

## UDEC과 LS-DYNA에 의한 암반균열 전파 시뮬레이션의 비교분석

최성용<sup>1)</sup> · 김재동<sup>1)</sup>

### 1. 서 론

주로 기계공학분야에서 활발히 이용되어오던 상용프로그램 LS-DYNA는 최근에 와서 화약 발파공학 및 암반공학 분야로까지 그 적용성을 넓히고 있다. LSTC(Livermore Software Technology Corporation)에 의해 개발된 LS-DYNA의 전신은 LLNL DYNA3D였는데, 이는 주로 방위산업분야에서의 역학적 해석을 위해 작성된 코드로서, 발사체의 관통문제, 폭발에 의한 구조물의 응답, 수중 충격 해석 등 동적해석에 널리 적용되어 왔었다. 이후 컴퓨터 성능의 기하학적인 발전과 함께 개인용 컴퓨터로서도 선형, 비선형, 열 해석 등이 가능해 지고, 최근에 와서는 유체해석 기능까지 포함되면서 공학용 프로그램인 LS-DYNA로 발전하게 되었으며, 지금까지 동적해석 분야에서 매우 큰 비중을 차지하고 있던 Abaqus 및 Ansys 등과 그 위치를 나란히 하고 있다.

본 고에서는 최근 국제암반역학회지에 소개된 바 있는, LS-DYNA에 의하여 암반발파를 모사한 논문을 소개함으로써 화약발파 분야의 세계적 연구동향을 분석하고, 국내 화약발파 공학자들에게 널리 알려진 UDEC 프로그램을 이용하여 이들의 연구결과를 검증함으로써 LS-DYNA의 적용성 및 한계성을 분석코자 한다.

### 2. 본 론

일반적으로 폭약이 발파공 내에서 폭발하게 되면, 급격한 화학반응이 일어나게 되며 그 일부는 고온의 가스로 전환된다. 따라서 이러한 화학적 반응은 응력파(stress wave)와 가스압(gas pressure)의 형태로 발파공을 가압하게 되는데, 최근의 연구결과에 의하면 발파공의 파쇄 및 발파공 주변으로의 균열발생에 직접적으로 영향을 미치는 것은 응력파이며, 발생한 균열의 전파에 영향을 미치는 것은 가스압인 것으로 알려지고 있다.

이러한 발파효과를 실제규모로 분석하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 수치해석에 의한 시뮬레이션이 적용되고 있으나, 이 역시 발파대상 매질을 연속체 또는 불연속체로 고려함에 따른 여러 가지 변수들의 적용이 용이하지 않거나 응력파와 가스압의 하중 적용이 용이하지 않아 매우 복잡한 해석과정을 거쳐야 하는 불편함을 내포하고 있다.

즉, Chen 등(1998, 2000)은 유한요소 프로그램인 AutoDYN-2D를 이용하여 연속체 암반에서의 폭발과정을 모사함으로써 주변 암반의 폭발이력을 진동속도 또는 압력의 형태로 구하

1) 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과

였으며 이 때의 폭발이력을 UDEC 해석모델에 적합한 입력과형으로 변환하여 사용한 바 있으며, 최성웅 등(2004)은 발파압력이력곡선을 발파하중의 입력자료로 사용하는 대신 현장에서 획득된 발파진동과형을 직접 FLAC 해석모델용 입력자료로 사용한 바 있다.

## 2.1 LS-DYNA에 의한 수치해석

3차원 비선형 동해석용 유한요소 프로그램인 LS-DYNA해석을 위해 Ma & An (2008)은 연속체 파괴모델인 Johnson-Holmquist model (J-H model)을 도입하였다. J-H model에서는 파괴전 및 파괴후의 매질에 대한 강도특성을 부여할 수 있고, 그 중간과정에서의 매질의 파괴특성을 표현할 수 있으며, 대변형 및 고응력 문제에 적합한 응답특성을 보유하고 있다. J-H model에서 요구하는 입력변수에 대한 수학적 표현은 Ma & An (2008)을 참조바라며, 암반분야에서 널리 적용되는 Mohr-Coulomb model에서와 거의 유사한 입력변수를 요구하면서 특히 Hoek-Brown의 파괴기준식에 의한 Hoek-Brown 상수를 이용하고 있다는 점이 특징이다.

또한 LS-DYNA에서는 공내 발파를 모사하기 위해 방사형 압력파를 발파공 표면에 적용시키는 기법을 사용하고 있는데, 이 압력파의 크기 및 지속시간은 폭약의 내부 에너지 및 발파공의 크기와 형태에 의해 다음 식과 같이 결정된다.

$$P = P_0 [e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}] \quad (1)$$

여기서,  $P$  ; 시간  $t$ 에서의 압력,

$P_0$  ; 최대압력,

$\alpha, \beta$ ; 상수 이다.

압력파의 증가부분과 감소부분에 대한 표현을 용이하게 하기 위해, 다음의 두 상수를 이용한다면 식(1)은 식(3) (Cho & Kaneko, 2004)과 같이 표현될 수 있다.

$$\zeta = 1 / (e^{-\alpha t_0} - e^{-\beta t_0}), \quad (2)$$

$$t_0 = \frac{1}{\beta/\alpha} \ln(\beta/\alpha)$$

$$P = P_0 \zeta [e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}] \quad (3)$$

따라서 LS-DYNA에 의한 발파 수치해석에서 사용된 압력파의 시간이력곡선은 그림 1과 같다.

