

유한요소해석을 이용한 터널 발파설계의 최적화

Optimization of Tunnel Blasting Design by Finite Element Method

이 인 모* ¹	Lee, In-Mo	최 중 월* ²	Choi, Jong-Won
김 상 균* ³	Kim, Sang-Gyun	김 동 현* ⁴	Kim, Dong-Hyun
이 두 화* ⁵	Lee, Du-Wha	김 영 옥* ⁶	Kim, Young-Uk

Abstract

The drilling and blasting method for excavating rock mass is generally used in underground construction; however, this technique has some shortcomings. For instance, the damage of rock masses is inevitable during drilling and blasting, and the blast-induced vibration frequently causes some problems. Until now, the field measurement method is used to predict the damage and vibration; however, it has many limitations. A numerical approach is needed to complement such limitations, and to estimate and predict the damage and vibration induced by tunnel blasting in the design stage. In this study, the rock mass behavior around the blast hole induced by blasting is analyzed and the damage zone of rock masses due to stoping and contour blasting based on the standard tunnel blasting pattern are compared, and the propriety of the standard tunnel blasting pattern is assessed. Then, the blasting pattern is optimized so that the damage zone due to stoping blasting with reduced charge is consistent with that due to contour blasting.

요 지

지하구조물 건설시 발파에 의한 암반의 굴착공법이 일반적으로 사용된다. 그러나 발파에 의한 암반의 굴착은 잔존암반의 손상과 진동을 유발하는 문제점을 가지고 있다. 현재까지는 이러한 암반의 손상과 진동문제를 해결하기 위해 현장계측을 기초로한 경험적인 방법이 이용되어 왔으나 여러 가지 한계점을 지니고 있는 것이 현실이다. 따라서 수치해석에 의한 터널 발파의 모델링을 이용하면 이러한 한계점을 보완할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 발파에 의한 발파공주위 암반의 거동을 유한요소해석을 이용하여 규명하고, 도로터널의 표준발파패턴을 기초로 하여 외곽공 발파와 외곽공에 인접한 주변공 발파에 의한 암반의 손상을 비교하여 발파패턴의 적절성을 평가하고자 하였으며, 이를 근거로 발파에 의한 암반의 손상을 최소화하기 위한 발파패턴의 최적화를 도모하였다.

Keywords : Rock blasting, Blasting pattern, Optimization, Decoupled charge, Numerical analysis

1. 서론

지하구조물 건설시 일반적으로 발파에 의한 암반 굴착

공법이 사용된다. 발파에 의한 암반의 굴착공법은 기계식 굴착공법에 비해 여러 가지 다양한 지반에 대한 적용성과 경제성 등의 장점을 가지고 있다. 그러나 발파에 의한

*1 정희원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수
 *2 고려대학교 토목환경공학과 석사과정 졸업
 *3 고려대학교 토목환경공학과 박사과정
 *4 정희원, (주) 삼보기술원, 차장
 *5 정희원, (주) 삼보기술원, 대표이사
 *6 정희원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사 후 연구 과정

암반의 굴착공법은 발파패턴의 설계가 적절하지 못할 경우 잔존암반의 손상과 진동을 유발하는 문제점을 지니고 있다. 지하구조물 건설시 잔존암반의 손상이 발생하게 되면 이의 보강을 위하여 별도의 지보체를 필요로 하게 되어 경제성을 악화시키는 요인이 된다.

따라서 발파에 의한 암반의 거동을 예측하여 이를 발파패턴의 설계에 반영하여야 한다. 현재까지는 발파에 의한 암반의 손상과 진동을 예측하기 위하여 현장계측에 의한 경험적인 방법이 사용되어 왔다. 그러나 이러한 경험적인 방법은 다양한 지반조건을 반영하지 못하는 등의 한계점을 가지고 있으므로 수치해석을 통한 암반의 손상과 진동을 예측함으로써 경험적인 방법의 한계점을 보완하여야 한다. Liu와 Katsabanis (1997)에 의하면 화약의 폭발에 의해 발생한 충격파는 암반의 손상과 균열발생의 주원인이 되며, 충격파 이후에 발생하는 폭발가스는 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 합리적으로 예측할 수 있음을 시사한다.

본 논문에서는 발파하중에 의한 발파공 주위 암반의 거동을 수치해석을 이용하여 규명하고, 현행 도로터널의 표준 발파패턴을 기초로 터널발파를 모델링하여 암반에서의 입자속도를 구하여 이를 바탕으로 주변공 발파와 외곽공 발파에 의한 암반의 손상영역을 비교하고 발파패턴의 적절성을 평가하였다. 또한 터널 발파에 의한 암반의 손상영역을 최소한으로 줄이기 위하여 외곽공에 인접한 주변공에 장전되는 ANFO의 적절한 장전 직경을 구하는 발파패턴의 최적화를 실시하였다.

2. 발파이론

일반적으로 터널 발파시 발파에 의한 암반의 파쇄는 3차

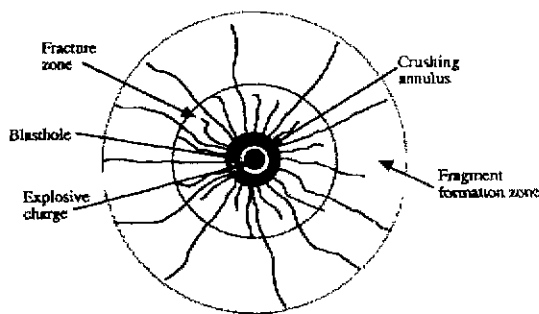


그림 1 발파공 주위 암반의 손상영역

원적인 문제이지만 발파공내의 화약의 장전직경에 비해 장전길이가 훨씬 길고, 화약의 폭발속도가 매우 빠르므로 화약의 전체 장전길이가 동시에 기폭된다고 가정할 수 있으므로 2차원적인 문제로 간주할 수 있다. 이러한 가정하에 화약의 폭발에 의한 발파공 주위의 암반의 손상영역은 다음의 그림 1과 같다 (Whittaker 등, 1992)

화약의 기폭직후 극히 짧은 시간(10~1000 μ sec) 이내에 충격파와 고온 고압의 가스가 발생하게 된다. 이러한 충격파는 발파공벽에 작용하여 발파공 주위의 암반에 반경방향의 압축응력이 발생하게 되는데 이러한 압축응력은 암반의 압축강도에 비해 훨씬 크기 때문에 발파공 주위의 암반은 완전히 파쇄되며 이러한 영역을 분쇄환 (crushed annulus)이라고 한다. 분쇄환은 주위 암반에 불필요한 손상을 초래하여 암반의 강도와 안정성을 저하시키게 되므로 그 크기를 최소한으로 감소시켜야 한다.

이러한 영역 바깥에서는 충격파가 응력파로 바뀌면서 음속으로 암반을 따라서 방사상으로 전파되어 나아간다. 응력파가 전파되는 영역은 탄성영역이고, 응력파는 반경방향의 압축응력(compressive radial stress)과 접선방향의 인장응력(tensile tangential stress)로 구성되며 그 크기는 Kirsch의 해로부터 구할 수 있다. 발파공 주위에 발생하는 접선방향의 인장응력으로 인하여 분쇄환의 바깥에는 방사상의 균열이 발생하게 되어 발파공 주위의 암반은 여러개의 조각으로 나뉘게 되며 이러한 영역을 균열대(fracture zone)라고 하며 발파에 의한 암반의 파쇄에 중요한 역할을 한다.

