

## 발파공의 천공오차와 발파정확도의 상관성에 관한 현장조사 및 계층분석기법 연구

이덕환, 최성웅\*, 김창오

### Analytic Hierarchy Process Analysis on Correlation Between Drilling Error and Blasting Accuracy

Deok-Hwan Lee, Sung-Oong Choi\*, Chang-Oh Kim

**Abstract** Drilling accuracy is known to be one of the most important factors determining blasting efficiency in mining by blast operation. Therefore analysing the causes of drilling error and preparing a countermeasure for minimizing drilling error are very important for blasting efficiency and safety. In this study, causes of drilling error are analyzed with dividing them into controllable factors and uncontrollable factors, and relationship between each cause is also comprehended through field measurement and AHP analysis. Finally, effective measures to help lower the drilling error are proposed with the results from weighting analysis for each factor.

**Key words** AHP, Drilling accuracy, Blasting accuracy, Drilling error

**초 록** 발파를 이용한 채광작업에 있어서 천공의 정확성은 발파의 효율성을 결정할 수 있는 중요한 요소 중의 하나이며, 따라서 천공오차의 발생 원인에 대한 분석과 천공오차의 발생 정도를 줄일 수 있는 대책 마련은 발파의 효율성 및 안전성 확보에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 천공오차의 발생 원인을 제어가능 요인과 제어불가능 요인으로 나누어 분석하였으며 현장조사와 AHP 분석을 통하여 천공오차를 유발하는 요인들의 영향성을 살펴보았다. 또한 이들 간의 가중치 분석을 통해 천공오차를 낮출 수 있는 효과적인 대책을 제시하였다.

**핵심어** 계층분석기법, 천공 정확성, 발파정확도, 천공오차

## 1. 서 론

최근 국내외적으로 다양한 종류의 사회간접시설에서 지하공간이 차지하는 비중이 점차 증가하는 가운데, 지하공간의 굴착을 위한 방법으로 TBM(Tunnel Boring Machine)에 의한 기계식 방법과 NATM(New Austrian Tunneling Method)과 같은 천공 및 발파에 의한 방법

이 주를 이루고 있다. 특히 우리나라의 경우 2000년대까지만 해도 도로터널의 건설공법별 비율을 살펴보면 건수로 봤을 때 전체 공사의 76.5%가 NATM 공법이고 이어서 개착식이 3.9%, ASSM 공법이 2.2%, Shield 공법이 0.3%, 기타가 17.1%를 차지하는 등 NATM 공법이 압도적으로 많았으며 철도터널에서도 43.5%로 NATM 공법이 가장 높은 비중을 차지하고 있었다(Korea Construction News, 2014). 이후 경제발전과 함께 환경친화적인 건설 필요성이 제기됨에 따라 TBM 공법의 적용성이 확대되고 있으나 여전히 NATM 공법은 터널건설 현장에서 주류를 이루고 있으며 특히 지하 및 노천 광산에서는 거의 대부분 발파를 이용한 채광을 실시하고 있기 때문에 발파에 의한 굴착은 건설 및 광업 분야에 서 상당한 부분을 차지한다고 볼 수 있다.

이와 같은 발파에 의한 굴착작업에서 대상 암반의 특

**Received:** Oct. 15, 2014

**Revised:** Oct. 23, 2014

**Accepted:** Oct. 23, 2014

**\*Corresponding Author:** Sung-Oong Choi

Tel) +82332506253, Fax) +82332556253

E-Mail) choiso@kangwon.ac.kr

Dept. of Energy & Resources Engineering, Kangwon National University, 1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do 200-701, Korea

성, 사용 폭약의 특성, 발파 패턴 및 천공 패턴 등은 발파의 효과에 영향을 미치는 매우 직접적인 요인으로 알려져 왔는데, 특히 이중에서도 발파작업을 위해 필요한 천공작업은 발파의 효과를 좌우하는 중요한 부분으로 인식되고 있으며, 발파작업 뿐만 아니라 록볼트의 타설, 지하수의 개발 및 그라우팅 시공 등에서도 필수적인 요소인 것으로 알려져 있다.

그러나 천공작업에서 발생하는 천공오차는, 도로터널의 경우 여굴 및 미굴 발생의 주요 원인이 됨과 동시에 굴착비용의 전반적인 증가를 초래하게 되며, 노천채광의 경우 천공장의 미확보에 따른 대괴의 발생, 벤치 높이의 축소 등에 의한 발파효율성의 저하 등을 야기함으로써 전반적인 채산성 하락을 유도하는 것으로 알려져 있다(Muhammad, 2009).

이렇듯 천공작업의 중요성은 굴착비용, 채수율, 그리고 현장의 안전성 등과 관련하여 매우 관심 있게 다루어져야 할 항목임에도 불구하고 이에 관한 연구가 충분히 수행되지 못하고 있으며, 국내의 경우에도 Song *et al.*(2013)에 의해 천공장비에 관한 연구 정도만 수행될 뿐 발파작업을 위한 발파공의 천공에 대한 다각적인 연구는 제대로 수행되고 있지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 천공작업 시 고려되어야 할 다양한 요소 중의 하나로서, 천공오차의 발생원인과 그 대책을 마련코자 현장조사 분석과 현장 천공작업자에 대한 계층분석을 동시에 실시하였다. 또한 이를 통하여 천공오차 발생을 유발하는 인자들 간의 영향성에 대해서도 함께 검토하였다.

