

터널 발파설계 최적화를 위한 실험 및 수치해석적 접근

Experimental and Numerical Approach for Optimization of Tunnel Blast Design

이 인 모*¹ Lee, In-Mo

김 상 균*² Kim, Sang-Gyun

권 지 웅*³ Kweon, Ji-Woong

박 봉 기*⁴ Park, Bong-Ki

Abstract

Laboratory model blast and in-situ rock blast tests were conducted to determine blast-induced stress wave propagation characteristics under different explosive types, different loading conditions and different mediums. Dynamic numerical approaches were conducted under the same conditions as experimental tests. Stress magnitudes at mid-point between two blast holes which were detonated simultaneously increased up to two times those of single hole detonation. The rise time of maximum stress in a decoupled charge condition was delayed two times that of a fully charged condition. Dynamic numerical analysis showed almost similar results to blast test results, which verifies the effectiveness of numerical approaches for optimizing the tunnel blast design. Dynamic numerical analysis was executed to evaluate rock behavior and damage of the contour hole, the stoping hole adjacent to the contour hole in the road tunnel blasting pattern. The rock damage zone of the stoping hole from the numerical analysis was larger than that of the contour hole. Damage in the stoping hole can be reduced by using lower density explosive, by applying decoupled charge, or by increasing distance between the stoping hole and the contour hole.

요 지

화약폭발로 발생한 응력과 전파특성을 파악하기 위하여 화약종류, 장약조건, 전파매질조건 별로 실내 모형시험 및 현장 암반시험과 수치해석을 시행하였다. 수치해석은 시험조건과 동일한 조건을 모델링하여 시행하였다. 2공을 동시 발파하는 경우에 2공 중심에서 응력크기는 1공 발파보다 2배정도로 증가되었다. 최대응력 도달시간은 디커플링 장전조건이 밀장전조건보다 2배정도 지연되어서 가스압력에 의해 최대 응력이 발생하였다. 시험결과와 수치해석결과를 비교·분석한 결과 수치해석결과가 시험결과보다 약간 저평가되었지만 비교적 유사하여 수치해석으로 발파결과를 미리 예측할 수 있었다. 도로터널의 일반적인 발파패턴도에 대하여 수치해석을 시행하고 외곽공과 외곽공과 인접한 확대공 발파로 인하여 발생하는 동적 암반거동 및 암반손상을 평가하였다. 수치해석결과 확대공의 손상영역이 외곽공보다 크게 나타났다. 확대공 손상영역을 감소시키기 위하여 낮은 밀도의 화약사용, 디커플링장전, 확대공과 외곽공 사이의 거리 증가 등의 방안을 제안하였다.

Keywords : Blasting pattern, Blast test, Damage zone, Numerical approach

*1 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Univ., inmolee@korea.ac.kr)

*2 정회원, (주)석탑 엔지니어링 이사 (Member, Director, Soktop Engrg., Corp.)

*3 정회원, (주)청석엔지니어링 주임 (Member, Junior Engineer, Chungbuk Engrg., Co., Ltd.)

*4 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.)

1. 서론

터널, 지하 저장시설, 지하구조물 등의 굴착공사는 주로 화약을 사용한 발파로 시행되고 있으며 적합한 발파 설계 여부는 정확한 굴착면 확보와 미굴착 암반의 손상 정도를 분석하여 파악할 수 있다. 발파연구는 굴착면 내 암반을 효과적으로 제거하고 여굴 및 암반 손상을 최소화하는 방향으로 많이 시도되고 있다. 그러나 이런 시도들은 발파 메카니즘에 대한 체계적이고 이론적인 접근보다는 특정 암반 및 장전조건에 대해 경험적 형태로 진행되어 왔으며 일반 발파압력 조건에 의한 암반거동을 이론적으로 분석한 연구는 미흡한 실정이다.

터널발파에서 굴착면 주위의 암반손상, 암버력 파쇄도, 지반진동은 터널안정성, 경제성, 시공성을 좌우하는 중요한 요소이다. 일반적으로 암반손상, 암버력 파쇄도, 지반진동은 현장발파 시험을 시행하여 경험적으로 평가해 왔으나 발파압력의 암반내 전파특성을 이론적으로 규명함으로써 미리 예측할 수 있다. 화약폭발시 발파공내에 5만기압 이상의 높은 압력과 고온이 발생하고 발파공주위 암반에 균열 및 손상정도에 따라 분쇄환(crushed annulus), 파석대(fracture zone), 균열대(fragment formation zone)가 형성된다. 이런 손상영역은 발파압력이 응력과 형태로 암반내를 전파하면서 발생된다.

응력과 전파메카니즘이 분석된다면 암반내 어떤 점에서 발파압력에 의한 동적 암반거동을 산출할 수 있다. 응력과 전파특성을 분석하기 위하여 스펙트럼 분석법(spectrum analysis)이 연구되었으나(Kharkvich, 1962) 전체적인 매질거동을 산출하기 위한 정보제공에 한계가 있고 매질의 거동해석이 제한적이다. Valliappan과 Ang(1988)은 터널 발파가 기존 터널에 미치는 영향을 분석하기 위하여 동적 의사-평면 변형률해석(dynamic pseudo-plane strain analysis)기법을 적용하여 2차원 해석을 하고 발파압력을 증가하중으로 모델링하여 해석하였다. Liu와 Katsabanis(1997)는 발파공 2개에서 발생하는 응력과 중첩현상, 발파공주위의 암반손상 및 파쇄도를 분석하기 위하여 3차원 수치해석을 하였다. 해석영역을 최소화하고 요소크기는 상대적으로 작게 모델링하였으며 발파압력은 증가하중을 적용하지 않고 각각의 발파공에 대해 적용하였다. 이와같이 해석목적에 따라 해석영역의 모델링, 해석차원, 발파압력 등이 달라져야 한다. 지금까지 발파로 인한 암반손상 평가는 주로

발파진동속도를 이용하는 방법이 대부분이고 암석코아 시추, 탄성과 굴절법탐사, 보어홀 카메라 등을 이용하는 방법이 이용되어 왔으나 각 방법의 우수성과 타당성이 검증되지 못한 상태이다.

