

## CFD를 이용한 굴착용 천공드릴비트의 유로 최적화에 관한 연구

송창현, 권기범, 박진영, 신대영, 조정우\*

## Optimization of Flow Path of Drill Bit Using CFD Simulation

Chang-Heon Song, Ki-Beom Kwon, Jin-Young Park, Dae-Young Shin, Jung-Woo Cho\*

**Abstract** In this study, a series of CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations carried out to evaluate the optimum design model of the internal flow path of drill bit. The Star-CCM+ code was adopted to simulate the multi-phase discharge flow of rock particles and flushing air during a drilling process. The input parameters for the flow simulation of rock particles and air were obtained from the in-situ drilling test results. After the three design factors were determined, the experimental design method (Taguchi method) was utilized to evaluate the optimum value of each factor.

**Key words** Drilling, Drill bit, CFD (Computational Fluid Dynamics), Multi-phase flow, Taguchi method

**초 록** 본 연구에서는 드릴비트 내부 유로의 최적설계를 위하여 암분유동해석을 수행하였다. 이를 위해 암분과 기체의 다상유동해석이 가능한 전산유체역학 코드인 Star-CCM+을 사용하였다. 실제 천공시험으로부터 획득한 결과값을 기체 및 암분의 해석조건으로 적용하였다. 내부 유로 설계에 관련된 핵심인자를 3가지로 결정한 후, 다구찌 기법을 활용한 실험계획법으로부터 3가지 설계인자에 대한 최적값을 조사하였다.

**핵심어** 천공, 드릴비트, 전산유체역학, 다상유동, 다구찌 기법

## 기호 설명

$\rho_f$ : Fluid density

$\rho$ : Particle density

$e$ : Total specific energy

$v_i$ : Fluid velocity to direction of  $i(i=x,y,z)$

$v_j$ : Fluid velocity to direction of  $j(j=x,y,z)$

$v_k$ : Fluid velocity to direction of  $k(k=x,y,z)$

$u'_i$ : Fluctuant fluid velocity of  $i(i=x,y,z)$

$u'_j$ : Fluctuant fluid velocity of  $j(j=x,y,z)$

$t$ : Time

$k$ : Turbulent kinetic energy

$p$ : Pressure

$p_{abs}$ : Absolute pressure

$T$ : Temperature

$C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_{\epsilon 3}, C_{\epsilon 4}$ : Coefficients of turbulence dissipation rate

$m_p$ : Particle mass

$\dot{m}_p$ : Rate of mass transfer to the particle

$r_p$ : Position of the particle

$v_p$ : Absolute velocity of the particle

$v_g$ : Grid velocity of the particle

$\sigma_k$ : Prandlt number of turbulence kinetic energy

$\sigma_\epsilon$ : Prandlt number of turbulence dissipation rate

$\delta$ : Kroneker delta

$\mu$ : Molecular viscosity

$\mu_t$ : Turbulent viscosity

**Received:** Aug. 22, 2012

**Revised:** Aug. 24, 2012

**Accepted:** Aug. 24, 2012

\***Corresponding Author:** Jung-Woo Cho

(Tel) +82536071102, (Fax) +82536071120

(E-Mail) chojw1665@gmail.com

Construction Equipment and Parts R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gyeongsan-si, Korea

### 1. 서론

신흥국의 천연자원 수요증가와 광물자원의 개발경쟁으로 인해 광산기계 산업은 세계적으로 급속히 성장하고 있다. 이에 지하자원 개발을 위한 암반 천공장비의 시장 역시 지속적으로 증가하는 추세이다(The freedonia group, 2009). 천공장비는 타격력, 가압력 및 회전력을 이용해 대상 암반을 천공하여 주로 발파공을 시공하는 장비로 타격력과 회전력의 제공방법에 따라 Rotary drilling, Down-the-Hole drilling(DTH) 및 Top hammer drilling(THD) 방식으로 구분된다.

현재 천공장비에 대한 연구사례들을 살펴보면, 암반에 따른 DTH 타격 특성을 수치해석을 통해 규명한 연구(Bu *et al.*, 2009), 시뮬레이션을 통해 DTH Hammer의 타격성능을 규명하고 최적화를 수행한 연구(Shin *et al.*, 2012) 및 회전력과 타격력을 발생시키는 천공 drifter의 유압회로 및 타격성능을 분석한 연구(Oh *et al.*, 2011) 등이 수행된 바 있다. 하지만 파쇄 암분의 배출과 관련된 드릴비트의 내부유로 설계에 대한 연구사례는 아직 조사된 바가 없다.