## 2. 천공오차의 조사 및 분석

천공 및 발파를 이용한 굴착에서 발파공의 천공은 당초 설계된 지점에서 설계된 방향으로 정확히 이루어져야 하나, 여러 가지 원인들이 복합적으로 작용함으로 인해 본래의 설계안에서 벗어나는 천공오차가 발생하게 된다(Sinkala, 1991).

이때 천공오차의 발생은 굴착 예정선의 변화로 인하여 여굴이나 미굴을 발생시킬 수 있으며, 공간격의 변화에 의한 공저 저항선 변경으로 인해 대괴를 발생시키거나 혹은 과파쇄를 유발할 수 있다. 이는 발파를 통한 굴착 및 채광의 효율을 저감시켜 궁극적으로 비용을 증가시키는 원인으로 알려져 있다(Muhammad, 2009, ESSEM, 2010). 이러한 천공오차의 종류와 각각의 발생 원인에 대해 살펴보면 다음과 같다.

### 2.1 천공오차의 종류

천공오차란, 실제 천공된 공의 위치 및 방향이 설계된

공의 그것과 다른 경우를 통칭하는 것으로서, 일반적으로 천공장 1 m당 약 3 cm의 오차가 발생한다고 알려져 있다(Gustafsson, 1973). 그러나 최근에 와서는 발생 원인에 따라 착점오차(collaring error), 정렬불일치(misalignment), 천공편향(deviation) 등으로 천공오차를 분류하여 연구하고 있다(Anders, 2013).

첫째, 착점오차란 Fig. 1의 1번과 같이 설계상의 천공 위치와 실제 천공위치가 일치하지 않음으로 인해 발생하는 오차를 말한다. 실제 천공작업 시 10 cm내외, 혹은 천공직경 정도의 범위에서 발생하는 것이 일반적인 것으로 알려져 있으며(Muhammad, 2009), 천공장에 관계없이 일정한 오차의 크기를 갖기 때문에 발파 효율에 대한 영향성은 다른 종류의 천공오차에 비해 상대적으로 가장 낮다고 볼 수 있다. 이러한 착점오차는 굴착에 정선 마킹의 정확성, 천공장비와 작업자의 올바른 위치, 작업자의 숙련도 및 막장 벽면의 특성 등의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2003, Atlas Copco 2008). 또한 Bhandari(1997)는 정확한 측량을 통해 착점오차를 제어할 수 있다고 한 바 있으며, 작업자의 주의를 통해 천공 초기작업 시 천공압력과 운용조건을 조절한다면 이 오차의 발생을 최소화 할 수 있는 것으로 알려져 있다(Atlas Copco, 2008).

둘째, 정렬불일치는 Fig. 1의 2번과 같이 착점은 정확하게 위치했으나, 예정된 천공 방향과 다른 각도로 천공작업이 수행됨으로서 발생하는 오차를 말한다. 천공작업 중 가장 빈번하게 발생하는 이 오차는 보통 천공기 피드의 부정확한 정착에 의해 발생하며 착점을 기준으로 360°방향 중 어느 방향으로도 발생 가능하다(Muhammad, 2009). 또한, 동일한 정렬불일치가 있는 경우라도 천공장이 길어짐에 따라 공저에서의 오차가 증가하기 때문에 인접공에 대한 영향이 착점오차에 비하여 상대적으로 크게 작용한다. 따라서 이러한 오차는 저항선 변경에 따른 대괴 및 과파쇄 입자의 발생을 야기하며, 터널의 경우 확천공(look-out)의 과대 또는 과소에



Fig. 1. Various kinds of drilling error

의해 여굴 및 미굴 발생의 주원인이 된다.

이러한 정렬불일치의 주된 원인은 과도한 확천공과 정확하지 않은 천공장비의 방향, 피드와 작업자의 위치 차이에 의한 시각적 오차 및 과도한 피드압력 등에 의해 발생한다고 알려져 있다(Kim *et al.*, 2003, Anders, 2013). 특히 Atlas Copco(2008)에 의하면 일반적인 수동조작의 경우 약 3~5% 가량의 정렬불일치가 발생할 수 있으나, 훈련과 관리를 통한 천공작업자의 숙련도 향상과 적합한 장비의 사용을 통해 0.2~0.5% 이내로 제어가 가능한 것으로 보고하고 있다.

마지막으로, 천공편향은 Fig. 1의 3번과 같이 천공 작업 중에 공의 방향이 변화하여 발생하는 오차를 말하며, 이는 다른 천공오차와 달리, 외부에서 오차를 감지하기가 매우 어려우며 또한 발생 정도를 정확히 추정하기도 쉽지 않다. 일반적으로 층리와 편리가 강하게 발달된 지층에서 천공편향은 최대 천공장의 5~10%까지 발생할 수 있기 때문에 많은 광산에서는 20 m 이상의 천공을 피하고 있으며, 일반적인 천공작업에서는 천공장의 3~5% 가량 발생하는 것이 보통인 것으로 알려져 있다(Atlas Copco, 2008). 또한 이러한 천공편향의 발생은 비트의 끼임(jamming), 여굴 및 미굴의 발생, 그리고 굴진장의 감소 등을 야기하여 궁극적으로 발파효율을 낮추고 천공비용을 증가시키는 원인이 되는 것으로 보고되고 있다(Muhammad, 2009, Atlas Copco, 2013). 일반적으로 천공편향의 발생은 암반 중의 절리, 편리, 단층 등과 같은 불연속면의 존재, 암반의 강도 변화, 그리고 비트와 룯드의 직경 차이 등에 의해 주로 발생하는 것으로 알려져 있으며, 가이드 튜브 및 DTH 해머(down-the-hole hammer) 등을 이용하여 최대 0.5%정도의 수준으로 감소시킬 수 있다고 보고되고 있다(Muhammad, 2009).

