

## 터널굴착시 천공 및 발파조건이 여굴의 크기에 미치는 영향

### Effect of the Drilling & Blasting Conditions on the Range of Overbreak in Tunnel Excavation

김 경 훈\*      임 한 옥\*\*  
Kim, Gyung-Hun      Lim, Han-Uk

#### Abstract

Overbreak, underbreak and range of disturbed rock zone (DRZ) are the most important factors in evaluating the results of tunnel blasting. These factors, which depend on the discontinuities in rock mass, the blasting patterns and drilling conditions, have been studied. The range of DRZ can be estimated by relationships between vibration velocity and associated tensile stress.

A new computerized rocket jumbo drill has been adopted to reduce overbreak based on the analysis of drilling accuracy. In-situ blasting tests were also performed by varying initiating systems. Overbreak can be reduce from 34.5cm to 20cm. The range of DRZ is 0.2m with stoping holes and 0.4m with wall holes respectively. In addition, some methods to reduce DRZ have been presented in this study.

키워드 : 과굴, 미굴, 교란영역, 터널발파

Keywords : overbreak, underbreak, range of disturbed rock zone(DRZ), tunnel blasting

#### 1. 서론

발파공법에 의한 터널굴착시 야기되는 지반진동, 폭풍압(air blast), 비석 등 소위 발파공해에 관한 문제점은 많이 개선된 것으로 알려지고 있다. 그러나 터널굴착 시 계획단면보다 더 크게 굴착되는 여굴(과굴, overbreak)이나 계획단면보다 더 적게 굴착되는 미굴(未掘), 그리고 굴착 후 남게 되는 원지반의 상태 등에 대해서는 상대적으로 관심을 표시하지 않았던 것으로 보인다.

이와 같은 이유는 전자의 발파공해는 민원의 발생 등으로 인하여 문제점 표출이 직접적인 반면에 후자의 여굴 경우는 공사 담당자들만으로

해결되었기 때문인 것으로 보인다.

그러나 여굴이 발생하는 경우 그 부분을 뿔어 붙임 콘크리트나 라이닝등으로 되 메워야 하며, 미굴이 형성될 때는 브레이커(breaker)나 착암기 등을 이용하여 2차로 제거해야 되기 때문에 경제성 및 공기면에서 큰 손실을 초래하게 된다. 뿐만 아니라 과도한 발파진동으로 터널 계획 단면외부의 원지반을 손상하게 될 때에는 지하수 유입의 통로가 되는 균열을 형성하게 되고, 또한 탄성영역이 소성영역으로 변환되어 언젠가는 지보에 사하중(死荷重)으로 작용되어 터널의 안정성에 중대한 영향을 미치게 된다.

이와 같은 이유로 최근에는 터널 굴착시 여굴 감소를 위한 방안에 관하여 국내에서도 연구한 결과가 몇몇 발표된 바 있다.[1][2][3][4] 그러나 이들은 여굴을 야기 시키는 몇 가지 문제 중 일부 예를 들면 천공방법이나 발파 패턴 설계등을

\* (주)바우컨설팅, 공학석사

\*\* 강원대학교 지구·환경공학부 교수, 공학박사

분리시켜 연구하고 있다.

그러나 여굴이란 천공방법은 물론 발파 패턴과도 직접적인 관계가 있기 때문에 종합적으로 검토되어야 한다. 즉 여굴 발생의 주요 요인은 암반내 불연속면의 발달 상태와 같은 자연적 현상과 천공 및 발파와 같은 인위적인 요인에 의해 좌우되기 때문에 본 연구에서는 여굴 감소를 위한 천공방법의 연구와 발파 방법에 관하여 현장실험을 통하여 계측, 분석하고 나아가 여굴 감소를 위한 몇 가지 대책을 제시하고자 한다. 원래 발파에 의한 터널 굴착 시 어느 정도의 여굴을 불가피한 것으로 인정된다. 즉 확천량(look-out)을 인정하고 있으나 이 보다 초과될 경우 앞에서 설명한 바와 같이 보강비 증가가 불가피 하다.

또한 발파로 인해 형성되는 터널 주변의 암반 손상·교란영역(disturbed rock zone, DRZ)은 터널 주변 암반인 모암과 다른 특성 즉 미소파괴나 균열이 형성되어 변형계수의 감소, 투수계수의 증가와 같은 현상을 초래하게 된다. 여기서 손상·교란영역이란 파괴영역(failure zone), 손상영역(damage zone) 및 교란영역(disturbed zone)을 총칭하는 의미이다. 이러한 손상영역의 범위를 평가하는 방법으로는 암반의 미소 변위 계측, 카메라를 이용한 균열의 조사 및 확인, 시험공을 이용한 파커(packer)테스트, 시추코어(암심)에 대한 암석 물성의 변화, 미소파괴음 빈도법(acoustic emission)등 비파괴시험, 발파진동의 계측에 의한 평가등이 있다[5][6][7][10][18][22].

그러나 현실적으로 이러한 방법들을 채택하는 데는 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 적용에 제한이 따른다. 따라서 본 연구에서는 발파진동의 계측에 의한 평가 방법을 채택하였다.

본 연구는 익산~포항간 고속도로 공사중 익산~장수간 00공구의 00터널에서 실시하였다.

## 2. 여굴 발생 요인과 손상영역

### 2.1 대상지역 지질 및 암석 특성

본 연구 대상인 터널 시공지역은 전라북도의 익산 ~ 포항간 고속도로 공사 중 익산 ~ 장수간 00공구의 00터널로서 그 위치는 Fig. 1과 같다.

연구대상 터널의 위치는 국가 기본지질도인 5만 축척의 장계도폭(홍승호, 윤옥, 1993)의 북서쪽구역에 해당되며, 선캠브리아의 편마암(gneiss)과 쥐라기의 화강암(granite)으로 구성되어 있다. 발파진동을 계측한 구역은 암반 III등급에 해당되는 구역으로서 발파에 의해서 발생하는 버력 중 신선하다고 판단되는 암괴를 채취하여 다음과 같이 물성 실험을 하였다.

물리적 시험 방법은 국제암반공학회가 제안한



(a) Location of tunnel



(b) Field test tunnel entry

Fig. 1 Location of tunnel and field test tunnel entry

방법(ISRM)을 적용하였으며 암괴를 원주형 코어 시험편으로 제작 후 길이 대 직경의 비가 2:1이 되도록 시료를 절단, 양끝면을 표면 연삭기를 이용하여 편평도의 오차가 0.02mm이하가 되도록 성형하였다. 이렇게 성형한 시료를 -50mmHg상태의 진공실내에 24시간 이상 방치하여 완전히 포화시킨 후 무게를 측정하고 성형된 시료를 105℃에서 24시간이상 건조시킨 후 무게를 측정하였다. 이렇게 측정된 무게를 통하여 공극율, 흡수율, 비중을 계산하였다. 그후 스트레인 게이지를 부착한 후 영국 ELE (Civil and Environmental Engineering Test Equipment, Model : ADR 2000)사에서 제작된 것으로 최대 가압용량은 2000KN 인 가압기를 사용하여 하중속도 0.5~1.0MPa/sec로 하중을 가압하면서 이때 발생한 변형율을 읽어 탄성계수를 구하였다.

암석의 인장강도는 간접인장강도인 압열인장강도 시험법을 사용하였다. 시험편에 원판의 중심선을 따라 상하에 집중하중을 가하면 중심부에 인장응력에 대해서 3배 크기의 압축응력이 작용하게 된다. 일반적으로 암석은 압축응력에 대해서 매우 큰 저항을 나타내지만 인장응력에 대해서 극히 취약하다. 그러므로 원판형 시험편은 압축응력에 의해서 파괴가 일어나기 전에 인장응력에 의해서 파

피가 된다. 이때의 파괴강도를 사용하여 간접인장 강도를 측정하였다. 이와 같은 원리에 의해서 얻어진 시료의 물성은 Table 1과 같다.

### 2.2 여굴발생 요인과 그 기준

발파공법을 채택하여 굴착할 경우 필연적으로 여굴이 발생된다. 일반적으로 착암기를 이용하여 천공할 때 불가피하게 확천양(look-out)이 발생된다[19].

