

터널발파의 수치해석적 모델링 Numerical Modelling of Tunnel Blasting

이인모¹⁾, In-Mo Lee, 최종원²⁾, Jong-Won Choi, 김상균³⁾, Sang-Gyun Kim, 김동현⁴⁾, Dong-Hyun Kim

¹⁾ 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea. Univ.

²⁾ 고려대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Korea. Univ.

³⁾ 고려대학교 토목환경공학과 박사과정, Ph.D. Student, Dept. of Civil Engrg., Korea. Univ.

⁴⁾ (주) 삼보기술단 차장, Researcher, Sambo Engrg. Consultant.

SYNOPSIS : Drilling and blasting method for excavating rock mass is generally used in underground construction; but this technique has some shortcomings. For instance, rock mass damage is inevitable during drilling and blasting, and blast-induced vibration frequently causes some problems. Until now, field measurement method is used to predict the overbreak and vibration; but it has many limitations. Therefore, numerical analysis method is needed to overcome such limitations, and to estimate and predict damage and vibration due to tunnel blasting in the design stage. In this study, damage zone of rock mass due to stoping and contour blasting is compared based on standard tunnel blasting pattern, and the propriety of the standard tunnel blasting pattern is estimated. Then, blasting pattern is optimized so that the damage zone due to stoping blasting with reduced charge is consistent with that due to contour blasting.

Key words : 터널발파, 암반의 손상영역, 발파패턴, 입자속도, 충격파, 응력파

1. 서론

현재, 지하구조물 건설시 암반을 굴착하기 위하여 발파에 의한 굴착공법이 일반적으로 사용된다. 그러나 발파에 의한 암반의 굴착은 잔존암반의 손상과 암반의 진동문제를 유발하는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 발파에 의한 암반의 손상영역과 진동에 대한 평가와 예측을 통하여 발파패턴의 개선이 이루어져야 한다. 현재까지는 발파에 의한 암반의 손상영역과 진동의 평가와 예측을 위하여 현장계측에 의한 경험적인 방법이 주로 이용되어 왔으나 이러한 경험적인 방법만으로는 서로 다른 현장의 다양한 조건을 반영하지 못하므로 적절한 평가와 예측이 이루어 질 수 없다. 따라서 경험적인 방법의 한계를 극복하기 위해서는 수치해석에 의한 암반의 손상영역과 진동의 예측을 실시하여야 한다. Liu와 Katsabanis(1997)에 의하면 발파에 의한 충격파 혹은 응력파의 전파는 대상암반의 균열분포 및 손상정도와 밀접한 관계가 있고 폭발가스에 의한 팽창력은 충격파에 의해 생성된 균열폭의 확대 및 파쇄암석의 이동에 관계된다고 알려져 있다. 이러한 사실은 암반내의 충격파 혹은 응력파의 전파를 수치해석으로 적절히 모델링한다면 발파에 의한 암반의 손상과 진동을 적절히 예측할 수 있음을

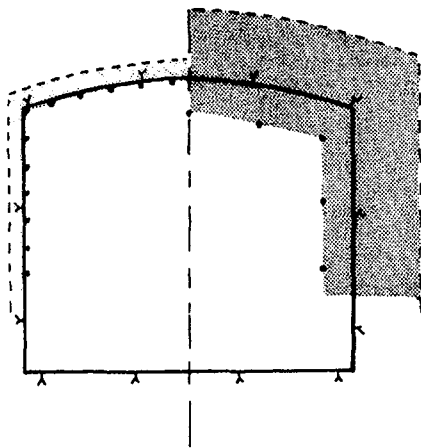
시사한다.

본 논문에서는 현행 발파패턴의 문제점을 지적하고 도로터널의 표준 발파패턴을 기초로 터널발파를 모델링하여 암반에서의 입자속도를 구하고 이를 바탕으로 암반의 손상영역을 평가하였다. 또한 터널 발파에 의한 암반의 손상영역을 최소한으로 줄이기 위하여 외곽공에 인접한 주변공에 장전되는 ANFO의 적절한 장전 직경을 구하는 발파패턴의 최적화를 실시하였다.