화약의 폭발에 의해 발생한 가스압은 충격파가 지나간 이후에도 상당한 시간동안 발파공 내에 높은 압력을 유지하며, 발파공 주위에 유사정적(quasi-static)인 응력분포를 나타나게 하고, 균열내부로 침투하여 균열의 성장을 촉진시켜 발파공 주위의 방사상 균열을 더욱더 키지게 만든다. 이러한 균열들은 서로 중첩되거나, 다른 발파에 의해 생성

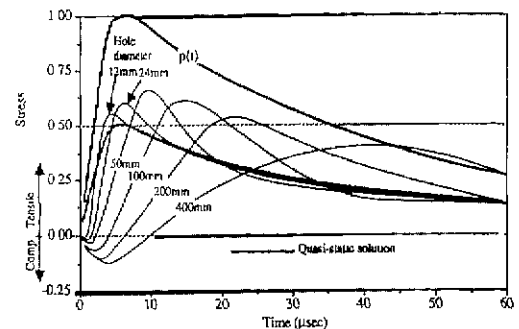
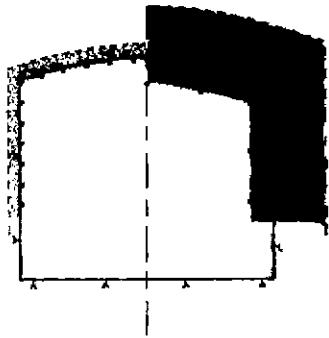
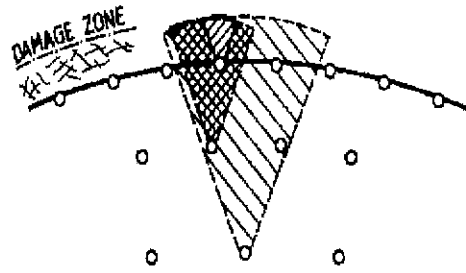


그림 2 발파하중 P(t)에 의한 발파공 주위의 접선방향 응력



(a) 현행 발파패턴의 의한 암반의 손상영역



(b) 최적화된 발파패턴에 의한 손상영역

그림 3. 발파에 의한 암반의 손상영역 비교

된 균열과 만나거나 혹은 자유면을 만나게 되어 암반은 다양한 크기의 조각으로 파쇄되어 파석형성대를 형성하게 된다.

발파공 주위의 균열의 발생은 Bligh (1972)에 의해 연구되었다. 그는 화약의 폭핑에 의한 발파공 주위의 동적인 응력상태에 대해 연구하여 발파공 주위의 임의의 지점에서의 응력과 변형율을 구할 수 있는 해를 구하였고 그 결과는 그림 2와 같다.

그림 2는 규암(quartzite)로 이루어진 암반내에 발파하중 $P(t)$ 에 의하여 발파공 주위에 발생하는 접선방향응력의 시간에 따른 변화를 나타낸 것으로서 접선방향의 응력은 시간 $t=0$ 에서 압축응력으로 나타난 후 인장응력으로 바뀌고 최대값에 도달한 후에 그 크기가 감소하는 것을 알 수 있다.

이와 같은 접선방향 압축응력의 발생은 초기에는 반경 방향의 변형율(압축)이 접선방향의 변형율(인장)에 비해 빨리 증가하기 때문이며 접선방향의 응력은 다음의 식 (1)로 표현된다.

$$\sigma_{\theta} = \frac{E(\epsilon_{\theta} + \nu\epsilon_r)}{1 - \nu - 2\nu^2} \quad (1)$$

여기서 σ_{θ} 는 접선방향응력, ϵ_{θ} 는 접선방향변형율, ϵ_r 은 반경방향변형율 그리고 E 는 탄성계수를 나타낸다.

초기에는 발파하중의 크기가 빠르게 증가하면서 ϵ_r (압축)이 ϵ_{θ} (인장)에 비해 빠르게 증가하므로 σ_{θ} 는 압축응력이 되고, 그 이후 응력파의 파면이 지나간 이후 응력이완으로 인하여 ϵ_r 에 비해 ϵ_{θ} 의 크기가 커지게 되므로 σ_{θ} 는 인장응력으로 바뀌게 된다.

폭핑의 초기단계에서는 주응력이 모두 압축응력이 되어 암반에는 인장균열이 아니라 압축응력에 의한 분쇄환이 발생하게 된다. 따라서 분쇄환의 크기를 최대한으로 줄이기

위해서는 폭핑압의 크기를 감소시켜 접선방향 압축응력의 크기를 감소시켜야 한다.

3. 현행발파패턴의 문제점

현재의 도로터널의 표준발파패턴에 의하면 모든 발파공의 직경은 45mm이고, 주변공에는 주장약으로 밀장전된 ANFO를 사용하며, 외곽공에는 설계굴착선을 얻기 위하여 도폭선이나 구릿(gurit)을 사용한다. Olofsson (1988)에 의하면 발파공의 직경이 45mm인 경우 밀장전된 ANFO(장전 밀도=1.5kg/m)에 의한 암반의 손상은 발파공 중심에서 반경 1.2~1.8m에 이르고, 구릿(장전직경=17mm)에 의한 손상영역은 발파공 중심에서 약 0.2~0.4m에 이르게 된다.

따라서 터널발파시 외곽공 발파에 의한 손상영역은 그림 3(a)에 나타난 것처럼 설계굴착선 주위에만 집중되는 반면, 주변공 발파에 의한 손상영역은 설계굴착선을 넘어 훨씬 먼 거리까지 도달하게 되어 외곽공 발파에 의한 손상영역보다 훨씬 더 크다는 것을 알 수 있다.

발파에 의한 암반의 손상영역을 최소한으로 줄이기 위해서는 그림 3(b)와 같이 외곽공에 인접한 주변공에 장전되는 화약의 양을 감소시키는 발파패턴의 최적화를 통하여 주변공 발파에 의한 손상영역과 외곽공 발파에 의한 손상영역을 일치시켜야 한다.

4. 터널발파의 모델링

4.1 발파하중

발파에 의한 암반의 동적인 거동은 발파하중의 동적인 특성에 좌우된다. 따라서 터널발파에 의한 암반의 거동을

수치해석으로 모사하기 위해서는 발파하중의 최대폭압, 최대압력도 달시간(rise time), 하중의 지속시간 등과 같은 발파하중의 동적인 특성을 올바르게 구하는 것이 매우 중요하다. 또한 발파하중의 동적인 특성은 유한요소 해석시 유한요소의 최대크기와 해석시간 간격을 정하는데 있어 매우 중요하다.