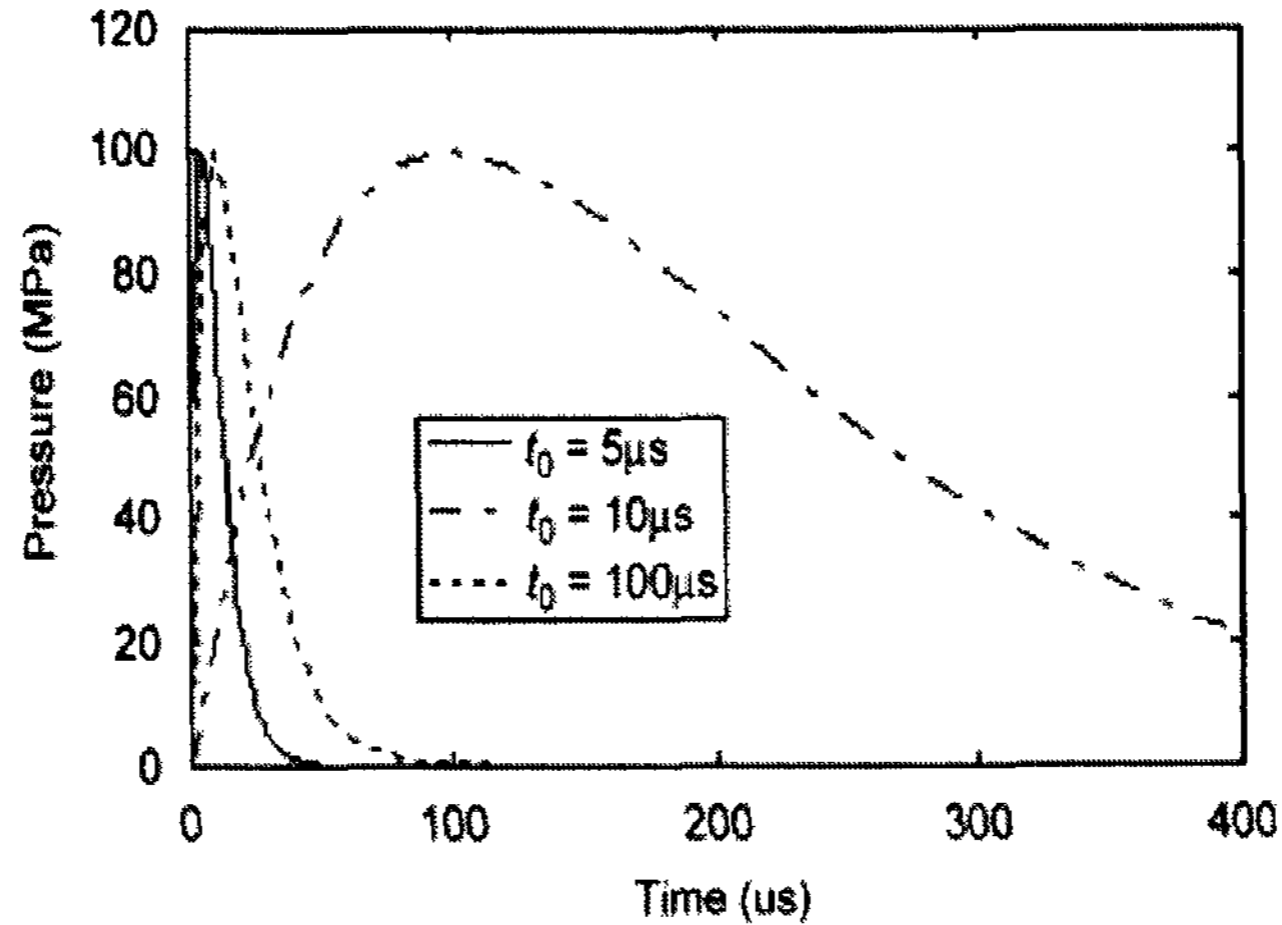


그림 1. LS-DYNA에서 적용된 압력파의 시간이력곡선 ( $\beta/\alpha = 1.5$ )

(1) 응력 가압을 효과

기존의 연구결과에 따르면 (Donze 등, 1997) 높은 변형률을 야기하는 응력 조건에서는 수많은 미세 균열의 발생에 따라 큰 파쇄영역이 발생하게 되며, 낮은 변형률을 야기하는 응력 조건에서는 상대적으로 작은 파쇄영역이 발생하고 적은 균열들이 더욱 길게 발생하는 것을 알려져 있다. 이러한 사실을 LS-DYNA에 의해 검증하고자 그림 1에서와 같이 동일한 최대압력(=100MPa)을 갖지만 압력파의 증가부분을 5 $\mu$ s, 10 $\mu$ s 및 100 $\mu$ s로 달리하여 그 지속 시간에 차등을 주도록 하여 해석을 실시한 결과, 발파공 주위의 파쇄영역의 발생양상 및 균열의 전파양상을 그림 2와 같이 해석할 수 있었다.