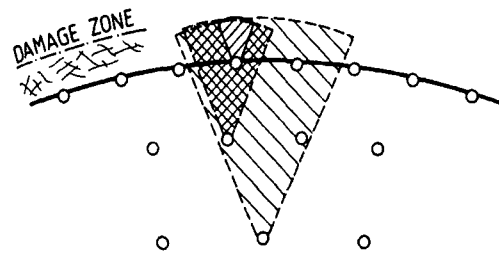
2. 현행 발파패턴의 문제점

현행 도로터널의 표준 발파패턴에 의하면 주변공에는 주장약으로 밀장전된 ANFO(장전밀도 =1.272kg/m)가 사용되고 외곽공에서는 설계굴착선을 확보하기 위해 도폭선 혹은 정밀 폭약인 gurit이 사용된다. Olofsson(1988)에 의하면 발파공의 직경이 45mm인 경우 밀장전된 ANFO에 의한 암반의 손상영역은 암반의 조건에 따라 대략 발파공 중심으로부터 반경 1.2~1.8m에 이르고 gurit(장전직경 17mm)에 의한 손상영역은 0.2~0.4m에 이르는 것으로 알려져 있다.

따라서 외곽공 발파에 의한 손상영역은 그림 1 (a)의 좌측에 표시된 것과 같이 설계굴착선 주위에만 집중되는 반면 외곽공에 인접한 주변공 발파에 의한 손상영역은 그림 1 (a)의 우측에 표시된 것처럼 설계굴착선을 크게 벗어나 외곽공 발파에 의한 손상영역보다 훨씬 더 커지게 된다. 이와 같이 적절하지 못한 발파패턴에 의하여 암반에 발생하는 과도한 손상영역은 지하구조물의 안정성을 위협하며 이의 보강을 위하여 별도의 지보재가 요구되므로 경제성을 악화시키는 요인이 된다. 이러한 손상영역을 줄이기 위해서는 외곽공에 인접한 주변공에 장전되는 화약의 양을 줄여 그림 1 (b)와 같이 주변공 발파에 의한 손상영역이 외곽공 발파에 의한 손상영역과 일치되도록 하는 발파패턴의 최적화가 이루어져야 한다. 발파패턴을 최적화시키기 위해서는 외곽공에 인접한 주변공에 장전되는 ANFO의 장전직경을 감소시켜야 한다.



(a) 현행 발파패턴에 의한 손상영역



(b) 최적화된 발파패턴에 의한 손상영역

그림 1 발파에 의한 암반의 손상영역

3. 터널발파의 수치해석 모델링

3.1 발파하중

터널 발파를 수치해석으로 모델링하기 위해서 가장 중요한 사항 중의 하나가 발파하중을 적절히 산정하는 것이다. 발파공내의 화약이 기폭되면 극히 짧은 시간(10~1000 μ sec) 이내에 최대폭굉압이 발생하

면서 충격파와 고온 고압의 가스가 발파공 벽에 작용하게 된다. 이러한 짧은 작용시간과 높은 발생에너지로 인하여 화약의 폭발에 의한 발파하중을 측정하거나 평가하는 것은 매우 어려운 일이다.

본 논문에서는 발파하중을 산정하기 위하여 김상균 등(1999) 이 제시한 것과 같이 밀장전된 화약의 경우는 식 (1)을 사용하여 화약의 폭발에 의한 폭발압을 구하고, decoupled charge에 의한 가스팽창압은 다음의 식 (2)를 이용하여 구한다. 그리고 하중의 형상은 모형실험 결과로부터 나온 변형을 이력곡선을 참고로 하여 발파하중을 산정하였다.

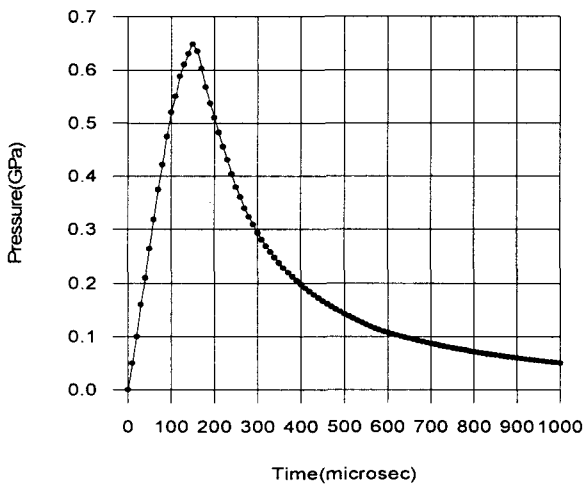
$$p_D = \frac{1}{\gamma+1} \rho_0 D^2 \quad (1)$$

$$p_g = \frac{f \cdot L}{V - \alpha L} = \frac{f}{(DI)^2 \cdot (1/\rho) - \alpha} \quad (2)$$

