

PFC^{3D} 상에서의 홉킨슨 효과를 이용한 응력파의 전파모델링

최병희¹⁾, 류창하²⁾

PFC^{3D} Modeling of Stress Wave Propagation Using The Hopkinson's Effect

Byung-Hee Choi and Chang-Ha Ryu

Abstract : An explosion modeling technique was developed by using the spherical discrete element code, PFC^{3D}, which can be used to model the dynamic stress wave propagation phenomenon. The modeling technique is simply based on an idea that the explosion pressure should be applied to a PFC^{3D} particle assembly not in the form of an external force (body force), but in the form of a contact force (surface force). The stress wave propagation modeling was conducted by simulating the experimental approach based on the Hopkinson's effect combined with the spalling phenomenon that had previously been developed to determine the dynamic tensile strength of Inada granite. As a result, the stress wave velocity obtained by the proposed modeling technique was 4167 m/s, which is merely 3% lower than the actual wave velocity of 4300 m/s for an Inada granite.

Key words : explosion modeling, PFC, stress wave, Hopkinson's effect

초 록 : 본 연구에서는 PFC^{3D} 상에서 공내입자들의 반경을 팽창/수축시키는 기법을 통해 공벽입자들에 접촉력의 형태로 폭발압력을 부여하는 폭원모델링을 기법을 소개하고, 제안된 기법을 이용하여 홉킨슨 효과 효과와 스폐링 현상을 응용하여 암석코어에 대한 응력파의 전파 및 반사과정을 기존의 외력을 적용함으로써 서로 비교하여 보았다. 암석코어는 직경 20 mm, 길이 200 mm의 입자결합체로서 접촉결합을 이용하여 구성하였으며, 시료의 선단에 주기 0.050 ms(50 μs)의 펄스형태의 폭발하중을 기존의 방법과 제안된 폭원모델링 기법을 이용하여 각기 입사시켰다. 해석결과 두 기법은 서로 유사한 결과를 보였으며, 입사압축파는 0.060 ms(60 μs) 이후 시료의 후단에서 반사되어 반사인장파의 형태로 되돌아오면서 시료의 축방향과 직각방향으로 인장균열을 발생시켰다. 또한 시료 중을 전파하는 응력파의 속도는 4,167 m/s로 계산되어 물리시료에 대한 측정치 4,300 m/s와 3% 정도의 근소한 오차를 보였다.

핵심어 : 폭원모델링, PFC, 응력파, 홉킨슨 효과

1. 서 언

암석시료의 동적인장강도를 측정하기 위하여 홉킨슨효과(Hopkinson's effect)와 스폐링현상(spalling phenomenon)을 조합하여 시험하는 기법이 제안된 바 있다[Jung, 2001]. 본 연구에서는 Cho[2003]가 Inada 화강암을 사용하여 실험하고 유한요소법을 이용하여 해석한 동적인장파괴 해석과정의 일부분을 (i) Test I: 외력을 적용하는 기존의 방법과 (ii)

Test II: 접촉력을 적용하는 새로운 폭원모델링 기법을 통하여 각각 모사하여 봄으로써 암석 중에서의 응력파의 전파과정과 균열발생의 측면에서 서로 비교될 수 있도록 하였다. 해석에 사용된 프로그램은 PFC^{3D}로서, 이 프로그램은 Cundall & Strack[1979]이 개별요소법(DEM)을 바탕으로 구상 입자들(spherical particles)의 운동과 상호작용을 모사한데서 비롯된 것으로 현재에는 상용패키지의 형태로 지속적으로 개선, 발표되고 있다.

2. 기존의 연구결과

발파모델링 분야의 많은 연구자들 가운데

1) 한국지질자원연구원 선임연구원

2) 한국지질자원연구원 책임연구원

접수일 : 2005년 9월 23일

Fourney[1993]는 화약발파에 의한 암반의 파괴메커니즘과 관련하여 응력파와 가스압이 중요한 역할을 하는 것으로 보고하였으며, Preece[1994]는 충격파에 의한 암석의 파쇄도를 예측하고 가스팽창에 의한 암반의 이동에 관한 연구를 수행하기도 하였다. Brinkman[1987, 1990]은 발파공 벽면에 금속의 라이너(liner)를 붙인 실험을 통해 발파공 인접부에서의 균열발생 및 파괴는 주로 충격파의 에너지에 의해 발생하며, 이후 가스체가 팽창함으로써 균열을 더욱 진전시키고 암반을 파쇄하면서 저항선이 전체적으로 이동하는 것으로 보고하였다.

Sarracino[1994]는 폭약이 폭발할 때 발파공 인접부의 암반은 강한 압축력을 받아 유체의 거동을 보이면서 극도로 파쇄되며, 이 영역을 넘어서면 소성압축대가 형성되고, 두 영역을 지나면 인장균열대가 형성되는 것으로 보았다. 하지만 이 인장균열대는 가스체의 침투가 없으면 파괴정도가 미미한 것으로 생각하였다. 위에 언급한 Preece[1994]는 2차원 개별요소법을 사용하여 암반의 이동과 가스체의 흐름을 모사하는 수치모델을 개발하였지만 이 모델에서는 균열이 이미 발생된 것으로 간주하고 충격파에 의한 암반파쇄는 모사하지 않았다. 이와 유사한 연구로서 Munjiza[1994]는 변형률연화(strain softening) 현상에 기초하여 유한요소법을 이용한 파괴모델(fracture model)을 개발하였다. 발파공으로부터 방사상으로 퍼져나가는 인장균열을 모사하기 위해 Schatz[1987]는 폭발하중을 화약과 폭약으로 구분하여 부여하고 균열이 전개되어 나가는 양상을 모사하였으나 충격파에 의한 파쇄는 모사하지 않았다.

또한, Potyondy[1996]는 PFC^{3D}를 이용하여 처음에는 충격압만을 부여하고, 이후 충격압의 가중에 따라 발생된 균열들의 기하학적 배열이 일정조건을 만족하면 파이프라인을 따라 가스압이 부가되는 방식으로 폭원을 모델링한 바 있다.

3. 폭원모델링 기법의 개발 및 검증

본 폭원모델링 기법에서는 폭약의 폭발기구에 따라 공벽에 작용하는 폭발압력은 기존의 연구결과를 채택하여 적용하며, 산출된 폭발압력을 대상 모델에 가중하는 방법만을 PFC^{3D}에서 제공하는 FISH 언어를 사용하여 구현하는 방식을 취하였다.

3.1 기존의 가중방법

연속체역학을 기반으로 하는 유한요소법과 같은 코드에서는 일반적으로 폭원에서 발생된 폭발압력을 그대로 공벽면에 가하면 되지만 개별요소법을 기반으로 하는 PFC^{3D}에서는 콘크리트와 같은 고체재료가 개별적인 입자들의 결합체(particle assembly)로 구성되므로 압력을 그대로 적용할 수는 없고 대신 압력에 상응하는 힘을 각 입자들의 질점에 부여하는 방식이 사용되고 있다. 예를 들면, 발파로 인한 폭발압력을 부여할 때에는 결정 또는 산정된 폭발압력을 공벽면을 구성하고 있는 입자들의 단면적의 크기에 따라 배분한 뒤, 각 입자에 배분된 압력에 그 입자의 단면적을 곱하여 구한 힘을 각 입자의 질점에 외력(external force)으로서 부여한다.

하지만 이 방법을 그대로 적용할 경우에는 재료에 따라서는 가중시간과 재료의 변형과의 관계로부터 한 가지 문제가 발생할 수 있다. 즉, PFC^{3D}의 입자들은 자유로운 운동이 가능하며, 또한 강체(rigid body)로 정의되어 변형은 가능하나 파괴될 수는 없다. 따라서 공벽입자들에 지속적으로 폭발충격과 같이 큰 힘을 가하면 힘을 받은 입자는 Fig. 1(a)에서와 같이 인접입자들 사이의 결합을 파괴하면서 그 사이로 진입하게 된다. 이런 경우에는 가압을 중단할 시점이 중요한 요소가 되며, 발파현상에서와 같이 입자들 사이의 결합이 끊어진 상태에서도 지속적인 가압이 필요한 경우에는 비현실적인 결과를 초래할 수도 있다. 특히 발파공의 경계를 이루는 공벽입자들이 Fig. 1(b)에서와 같이 배치된 상태에서는 모델링 과정에서 폭발압력을 가해줄 공벽입자를 추적하는 일이 까다로운 문제가 될 수도 있다.