## 2.2 천공오차 발생요인 분석

앞서 분석한 바와 같이, 천공오차 발생의 원인은 여러 가지가 있을 수 있으나, Table 1에서 정리된 바와 같이 크게 제어가능한 요인(controllable factor)과 제어불가능한 요인(uncontrollable factor)으로 나눌 수 있다(Sinkala, 1991).

먼저 제어불가능 요인에는 불연속면, 암반의 강도 및 경도, 충전물 등 해당 암반의 물리적, 지질학적 특성에 따른 원인이 포함될 수 있으며, 이는 천공오차 중 천공편향과 연관이 가장 큰 것으로 알려져 있다(Atlas Copco, 2008).

Anders(2013)는 지질학적 요인에 의한 천공오차는 천공 작업 중 작업자의 주의 깊은 장비운용, 천공제어 시스템과 천공정보 모니터링 시스템 적용 등의 노력을 통해 제어할 수 있으나, 오차발생 원인의 특성상 모든 제어기법을 적용한다 하더라도 오차발생을 완전히 억제하는 것은 불가능하다고 한 바 있다.

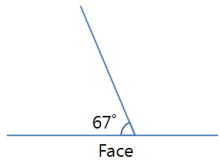
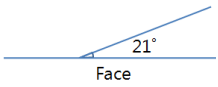
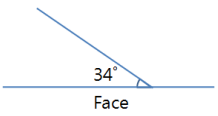
한편, 제어가능 요인에는 천공장비에 의한 요인과 현장조건에 의한 요인으로 분류할 수 있다(Anders, 2013).

천공장비에 의한 천공오차의 발생은 착암기의 성능(추력, 토크), 비트와 룯드의 강성 및 직경, 추가적인 제어 장비의 적용 유무 등에 의해 발생한다. 천공장비에 의한 천공오차는 정렬불일치나 천공편향이 추가되며, 각 현장마다 그 영향 정도가 다양하게 나타나고 있다. 천공장비에 의한 요인을 저감하기 위해서는 컴퓨터제어의 착암기의 적용, 가이드 룯드(guide rod)의 사용, 천공 작업자의 주의, DTH 해머를 장착한 착암기의 적용 등의 저감 방안이 제시될 수 있으며, 특히 천공장비와 룯드 및 비트의 변화만으로도 천공오차를 천공장의 1% 이내로 유지할 수 있다고 보고되고 있다(Atlas Copco, 2008, Anders, 2013). 그러나 작업자의 주의를 제외한 대부분의 방안들은 추가적인 비용을 발생시키기 때문

**Table 1.** Classification of causes of drilling error

| Main category         | Division                      | Cause of drilling error   |
|-----------------------|-------------------------------|---|
| Uncontrollable factor | Geological factors            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Discontinuities</li> <li>• Rock strength and hardness</li> <li>• Young's modulus of fresh rock</li> <li>• Filling of joints, etc.</li> </ul> |
|                       | Factor of drilling equipments | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Performance of drilling rig</li> <li>• Stiffness of bit and rod</li> <li>• Diameter ratio of bit and rod, etc.</li> </ul>                    |
| Controllable factor   | Factor of field condition     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Length of hole</li> <li>• Diameter of hole</li> <li>• Workmanship of worker</li> </ul>   |

**Table 2.** The results of face mapping at blind end

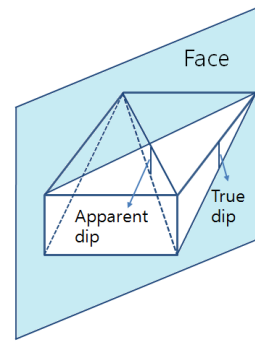
|   | Face   | Set 1   | Set 2  | Set 3   |
|---|--------|---|--|---|
| Dip direction / Dip (°)                       | 146/90 | 213/56  | 125/85   | 180/65  |
| Included angle between joint set and face (°) | -      |  |  |  |
| Apparent dip of joint (°)                     | -      | -67   | 21   | -34   |
| Apparent dip of joint (°)                     | -      | 30  | 84   | 60  |
| Dip direction                                 | -      | Out of face   | Out of face  | Out of face   |
| Joint spacing (cm)                            | -      | 20 ~ 30   | 30   | 30  |

에 대부분의 작업장에서 쉽게 적용되지는 못하는 실정이다.

현장조건에 의한 천공오차는 천공장, 천공경, 작업자의 숙련도, 비트와 천공면의 착점 조건 등과 같이 작업 현장의 조건 및 특수성에서 원인을 찾을 수 있으며, 착점오차, 정렬불일치, 천공편향 등 모든 종류의 오차를 발생시키는 요인이 된다. 현장조건에 의한 천공오차의 저감을 위해서는 천공경의 증가 및 천공장의 감소, 불연속면을 고려한 천공방향, 천공 작업자의 교육 및 훈련 등의 방안이 있으나, 실제 적용을 위해서는 천공기의 성능 및 지질학적 조건을 감안하여 천공패턴 및 방향을 변화시켜야하기 때문에 수정이 불가능한 상황이 발생할 수도 있다(Kim *et al.*, 2003).