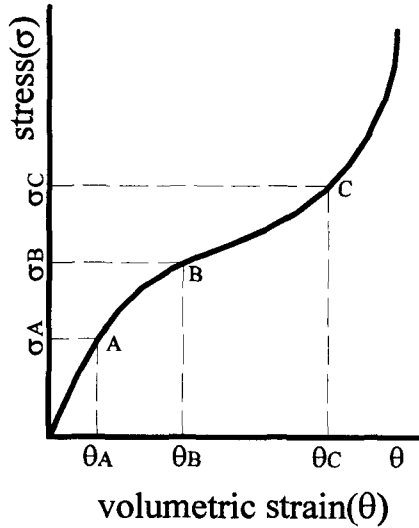
이 연구는 발파로 인한 암반손상과 응력파 전파특성을 평가하기 위하여 화약종류, 장약조건, 전파매질조건별로 실내 모델시험 및 현장 암반시험을 시행하였다. 또한 실내 모델시험과 현장 암반시험을 유한요소법으로 모델링하고 Kim(2001)이 제안한 발파압력을 이용하여 수치해석을 시행하였다. 또한 시험결과와 수치해석 결과를 비교·분석하여 수치해석의 적정성을 검증하였다. 검증된 수치해석을 시행함으로써 현장 발파시험을 시행하기 전에 수치해석으로 발파결과를 미리 예측할 수 있는 방안을 제시하였다. 또한 이런 수치해석을 시행하여 터널발파 굴착에서 발파공주위 암반의 동적 거동 및 손상정도를 암반특성, 사용화약, 장약조건 등에 따라 분석하고 발파패턴 설계의 최적화 방안을 제시하였다.

2. 발파이론과 암반거동

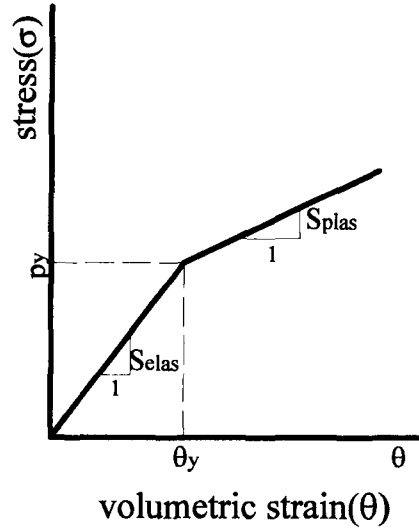
2.1 발파압력의 암반내 전파특성

발파압력은 화약이 폭발하면서 발생하는 충격파와 가스압력으로 구분된다. 충격파는 응력파형태로 암반내를 전파하면서 암반파괴, 지반진동 등을 발생시킨다. 가스압력은 충격파 후에 발생하여 균열 성장 및 생성, 비석 등을 발생시킨다. 발파후 발파공 주위 암반은 분쇄환(crushed annulus), 파석대(fracture zone), 균열대(fragment formation zone), 탄성대(elastic zone)로 구분(Whittaker 등, 1992)되고 응력파는 충격파, 소성파, 탄성파로 구분된다. 응력파 전파특성은 매질의 응력-체적 변형을 관계에 크게 영향을 받으며 그림 1(a)는 매질 상태(기체, 액체, 고체)에 따른 일반적인 응력-체적 변형을 곡선이다. 고체 암반매질인 경우 응력-체적 변형을 곡선을 그림 1(b)와 같이 두개 직선으로 단순화시키면 탄성파속도 및 소성파속도가 상수가 되어 효과적으로 사용할 수 있다.

발파공 중심에서 탄성파만이 전파되기 시작하는 최단거리(r_c)는 암반에 대한 응력 감쇄식으로부터 식 (1)과 같이 구할 수 있고 탄성 응력파의 형상은 변하지 않는다.



(a) 일반적인 응력-체적변형을 곡선



(b) 고체 암반의 응력-체적변형을 곡선

그림 1. 응력-체적 변형을 곡선

$$p_r = p_x \left(\frac{r}{r_0}\right)^n, \quad r_c = r_0 \left(\frac{\sigma_y}{p_x}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

여기서, r , r_0 , p_x , n , σ_y 은 각각 발파공 중심에서 거리, 화약 반경, 거리 r 에서 응력과 크기, 암반 감쇄정수, 암반항복강도이다.

2.2 발파압력

발파공에서 화약이 폭발하면 폭굉파가 전파되고 폭굉파 전면(detonation wave front)에서 폭굉상수들이 최대값을 갖게 된다. 이런 폭굉상수들은 열동력학법칙을 이용하여 식 (2)와 같이 산정된다(Zhang 등, 1979).

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

$$u_D = \frac{1}{\gamma+1} D, \quad c_{2D} = \frac{\gamma}{\gamma+1} D$$

여기서, p_D , ρ_D , u_D , c_{2D} 는 각각 폭굉압력, 폭굉밀도, 폭굉입자속도, 폭굉음파속도를 나타내며 D , ρ_0 , γ 는 폭굉속도, 초기밀도, 단열지수(adiabatic exponent)이다. 발파공내 발파압력은 폭굉압력 분포의 평균값 p_m 이며 일반적으로 최대 폭굉압력 p_D 의 1/2이다(Henrych, 1979).

발파 수치해석시 입력하는 발파압력은 화약 폭발로 인한 폭굉압력이 발파공벽에 작용하여 암반내에 전파되는 압력을 사용한다. 밀장전조건에서 발파공벽에 작용하는 발파압력 크기는 화약과 암반 경계면의 입자속

도에 대한 적합조건, 질량 보존법칙, 운동량 보존법칙을 적용하여 식 (3), (4)와 같이 구할 수 있고 두식을 연립하여 풀면 구할 수 있다(Kim, 2001). 충격파 전파속도 c_s 는 충격하중을 받는 암반에 대한 Hugoniot 관계식으로 부터 식 (5)와 같이 산정한다(Marsh, 1980).

$$u_x = \frac{D}{\gamma+1} \left[1 + \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(1 - \left(\frac{p_x}{p_m} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right) \right] \quad (3)$$

$$p_x = \rho_{r0} \cdot u_x \cdot c_s \quad (4)$$

$$c_s = c + K u_x \quad (5)$$

여기서, u_x , c_s , p_x , p_m , ρ_{r0} 는 각각 발파공벽 내 충격파 입자속도, 충격파 전파속도, 발파공벽의 발파압력, 발파공내 평균 발파압력, 암반 초기밀도이고, c , K 는 충격파 속도와 입자속도에 대한 암반 비례상수이며 실험으로 결정되는 암반 특성치이다.

디커플링(decoupling) 장전조건은 화약과 암반 사이에 빈 공간이 있고 화약 폭발시 빈 공간만큼 폭굉압력 작용체적이 증가하여 폭굉압력이 감소한다. 발파공벽의 발파압력은 일반적으로 가스팽창압력 p_g 와 같으며 크기는 Abel-Novel이 제안한 상태방정식으로부터 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$p_x \approx p_g = \frac{f \cdot L}{V - \alpha L} = \frac{f}{(D_f)^2 \cdot (1/\rho_0) - \alpha} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{1.5}{1.26 + 1.33\rho_0} \quad (7)$$

여기서, f , L , α , V , D_f 는 각각 화약의 비에너지, 장약량, 코볼륨(covolume), 발파공 부피, 디커플링 지수이다.