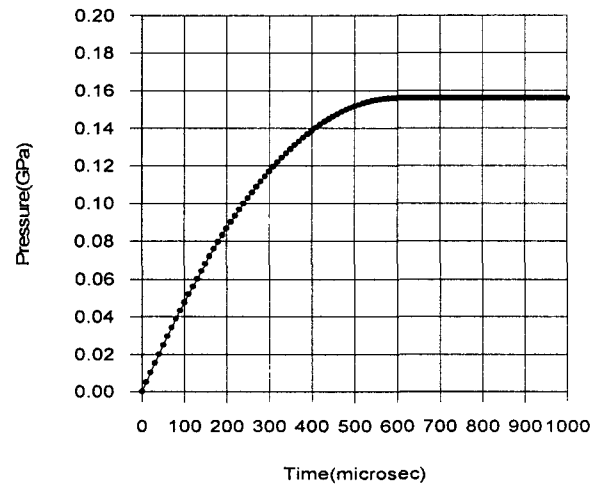
여기서 P_D 는 폭발압, γ 는 비열비, ρ_0 는 화약의 밀도, D 는 화약의 폭발을 나타낸다. 또한 P_g , f , L , V 는 각각 가스팽창압, 화약력, 폭약중량, 장약실의 체적을 나타내고 DI (Decoupling Index)는 발파공 직경과 화약 장전직경의 비를 나타내며, α 는 다음의 식 (3)으로 표시되는 co-volume이다.

$$\alpha = \frac{1.5}{1.26 + 1.33\rho_0} \quad (3)$$

주변공에 사용되는 ANFO의 밀도는 0.9 g/cm^3 , 폭발속은 3000 m/sec , 비열비는 2.44이며, 표준발파패턴에 의하면 발파공내에 밀장전되므로 DI 는 1이 된다. 또한 외곽공에 사용되는 gurit의 밀도는 1 g/cm^3 , 폭발속은 4000 m/sec , 화약력은 $10000 \text{ l} \cdot \text{kgf/cm}^3$ 이며 일반적으로 gurit의 장전직경은 17 mm 이므로 발파공의 직경이 45 mm 인 경우 DI 는 2.65가 된다. ANFO와 gurit의 물성치와 DI 를 고려하여 발파공 벽에 작용하는 발파하중을 산정하여 그림 2에 나타내었다.



(a) 주변공발파시 하중(ANFO, DI=1)



(b) 외곽공발파시 하중(gurit, DI=2.65)

그림 2 발파하중

3.2 해석조건

본 논문에서는 외곽공 발파와 외곽공에 인접한 주변공 발파에 의한 손상영역을 비교하고 이러한 손상영역을 최소화하기 위하여 그림 3에 나타낸 2차선 도로터널단면중 터널천단부에 사각형으로 표시된 영

역을 해석대상으로 하였다. 해석 영역은 9개의 외곽공과 5개의 주변공을 포함하고 있고 외곽공 사이의 간격은 600mm, 주변공 사이의 간격은 940mm, 외곽공과 주변공 사이의 간격은 750mm이며, 모든 발파공의 지름은 45mm이고, 터널의 굴착단면적은 90.939m²이다. 터널의 천단은 지하 20m에 위치하고 있고 암반내에 불연속면은 없는 것으로 가정하였다. 또한 주변공 발파와 외곽공 발파에 의한 영향을 분리하여 비교하기 위해 5개의 주변공들이 동시에 기폭된후 상당한 시간이 지난후 9개의 외곽공들이 동시에 기폭되는 것으로 가정하였다.