### 3. 현장조사를 통한 천공오차 발생원인 분석

천공오차의 종류와 발생원인에 대해서는 전술한 바와 같이 여러 연구자들에 의해 보고되고 있으나, 각 천공오차별 발생규모 및 그 정도에 대해서는 충분한 검토가 이루어지지 못한 것으로 분석된다. 따라서 본 연구에서는 이에 관한 정량적인 측정값의 획득 및 비교를 위해 발파공의 천공현장에서 직접 계측을 실시하였다. 즉, 현장계측을 통해 각 발파공의 위치를 발파 이전에 정확히 확인하고 이를 다시 천공배치도와 비교하였다. 또한 발파작업이 수행된 직후, 사전에 확인되었던 발파공의 위치와 발파후 관측되는 잔류발파공의 위치를 비교 분석함으로써 궁극적으로 천공오차를 직접 측정하여 이 오차를 유발한 요인과 그 발생원인에 대해 다양한 방법의 분석을 실시하였다.



**Fig. 2.** Illustration of true dip and apparent dip

#### 3.1 지질학적 특성 조사

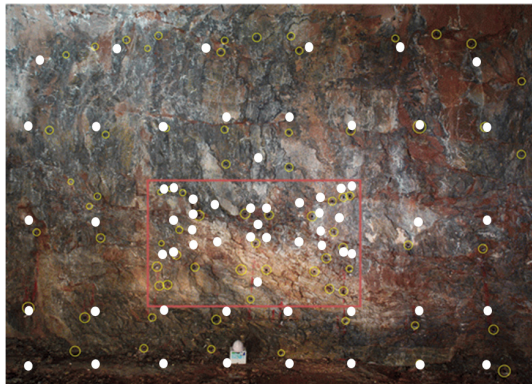
천공오차의 측정을 위하여 강원도 삼척시에 위치한 석회석 광산인 대성MDI(주) 동해사업소에서 발파공에 대한 측정을 실시하였다. 측정에 앞서 현지 암반의 특성을 파악하기 위하여 막장면에 대한 막장 조사를 실시하였으며, 측정 결과를 바탕으로 막장면에서 관측한 절리군과 막장면 간의 진경사(true dip)와 위경사(apparent dip)를 각각 산출하였다. 이때 진경사와 위경사의 개념은 Fig. 2에서 설명하는 바와 같다.

이와 같은 개념으로 측정된 계측대상 막장면에서의 절리들은 Table 2에서 정리하여 나타내었는데, 여기서 보는 바와 같이 계측대상 막장면에서는 약 20~30 cm의 절리간격을 갖는 3개의 주절리군이 관측되었으며, 관측된 모든 절리군은 굴진반대방향의 경사를 갖고 있는 것으로 분석되었다.

대상 현장에서 사용된 착암기는 Atlas Copco사의 COP 2238 모델의 착암기를 사용하고 있으며, 착암기의 제원

**Table 3.** Specification of rock drill

|                    |          |
|--------------------|----------|
| Model              | COP 2238 |
| Impact power       | 22 kW    |
| Input power        | 38 kW    |
| Hydraulic pressure | 250 bar  |
| Impact frequency   | 73 Hz    |
| Impact energy      | 300 Nm   |
| Hole range         | 51-76 mm |
| Torque             | 820 Nm   |



**Fig. 3.** Comparison of designed drilling holes and actual drilling holes (circle: designed, white dot: drilled)

은 Table 3과 같다.

**3.2 발파공 조사 및 결과**

천공오차의 종류별 발생 정도를 측정하기 위하여 광파측량기를 이용하여 발파 전/후의 발파공 위치를 계측

하였다. 발파공의 위치 측정은 천공된 발파공과 발파 후 관측할 수 있는 잔류발파공을 대상으로 하였으며, 정확한 측정을 위하여 발파공 중앙부에 측정용 타겟을 위치시켜 수행하였다.

먼저, 발파공의 착점오차를 살펴보기 위하여 막장면에 천공된 실제 발파공과 발파패턴도 상에서의 발파공의 천공위치를 Fig. 3에서와 같이 중첩하여 표현하였다. 사진에서처럼 실제 발파공은 흰점으로 표시하였으며 발파패턴도 상의 천공위치는 원으로 표시하였다. 여기서 보는 바와 같이 조사대상 막장면에서의 천공 개수는 설계상의 63공 보다 15개가 많은 총 78공이 천공되어 전체적인 천공패턴이 변화한 것을 알 수 있다. 또한 확대공을 대상으로 계측된 착점오차는 평균 20.8 cm인 것으로 측정되었으며, 심발의 경우 설계보다 상하로 넓게 분포되어 평균 25.4 cm의 착점오차를 보이고 있어, Atlas Copco(2008)가 제시한 10 cm 이내의 범위를 크게 웃도는 것으로 조사되었다. 이와 같은 결과는 조사가 수행된 막장면의 폭이 당초 설계 폭인 9.5 m보다 약 0.8 m 가량 넓은 10.3 m로 측정된 것으로 미루어 볼 때, 막장면의 특성에 따라 작업자의 주관적 판단에 의한 수정 발파패턴을 적용하였기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 발파 후 계측된 잔류공 중 수평천공을 하지 않은 심발공과 최외곽공(경사심발, look-out)을 제외한 25개 공 중, 9개 공에서 잔류공의 위치좌표를 획득하였다. 측정된 발파공의 위치좌표를 Table 4와 같이 정리하였다. 여기서 보는 바와 같이 착점위치를 기준으로 잔류공의 위치는 x축의 경우 -0.80~0.46 m의 차이를 보였으며 표준편차는 0.38 m였다. 또한 y축의 경우 -0.12~0.09 m의 차이를 나타냈으며, 0.07 m의 표준편차를 나타냈다.