확천양이란 그림과 같이 터널 굴진 시 계획 단면을 확보하기 위하여 착암기로 천반공, 측벽공과 같은 주변공을 천공할 때 계획단면보다 밖으로 벗어난 부분을 말하며 그 양은 10cm+3cm/천공길이(m)로 주어진다. 천공장이 3m 내외일 때 그 값은 20cm내외이다.

따라서 천공장이 길어질수록 그 값은 증가한다.

이러한 현실에 비추어 국내 주요 기관의 공사 발주시에는 이들 허용여굴량을 설계에 반영시키는데 그 값을 기관에 따라 다소 차이가 있다.

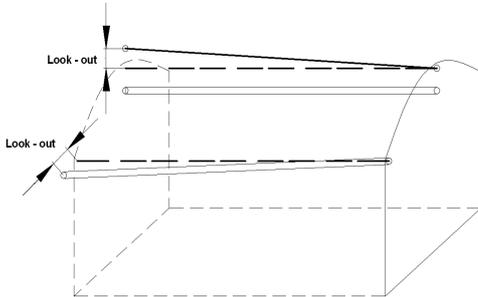


Fig. 2 Tunnel drilling pattern at roof holes & wall holes (look-out)

그러나 한국도로공사에서 조사한 국내 터널 현장의 여굴 발생량은 반단면에서 평균 41.2cm, 전단면에서 34.5cm인 것으로 알려지고 있다.<sup>4)</sup> 이와 같이 여굴의 허용기준량과 실제 발생량과의 차이는 뿔머 불임 콘크리트등으로 채워야 하기 때문에 경제적 손실이 막대하다고 하겠다.

여굴의 발생은 크게 암반의 특성 및 상태, 사용 폭약류의 성능, 천공의 정밀도 등을 들 수 있다. 이들 중 인위적으로 조정이 가능한 부분은 다음과 같다.

Table 2 Allowance standard values for overbreak in domestic major agency

Part	Standard values (cm)		Remark
	Roof zone	Wall zone	
건설 표준품셈	15~20	10~15	
S.M.S.C	20	20	
K.E.P.C.O.	15	15	LEG DRILL
	20	20	JUMBO DRILL
K.N.R.R.	15	15	
K.N.O.C.	17.5	12.5	Underground Storage Cavern
K.T.C.	20	20	

- \* S.M.S.C : Seoul Metropolitan Subway Corporation
- \* K.E.P.C.O : Korea Electric Power Corporation
- \* K.N.R.R : Korean National Rail Road
- \* K.N.O.C : Korea National Oil Corporation
- \* K.T.C : Korea Telecom corporation

### 첫째, 암반의 특성 및 상태

터널 막장의 암반 중 여굴 발생 정도와 직접적인 관련되는 것은 굴착선 부근의 암반조건이다. 굴착선 부분의 암질 및 굴착선과 불연속면이 이루는 각, 그리고 불연속면의 상태 등은 발파 후 굴착선의 모양이 형성되는데 중요한 역할을 한다.

굴착부분의 암질의 상태가 상당히 양호하여 불연속면이 거의 없는 신선한 암피라고 할 때는 발파효과를 보기는 어렵지만 공과 공사와의 선균열을 통해 여굴면 조절이 용이하다. 그러나 파쇄된 암반에서는 작은 장약량에도 발파효과가 좋으나 여굴 발생이 많아지고 암반 손상영역이 증가한다.

불연속면은 그 자체가 인장강도와 암반에 비해 낮은 뿐만 아니라 발파 에너지 즉 파의 전파가 불연속면에 집중되어 약화되므로, 불연속면의 존재는

Table 1 Physical properties of specimens

	Apparent Density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)	Absorption (%)	Elastic Wave velocity (m/sec)	Uniaxial Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)
Range	2.75~2.62	0.75~0.18	0.31~0.08	5684~4074	260.9~183.2	62.02~42.92	14.0~5.2
Average	2.65	0.40	0.17	4580	121.32	48.28	9.5

발파에 의한 여굴과 매우 밀접한 관련이 있다. 불연속면의 간격이 커질수록 암반은 압력에 가깝게 거동하여 여굴 조절이 용이하며, 불연속면과 불연속면이 근접할수록 서로에 대한 영향으로 여굴 발생 정도가 커질 수 있다.

불연속면의 방향은 여굴 발생의 중요 요인이 된다. Worsey 등은 실내/현장실험을 통하여 불연속면이 굴착선과 이루는 각도가 60도 이하가 될 경우에는 정밀발파가 어려우며, 15도 이하일 경우에는 정밀발파의 효과가 거의 없다는 결론을 내렸다. 그리고 불연속면의 주향이 터널 굴진 방향과 수직일 경우에는 여굴이 거의 발생되지 않았으며 주향이 수직일 경우 과도한 여굴과 손상이 발생하였음이 관찰되었다[16][18].

불연속면 간극의 증가는 심각한 여굴의 원인이 되고, 불연속면이 밀착되어 있을 때는 양호한 상태를 보인다고 하였다. 불연속면 사이의 점토물질의 협재는 팽창성과 두께 정도에 따라 여굴 혹은 미굴이 될 수 있는 악영향을 미친다. 불연속면 간극이 작고 강하고 견고한 물질로 충전되었다면 여굴은 불연속면의 방향성에 의해 좌우될 것이다.

둘째, 사용 폭약류의 성능

터널 굴착 시 여굴을 감소시키기 위해서 스무스 블라스팅(smooth blasting)법을 채택하고 여기에 저폭속인 Finex 등 정밀폭약을 사용하고 있다. 이 폭약은 폭속이 4400m/sec로 폭발 위력이 상대적으로 낮기 때문에 경암이 노출된 구간에서는 충분한 파괴효과를 발휘하지 못하여 미굴이 발생된다.

셋째, 천공의 정밀도

컴퓨터가 장착되지 않는 점보드릴로 천공시, 천공을 위해서는 막장에 터널내공의 굴착 설계선을 표시하는 마킹(marking) 작업을 실시하여야 한다. 표시된 굴착 설계선상에 점보드릴의 비트(bit)를 일치시켜 천공은 시작되므로 표시된 굴착선의 정확도, 천공 착점의 정확한 위치선정, 천공각도 및 천공 간격 등 천공의 정밀도는 여굴 또는 미굴 발생에 큰 영향을 미치게 된다.

### 2.3 손상영역의 예측

화약의 발파 작업에 의해서 발생하는 손상영역의 범위에 대해서 어디까지 할 것인가에 대해서 여러 가지 견해가 있으며 아직까지 명확한 정의가 없다. 본 연구에서는 편이상 파쇄대(fracture zone)와 분쇄대(crushing zone)를 손상영역(damage zone)으로, 그리고 균열대(crack zone)를 포함하여 교란영역(disturbed rock zone)으로 정의하기로 한다. 이것을 도시화 하면 Fig.3과 같다.

일반적으로 발파공 부분의 발파진동을 직접 측정하기 어렵기 때문에 대부분의 경우 원거리 진동 측정을 통하여 근거리 진동을 추정한다. 단일 장약공에 의한 발파에 의해서 발생하는 발파진동은

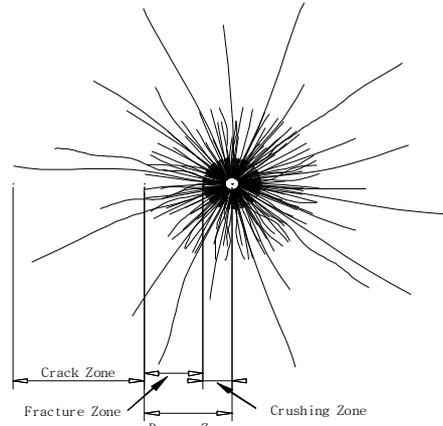


Fig. 3 Disturbed rock zone around blast hole

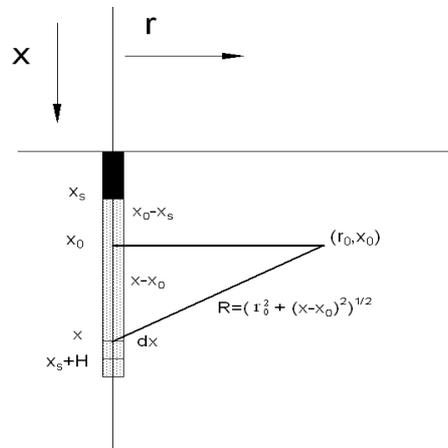


Fig. 4 Integration of the shock wave effect the near region of an extended charge

Fig.4와 같다. 즉 장약장이 H인 암반에 천공된 장약공에 선형장약집중도 I (장약길이(m)당 장약량(kg))인 폭약을 장전하면 장약축으로부터 임의의 거리  $r_0$ 에서 장약의 폭굉으로 발생한 발파진동에 의해 유발되는 응력을 알려고 한다면 다음과 같은 가정을 하여야한다.

