

Decoupling 장전시 천공벽에 작용하는 발파하중의 산정 Determination of Blast Load on the Borehole Wall Using Decoupled Charge

김상균¹⁾, Sang-Gyun Kim, 이인모²⁾, In-Mo Lee, 최종원³⁾, Jong-Won, Choi,
김신⁴⁾, Shin Kim, 이두화⁵⁾, Du-Wha Lee

- ¹⁾ 고려대학교 토목환경공학과 박사과정, Ph.D. Student, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.
²⁾ 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.
³⁾ 고려대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.
⁴⁾ (주) 삼보기술단 지반부 부장, General Manager, Geotechnical Div., Sambo Engrg. Co., Ltd
⁵⁾ (주) 삼보기술단 대표이사, President, Sambo Engrg. Co., Ltd

SYNOPSIS : In tunneling and road cuts by blasting, it is of the utmost importance that the remaining rock is of high quality in order to avoid rockfall, rockslides and excessive maintenance work. Therefore, numerous blasting techniques which make use of decoupled charge or shock wave superposition effect have been used to control overbreak. In this paper, some approximate method for the determination of blast load according to the charge condition was introduced at first and, instrumented tests were conducted in small scale transparent material to investigate the shape and amplitude of blast load around the bore hole.

Compare to the fully coupled charge, low amplitude of blast load around the bore hole was observed in the decoupled charge and explosion gas pressure was important in the shape of blast load. Therefore, quasi-static behaviour of the crack pattern was shown due to low loading rate.

Key words : decoupled charge, shock wave, explosion gas, reaction rate, quasi-static behaviour.

1. 서 론

발파에 의해 굴착공사를 시행하는 경우, 암반의 파쇄 및 이동은 화약의 폭발시에 발생하는 충격파(shock wave)의 전파와 화학반응에 의해 생성되는 가스(explosion gas)팽창에 의해 수행된다. 실무적으로 이용되는 화약의 발파능력(blasting performance)은 폭발, 화약밀도 그리고 화학반응 전·후의 상태 방정식(equation of state)으로부터 파악하거나 실험결과가 많이 축적되어 있는 기준폭약에 대한 상대적인 크기등이 이용된다. 그러나 이와같은 인자들은 특정한 상태에서의 값으로 시간에 따른 변화를 반영하지 못하며 화약자체의 특성에 의해서만 결정되기 때문에 천공패턴, 지연시차 그리고 Decoupling 효과 등에 따른 영향을 적절히 반영할 수 없어 제한된 조건에서만 적용이 가능하다. 특히, 천공벽에 작용하는 발파하중의 크기와 균열의 발생양상은 대상암반의 공학적특성과 발파하중의 시간변화율/loading rate)과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있어 터널등에 있어서 설계굴착선(design perimeter)의 조절 발파효과를 파악하는데 적합하지 않다. 그러므로 발파공주위 암반의 균열발생상황 및 손상정도를 적절히 파악하기 위해서는 우선적으로 대상암반의 특성 및 Decoupling 지수등을 반영하여 천공벽에 작용하는 발파하중의 시간변화율을 산정할 필요가 있다. 이와 같은 발파하중의 크기 및 형상은 특정암반에서의 발파효과 뿐만 아니라 다양한 조건하에서 대상암반의 균열발생상황 및 손상정도를 수치해석등을 통해 파악하고자 하는 경우에 입력치로 유용하게 이용될 수 있다.

본 논문에서는 먼저 발파하중에 의한 발파공 주위 암반의 상태 및 Decoupling 메커니즘을 파악하고 화약과 발파공주위 암반의 특성 그리고 Decoupling 조건을 고려하여 시간에 따른 발파하중을 산정하였다. 또한 발파모형시험을 통해 Decoupling 지수의 크기에 따라 발파공벽에 작용하는 발파하중의 크기 및 형상 그리고 발파대상매질의 거동을 파악하였다.

2. 발파메카니즘

2.1 발파공 주위 암반의 상태

발파하중하에서 발파공주위 암반은 그림 1과 같이 분쇄환(crushing annulus), 균열대(fracture zone) 그리고 파석형성대(fragment formation zone)의 세부분으로 나누어 진다.

