을 파쇄하며 천공한다. 타격부가 암석에 직접적으로 닿아 있는 구조로, 드릴스트링 상단을 타격하고 드릴스트링을 통해 충격파를 암석에 전달하는 탑해머 방식에 비하여 천공깊이 증가에 따르는 드릴스트링과 체결부에서 타격에너지 손실증가가 없고, 따라서 천공 깊이의 증가에도 동일한 작업효율을 유지하는 장점으로 고심도 작업에 널리 쓰인다. 또한 타격이 없는 로터리 방식에 비하여 상대적으로 빠른 천공이 가능하다. 이러한 이유로 관정 및 광물채굴 목적으로 DTH 방식 사용이 증가하고 있다.<sup>(1)</sup>

반면 관련연구는 상대적으로 드물다. 대표적 사례로 DTH rock drilling 설계변수를 선정과 충격량-운동량 정리를 기반으로한 수치해석,<sup>(5)</sup> 암질에 따른 DTH특성 시뮬레이션 해석,<sup>(6)</sup> 다구찌 기법을 이용한 DTH 타격성능 최적화에 관한 연구<sup>(2)</sup> 등이

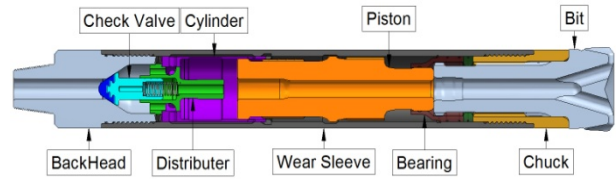


Fig. 2 Structure of DTH hammer

있으나 대부분의 연구는 시뮬레이션 및 수치해석에서 수준에서 머물러 있으며, 이를 실제실험과 비교하여 연구모델 정확도를 검증한 사례는 드물고, 실제 DTH운용 시 필수적인 DTH 리그에 관한 가정들이 고려되지 않은 연구가 대다수이다. 이로 인하여 연구결과를 제품설계 및 개발에 적용하는데 한계가 있었다.

특히 DTH 천공방식은 천공을 위한 타격부가 지하 수십~수백 미터 아래에 위치하고, 고온고압 상황에 있으며, 타격시 회전과 함께 높은 충격에너지가 발생한다. 이 때문에 작동에 관련된 변수를 직접 측정하는데 상당한 어려움이 있다. 또한 측정을 위해 DTH 리그 장비를 운용해야 하므로 시간과 비용의 소모가 크다. 이러한 DTH 해머 개발에 발생하는 어려움을 본 논문에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 해결하고자 하였다.

본 논문에서는 DTH 해머 모델의 타격에너지와 효율에 관련된 제어인자를 선정하고, AMESim프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 통해 최적화하여 이를 향상시키는 것을 목표로 하였다.

2. 모델링

2.1 DTH해머의 구조

DTH 해머는 각 제조사 별로 구조 및 동작원리가 서로 상이하다. 본 논문에서는 Everdigm 6인치 DTH 해머를 기준으로 연구를 진행하였다. DTH 해머의 구조는 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.<sup>(1)</sup>