Sharpe(1942)와 Bligh(1972)는 발파하중의 이력곡선을 이중지수 감소함수로 나타내었고, Udy와 Lownds (1990)는 발파하중을 나타내기 위해 화약과 암반의 상호작용 모델을 이용하여 생성가스의 압력-발파공의 부피 관계곡선(p vs. v)과 생성가스 압력의 이력곡선(p vs. t)에 대하여 연구하였다. 최근에는 Liu와 Katsabanis(1997)가 화약의 상태방정식을 이용하여 생성가스의 압력과 체적의 관계곡선으로서 발파하중을 모사하였다. 그러나 현재까지의 연구결과에서는 발파하중의 모사가 근사적이거나 정성적인 접근에 그쳐 발파하중의 동적인 효과를 제대로 반영하지 못 하였다.

한편, 화약의 폭평에 의하여 발생된 고온 고압의 생성가스와 극히 짧은 하중지속시간으로 인하여 발파하중의 시간 이력곡선을 실험으로 측정하는 것은 매우 어려운 일이다.

본 논문에서는 김상균 등(1999)이 제시한 방법과 같이 밀장전된 화약의 최대 폭평압은 식(2)를 사용하여 구하고, 축소(decoupled) 장전시의 가스압력은 식(3)을 이용하여 구하였다. 그후 발파하중의 곡선 모양은 모형 실험으로부터 구한 발파하중에 의한 시료의 변형을 이력곡선을 참조로 하여 발파하중을 구하였다.

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

$$p_g = \frac{f \cdot L}{V - aL}$$

$$= \frac{f}{(DI)^2 \cdot (1/\rho) - \alpha} \quad (3)$$

여기서 P_D 는 폭평압, γ 는 비열비, ρ_0 는 화약의 밀도, D 는 화약의 폭속을 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(4)로 표시되는 co-volume이다.

$$\alpha = \frac{1.5}{1.26 + 1.33\rho_0} \quad (4)$$

4.2 해석 조건

본 논문에서는, 주변공 발파와 외곽공 발파에 의한 암반의 거동을 비교하기 위하여 그림 4에 나타난 것처럼 터널의 천단부에 위치한 영역을 해석대상으로 하였다.

해석영역 내에는 9개의 외곽공과 5개의 주변공이 포함되어 있으며, 외곽공들 사이의 간격은 600mm, 주변공들 사이의 간격은 940mm, 외곽공과 주변공 사이의 간격은 750mm이다. 각 발파공들의 직경은 45mm이고 굴착 단면적은 90.939㎡이다. 터널 천단부는 지하 20m에 위치하고 있고, 암반은 경암으로 이루어져 있으며, 암반내에는 불연속면이 없는 것으로 가정하였다.

발파패턴은 표준발파패턴을 적용하였다. 표준발파패턴에 의하면 앞에서 언급한 것처럼 주변공에는 밀장전된 ANFO가 주장약으로 에멀전 카트리지 32mm×200mm가 기저장약으로 사용되며, 외곽공에는 도폭선(40g/m) 혹은 카트리지 형태의 규릿(17mm×500mm)이 사용된다. 본 논문에서는 주변공에는 ANFO가 장전된 부분을 외곽공에는 규릿이 장전된 부분을 해석대상으로 하였다. 또한, 발파공 직경에 비해 화약의 장전길이가 길고 폭속이 매우 빠르므로 화약이 전체 장전길이에 걸쳐 동시에 기폭되는 것으로 간주하여 2차원 해석을 실시한다.

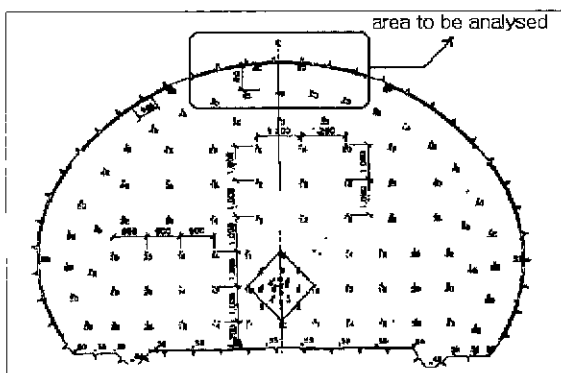


그림 4. 일반적인 도로터널 단면(2차선)

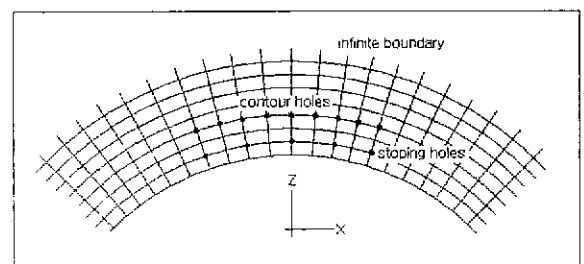


그림 5. 해석에 사용된 유한요소망

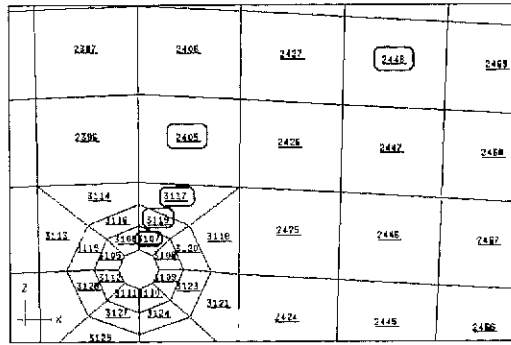


그림 6. 요소들의 위치

그림 4에 나타난 해석영역을 유한요소망으로 나타내어 그림 5에 표시하였다.

일반적인 도로터널의 표준발파패턴에 의하면 외곽공에서는 정밀폭약인 규릿(gurit)이 주변공에서는 ANFO가 사용되며 발파공의 직경이 45mm일 경우 규릿과 ANFO에 의한 암반의 손상영역은 각각 20cm, 1.5m 정도로 알려져 있고 수치해석시 유한요소의 수가 너무 많아지는 것을 피하기 위해 설계굴착선으로부터 2m 떨어진 지점까지만을 해석 대상으로 하였다.

유한요소망에서, 암반을 모사하기 위하여 4절점의 평면 변형을 요소가 사용되었고, 상단과 좌우측 경계면에는 무한영역을 모사하여 발파에 의해 발생한 응력파의 반사를 막기 위하여 무한경계(infinite boundary)를 사용하였다. 그리고 심폐기와 주변공 발파에 의해 이미 암반이 굴착된 것으로 가정하여 하단의 경계면은 자유면으로 설정하였다. 그림에서 수직방향을 z축으로, 터널축에 직각인 방향을 x 축으로 설정하였다.

유한요소의 최대크기와 해석시간 간격은 수치해석의 결

과로 나온 해의 안정성(stability)과 정확성(accuracy)을 위해 Valliappan과 Wang(1994)이 제안한 유한요소의 크기와 해석시간 간격의 기준을 사용하였다. 사용된 유한요소의 최대 크기와 해석시간 간격은 각각 0.1m, 10 μ sec이다.