본 연구는 Top hammer drilling 방식에 사용되는 드릴비트를 대상으로 수행되었으며, 천공시험을 통해 얻은 다양한 크기의 암분의 분포를 다상유동이 가능한 전산유체역학에 적용하여 유로 형상에 따른 암분의 배출능력을 분석하였다. 다구찌 기법을 바탕으로 실험계획을 구성하여 유로 설계의 최적 설계값을 도출하고자 하였다.

### 2. 암반 천공 시험

#### 2.1 천공장비의 작동 원리

Fig. 1은 Top hammer drilling의 작동 과정을 설명하고 있다. 유압식 착암기는 타격력, 가압력 및 회전력 등

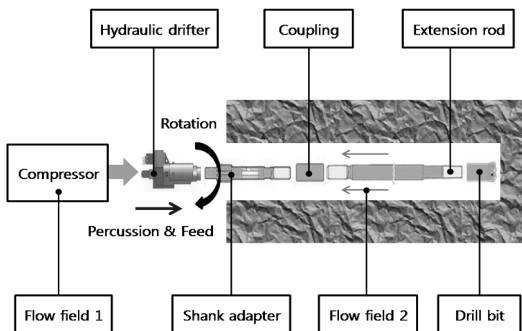


Fig. 1. Schematic of drilling system

천공에 필요한 에너지를 발생시켜 shank adapter에 전달하고 전달된 천공에너지는 extension rod와 드릴비트를 거쳐 대상 암반면을 타격하게 된다(김광영 등, 2008). 타격에 의해 1차적으로 파쇄된 암석은 회전 및 2차 타격에 의해 분쇄되어 암분이 생성된다. 타격과 회전에 의해 생성된 암분은 압축기에서 공급되는 압축공기의 순환으로 시추공 외부로 배출되는 방식으로 천공작업이 진행된다. 본 연구에서는 유동해석시 단상유동과 다상유동 조건을 구분하기 위해 flow field를 구분하였다. flow field 1에서는 압축기에서 공급되는 순수한 공기만의 유동이 발생하며, flow field 2에서는 암분과 공기가 혼합된 다상유동이 발생한다(Fig 1).

#### 2.2 암반 천공 시험

천공작업시 발생하는 암분의 분포를 유동해석의 입력 변수로 적용하기 위해 충남 아산의 화강암을 대상으로 천공 시험을 수행하였다. 천공 시험시 적용된 천공 드릴의 구동조건은 Table 1에 정리하였다.

암반 천공 시험 후 암분에 대한 형상 및 크기 분포 조사를 위해 체 거름 방법으로 mesh별 입도를 분류하였으며, 사용된 mesh에 따른 암분 중량을 Table 2에 기록하였다. Fig. 2에 나타난 암분의 체취 결과를 보면 1.36 mm의 암분이 다량 발생하였으며, 암분은 0.56 mm를 기준으로 크게 2개의 그룹이 형성되었다.

Table 1. Operating conditions of drilling test

Category	Value
Drill bit dia. [mm]	76
Impact pressure [bar]	150
Rotation [rpm]	180
Feed pressure [bar]	40
Impact rate [bpm]	2600

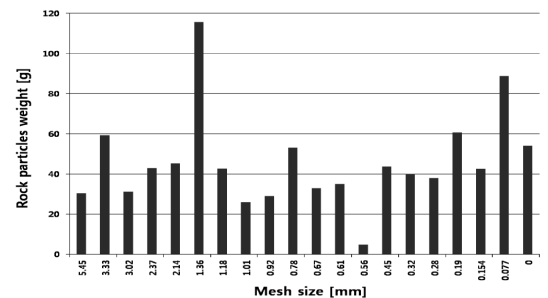
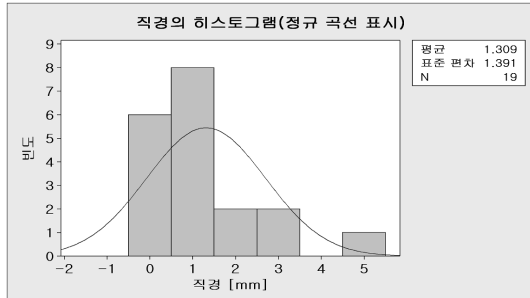


Fig. 2. Classification of rock particles

**Table 2.** Types of mesh & results of classification of rock particles

No.	Size [mm]	Weight [kg]
1	5.45	30.4
2	3.33	59.2
3	3.02	31.1
4	2.37	42.9
5	2.14	45.2
6	1.36	115.7
7	1.18	42.6
8	1.01	26.0
9	0.92	29.0
10	0.78	53.1
11	0.67	32.9
12	0.61	35.0
13	0.56	4.8.0
14	0.45	43.7
15	0.32	40.1
16	0.28	38.0
17	0.19	60.6
18	0.154	42.5
19	0.077	88.8
20	0.077 ↓	54.0