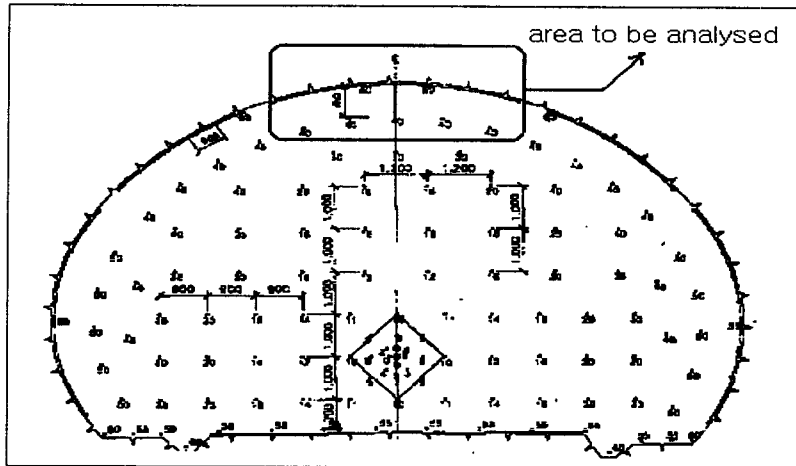


그림 3 일반적인 도로단면(2차선)

또한, 그림 3에 나타난 해석영역을 유한요소망으로 나타내어 그림 4에 제시하였다. 유한요소망의 좌, 우측과 상단의 경계면에는 암반의 무한영역을 모사하여 파의 반사를 막기 위해 infinite boundary를 사용하였고, 하단부는 심배기와 주변공 발파에 의해 이미 암반이 굴착된 것으로 가정하고 자유면으로 설정하였다. 그림 4에서 수직방향을 z축으로, 터널축에 직각인 방향을 x축으로 설정하였다.

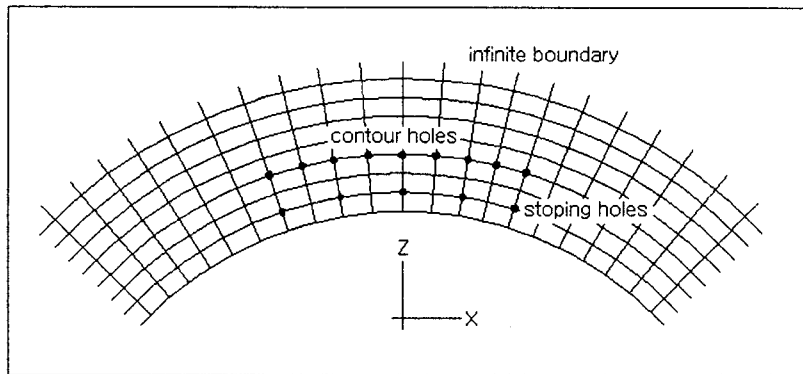
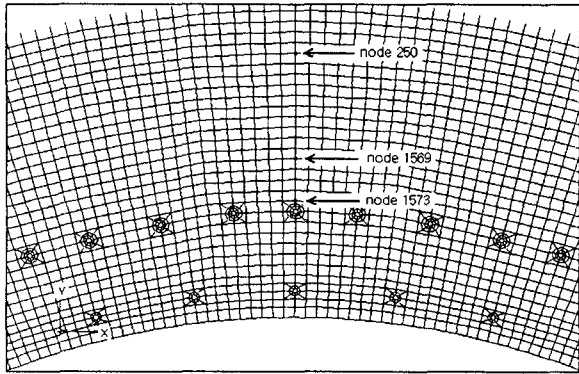


그림 4 해석에 사용된 요소망

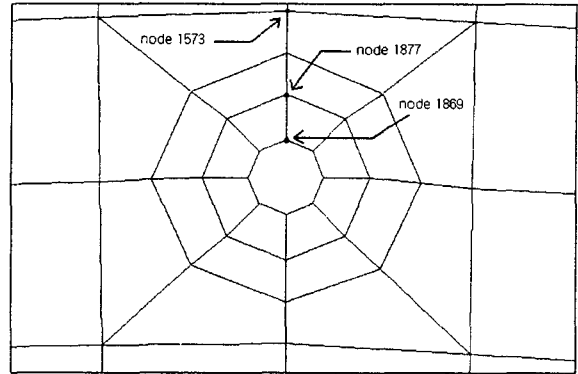
일반적으로 충격파나 응력파의 전달은 3차원 문제이지만 터널의 경우 발파공의 지름에 비해 화약의 장전길이가 길기 때문에 본 논문에서는 평면변형을 요소를 사용하여 2차원 해석을 실시하였다. 해석에 사용된 요소의 최대크기와 해석시간간격은 수치해석결과로 나온 해의 안정성과 정확성을 고려하기 위해 Valliappan과 Wang (1994)이 제안한 요소크기와 해석시간간격 기준에 따라 각각 10 cm, 10 μ sec로 정하였고, 해석대상 지반의 탄성계수와 프와송비 그리고 지반의 토압계수는 각각 50 GPa, 0.25, 0.5로 가정하였다. 또한 암반의 감쇠효과는 일반적인 토사지반에 비해 작다고 알려져 있으므로 damping은 1%의 material damping을 사용하였다.