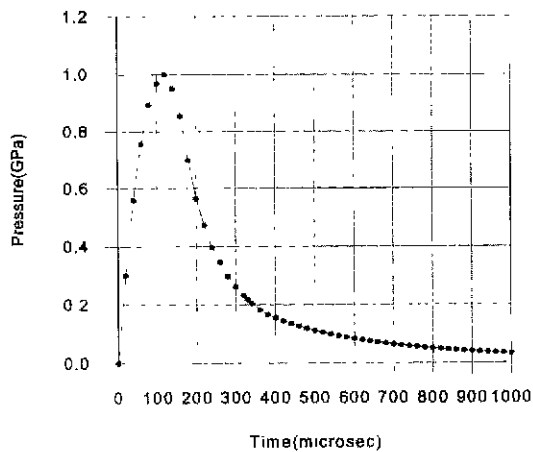
해석은 탄성해석을 실시하였고, 암반의 탄성계수는 50 GPa, 포와송 비는 0.25, 단위중량은 25 KN/m³, 정지토압계수(K_0)는 0.5를 사용하였다. 일반적으로 경암의 감쇠계수(damping ratio)는 토사지반의 감쇠계수(3~5%)에 비해 작은 것으로 알려져 있으므로 본 논문에서는 최종원(2000)의 연구에 사용된 감쇠계수들 중에서 일반적인 토사지반의 감쇠계수보다 더 작은 1%의 재료감쇠를 사용하였다.

발파하중에 의한 암반의 거동을 해석하기 위해 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS /Standard (Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.)을 사용하였다. 이 프로그램은 선형 및 비선형의 동적인 해석이 가능하고, 직접적분법 중의 하나인 Newmark- β 방법을 사용하여 각 시간 간격마다 해를 구하게 된다.

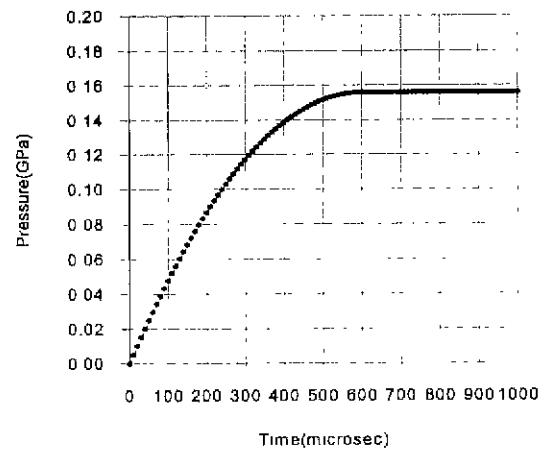
5. 수치해석의 결과

5.1 발파하중에 의한 주위 암반의 거동

이번 절에서는 발파하중에 의한 발파공 주위의 암반의 거동에 대하여 논한다. 발파하중의 동적인 특성은 화약의 DI값에 따라 바뀌며, 이에 따라 암반의 거동 역시 바뀌게 된다. 또한, 앞에서 언급한 것처럼 화약의 기폭직후 발파공 주위의 접선방향응력은 초기에는 압축응력으로 나타나지만 시간이 지나면서 점차 인장응력으로 바뀌게 된다. 초기의

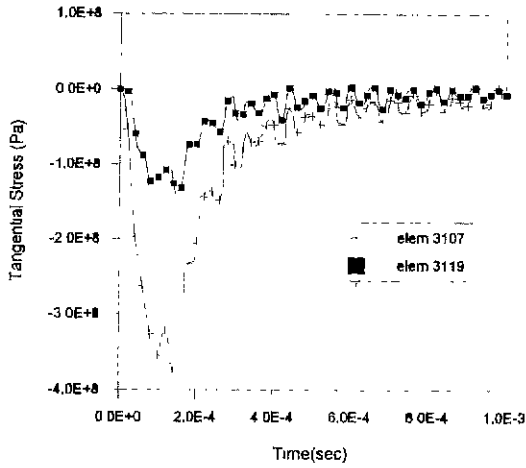


(a) 밀장전 (DI=1)

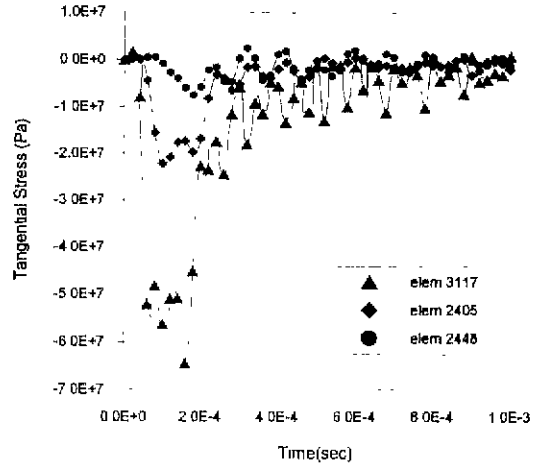


(b) 축소장전 (DI=2.65)

그림 7. 발파하중

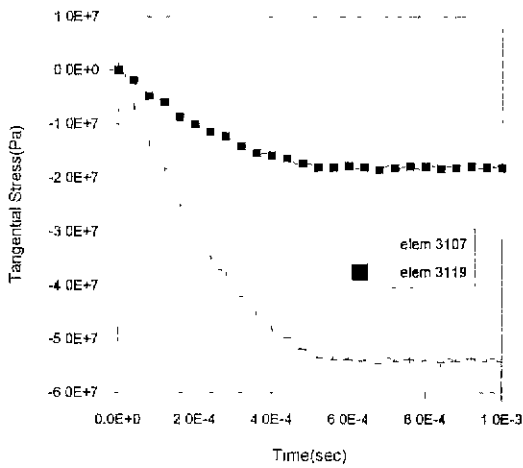


(a) 요소 3107, 3119

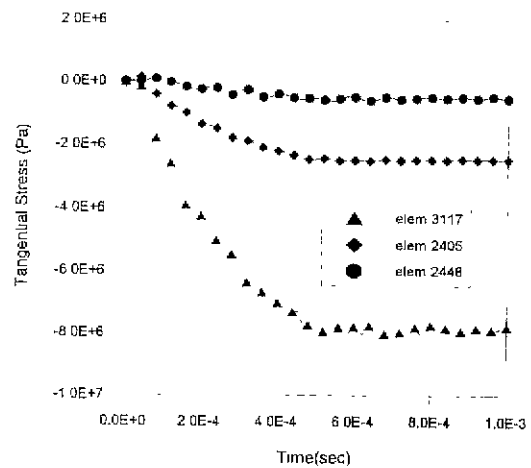


(b) 요소 3117, 2405, 2448

그림 8. 밀장전시 접선방향 응력



(a) 요소 3107, 3119



(b) 요소 3117, 2405, 2448

그림 9. 축소장전시 접선방향응력 이력곡선

접선방향의 압축응력은 발파공 주위의 분쇄환(crushed annulus)의 발생에 관계되고, 그 후의 인장응력은 방사상 균열의 주원인이 된다. 이러한 현상을 규명하기 위하여 그림 6에 표시된 요소들의 동적인 거동을 구하였다.