**Fig. 3.** Histogram for diameter of rock particles

**Table 3.** Results of statistical analysis

Category	Value
Mean [mm]	1.309
Standard deviation [mm]	1.391
Max. [mm]	5.45
Min. [mm]	0.077

**2.3 암분 분포 통계량분석**

Fig. 3은 히스토그램을 이용해 암분 직경에 대한 데이터 분포상태를 나타낸 그림이며, 기술 통계량의 분석 결과로 도출된 평균 및 표준편차는 Table 3과 같다. 분석된 분포 통계량(평균, 표준편차, 최대값, 최소값)은 유

동해석에서 암분 생성시 입력조건으로 적용되었다.

**3. 수치해석**

유체인 압축공기와 함께 고체인 암분이 외부로 배출되는 다상유동(Multi-phase flow) 현상을 동시에 모델링하기 위해서는 공기와 암분의 상호작용이 수치해석시 고려되어야 한다. 본 연구에서는 STAR-CCM+(Ver.7.02 0.11)를 사용하여 드릴비트 유로 형상에 따른 암분의 배출성능을 분석하기 위한 다상유동 해석을 수행하였다.

**3.1 지배방정식 및 계산 모델**

유동해석에 사용된 유체는 공기모델로, 압축성과 점성이 고려되며, 연속방정식, 운동량방정식, 상태방정식 등의 유체 지배방정식을 따른다. 식 (1)부터 (3)은 본 해석에 사용된 지배방정식을 나타내고 있다(Rhie *et al*, 1983).

- Continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

- Momentum equation

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \left(\frac{\partial}{\partial x_i}\right) \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \tag{2}$$

- Equation of state

$$\rho = \frac{P_{abs}}{RT} \tag{3}$$

본 유동해석에 적용된 난류모델은 Standard k-ε turbulence model로 압축성 난류해석에 적합한 모델이다(Lee *et al*, 2009, El Tahry, 1983). 식 (4)는 난류운동에너지 k, 식 (5)는 난류운동에너지 소산률 ε에 관한 방정식을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho u_j k - \left( \mu_f + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \\ = \mu_t (P_K + P_B) - \rho \epsilon - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t P_{NL} \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)의 우변은 난류에너지 생성항으로 첫 번째 항 P<sub>K</sub>는 전단 및 수직응력, P<sub>B</sub>는 부력, 두 번째 항은 점성

소산, 세 번째 항은 증폭 및 압축성에 의한 난류에너지 생성을 나타낸다. 마지막 항  $P_{ML}$ 은 비선형성을 고려하는 항이다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho u_j \epsilon - \left( \mu_f + \frac{\mu_t}{\sigma_p} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ &= C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left[ u_i P - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 3} \rho \frac{\epsilon}{k} \mu_t P_B \\ & - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + C_{\epsilon 4} \rho \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \mu_t P_{NL} \end{aligned} \quad (5)$$

위 수식에 사용된 Standard k- $\epsilon$  turbulence model의 경험상수  $C_{\epsilon 1}$ ,  $C_{\epsilon 2}$ ,  $C_{\epsilon 3}$ ,  $C_{\epsilon 4}$ 는 기존 선행 연구에서 제안된 값을 참고하여 결정되었으며(El Tahry, 1983, Launder and Spalding, 1974, Rodi, 1979), 해당 상수들은 Table 4에 제시하였다.

다상유동 해석시 공기와 암분의 상호작용을 고려하기 위해 Lagrangian multi-phase model을 이용하여 암분을 모델링하였다. 식 (6)부터 식 (8)은 Lagrangian multi-phase model에서 사용된 입자모델의 운동방정식, 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식을 나타낸다(STAR-CCM+ Ver. 7.11 0.11 User guide, 2011).

- Basic equation of motion

$$\frac{dr_p}{dt} = v_p - v_g \quad (6)$$

- Mass balance for a material particle

$$\frac{dm_p}{dt} = \dot{m}_p \quad (7)$$

- Momentum balance for a material particle

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_s + F_b \quad (8)$$

여기서  $F_s = F_d + F_p + F_{vm}$   
 $F_b = F_g + F_u$  이다.