2.2 DTH 해머의 작동 원리

DTH 해머의 동작은 크게 4 step으로 구분될 수 있으며, 각 개념도가 Fig. 3에 나타나 있다.<sup>(1)</sup>

Step 1에서 피스톤은 초기에 비트와 접촉한 상태로 하단에 위치한다(그림에서 우측방향). 백헤드에

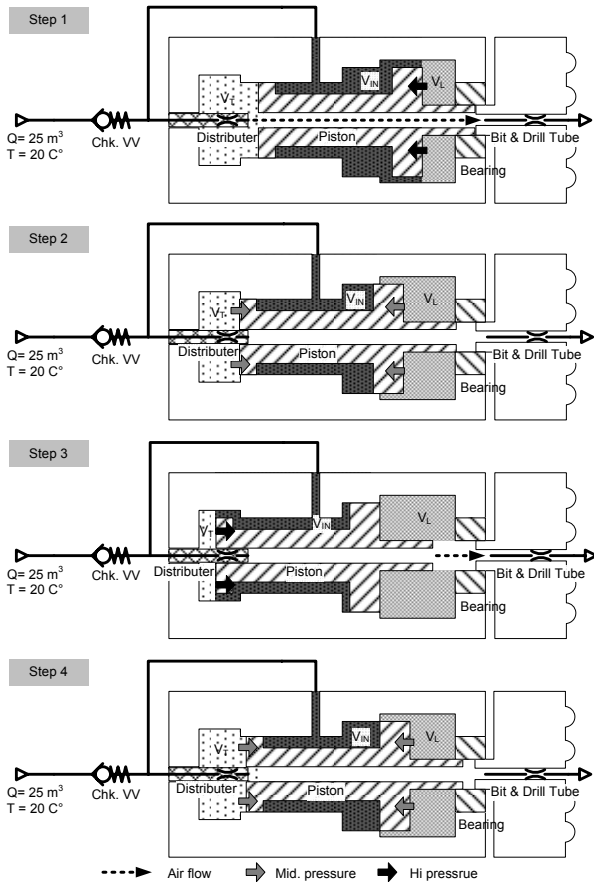


Fig. 3 Working principle of DTH hammer<sup>(1)</sup>

서 에어가 유입되고 체크 밸브를 거쳐 대부분은 웨어슬리브 중간  $V_{IN}$  챔버로 고압의 압축 에어가 공급된다. 소량은 체크 밸브와 디스트리뷰터의 습동면을 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. 그 때  $V_T$  챔버는 디스트리뷰터와 피스톤상단이 빠져 있어, 모든 에어는 피스톤과 비트의 가운데 뚫려 있는 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.<sup>(1)</sup>

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 시작

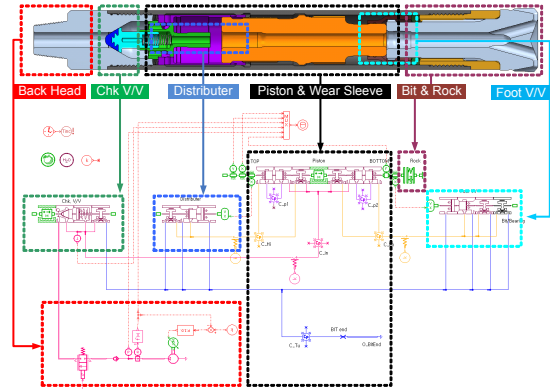


Fig. 4 Simulation Model of DTH hammer

한다. 이로 인하여 피스톤의 상승 속도는 점차 감소한다.<sup>(1)</sup>

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.<sup>(1)</sup>

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 하강속도는 점차 감속된다. 그러나 관성과 중력의 영향으로 피스톤은 비트를 최종적으로 타격하게 되고 Step 1의 상태로 돌아가게 된다.<sup>(1)</sup>

### 2.3 AMESim 모델

이전 연구에서 DTH해머의 시뮬레이션 모델을 제시하였으며, 해당 시뮬레이션 모델은 실제 DTH 리그 값과 4% 이내 오차를 가짐을 보였다.<sup>1)</sup> 본 연구에서는 이를 이용하여 국내에서 가장 많이 사용되는 6인치 제품에 대하여 최적화를 진행하기로 하였다. 이때 실제 DTH리그의 실험 조건을 반영 하도록 에어 공급조건을 DTH 리그 에어컴프레서 사용조건과 유사하게 변경하였다.

일반적으로 DTH 리그의 에어컴프레서는 장비 가동시간 단축을 위해 최대RPM으로 동작하게 설정되어 있다. 따라서 일정한 유량이 지속적으로 공급되는 구조이며, 회로의 최대 압력은 릴리프 밸브로 제어된다. 본 연구에서는 6인치 DTH해머가 장착되는 리그를 기준하므로 유량 25 m<sup>3</sup>/min을 선정하였다. 단, 시뮬레이션에서는 DTH 해머의 효

**Table 1** Operating parameters of simulation

Parameter	Value	Unit
Simulation time	3	[sec]
Sampling rate	0.0001	[sec]
$T_{in}$	20	[°C]
$T_{gr}$	20	[°C]
$Q_{in}$	25	[m <sup>3</sup> ]

**Table 2** Initial condition

Parameter	Value	Unit
$M_{pis}$	22.52	[kg]
$P_{in}$	20.99	[bar]
$V_{pis}$	10.54	[m/s]
$N$	1764.71	[BPM]
$E_n$	1250.05	[J]
$E_f$	4.20	[%]

을산출을 위해서 릴리프 밸브는 제외하였다.