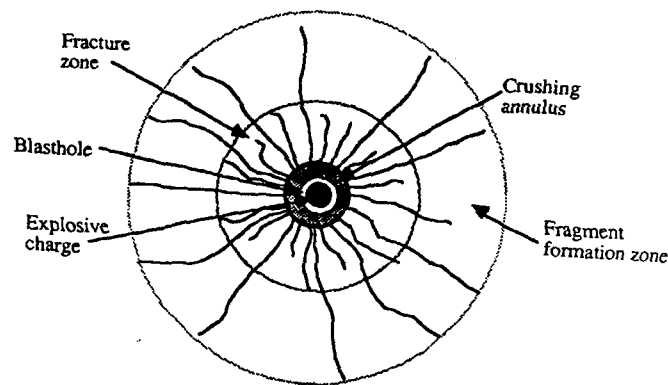


그림 1 발파하중에 의한 암반의 상태

밀장전(fully coupled charge)된 발파공내에서 생성된 높은 압력은 천공벽면에 암반의 압축강도보다 훨씬 큰 반경방향 압축응력(radial compressive stress)으로 작용하여 발파공에 인접한 암반을 분쇄시킨다. 또한 화약의 화학반응에 의해 생성된 고온의 기체로 인해 이 영역의 암반은 유체와 같은 거동을 보이게 된다. 이와 같은 분쇄환은 과도한 파괴를 유발하고 외부암반으로의 하중전달을 방해하는 요소로 작용하여 잔존암반의 손상 뿐만아니라 발파효율 자체를 저하시킨다.

분쇄환(crushing annulus)의 외각 경계에서는 주위 암반에 반경방향으로 전파되는 응력파가 발생하며 반경방향의 압축응력과 접선방향의 인장응력이 Kirsh's Solution으로부터 계산된다. 그러므로 이때 발생하는 균열은 접선방향 인장응력과 분쇄환 외곽에 존재하는 결함(flaw)등에 의해 발생하며 반경방향 균열에 의해 분쇄환 외곽의 암반 분리가 일어난다. 이 지역을 균열대라고 하며 이는 발파 효율 측면에서 실제적으로 유용하며 설계굴착선공의 조절발파는 이 지역에서 발생하는 균열의 수량을 줄이고 방향을 조절하는 기법이라 할 수 있다. 파석형성대는 발파공 안의 반응생성물(reaction products)이 팽창함으로써 가스가 균열사이로 침투하여 균열의 길이를 연장시킨 영역이며 이 부분의 균열양상으로부터 파쇄암석의 크기가 결정된다.

최근의 연구결과에 의하면 발파에 의해 발생한 충격파의 전파는 대상암반의 균열분포 및 손상정도와 밀접한 관계가 있고 폭발가스에 의한 팽창력(expansion work)은 충격파의 전파에 의해 형성된 균열폭의 확대 및 파쇄암석의 이동에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다.(Liu and Katsabanis, 1997) 그러므로 일반적인 발파공의 경우, 암반의 손상에 대한 연구는 응력파의 전파에 의해 형성되는 균열대의 크기 및 균열양상 파악을 중심으로 이루어 지고 있다.

2.2 Decoupling 메카니즘

전술한 바와 같이 설계굴착선(design perimeter)상에 위치하는 발파공의 천공간격, 장약조건 그리고 기폭시차등을 다른 발파공과 같이 적용하면 여굴 및 잔존암반의 손상이 크게 되어 지보재수량 증대 및 안정성 확보에 영향을 미치게 된다. 그러므로 설계굴착선에 위치하는 발파공들에 대해 천공직경보다 작은 직경의 화약을 사용하는 Decoupling 효과를 이용하고 발파공들이 동시에 기폭되게 하는 조절발파기법이 적용되며 이에 대한 메카니즘은 다음과 같다.

천공직경에 비해 장약직경이 작은 경우, 화약과 발파공벽사이에는 공기가 존재하게 되어 화약의 폭발에 의해 발생하는 폭발압이 발파공벽에 직접 작용되지 않고 공기층을 통과하여 작용하게 된다. 그러므로 발파공벽에 작용하는 압력이 감소하여 분쇄환의 발생을 억제할 뿐만 아니라 시간에 따른 압력의 변화율이 감소하고 동적하중보다는 준 정적인 하중하에서의 균열발생양상을 보이게 된다.