장약으로부터 떨어진 어떤 한 점에서 장약의 각 부분의 폭굉으로부터 발생한 진동 최대입자속도는 수치적으로 부가되고 많은 학자들은 관측점에 도달하는 장약 각 부분으로부터 발생하는 wave package를 거리차에 의한 도달 시간의 차를 계산해서 통합하려고 시도했다. 하지만 암반에서 최대 입자속도와 그에 의한 최대응력은 관측점에 초동이 도달할 때 나타나지 않았다. 최대응력은 자유면으로부터 인장파가 반사된 후에 나타난다. 그러나 time scale에 의해서, 충격파의

도달시간의 작은 차이는 무시할 수 있다. 그래서 직접파의 도달시간의 작은 차이를 고려하지 않고 팽창된 장약의 요소에 의한 진동의 통합이 허용된다[18]. 결과적으로 진동 최대 입자속도를 진동에 의한 응력으로 표현할 수 있다.

장약공으로부터 임의의 거리 R에 있는 한 점에서의 응력을 알기 위해서 장약의 각 부분으로부터 발생하는 진동입자속도의 통합하여야 하며 진동 추정식을 변형해서 적분해야 한다.

거리 R(m) 떨어진 곳에서 지발당 장약량 W에 의해 발생하는 진동속도의 크기 v는 식(1)과 같다.

$$v = K \left( \frac{R}{W^b} \right)^{-n} = K \frac{W^a}{R^\beta} \quad (1)$$

여기서 K, n, a, β는 진동계측에서 얻은 측정치를 이용해 회귀분석을 통해 구할 수 있는 상수이고 b는 1/2 또는 1/3이다. 식 (1)에서 n, a, β의 관계는 다음과 같다.

$$\beta = n = a/b$$

식 (1)을 변형하여 새로운 함수 w로 치환하여 적분한다. 이 함수를 진동강도(vibration intensity)로 정의하고 식 (2)로 표현한다.

$$w = \left( \frac{v}{K} \right)^{1/a} = \frac{W}{R^{\beta/a}} \quad (2)$$

미소 장약 dW에 대해 진동강도 dw는 식 (3)과 같다. 미소 장약 dw는 선형장약집중도를 x방향으로 미분한 값이다. 또한 Fig.4에서 거리 R은 식 (4)와 같다.

$$dw = 1/(R^{\beta/a})dW \quad (3)$$

$$dW = l dx$$

$$R = [r_0^2 + (x - x_0)^2]^{1/2} \quad (4)$$

식 (3)을 적분하기 위해 식 (4)를 취하면 다음과 같다.

$$w = l \int_{x_s}^{x_s+H} \frac{dx}{[r_0^2 + (x - x_0)^2]^{\beta/2a}} \quad (5)$$

식 (2)와 관련하여 진동속도로 나타내면 다음과 같다.

$$v = K \left[ l \int_{x_s}^{x_s+H} \frac{dx}{[r_0^2 + (x - x_0)^2]^{\beta/2a}} \right]^a \quad (6)$$

β = 2a인 경우, 식 (6)을 적분하면 다음과 같다.

$$v = K \left( \frac{l}{r_0} \right)^a \left[ \arctan \left( \frac{H + x_s - x_0}{r_0} \right) + \arctan \left( \frac{x_0 - x_s}{r_0} \right) \right]^a \quad (7)$$

β = 3a인 경우, 식 (6)을 적분하면 다음과 같다.

$$v = K \left( \frac{l}{r_0} \right)^a \left[ \frac{x_s + H - x_0}{(r_0^2 + (x_s + H - x_0)^2)^{1/2}} - \frac{x_s - x_0}{(r_0^2 + (x_s - x_0)^2)^{1/2}} \right]^a \quad (8)$$

이 수식을 이용하여 발파공으로부터 임의의 거리의 진동 입자속도를 구할 수 있다.

한편 진동 최대 입자속도와 암석의 인장강도를 이용하여 암반의 손상영역을 예측할 수 있다. 응력파에 의해 발생한 응력에 대한 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma = \frac{v}{c} E \quad (9)$$

여기서 σ는 진동속도(v)에 의해 발생한 응력, c는 탄성과 속도, E는 탄성계수이다. 암반은 압축강도가 인장강도에 비하여 훨씬 크기 때문에 암반 파괴와 관련한 응력 σ를 인장강도라 하면 v는 균열을 발생시킬 수 있는 임계 진동속도이다. 인장강도를 일축압축강도의 0.1배로 가정하여 사용하기는 하지만, 본 연구에서는 실험을 통해 얻은 인장강도 값을 사용하기로 한다. 즉 임계진동속도를 나타내면 다음의 식과 같다.

$$v_{critical} = \sigma_t \frac{c}{E} \quad (10)$$

발파공으로부터 거리에 따른 진동입자 속도와 이에 의한 응력에 의해 균열이 발생하는 임계 진동속도를 도시하면 Fig. 5와 같다.

Fig. 5에서 그래프는 식 (7)에 대입해서 구한 것으로 발파면 배후의 거리에 따른 입자진동속도를 나타낸 모식도이고, 점선은 암반의 물성을 식 (10)에 대입해서 구한 임계 입자 진동속도이다.

### 3. 실험 및 계측

여굴 발생요인과 그 대책을 마련하기 위해 본

연구에서는 크게 천공의 정밀도, 발파진동의 계측을 실시하였다.

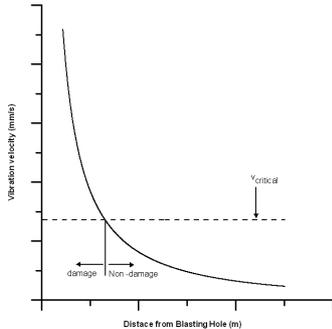


Fig. 5 Calculated peak vibration velocity as a function of the distance

### 3.1. 컴퓨터 제어식 점보드릴

#### (1) 컴퓨터 제어식 점보드릴

(New Computerized Rocket Jumbo Drill)

종래의 점보드릴과는 달리 자동시스템 계측기를 장착하여 천공에 정확도를 높이고, 또한 막장 전방의 암반 상태까지도 예측이 가능하다.

#### (가) 자동시스템 계측기기를 장착한 점보드릴에 의한 천공

암반을 천공할 때는 옛날부터 착암기가 사용되고 있다. 그러나 이들 착암기는 압축공기에 의한 수동식 착암기에서 유압에 의한 착암기로 개량되어 오다 최근에는 반자동시스템 계측기기를 장착한 점보드릴로 발전되고 있다. 이 점보드릴의 주요 특성은 다음과 같다.

먼저 터널의 모양과 각공의 천공위치, 심도, 간격등을 천공패턴 프로그램에 입력 시킨 다음 터널내에서 레이저를 이용하여 터널의 선형측장비를 올바르게 위치시킨다. 다음, 막장에서는 착암기에 부착된 여러 개의 피드(feed)중 한 개의 피드를 레이저, 천공지점과 일치시켜 정렬한다. 그리고 작동시키면 천공하고자 하는 각공의 정확한 위치와 경사각도가 나타난다. 즉 운전자가 운전석에 설치된 모니터를 통하여 비트의 위치와 천공각도 등을 확인하면서 장착된 자동천공각도 조절장치를 통하여 천공시 수평각 및 수직각을 자동 조절한다. 이때 비트가 모니터된 천공깊이에 도달하면 자동으로 후퇴한다. 이와 같은 천공장의 조절은 막장면이 고르지 못하거나, 천공장이 짧을 때는 대단히 중요하다.