주변공과 외곽공 발파에 의한 주위 암반의 손상영역을 평가하기 위해 그림 5에 표시된 절점들에서의

입자속도를 구하였다. 발파하중의 손상영역을 평가하기 위해 입자속도를 구한 것은 현재까지 암반의 손상정도를 평가하기 위해 암반의 손상정도와 입자속도의 관계가 이용되어 왔기 때문이다.



(a) 주변공 발파



(b) 외곽공 발파

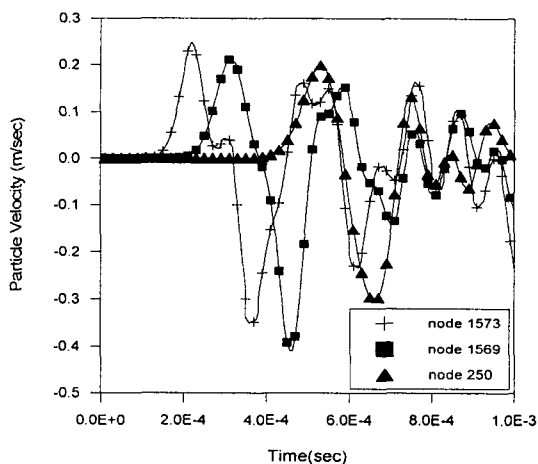
그림 5 발파에 의한 입자속도를 측정할 절점들의 위치

그림 5에서 외곽공 발파에 의한 입자속도 이력곡선을 구한 절점들은 외곽공 중에서 가운데에 위치한 발파공 주위에 위치하는 데 이것은 외곽공 발파에 의한 발파하중이 주변공 발파에 의한 발파하중보다 훨씬 작으므로 그 영향범위가 주변공 발파에 의한 영향범위에 비해 더 작을 것으로 예상되기 때문에 발파공 주위에 위치한 절점들을 선택하였다.

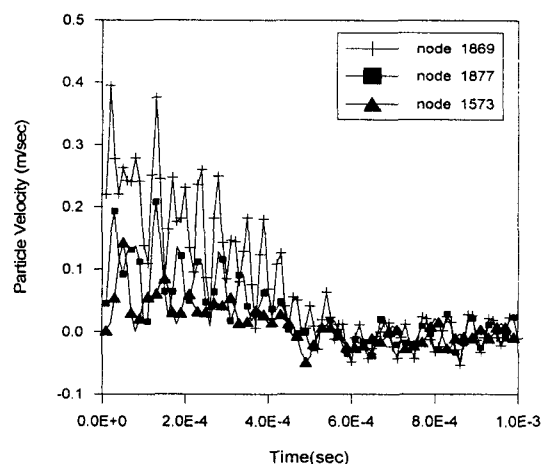
4. 수치해석 결과

4.1 표준발파 패턴에 의한 손상영역

유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/standard를 이용하여 주변공 발파와 외곽공 발파에 의한 각 절점들에서의 z축 방향 입자속도 이력곡선을 구하여 그림 6에 제시하였다. 수치해석 결과, x축 방향 입자속도는 입자속도를 구한 절점들의 위치가 유한요소망의 대칭축 선상에 위치하므로 z축 방향 입자속도에 비해 매우 작은 것으로 나타나 그래프로 나타내지는 않았다.



(a) 주변공 발파시



(b) 외곽공 발파시

그림 6 발파에 의한 z축 방향 입자속도 이력곡선

그림 6으로부터 각 절점에서의 최대입자속도를 구하여 표 1에 제시하였다. 최대입자속도는 이력곡선 중에서 부호에 상관없이 절대값이 가장 큰 값을 최대값으로 사용하였다.