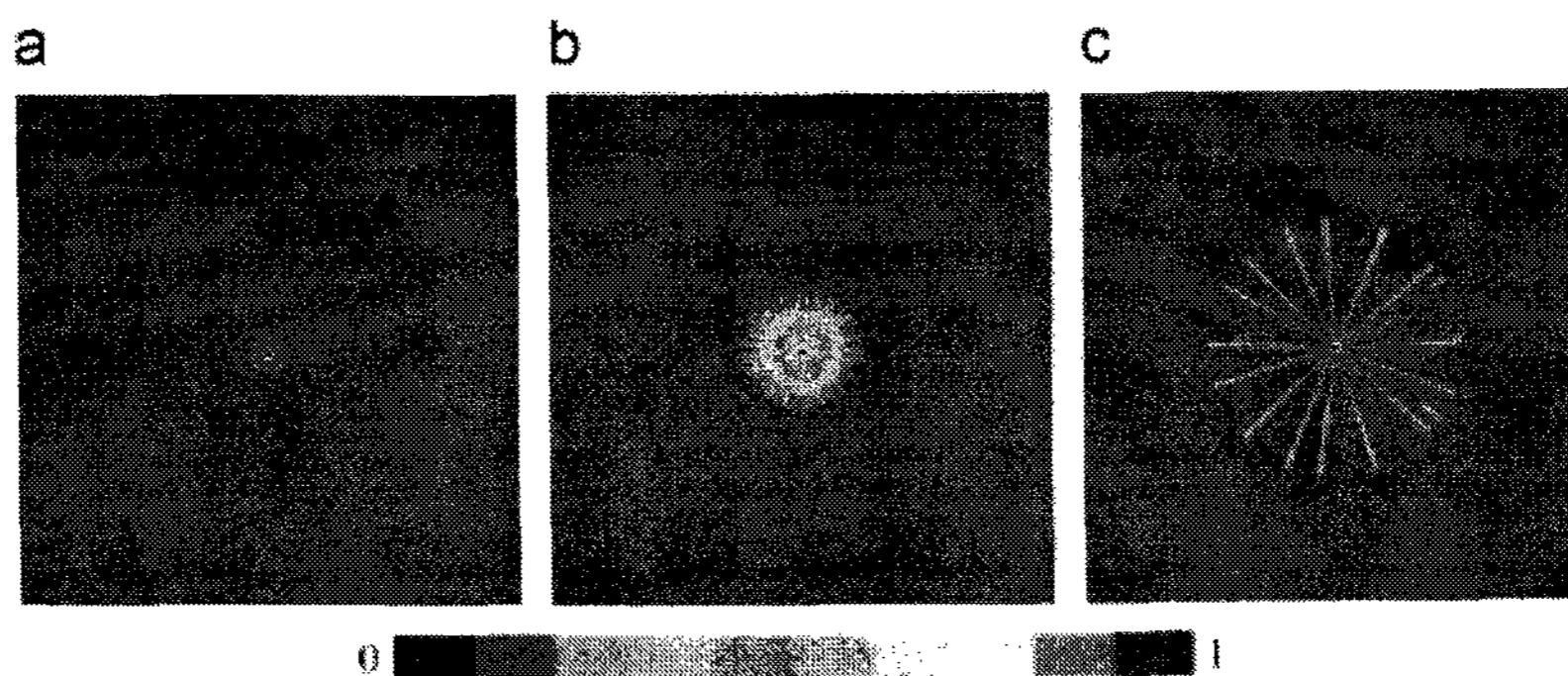


그림 2. LS-DYNA에 의한 응력 가압율과 균열전파양상의 관계  
( $P_0 = 100MPa$ ,  $\beta/\alpha = 1.5$ ); (a) 20MPa/ $\mu$ s, (b) 10MPa/ $\mu$ s, (c) 1.0MPa/ $\mu$ s

(2) 현지암반응력 효과

지하 심부 터널에 대한 발파 굴착의 경우, 암반 내에 존재하는 초기응력의 크기와 방향은 발파 균열의 발생 및 전파에 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 현지암반응력의 효과를 모사하기 위해 수치모델의 한쪽 방향에 대해 2, 10, 30 및 50MPa의 응력을 적용하고 다른 쪽 방향에 대해서는 비반사 경계(non-reflecting boundary) 조건을 적용하였으며, 발파공 내에서의 압력파는  $P_0=30MPa$ ,  $\beta/a=1.5$ ,  $t_0=100\mu s$ 의 조건을 적용한 결과, 그림 3과 같은 수치해석 결과를 구할 수 있었다.

즉, 발파에 의한 균열의 전파방향은 최대수평주응력의 방향으로 발전하고 있으며, 그 차 응력의 크기가 클수록 그 경향은 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있다.

(3) 균열발생 유도 기법

균열의 발생과 발전방향에 대한 조절은 발파공학 분야에서 많은 연구가 진행되고 있는 부분이다. 즉, 터널 발파에서 조절발파가 그 대표적인 예인데, 이를 위해 방사형 노치를 이용하거나 pre-slit charge holder를 사용하고 있다. 그림 4는 방사형 노치를 수치해석모델에서 고려하였을 때의 발파균열의 발전방향을 모사한 그림이며, 그림 5는 pre-slit charge holder를 고려한 발파균열의 발전에 관한 수치해석결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 LS-DYNA를 이용한 발파균열 조절해석으로부터 비교적 객관적인 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