발파공벽에 작용하는 압력이 감소하는 원인은 충격파의 전파특성으로부터 파악할 수 있다. 즉, 충격파가 서로 다른 매질을 통과하는 경우 매질의 경계면에서는 각각의 임피던스차이에 의해 굴절과 반사현상이 발생하며 응력의 크기등도 변화한다. Decoupling 장전시의 화약의 밀도와 폭발속도는 공기의 밀도와 파전파속도에 비해 크기 때문에 폭발에 의해 발생한 압력의 크기가 공기층을 통과하면서 감소되어 발파공벽에 전달되게 된다.

동적하중과 준 정적인 하중하에서의 일반적인 균열발생양상의 차이는 그림 2로부터 설명될 수 있는데 발파공벽에 정적인 하중이 작용하는 경우에는 수압파쇄(hydrofracturing)시험시의 암반거동과 같이 발파공벽주위의 가장 취약한 면에서만 균열이 발생하여 확장되고 이로 인해 다른 부분에서는 접선방향으로 작용하는 인장응력이 감소하여 균열발생이 억제된다. 그러나 동적하중상태에서는 하중의 작용시간이 매우 짧기 때문에 발파공벽주위의 응력상태가 서로 영향을 미치지 않고 독립적이기 때문에 다수의 균열이 발생하게 된다. 물론 Decoupling 장전시의 발파하중을 정적인 것으로 볼 수는 없으나 밀장전시에 비해서는 동적인 효과가 적기 때문에 이를 의사정적(quasi-static) 또는 준정적인 하중으로 간주 할 수 있다. 설계굴착선공의 조절발파시 발파공들을 동시에 기폭시키는 목적은 각각의 발파공에서 발생하는 응력파의 중첩효과를 이용하여 굴착단면에서 최대접선응력을 발생시켜 상대적으로 취약한 단면이 되게 하여 균열을 유도하기 위함이다.

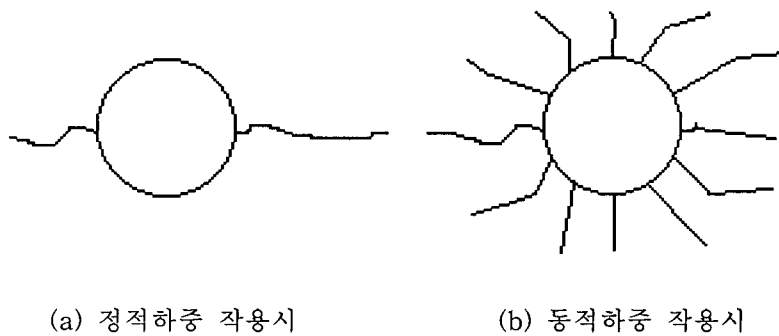


그림 2 하중의 종류에 따른 균열양상

3. 발파하중의 산정

발파공벽에 작용하는 발파하중은 먼저 화약이 일정한 폭속상태에서 발휘하는 하중을 질량, 모멘트 그리고 에너지 보존법칙을 이용하여 산정하고 반응속도모델(reaction rate model)을 이용하여 시간에 따른 변화를 파악하였다. 이를 토대로 밀장전시와 Decoupling 장전시에 대해 대상암반의 공학적특성과 공기의 완충효과를 고려하여 발파공벽에 작용하는 발파하중을 산정하였다.

3.1 화약의 폭굉압력 산정

화약의 폭굉시 정상상태(steady-state condition) 상태에서의 매개변수(detonation parameter)는 화약의 폭속과 밀도로부터 다음과 같이 구해진다. (Zhang, 1979)

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

여기에서 p_D , ρ_D , u_D , c_D 는 폭굉후의 압력, 반응물질의 밀도, 입자 속도, 매질내에서의 음속을 나타내며 ρ_0 , D 는 화약의 밀도와 폭굉속도이다. γ 는 정압비열과 정적비열의 비율(C_p/C_v)로서 화합화약류는 일반적으로 3 이고 ANFO 등의 혼합화약류인 경우는 다음과 같이 결정된다.

$$\gamma = 1.9 + 0.6 \times \rho_0 \quad (2)$$

이와 같은 매개변수들은 발파효과를 파악하는데 매우 유용하게 이용되지만 임의의 지점에서 화학반응에 의해 발생하는 최대값 만을 나타내므로 수치해석등의 입력치로 사용하기는 어렵다. 그러므로 최대값 전·후에서 매개변수의 시간에 따른 변화양상을 파악할 필요가 있으며 이는 압력변화를 중심으로 충격파후면에서 화약의 측면손실과 화약을 구성하는 물질의 반응속도로부터 파악할 수 있다.