2.3 발파압력 작용시 암반거동 특성

발파압력과 같은 동적 하중 작용 시 재료강도는 정적 강도와 다르다. 즉 동적 하중이 재료의 정적 항복강도를 초과해도 항복이나 파괴에 도달하지 않는 경우가 있다. 또한 항복강도를 초과해도 동적 하중의 작용시간이 충분하지 못하면 항복이나 파괴에 도달하지 못한다.

Zhao(2000)는 Bukit Timah 화강암에 대하여 동적 일축 및 삼축 압축시험, 인장시험, 불구속 전단시험을 시행하여 동적 Hoek-Brown 파괴기준을 제시하였다. 그림 2와 같이 하중재하율이 증가할수록 동적 일축압축 강도는 증가 경향을 보이며 수식으로 나타내면 식 (8)과 같다.

$$\sigma_{cd} = A \log(\dot{\sigma}_{cd} / \dot{\sigma}_c) + \sigma_c \quad (8)$$

여기서, σ_{cd} , $\dot{\sigma}_{cd}$, σ_c , A 는 각각 동적 일축압축강도 (MPa), 동적 하중재하율 (MPa/s), 의사정적 하중의 일축 압축강도 (MPa), 재료상수이고 $\dot{\sigma}_c$ 는 의사정적 하중재하율(quasi-static loading rate)로서 개략 5×10^{-2} MPa/sec 정도이다. 또한 삼축압축시험에서 구속압력 σ_3 와 하중재하율을 변화시키면서 많은 파괴시험을 시행하여 식 (9)와 같은 Hoek-Brown 파괴기준을 제안하였다. 그림 3과 같이 하중재하율이 증가함에 따라 동적 파괴강도가 증가하였다.

$$\sigma_{1d} = \sigma_3 + \sigma_{cd}(m \sigma_3 / \sigma_{cd} + 1.0)^{0.5} \quad (9)$$

여기서, σ_{1d} , σ_3 , m 는 동적 최대 주응력, 최소 주응력, Hoek-Brown 파괴기준 상수이다.

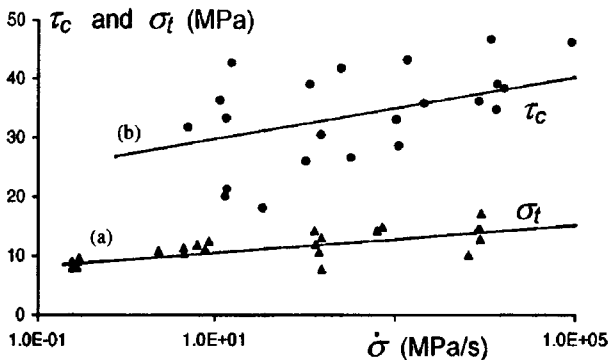


그림 2. 하중재하율과 동적 일축 및 전단강도

2.4 암반손상(rock damage) 기준

암반손상은 하중작용시 균열이 생기거나 기존 미세균열이 확장되어서 재료강도나 강성이 감소되는 현상이다. 손상도는 균열이 생성된 수나 확장된 균열수를 기준으로 정의한다. 하지만 암반균열 정도를 정확히 파악하기가 매우 어렵기 때문에 확률론적 방법을 적용하여 손상도를 나타낸다. 과거에 암반 손상도를 파악하기 위하여 암반 입자속도(particle velocity)를 사용하였으나 최근 Liu와 Katsabanis(1997)가 제안한 균열밀도 C_d 를 사용한다. 균열밀도 C_d 는 동적 하중, 하중 작용시간, 암반 항복강도, 암반 강성, 미세균열 생성률 등의 함수이다.

발파압력에 의한 균열밀도가 암반강성에 미치는 영향을 정량화하기 위하여 통계학적 파괴역학 개념에서 식 (10)과 같은 파괴확률(the probability of fracture) p_f 를 사용한다.

$$p_f = 1 - e^{-C_d V_0} \quad (10)$$

여기서 V_0 는 단위체적이다. 파괴확률은 0과 1 사이 값이며 균열밀도가 0이면 파괴확률도 0이고 균열밀도가 매우 크면 파괴확률은 1이 된다. 파괴확률은 미세균열로 인한 암반 손상도를 나타내며 식 (11)과 같이 손상계수 D 와 동일한 개념으로 사용할 수 있다. 암반 손상도가 암반 강성에 미치는 영향은 식 (12)와 같이 쓸 수 있다.

$$D = p_f = 1 - e^{-C_d V_0} \quad (11)$$

$$E_d = E(1 - D) \quad , \quad G_d = G(1 - D) \quad (12)$$

암반이 파괴되기 시작하는 시점의 손상계수를 D_{min} 이라 정의한다. Shockey 등(1974)에 의하면 단위체적에

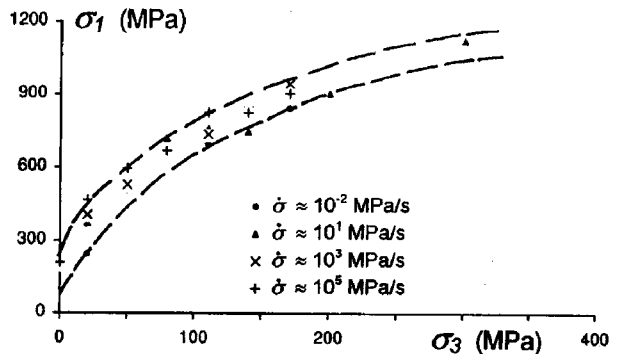


그림 3. 하중재하율과 파괴강도

암반파괴를 일으키는 한 개의 균열이 있을 때 D_{min} 은 0.632이고 Grady와 Kipp (1980)는 시험결과와 수치해석 결과를 비교하여 D_{min} 을 0.2로 제안하였다. 따라서 손상계수 D 는 일률적으로 적용하기는 곤란하고 현장조건, 암반변형 특성을 고려하여 적용하여야 한다.

3. 모델시험에 의한 발파압력 전파특성과 손상평가

3.1 모델시험 준비작업

국내에서 암반손상 평가는 현장계측에 의한 경험방법이 주로 이용되고 있으나 이 방법은 현장조건 변화를 반영할 수 없어서 특정한 현장조건이 아닌 경우 적용이 곤란하다. 이런 한계를 극복하기 위하여 이 연구에서는 각기 다른 장약조건, 발파조건, 전파 매질조건으로 인해 발생하는 발파압력의 전파특성을 실내 모형시험, 현장 터널시험을 시행하여 분석하였으며 수치해석 결과와 비교·분석하여 수치해석에 의한 암반손상 평가방안을 연구하였다. 실내시험은 암반의 취성파괴거동과 유사하고 비교적 균질한 재료인 시멘트 모르타르를 사용했으며 현장시험은 불연속면이 거의 없는 경암반조건에서 시행하였다.