$F_s$ : Particle surface force

$F_b$ : Particle body force

$F_d$ : Drag force

$F_p$ : Pressure force

$F_{vm}$ : Virtual mass force

$F_g$ : Gravity force

$F_u$ : User defined body force

### 3.2 해석 모델 및 경계조건

유동해석모델은 천공개념도(Fig. 1)를 바탕으로 drill bit, extension rod, coupling의 유동장(flow field)을 volume mesh를 생성시켜 모델링하였다. 격자의 형태는 다면체(polyhedral) 요소를 이용하였으며(Fig. 4), 생성되는 암분입자는 구형(spherical type)으로 가정하였다. 2 ton/m<sup>3</sup>의 밀도를 가지는 암분을 외부로 배출하기 위해서 압축공기의 속도는 10 m/s 이상이 필요하다고 알려져 있다(Markku, 2006). 따라서 flow field 2의 압축공기의 속도 10 m/s를 구현하기 위해 공급되는 flow field 1의 유량은 3.949 m<sup>3</sup>/min로 설정하였다(Table 4).

Table 4에는 유동해석을 위한 해석 조건, 유체 및 암분의 물성, 천공장비의 작동조건을 정리하였다. 천공시 드릴비트와 시추공 저면에 생성되는 암분의 위치, 초기 속도 등의 변수들은 실제 실험으로 규명할 수 없었다. 따라서 해석시 암분입자들은 드릴비트 하부에 균등한 밀도로 발생시켰고, 암분의 초기속도는 고려되지 않았다.

### 3.3 수치해석 결과

Fig. 5는 공기압으로 인해 시추공 위로 배출되는 암분입자들을 보여준다. 암분의 속도 및 유체의 속도를 Fig. 6에 벡터 형태로 나타내었다. 유입되는 공기는 extension rod 내부에서 일정한 속도가 유지되며, 드릴비트 내부 유로 영역에서 최고치로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 드릴비트 내부유로의 단면적이 급격히 감소하는 부근에서 유체의 속도가 최대가 되어 암분의 배출을 용이하게 하는 것으로 판단된다.

또한 드릴비트의 하부면 으로부터 멀어질수록 상대적으로 암분 및 공기의 속도가 감소한다는 것을 확인할 수 있다(Fig. 7). 이는 중력의 효과 및 유체의 마찰을 고려한 주손실(major loss)의 효과로 판단되며, 1200 mm

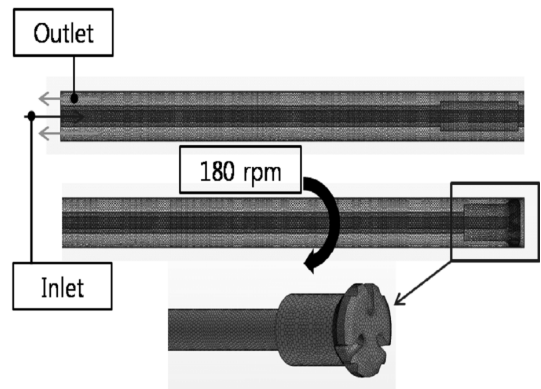
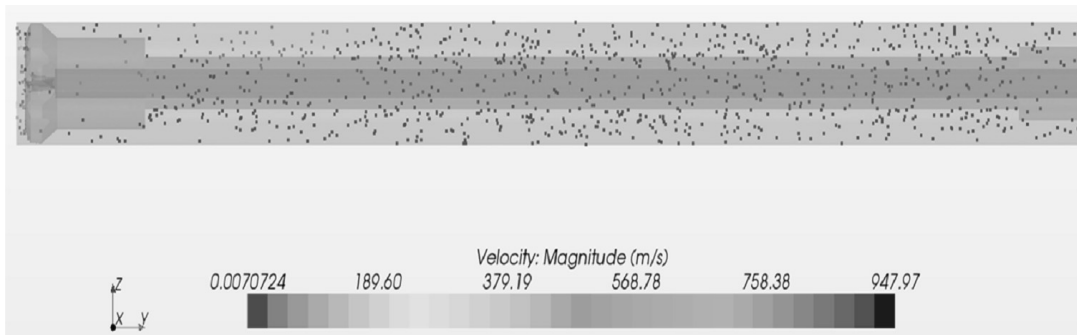


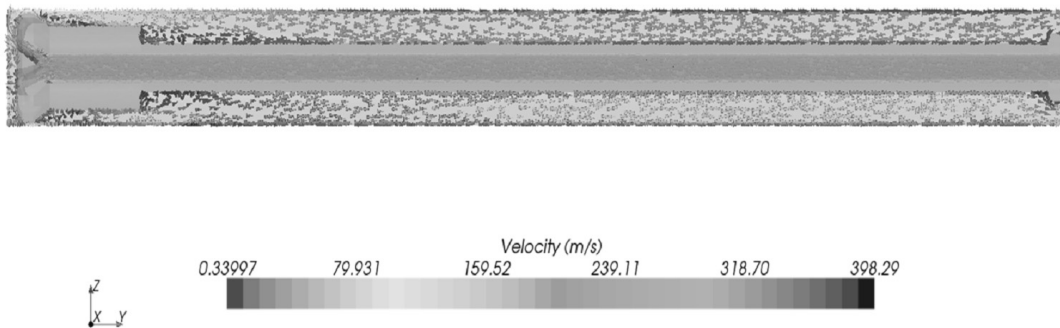
Fig. 4. Finite element model for CFD simulation