화약의 측면손실은 주상장약(cylindrical charge)의 경우, 화약이 완전히 밀폐된 상태에서 반응하지 않기 때문에 발생하며 측면에서의 구속정도가 화약의 중심부에 비해 작기 때문에 부피팽창에 의한 압력분포가 중심부로 갈수록 커지게 된다. 이로 인해 폭굉파는 곡면을 이루게 되며 곡률(curvature)이 클수록 폭속이 저하되고 최대압력을 나타내는 시간이 증가한다. 산업화약에 있어서 이와 같은 측면손실은 장약공의 직경과 밀접한 관계가 있으며 ANFO 와 같은 화약에서 장약공의 직경이 클수록 폭속이 증가하는 원인이 된다. 화약을 구성하는 물질의 반응속도와 압력의 관계는 다음과 반응속도모델로부터 파악할 수 있다.(Kennedy and Jones, 1993)

$$-\frac{d\lambda}{dt} = (1-\lambda) \left(\frac{p_h a_h}{\tau_h} + \frac{p_i a_i}{\tau_i} + \frac{p_f a_f}{\tau_f} \right) \quad (3)$$

식 (3)에서 λ 는 화약의 화학반응정도(extent of reaction)를 나타내며 p 는 화학반응시간에 따른 압력 그리고 a 는 λ 의 Gaussian Function 이다. 아래첨자 h, i, f 는 화약을 구성하는 Hotspot, 액체성분 그리고 고체성분을 뜻하며 τ 는 각각의 성분에 대한 특성반응시간(characteristic reaction time)이다.

이와 같이 화약에서 발생하는 압력의 시간적변화는 측면손실과 화학반응속도에 따라 달라지며 화합화약(molecular explosive)은 측면손실에 의한 영향이 크고 여러 가지 성분이 혼합된 산업화약의 경우에는 구성재료의 화학반응속도와 밀접한 관계가 있다.

최대압력을 나타내는 시간이후의 압력변화 역시 화학반응속도로부터 파악할수 있는데 예를 들면 화학반응이 완료되는 시간이 $40 \mu\text{sec}$ 이고 최대압력도달시간(rising time)이 $15 \mu\text{sec}$ 인 경우, $15 \mu\text{sec}$ 이후의 압력은 최대압력에서 선형적으로 감소하여 가스팽창압력에 이르게 된다. 화학반응이 완료되는 시간은 폭굉압력과 마찬가지로 폭속과 밀접한 관계가 있으며 산업화약의 경우, 다이ना마이트, 에멀전 그리고 ANFO 의 순서로 반응시간이 길어진다. 화학반응이 완료되는 순간에 팽창가스압력은 최대가 상대적으로 긴 시간동안 지속되며 장약공의 체적이 일정하다는 가정으로부터 다음과 같은 Abel-Novel 의 상태방정식으로부터 압력의 크기가 산정된다.

$$p_g = \frac{f \cdot L}{V - aL} \quad \alpha = \frac{1.5}{1.26 + 1.33\rho_0} \quad (4)$$

여기서 p_g , f , L , V 는 각각 가스팽창압력, 화약력, 폭약중량, 장약실의 체적을 나타내고 α 는 co-volume 이다.

식 (1)~(4)를 이용하여 화약에 의해 발생하는 압력의 크기 및 형상을 결정할 수 있으며 그림 3은 화약직경 17mm, 폭속(D) 4000m/sec, 밀도(ρ) 1g/cm³, 비열비(γ) 2.5 그리고 화약력(f) 10000 l · kgf/cm²/kg 인 경우에 대한 시간에 따른 압력분포로 화약구성성분의 전체반응시간은 40 μ sec 최대압력도달시간은 15 μ sec 로하여 산정하였다.