따라서 이 착암기는 다음과 같은 장점을 갖고 있다.

- ① 자동 천공각도 조절 장치의 장착으로 천공의 정밀도를 향상시켜, 굴착이 정확하고 휨 보정장치 및 각종 보정(calibration)을 할 수 있어 역골이 감소된다.
- ② 막장에 천공 위치 표시 즉 마킹(marking)이 필요 없어 작업시간을 단축할 수 있다.
- ③ 협소하고 어두운 지하 터널 작업에 유용하도록 설계, 제작되었으며, 모니터의 조치가 간단하고 쉽다.
- ④ 천공 중 천공속도, 타격압력, 피드압력, 회전압력 등 중요 자료를 취득, 저장, 인쇄, 보관할 수 있어 막장 전방 암반 상태를 예측할 수 있으며, 아울러 장비의 상태를 점검할 수도 있다.

#### (나) 막장 전방 암반 상태 예측

종래에는 막장 전방의 암반상태를 예측하기 위해서 별도로 시추를 실시하였으나 이 점보드릴을 이용하여 실시할 수 있다. 즉 유압센서 및 데이터 레코더를 부착하여 천공할 때 피드압, 회전압, 타격압을 측정할 경우, 이들 자료로부터 막장 전방의 지질상태를 사전에 예측할 수 있어 시공의 효율성을 높이고, 또한 안전성을 확보할 수 있다.

즉, 천공시 얻어진 자료를 별도 개발된 갱내 탄성과 탐사(T.S.P) 및 전자탐사법(TDEM)프로그램과 조합하여 해석할 경우 정확도 높은 전방 암반의 상태를 파악할 수 있다. 이때 천공장은 최대 50m까지 가능하며, 일반적으로 30m이다.

막장전방 암반 상태 예측 시스템은 Fig. 6과 같이 계측 시스템과 해석 시스템으로 구성된다. 계측시스템은 점보드릴내 피드실린더에 유량계를 설치하고, 계량된 유량으로부터 천공거리를 환산한다. 또한 피드, 회전 및 타격 실린더에 유압센서를 부착하여 각각의 압력을 측정후 이를 전기적 신호로 변환시켜 데이터 레코더에 기록하거나 PC카드에 저장한다.

해석 시스템은 PC카드에 저장된 계측 자료를 컴퓨터에 분석하여 천공에너지, 천공반력을 산출하고 Fig. 6과 같이 거리에 따른 도면으로 표시할 수도 있다. 그리고 천공 중 얻어진 암분(slim

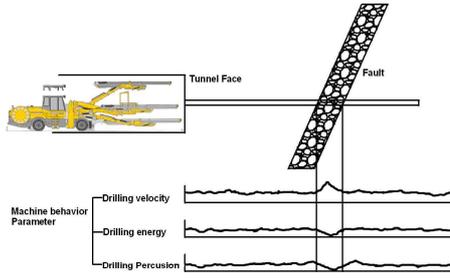


Fig. 6 Estimating synopsis of machine behavior parameters at tunnel face due to tunneling

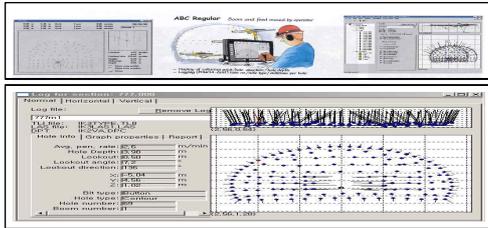


Fig. 7 Drilling pattern by New Computerized Rocket Jumbo Drill

e)의 성상, 막장관찰 자료 및 기준 자료와 비교, 분석하여 막장 전방의 지질상태를 예측한다.

(2) 자동형 무타킷 측량 (3 Dimension - Precision Convergency Measure)

내공 변위 및 천단 침하 계측의 자동화

일상 계측 항목인 내공변위와 천단 침하의 계측은 테이프와 레벨에 의해서 측정함으로 시공중에 계측 수행을 위한 대기시간이 많고 계측자료처리가 결과나 상대 변위로 한정되어 터널 거동 분석시 한계를 갖고 있다.

이러한 기존 일상 계측의 문제점을 보완하고, 시공의 영향을 최소화 하면서 계측을 수행할 수 있을 뿐만 아니라 다양한 측정정보를 획득하여 효율적인, 분석이 가능한 3차원 절대 변위 계측 관리이다.

(가) 주요 장비 및 자재

광파측량기(레이저), 3차원 변위 확인용 타겟셀, 소프트 웨어, 컴퓨터 등

(나) 출력물

터널 각 측정점간의 절대 수직 침하량, 절대 수평 변위량, 종방향 절대 변위량, 각 측정점간의 상대 변위량

3.2 발파진동의 계측

(1) 발파 패턴

터널 시공 현장은 1일 3회 발파를 실시하고 1회

발파는 1지발당 4~10공으로서 총 천공수는 146공이며 총 단면적  $12.777 \times 8.581\text{m}$  이다. 1발파에 사용되는 총 폭약량은 289.5kg을 사용하였으며 천공경은 45mm이며 천공장은 3.2m이고 굴진장은 3m이다. 주장약은 다이나마이트를 사용하였으며 최외곽공은 최대한 암반의 손상을 줄이기 위해서 정밀 폭약FINEX를 사용하였다.

터널의 4부분에 대한 진동회귀분석을 얻기 위해서 뇌관의 단차를 최대한 많이 사용하여 MS12~LP20번까지 사용하였다.

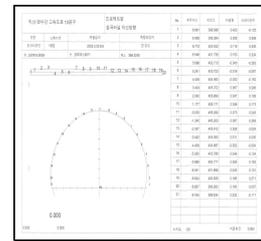


Fig. 8 Photograph for survey example

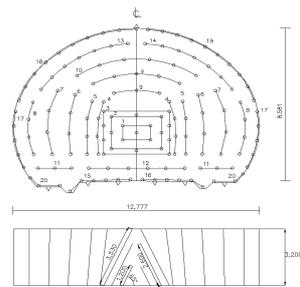


Fig. 9 Drilling pattern for blasting

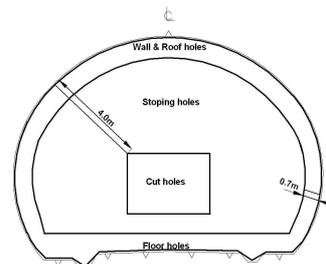


Fig. 10 Zones in tunnel blasting

Table 3 Blasting pattern

Part of Round	No	No. Detonator	Time	No. hole	Charge per hole			Delay of charge			
					Mega MITE I	FINEX	Charge (kg)	Mega MITE I	FINEX	Charge (kg)	
Cut	B-v	1	MS12	240	4	2	0	0.75	8	0	3
	M-v	2	MS16	320	6	4	0	1.5	24	0	9
		3	MS17	340	8	7	0	2.625	56	0	21
Sto ping	4	LP4	400	8	6	0	2.25	48	0	18	
	5	LP5	500	8	6	0	2.25	48	0	18	
	6	LP6	600	8	6	0	2.25	48	0	18	
	7	LP7	700	8	6	0	2.25	48	0	18	
	8	LP8	800	8	6	0	2.25	48	0	18	
	9	LP9	900	8	6	0	2.25	48	0	18	
	10	LP10	1000	6	6	0	2.25	36	0	13.5	
	11	LP11	1200	6	6	0	2.25	36	0	13.5	
	12	LP12	1400	6	6	0	2.25	36	0	13.5	
	13	LP13	1600	7	6	0	2.25	42	0	15.75	
	14	LP14	1800	7	6	0	2.25	42	0	15.75	
Floor	15	LP15	2000	6	7	0	2.625	42	0	15.75	
	16	LP16	2500	6	7	0	2.625	42	0	15.75	
Wall & Roof	17	LP17	3000	10	1	6	0.975	10	60	9.75	
	18	LP18	3500	10	1	6	0.975	10	60	9.75	
	19	LP19	4000	10	1	6	0.975	10	60	9.75	
Floor	20	LP20	4500	6	7	0	2.625	42	0	15.75	
Total				146	103	18	40.425	725	180	289.5	

\* B-V : Baby v- cut, M-v : Main v- cut

(2) 진동 계측

발파진동은 총 7회 측정 하였으며 각 회당 4대의 Canada Instanet사의 Blastmate II와 THOMAS사의 VMS-500 1대를 사용하여 계측하였다.