3.2 새로운 가중방법

일반적인 수치해석 코드에서는 압력과 힘이 서로 동등하나 PFC^{3D}에서는 입자의 운동이 완전히 허용되므로 어떤 입자에 가해진 힘이 인접입자들에 큰 변위를 일으킬 수 있는 조건이라면 압력과 힘이 서로 동등하게 변환되지 않을 수도 있다. 또한 PFC^{3D}의 사용자 인터페이스에서는 직접적으로 압력을 부여할 수 없는 대신 외력을 부여할 수 있도록 되어 있는데, 이 때문에 압력을 가할 필요성이 있을 때 보통 압력 대신 Newton의 힘으로 변환하여 가하게 된다. Fig. 2는 Newton의 힘과

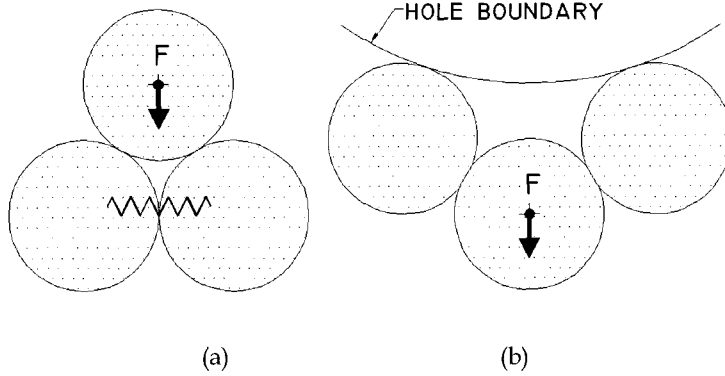


Fig. 1. Tensile failure and difficulties in applying forces to boundary particles.

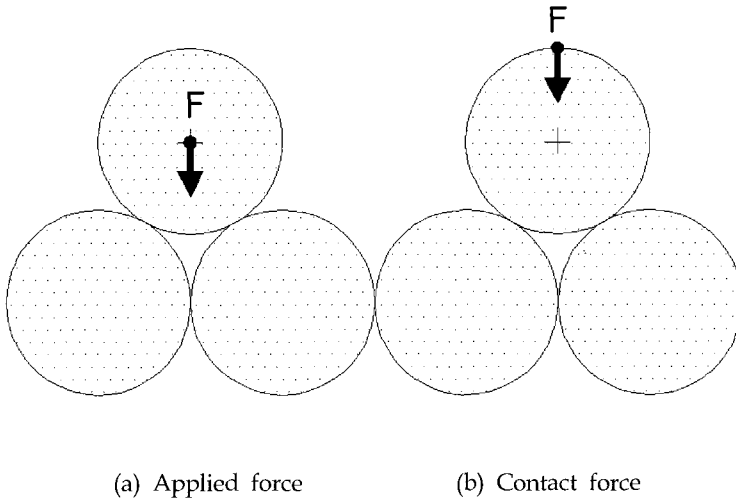


Fig. 2. Applied (external) force and contact force.

Hooke의 힘이 입자들에 작용되는 방식을 비교한 그림으로 Newton의 힘은 입자의 질점에 작용하는 외력(물체력)으로서 힘을 받은 입자의 운동을 일으키며, Hooke의 힘은 입자의 표면에 작용하는 접촉력(표면력)으로서 그 작용점에서의 변위를 발생시킨다.

이 개념은 경계입자의 추적을 쉽게 해 주므로 본 연구에서는 발파로 발생되는 폭발압력을 공벽을 구성하는 입자표면에서의 접촉력의 형태로 부여하는 폭원모델링 기법을 제안하였다. 즉, Fig. 3(a)에서 보듯이 일반적으로 발파현상을 모델링 할 때에는 천공된 발파공을 모사하기 위해 먼저 발파공 내부에 해당하는 입자요소들을 제거하는 것이 통례이

다. 하지만 본 모델에서는 Fig. 3(b)에서와 같이 공벽입자들에 접촉력을 부여하기 위하여 발파공 내부에 위치하는 공내입자들을 제거하지 않고 오히려 이들을 일종의 제어기(controller)로 활용한다. 즉, 공벽입자에 필요한 만큼의 접촉력을 발생시키기 위하여 공내입자들의 반경을 제어기로 이용하여 그 크기를 팽창 또는 수축시키는 기법을 사용한다. 따라서 폭발압력으로부터 공벽에 작용시킬 힘이 산출되면 이 힘을 공벽입자에 가해주기 위하여 다음 식 (1)과 (2)에서와 같이 발파공의 반경증분 Δd 와 공내입자의 반경팽창을 Δr 을 계산 및 적용하고, 측정된 접촉력을 토대로 보정하는 과정을 매 계산단계(time step)마다 반복하게 된다.

$$\Sigma f = \Sigma(k\Delta d) = (\Sigma k)\Delta d \quad (1)$$

$$\Delta r = \frac{\Delta d}{\sqrt{3}ofn_{cp}} \quad (2)$$

단, 위의 식 (1)과 (2)에서 Σf 는 주어진 시각에서 공벽전체에 작용하는 힘으로서 폭발압력의 시간이력으로부터 결정되며, Σk 는 공내입자들과 공벽입자들 사이의 접촉점들에서의 수직강성들의 합이며, n_{cp} 는 공내입자들이 지닌 총 접촉수이다.

4. 홉킨슨 효과를 이용한 응력파의 전파과정 모델링

4.1 해석모델의 구성 및 입력물성의 결정

암석시료의 동적인장강도를 측정하기 위하여 홉킨슨효과(Hopkinson's effect)와 스폴링현상을 조합하여 시험하는 기법이 제안된 바 있다[Jung,

2001]. 본 연구에서는 Cho[2003]가 Inada 화강암을 사용하여 실험하고 유한요소법을 이용하여 해석한 동적인장파괴 해석과정의 일부분을 다음과 같은 두 가지의 방법으로 구분하여 각각 모사하여 봄으로써 암석 중에서의 응력파의 전파과정과 균열발생의 측면에서 서로 비교될 수 있도록 하였다.

- (i) Test I: 외력을 적용하는 기존의 방법
- (ii) Test II: 접촉력을 적용하는 새로운 폭원모델링 기법

Hopkinson 효과와 암석시료에서의 응력파의 전파 및 반사과정을 모사하기 위하여 구성된 PFC^{3D} 입자결합모델을 Fig. 4에 보였다. 해석모델은 정육면체의 약실(chamber)과 암석코어로 구성되며, 사용입자들의 개수는 총 35727개, 직경은 평균 3 mm이다. 약실은 60×60×60 mm의 크기에 접촉결합으로 구성되며, 코어시료는 직경 20 mm, 길이 200 mm의 크기에 역시 접촉결합으로 구성된다. 약실

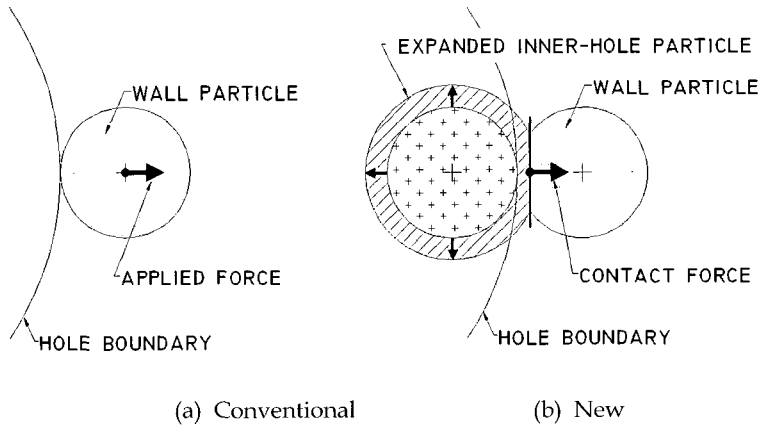


Fig. 3. Pressure loading schemes.