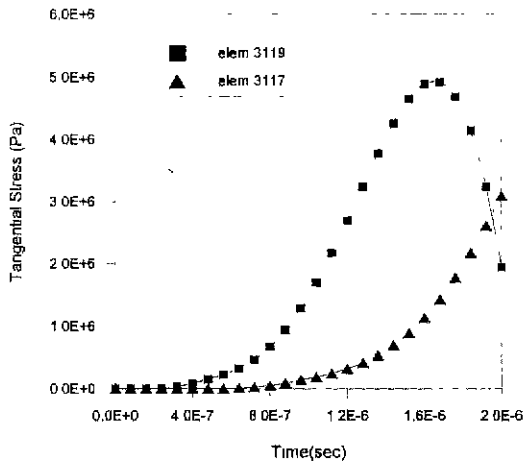
그림 6에서 요소 3107, 3119, 3117, 2405, 2448은 발파공 중심으로 각각 2.25, 5.00, 2.75, 10.0, 24.0cm 떨어진 곳에 위치하고 있다.

해석에 사용된 발파하중은 폭속(VOD)은 4000 m/sec, 밀도(ρ)는 1 g/cm³는, 비열비(γ)는 2.5, 그리고 화약력은 10,000 l · kgf/cm³인 화약을 대상으로 하였고 밀장전시의 최대폭굉압은 식 (2)를 이용하여 구하였고, 축소(decoupled) 장전시에는 식 (3)을 이용하여 가스압을 구하였으며, 산정된 밀장전시와 축소(decoupled) 장전시의 발

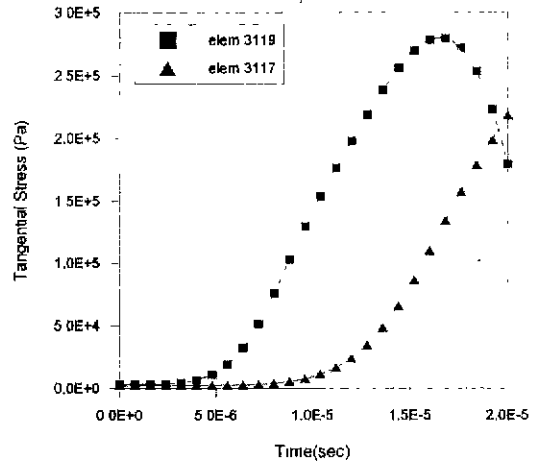
파하중을 그림 7에 나타내었다.

이력곡선발파하중에 의한 주위 암반의 거동을 규명하기 위해 발파공 하나만 기폭되었을 경우 그림 6에 나타낸 요소들에서의 접선방향 응력의 이력곡선을 구하여 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 해석시간은 0초부터 0.001초까지 0.001초 동안이며 접선방향 응력의 이력곡선에서 압축응력은 +값으로 인장응력은 -값으로 나타난다.

그림 8과 그림 9에서 접선방향의 응력은 대체적으로 인장응력이며 밀장전의 경우 응력파가 요소 3107에서 요소 2448까지 0.2175m 나아가는 동안 접선방향응력의 최대값은 1/4로 감소하였고, 축소장전의 경우에는 1/100 만큼 감소한다는 것을 알 수 있다. 발파공 주위에 접선방향 인장응력은 그 크기가 암반의 인장강도를 넘어설 경우 발파공 주

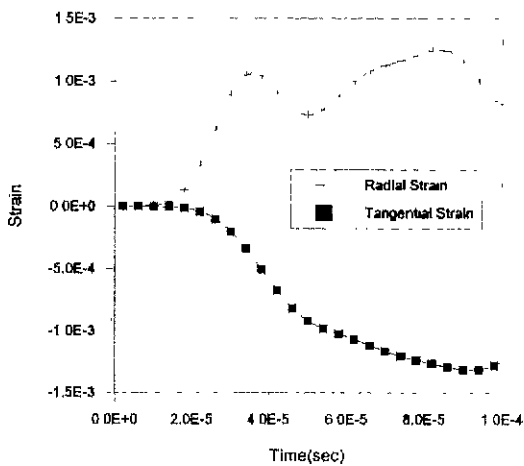


(a) 밀장전시

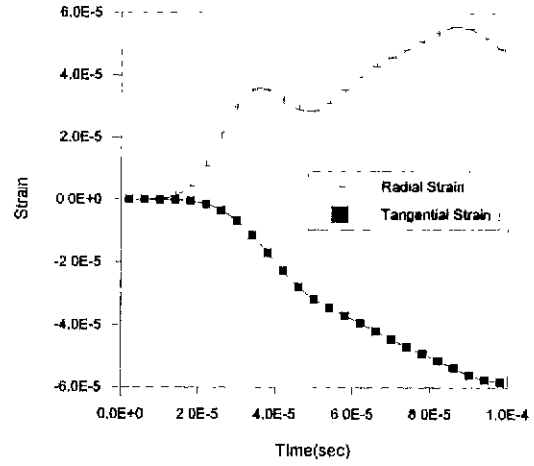


(b) 축소장전시

그림 10. 접선방향응력 이력곡선



(a) 밀장전시



(b) 축소장전시

그림 11. 요소 3117의 변형율이력곡선

위에 방사상의 균열을 유발하게 된다. 한편, 접선방향응력 이력곡선의 초기 부분은 인장응력이 아니고 압축응력으로 나타나게 되는데 이러한 압축응력의 발생은 그림 10에 명확히 볼 수 있다.

그림 10은 요소 3119와 3117에서의 접선방향 응력의 이력곡선 중 $0 \sim 2.0 \times 10^{-5}$ 초까지의 부분을 나타낸 것이다. 그림에서 밀장전시와 축소장전시 모두 접선방향 응력의 초기 부분은 압축응력임을 알 수 있다.

이러한 압축응력의 발생은 요소 3117에서의 접선방향의 변형율(ϵ_θ)과 반경방향의 변형율(ϵ_r)의 이력곡선을 나타낸 그림 11로 설명할 수 있다.

변형율 이력곡선의 초기부분에는 반경방향 변형율(ϵ_r)이 접선방향 변형율(ϵ_θ)에 비해 빠르게 증가하므로 그 크

기가 더 큰 것을 알 수 있다.

따라서 식 (1)의 분자($\epsilon_\theta + \nu \epsilon_r$)는 전체적으로 압축으로 나타나게 되므로 접선방향응력(σ_θ) 역시 압축응력으로 나타나게 된다.

그 후 시간이 지나면서 반경방향 변형율에 비해 접선방향 변형율이 상대적으로 커지게 되므로 식 (1)의 분자($\epsilon_\theta + \nu \epsilon_r$)는 인장으로 바뀌게 되어 접선 방향응력 역시 인장응력으로 나타나게 된다.

앞에서 언급한 바와 같이 화약의 기폭직후 반경방향응력이 압축응력으로 나타나게 됨에 따라 발파공 주위의 주응력은 모두 압축응력이 되고 따라서 발파공 주위에는 압축응력으로 인한 분쇄환이 발생하게 된다. 또한, 그림 11에서 나타낸 것처럼 발파하중의 최대값이 크면 접선방향 압축응

력의 최대값도 크게 나타나므로 분쇄환의 발생을 최소한으로 줄이기 위해서는 decoupled 장전을 사용하여 발파하중의 크기를 감소시켜야 한다는 것을 알 수 있다.