발파에 의한 계측기의 손상을 최대한 방지하고 발파지점에서 최대한 근접한 지점에서 계측하기 위해서 굴착이 이루어지는 터널의 반대편 터널에서 가장 가까운 곳에 계측기를 위치 시켜 계측을 실시하였으며 각 계측기별 간격은 계측기 II-1~2의 2.7m를 제외한 나머지 계측기간의 거리는 모두 2.05m로 일정하게 배치하였다. 또한 매회 발파에 의해서 1회 굴진장인 3m씩 앞으로 전진 하며 그에 따라서 계측기와 발파지점은 매회 변경되었다.

4. 계측 결과 및 분석

4.1 여굴 상태의 계측 결과

여굴 상태를 계측한 예를 그림으로 표시하면 Fig. 12와 같으며 그 결과를 정리하면 Table 4와 같다.

여굴의 허용기준을 건설표준품셈에 의거 천반을 20cm로 설정할 경우 20cm미만이 74% 이고 20cm~

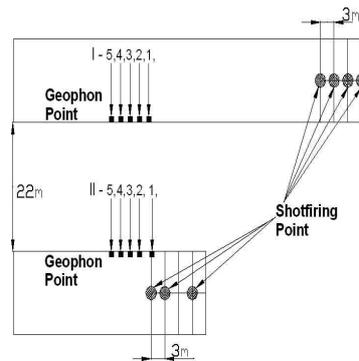


Fig. 11 Blasting vibration measurement point at tunnel

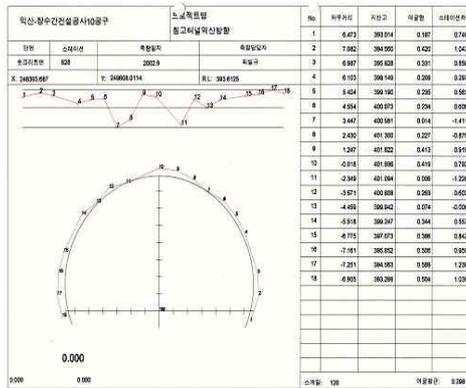


Fig. 12 Survey example for overbreak measuring data

Table 4 Field measuring data

	Overbreak amount (cm)								
	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	+0.4
1	0	6	21	31	17	10	3	0	1
2	2	7	8	16	11	8	2	2	1
3	11	14	10	3	1	1	1	0	0
4	10	17	10	7	4	2	1	0	0
5	6	3	5	13	7	4	1	0	2
6	4	13	8	15	6	3	2	0	0
7	29	34	35	15	9	5	3	0	1
8	6	15	15	12	16	6	9	5	1
9	20	28	44	15	13	5	1	1	0
10	10	15	13	17	16	8	1	0	0
11	24	24	24	18	17	12	5	0	1
Frequency	122	176	193	162	117	64	29	8	7
C.F.D	122	298	491	653	770	834	863	871	878
R.F (%)	14	20	22	18	13	7	3	1	1
R.C.F.D (%)	14	34	56	74	88	95	98	99	100

\*C.F.D. : Cumulative Frequency Distribution

\*R.F. : Relative Frequency

\*R.C.F.D. : Relative Cumulative Frequency Distribution

30cm은 21%, 30cm이상은 5%에 불과함을 알 수 있다. 따라서 한국도로공사 조사결과치인 평균 34.5cm에 비하여 대폭 감소함을 알 수 있다.

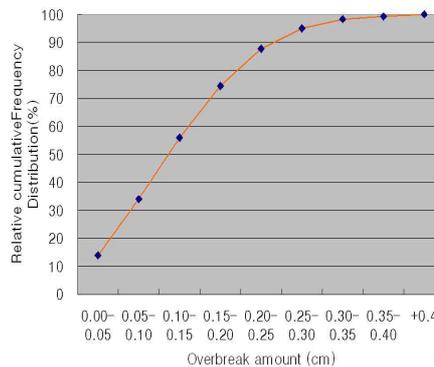
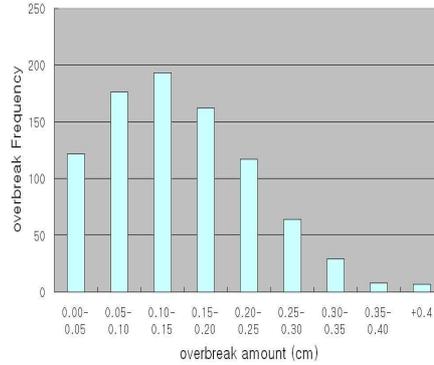


Fig. 13 Frequency Distribution Histogram & Relative Cumulative Frequency Distribution Curve of field measuring data

#### 4.2 발파 진동 분석

1일 3회 발파 총 7회에 걸쳐서 발파진동을 계측한 자료로부터 심베기공, 확대공, 바닥공, 최외곽공 4부분으로 구분하여 각각의 성분별 peak값을 취하였다. 성분별 peak값은 4부분에서 사용한 뇌관의 시차를 적용하여 기록되는 시간과 계측된 발파진동의 시간을 적용하였으며, 뇌관의 시차와 발파진동의 시차로부터 심베기공, 확대공, 바닥공, 최외곽공으로 구분을 하였다. 계측기와 발파지점과의 거리는 20번째로 발파되는 발파공을 3차원 좌표인 (0,0,0)으로 기준을 잡아 각각의 장약공과 계측기와의 좌표를 터널발파 패턴도를 이용하여 구하고 이 좌표를 이용하여 각 공별 계측기와의 거리를 구하였다. 이때 환산거리에 적용하는 거리는 각 제발되는 발파공들을 하나로 묶고 제발되는 발파공 중 계측기와 가장 가까운 거리 최단거리를 사용하였다.

심베기공에서는 baby-v-cut과 main-v-cut과의 시차구분이 가능하였으나 main-v-cut에서는 시차가 20ms로 그 구분이 어려워 하나로 구분하였다. 그리고 확대공은 각각의 지발당 장약량을 기준으로

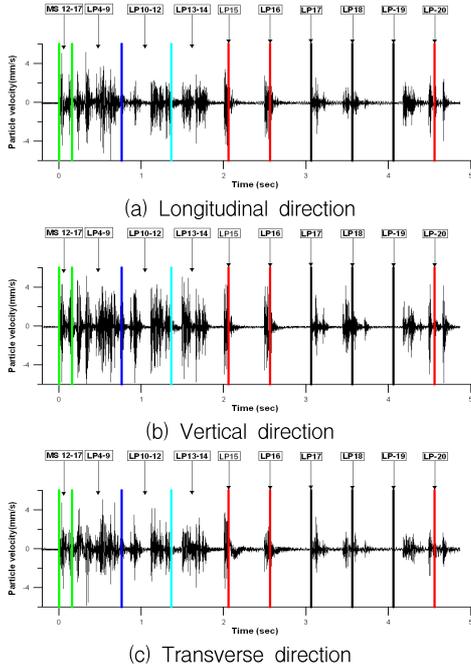


Fig. 14 Analysis blasting vibration by detonator time

로 하여 구분을 하였으며 18kg을 사용하고 100ms의 시차를 준 LP4~9, 13.5kg을 사용하고 200ms의 시차를 준 LP10~12, 15.75kg을 사용하고 200ms의 시차를 준 LP13~14번으로 크게 3단계로 구분하였으며 각각의 단계별로 진동 peak값을 사용하였다. 바닥공의 경우 1지발당 폭약량은 15.75kg으로서 뇌관은 LP15~16, 20번을 사용하였으며 진동이 뚜렷이 구분되어서 각 지발당 하나의 peak값을 취하였다. 최외곽공은 1지발당 9.75kg의 폭약량을 사용하였으며 뇌관은 LP17~19번까지 사용하였다.[14] 이때 각 단계별 진동의 peak값을 얻었다. 이와 같은 방법에 의해서 얻어진 측정자료는 Table 5와 같다.