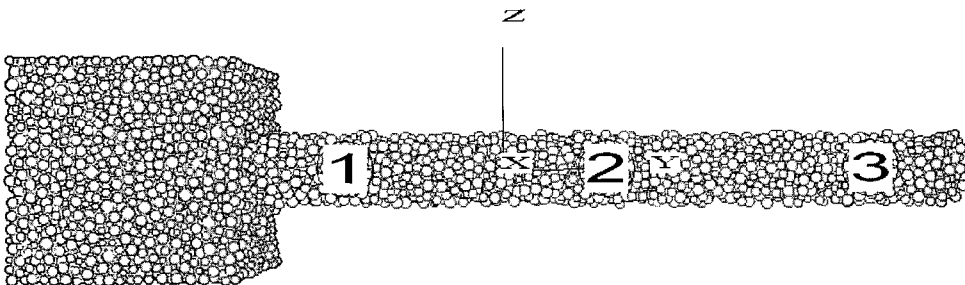


Fig. 4. Particle-bonded model for testing Hopkinson's effect.

내에는 입사파를 생성하기 위한 폭약이 위치하게 되며, 장약공은 직경 20 mm, 길이 30 mm의 크기로서 코어시료의 축방향을 길이방향으로 한다.

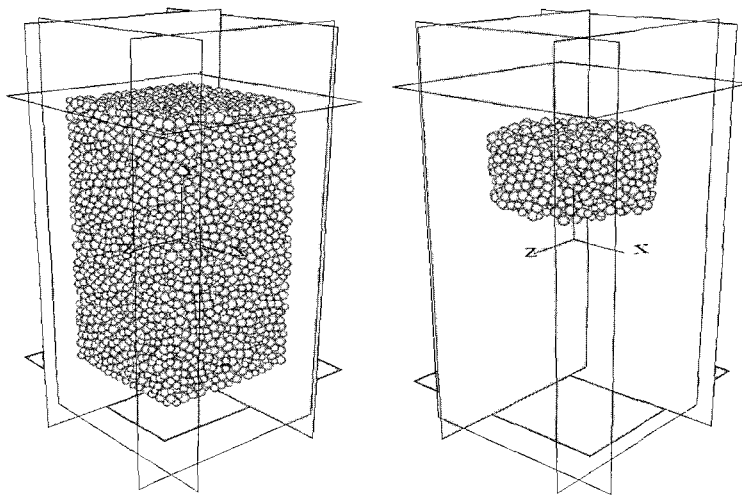
이 모델에서 폭약과 암석시료 사이에 위치하게 되는 약실의 벽면은 폭약의 폭발로부터 암석시료가 파괴되지 않도록 하기 위하여 15 mm의 두께를 부여하였다. 또한 암석시료와 약실 사이의 모든 접촉들에서는 입자간의 결합강도를 모두 제거함으로써 사실상 시료와 약실이 서로 분리된 상태가 되도록 하였다. 또한 그림의 ①, ②, ③은 PFC^{3D}의 측정구(measurement sphere)로서 시료내부에서 발생하는 응력과 변형률속도를 각각의 위치에서 측정하며, 변형률은 각 시간단계에서 측정된 변형률속도로부터 계산을 통하여 구한다. 각 측정구들은 암석시료의 중앙과 좌우편에 위치시켰으며, 측정구 사이의 거리는 75 mm이다. z축 방향에서 약실의 상부 및 하부의 외벽은 고정하였으며, 약실을 구성하는 입자들에는 감쇠상수로서 기본값($\alpha = 0.7$)을 부여하였고, 암석시료의 경우에는 흠킨슨 시험조건을 고려하여 감쇠상수를 영(zero)으로 설정하였다.

Table 1에서와 같이 약실에는 폭발에 견딜 수 있도록 금속재료에 상당하는 물성을 부여하였으며,

암석시료의 물성은 Inada 화강암의 물성에 따라 수치시험을 통하여 결정하였다. Fig. 5의 (a) 및 (b)는 각각 화강암의 수치시험에 사용한 일축압축시험편 및 간접인장시험편의 모습이다. Fig. 6의 (a) 및 (b)는 각각 압축시험 및 인장시험에서 나타난 응력-변형률 선도들이다. Inada 화강암의 물성과 수치시험에서 나타난 거시적인 응답특성들은 Table 2에 보였다.

Table 1. Micro-properties of the chamber

ρ	7850 kg/m ³
E_c	220e9 Pa
k_n/k_s	1.0
μ	0.5
$\sigma_c(\text{mean})$	1500e6 Pa
$\tau_c(\text{mean})$	1500e6 Pa



(a) Compression

(b) Tension

Fig. 5. Numerical test models for Inada granite.

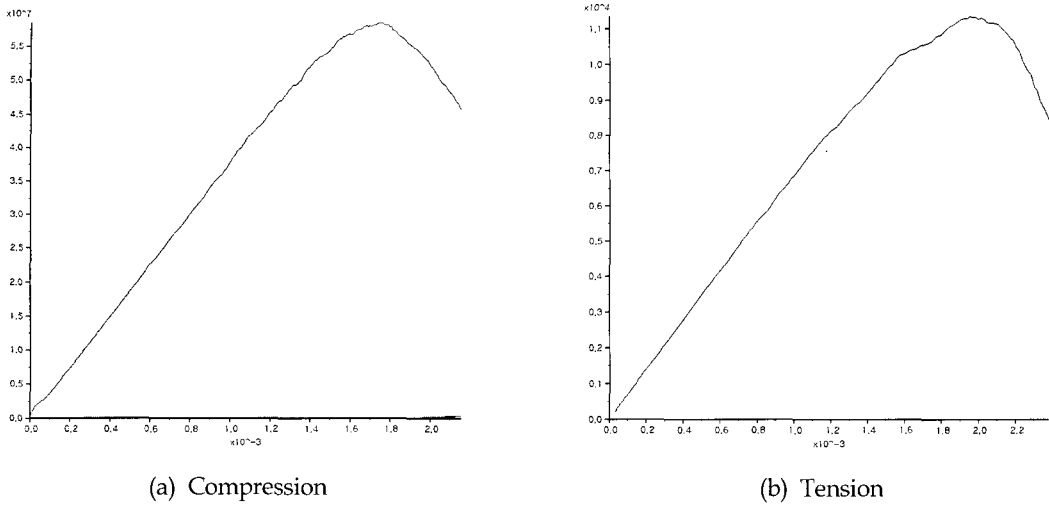


Fig. 6. Stress-strain diagrams in calibration processes.

Table 2. Physical properties of Inada granite and numerical test results

Physical properties	Macro-responses
Density = 2500 kg/m ³	$\sigma_y = 58.4$ MPa
Young's modulus = 40 GPa	$E = 37.4$ GPa
Poisson's ratio = 0.25	$\nu = 0.19$
Compressive strength = 60 MPa	$\sigma_t = 15.2$ MPa
Tensile strength = 4.0 MPa	$\sigma_{ci} = 42.7$ MPa
P-wave velocity = 4300 m/s	

4.2 폭원모델링 기법의 적용

PFC^{3D}를 이용한 기존의 폭원모델링에서는 일반적으로 폭발압력을 공벽입자의 단면적의 크기를 고려하여 상응하는 힘으로 변환한 다음 각 공벽입자들에 외력의 형태로 부여하는 방법이 사용되고 있다. Fig. 7은 앞의 Fig. 4에 보인 해석모델의 단면모습으로서 통상적인 방법에서와 같이 발파공 내부에 위치하는 입자요소들이 제거된 상태이다. 폭발력은 공벽입자들에 대한 외력의 형태로써 입자의 위치에 따라 발파공의 상하부 바닥과 측벽에 수직인 방향으로만 작용시키며, 모서리 입자들에 대해 별도의 작용방향은 고려하지 않았다.