**Table 4.** Measuring results of drilling error

| No. | Sitting position (m) |      | Remain hole position (m) |      | Movement (m) |       |
|-----|----------------------|------|--------------------------|------|--------------|-------|
|     | x                    | y    | x                        | y    | x            | y     |
| 1   | 17.99                | 1.36 | 17.54                    | 1.33 | 0.46         | 0.03  |
| 2   | 16.15                | 1.46 | 16.16                    | 1.46 | -0.01        | 0.01  |
| 3   | 17.02                | 1.52 | 16.89                    | 1.54 | 0.12         | -0.03 |
| 4   | 8.49                 | 1.58 | 10.66                    | 1.61 | -2.17        | -0.05 |
| 5   | 10.09                | 1.59 | 12.43                    | 1.64 | -2.34        | -0.12 |
| 6   | 12.10                | 1.69 | 8.814                    | 1.70 | 3.28         | 0.09  |
| 7   | 14.97                | 2.17 | 15.02                    | 2.21 | -0.05        | -0.04 |
| 8   | 13.74                | 2.29 | 14.54                    | 2.24 | -0.80        | 0.06  |
| 9   | 13.21                | 2.39 | 13.42                    | 2.47 | -0.21        | -0.09 |

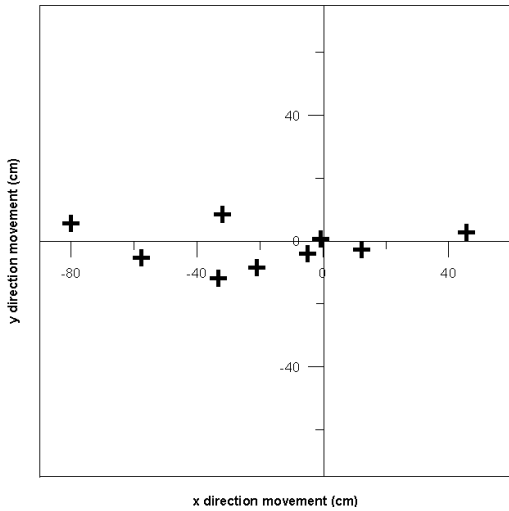


Fig. 4. Relative position of direction of residual holes to sitting point

Fig. 4는 착점위치를 기준으로 관측된 잔류공의 상대 위치를 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 총 9개의 잔류공 중 7개가 착점의 좌측방향에서 관측되어 전체적인 천공편향 및 정렬불일치에 의한 천공오차는 좌측방향으로 발생한 것으로 나타났다. 이와 같은 오차의 발생은 앞서 언급했던 암반의 이방성에 의한 천공편향 발생과 같이, 조사대상 막장면에 존재하는 절리군에 영향에 의해 발생한 것으로 판단된다. 즉, 불연속면의 주향과 천공방향 간의 사잇각이 작을 경우 주향과 나란한 방향으로 편향이 발생하고, 주향과 천공방향 간의 사잇각이 클 경우 주향과 수직한 방향으로 편향이 발생한다고 보고한 Brown *et al.*(1981)의 연구결과에서와 유사하게, 천공방향과 비교적 나란한 주향을 갖는 set 1 절리군과 set 2 절리군이 천공편향의 발생에 직접적인 영향을 줌으로써 좌측방향으로의 천공오차가 발생한 것으로 판단된다.

상하 방향의 경우 착점위치의 상부에서 관측된 잔류공이 4개, 하부에서 관측된 것이 5개로 전체적으로 아래 방향의 이동이 다소 우세한 것으로 나타났으나, 좌우 방향에 비해서는 상대적으로 낮은 오차를 나타냈다. 일반적인 천공 작업에서 현장 출수에 의한 영향을 최소화하기 위해 1° 가량 상향 천공하는 것을 감안하면 실제 잔류공은 계속 위치보다 약 7 cm 가량 아래쪽에 위치할 것으로 판단된다. 이는 룯드와 비트에 미치는 중력과 3개의 절리군 중 수직에 가까운 위경사를 나타내는 set 2, 3 절리군에 의한 영향으로 인해 경사 방향으로 편향이 발생한 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 Brown *et al.*(1981)의 연구에서 암반의 이방성 뿐만 아

니라 중력의 영향에 의해서도 하부 방향으로의 천공편향이 발생할 수 있다고 한 것과 유사한 결과로 볼 수 있으나, 본 연구에서의 천공장은 이들의 연구에서의 천공장에 비해 상대적으로 짧기 때문에 중력에 의한 하부 방향으로의 천공편향은 절리군에 의한 천공편향에 비하여 매우 작을 것으로 사료된다.