**Table 4.** Input parameter for CFD simulation

Category	Model	Parameters	Input value
Fluid properties		Fluid	Compressed Air
		Fluid density ( $\rho_f$ )	1.18415 kg/m <sup>3</sup>
		Inlet flow rate	3.949 m <sup>3</sup> /min
		Outlet	Atm. Pressure
Mechanical property		Rotation	180 rpm
Turbulence model	Standard $k-\varepsilon$	Coefficient ( $C_\mu$ )	0.09
		( $C_{\varepsilon_1}$ )	1.44
		( $C_{\varepsilon_2}$ )	1.92
		( $C_{\varepsilon_3}$ )	0.0 or 1.44
		( $C_{\varepsilon_4}$ )	-0.33
		( $\sigma_\varepsilon$ )	1.3
		( $\sigma_k$ )	1
Granite	Mechanical properties	Particle density ( $\rho$ )	2800 kg/m <sup>3</sup>
Statistics value	Normal distribution	Standard deviation ( $\sigma$ )	1.039 mm
		Mean ( $\mu$ )	1.41 mm
		Max.	5.45 mm
		Min.	0.077 mm



**Fig. 5.** Rock particle distribution



**Fig. 6.** Velocity vector plot

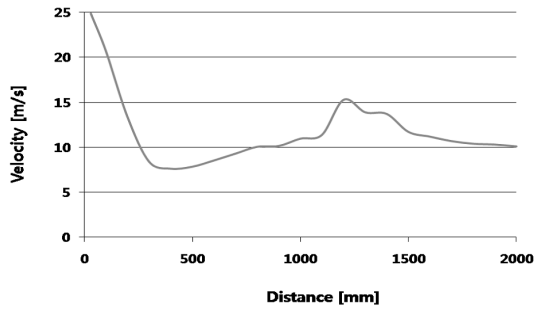


Fig. 7. Velocity in accordance with distance

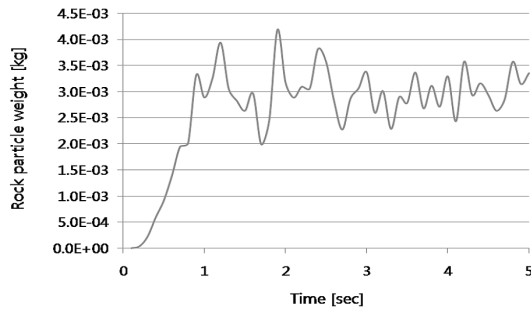


Fig. 8. Result of simulation for discharge weight

의 위치(Fig. 6의 우측 끝부분)에서 속도가 부분적으로 증가하는데, 이 부분에 coupling 부품이 위치하고 있어 유동 단면적이 부분적으로 감소하기 때문이다.

Fig. 8은 외부로 배출된 암분 중량을 나타내고 있다. 천공작업 초기에 배출량이 급격히 증가하고, 약 1초 후 일정한 수준으로 배출량이 유지되는 것으로 분석되었다. 천공작업 중 암분의 평균 배출중량은 3.0E-03 kg으로 조사되었다.

## 4. 다구찌 기법을 이용한 유로 최적화

### 4.1 다구찌 기법

다구찌 기법은 최소한의 실험을 통해 설계변수의 영향성을 평가하여 최적인자를 찾는 실험계획법이다. 본 연구에서는 이 기법을 드릴비트 설계에 적용해 내부유로 최적화에 활용하였다.  $S/N$ 비는 신호 대 잡음(Signal to Noise)을 의미하는 것으로 다음 수식 (9)와 같이 신호입력과 잡음이 주는 영향의 힘의 비율로 나타낼 수 있다(박동규, 2008, 이레테크, 2009).  $S/N$ 비는 최적화 설계시 반응변수로 분석되며 공정특성에 대한 잡음인자의 영향을 추정하여 최적수준을 도출할 수 있다.