3.1.1 실내 모형시험

모형시험은 시멘트-모르타르를 이용하여 그림 4와 같이 시편을 제작하였다. 모형시편의 크기는 계측기 설치위치에서 경계면 반사파가 중첩되지 않도록 충분히 크게 제작하였다. 발파공은 0.4m 간격으로 2개소를, 계측기는 2개 발파공 사이에 0.1m, 0.2m 이격거리로 2개소를 계획하였다. 계측기는 변형률계(strain gauge)를 사용했고 반경방향과 접선방향의 변형률을 측정하였다. 시

멘트모르타르의 특성치는 실험을 시행하여 구했으며 표 1과 같다(Kweon, 2001). 사용화약은 봉상이고 밀장약은 에멀전(emulsion)화약을, 디커플링장약은 구리트(gurit)화약을 사용하였다.

3.1.2 현장 터널시험

현장시험은 강원도 춘천의 터널현장에서 시행하였다. 터널 굴착면에 4개소를 천공하여 2개소는 발파공으로, 2개소는 계측기 설치공으로 사용하였다. 계측기 설치심도는 굴착면 반사파가 중첩되지 않도록 충분히 깊게 설치하였다. 발파공 간격은 0.6m이고 계측기는 발파공 사이에 0.15m, 0.30m 이격거리로 계획하였다(그림 5 참조). 계측기는 변형률계를 사용했고 반경방향과 접선방향의 변형을 측정하였다. 사용화약은 실내 모형시험과 동일하며 암반 특성치는 실험을 시행하여 구했으며 표 2와 같다(Kweon, 2001).

3.2 모델시험 결과

3.2.1 실내 모형시험 결과

실내 모형시험 결과는 표 3과 같으며 반경방향은 압축응력을, 접선방향은 인장응력을 나타낸다. 두 발파공의 중심인 1/2지점에서 발생한 응력은 2공 동시발파가 1공 단독발파보다 2.1~2.2배(밀장전조건), 1.8~2.0배(디커플링장전조건) 커서 응력파의 중첩이 발생하였다. 1공 단독발파 경우 발파공에 근접한 1/4지점과 중심인 1/2지점의 최대응력을 비교하면 1/2지점 응력은 1/4지점의 33~42%(밀장전조건), 27~28%(디커플링장전조건)로서 디커플링장전조건에 응력감쇠가 크게 일어났다. 최대응력 도달시간은 1공 단독발파와 2공 동시발파에서 차이가 없었으나 디커플링장약조건이 밀장약조건

표 1. 실내 모형시험의 시멘트모르타르 특성치

밀도 (gf/cm ³)	탄성계수(GPa)		항복응력 (MPa)	탄성파속도 (m/sec)	소성파속도 (m/sec)	포아손비
	정적	동적				
2.3	20.4	36.6	18.3	3990	2000	0.24

* 소성파속도는 가정치임

표 2. 현장 터널시험의 암반 특성치

밀도 (gf/cm ³)	탄성계수(GPa)		항복응력 (MPa)	탄성파속도 (m/sec)	소성파속도 (m/sec)	포아손비
	정적	동적				
2.6	33.9	42.9	92.6	4060	2030	0.26

* 소성파속도는 가정치임

표 3. 시멘트모르타르 실내 모형시험 결과

구 분	밀장약 조건				디커플링장약 조건				
	1/4 지점(10cm)		1/2 지점(20cm)		1/4 지점(10cm)		1/2 지점(20cm)		
	반경방향	접선방향	반경방향	접선방향	반경방향	접선방향	반경방향	접선방향	
1공 발파	응력 (MPa)	364.2	-176.1	152.6	-58.7	12.9	-7.1	3.6	-1.9
	도달시간(μsec)*	40	45	55	60	85	110	90	115
2공 발파	응력 (MPa)	367.6	-180.1	320.5	-129.1	12.6	-6.9	6.6	-3.8
	도달시간(μsec)*	40	45	55	60	85	110	90	115

* 도달시간은 최대응력 도달시간임

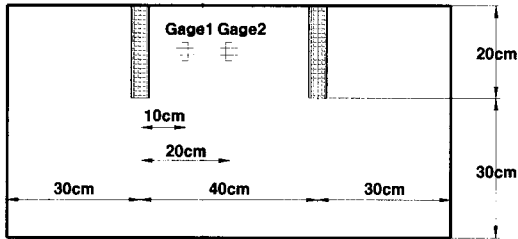


그림 4. 실내 모형시험조건

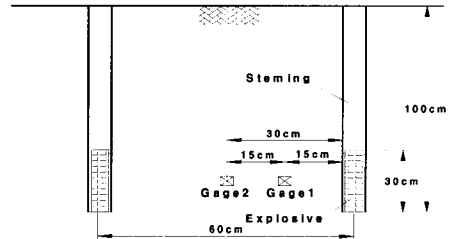


그림 5. 현장 터널시험조건

보다 1.6~2.4배정도 지연되었다. 이는 밀장전조건은 충격파에 의해 최대응력이 발생하고 디커플링장전조건은 가스압력에 의해 최대응력이 발생함을 잘 나타내었다. 디커플링장전조건인 2공 동시발파의 파괴형태는 그림 6과 같다. 1공 단독발파는 발파공 주변으로 반경방향의 균열이 생기면서 발파공 주위로 파석대와 균열대가 발생하였고 2공 동시발파는 응력과 중첩현상으로 인한 손상영역이 발생했음을 알 수 있었다.

3.2.2 현장 터널시험 결과

현장 터널시험 결과는 표 4와 같다. 두 발파공의 중심인 1/2지점에서 발생한 응력은 2공 동시발파가 1공 단독발파보다 1.8~1.9배(밀장전조건), 1.7~1.8배(디커플링장전조건) 커서 응력파의 중첩을 나타내었다. 1공 단독발파 경우 발파공에 근접한 1/4지점과 중심인 1/2지점의 최대응력을 비교하면 1/2지점 응력은 1/4지점의

28~35%(밀장전조건), 24~26%(디커플링장전조건)로서 디커플링장전조건인 경우 응력감쇠가 크게 일어났다. 실내시험보다 현장시험에서 응력감쇠가 크게 일어난 것은 응력과 전파거리가 길고 감쇠지수 영향 때문이다. 최대 응력 도달시간은 1공 단독발파와 2공 동시발파에서 차이가 거의 없었으나 최대응력 도달시간은 디커플링장약조건이 밀장약조건보다 1.7~2.8배정도 지연되었고 지연시간 차이는 실내시험결과와 유사하다. 이는 응력과 속도가 매우 커서 짧은 거리차가 무시됨을 알 수 있다. 밀장전조건인 2공 동시발파의 암반손상 형태는 그림 7과 같다. 2공 동시발파가 중앙지점에서 1공 단독발파와 비교해 손상영역이 증가하였다. 디커플링장약조건인 경우 손상영역 크기가 작아서 1공 단독발파와 2공 동시발파 모두 발파공 주위에서만 손상이 발생하였다.