이상의 현장조사를 통해 대상 암반의 불연속면이 천공오차에 미치는 영향을 알아보았으나, 천공편향과 정렬불일치에 영향을 미치는 주요 요인을 구분하기에는 다소 무리가 있는 것으로 판단되었다. 따라서 각 인자가 천공오차에 미치는 영향을 세부적으로 알아보기 위하여 천공작업자들을 대상으로 AHP(Analytic Hierarchy Process)분석을 수행하였다.

#### 4. AHP 분석을 통한 천공오차별 가중치 분석

##### 4.1 AHP 분석의 이론적 배경

천공오차를 발생시키는 요인은 다양하나, 실제 천공에 있어서 각 요인의 영향 정도를 정확히 판단하기는 매우 어렵다. 이는 천공오차에 영향을 미치는 요인이 정량적이기 보다는 정성적인 특성을 갖고 있기 때문이며, 이와 같이 정성적인 요인에 의한 영향성을 파악하기 위해서는 이에 적합한 분석방법이 필요할 것이다.

Saaty(1980)가 제안한 AHP(Analytic Hierarchy Process) 분석기법은 정성적인 요인을 평가함에 있어 논리적 일관성을 추론할 수 있는 유용한 방법으로 알려져 있으며(Dyer and Forman, 1992), 계량적 접근이 어려운 분야의 의사결정을 하는 경우 의사 결정자의 판단과 경험을 조직화, 구조화, 체계화하여 평가요소의 가중치를 설정하는 방법으로 의사결정단계에서 수학적 모형에 적합하도록 고안된 의사결정법이다.

따라서 개인적 의사결정 뿐만 아니라 집단적 의사결정까지 적용할 수 있으며, 다수의 기준 또는 속성들이 계층을 이루어 복잡하게 구성되어 있는 문제에 특히 유용한 방법이기 때문에 다양한 분야에서 활용되고 있다. AHP를 이용한 의사결정은 다음과 같이 5단계로 나타낼 수 있다(Kang, 2003).

- 1단계 : 의사결정 문제의 최종목표, 평가기준, 대안으로 구성된 계층도를 작성한다.
- 2단계 : 동일 계층 내에 요소들 간의 쌍대비교(dual comparison)를 실시한다. 비교대상 평가요소의 수가 N개일 경우 쌍대비교 횟수는  $\frac{N(N-1)}{2}$  회가 되며, 쌍대비교시 의사결정자의 중요도는 9점 척도를 기준으로 한다.

**Table 5.** Random index used in AHP analysis

| Number of elements | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RI                 | 0.00 | 0.00 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 |

**Table 6.** The results of AHP analysis

| Factors                     | Weighting / Rank |                    |                 |
|-----------------------------|------------------|--------------------|-----------------|
|                             | All mines        | Underground mining | Open-pit mining |
| Discontinuities             | 0.23 / 1         | 0.22 / 1           | 0.24 / 1        |
| Fresh rock strength         | 0.15 / 3         | 0.15 / 3           | 0.15 / 3        |
| Performance of drilling rig | 0.17 / 2         | 0.15 / 2           | 0.19 / 2        |
| Properties of rod           | 0.12 / 5         | 0.11 / 7           | 0.13 / 4        |
| Drilling pattern            | 0.12 / 6         | 0.13 / 4           | 0.10 / 6        |
| Sitting condition of bit    | 0.10 / 7         | 0.12 / 5           | 0.09 / 7        |
| Workmanship of worker       | 0.12 / 4         | 0.12 / 6           | 0.11 / 5        |
| Consistency ratio           | 0.022            | 0.017              | 0.037           |

- 3단계 : 쌍대비교된 요소들의 상대적 중요도인 가중치를 구한다.
- 4단계 : 판단의 일치율(CR, Consistency Ratio)을 측정한다. 이때 AHP 분석 결과 일치율이 10% 이상으로 나오게 되면 설문결과와 신뢰도에 문제가 있을 수 있으므로 아래의 (1)식을 이용하여 일치율을 산출한다(Saaty, 1980).
- 5단계 : 대안들의 우선순위를 구하기 위해, 각 계층에서 구해진 요소들의 상대적 중요도를 나타내는 가중치를 종합한다.

$$CR = \frac{CI}{RI} = \left( \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \right) \left( \frac{1}{RI} \right) \quad (1)$$

여기서, CR은 일치율, CI(Consistency index)는 일관성 지수, RI(Random index)는 무작위 지수(Table 5 참조)이며,  $\lambda_{max}$ 는  $n \times n$  행렬의 특성방정식의 해 중 가장 큰 값을 말한다.

**4.2 천공오차 발생요인 가중치 분석**

본 연구에서는 AHP 분석을 위하여 다음과 같이 7개의 천공오차 발생 인자를 구성요소로 선정하였다. 각 구성요소는 여러 연구자들에 의해 제안된 천공오차 발생요인 중에서 유사한 것들을 하나로 묶는 방식으로 요인의 개수를 줄여 구성하였다. 7개의 구성요소는 다음과 같다.