또한 목표치에서 벗어난 정도를 손실함수로 정의하는

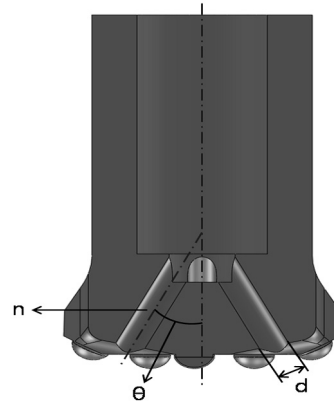


Fig. 9. Design factors of drill bit

Table 5. Level of design factor

Factor		Level 1	Level 2	Level 3
$\theta$	A	24	30	36
d	B	9.6	12	14.4
n	C	2	3	4

데, 손실함수는 특성치의 종류에 따라 망소, 망목 및 망대특성으로 구분된다. 본 연구에서는 배출되는 암분의 양이 클수록 높은 천공효율을 기대할 수 있으므로 망대특성을 적용하였다. 망대특성의  $S/N$ 비는 식 (10)을 이용해 계산하였으며,  $n$ 은 실험 횟수,  $y_i$ 는  $i$ 번째 특성값을 나타낸다.

드릴비트 유로 최적화에 대한 설계인자는 Fig. 9와 같이 유로각도( $\theta$ ), 유로직경( $d$ ), 유로개수( $n$ )등 3가지로 선정하였으며, Table 5와 같이 설계인자의 수준은 3수준으로 결정하였다.

$$S/N\text{비} = \frac{\text{Power of signal}}{\text{Power of noise}} \quad (9)$$

$$\text{망대특성 } S/N\text{비} = -10 \log_{10} \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{y_i^2} \right) \right] \quad (10)$$

### 4.2 잡음인자 선정

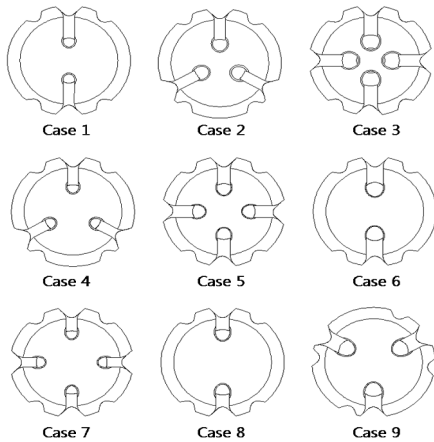
잡음 인자는 영향력이 크면서 제어할 수 없는 인자를 뜻한다. 공기압축기에서 공급되는 압축공기는 파쇄된 암분을 외부로 배출시키는 중요한 인자이므로 Table 6과 같이 공기압축기의 토출되는 유량의 변동을 잡음인자로 선정하였다. 장비의 결함이나 외부적인 요인으로 공기압축기의 오작동이 발생하는 경우, 사용자가 원치 않는 출력의 변화를 야기할 수 있기 때문이다.

**Table 6.** Selecting of noise factor

Noise Factor	Value
N1	Flow rate 10% increase
N2	Flow rate 10% decrease

**Table 7.** Orthogonal arrays and analysis results of discharge weight

No.	A	B	C	Particle weight		
				N1	N2	S/N
1	24	9.6	2	0.303754	0.220964	-11.9478
2	24	12	3	0.176351	0.076182	-20.0957
3	24	14.4	4	0.084889	0.029844	-27.9987
4	30	9.6	3	0.247951	0.151867	-14.7439
5	30	12	4	0.117304	0.042427	-24.9708
6	30	14.4	2	0.208024	0.104844	-17.5619
7	36	9.6	4	0.18397	0.085229	-19.2224
8	36	12	2	0.26305	0.170852	-13.8659
9	36	14.4	3	0.135763	0.052733	-23.1583

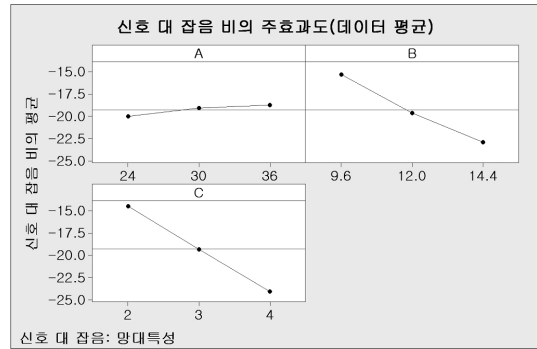


**Fig. 10.** Combination model of design factor and level

**4.3 배출 중량**

Table 7에 다루지 기법을 이용한 설계인자의 직교배열표를 정리하였다. 직교배열표 상의 각 설계인자와 수준의 조합에 근거하여 Fig. 10과 같이 9개의 비트 모델을 생성한 후 유동해석을 진행하였다. 각 수준 조합의 배출 중량에 대한 S/N비를 Table 7에 나타내었다.