Table 5 Measuring data of blasting vibration

Prat	NO. of Charge data	Delay (kg)	Distance (m)	PPV(mm/s)		
				Tran	Vert	Long
Cut holes	30	3~21	26.1 ~ 60.4	0.55 ~ 12.29	0.73 ~ 17.07	0.71 ~ 12.59
Stopping holes	53	13.5~18	22.9 ~ 59.8	1.02 ~ 16.4	1.66 ~ 16.6	0.76 ~ 9.94
Floor holes	56	15.75	21.7 ~ 60.8	0.76 ~ 12.7	1.27 ~ 13.10	0.51 ~ 10.38
Wall & Roof holes	58	9.75	21.0 ~ 61.5	0.38 ~ 6.48	0.51 ~ 7.24	0.11 ~ 5.96

계측된 자료로부터 자승근 환산거리와 입방근 환산거리를 이용하여 심배기공, 확대공, 최외곽공, 바닥공에 대한 각각의 입지상수 K와 감쇠지수 n을 구하였다.

진동추정식의 입지상수 K와 감쇠지수 n을 구하기 위해서 진동추정식 각변에 대해서 log를 취한 후 1차식으로 변화한다.

$$v = K \left( \frac{R}{W^b} \right)^{-n} = K(SD)^{-n} \quad (11)$$

$$\log v = \log K - n \log(SD) \quad (12)$$

식 (12)와 같이 나타난 진동추정식의 회귀방정식은 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$Y = b + aX \quad (13)$$

관측된  $y_i$ 와 예측된  $Y$ 의 오차는 다음과 같다

$$E = \sum_{i=1}^n (Y - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - Y)^2 \quad (14)$$

이 오차(E)가 최소가 되기 위해서는 상수 b, a에 대해서 편미분한 값이 0이 되어야 한다.

$$\frac{\partial E}{\partial b} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial b} (b + b + ax_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n 2(b + ax_i - y_i) = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial a} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial a} (b + ax_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n 2x_i(b + ax_i - y_i) = 0$$

이것을 정리하면 다음과 같다.

$$nb + \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) a = \sum_{i=1}^n y_i$$

$$\left( \sum_{i=1}^n x_i \right) b + \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a = \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

이 식을 다시 쓰면

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{bmatrix} \quad (15)$$

이 식 (15)를 만족하는 a, b를 구하면 우리가 구하고자 하는 입지상수 K와 감쇠지수  $-n$ 을 얻을 수 있다. 이와 같이 구한 입지상수는 50% 신뢰구간으로서 우리가 얻고자 하는 95% 신뢰수준을 구하기 위해서는 다음과 같은 통계처리가 필요하다. 일반

적으로 자료의 수(n)이 30을 넘으면 정규분포에 따르면 평균에 두배의 표준편차를 더해줌으로 95%의 신뢰수준을 구할 수 있다.[9]

$$K_{95\%} = K_{50\%} + 2SE \quad (16)$$

식 (15), (16)을 이용하여 자료를 처리하면 Table 6과 같다.

Table 6 Constants of blasting vibration equation

Part	No.of data	Scaled distance	Confidence Degree	K	-n	R <sup>2</sup>
Cut holes	30	R/√W	50%	189.505	-1.267	0.884
			95%	394.790		
		R/√3W	50%	666.942	-1.558	
			95%	1359.093		
Stopping holes	53	R/√W	50%	202.254	-1.501	0.814
			95%	329.938		
		R/√3W	50%	402.590	-1.500	
			95%	662.156		
Floor holes	56	R/√W	50%	186.644	-1.618	0.812
			95%	308.910		
		R/√3W	50%	392.591	-1.618	
			95%	649.768		
Wall & Roof holes	58	R/√W	50%	164.746	-1.686	0.846
			95%	293.287		
		R/√3W	50%	312.432	-1.686	
			95%	556.203		

여기서 얻은 입지상수와 감쇠지수를 이용하여 동일한 scaled distance를 적용하여 각 4구역에 대한 진동추정식을 비교하면 다음의 Fig. 4.4와 같다.

진동 계측자료가 30개 이상이 되어야 신뢰성이 있다고 알려져 있으며 본 연구에서 심베기공, 확대공, 바닥공, 최외곽공 부분에 대한 자료의 수는 30 ~ 58개로서 모두 신뢰성을 갖고 있다고 볼 수 있다.

심베기공, 확대공, 바닥공, 최외곽공에서 얻은 진동추정식과 이러한 4구역에 대한 3성분(Transverse, Vertical, Longitudinal)에 관한 영향성을 평가하기 위해서 각각에 대해서 위와 동일한 방법에 의해서 분석하였다.

#### 4.3 발파로 인한 손상영역 평가

발파진동 추정식에 사용되는 환산거리에는 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리가 있다. 이는 각각 거리를 장약량의 자승 및 삼승의 비율로 환산한 형태이며 둘 모두 사용되고 있으나 일반적으로 먼 거리에서는 자승근 환산거리가 가까운 거리에서는 삼승근 환산거리가 더욱 잘 맞는다고 알려져 있다[13].

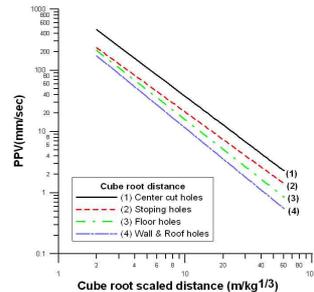
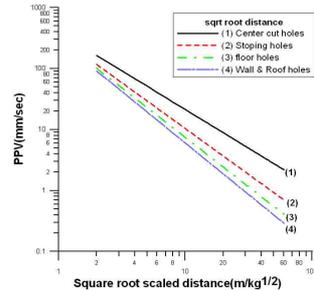


Fig. 16 Total Regression analysis by square root scaled distance & cube root scaled distance (confidence level 95%)

따라서 본 연구에서는 근접한 거리에 대한 발파진동속도를 예측하기 위해서 삼승근 환산거리를 사용하였다.

앞 절에 의해서 얻어진 삼승근 환산거리에 따른 입지상수와 감쇠지수를 식 (8)과 식(9)를 이용하여 손상영역을 평가하였다. 식 (8)을 사용하기 위해 입력변수를 정리하면 다음 Table 8과 같다.

식 (8)과 Table 8을 이용해 발파공으로부터 거리에 따른 입자속도와 식 (9)에 의한 손상영역을 나타내면 다음과 같다.

Fig. 17은 터널의 4구역 심베기공, 확대공, 바닥공, 최외곽공으로 구분하여 각각에 대한 암반손상영역과 4구역에 대해서 발파진동의 3성분 Longitudinal, Transverse, Vertical성분에 의한 암반손상영역을 표시한 것이다. 이때 손상영역의 임계 진동입자속도는 901mm/s이다.

위에서 구한 것을 표로 작성하면 Table 9와 같다.

심베기공, 확대공, 바닥공, 최외곽공에 대해 평가된 암반의 손상영역을 터널의 천공한 장약공을 중심으로 하여 X축은 장약축과 수직인 거리와 Y축은 장약축과 수평하게 자유면에서부터의 심도에 따라서 발파진동의 등속도 분포와 임계진동입자속도를 나타내면 Fig. 18과 같다.