표 1 각 절점에서의 최대입자속도

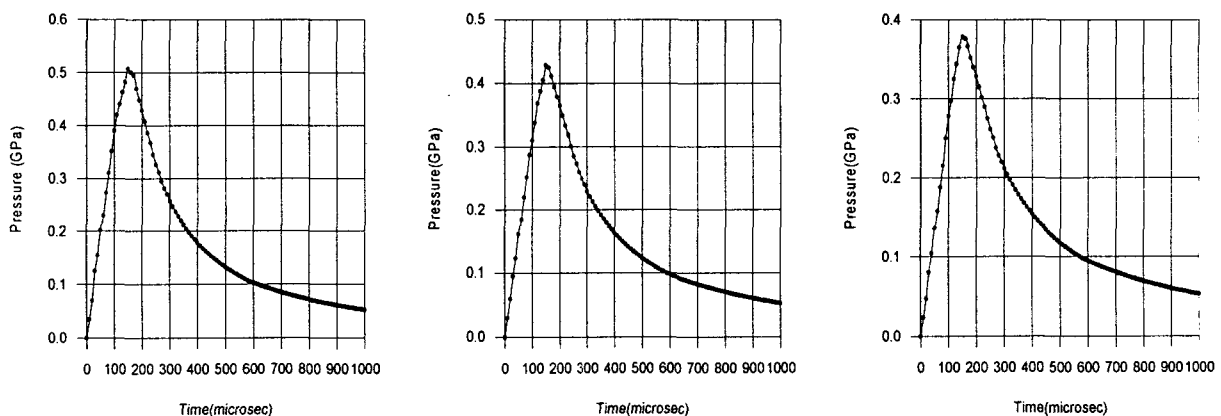
주변공 발파			외곽공 발파		
절점	설계 굴착선으로부터의 거리(m)	최대입자속도 (m/sec)	절점	설계 굴착선으로부터의 거리(m)	최대입자속도 (m/sec)
1573	0.1	0.350	1869	0.0225	0.395
1569	1.0	0.412	1877	0.05	0.208
250	1.5	0.304	1573	0.1	0.143

Langefors (1948) 그리고 Bauer와 Calder(1978) 등이 제시한 발파에 의한 암반의 손상 기준에 의하면 발파에 의한 암반에서의 입자속도가 0.27m/sec 이상이면 암반에 손상이 발생하기 시작하고, 입자속도가 0.6m/sec 이상이면 암반에 상당한 손상이 발생하고, 2.54m/sec 이상이 되면 암반에 완전한 파쇄가 일어나게 된다.

이와 같은 기준을 바탕으로 표1을 분석하면, 주변공 발파에 의해 설계굴착선으로부터 1.5m 떨어진 절점 250에서의 입자속도가 0.304 m/sec으로 나타나 손상영역은 대략 설계굴착선으로부터 1.5m 이상까지 이를 것으로 추정되며, 외곽공 발파에 의해 설계굴착선으로부터 0.0225m 떨어진 절점 1869에서의 입자속도가 0.395 m/sec, 설계굴착선에서 0.05m떨어진 절점 1877에서는 0.208 m/sec으로 나타나 암반의 손상은 거의 설계굴착선 주위에만 국한될 것으로 판단된다. 따라서 주변공발파에 의한 손상 영역이 외곽공 발파에 의한 손상영역보다 훨씬 크므로 발파패턴은 적절하지 못한 것으로 판단된다.

4.2 발파패턴의 최적화

수치해석결과로부터 주변공 발파에 의한 손상영역이 외곽공 발파에 의한 손상영역보다 훨씬 큰 것으로 나타났으므로 주변공 발파에 의한 손상영역을 외곽공 발파에 의한 손상영역과 일치시키기 위한 발파 패턴의 최적화가 필요하다. 발파패턴의 최적화를 위해 외곽공에 인접한 주변공에 장전되는 ANFO의 장전직경을 45mm에서 40mm, 38mm, 35mm로 줄였을 경우의 발파하중을 그림 7과 같이 구하고 이러한 하중에 의한 손상영역을 수치해석으로부터 구한다.