표 4. 암반 현장터널시험 결과

구 분	밀장약 조건				디커플링장약 조건				
	1/4 지점(15cm)		1/2 지점(30cm)		1/4 지점(15cm)		1/2 지점(30cm)		
	반경방향	접선방향	반경방향	접선방향	반경방향	접선방향	반경방향	접선방향	
1공 발파	응력 (MPa)	213.3	-104.4	75.0	-28.8	10.4	-5.7	2.7	-1.4
	도달시간(μsec)*	35	40	50	55	80	105	85	110
2공 발파	응력 (MPa)	215.7	-106.2	146.2	-52.3	19.1	-9.9	4.7	-2.5
	도달시간(μsec)*	35	40	50	55	85	110	85	110

* 도달시간은 최대응력 도달시간임

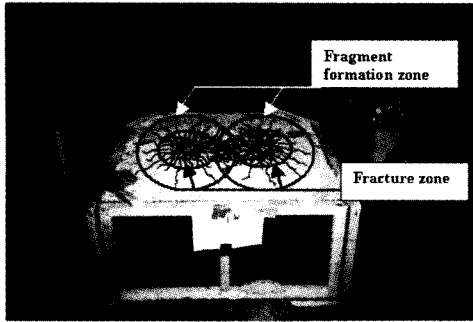


그림 6. 실내 모형시험의 손상영역

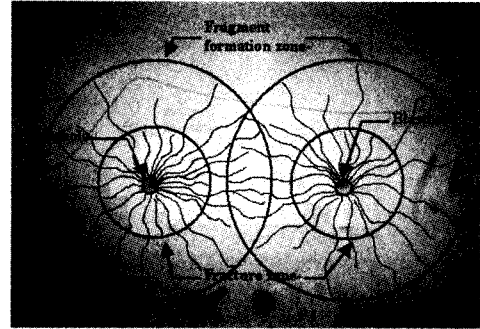


그림 7. 현장 터널시험의 손상영역

3.3 모델시험의 수치해석결과

수치해석은 2차원 평면변형률 조건이고 해석 프로그램은 'PENTAGON'을 이용하였다. 화약직경이 발파공 길이나 자유면으로부터 거리에 비하여 매우 작고 화약의 폭굉속도가 매우 빨라서 화약전체 길이에서 동시에 폭굉된다고 전제할 수 있으므로 평면 변형률 조건인 2차원 해석이 가능하다(Whittaker 등, 1992). 경계조건은 반사파 영향이 해석결과에 미치는 영향을 방지하기 위하여 무한경계조건으로 하였다. 실내시험과 현장시험을 해석하기 위한 해석모델은 그림 8, 9와 같다.

입력 발파압력은 밀장전 조건인 경우 식 (3), (4)를, 디커플링장전 조건인 경우 식 (6)을 사용했으며 사용된

화약 특성치는 표 5와 같다. 동적 항복기준은 식 (9)와 같이 Zhao(2000)의 제안식을 사용했다. 미세 균열 생성을 κ 는 7×10^{10} , 변화율 계수 η 는 2, 한계변형률 θ_c 는 0.0001을 적용한다.

표 5. 사용된 화약 특성치

Emulsion explosive	밀도, ρ_o	1.2 g/cm ³
	폭굉 속도, D	5000 m/sec
	직경, d	32 mm
Gurit	밀도, ρ_o	1.0 g/cm ³
	폭굉 속도, D	4000 m/sec
	직경, d	17 mm
	비에너지, f	104 lkgf/cm ² /kg

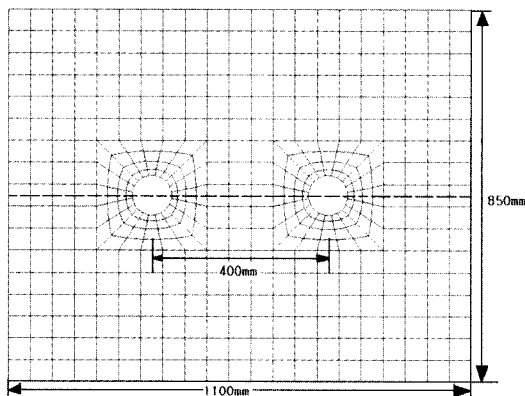


그림 8. 실내시험 해석을 위한 유한요소 모델

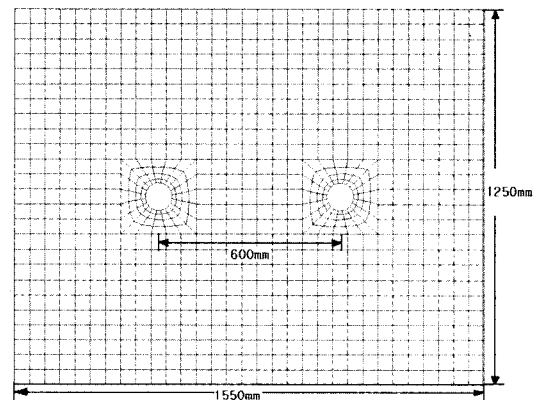


그림 9. 현장시험 해석을 위한 유한요소 모델

표 6. 모델시험의 수치해석 결과 계측점 응력

응력 (MPa)		밀장약 조건				디커플링장약 조건			
		1/4 지점		1/2 지점		1/4 지점		1/2 지점	
		반경방향	접선방향	반경방향	접선방향	반경방향	접선방향	반경방향	접선방향
실내 시험	1공발파	304.5	-162.7	147.7	-55.6	12.2	-6.8	3.1	-1.8
	2공발파	304.5	-162.7	280.6	-115.2	11.4	-6.6	6.2	-3.6
현장 시험	1공발파	177.4	-88.1	67.2	-24.5	9.5	-5.4	2.4	-1.3
	2공발파	177.5	-88.2	135.8	-50.9	10.1	-5.9	4.2	-2.2

결과분석 계측점은 실내시험과 현장시험의 계측점과 동일한 위치로서 해석결과는 표 6과 같다. 1/2지점에서 발생한 응력은 2공 동시발파가 1공 단독발파보다 1.9~2.1배(밀장전조건), 1.7~2.0배(디커플링장전조건) 커서 응력파의 중첩을 나타내었다. 1공 단독발파 경우 1/4지점과 1/2지점의 최대응력을 비교하면 1/2지점 응력은 1/4지점의 28~49%(밀장전조건), 24~26%(디커플링장전조건)로서 디커플링장전조건의 응력감쇠가 크게 일어났다.