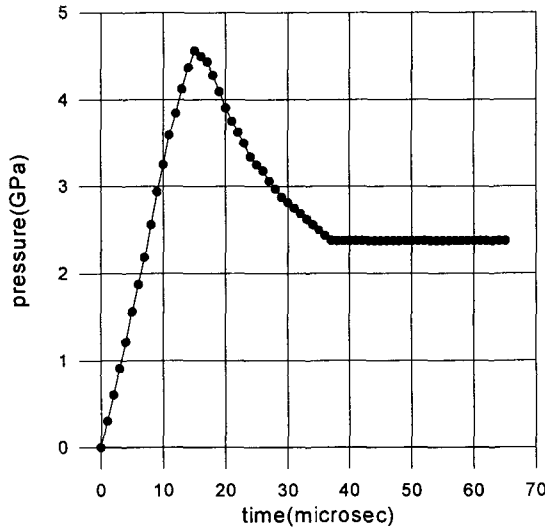


그림 3 화약의 시간에 따른 폭굉압력

3.2 발파공벽에 작용하는 압력의 산정

발파에 의한 주변압반의 거동을 적절히 파악하기 위해서는 화약에 의해 발생하는 폭굉압력으로부터 발파공벽에 작용하는 응력파의 형상을 파악해야 한다. 밀장전이고 발파공벽의 강성이 매우 크면 화약과 발파공벽의 접촉면에서의 압력의 크기는 화약에 의해 발휘되는 압력의 1/2 로 계산된다. 그러나 대부분의 경우, 최대압력이 도달할 때, 이미 발파공벽 주위압반에서는 반경방향의 변형이 발생하여 발파공벽에 작용하는 압력의 크기는 더욱 감소한다.

Decoupling 장전의 경우는 발파공벽에 작용하는 압력이 화약과 발파공벽사이에 존재하는 공기로 인해 밀장전의 경우와 다른 양상을 보이게 된다. 즉, Decoupling 지수가 2.5 보다 크게 되면 화약의 폭굉압력이 공기층을 전파함으로써 발생하는 압력은 파전파이론에 의해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$p_a = \frac{2 \rho_a C_a}{\rho_a C_a + \rho_0 D} \times p_D \quad (5)$$

여기에서 p_a , ρ_a , C_a 공기층을 전파하는 압력, 공기의 밀도와 공기층의 파전파속도이다. 일반적인 공기의 밀도 0.0012 g/cm³ 이고 파전파속도는 340 m/sec 정도로 화약의 밀도와 폭굉속도에 비해 매우 작아 화약의 폭굉에 의한 압력은 거의 소멸되어 천공벽에는 가스팽창압력만이 작용된다. 그러나 공기층의 두께가 작은 화약과 발파공벽의 거리가 가까운 경우에는 폭굉압력의 감소정도가 식 (5)와는 다르게 나타난다. 화약의 화학반응생성물에 의한 팽창압력은 식 (4)로부터 개략적으로 파악할 수 있으며 이때 장약량은 일정하고 장약공의 부피가 증대되어 그림 3 에서의 산정된 압력보다 작은 값이 계산된다.

그림 4는 그림 3과 같은 조건에서 암반의 탄성계수 50GPa, 밀도 2.5g/cm³ 인 경우에 대한 밀장전시와 천공직경을 45mm 로 한 Decoupling 장전시의 발파공벽에 작용하는 압력의 시간에 따른 분포이다.