5.2 주변공 발파와 외곽공 발파에 의한 암반의 손상영역 비교

이번 절에서는 도로터널의 표준발파패턴을 기초로 주변공 발파와 외곽공 발파에 의한 암반의 손상영역을 비교한다. 암반의 손상영역은 발파하중에 의한 암반에서의 입자속도를 수치해석으로 구하여 평가한다. 주변공 발파와 외곽공 발파에 의한 입자속도를 구한 절점들의 위치는 그림 12와 표 1에 나타내었다.

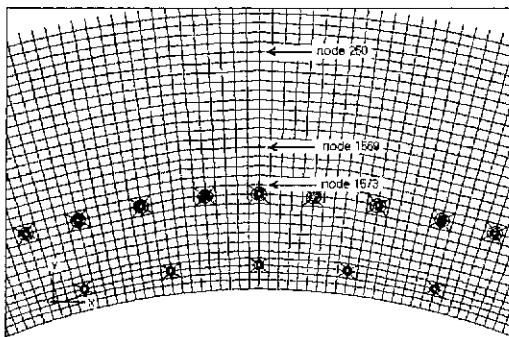
그림 12에서 외곽공 발파에 의한 입자속도를 구한 절점들의 위치는 외곽공들 중에서 가장 가운데에 위치한 발파공 주위에 위치하는데 이것은 외곽공 발파에 의한 발파하중이 주변공 발파에 의한 발파하중에 비해 작으므로 그 영

표 1. 설계굴착선으로부터 절점까지의 거리

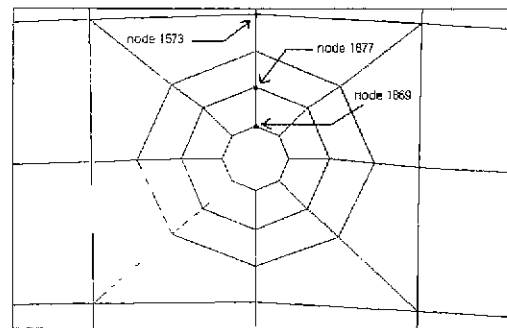
주변공 발파		외곽공 발파	
절점	거리(m)	절점	거리(cm)
1573	0.1	1869	2.25
1569	0.5	1877	5.00
250	1.5	1573	10.0

향 범위가 훨씬 작을 것으로 예상되기 때문이다.

주변공에는 밀장전된 ANFO가 사용되며 외곽공에는 규릿이 사용되는 것으로 가정하였다. ANFO의 밀도는 0.9 g/cm³, 폭속은 3000 m/sec, 비열비는 2.44이며 DI는 1이 된다. 그리고 규릿의 밀도는 1.0 g/cm³, 폭속은 4000m/sec, 비열비는 2.5이고 화약력은 10,000 l · kg/cm³이다. 장전직경은 일반적으로 17mm이므로 발파공의 직경이 45mm인 경우 DI는 2.65가 된다. ANFO와 규릿의 물성치와 DI를 고려한 발파하중을 구하여 그림 13에 나타내었다.

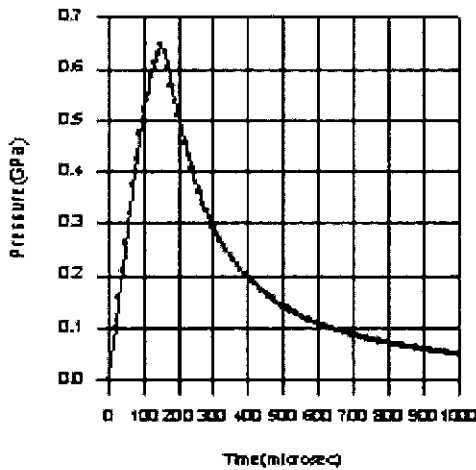


(a) 주변공 발파시

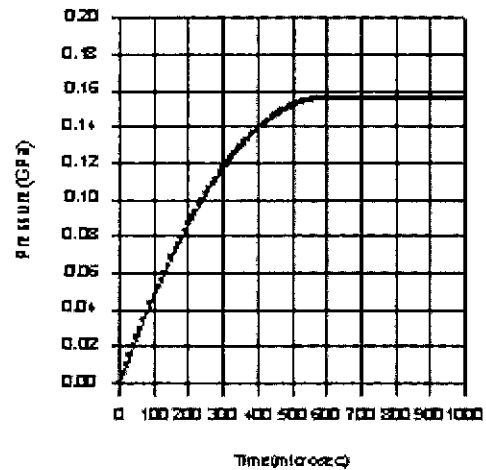


(b) 외곽공 발파시

그림 12. 절점들의 위치

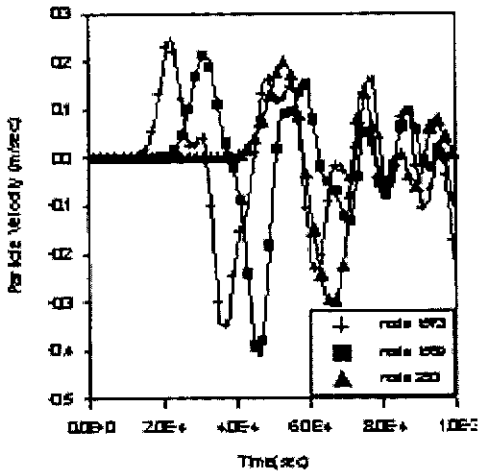


(a) ANFO의 발파하중(주변공, DI=1)

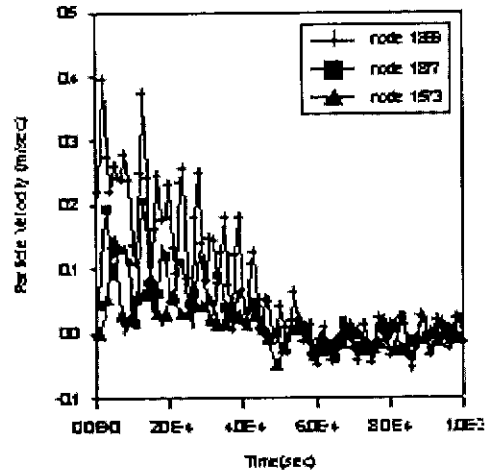


(b) 규릿의 발파하중(외곽공, DI=2.65)

그림 13. 발파하중



(a) 주변공 발파



(b) 외곽공 발파

그림 14. 수직방향 입자속도 이력곡선

이와 같은 하중이 작용할 경우 주변공 발파와 외곽공 발파에 의한 암반에서의 수직방향 입자속도 이력곡선을 구하여 그림 14에 나타내었다. 여기서 수평방향 입자속도의 이력곡선은 나타내지 않았는데 이것은 입자속도의 이력곡선을 구한 절점들의 위치가 유한요소망의 대칭축 선상에 위치하고 발파공들이 동시에 기폭되므로 수평방향의 입자속도는 수직방향 입자속도에 비해 매우 작게 나타나기 때문이다.