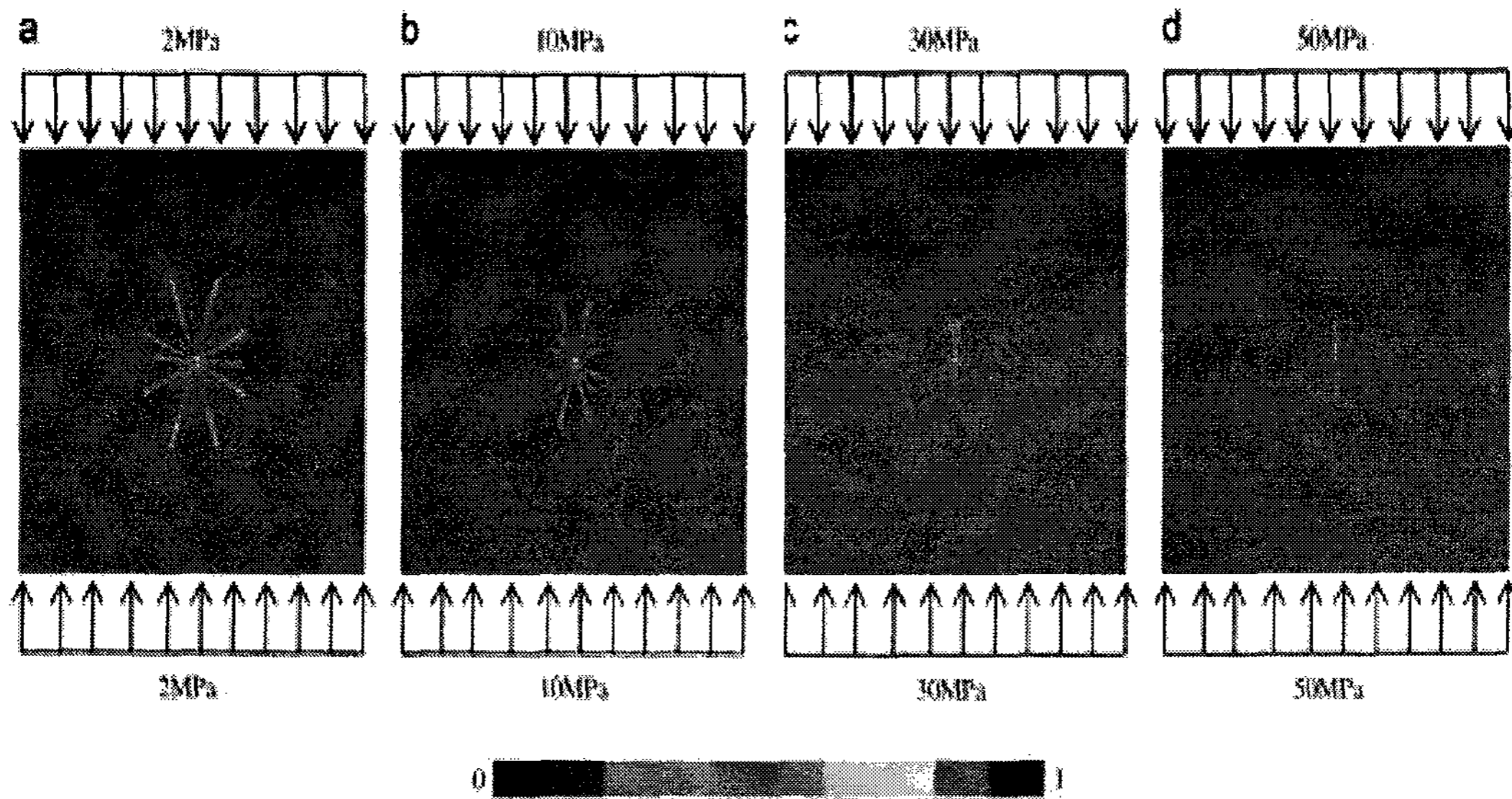


그림 3. LS-DYNA에 의한 현지암반응력조건과 균열전파양상의 관계  
 ( $P_0=30MPa$ ,  $\beta/a=1.5$ ,  $t_0=100\mu s$ )