한편, 본 연구에서 제안하고 있는 폭원모델링 기

법의 경우 폭발압력을 힘으로 변환하는 과정은 기존의 방법과 같으나 산출된 힘을 공벽입자에 부여할 때에는 외력이 아닌 접촉력의 형태로 부여하는 방법이 사용된다. Fig. 8은 앞의 Fig. 4에 보인 해석모델을 이와 같은 폭원모델링 기법에 따라 구성하였을 때 나타나는 단면모습을 보인 것으로 발파공 내부에 위치하는 입자요소들을 제거하지 않고 오히려 이들 공내입자들의 반경팽창을 통하여 공벽입자들에 접촉력을 부여하게 된다.

Fig. 9는 해석과정에서 사용한 폭발압력의 시간 이력을 도시한 그래프로서 폭발압력의 상승시간은 0.015 ms (15 μ s), 작용시간은 0.050 ms (50 μ s)로서 두 시험에서 서로 동일한 파형을 사용하였다.

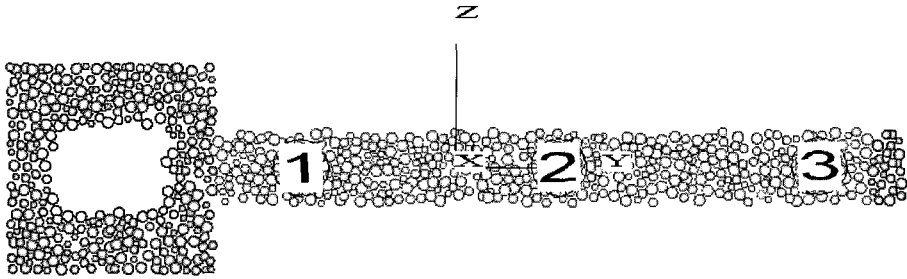


Fig. 7. Numerical model for Test I.

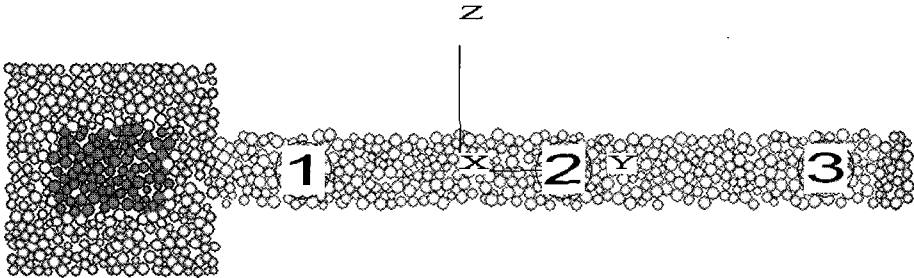


Fig. 8. Numerical model for Test II.

4.3 해석결과 및 검토

해석과정에서는 입사응력파에 의하여 암석시료가 파괴되지 않도록 폭약의 폭속을 (i) Test I의 경우에는 1800 m/s, (ii) Test II의 경우에는 2550 m/s로 조절함으로써 측정구 ①에서 측정되는 입사응력파의 크기가 시료의 인장강도와 압축강도 사이에 유지되도록 하였다. 이는 두 시험에서 암석코어를 향하고 있는 발파공 바닥부에 작용하는 힘들이 시험방법에 따라 서로 다르므로 측정구 ①에서 측정되는 입사파의 응력수준이 일치하도록 조절하였기 때문이다. 한편, 사용폭약의 밀도는 두 시험에서 모두 1.0 g/cc를 적용하였다.

Fig. 10은 Test I에서 공벽에 작용하는 압력을 도시한 그림으로서 최대압력은 205 MPa이다. 폭발압력의 상승시간은 0.015 ms (15 μ s), 작용시간은 0.050 ms (50 μ s)이다. Fig. 11(a)는 폭원모델링에서 언급한 공벽에서의 입력하중과 유도된 접촉력의 크기를 도시한 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 공벽에서 측정된 접촉력은 입력 하중곡선

을 따라 진동하는 모습을 보이고 있으며, 하중의 입력이 종결되면 즉시 가압이 중단된다. 그림에서는 0.05 ms (50 μ s) 이후에도 접촉력이 일정한 크기로 유지되는 것처럼 표시되어 있으나 실제로는 가압루틴의 가동이 중단됨으로써 더 이상 어떠한 힘도 부여되지 않는다. Fig. 11(b)는 Test II의 경우 나타나는 공내입자들의 반경팽창율의 변화를 보인 그래프이다. 반경팽창율은 공내입자와 공벽입자들의 수직강성에 따라 그 크기가 달라지지만 그래프에서 볼 수 있듯이 약 200 MPa 정도의 발파압력을 구현하기 위하여 필요한 반경팽창율은 전단계에서의 입자반경의 ± 1.0002 배 이내에 불과하다.

응력파의 전파양상

Fig. 12는 Test I에서 주어진 폭발하중을 적용하였을 때 기폭 후 시간의 흐름에 따라 나타나는 속도벡터의 변화양상을 보인 것으로 발생한 압축응력파가 암석시료를 따라 오른쪽으로 전파되고 시료의 끝에서 반사된 인장응력파가 왼쪽으로 되돌아오는

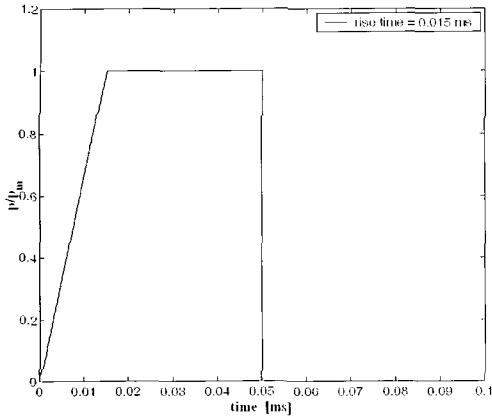


Fig. 9. Incident wave form.

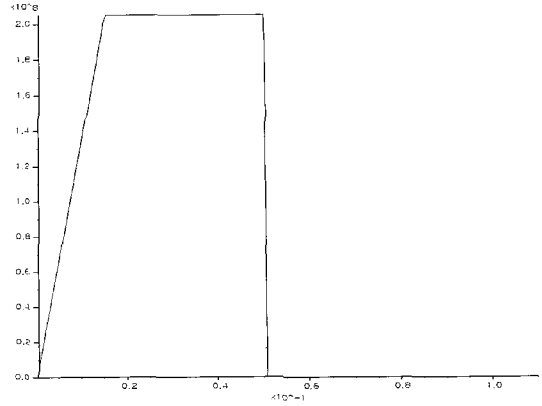
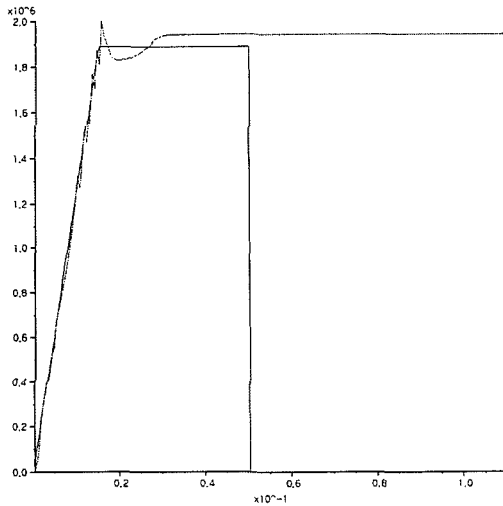
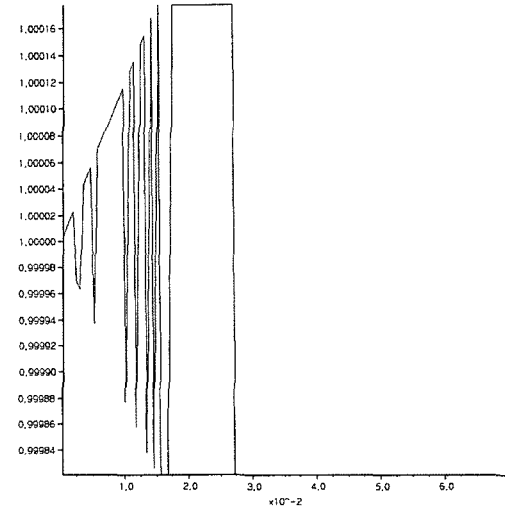


Fig. 10. Wall pressure in Test I.