(a) 장전직경 40mm

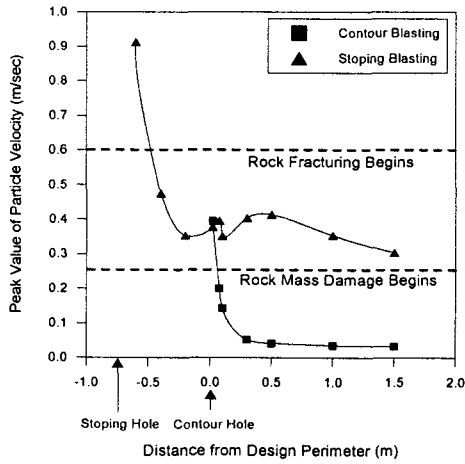
(b) 장전직경 38mm

(c) 장전직경 35mm

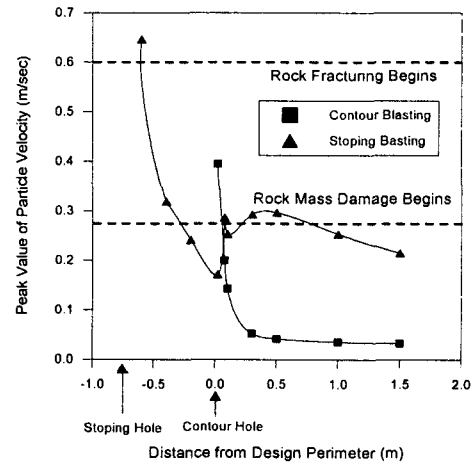
그림 7 ANFO의 장전직경에 따른 발파하중(발파공 직경=45mm)

수치해석결과로부터 구한 암반의 손상영역이 외곽공발파에 의한 손상영역과 일치할 경우의 ANFO의 장전직경을 구함으로써 발파패턴을 최적화하게 된다.

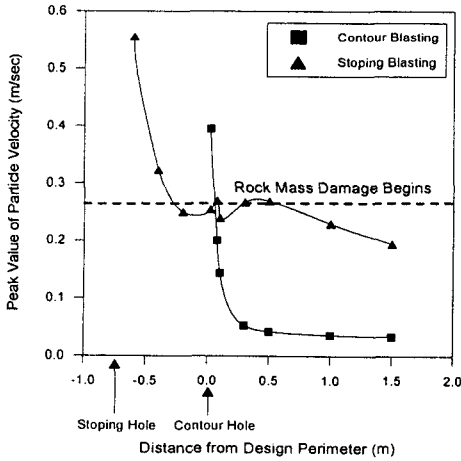
ANFO의 장전직경이 바뀔 경우 주변공 발파에 의한 각 지점에서의 최대입자속도와 외곽공 발파에 의한 각 지점에서의 최대입자속도를 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 x축은 설계굴착선으로부터 입자속도를 구한 절점까지의 거리를 나타내고 y축은 최대입자속도를 나타내며, 아래쪽에 위치한 점선은 입자속도가 0.27m/sec인 선을 나타내며 발파에 의하여 암반에 손상이 발생하기 시작하는 속도를 의미한다. 삼각형으로 표시된 곡선은 ANFO가 장전된 주변공 발파에 의한 각 절점에서의 최대입자속도를 나타내고, 사각형으로 표시된 곡선은 gurit이 장전된 외곽공 발파에 의한 각 절점에서의 최대입자속도를 나타낸다.