수치해석 결과와 식 (5)를 사용하여 입자속도의 최대값을 구하여 표 2에 나타내었다.

$$v_{peak} = \sqrt{v_v^2 + v_h^2} \quad (5)$$

여기서 v_{peak} 는 입자속도의 최대값, v_v 는 수직방향 입자속도, v_h 는 수평방향 입자속도를 나타낸다.

일반적으로 발파에 의한 암반의 손상영역을 평가하기 위해서는 발파에 의한 암반의 입자속도를 기준으로 사용하여 Langefors (1948), 그리고 Bauer와 Calder(1978) 등이 제시한 발파에 의한 암반의 손상 기준에 의하면 발파에 의한 암반에서의 입자속도가 0.27m/sec 이상이면 암반에 손상이

이 발생하기 시작하고, 입자속도가 0.6m/sec 이상이면 암반에 상당한 손상이 발생하며, 2.54m/sec 이상이 되면 암반에 완전한 파쇄가 일어나게 된다.

이와 같은 기준을 바탕으로 표 2를 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 의해서는 설계굴착선으로부터 0.0225m 떨어진 절점 1869에서의 입자속도가 0.395 m/sec, 설계굴착선에서 0.05m 떨어진 절점 1877에서는 0.208 m/sec으로 나타나 암반의 손상은 거의 설계굴착선 주위에만 국한될 것으로 판단된다.

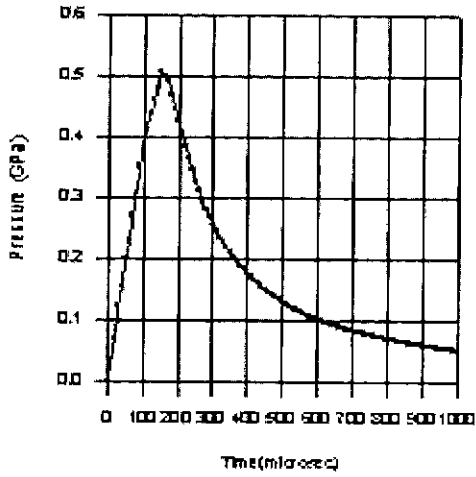
따라서 주변공의 위치가 설계굴착선 즉, 외곽공의 중심으로부터 75cm 떨어져 있음에도 불구하고 주변공 발파에 의한 손상영역이 외곽공 발파에 의한 손상영역보다 훨씬 큰 것으로 나타나 발파패턴은 적절하지 못한 것으로 판단된다

5.3 발파패턴의 최적화

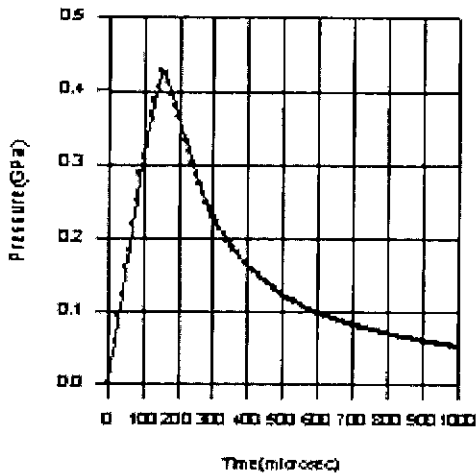
수치해석결과로부터 주변공 발파에 의한 손상영역이 외곽공 발파에 의한 손상영역보다 훨씬 큰 것으로 나타났으므로 주변공 발파에 의한 손상영역을 외곽공 발파에 의한 손상영역과 일치시키기 위한 발파패턴의 최적화가 필요하다. 발파패턴의 최적화를 위해 외곽공에 인접한 주변공에 장전되는 ANFO의 장전직경을 45mm에서 40mm, 38mm, 35mm로 줄였을 경우의 발파하중을 그림 15와 같이 구하고

표 2. 입자속도의 최대값

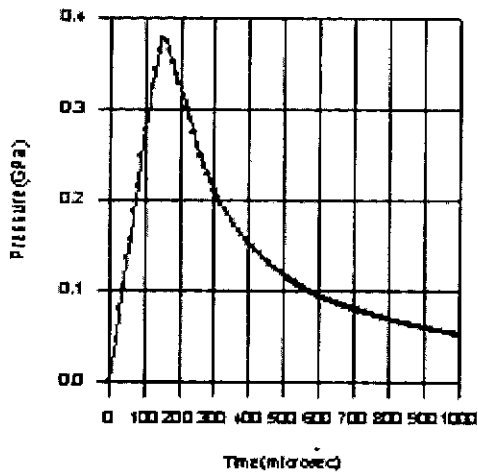
주변공 발파		외곽공 발파	
설계굴착선으로부터의 거리(m)	입자속도 (m/sec)	설계굴착선으로부터의 거리(m)	입자속도 (m/sec)
0.1	0.350	0.0225	0.395
1.0	0.412	0.0500	0.208
1.5	0.304	0.1000	0.143



(a) 장전직경 40mm



(b) 장전직경 38mm



(c) 장전직경 35mm

그림 15. ANFO의 장전직경에 따른 발파하중

이러한 하중에 의한 손상영역을 수치해석으로부터 구한다.

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

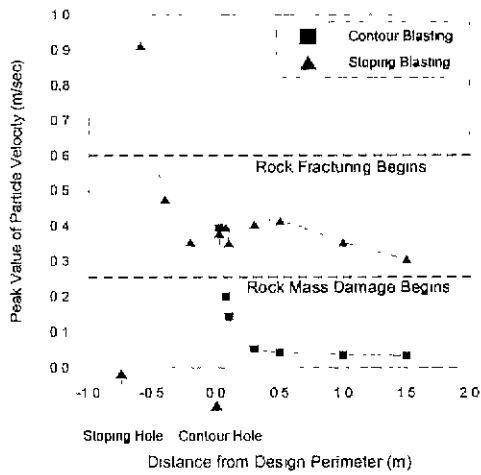
ANFO의 장전직경이 바뀔 경우 주변공 발파에 의한 각 지점에서의 최대입자속도와 외곽공 발파에 의한 각 지점에서의 최대입자속도를 그림 16에 나타내었다.

그림 16에서 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. 또한 삼각형으로 표시된 곡선은 ANFO가 장전된 주변공 발파에 의한 각 절점에서의 최대입자속도를 나타내고, 사각형으로 표시된 곡선은 규릿이 장전된 외곽공 발파에 의한 각 절점에서의 최대입자속도를 나타낸다. 따라서 삼각형 혹은 사각형으로 표시된 곡선이 아래쪽 점선과 만나는 점의 x축 좌표를 읽으면 발파에 의한 손상영역이 설계굴착선으로부터 어느 정도의 거리까지 미칠지를 예상할 수 있다.