Table 7 Constants of blasting vibration equation(Three perpendicular components)

Part	Scaled distance	Perpendicular components	Confidence degree	K	-n	
Cut holes	$R/\sqrt{W}$	Tran	50%	74.381	-1.188	
			95%	191.901		
		Vert	50%	208.462	-1.329	
			95%	532.198		
		Long	50%	54.261	-1.022	
			95%	183.624		
	$R/\sqrt[3]{W}$	Tran	50%	226.554	-1.441	
			95%	594.967		
		Vert	50%	758.772	-1.626	
			95%	1931.270		
		Long	50%	149.129	-1.257	
			95%	501.157		
Stoping holes	$R/\sqrt{W}$	Tran	50%	37.277	-1.266	
			95%	157.953		
		Vert	50%	174.087	-1.470	
			95%	313.695		
		Long	50%	77.317	-1.345	
			95%	190.769		
	$R/\sqrt[3]{W}$	Tran	50%	73.737	-1.246	
			Long	271.226		
		Vert	50%	345.538	-1.473	
			95%	624.141		
		Long	50%	136.183	-1.326	
			95%	341.017		
	Floor holes	$R/\sqrt{W}$	Tran	50%	29.948	-1.126
				95%	78.426	
			Vert	50%	157.925	-1.594
				95%	302.618	
			Long	50%	36.969	-1.181
				95%	104.931	
$R/\sqrt[3]{W}$		Tran	50%	50.229	-1.126	
			Long	131.533		
		Vert	50%	328.541	-1.594	
			95%	629.554		
		Long	50%	63.604	-1.181	
			95%	180.532		
Wall & Roof holes	$R/\sqrt{W}$	Tran	50%	29.851	-1.193	
			95%	77.258		
		Vert	50%	168.317	-1.764	
			95%	375.839		
		Long	50%	65.761	-1.567	
			95%	217.393		
	$R/\sqrt[3]{W}$	Tran	50%	46.946	-1.193	
			Long	121.499		
		Vert	50%	328.805	-1.764	
			95%	734.196		
		Long	50%	119.207	-1.567	
			95%	394.075		

Table 8 Input parameters

	Cut holes	Stoping holes	Floor Holes	Wall&Roof holes
Linear charge concentrations $I(\text{kg/m})$	0.938	0.938	0.938	0.425
Charge length $H(\text{m})$	2.625	2.400	2.800	2.550
Stemming length $X_s(\text{m})$	0.905	0.800	0.400	0.650
Elastic Wave velocity $C(\text{m/s})$	4580			
Elastic modulus $E(\text{GPa})$	48.28			
Tension Strength $\sigma_t (\text{MPa})$	9.5			

K	$R/\sqrt[3]{W}$	PPV	1359.093	662.156	649.768	556.203
		Tran	594.967	271.226	131.533	121.499
		Vert	1931.270	624.141	629.554	734.196
		Long	501.157	341.017	180.532	394.075
N	$R/\sqrt[3]{W}$	PPV	1.558	1.500	1.618	1.686
		Tran	1.441	1.246	1.126	1.193
		Vert	1.626	1.473	1.594	1.764
		Long	1.257	1.326	1.181	1.567
a	$R/\sqrt[3]{W}$	PPV	0.519	0.500	0.539	0.562
		Tran	0.480	0.415	0.375	0.398
		Vert	0.542	0.491	0.531	0.588
		Long	0.419	0.442	0.394	0.522

Table 9 calculated damage zone

		Damage zone (m)							
		Cut hole		Stoping hole		Floor hole		Wall&Roof hole	
		$R_0$	$X_0$	$R_0$	$X_0$	$R_0$	$X_0$	$R_0$	$X_0$
Cube root distance	PPV	1.6	2.2	0.9	2.0	0.9	1.9	0.4	1.9
Cube root distance	Tran	0.8	2.2	0.4	2.0	0.1	1.9	0.1	1.9
	Vert	2.0	2.2	0.9	2.0	0.9	1.9	0.6	1.9
	Long	0.6	2.2	0.4	2.0	0.2	1.9	0.3	1.9

\*  $R_0$  : Perpendicular distance form the charge axis

\*  $X_0$  : Depth from the free face horizontal to charge axis

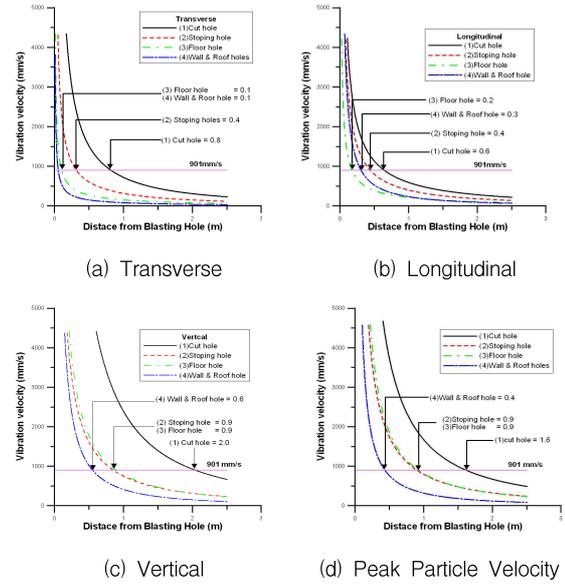


Fig. 17 Calculated peak vibration velocity and damage begins critical velocity

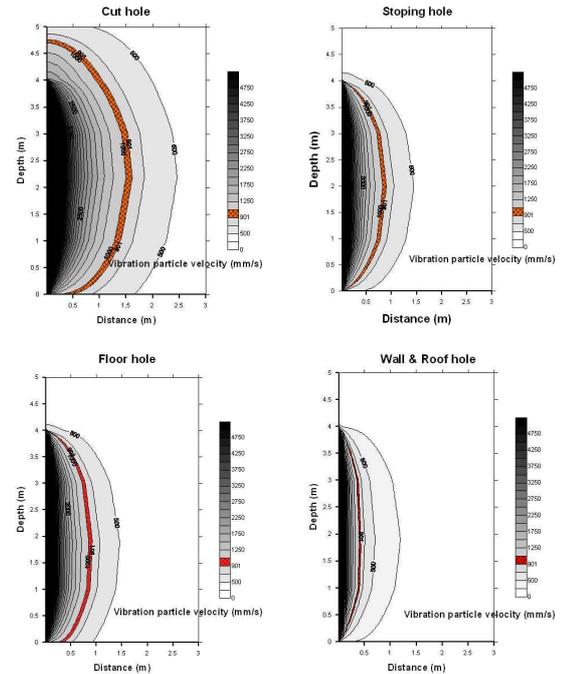


Fig. 18 Illustration of contours of equal vibration velocity

#### 4.4 평가결과의 고찰

본 연구가 계측이 이루어진 터널 발파는 총 7회로서 각각 발파시 총 5대의 발파진동 계측기를 이용하여 계측을 실시하였다. 계측된 지점은 발파지점에서 반대편 터널에서 계측이 이루어 졌으며 최소거리 21.02m에서 최대 61.53m에서 이루어 졌다.

여기서 얻은 진동추정식과 암석의 물성값을 이용하여 각 발파공에 따른 손상영역을 구하였다. 그러나 우리가 관심을 갖고자 하는 손상영역은 장약공 중심으로부터의 거리가 아닌 터널벽면에서 발파에 의한 손상영역이므로 상기에서 얻어진 손상영역에 대해서 심폐기공과 확대공의 장약공에 대해서 터널벽면과의 최단거리를 고려하여야 한다.

발파 패턴도를 이용해서 심폐기공과 확대공에 대한 터널 벽면까지의 최단거리를 측정된 결과 심발부분은 4.0m이며 확대공은 0.7m이다.

삼승근 환산거리를 사용하여 얻은 진동추정식에 의한 심폐기공에서 암반의 손상영역은 1.6m이다. 그러므로 심폐기공 발파에 의한 암반의 손상영역은 터널 굴진에 의해서 굴착되는 부분에 해당되므로 터널의 벽면까지 작용하지 않는다.

그리고 확대공에서 암반의 손상영역은 0.9m이다. 확대공에서 터널벽면까지의 거리 0.7m를 제외한 0.2m에 해당하는 부분이 터널벽면 배후에 암반의 손상영역으로 작용할 것으로 판단된다.

최외곽공에 의한 터널 벽면에 대한 암반의 손상영역은 0.4m이다. 그러므로 터널벽면의 암반손상영역에 대한 평가는 확대공과 최외곽공에 대한 암반손상영역을 평가가 복합적으로 이루어져야 한다.

터널 바닥에 대한 암반의 손상영역은 터널의 바닥공에 의한 영향에 의해서 0.9m이다.