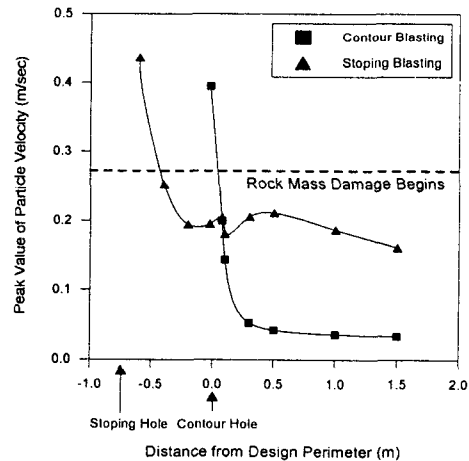
(a) ANFO의 장전직경 45mm



(b) ANFO의 장전직경 40mm



(c) ANFO의 장전직경 38mm



(d) ANFO의 장전직경 35mm

그림 8 주변공과 외곽공 발파에 의한 손상영역 비교

그림 8에서 외곽공 발파에 의한 입자속도를 나타낸 곡선과 입자속도 0.27m/sec을 나타내는 점선이 만나는 지점은 설계굴착선으로부터 대략 7.5 cm 떨어진 지점으로 나타나 외곽공 발파에 의한 손상영역은 설계굴착선으로부터 약 7.5 cm에 이를 것으로 판단된다. 그러나 ANFO의 장전직경이 45mm를 나타낸 그림 8 (a)을 보면 주변공발파에 의한 입자속도를 나타내는 곡선과 점선은 설계굴착선으로부터 대략 1.8m에서 만나므로 현행의 표준발파패턴에 의한 암반의 손상영역은 설계굴착선으로부터 대략 1.8m에 이르고, ANFO의 장전직경이 40mm인 그림 8 (b)를 보면 손상영역이 설계굴착선으로부터 약 7.5 cm에 이를 것으로 판단된다. 또한, ANFO의 장전직경이 38mm인 경우에는 주변공 발파에 의한 손상영역이 대

략 외곽공 발파에 의한 손상영역과 일치할 것으로 판단되며, 장전직경이 35mm인 경우에는 손상영역이 설계굴착선에도 미치지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 주변공 발파에 의한 손상영역을 외곽공 발파에 의한 손상영역과 일치시키기 위해서는 주변공에 장전되는 ANFO의 장전직경을 38mm로 제한하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 표준발파패턴을 바탕으로 하여 주변공과 외곽공 발파에 의한 발파하중을 산정하여 외곽공 발파와 주변공 발파에 의한 입자속도 이력곡선을 구하고 최대입자속도로부터 암반의 손상영역을 추정 후 손상영역을 바탕으로 표준발파패턴을 적절성을 평가하였다. 또한 주변공 발파에 의한 손상영역을 외곽공 발파에 의한 손상영역과 일치시키기 위한 발파패턴최적화를 실시하였으며 이의 결론은 다음과 같다.

- 1) 현행의 표준발파패턴을 기준으로하여 수치해석결과로부터 구한 주변공 발파에 의한 암반의 손상영역은 설계굴착선으로부터 약 1.8m에 이르는 것으로 나타났고 외곽공 발파에 의한 암반의 손상영역은 설계굴착선으로부터 약 7.5 cm에 이르는 것으로 나타났다.
- 2) 외곽공 발파에 의한 손상영역보다 주변공 발파에 의한 손상영역이 훨씬 더 크므로 현행의 표준발파패턴은 적절하지 못한 것으로 나타나 주변공에 장전되는 ANFO의 장전직경을 줄여 주변공 발파에 의한 암반의 손상영역을 감소시키는 발파패턴의 최적화가 필요한 것으로 판단된다.
- 3) 발파패턴의 최적화 결과 외곽공에 인접한 주변공에 장전되는 ANFO의 장전직경이 38mm일 경우 주변공 발파에 의한 암반의 손상영역이 외곽공 발파에 의한 암반의 손상영역과 대략 일치하는 것으로 나타나 주변공 발파에 의한 암반의 손상을 최대한으로 억제하기 위해서는 ANFO의 장전직경을 38mm로 제한하는 것이 바람직하다고 판단된다.

6. 감사의 글

이 연구는 (주) 삼보기술단과의 산학협동 연구로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

7. 참고 문헌

1. Liu, L. and Katsabanis, P. D.(1997), "Development of a Continuum Damage Model for Blasting Analysis" Int. J. Rock. Min. Sci. Vol. 34, No. 2, pp. 219-231.
2. Olofsson, S. O. (1988), *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*, Nora Boktryckeri AB.
3. 김상균, 이인모, 최종원, 김 신, 이두화 (1999), "Decoupling 장전시 천공벽에 작용하는 발파하중의 산정", 한국지반공학회 '99 가을학술발표회 논문집, pp. 209~216.
4. Valliappan, S. and Wang, Y. C.(1994), "Advances in computational mechanics applied to wave propagation problems", Computer Methods and Advances in Geomechanics, pp 347-360.
5. Langefors, U., Kihlstrom, B., and H. Westerberg, H. (1948), *Ground Vibration in Blasting*, Water Power.
6. Bauer, A. and Calder, P. N. (1978), *Open Pit and Blast Seminar*, Course #63-321, Queen's University Mining Engineering Department.