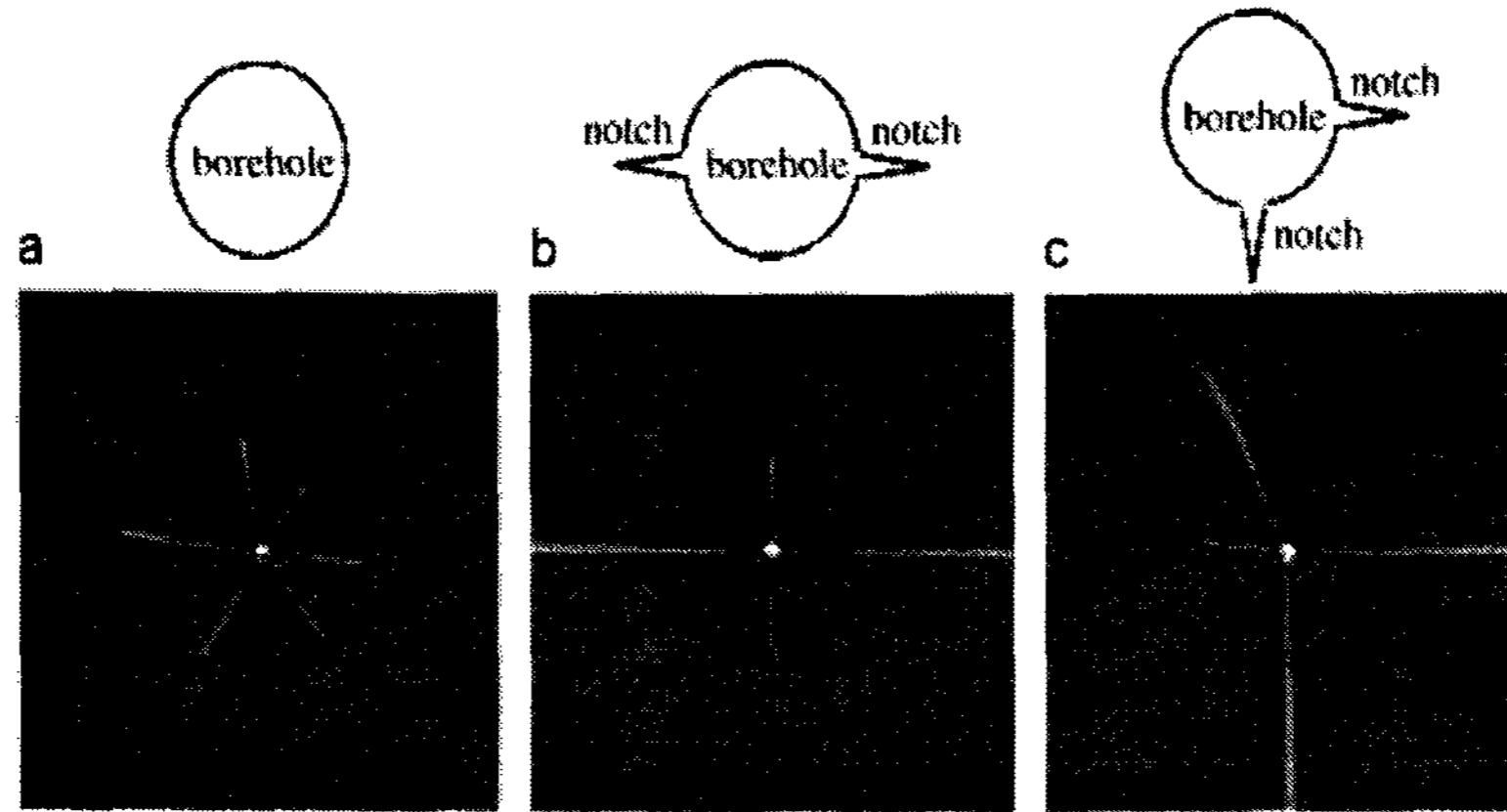


그림 4. LS-DYNA에 의한 균열전파 해석; (a) notch가 없을 경우, (b) 2개의 대칭 notch가 있을 경우, (c) 2개의 직교 notch가 있을 경우

## 2.2 UDEC에 의한 수치해석

앞서 언급한 바와 같이, 폭약의 폭발에 의한 압력파의 형태를 수치해석용 입력자료로 사용하기 위해 AutoDYN-2D 등과 같이 별도의 프로그램으로부터 구해진 암반의 폭발이력을 입력파형으로 변환하여 사용하거나, 또는 현장에서 획득된 발파진동파형을 직접 해석모델용 입력자료로 사용하는 것이 최근의 발파공학 분야의 연구동향이다.

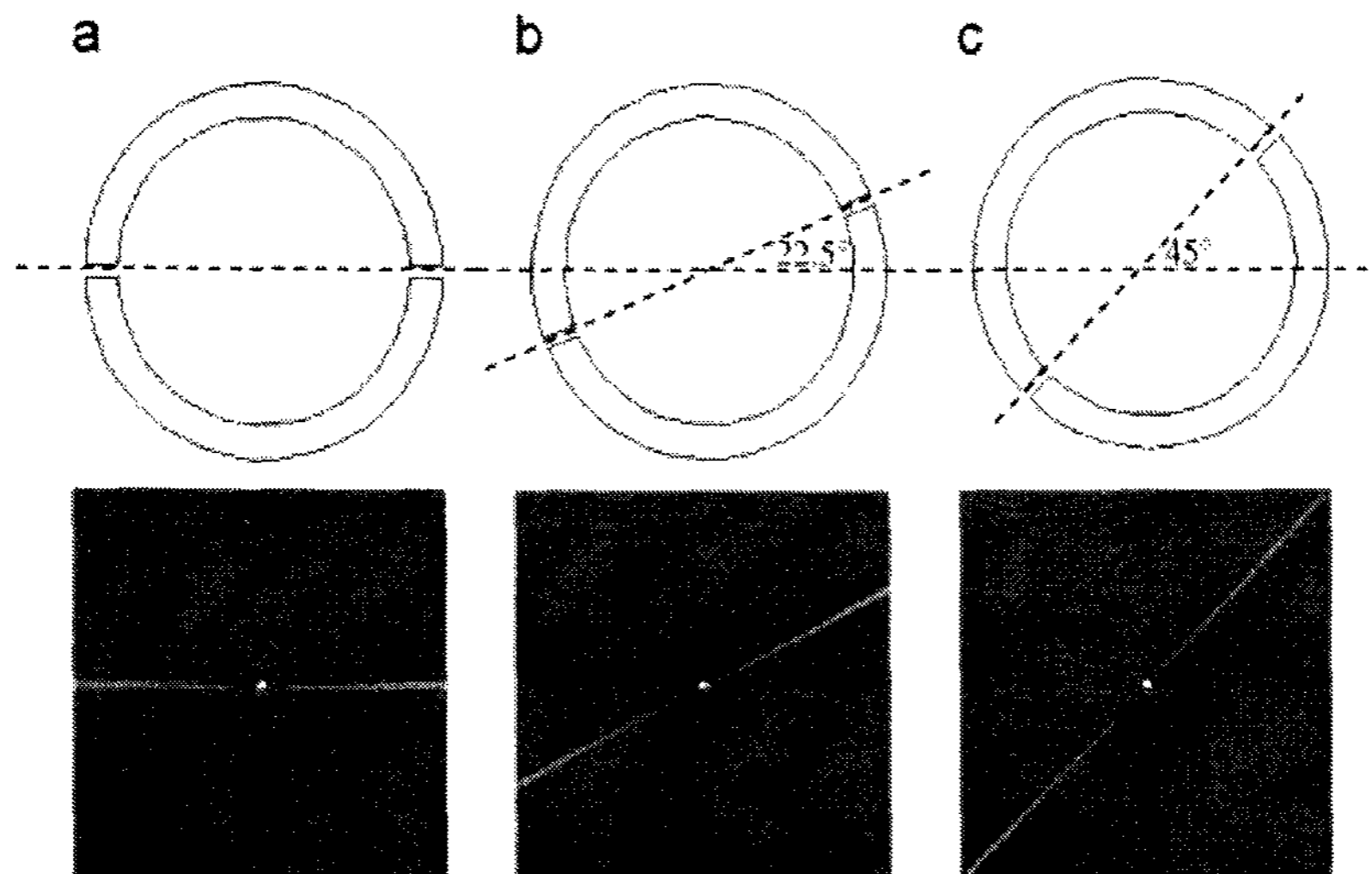


그림 5. LS-DYNA에 의한 균열전파 해석; (a) 0° two-slit charge holder, (b) 22.5° two-slit charge holder, (c) 45° two-slit charge holder

그러나 여기서는 LS-DYNA의 연구결과와의 비교분석을 위해 그림 1에서 제시된 바와 동일한 시간이력곡선을 갖는 압력파를 발파하중으로 적용하기로 하였다.