3.4 모델시험 결과와 수치해석 결과의 비교 · 분석

실내시험, 현장시험의 계측결과와 수치해석 결과를 표 7과 같이 서로 비교 · 분석하였다. 1공 단독발파로 발생한 응력파의 최대 응력값과 도달시간이 시험결과와 수치해석결과가 거의 유사하며 2공 동시발파의 응력파 중첩효과도 거의 유사하였다. 응력파가 중첩되어 응력크기가 증가되었지만 손상영역 크기는 크게 커지지

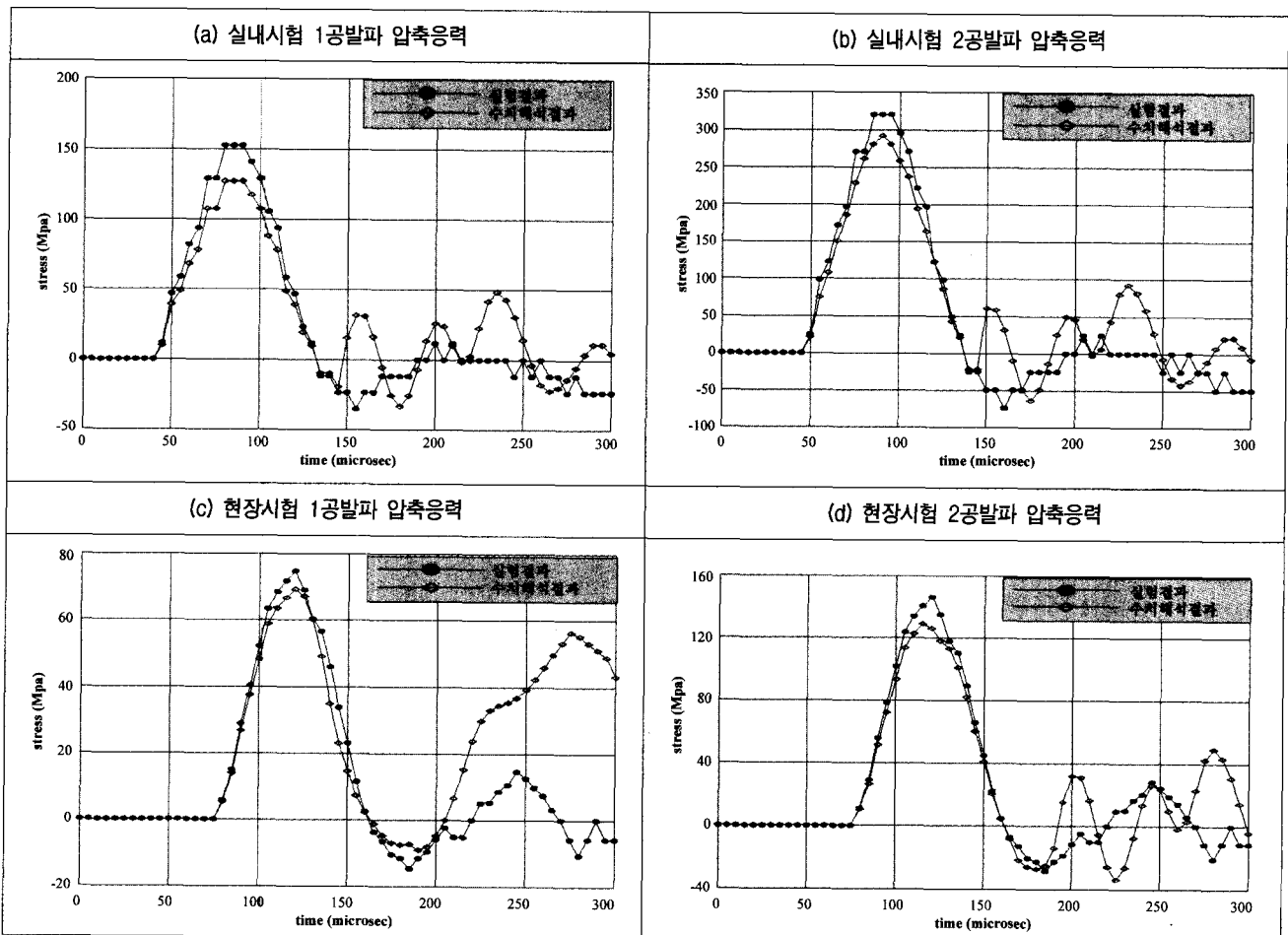
않았다. 즉 응력은 증가하였지만 변형을 변화율(strain rate)은 크게 증가하지 않았다. 이는 암반손상이 변형을 변화율의 함수이기 때문에 손상영역이 증가하지 않았다. 시간에 따른 응력파 변화는 최대값 도달시간까지 시험결과와 수치해석결과가 서로 유사하지만 그 후 시간에는 일치하지 않았다. 이는 모형시험의 경계조건에서 발생된 반사파 중첩, 계측점 파괴에 따른 측정계지의 에러 때문으로 판단된다.

4. 터널 발파설계 최적화를 위한 수치해석적 접근

4.1 수치해석 모델링

발파가 터널 굴착면 주위 암반에 미치는 영향을 분석하기 위하여 도로터널의 일반적인 발파패턴도(경암반 조건)를 대상으로 수치해석을 시행하였다. 실제 터널발파는 심발공, 확대공, 외곽공, 바닥공의 순서로 지연시간을 가지고 발파되므로 전단면을 해석할 경우 많은 계

표 7. 모델시험 결과와 수치해석 결과의 비교



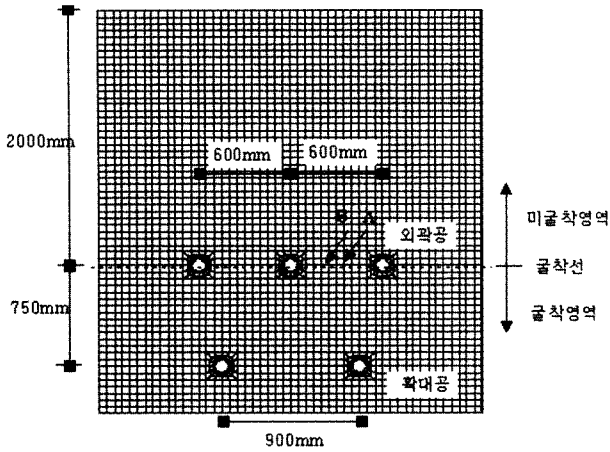


그림 10. 터널 발파해석을 위한 유한요소 모델

산시간이 필요하다. 외곽공 주위의 암반손상을 연구하기 위해서 많은 계산시간이 소요되는 전단면 해석을 하는 것은 효율적이지 못하다. 따라서 암반손상 및 여굴에 가장 크게 영향을 미치는 외곽공(contour hole) 3개소와 인접한 확대공(stopping hole) 2개소에 해당하는 영역을 해석대상으로 하였다. 발파시 암반은 3차원 거동을 나타내지만 연구관심이 발파공 주변영역에 국한되고 화약 기폭속도가 매우 빠르므로 평면변형률조건인 2차원 해석을 시행한다.