발파진동의 3성분 즉 Transverse, Vertical, Longitudinal에 의한 각각의 손상영역을 적용한 결과 심폐기공, 확대공, 바닥공, 최외곽공 모두에서 Vertical 방향에 의해서 가장 큰 영향을 받고 각각 2.0m, 0.9m, 0.9m, 0.5m 의 손상영역을 형성한다.

#### 5. 결론 및 제언

발파에 의한 터널 굴착시 여굴 및 미굴의 발생, 발파진동으로 인한 원지반내 손상영역 형성은 경제성 및 안전성 확보에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 터널내 여굴은 암반상태, 화약의 종류, 천공의 정밀도의 요인에 의해서 형성되는데 본 연구에서는 천공의 정밀도가 높은 천공기를 사용하여 여굴의 발생량을 감소시켰으며 그때 발생하는 발파진동에 의해서 터널주변의 암반의 손상영역을 평가하였다.

연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 여굴 감소를 위해서는 천공의 정밀도와 발파단면에서 최외곽공의 천공 배열 및 장약량의 조정이 필요하다.
- (2) 컴퓨터 제어식 점보드릴을 사용하여 천공의 정밀도를 높이고 자동형 무타킷 측량시스템의 채택으로 여굴을 계측한 결과 여굴을 대폭감소 시킬 수 있다. 즉 종래 터널에서는 여굴이 평균 34.5cm인데 비하여 이 경우 여굴 발생량은 20cm미만이 전체의 74%이고 20~30cm는 21%, 30cm 이상은 5%에 불과하다.
- (3) 4개 부분별 발파진동의 크기를 입자상수 K와 감쇠지수 n으로 표시하면 다음과 같다.

Part	Constants of blasting vibration equation		Vibration velocity (mm/sec)	비교 (%)
	K	-n		
Cut holes	1359.093	-1.558	62.08	100
Stoping holes	662.156	-1.500	33.93	55
Floor holes	649.768	-1.618	26.35	42
Wall & Roof holes	556.203	-1.686	19.71	32

\*D=20m W=21kg

각 부분별 상대적인 진동의 크기를 비교하기 위하여 지발당 장약량과 거리를 각각 21kg, 20m로 가정해 보면 심폐기공의 진동이 100%일 때 확대공, 바닥공 및 외곽공의 진동크기는 각각 55%, 42% 및 32%로 심폐기공에 가장 크게 발생한다.

- (4) 진동 최대 입자속도와 암석의 인장강도로부터 구한 암반손상영역은 아래의 표와 같다.

Part	Damage zone (m)	Damage zone(*a) (m)
Cut holes	1.6	굴착대상영역에 포함.
Stoping holes	0.9	0.2
Floor holes	0.9	
Wall & Roof holes	0.4	0.4

- (a) 터널계획단면 외부에 미치는 손상영역

발파진동 계측 및 분석결과 터널 주변 원지반내 손상영역 형성은 확대공에 의해서 약 20cm, 최외곽공에 의해서 약 40cm가 형성될 것으로 판단된다.

- (5) 터널 벽면의 손상영역은 최외곽공에 의한 영향뿐만 아니라 확대공에 의한 손상영역을 발생하여 더욱 안정성에 문제를 발생시킬 수 있다. 그러므로 터널의 손상영역을 평가하기 위해서는 최외곽공 뿐만 아니라 확대공에 의한 영향도 같이 고려하여야 한다.
- (6) 본 연구대상의 터널의 경우 암반의 손상영역은 최외곽공뿐만 아니라 확대공에 의한 손상영역도 발생하게 된다. 그러므로 터널의 안정성을 높이기 위해서 지금까지 최외곽공 1열을 smooth blasting 하는데 이에 1열을 추가하여 최외곽공 2개열에 대해서 smooth blasting 할 것을 제의한다. 이때 공간격 및 장약량의 조정에 대해서 더욱 연구가 요구된다.

### 참고 문헌

- [1] 이태노, 김동현, 서영화, “터널굴착면 여굴 최소화를 위한 발파암 분류(안) 및 공법 개발 연구”, *화약·발파*, Vol20, No3, pp.25~38, 2002.
- [2] 이상돈, 김낙영, “여굴최소화를 위한 최적발파 패턴 설계방안에 관한 연구”, *제 18회 도로기술 연구성과 발표회 논문집*, 한국도로공사, pp.71~109, 2001.
- [3] 김양균, 김형철, 유정훈, “터널발파 작업시 여굴 저감을 위한 천공방법 연구”, *화약·발파*, Vol 21, No2 pp1~13, 2003.
- [4] 김성욱, “터널 천공발파시 여굴원인 및 대책”, *도로공사 실패사례집*, 한국도로공사, pp 391~394, 1999.
- [5] 이영호, “암반 사면에서 발파에 의한 손상영역 평가에 관한 연구”, *강원대학교 공학석사학위논문*, 68p, 2003.
- [6] 장수호, 신일재, 최용근, 이정인, “발파에 의한 터널주변 암반의 손상영역평가에 관한 연구”, *한국지반공학회 연구집*, Vol 16, 5., pp.12 9~140, 2000.
- [7] 정동호, “발파진동이 양생콘크리트의 강도에 미치는 영향”, *강원대학교 공학박사학위논문*, 137 p, 1995.
- [8] 김재홍, “터널에서 대구경 무장약공과 선균열을 이용한 심베기 공법에 관한 연구”, *강원대학교 공학석사학위논문*, 46p, 2000.
- [9] 구자홍, 김진경, 이재준, 전홍석, 최지훈, *통계학*, 423p, 1992
- [10] 임한옥, 박근순, 정동호, 이상은, “발파진동의 크기가 양생콘크리트의 강도에 미치는 영향”, *터널과 지하공간*, Vol. 5, pp.134~143, 1995.
- [11] 임한옥, 김재동, “발파진동의 크기와 주파수 특성에 관한 연구”, *한국자원공학회지*, 29, pp.146 ~ 157, 1992.
- [12] 류창하, “암반굴착에 의한 발파진동,소음 및 비석의 조절”, *터널과 지하공간*, Vol 2, pp.102 ~ 115, 1992.
- [13] 김일중, 김영석, “발파진동 예측식을 이용한 안전장약량 산정문제에 관하여”, *터널과 지하공간*, 한국암반공학회, Vol.5, pp.88 ~ 94, 1995.
- [14] 박지홍, 이정인, *지발당 장약량 산정을 위한 시차 결정 및 터널발파 진동특성*.
- [15] 고영선, 김종우, “발파조건이 지반진동에 미치는 영향에 관한 사례연구”, *터널과 지하공간*, Vol. 9, pp.12 ~ 19, 1999.
- [16] S.M. Tariq and P.N.Worsey, “An investigation into the effect of varying joint aperture and nature of surface on pre splitting, on Explosives. and Blasting”, pp.186~195, 1995.
- [17] S. Singh. “The influence of rock mass characteristics on overbreak control, on Explosives. and Blasting Technique”, Vol.2, pp.117~129, 1995.
- [18] Persson, Per-Anders. Holmberg, Roger. Lee, Jaimin “Rock blasting and Explosives Engineering”, CRC press. Inc., pp.112~130, pp.233~248, 1994.
- [19] S.O.Olofsson., *Applied explosives technology for construction and mining*, 1988
- [20] C. H. Dowding, *Blast vibration monitoring and control*, 1984.
- [21] Unyberg, S.Fjelborg, *Controlled drifting and estimation of blast damage*, 2000.
- [22] F. ouchterlony, C.Sjoberg and B. A.Jnsson, “Blast damage predictions from vibration measurements at the SKB underground laboratories at ÄspÖ in Sweden, Complete Abstracts of the ISEE Proceedings” Research proceedings Collection, 1993.
- [23] R. C. Gauer, *Evaluation of rock mass damage produced during blasting excavation*, 1989.
- [24] L. Obert and W. I. Duvall, “Rock Mechanics and Design of Structures in Rock”, John Wiley & Sons, Inc, pp.326~349, 1967.
- [25] F.V.Donzè, J.Bouchez, and A.A.Magnier, “Modeling Fractures in Rock Blasting”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol.34, No.8. pp.1153 ~ 1163, 1997.