지반공학분야에서 불연속체 해석프로그램 중 대표적인 것으로 알려져 있는 UDEC에서는 개별적인 요소들의 집합체로 해석모델을 구성하기 때문에 요소들 간의 분리 현상 및 요소들의 변위양상을 보다 효과적으로 보여줄 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 연속체 모델의 대표적인 프로그램인 FLAC 등에 비하여 모델의 구성이 용이하지 않고 암반자체의 물리적 특성값 보다 불연속면의 물리적 특성에 의해 해석결과가 영향을 받을 수 있다는 점에서 보다 신중한 접근이 필요한 프로그램이기도 하다.

(1) 요소 배열의 효과

개별 요소들의 집합체로서 해석모델을 구성하는 UDEC의 특성상, 각 요소들의 배열은 매우 중요한 요소일 것이다. 왜냐하면, 향후 균열의 전파는 이들 요소들 간의 경계를 따라 이루어질 것이며, 실제 암반에서의 불연속면은 아니지만 glue의 효과를 적용한 무결암의 특성을 지니는 가상의 균열면 형태를 띠는 것이기 때문이다.

이를 위하여 먼저 그림 6에서와 같이 4가지 형태의 요소 배열을 고려한 사전조사를 실시하였다. 그림에서 (a)는 단순히 직교하는 두개의 절리군을 고려한 경우이며, (b)는 직교하는 두개의 절리군을 서로 엇갈리게 고려한 경우이고, (c)는 두개의 절리군을 대각선 방향으로 배열한 경우이며, (d)는 Voronoi tessellation 을 적용하여 임의 크기의 다각형 블록들의 집합체로 고려한 경우이다.

이와 같이 크게 4가지 형태의 요소 배열을 고려하여 균열의 발전 양상을 수치적으로 시뮬레이션할 결과, 그림 7 (a)와 같이 단순 직교의 절리군을 고려한 경우에는 균열의 발전방향이 직선으로만 발생하게 되는, 즉 비현실적인 균열전파양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

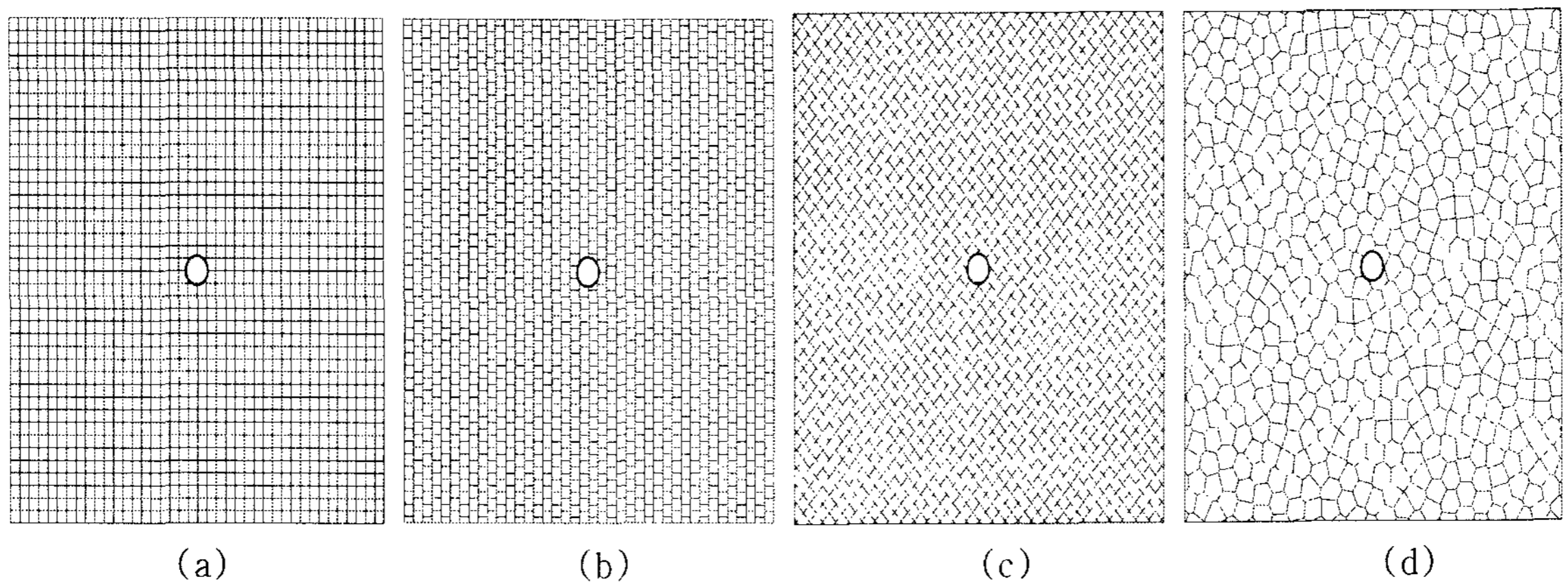


그림 6. UDEC 해석에서 고려될 수 있는 요소들의 배열 형태;