(a) Input and induced forces



(b) Radius multiplier

Fig. 11. Input vs induced contact forces and variation of radius multiplier in Test II.

모습을 볼 수 있다. 그림에서 약실에 표시된 크기가 일정한 화살표는 공벽입자들에 가해지는 폭발하중에 상응하는 외력들을 단위벡터로 표시한 것이다. 마찬가지로 Fig. 13은 Test II의 경우에 나타나는 속도벡터장을 표시한 것으로서 약실의 화살표는 공내 입자의 반경변화에 따라 공벽입자들이 보이는 변위벡터를 단위벡터로 표시한 것이다. 두 경우 모두 기폭 후 약 0.06 ms (60 μ s)가 지나면 압축응력파의 선단이 암석시료의 끝에 도달하며, 이후 반사인장파가 시료 중으로 되돌아오게 된다.

한편, Fig. 10의 폭발압력의 시간이력에서 볼 수 있듯이 기폭이후 경과시간이 입사파의 파장에 해당하는 0.05 ms (50 μ s)를 지나면 탄성변형했던 약실의 복원력이 폭발압력을 초과하면서 공벽입자들은 주로 이 복원력에 따라 운동하게 된다. 따라서 Fig. 12에서는 공벽에 가해지는 외력을 단위벡터로 표시하고 있으므로 0.05 ms 이후의 화살표는 사실상 무의미한 것이나 Fig. 13의 경우에는 공벽입자들이 보이는 변위벡터를 단위벡터의 형태로 그대로 도시한 것이다.

아울러 Test I 및 II의 해석모델에서 측정구 사이의 거리(75 mm)와 응력파의 최고치가 각 측정구에 도달하는 시차(0.018 ms = 18 μ s)로부터 대상 암석 중에서의 응력파의 속도는 약 4167 m/s로

계산된다. 이 수치는 Inada 화강석에서 실측된 P 파속도 4300 m/s와 거의 유사한 것으로 오차는 약 3% 정도로 근소하게 나타났다.

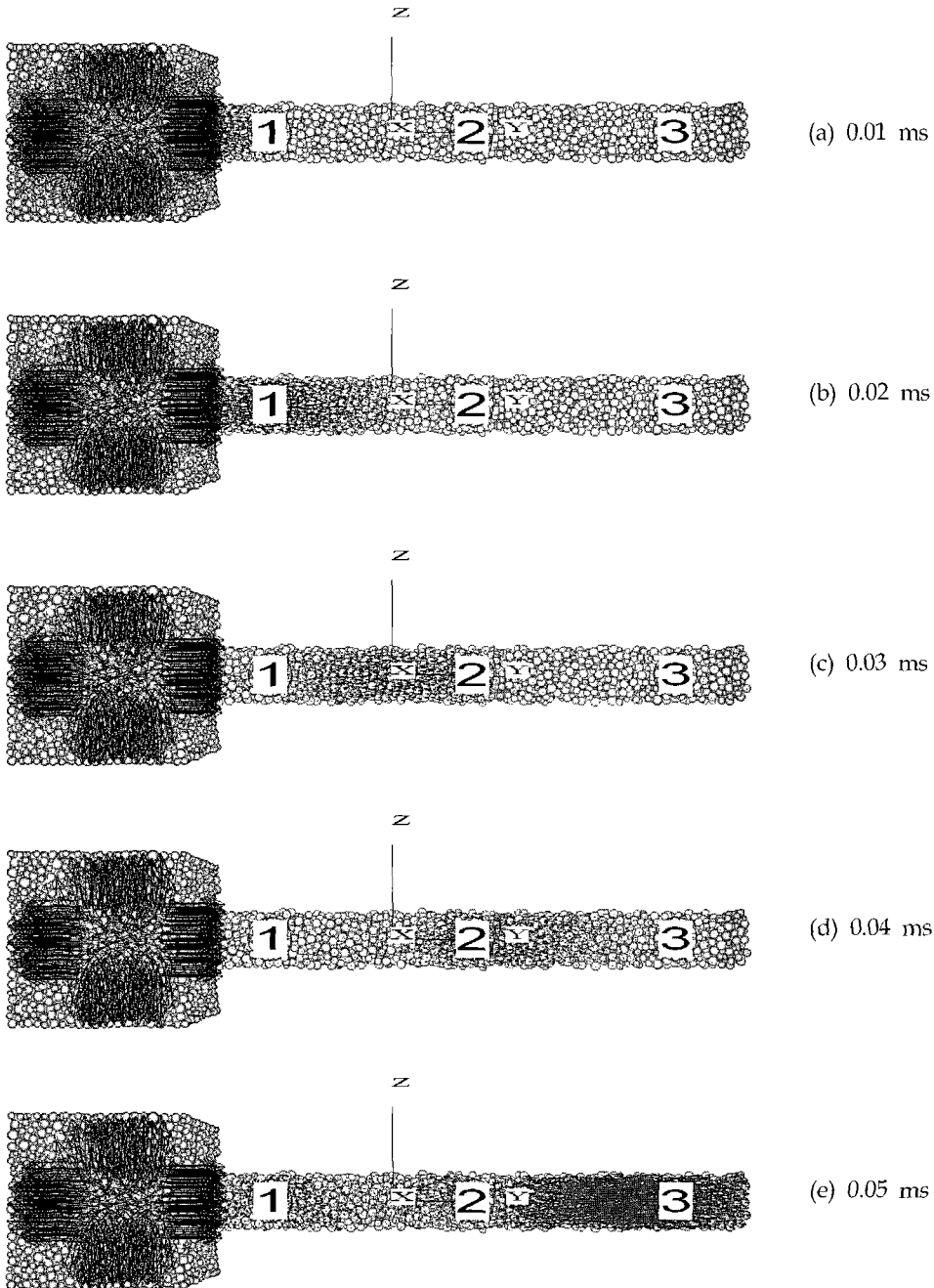


Fig. 12. Propagation of stress wave in Test I.