Fig. 11은 배출 중량에 대한 S/N비의 주효과도를 나타내고 있으며, Table 8은 신뢰 수준 95%에서 암분배출에 대한 설계인자의 분산을 조사하기 위해 분산분석



**Fig. 11.** Main effects plot of S/N ratio for particle weight

**Table 8.** Analysis of variance for S/N ratio of particle weight

출처	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	2	2.569	2.569	1.284	1.04	0.491
B	2	87.256	87.256	43.628	35.18	0.028
C	2	138.407	138.407	69.203	55.80	0.018
오차	2	2.481	2.481	1.240		
전체	8	230.712				

S=1.11367 R-제곱 =98.92% R-제곱(수정)=95.70%

**Table 9.** Optimum level of design factor

Factor	Optimum level	Value
$\theta$	A	Level 3 36°
d	B	Level 1 9.6 mm
n	C	Level 1 2

를 수행한 결과이다. 이때 설계인자 및 전체의 제곱합 (Seq SS: sum of square)로 부터 배출중량에 대한 기여율을 계산하였다. B(유로직경)와 C(유로개수)의 기여율은 각각 37.8%와 60.0%로 암분의 배출에 큰 영향을 미치는 반면 A(유로각도)는 1.1%로 상대적으로 작은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

일정한 유량이 공급되면 유로 직경(d)이 작을수록 단면적은 감소하고 토출되는 압축공기의 속도는 증가한다. 속도의 증가는 공압에너지를 높여 암분의 배출을 용이하게 하기 때문에 유로직경이 뚜렷한 영향력을 가지는 것으로 판단된다. 또한 유로의 개수(n)가 감소하면 각각의 유로를 통과하는 유량과 유속이 증가하여 암분 배출에 유리한 것으로 판단된다. 결과적으로 암분배출에 유리한 최적의 설계조건은 유로각도( $\theta$ ) 36°, 유로직경(d) 9.6 mm, 유로개수(n)은 2개인 것으로 분석되었다(Table 9).

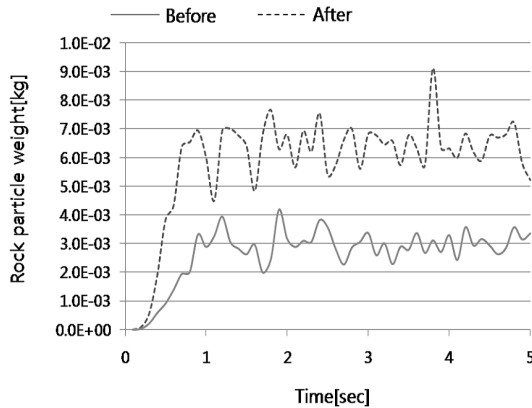


Fig. 12. Comparison of discharge weight in original model and optimized model

Table 10. Results of flow path optimization

Model	Discharge weight	Improvement ratio
Original model	0.134 kg	45.6%
Optimized model	0.294 kg	

#### 4.4 최적화 모델 검증

최적화된 설계인자의 타당성을 검증하기 위해 도출된 수준을 바탕으로 유동해석을 재수행하였다. Fig. 12는 최적화 이전의 드릴비트와 최적화된 유로를 적용한 드릴비트의 암분배출중량을 비교하고 있다. 수치해석 결과를 정리한 Table 10을 보면 유로 최적화 이전의 모델은 5초간 암분 배출중량은 0.134 kg이었으며, 유로 최적화 적용 후 0.294 kg으로 증가하여 최적화 후 45.6%의 개선 효과를 보여주었다.

하지만 본 연구의 유동해석 결과는 air flushing이 되기 전 천공 비트 하부에 발생하는 암분의 입도 분포, 발생위치, 초기속도 등 여러 천공변수를 실험적으로 규명할 수 없는 상황이기 때문에 해당 조건을 유동해석시 고려하지 못하였다. 또한 암분 생성시 개별 암분의 형상을 구형(spherical type)으로 가정하였다. 따라서 실제 천공작업과 해석상 배출 중량의 일부 차이가 발생할 것으로 예상되며 이에 대해서는 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 굴착용 천공 드릴비트의 내부유로 최적 설계를 목적으로 암분 유동 해석을 수행하고 다구찌

기법을 활용하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 다구찌 기법을 통해 암분배출에 대한 최적 설계 인자값은 유로 각도( $\theta$ ) 36°, 유로 직경( $d$ ) 9.6 mm, 유로 개수( $n$ )은 2개로 분석되었다.
2. 주효과도와 분산분석의 결과로 암분의 배출에 절대적인 영향을 미치는 설계인자 유로직경( $d$ )과 유로개수( $n$ )의 기여율은 각각 37.8%와 60.0%로 절대적인 영향을 미치는 반면에 유로각도( $\theta$ )는 기여율이 1.1%로 상대적으로 작은 영향을 미치고 있다.
3. 다구찌 기법을 이용하여 설계안을 제시한 드릴비트의 경우, 암분의 배출중량은 0.134 kg에서 0.294 kg으로 증가하여 45.6%의 개선 효과를 가진 것으로 분석되었다.