- (a) 단순 직교형 배열, (b) 서로 엇갈리는 직교형 배열, (c) 대각선 방향의 직교형 배열, (d) 임의크기의 다각형 배열



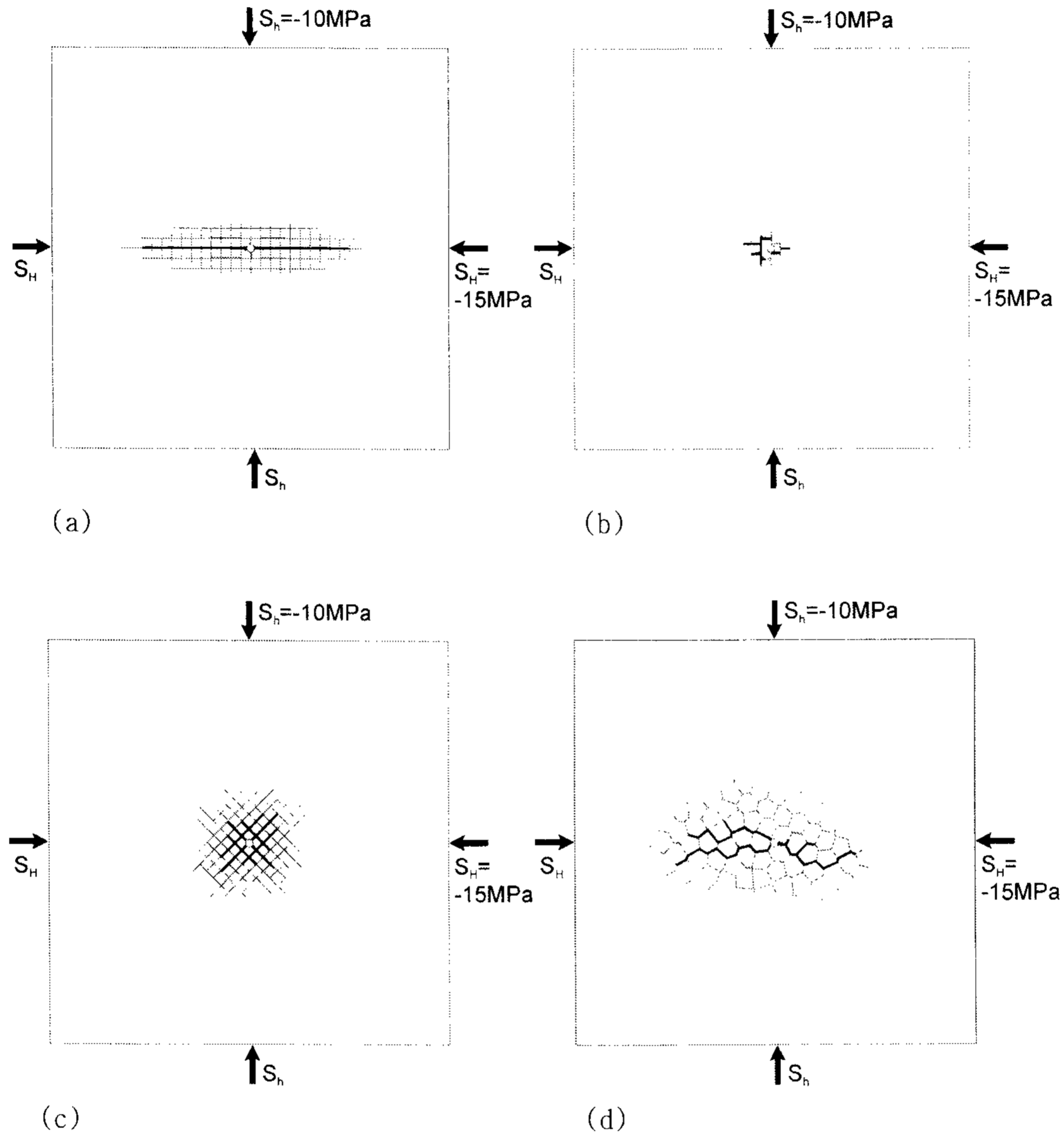


그림 7. 요소들의 배열에 따른 균열전파양상의 특성;

- a) 단순 직교형 배열, (b) 서로 엇갈리는 직교형 배열, (c) 대각선 방향의 직교형 배열, (d) 임의크기의 다각형 배열

따라서 암반에 대한 발파 균열의 모사를 효과적으로 수행하기 위해서는 단순히 직교하는 형태의 불연속면을 고려하는 것보다는 Voronoi tessellation 기법을 적용한 임의 크기의 다각형 블록들의 집합체로 해석모델을 구성하는 것이 현실적임을 알 수 있다.

(2) 현지암반응력 효과

LS-DYNA에 의한 해석의 경우와 유사하게 해석모델에 가해지는 수평주응력의 크기를 달리함으로써 균열의 발전방향에 어떠한 차이가 있는지를 검토하기 위해 최소수평주응력은

10MPa로 고정한 상태에서 최대수평주응력을 10MPa, 12.5MPa, 15MPa 로 달리 적용하며 균열의 발전양상을 검토하였다.

그림 8에서 보는 바와 같이 최대수평주응력 및 최소수평주응력이 10MPa로 같을 경우, 균열의 발전방향은 거의 방사형으로 발생하고 있음을 알 수 있으며, 최대수평주응력의 크기가 12.5MPa 및 15MPa 가 됨에 따라, 즉 수평주응력의 차응력이 커짐에 따라 최대수평주응력 방향으로 균열의 발전방향이 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있으며, 이는 LS-DYNA의 해석결과와 유사함을 알 수 있다.