시뮬레이션은 3초를 수행하였으며, 시뮬레이션 초기에 과도응답을 고려하여 데이터 취득은 2.5초~3초까지 데이터를 취득하였다. 본 연구에 사용된 시뮬레이션 모델은 Fig.4에 나타나 있다.

### 3. 최적화

국내에서 가장 많이 사용되는 6인치 제품에 대하여 최적화를 진행하면서 시뮬레이션에 사용한 변수들이 Table 1에 정리되어 있다.

이를 이용한 초기 DTH 해머 시뮬레이션 결과가 Table 2에 정리되어 있다. 이들 중 DTH 해머와 리그의 천공성능에 영향을 많이 주는 타격에너지와 효율을 본 연구에서 최적화 대상으로 선정하고, 이를 개선하는 것을 목표로 하였다.

#### 3.1 목적함수 선정 및 제한조건

타격에너지는 DTH해머의 성능지표 중 하나로 사용되며, 운동에너지 식을 이용하여 식 (1)과 같이 계산할 수 있다. 타격에너지를 증가시키기 위해서는 제품크기의 제약이 있는 피스톤 질량을 조절하기보다는 타격속도를 증가시키는 것이 상대적으로 쉽다. 단, 타격속도 증가 시 작동압력이 같이 상승하는 특성이 있어 주의가 필요하다. DTH해머의 효율식은 식 (2)와 같이 계산할 수 있다. 타격에너지 또는 타격수를 늘리면 이를 증가시킬 수 있다.

**Table 3** Objectives

Parameter	Objective	Unit
$E_n$	Maximize	[J]
$E_f$	Maximize	[%]
$P_{in}$	Under 24	[bar]
$R_{st}$	Under 85	[%]

**Table 4** Level of design parameters

Variation		Level				
		1	2	3	4	5
Distributer length [mm]	A	-15	-7.5	0	7.5	15
Upper port position [mm]	B	-15	-7.5	0	7.5	15
Lower port length [mm]	C	-15	-11.25	-7.5	-3.75	0
Piston upper diameter [mm]	D	-1	-0.5	0	0.5	1
Upper chamber volume [%]	E	90	95	100	105	110
Lower chamber volume [%]	F	90	95	100	105	110

$$E_n = \frac{1}{2} M_{pis} V_{pis}^2 \quad [\text{J}] \quad (1)$$

$$E_f = \frac{W_{out}}{W_{in}} \times 100 = \frac{E_n \times N}{(P_{in} \times 10^5) \times Q_{in}} \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

이때, 타격수는 피스톤 상, 하단의 압력과 각 포트 언더랩 길이 등이 복합적으로 연관되어 나타난다. 타격에너지와 효율 두 가지 모두 값이 클수록 DTH해머 성능이 좋아지므로 망대특성 함수로 설정하였다.<sup>(7)</sup>

시뮬레이션에서는 릴리프 밸브를 고려하지 않았으나, 실제 DTH리그에서는 일반적으로 25 bar에서 릴리프 밸브가 장착이 된다. 본 논문에선 안전율을 감안하여 평균 작동압력 24 bar 이하가 되도록 하고, 또한 피스톤이 디스트리뷰터와 충돌하지 않도록 최대스트로크를 85% 이내로 하였다. 이들 제한조건은 Table 3에 정돈되어 있다.

#### 3.2 설계변수

제어인자를 찾기위해 분석 방법으로 시험계획법을 선택하고 이 중 직교배열법을 이용하였다.