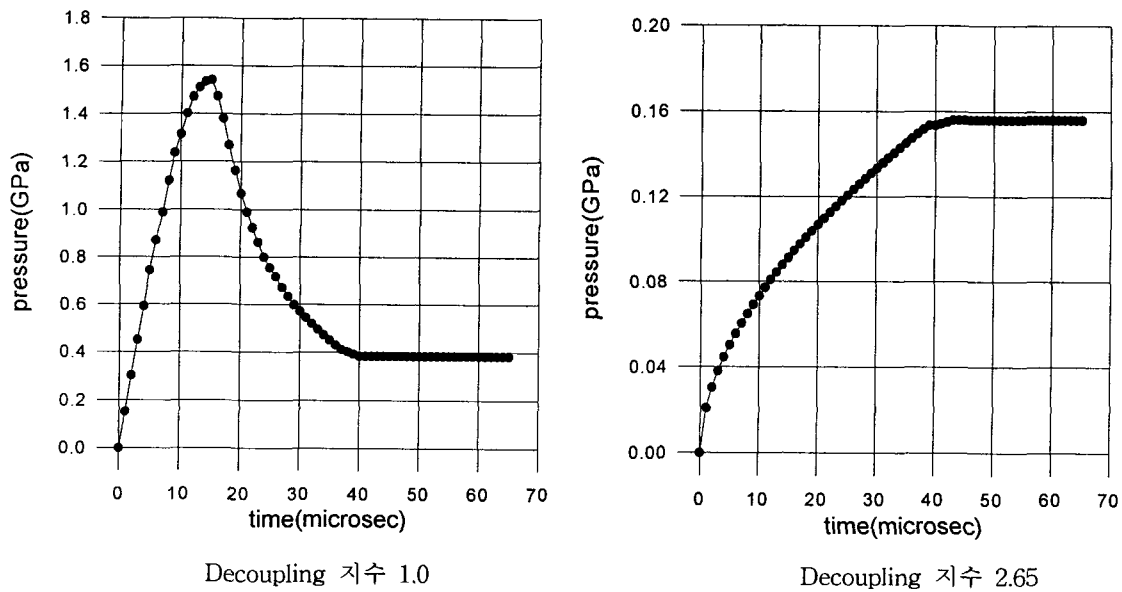


그림 4 발파공벽에 작용하는 압력분포

그림 3과 그림 4로부터 밀장전시 발파공벽에 작용하는 최대압력은 최대폭굉압력의 1/3 정도로 계산되었고 Decoupling 장전시는 최대폭굉압력의 1/30 정도로 산정되었으며 이에 비례하여 압력의 변화율도 감소하는 것으로 나타났다.

4. 발파 모형시험

4.1 시험 조건

Decoupling 지수의 크기에 따른 발파하중특성 그리고 응력파의 전파에 따른 매질의 거동을 파악하기 위해 투명한 아크릴수지로 제작한 시편에 PETN을 심약으로 한 도폭선을 장약하고 발파공 중심으로부터 40mm 와 80mm 지점에 변형율게이지를 설치하여 발파시험을 실시하였다. 모형시편의 크기와 천공 및 장약조건 그리고 변형을 측정위치는 그림 5와 같으며 아크릴수지의 탄성계수와 밀도는 각각 30 GPa, 1.2 g/cm³ 이고 도폭선의 직경과 심약량은 각각 4 mm, 5 g/m 를 사용하였다.

4.2 시험 결과

발파모형시험으로부터 파악된 발파공 중심에서 40mm 와 80mm 떨어진 지점의 시간에 따른 변형을 변화양상은 그림 6과 같다. Decoupling 지수 1.25 에 대한 발파시험에서는 발파공 중심으로부터 40mm 지점의 변형을 게이지의 결함으로 인해 80mm 지점에서만 변형율이 측정되었다. 또한 계측장비의 제한성으로 인해 데이터의 sampling time 을 40 μ sec 간격으로 하였기 때문에 정확한 하중의 형상은 나타나지 않았으며 최대변형율의 크기는 1150 μ strain 으로 나타났다.

반면에 Decoupling 지수 3.75 에 대한 발파시험에서는 두지점에서의 시간에 따른 변형을 변화양상이 비교적 정확히 측정되었으며 거리에 따른 감쇄효과도 확인 되었다.