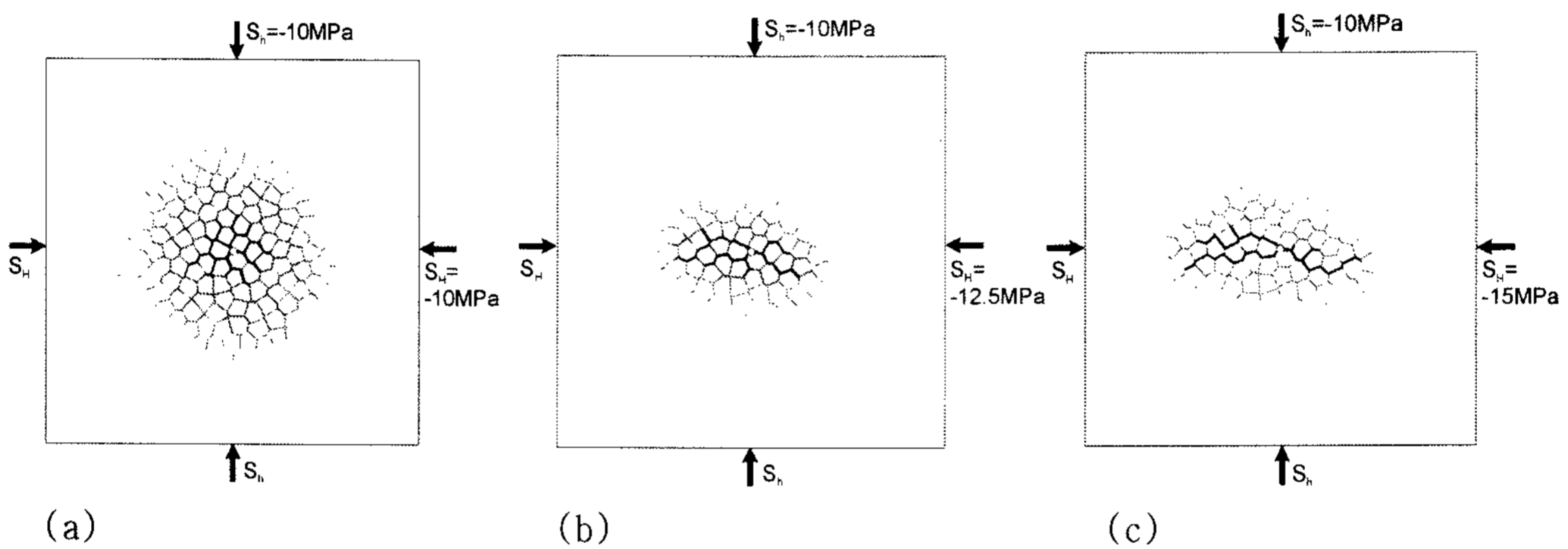


그림 8. 현지암반응력의 크기에 따른 균열발전의 전파양상 (최소수평주응력=10MPa);  
 (a) 최대수평주응력=10MPa, (b) 최대수평주응력=12.5MPa, (c) 최대수평주응력=15MPa

### 3. 결론

최근 암반공학 및 화약발파공학 분야에서 발파균열의 전파특성을 해석하기 위해 적용되기 시작한 상용프로그램 LS-DYNA의 적용성을 살펴보기 위해 국제암반역학회지의 최근호에 발표된 논문을 위주로 발파압력과 지속시간에 따른 발파균열의 전파특성, 현지암반응력 분포양상에 따른 균열의 발전방향특성, 조절발파를 고려한 균열의 방향조절특성 등을 살펴보았으며, 그 연구내용 중 일부에 대하여 동일한 조건으로 UDEC에 의한 수치해석을 실시, 그 결과를 비교해 보았다.

유한요소해석을 바탕으로 하는 LS-DYNA로서는 지반문제에 대한 적용성이 유한차분요소 해석 및 개별요소해석 등에 비해 다소 불리한 점을 가질 수도 있으나, 구성방정식의 다양화를 통해 비교적 현실적인 해석결과를 보여주고 있음을 알았으며, 해석자의 편의를 도모하기 위한 많은 내재함수들로 인해 오히려 UDEC 해석시보다 더욱 편리한 입력변수 선정과정을 보유함을 알 수 있었다.

결국 국내외적으로 널리 사용되고 있는 상용프로그램의 대다수는 동적해석 옵션을 통해 발파에 의한 암반균열의 전파과정을 충분히 객관적으로 모사할 수 있음을 알 수 있으며, 해



석자의 판단에 따라, 즉 해석결과의 주안점을 어디에 둘 것인가에 따라 유한요소해석 또는 개별요소해석 및 유한차분해석 등의 접근방법이 선택되어야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. 최성웅, 박의섭, 선우춘, 정소걸, 2004, 실측진동파형을 이용한 발파 동해석 기법에 관한 연구, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, Vol.14, No.2, pp.1-13.
2. Chen, S.G. and Zhao, J., 1998, A study of UDEC modelling for blast wave propagation in jointed rock masses, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.35, pp.93-99.
3. Chen, S.G., Cai, J.G., Zhao, J. and Zhou, Y.X., 2000, Discrete element modelling of an underground explosion in an jointed rock mass, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.18, 59-78.
4. Cho, S.H. and Kaneko, K., 2004, Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture processes in rock, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.41, pp.771-784.
5. Donze, F.V., Magnier, S.A., 1995, Formulation of a three-dimensional numerical model of brittle behaviour, *Geophys J. Int.*, Vol.122, pp.790-802.
6. Ma, G.W. & An, X.M., 2008, Numerical simulation of blasting-induced rock fractures, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, in Press.