발파압력, 암반특성치, 사용프로그램은 모형시험 수치해석과 동일하다. 확대공, 외곽공 발파를 해석하기 위한 해석모델은 그림 10과 같고 모든 경계면은 응력파 반사에 의한 중첩을 방지하기 위하여 무한경계조건을 적용하였다. 따라서 실제 발파에서 자유면의 반사파에

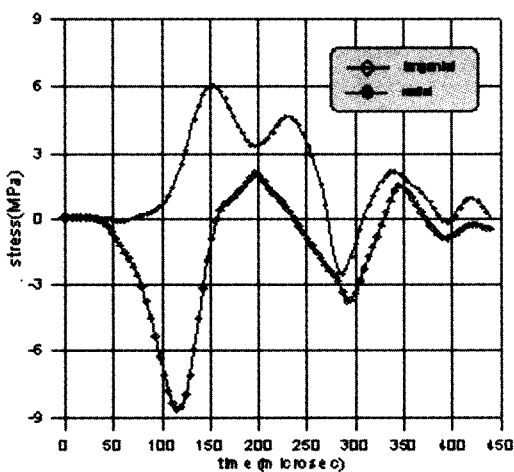
의한 인장파괴영향은 이 연구에서 고려하지 않았다. 또한 확대공과 외곽공을 동시 기폭으로 모델링하여 지연 시간 차를 고려하지 않았다.

4.2 해석결과와 분석

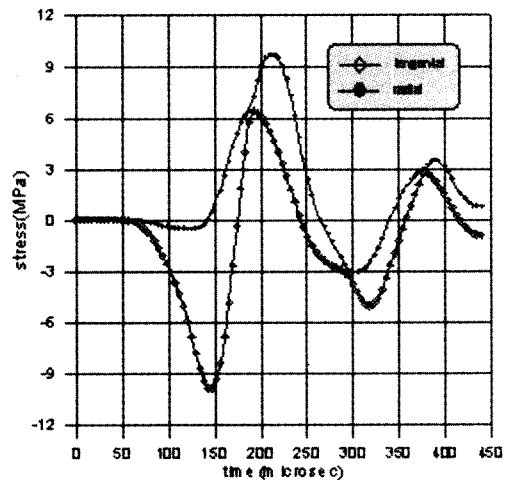
터널발파 최적설계는 굴착영역 암반을 효과적으로 제거하고 미 굴착영역 암반손상이 최소가 되도록 한다. 굴착면 확보여부는 발파 중첩으로 발생하는 응력크기와 암반강도를 비교·분석하고 암반손상 정도는 연속체 손상역학 개념에서 외곽공 및 외곽공과 인접한 확대공의 발파압력 전파로 발생하는 응력파의 변형률 특성으로부터 분석한다.

굴착면 확보여부를 분석하기 위한 해석결과는 그림 11과 같으며 (a)는 외곽공 사이의 중앙지점(A 지점)에서 반경방향 응력과 접선방향 응력을, (b)는 외곽공에서 20cm 이격지점(B 지점)에서 반경방향 응력과 접선방향 응력을 도시하였다. 거리에 따른 감쇠에도 불구하고 최대 반경방향응력(압축응력) 및 접선방향응력(인장응력)이 응력파 중첩으로 인해 중앙지점에서 크게 나타났다. 중앙지점에서 최대 인장응력은 10MPa로 정적 암반 인장강도 6MPa보다 커서 굴착면 확보가 가능한 것으로 검토되었다. 따라서 굴착면 확보여부 측면에서 발파패턴의 화약 및 장약조건은 비교적 적합한 것으로 판단된다.

터널발파시 외곽공과 확대공이 암반 손상에 미치는 영향은 서로 다르며 손상도 D는 현장조건, 암반 변형특성을 고려해서 산정해야 한다. 암반손상 영역 기준인 손

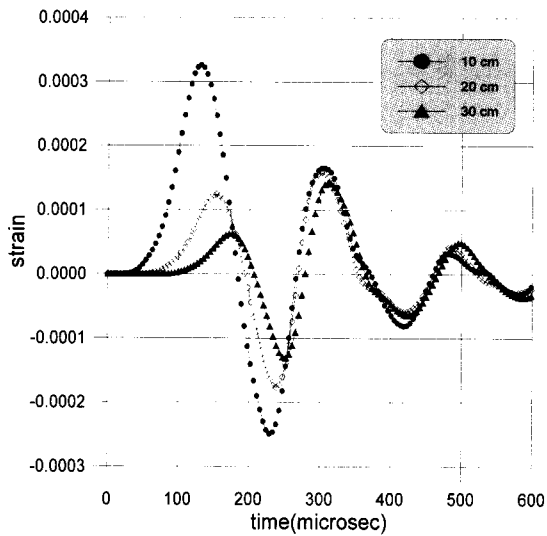


(a) 외곽공에서 20cm 이격지점(B지점)

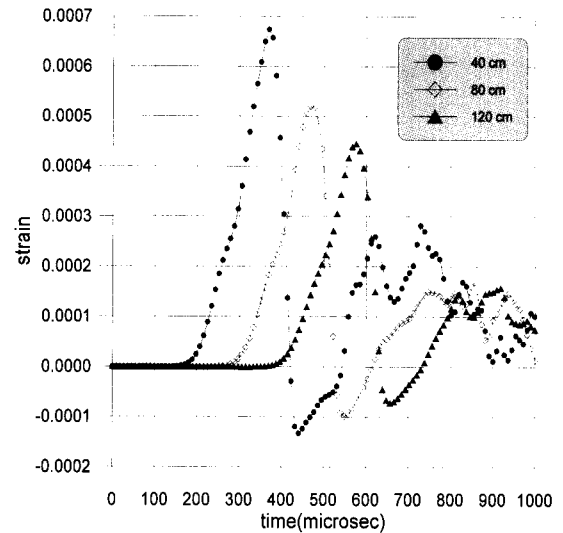


(b) 외곽공사이의 중앙지점(A지점)