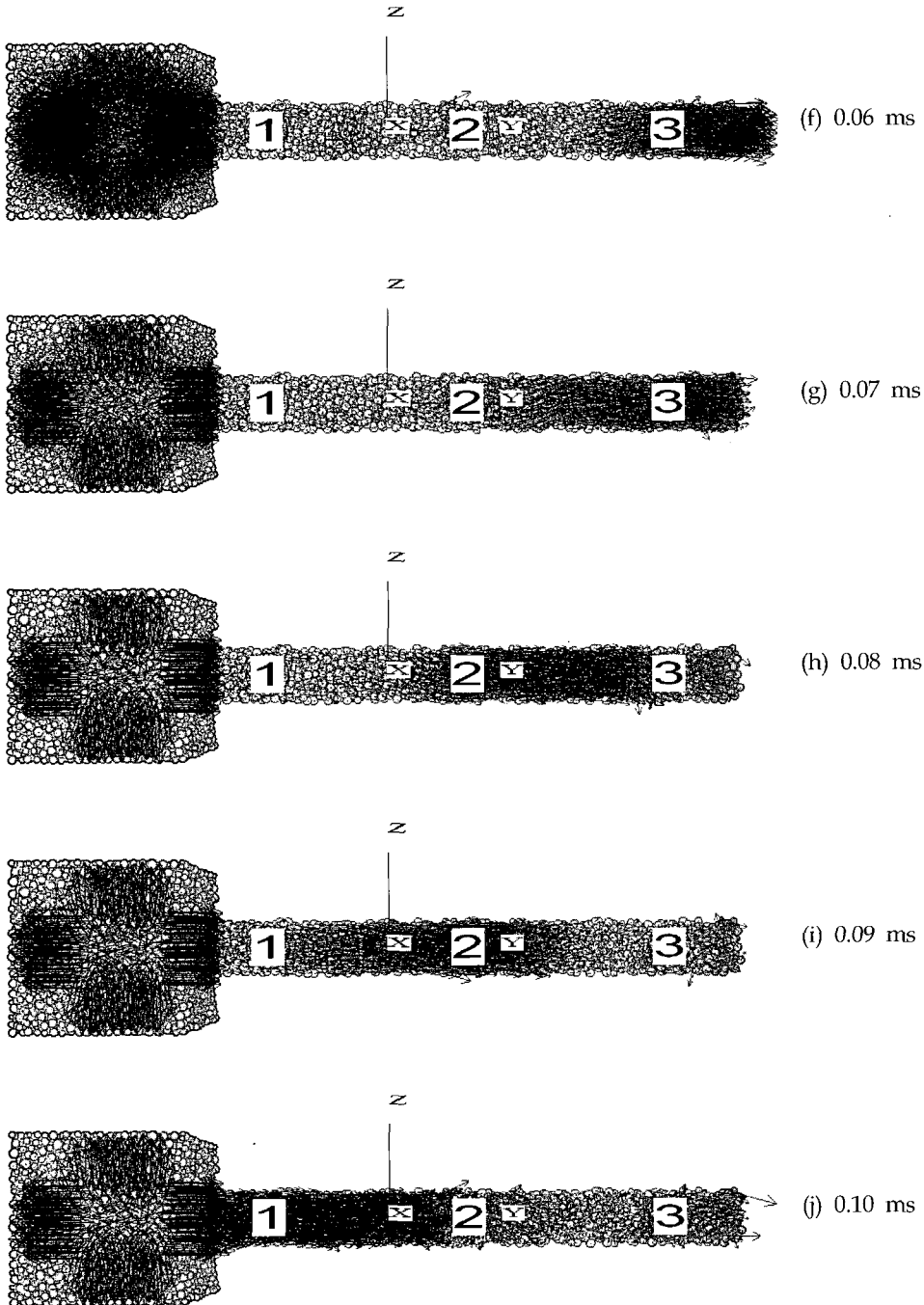


Fig. 12. (continued).

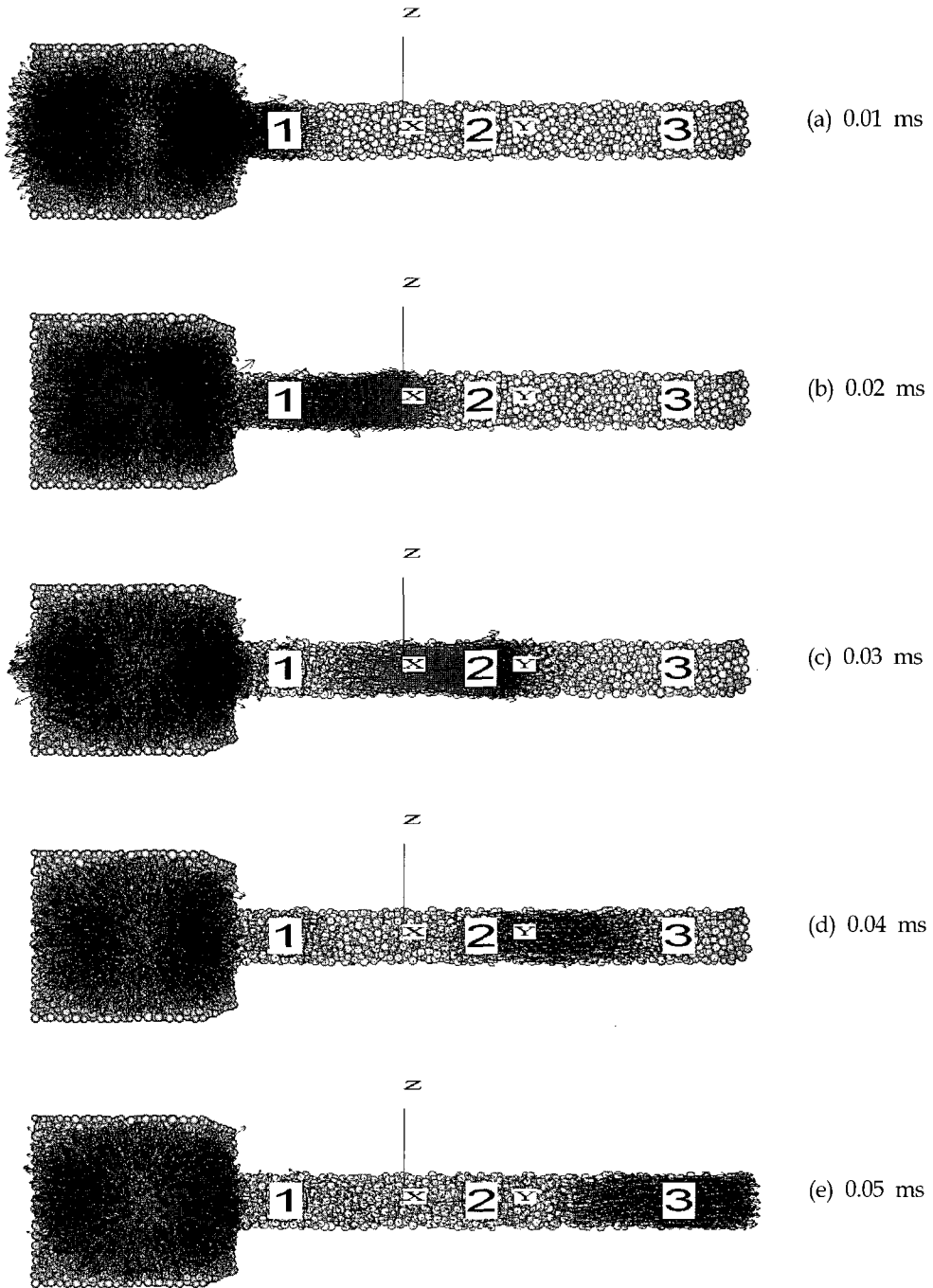


Fig. 13. Propagation of stress wave in Test II.