앞서 DTH 해머의 작동 원리에서 피스톤 거동에 관련되는 부분은 디스트리뷰터, 상단포트, 하단포트의 언더랩(또는 오버랩)에 의해 피스톤 운동

Table 5  $L_{25}(5^6)$  Simulation result

No.	A	B	C	D	E	F	$P_{in}$	$N$	$V_{pis}$	$L_{pis}$	$E_n$	SN Ratio of $E_n$	$E_f$	SN Ratio of $E_f$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]	[bar]	[BPM]	[m/s]	[mm]	[J]	[dB]	%	[dB]
1	-15.00	-15.00	-15.00	-1.00	90	90	20.24	1846.15	9.65	80.31	1049.42	60.42	3.83	11.66
2	-15.00	-7.50	-11.25	-0.50	95	95	20.43	1769.91	10.25	88.65	1183.68	61.46	4.10	12.26
3	-15.00	0.00	-7.50	0.00	100	100	20.53	1704.55	10.66	95.93	1280.48	62.15	4.25	12.57
4	-15.00	7.50	-3.75	0.50	105	105	20.58	1648.35	10.96	102.67	1352.50	62.62	4.33	12.74
5	-15.00	15.00	0.00	1.00	110	110	20.58	1595.74	11.18	108.93	1407.05	62.97	4.36	12.80
6	-7.50	-15.00	-11.25	0.00	105	110	18.70	1769.91	9.65	81.42	1048.32	60.41	3.97	11.97
7	-7.50	-7.50	-7.50	0.50	110	90	19.74	1769.91	10.06	85.46	1139.50	61.13	4.09	12.23
8	-7.50	0.00	-3.75	1.00	90	95	21.68	1759.53	10.88	95.26	1332.33	62.49	4.33	12.72
9	-7.50	7.50	0.00	-1.00	95	100	21.87	1780.42	11.08	99.90	1381.88	62.81	4.50	13.06
10	-7.50	15.00	-15.00	-0.50	100	105	23.34	1754.39	11.44	98.62	1474.62	63.37	4.43	12.94
11	0.00	-15.00	-7.50	1.00	95	105	19.83	1834.86	9.93	80.83	1111.04	60.91	4.11	12.28
12	0.00	-7.50	-3.75	-1.00	100	110	20.12	1780.42	10.23	86.13	1178.74	61.43	4.17	12.41
13	0.00	0.00	0.00	-0.50	105	90	21.13	1785.71	10.45	88.99	1229.97	61.80	4.16	12.38
14	0.00	7.50	-15.00	0.00	110	95	22.57	1829.27	10.94	88.54	1346.69	62.59	4.37	12.80
15	0.00	15.00	-11.25	0.50	90	100	24.56	1807.23	11.71	99.24	1542.74	63.77	4.54	13.14
16	7.50	-15.00	-3.75	-0.50	110	100	19.77	1880.88	9.61	75.21	1039.93	60.34	3.96	11.95
17	7.50	-7.50	0.00	0.00	90	105	21.19	1846.15	10.25	83.91	1183.44	61.46	4.12	12.31
18	7.50	0.00	-15.00	0.50	95	110	22.75	1904.76	10.65	82.55	1277.33	62.13	4.28	12.62
19	7.50	7.50	-11.25	1.00	100	90	23.91	1892.74	11.14	87.58	1397.61	62.91	4.43	12.92
20	7.50	15.00	-7.50	-1.00	105	95	23.95	1834.86	11.28	91.86	1432.82	63.12	4.39	12.85
21	15.00	-15.00	0.00	0.50	100	95	21.01	1960.78	9.55	72.06	1026.06	60.22	3.83	11.66
22	15.00	-7.50	-15.00	1.00	105	100	22.57	2020.20	10.11	71.73	1151.29	61.22	4.12	12.30
23	15.00	0.00	-11.25	-1.00	110	105	22.61	1948.05	10.41	77.22	1220.82	61.73	4.21	12.48
24	15.00	7.50	-7.50	-0.50	90	110	23.99	1898.73	10.94	86.25	1348.12	62.59	4.27	12.60
25	15.00	15.00	-3.75	0.00	95	90	25.28	1898.73	11.07	88.25	1380.08	62.80	4.15	12.35

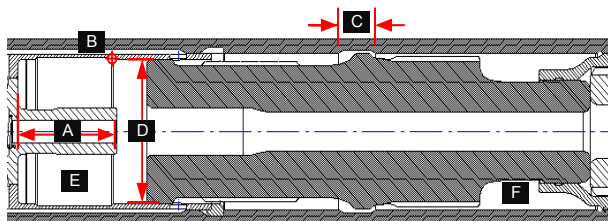


Fig. 5 Design parameters

타이밍이 결정되며, 이때 상단과 하단의 챔버크기는 압축 시 압력에 영향을 주며, 이들 또한 피스톤 거동과 관련된다. 따라서 설계도면에서 DTH 해머 거동과 관련된 설계변수를 다음의 6개로 정