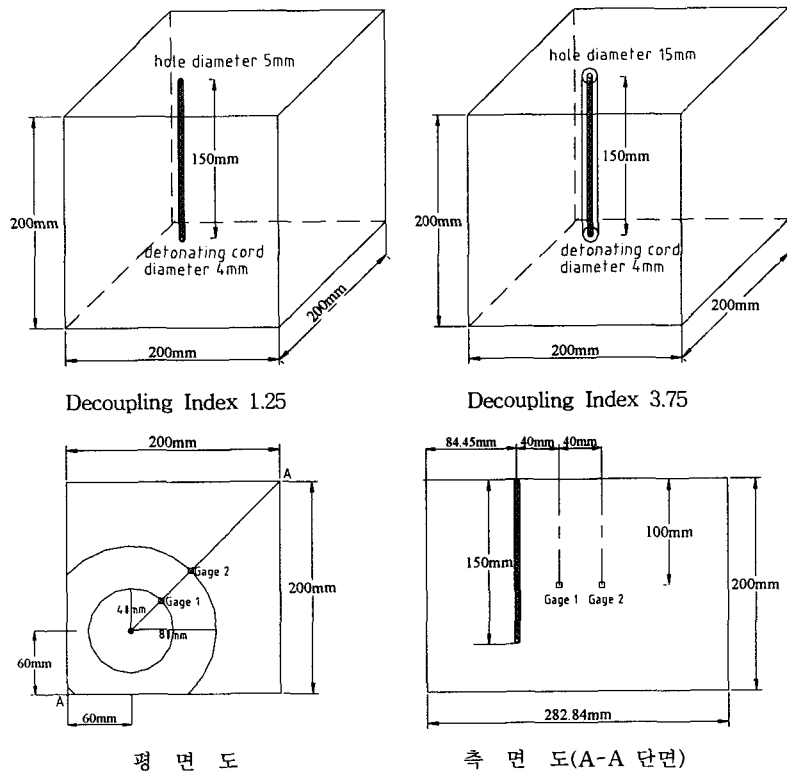


그림 5 발파 모형시험 조건

이들을 종합할 때, Decoupling 지수를 증가시키에 따라 발생압력의 크기가 감소할 뿐만아니라 화약의 폭굉에 의해 발생하는 충격파의 효과는 감소하고 화학반응에 의한 가스팽창압이 발파공벽에 작용하는 응력에 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 이로 인해 발파하중의 시간변화율이 감소하게 되어 준정적인 하중하에서의 균열발생을 유도하는 것으로 나타났다.