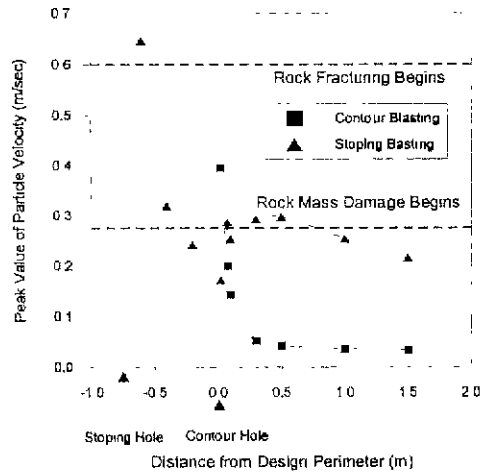
그림 16에서 외곽공 발파에 의한 입자속도를 나타낸 곡선과 입자속도 0.27m/sec를 나타내는 점선이 만나는 지점은 설계굴착선으로부터 대략 7.5 cm 떨어진 지점으로 나타나 외곽공 발파에 의한 손상영역은 설계굴착선으로부터 약 7.5 cm에 이를 것으로 판단된다. 그러나 ANFO의 장전직경이 45mm를 나타낸 그림 15 (a)를 보면 주변공발파에 의한 입자속도를 나타내는 곡선과 점선은 설계굴착선으로부터 대략 1.8m에서 만나므로 현행의 표준발파패턴에 의한 암반의 손상영역은 설계굴착선으로부터 대략 1.8m에 이르고, ANFO의 장전직경이 40mm인 그림 15 (b)를 보면 손상영역이 설계굴착선으로부터 약 75 cm에 이를 것으로 판단된다. 또한, ANFO의 장전직경이 38mm인 그림 15 (c)로부터 주변공 발파에 의한 손상영역이 대략 외곽공 발파에 의한 손상영역과 일치할 것으로 판단되며, 장전직경이 35mm인 경우인 그림 15 (d)를 보면 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.

6. 결론

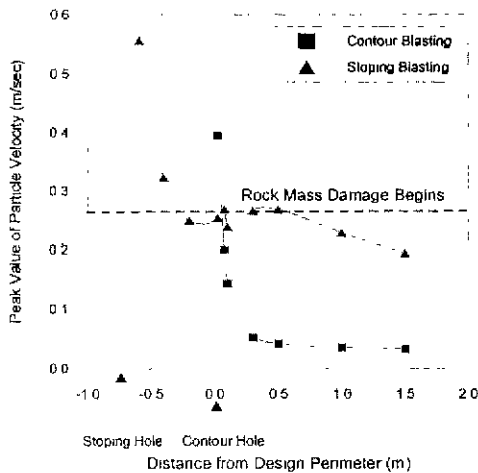
본 논문에서는 표준발파패턴을 바탕으로 하여 한 개의 발파공이 기폭되었을 경우 주위 암반의 거동을 규명하였



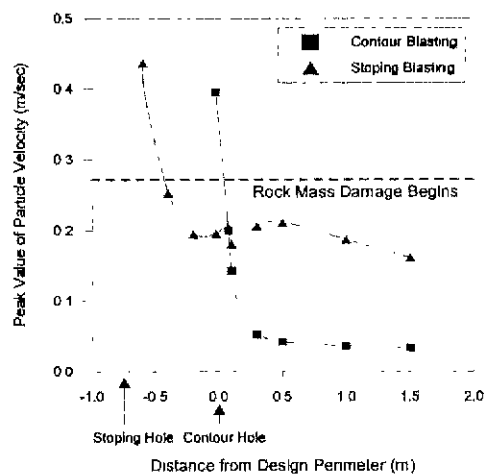
(a) 장전직경 45mm



(b) 장전직경 40mm



(c) 장전직경 38mm



(d) 장전직경 35mm

그림 16. 발파에 의한 암반의 손상영역비교

고, 외곽공 발파와 주변공 발파에 의한 입자속도 이력곡선을 구하고 최대입자속도로부터 암반의 손상영역을 추정한 후 손상영역을 바탕으로 표준발파패턴을 적절성을 평가하였다. 또한 주변공 발파에 의한 손상영역을 외곽공 발파에 의한 손상영역과 일치시키기 위한 발파패턴최적화를 실시하였으며 이의 결론은 다음과 같다.

1) 발파공내의 화약이 기폭되면 충격파가 발생하고 발파공 주위의 암반으로 전달되어 응력파로써 전파되어 나가게 된다. 응력파가 도달한 직후 발파공 주위의 반경방향응력과 접선방향응력은 압축응력으로 나타나고 그 이후 접선방향응력은 시간이 지나면서 인장응력으로 바뀌게 된다. 이러한 초기의 접선방향의 압축응력은 발파공 주

위의 분쇄환의 발생의 주원인이 되고, 그후에 발생하는 접선방향의 인장응력은 발파공 주위에 나타나는 방사상 균열의 주원인이 된다.

2) 현행의 표준발파패턴을 기준으로하여 수치해석결과로부터 구한 주변공 발파에 의한 암반의 손상영역은 설계 굴착선으로부터 약 1.8m에 이르는 것으로 나타났고 외곽공 발파에 의한 암반의 손상영역은 설계굴착선으로부터 약 7.5 cm에 이르는 것으로 나타나 외곽공 발파에 의한 손상영역보다 주변공 발파에 의한 손상영역이 훨씬 더 크므로 현행의 표준발파패턴은 적절하지 못하며 외곽공에 인접한 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 바람직한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 (주) 삼보기술단과의 협동연구에 의하여 이루어진 것으로서, 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Grady, D. E. and Kipp, M. E. (1980), "Continuum modelling of explosive fracture in oil shale", *Int. J. Rock. Mech. Min Sci & Geomech Abstr*, 17, pp 147 ~ 157.
2. Bligh, T. P. (1972), Gaseous detonations at very high pressures and their applications to a rock breaking device. Ph.D Thesis, University of Witwatersrand
3. Olofsson, S. O. (1988), *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*, Nora Boktryckeri AB.
4. Sharpe, J. A. (1942), "The production of elastic waves by explosion pressures. Theory and empirical observations", *Geophysics*, 7, pp 144 ~ 154.
5. Udy, L L and Lownds, C. M. (1990), "The partitioning of energy in blasting with non-ideal explosives", 3rd Int. Symp. on Rock Frag. by Blasting, Brisbane, Australia, pp. 37 ~ 43.
6. Liu, L. and Katsabanis, P. D. (1997), "Development of a continuum damage model for blasting analysis", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 34, No. 2, pp. 217 ~ 231.
7. Kennedy, D. L. and Jones, D. A. (1993), "Modelling shock initiation and detonation in the non-ideal explosive PBXW-115", 10th Int. Symp on Detonation, July 16, 1993, Boston, MA.
8. 김상균, 이인모, 최종원, 김 신, 이두화 (1999), "Decoupling 장전시 천공벽에 작용하는 발파하중의 산정", 한국지반공학회 '99 가을 학술발표회 논문집, pp. 209 ~ 216.
9. 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.
10. 최종원 (2000), "발파에 의한 암반진동의 수치해석 모델링", 고려대학교 석사학위 논문.
11. Hibbitt, Karlsson, and Sorensen (1995), *ABAQUS/Standard (Version 5.5), Users' Manual*.
12. Langefors, U., Kihlstrom, B., and H. Westerberg. H. (1948), *Ground Vibration in Blasting*, Water Power.
13. Bauer, A. and Calder, P. N (1978), *Open Pit and Blast Seminar, Course #63-321*, Queen's University Mining Engineering Department.

(접수일자 2000. 3. 17)