돈하였다. A-디스트리뷰터 길이, B-상단포트 위치, C-하단포트 길이, D-피스톤 상단 지름, E-상단챔버 체적, F-하단챔버 체적으로 정돈하였으며, Fig. 5에 이를 나타나 있다. 각 인자들은 초기값을 기준으로 제작가능한 설계최대~최소값을 5수준으로 정돈하여 Table 4에 정리하였다. 5수준의 6개 인자를 가지는 시험계획법이므로 시뮬레이션은  $L_{25}(5^6)$ 의 직교배열을 이용하였다.<sup>(7)</sup> 이 결과가 Table 5에 정리되어 있다.

### 3.3 제어인자 선정

DTH해머의 타격에너지에 영향을 주는 제어인

**Table 6** Analysis of variance for S/N ratio of impact energy

Factor	S	df	V	F <sub>0</sub>
A	0.44	4.00	0.11	2.53
B	23.71	4.00	5.93	135.29
C	0.11	4.00	0.03	0.63
D	0.16	4.00	0.04	
E	0.50	4.00	0.13	2.87
F	0.19	4.00	0.05	
e	0.35	8.00	0.04	
Ct	95959.30			
St	25.11			

**Table 7** Analysis of variance for S/N ratio of efficiency

Factor	S	df	V	F <sub>0</sub>
A	0.37	4.00	0.09	10.67
B	3.00	4.00	0.75	87.01
C	0.05	4.00	0.01	
D	0.12	4.00	0.03	3.62
E	0.02	4.00	0.00	
F	0.25	4.00	0.06	7.39
e	0.07	8.00	0.01	
Ct	3893.91			
St	3.81			

자를 선정하기 위해, Table 5 결과를 이용하여 영향성 분석을 수행하였다.<sup>(7)</sup>

타격에너지에 관한 분산분석 결과가 Table 6에 정리되어 있다. Table 6에서 설계인자 중, 변동(S)의 크기가 가장 작은 D와 F를 풀링시켜 F 검정을 하였다. 일반적으로 F<sub>0</sub> 값이 2 이상인 경우 어느정도 유의한 인자로 판단할 수 있다.<sup>(7)</sup> 분석결과 B가 가장 영향이 큰 것으로 나타났다. 그 다음으로 A와 E가 다소 영향이 있는 것으로 나타났다. C, D, F는 유의하지 않는 것으로 분석되었다.

다음으로 효율에 관한 분산분석 결과를 Table 7에 정리하였다. 효율 분석결과, 타격에너지와 유사한 성격의 결과를 얻을 수 있었다. 이전과 같은 방식으로 Table 7에서 설계 인자 중, 변동(S)의 크기가 가장 작은 D와 F를 풀링시켜 F 검정을 하였다. 이 결과 B가 가장 영향이 큰 것으로 나타났으며, 다음으로 A > F > D 순으로 영향이 있는 것으로 나타났다. C, E는 유의하지 않는 것으로 분석되었다. 타격에너지, 효율에 동시에 영향을 주는 제어인자는 B > A로 나타났다. D, E, F는 한쪽에만 유의한 영향이 있으며, C는 양쪽 모두 영향이 적은 것으로 나타났다.

**Table 8** Factor level analysis of impact energy

Level	A	B	C	D	E	F
1	309.6	302.3	309.7	309.5	<b>310.7</b>	309.1
2	310.2	306.7	<b>310.3</b>	309.6	310.1	<b>309.9</b>
3	<b>310.5</b>	310.3	309.9	309.4	310.1	310.3
4	310.0	313.5	309.7	309.9	309.2	310.1
5	308.6	<b>316.0</b>	309.3	<b>310.5</b>	308.8	309.5
Range of level	1.9	13.7	1.0	1.1	2.0	1.2
Contribution ratio[%]	9.2	65.4	4.9	5.3	9.4	5.9