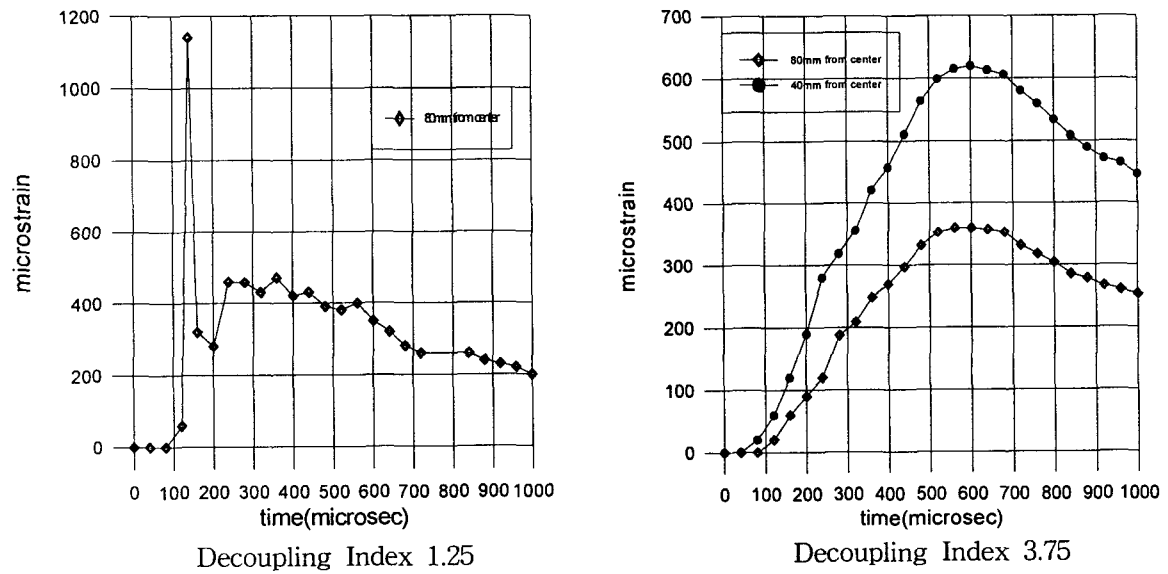


그림 6 Decoupling 지수의 크기에 따른 변형율

응력파의 전파에 따른 매질의 거동을 파악하기 위해 육안관찰을 실시한 결과, Decoupling 지수를 1.25로 한 시편은 발파하중에 의해 자유면에서 발파공까지의 거리가 짧은 부분이 파쇄되어 분리되었으며 Decoupling 지수를 3.75로 한 시편은 파쇄되지 않고 균열만 발생한 것으로 나타났다. 균열의 발생양상에 있어서는 Decoupling 지수가 작은 시편이 발파공을 중심으로 한 반경방향의 균열면적이 크고 균열의 수도 많게 나타났으며 Decoupling 지수가 큰 시편은 적은 수의 균열이 자유면에서 반사되는 인장응력파가 빠르게 도달되는 취약단면을 따라 발생하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 천공벽면에 발생하는 발파하중의 크기 및 시간변화율과 발파대상매질의 거동을 파악하기 위해 폭굉파의 전파 및 가스팽창이론 그리고 반응속도모델을 이용하여 화약 및 암반의 특성 그리고 Decoupling 지수에 따른 발파하중을 산정하고 발파모형시험을 실시하였으며 이의 결론은 다음과 같다.

- 1) 화약자체의 특성 뿐만아니라 발파대상암반의 특성 및 Decoupling 지수에 따른 영향을 고려할 수 있는 발파하중 산정방법을 도출하였으며 이로부터 다양한 발파조건에 대해서 실제와 유사한 하중산정이 가능하고 발파효과를 파악하기 위한 수치해석등에 유용한 입력치로 사용될 수 있는 것으로 나타났다.
- 2) 발파공벽에서 발생하여 주위암반으로 전파되는 응력파의 형상에 영향을 미치는 인자는 밀장전의 경우는 폭굉에 의한 충격파, Decoupling 장전시는 화학반응에 의한 팽창가스압력으로 확인되었다.
- 3) Decoupling 지수가 증가할수록 발파공벽에 발생하는 최대압력의 크기 및 시간에 따른 하중증가율은 감소하고 지속시간이 크게 나타나 이론적으로 산정한 발파하중과 발파모형시험에 의해 파악한 발파하중이 유사하게 나타났다..
- 4) 동일한 화약을 사용하고 Decoupling 지수만을 달리하여 실시한 발파모형시험결과, Decoupling 지수 3.75인 경우에는 발파공벽주위에서 준 정적인 하중하에서의 균열양상이 Decoupling 지수 1.25인 경우에는 동적인 하중하에서의 균열양상이 확인되었다
- 5) 매질의 파쇄정도에 있어서는 Decoupling 지수를 1.25로 한 시편은 발파하중이 상대적으로 크고 응력파의 전파 및 반사 특성으로 인해 자유면에서 발파공까지의 거리가 짧은 부분이 파쇄되어 분리되었으며 Decoupling 지수를 3.75로 한 시편은 파쇄되지 않고 균열만 발생하였다.

감사의 글

본 논문은 (주) 삼보기술단과의 협동연구에 의해 수행중인 “ 터널발파로 인한 여굴 및 암반손상 최소화 방안 연구” 의 일부이며 이에 감사한다.

참고 문헌

1. Dick, R. D., Fourney, W. L., Wang, X. J. and YoungIII, C.(1993), "Results from Instrumented Small Scale Model Tests" Forth Int. Symp. on Rock Frag. by Blasting, pp 47-54, Vienna, Austria.
2. Kennedy, D. L. and Jones, D. A.(1993), "Modelling Shock Initiation and Detonation in the Nonideal Explosive PBXW-115" Tenth Int. Symposium on Detonation, Boston, MA.
3. Liu, Liqing 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.
4. Persson, P. A., Holmberg, R. and Lee, J. M.(1994), Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC Press.
5. Udy, L. L. and Lownds, C. M.(1990), "The Partition of Energy in Blasting with Non-ideal Explosives", Third Int. Symp. on Rock Frag. by Blasting, pp 37-43, Brisbane, Australia.
6. Whittaker, B. N., Singh, R. N. and Sun, Gexin (1992), Rock Fracture Mechanics, Elsevier Science.
7. Zhang, Qi(1990), "Study on Problem of Attenuation of Explosion Stress in Rocks by Column Charge", Quarterly of the Changsha Institute of Mining Research, Vol. 3, Hunan, China.