- ① 불연속면(절리, 엽리, 단층 등)
- ② 암반의 강도

- ③ 착암기의 성능
- ④ 비트와 룯드의 특성
- ⑤ 천공패턴(천공장, 천공경)
- ⑥ 비트와 천공면의 접촉조건
- ⑦ 작업자의 숙련도

각 구성요소에 대한 AHP 분석을 위하여 7개의 구성요소를 쌍대비교하는 총 21문항으로 구성된 설문지를 제작하여 국내 석회석 광산에 종사하는 천공 전문가들에게 배포하였다. 설문의 각 요소에 대한 상대적 중요도는 5단계(3, 2, 1, 1/2, 1/3)로 나누었으며, 최대 상대적 중요도는 3으로 설정하였다. 그 까닭은 Kang(2003)의 연구결과에서도 언급된 바와 같이, 높은 값의 상대적 중요도를 채택했을 경우 각 요소에 대한 중요도는 명확하게 구분될 수 있는 반면, 높은 상대적 중요도를 채택한 소수의 의견에 의해 낮은 상대적 중요도를 채택한 다수의 의견이 역전되는 현상이 발생할 수 있기 때문이다. 상대적으로 역전의 발생이 어려운 낮은 상대적 중요도를 채택하였다.

설문에 응답한 설문지는 갱내채광을 실시하는 광산에서 13개, 노천채광을 실시하는 광산은 8개 등 총 21개의 설문지가 회수되었다. 일치율 확인을 위하여 회수된 모든 설문지는 각각 분석을 수행하였으며, Table 6에서 정리한 바와 같이 모든 설문지에서 10%이하의 일치율을 나타내었기 때문에 설문조사결과와 신뢰도는 보장된다고 할 수 있을 것이다.

일반적인 AHP에서는 각 전문가의 의견을 종합하는 방법으로 기하평균(geometric mean)과 가중산술평균(weighted arithmetic mean)을 사용하고 있는데, 본



연구에서는 Aczel and Saaty(1983)가 제안한 것처럼 그룹판단에 적합하다고 알려진 기하평균을 사용하였다. 또한 Table 6에서 보는 바와 같이 전체광산에 대한 AHP 분석을 통해 천공오차 발생요인별 가중치 분석을 수행한 것 외에, 채광 형태별 가중치를 별도로 분석하고자 갱내채광과 노천채광에 대해 구분하여 AHP 분석을 실시하였다.

갱내채광 및 노천채광 모두에 대한 AHP 분석결과, 불연속면에 의한 천공오차 가중치가 0.23으로 가장 높게 나타났으며, 비트의 착점조건에 의한 천공오차 가중치는 0.10으로 가장 낮은 값을 보이는 것으로 분석되었다.

또한 천공오차 발생요인을 그룹별로 봤을 때, 지질학적 요인, 천공장비에 의한 요인, 현장조건에 의한 요인 순으로 낮아지는 것을 알 수 있었으며, 일치율은 0.022로 나타나 신뢰할만한 결과인 것으로 판단된다. 제어불가능 그룹요인에 포함되는 불연속면과 암반의 강도를 제외한 제어가능 요인만을 비교해 봤을 때, 착암기의 성능이 가장 높은 0.17의 가중치를 보였으며, 작업자의 숙련도, 룯드의 특성 순으로 가중치가 높은 것으로 분석되었다.

채광형태별 AHP 분석결과 역시 불연속면에 의한 요인이 갱내채광과 노천채광에 대해 각각 0.22 및 0.24로 나타나는 등 가장 높은 가중치를 보이고 있으나, 갱내채광에서는 룯드의 특성이 0.11로 가장 낮은 수치를 보인 반면 노천채광에서는 비트의 착점조건이 0.09로 가장 낮은 수치를 나타내었다. 또한, 착암기의 성능에 대한 천공오차의 가중치는, 갱내채광에서는 0.15인 반면 노천채광에서는 0.19로 산출되어 노천채광의 경우 착암기의 성능이 천공오차발생에 더 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이는 상대적으로 천공장이 짧은 갱내채광의 특성상 천공장비에 의한 영향이 장공천공을 실시하는 노천채광에 비하여 낮게 나타나기 때문으로 판단된다.

이상과 같이 AHP분석에 의한 천공오차 발생요인에 대한 가중치를 분석한 결과, 지질학적 요인이 천공오차에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 이는 제어불가능 요인에 포함되기 때문에 천공오차를 저감시키기 위한 대책으로는 제안될 수 없다. 따라서 효과적인 천공오차 제어를 위해서는 착암기의 성능이나 룯드의 특성과 같은 천공장비에 의한 요인을 변화시키는 것과 작업자 교육을 통한 숙련도 향상이 가장 적합하다고 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 천공오차의 발생요인과 각 요인이 천