**Table 9** Factor level analysis of efficiency

Level	A	B	C	D	E	F
1	62.0	59.5	62.3	62.5	62.4	61.5
2	62.9	61.5	<b>62.8</b>	62.1	<b>62.6</b>	62.3
3	<b>63.0</b>	62.8	62.5	62.0	62.5	<b>63.0</b>
4	62.7	<b>64.1</b>	62.2	62.4	62.2	62.7
5	61.4	<b>64.1</b>	62.2	<b>63.0</b>	62.3	62.4
Range of level	1.6	4.6	0.6	1.0	0.3	1.5
Contribution ratio[%]	16.6	47.6	6.3	10.5	3.5	15.5

### 3.4 최적화

확정된 제어인자를 이용하여 타격에너지와 효율에 관하여 최적화를 수행하였다. 앞서 기술한 대로 타격에너지와 효율 값은 클수록 유리하므로, Table 5에 망대특성을 적용하여 S/N비에 관한 인자 수준별 통계분석을 하였다.<sup>(7)</sup>

타격에너지에 관한 결과가 Table 8에, 효율에 관한 결과가 Table 9에 정리되어 있다. 두 결과에서 타격에너지와 효율에 가장 큰 영향을 주는 인자 B는 B<sub>5</sub>로, A는 A<sub>3</sub>으로 선택이 가능하다. C는 영향성이 적어 제작성을 고려하여 C<sub>3</sub>를 선택하였다. D, E, F의 경우는 타격에너지와 효율을 동시에 만족하는 값이 없어 특정수준의 확정은 어렵지만 인자 값의 증감에 대한 방향성이 확인 되므로, 이를 통해 시뮬레이션 경우의 수를 줄여 전체시뮬레이션을 수행하였다. A<sub>3</sub>, B<sub>5</sub>, C<sub>3</sub>값을 고정하고 D<sub>3</sub>~D<sub>5</sub>, E<sub>1</sub>~E<sub>3</sub>, F<sub>1</sub>~F<sub>3</sub>에 대하여 전체 시뮬레이션을 수행하였다. 이에 관한 결과가 Table 10에 정리되어 있다. 이 결과 중 제한조건인 평균작동압력과 최대스트로크 비율을 만족하지 못하는 결과를 제외하고, 이를 타격에너지 순으로 정돈한 결과가 Table 11에 정리되어 있다. 이 결과 E 경우 E<sub>3</sub>만 적합한 것으로 나타났다. F의 경우 F<sub>1</sub> > F<sub>2</sub> > F<sub>3</sub> 순으로 타격에너지를 높이는 것으로 나타났으며 D는 상대적으

Table 10 Simulation result

No.	D	E	F	$P_m$	$N$	$V_{pis}$	$L_{pis}$	$R_{st}$	$E_n$	$E_f$
	[mm]	[%]	[%]	[bar]	[BPM]	[m/s]	[mm]	[%]	[J]	[%]
1	1	100	100	22.61	1724.14	11.26	100.97	81.49	1426.89	4.35
2	1	100	95	22.85	1739.13	11.28	100.40	81.04	1431.73	4.36
3	1	100	90	23.14	1749.27	11.29	99.78	80.53	1435.77	4.34
4	1	95	100	23.01	1729.11	11.36	101.83	86.51	1451.92	4.36
5	1	95	95	23.27	1749.27	11.37	101.20	85.98	1456.38	4.38
6	1	95	90	23.56	1764.71	11.39	100.53	85.41	1460.25	4.37
7	1	90	100	23.42	1744.19	11.45	102.60	92.01	1475.21	4.40
8	1	90	95	23.73	1754.39	11.46	101.95	91.43	1479.98	4.38
9	1	90	90	24.02	1796.41	11.48	101.31	90.85	1485.24	4.44
10	0.5	100	100	22.65	1724.14	11.26	100.70	81.28	1426.93	4.35
11	0.5	100	95	22.89	1739.13	11.27	100.08	80.78	1430.88	4.35
12	0.5	100	90	23.19	1754.39	11.29	99.43	80.25	1434.72	4.34
13	0.5	95	100	23.04	1734.10	11.35	101.50	86.24	1451.18	4.37
14	0.5	95	95	23.33	1749.27	11.37	100.86	85.69	1455.21	4.36
15	0.5	95	90	23.59	1764.71	11.39	100.21	85.14	1459.72	4.37
16	0.5	90	100	23.49	1744.19	11.44	102.23	91.68	1474.02	4.38
17	0.5	90	95	23.76	1759.53	11.46	101.60	91.11	1478.74	4.38
18	0.5	90	90	24.09	1775.15	11.48	100.92	90.50	1483.50	4.37
19	0	100	100	22.71	1729.11	11.25	100.34	80.99	1425.90	4.34
20	0	100	95	22.93	1739.13	11.27	99.78	80.54	1430.56	4.34
21	0	100	90	23.22	1759.53	11.29	99.13	80.01	1434.29	4.35
22	0	95	100	23.07	1739.13	11.35	101.16	85.95	1450.13	4.37
23	0	95	95	23.38	1754.39	11.36	100.50	85.38	1454.01	4.36
24	0	95	90	23.65	1769.91	11.38	99.86	84.84	1458.43	4.37
25	0	90	100	23.55	1749.27	11.44	101.86	91.34	1472.41	4.37
26	0	90	95	23.81	1764.71	11.46	101.24	90.79	1477.73	4.38
27	0	90	90	24.12	1780.42	11.47	100.59	90.21	1482.42	4.38