그림 11. 발파 중첩으로 발생하는 암반 응력(-:압축, +:인장)



(a) 외곽공 발파 결과



(b) 확대공 발파 결과

그림 12. 응력과 전파에 따른 변형을

상도를 0.3으로 가정하였다. 즉 암반 변형계수가 30%정도 감소되는 영역을 암반손상 영역으로 전제하였다. 그림 12는 굴착면에서 거리에 따라 발생된 변형률이며 (a)는 외곽공 발파에 의한 변형율, (b)는 확대공 발파에 의한 변형율을 나타낸다. 변형율 변화율은 파 전파에 따른 응력감소로 인하여 모든 지점에서 다르게 나타났고 확대공 발파시 굴착면에서 10cm 이격지점에서 변형율 변화율이 3.3/sec이고 외곽공 발파시 굴착면에서 120cm 이격지점에서 변형율 변화율이 2.5/sec로 산출되었다.

그림 12 및 식 (11)에서 손상도 0.3이상인 영역은 외곽공 발파시 굴착면에서 15cm정도, 확대공 발파시 굴착면에서 90cm정도로 나타난다. 암반 손상은 외곽공보다 외곽공과 인접한 확대공에 의해 더 크게 발생하였으므로 확대공의 발파설계는 적합하지 않았다. 따라서 확대공에 의한 손상영역을 감소시키기 위하여 확대공 위치를 굴착면에서 더 멀리 이격시키거나 낮은 밀도의 화약 사용, 디커플링장약 방법 등을 적용하여 확대공 손상영역을 감소시키고 확대공 손상영역과 외곽공 손상영역을 일치시킴으로서 터널 발파설계를 최적화시킬 수 있다. 예를 들어서, 확대공의 화약직경을 25mm로 감소시켜 수치해석을 시행한 결과 손상영역은 30cm 이하로 나타났다으며, 직경 32mm 화약을 사용한 경우와 비교하여 손상영역이 크게 감소됨을 알 수 있다.

5. 결론

이 연구는 화약폭발로 발생한 응력파의 전파특성을

파악하기 위하여 화약종류, 장약조건, 전파매질조건 별로 실내 모델시험 및 현장 암반시험과 수치해석을 시행하였다. 또한 시험결과와 수치해석결과를 비교·분석하여 수치해석의 적정성을 검증함으로써 현장발파시험을 시행하기 전에 수치해석으로 발파결과를 미리 예측할 수 있는 방안을 강구하였다. 또한 이런 수치해석을 시행하여 터널발파 굴착에서 발파공주위 암반의 동적 거동 및 손상정도를 암반특성, 사용화약, 장약조건 등에 따라 분석하고 발파패턴 설계의 최적화 방안을 제시하였다.

실내 모델시험과 현장 암반시험결과 2공의 화약을 동시에 발파하는 경우 두 발파공 중심선을 연하여 응력파 중첩이 발생하였다. 발파공 중심에서 거리에 따른 응력파 감쇠는 밀장전조건보다 디커플링장전조건에서 더 크게 일어났다. 최대응력 도달시간은 디커플링장전조건이 밀장전조건보다 2배정도 지연되어서 가스압력에 의해 최대응력이 발생하였다. 발파공주위에 균열이 생기면서 파석대, 균열대가 발생하였고 응력파 중첩으로 인한 손상영역이 확대됨을 확인하였다. 시험결과와 수치해석결과를 비교분석한 결과 수치해석결과가 시험결과보다 약간 저평가되었지만 비교적 유사하여 수치해석으로 발파결과를 미리 예측할 수 있었다.

터널발파 굴착의 굴착면 확보와 암반손상 정도를 분석하기 위하여 일반적인 도로터널 발파패턴도를 대상으로 수치해석을 시행한 결과, 외곽공에 인접한 확대공의 암반손상영역 범위가 외곽공보다 6배정도 과대하였다. 따라서 확대공 위치를 굴착면에서 더 멀리 이격시키

거나 낮은 밀도의 화약 사용, 디커플링장약 방법 등을 적용하여 확대공 손상영역과 외곽공 손상영역을 일치 시킴으로서 터널 발파설계를 최적화시킬 수 있는 기본안을 제시하였다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 목적기초연구사업(과제번호:R01-2001-00475)의 연구비 지원에 의해 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. EmeraldSoft Co., Ltd.(2002), PENTAGON-2D User Manual, 2002 release.
2. Grady, D. E. and Kipp, M. E.(1980), "Continuum Modelling of Explosive Fracture in Oil Shale", *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech.*, pp.147-157.
3. Henrych, J.(1979), *The Dynamics of Explosion and its Use*, Elsevier Scientific Company, Amsterdam.
4. Kharkvich, A. A.(1962), *Spectra and Analysis*, Fizmathgiz, Moscow.
5. Kim, S. G.(2001), *Quantitative Assessment of Blast Waves and Numerical Approach for Tunnel Blasting Optimization*, Ph. D. Thesis, Korea University.
6. Kweon, J. W.(2001), *Experimental Approaches on Estimation of Damage Zone due to Blast Loading*, MS. Thesis, Korea University.
7. Liu, L. and Katsabanis, P. D.(1997), "A Numerical Study of the Effects of Accurate Timing on Rock Fragmentation", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.34, No.5, pp.817-835.
8. Marsh, S. R.(1980), *Last Shock Hugoniot Data.*, Univ. of California Press, Berkely.
9. Shockey, D. A., Curran, D. R., Seaman, L., Rosenberg, J. T., and Petersen, C. F.(1974), "Fragmentation of Rock under Dynamic Loads", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 11, pp.303-317
10. Valliappan, S. and Ang, K. K.(1988), "Finite Element Analysis of Vibration Induced by Propagating Waves Generated by Tunnel Blasting", *Rock Mech. Rock Eng.* pp.53-78.
11. Whittaker, B. N., Singh, R. N. and Sun, G.(1992), *Rock Fracture Mechanics Principles, Design and Applications*, Elsevier Scientific Company, New York.
12. Zhang, Baoping. et. al.(1979), *Explosion and their Application*, Publishing House of Defence Industry, Beijing.
13. Zhao, J.(2000), "Applicability of Mohr-Coulomb and Hoek-Brown Strength Criteria to the Dynamic Strength of Brittle Rock", *Int. J. Rock. Min. Sci.* Vol.37, No.7, pp.1115-1121.

(접수일자 2002. 8. 2, 심사완료일 2003. 3. 20)