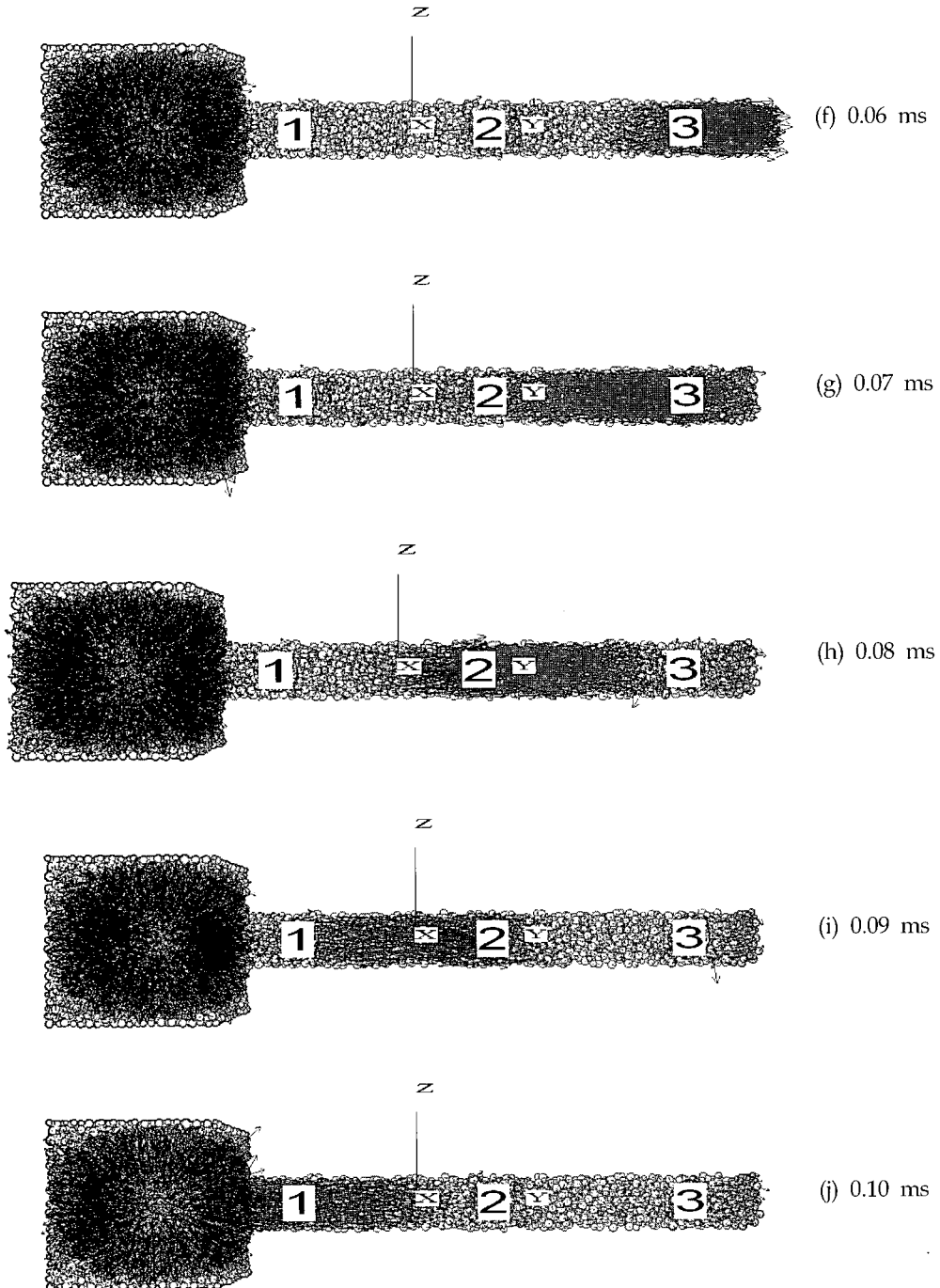


Fig. 13. (continued).

균열의 발생양상

Fig. 14는 Test I 및 II에서 발생한 균열의 수를 시간에 따라 도시한 그래프이며, 압축응력파가 시료의 후단에서 반사되는 시점인 0.06 ms (60 μ s) 이후에 인장균열들이 급증하는 양상을 보여준다. Test I의 경우 발생한 균열의 수는 총 33개이며, 이들은 모두 인장균열이다. Test II의 경우 발생균열의 수는 총 33개이며, 그 가운데 인장균열은 32개, 전단균열은 1개가 발생하였다.

Fig. 15의 (a) 및 (b)는 각각 Test I 및 II의 각 해석과정에서 암석코어 중에 나타나는 균열의 발생양상을 보인 그림이다. 그림에서 짙은 다각형으로 표시된 것은 입자간의 결합이 파괴됨으로써 발생한 인장균열 또는 전단균열을 표시한다. Test I의 경우 발생한 균열은 모두 인장균열이며, Test II의 경우에는 압축파의 전파과정에서 발생한 한 개의 전단균열을 제외하면 나머지는 모두 인장균열이다. 아울러 다각형의 면은 입자간의 접촉평면의 방향과 일치하므로 이로부터 균열의 발생방향도 확인할 수 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 기폭이후 0.07 ms (70 μ s)가 지나면 시료의 끝부분에서 반사

된 인장응력파가 폭원 쪽으로 되돌아가면서 축 방향에 수직인 방향으로 인장균열이 발생되기 시작하여 점차 폭원 쪽으로 진행되는 모습이 뚜렷이 나타나고 있다. 또한 두 경우 모두 응력파의 전파 과정에서 나타나는 거의 대부분의 균열들은 반사 인장파에 의해 발생하는 인장균열임을 알 수 있다.

응력의 변화양상

Fig. 16은 폭약의 기폭으로 발생한 응력파가 암석시료 중으로 전파할 때 각 측정구에서 측정된 응력의 크기변화를 도시한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 폭발파가 시료의 선단으로 입사할 때에는 각 측정구에서 압축응력파의 형태로 측정되고, 시료의 후단에서 반사되어 되돌아올 때에는 인장응력파로 측정되고 있다.

또한 암석시료로 입사되는 압축응력의 크기는 주어진 조건하에서 측정구 ①, ②, ③의 순으로 감소함을 알 수 있다. 측정구 ①에서의 최대압축응력은 Test I의 경우 21.5 MPa, Test II의 경우 21.4 MPa로 측정되었으며, 다른 측정구별로도 모두 유사한 크기와 형태로 나타나고 있다.

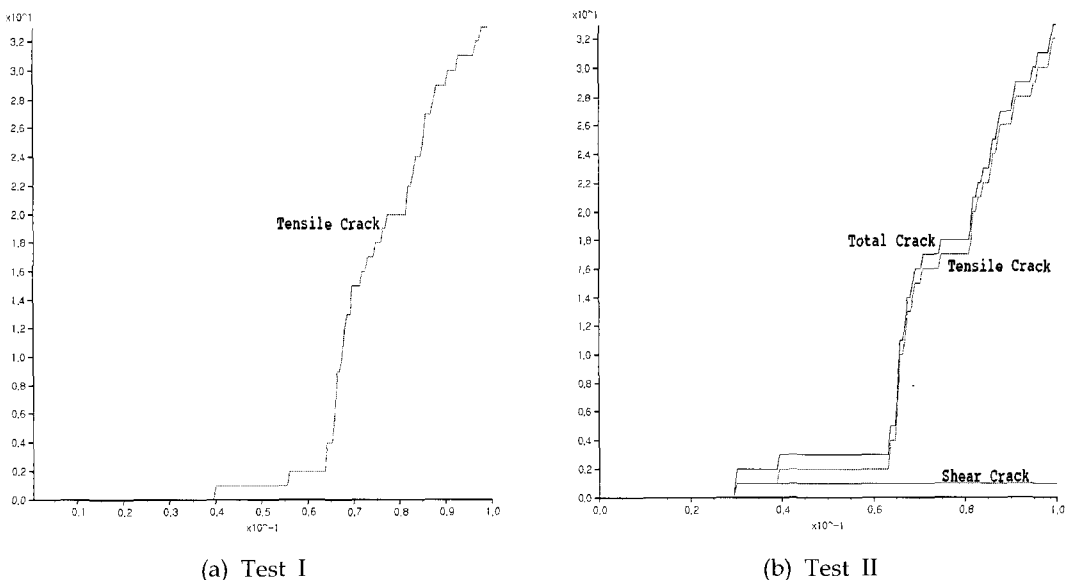


Fig. 14. Number of cracks vs Time[ms].