Table 11 Sorted result of simulation by impact energy

No.	D	E	F	$P_m$	$N$	$V_{pis}$	$L_{pis}$	$R_{st}$	$E_n$	$E_f$
	[mm]	[%]	[%]	[bar]	[BPM]	[m/s]	[mm]	[%]	[J]	[%]
3	1	100	90	23.14	1749.27	11.29	99.78	80.53	1435.77	4.34
12	0.5	100	90	23.19	1754.39	11.29	99.43	80.25	1434.72	4.34
21	0	100	90	23.22	1759.53	11.29	99.13	80.01	1434.29	4.35
2	1	100	95	22.85	1739.13	11.28	100.40	81.04	1431.73	4.36
11	0.5	100	95	22.89	1739.13	11.27	100.08	80.78	1430.88	4.35
20	0	100	95	22.93	1739.13	11.27	99.78	80.54	1430.56	4.34
10	0.5	100	100	22.65	1724.14	11.26	100.70	81.28	1426.93	4.35
1	1	100	100	22.61	1724.14	11.26	100.97	81.49	1426.89	4.35
19	0	100	100	22.71	1729.11	11.25	100.34	80.99	1425.90	4.34

로 영향이 적은 것으로 나타났다. 이때 효율은 4.36~4.34%로 큰 차이를 보이지 않으므로, 최적화 조합 선택 시 효율보다 타격에너지가 가장 우수한 조합을 선택하는 것이 유리하다고 판단되었다. 이에 따라  $D_5, E_3, F_1$ 을 선택하였다.

3.5 시뮬레이션 결과

최종적으로 선정된  $A_3, B_5, C_3, D_5, E_3, F_1$  조합에

대하여 시뮬레이션하고 이를 초기값과 비교하였다. 이 결과가 Fig. 6, 7과 Table 12에 나타나 있다.

Fig. 6에서 최적화 결과로 작동압이 제한조건 이내로 상승하며, 피스톤의 상사점이 높아짐을 확인할 수 있다. 더불어 Fig. 7에서 타격속도 상승이 이루어져 타격에너지가 증가하였다. 상사점이 높아진 만큼 스트로크가 길어졌으나, 피스톤속도 상승의 영향이 더 높아 이를 상쇄하고 효율을 더 높



Table 12 Optimized result

	Initial	Optimized	Unit	Note
$P_{in}$	20.99	23.14	[bar]	+10.2%
$N$	1764.71	1749.27	[BPM]	-0.9%
$V_{pis}$	10.54	11.29	[m/s]	+5.2%
$E_n$	1250.05	1435.78	[J]	+14.9%
$W_{out}$	36.77	41.86	[kW]	+13.9%
$W_{in}$	874.58	964.17	[kW]	+10.2%
$E_f$	4.20	4.34	[%]	+3.3%