본 연구의 결과는 굴착용 드릴비트 암분배출 성능개선 및 새로운 모델 개발에 기초자료로 활용될 예정이다. 또한 본 유동해석의 타당성을 검증하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

## 사 사

본 논문은 지식경제부 기술혁신사업(10036999, 굴착용 천공 드릴 모듈)과 지식경제부 자원개발특성화대학사업의 지원을 받은 연구결과입니다.

## REFERENCES

1. The Freedonia Group Inc., 2009, World Mining Equipment.
2. Bu Changgen, Qu Yegao, Cheng Zhiqiang, Liu Baolin, 2009, Numerical simulation of impact on pneumatic DTH hammer percussive drilling, Journal of Earth Science, 20.5, 868-878.
3. Shin, D. Y., Song, C. H., 2012, Performance Optimization of Down-the-Hole Hammer Using Taguchi Method, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A 36.1, 109-116.
4. Oh, J. Y., Lee, G. H., Song, C. S., 2011, A Study on the Analysis of Hydraulic Circuit of a Rockdrill Drifter, The Korea Fluid Power System Society, Proceeding of the KFPS 2011 Spring Conference, 70-75.
5. 김광염, 김창용, 김광식, 2008, 균질 암반에서의 유압식 천공데이터 평가, 한국암반공학회지, 18(6), pp. 480-490.
6. Rhie, C. M., Chow, W. L., 1983, Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Edge Separation, AIAA Journal, 21.11, 1525-1532.
7. Lee, B. H., Yi, J. S., Kim, B. H., Chung, H. S., 2009, A Numerical Analysis on EGR Cooler of CI Engine, The Korean Society of Automotive Engineers, Annual Con-



ference, 197-202.  
 8. El Tahry, S.H., 1983,  $k-\epsilon$  equation for compressible reciprocating engine flows, AIAA Journal of Energy, 7.4, 345-353.  
 9. Launder, B.E., and Spalding, D.B. 1974, The numerical computation of turbulent flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3.2, 269-289.  
 10. Rodi, W. 1979, Influence of buoyancy and rotation on equations for the turbulent length scale, Proc 2nd Symp, on Turbulent Shear Flows.

11. STAR-CCM+ Version 7.02 0.11, User guide 2011, CD-Adapco.  
 12. Markku Terasvasara, Surface drilling in open pit mining, Atlascopco, First edition 2006.  
 13. Markku Terasvasara, Surface drilling in Quarry and Construction, Atlascopco, Third edition 2006.  
 14. 박동규, Minitab을 활용한 실험계획법, 기전연구소, 2008.  
 15. 이레테크 사업팀, 새 Minitab 실무완성, 이레테크, 2009.

**송 창 현**



2009년 한국산업기술대학교 기계설계공학부 공학사  
 2011년 한국산업기술대학교 기계시스템설계공학부 석사

Tel: 053-607-1124  
 E-mail: sch8310@kitech.re.kr  
 현재 한국생산기술연구원 건설기계부 품연구그룹 연구원

**권 기 범**



2009년 한국산업기술대학교 기계설계공학부 공학사  
 2011년 한국산업기술대학교 기계시스템설계공학부 석사

Tel: 053-607-1125  
 E-mail: kbkwon@kitech.re.kr  
 현재 한국생산기술연구원 건설기계부 품연구그룹 연구원

**박 진 영**



2006년 경북대학교 공과대학 전자전기 컴퓨터 공학사  
 2009년 경북대학교 공과대학 전자전기 컴퓨터 석사

Tel: 053-607-1122  
 E-mail: jinypark@kitech.re.kr  
 현재 한국생산기술연구원 건설기계부 품연구그룹 연구원

**신 대 영**



2000년 한양대학교 정밀기계공학과 박사

Tel: 053-607-1100  
 E-mail: dyshin@gmail.com  
 현재 한국생산기술연구원 건설기계부 품연구그룹 그룹장/ 수석연구원

**조 정 우**



2002년 서울대학교 공과대학 지구환경 시스템공학부 공학사  
 2010년 서울대학교 공과대학 지구환경 시스템공학부 박사

Tel: 053-607-1102  
 E-mail: chojw1665@gmail.com  
 현재 한국생산기술연구원 건설기계부 품연구그룹 선임연구원