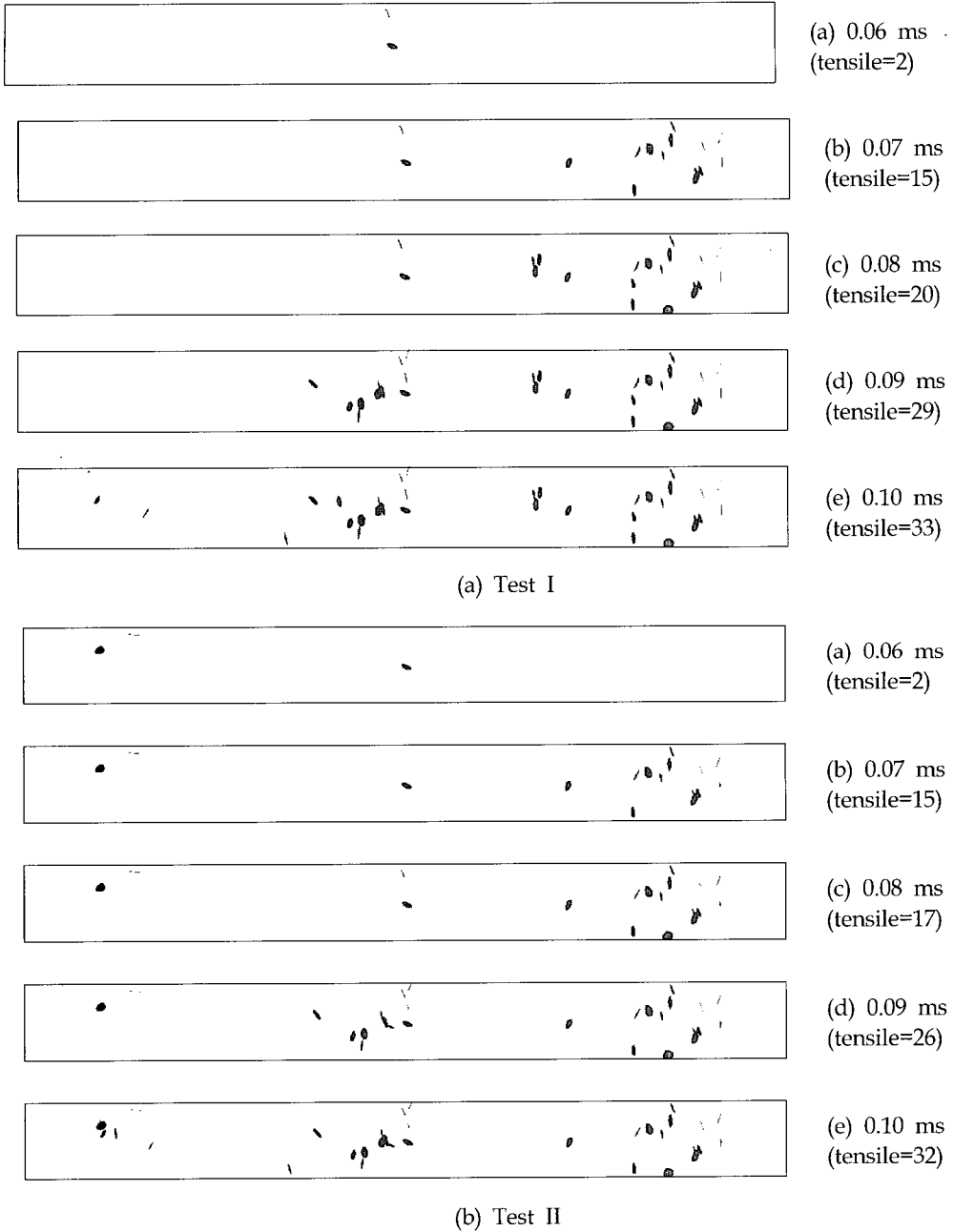
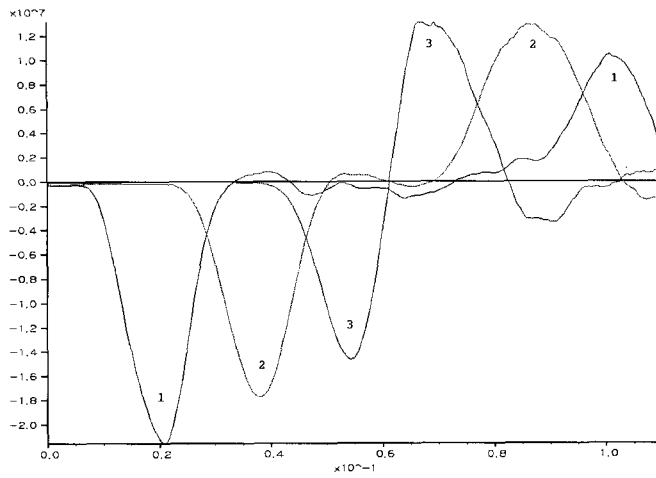
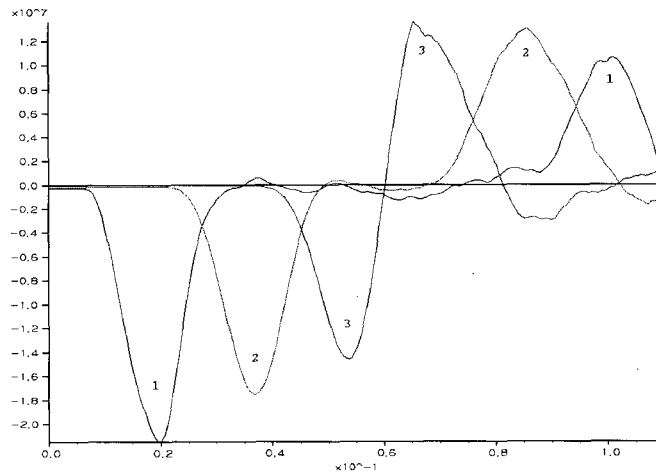


Fig. 15. Dynamical crack formation in rock specimen.



(a) Stress[Pa]-Time[ms] curves in Test I



(b) Stress[Pa]-Time[ms] curves in Test II

(1: stress at measurement sphere ①, 2: ②, 3: ③)

Fig. 16. Axial stress variations at measurement spheres.

5. 결 언

본 연구에서는 PFC^{3D} 상에서 흡킨슨 효과를 이용하여 폭약의 폭발로 인한 암석시료 중에서의 응력파의 전파 및 파괴 과정을 모사하였다. 연구에서 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 폭원모델링 과정에서는 기존의 이론적, 실험적인 폭발하중의 함수로부터 계산된 폭발압력을 발파공의 벽면을 구성하는 입자요소들에 접촉력의 형태로 부여하는 기법을 사용하였다.

2) 제안된 폭원모델링 기법을 이용하여 폭약의 폭발로 인한 암석 중에서의 응력파의 전파 및 반사과정을 기존의 외력을 적용하는 방법과 비교하여 모사하였다. 해석결과 두 기법은 서로 유사한 결과를 보였으며, 입사압축파는 기폭이후 0.060ms (60 μ s) 경에 시료의 후단에서 반사되어 반사인장파의 형태로 되돌아오면서 시료의 축방향과 직각방향으로 인장균열을 발생시켰다. 시료 중을 전파하는 응력파의 전파속도는 4167 m/s로 계산되어, 물리시료에 대한 측정치 4300 m/s와는 약 3%의 근소한 오차를 보였다.

참고문헌

1. Brinkmann, J. R., 1987, Separating Shock Wave and Gas Expansion Breakage Mechanisms, Proc. 2nd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, W. L. Fournery and R. D. Dick, Eds., Bethel, Connecticut, Society for Experimental Mechanics, pp. 6-15.
2. Brinkmann, J. R., 1990, An Experimental Study of the Effects of Shock and Gas Penetration in Blasting, Proc. 3rd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting.
3. Cho, S., 2003, Dynamic Fracture Process Analysis of Rock and Its Application to Fragmentation Control in Blasting, Ph.D. Thesis, Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., pp. 39-76.
4. Cundall, P. A., and O. D. L. Strack, 1979, A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol. 29, pp. 47-65.
5. Fournery, W. L., 1993, Mechanism of Rock Fragmentation by Blasting, Comprehensive Rock Engineering, Principles, Practice and Projects, J. A. Hudson, Ed. Oxford, Pergamon Press, pp. 39-69.
6. Jung, W. J., Y. Ogata, Y. Wada, M. Seto, K. Katsuyama and T. Ogawa, 2001, Effects of Water Saturation and Strain Rate on the Tensile Strength of Rocks under Dynamic Load, Journal of Geotechnical Engineering, JSCE, No. 673, III-54, pp. 53-59.
7. Munjiza, A., D. R. J. Owen, N. Bicanic and J. R. Owen, 1994, On a Rational Approach to Rock Blasting, Computer Methods and Advances in Geomechanics, pp. 871-876, H. J. Siriwardane and M. M. Zaman, Eds., Rotterdam, Balkema.
8. Potyondy, D. O., and P. A. Cundall, 1996, Modeling of Shock- and Gas-Driven Fractures Induced by a Blast Using Bonded Assemblies of Spherical Particles, Rock Fragmentation by Blasting, Balkema, Rotterdam, pp. 55-61.
9. Preece, D. S., B. J. Thorne, M. R. Baer and J. W. Swegle, 1994, Computer Simulation of Rock Blasting: A Summary of Work from 1987 through 1993, Sandia National Laboratories, Report No. SAND92-1027.
10. Sarracino, R. S., and J. R. Brinkmann, 1994, Modeling of Blasthole Liner Experiments, Computer Methods and Advances in Geomechanics, H. J. Siriwardane and M. M. Zaman, Eds., Rotterdam, Balkema, pp. 871-876.
11. Schatz, J. F., B. J. Zeigler, R. A. Bellman, J. M. Hanson, M. Christianson and R. D. Hart, 1987, Prediction and Interpretation of Multiple Radial Fracture Stimulations, Science Applications International Corporation (SAIC), Report to Gas Research Inst. (GRI), SAIC Report No. SAIC087/1056, GRI Report No. GRI-87/0199.



최병희

1988 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사

2002 전남대학교 대학원 자원공학과 공학석사

2005 전남대학교 대학원 지구시스템공학과 공학박사

Email: bhchoi@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원



류창하

E-mail : cryu@rock25t.kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 실장