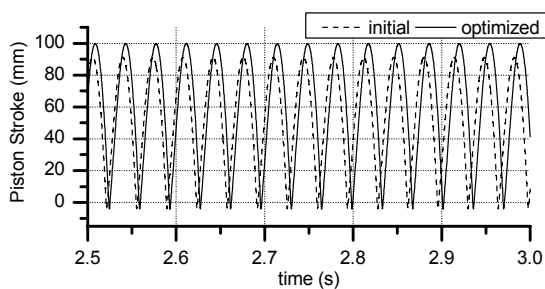


Fig. 6. Optimized result of piston displacement

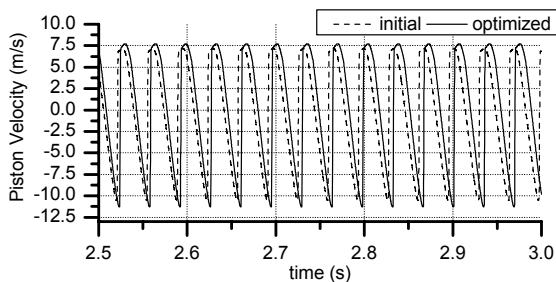


Fig. 7. Optimized result of piston velocity

이는 결과를 얻었다. 최종적으로 타격에너지는 14.9% 증가, 효율은 3.3% 상승하였다.

3.6 실험비교

최적화 결과를 이용하여 시제품을 제작하고 DTH 리그실험을 Fig. 8과 같이 수행하였다.

실험에 사용한 암반은 균일성을 확보하기 위해 시험장에 콘크리트를 타설하여 수행하였다. 실험은 암반조건과 드릴 리그의 에어컴프레셔 온도변화 등을 고려하여 3회 실험하고 이를 평균하여 값을 취득하였다. 이를 시뮬레이션과 비교하였다. 이 결과가 Table 13에 나타나 있다. 앞서 기술한대로 DTH해머는 데이터를 취득 가능한 변수가 적어 평균동작압력과 타격수만을 비교대상으로 하였다. 분석결과 실험과 시뮬레이션 값이 상당히 근접하게 나타났다.

Table 13 Comparison of Test result

	$P_{in}$ [bar]	$N$ [bpm]
Test 1	23.70	1795
Test 2	23.10	1740
Test 3	23.25	1730
Average of test	23.35	1755
Simulation	23.14	1749.27
Error	-0.90 %	-0.30 %



Fig. 8. DTH rig test

4. 결 론

본 연구에서는 고효율 DTH 해머 제품개발시 다르게 되는 실험에 대한 막대한 시간과 비용을 시뮬레이션을 활용하여 해결하도록 시도하였다.

이를 위해서 DTH 해머 작동 원리를 분석하고, AMESim을 이용하여 DTH 해머의 최적화를 시도하였다. 시뮬레이션 결과에 실험설계법을 적용하여 DTH해머성능 제어인자를 찾고, 이것이 피스톤 상단포트의 위치와 디스트리뷰터 길이와 관련이 깊음을 나타내었다. 이를 망대특성을 이용한 통계 분석으로 최적화를 수행하였다.

그 결과 타격에너지는 14.9% 증가, 효율은 3.3% 높이는 결과를 얻었으며, 최종적으로 시제품제작을 이용한 실험에서도 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌  
(References)

- (1) Hwang U. K., 2015, "Modelling and Test of Down-the-Hole Hammer," *Journal of Drive and Control*, Vol. 12, No. 2, pp. 34~38.
- (2) Shin, D. Y. and Song, C. H., 2012 "Performance



- Optimization of Down-the-Hole Hammer Using Taguchi Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 1, pp. 109~116.
- (3) Markku, T., 2006, *Surface Drilling in Open Pit Mining*, Atlascopco, First Edition.
- (4) Tatiya, R. R., 2009, *Surface and Underground Excavations*, Balkema, pp. 62~63.
- (5) Chiang, L. E. and Elias, D. A., 2000, "Modeling Impact in Down-The-Hole Rock Drilling," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37, pp. 599~613.
- (6) Bu, C., Qu, Y., Cheng, Z. and Liu, B., 2009., "Numerical Simulation of Impact on Pneumatic DTH Hammer Percussive Drilling," *Journal of Earth Science*, Vol. 20, No. 5, pp.868~878.
- (7) Park, S. H., 1993, *Quality Engineering*, Minyoungsa, Seoul, pp. 165~239.