공오차에 미치는 영향을 알아보기 위하여 문헌조사를 통한 주요 구성요소들을 선정하였으며 현장계측 및 설문조사를 통한 AHP 분석을 통하여 각 발생요인에 대한 가중치 분석을 수행하였다. 연구결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 천공오차의 종류는 천공 위치에 의한 착점오차, 천공 각도에 의한 정렬불일치, 천공 작업 중에 발생하는 천공편향으로 나눌 수 있으며, 천공오차에 영향을 미치는 요인에는 암반의 불연속면, 강도 및 경도, 불연속면 충전물 등 지질학적 요인을 포함한 제어불가능 요인과 착암기의 성능 및 종류, 비트와 룯드의 특성 등 천공장비에 의한 요인과 천공경, 천공장, 작업자의 숙련도 등의 현장조건에 의한 요인을 포함하는 제어가능 요인으로 나눌 수 있었다.
2. 조사대상의 갱내막장면에서 측정된 착점오차는 확대공에서 평균 20.8 cm, 심발공에서 평균 25.4 cm로 측정됐으며, 이는 설계보다 큰 단면으로 인해 천공 작업자가 임의로 천공패턴을 변경했기 때문에 발생한 결과로 판단되었다. 또한 착점위치를 기준으로 잔류공은 x축에 대해 -0.80~0.46 m(표준편차는 0.38 m) 지점에서 확인되는 등 전체적으로 좌측으로 오차가 발생하는 것으로 계속되었으며, 이는 해당 단면의 절리군 중 천공방향과 가장 나란한 주향을 갖는 set 1 절리군의 영향에 의한 것으로 판단된다. y축의 경우 대체로 착점을 기준으로 하부에서 관측되었으나, 0.07 m의 상대적으로 낮은 표준편차를 나타내었다.
3. 천공작업자를 대상으로 한 설문조사를 토대로 수행한 AHP 분석을 실시한 결과, 불연속면이 천공오차에 가장 큰 영향을 미치는 요소인 것으로 분석되었으며, 비트의 착점조건이 상대적으로 가장 낮은 영향을 미치는 요소인 것으로 조사되었다. 제어가능 요인만을 비교하였을 경우, 착암기의 성능이 가장 높은 가중치를 보였으며, 채광 형태에 따라서는 갱내에서는 천공패턴이, 노천에서는 룯드의 특성이 높은 가중치를 나타내었다.

이상의 결과를 통해, 천공오차의 저감을 위해 가장 효과적인 대책은 제어가능 요인인 착암기의 개선과 작업자의 숙련도 향상이 제시될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 갱내채광의 경우와 노천채광의 경우 천공오차발생에 미치는 가장 중요한 요인이 다르게 나타나는 것처럼, 발파공을 천공하는 대상의 성격과 발파 형태에 따라 천공오차를 최소화할 수 있는 대책도 별도로 제시될 수 있음을 유념해야 할 것이다.



## 사 사

본 연구는 산업통상자원부 에너지기술개발사업 “국내 석회석광 적용 자동차 경량화 광물 원료 등 미래 자원화 기술 실증화 연구(과제번호: 2013T100100021)”와 강원대학교 기본연구비사업의 지원으로 수행되었다.

## Reference

1. Aczel, J. and Saaty, T.L., 1983, Procedures for synthesizing ratio judgements, *Journal of Mathematical Psychology*, Vol. 27, 93-102.
2. Anders, O., 2013, High precision drilling, Tunnelling in Rock by Drilling and Blasting, Taylor & Francis Group, London, 1-6.
3. Atlas Copco, 2008, Surface Drilling, 2nd edition, Publisher Ulf Linder, A technical reference edition of Atlas Copco, Sweden.
4. Atlas Copco, 2013, Blasthole drilling, 3rd edition, Publisher Ulf Linder, A technical reference edition of Atlas Copco, Sweden.
5. Bhandari, S., 1997, Engineering Rock Blasting Operations. A.A. Balkema, Rotterdam, 215p.
6. Brown, E.T., Green, S.J., and Sinha, K.P., 1981, The influence of rock anisotropy on hole deviation in rotary drilling, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 18, 387-401.
7. Dyer, R.F. and Forman, E.H., 1992, Group decision support with the analytic hierarchy process, *Decision Support System*, Vol. 8, 99-124.
8. ESSEEM, 2010, Drilling methods and commonly used machinery, ESSEEM Work Package, [http://www.esseem.eu/work\\_packages.htm](http://www.esseem.eu/work_packages.htm).
9. Gustafsson, R., 1973. Swedish Blasting Technique, Published by SPI, Gothenburg, Sweden, 61-62.
10. Kang, M.S., 2003, Rank reversal problem in the application of AHP to group decision making process, *J. of Business Research*, Vol. 18.3, 153-170.
11. Kim, Y.K., Kim, H.C., and Yoo, J.H., 2003, A study on the drilling methods to reduce overbreak in tunnel blasting, *Explosives & Blasting*, Vol. 21.2, 1-13.
12. Korea Construction News, 2014.01.20., [www.conslope.co.kr/news](http://www.conslope.co.kr/news).
13. Muhammad, A.R., 2009, The Effect of Fragmentation Specification on Blasting Cost, MS Thesis, Queen's University.
14. Saaty, T.L., 1980, The Analytic Hierarchy Process, New York, McGraw-Hill.
15. Sinkala, T., 1991, Improving hole quality by automatic control of the drilling process: theoretical and field studies, *Min. Sci. and Tech.*, Vol. 12, 79-88.
16. Song, C.H., Kwon, K.B., Shin, D.Y., Hwang, W.K., Lirn, J.H., and Cho, J.W., 2013, “Trend analysis of drilling technology for top-hammer drilling machine”, *Tunnel & Underground Space*, Vol. 23.4, 271-279.



### 이 덕 환

2006년 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 공학사  
2012년 강원대학교 대학원 지구시스템공학과 공학석사

Tel: 033-255-6253  
E-mail: jadenovember@kangwon.ac.kr  
현재 강원대학교 에너지자원공학과 박사과정

### 김 창 오

1996년 삼척대학교 공과대학 자원공학과 공학사

Tel: 033-372-5017  
E-mail: kimco@dsmd.co.kr  
현재 대성엠디아이(주) 기획팀 차장



### 최 성 응

1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사  
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사  
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 033-250-6253  
E-mail: choiso@kangwon.ac.kr  
현재 강원대학교 에너지자원공학과 교수