

노치 장약공을 이용한 발파균열제어에 관한 수치해석적 연구

조상호^{1)*}, 박승환¹⁾, 김광염²⁾, 나카무라 유이치³⁾, 카네꼬 카츠히코⁴⁾

Numerical Study on the Crack-propagation Controlling in Blasting Using Notched Charge Hole

Sang-Ho Cho, Seung-Hwan Park, Kwang-Yeom Kim, Yuichi Nakamura and Katsuhiko Kaneko

Abstract Mechanical excavation techniques employing tunnel boring machines (TBM) and rock splitters have been proposed to minimize rock damage for tunnel and underground waste repository facilities. Such a mechanical excavation, however, is extremely expensive and not applicable in all cases. For these reasons, controlled blasting using notched charge holes have been suggested to achieve crack growth along specific directions and inhibit growth along other directions. This study introduces a dynamic fracture process analysis code to simulate fracture processes of rock which has a notched charge hole.

Key words Notched charge hole, Crack controlling, Dynamic fracture process analysis code

초 록 터널 및 지하공동 폐기물 처분시설의 건설에서 여굴을 적게하고 굴착후 잔류암반의 안정성을 높이기 위하여 TBM 및 활암기 등의 기계적 굴착공법의 적용이 제안되고 있다. 그러나 기계적 굴착공법은 경비나 시공성, 현장 적용성에 있어서 많은 제약이 따르고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 고도의 정밀제어발파공법이 제안되고 있다. 특히 노치 장약공을 이용하여 예정된 굴착면을 따라 정밀하게 파단면을 형성시키는 방법이 제안되고 있지만 아직까지 균열제어에 관련된 연구가 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 동적파괴과정해석코드를 이용하여 암반내 노치를 가진 발파공을 모델링하여 암반의 균열발생 메커니즘과 파괴과정을 수치해석적으로 검토하였다.

핵심어 노치장약공, 균열제어, 동적파괴과정해석코드

1. 서 론

제어발파는 암반터널이나 지하공동 굴착에서 널리 사용되고 있는 발파공법으로서, 여굴 및 미굴을 최소화하여 평활한 파단면을 형성하고 주위 암반의 손상을 억제시키기 위해 적용된다. 제어발파공법에는 스프레스블라스팅, 프리스플리팅, 라인드러링과 같은 전

통적인 공법과 장약실 또는 장약공의 형태를 바꾸어 균열을 적극적으로 제어하는 발파공법이 제안되고 있다(Fourney et al., 1978; Nakamura et al., 1992, 최와이, 2000; 조상호 외, 2004).

노치장약공을 이용한 발파공법은 장약공 노치의 선단부에 인장응력을 집중시켜 균열발생 위치를 인위적으로 제어하여, 균열의 진전방향과 탁월균열의 수를 제어하게 된다. 특히 장약공에 노치를 세기는 방법으로 워터젯(water jet)이나 컷터(cutter)를 이용한 방법이 있으나, 원형장약공을 천공하고 노치를 세기는 두 번의 작업공정이 필요하게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 한번의 천공으로 노치장약공을 착공할 수 있는 기술들이 국내외에서 개발되고 있다(椋木 외, 1992; 정

¹⁾ 전북대학교 자원·에너지공학과

²⁾ 한국건설기술연구원 지하구조물 연구실

³⁾ Yatsushiro National College of Technology, Japan

⁴⁾ Hokkaido University, Japan

* 교신저자 : chosh@chonbuk.ac.kr

접수일 : 2008년 6월 5일

게재 승인일 : 2008년 6월 16일

동호 외, 2007).

본 논문에서는 노치 장약공을 이용한 제어발파의 설계에 필요한 기초자료의 획득·분석을 목적으로 동적파괴과정해석(조상호 외, 2004)을 적용하였다. 구체적으로 원통형 암반시료의 중심에 노치장약공을 위치시키고 장약공벽 내에 뇌관폭발하중을 입력하여 암반중에 발생하는 응력과, 파괴현상을 계산한다. 먼저 장약공 노치에 의한 응력상태, 균열의 발생 및 성장을 분석한다.

2. 동적파괴과정 해석법

동적파괴과정해석법은 동적유한요소법과 비선형 파괴역학을 기초로 하여 개발된 프로그램이다(조상호 외, 2004). 이 방법은 균열의 발생, 성장, 결합 등을 요소 경계변의 파괴로서 취급하며, 요소 경계변의 응력은 그 응력경계면을 포함하는 요소들의 응력의 평균값을 계산하고 이 평균값과 요소경계변의 인장강도의 비(국소취힘율)를 계산하여 인장파괴판정에 적용한다. 압축파괴의 판정에는 Mohr-Coulomb 파괴기준식을 사용하였다. 암석의 파괴는 그 조직과 밀접한 관계가 있으므로 암석의 파괴를 고려하기 위해서는 암석의 미세구조를 모델화할 필요가 있으나 이러한 엄밀한 수치해석은 곤란하므로, 미시적 크기를 가진 요소의 집합체로써 근사시켜 모델링을 한다. 특히 암석의 미시구조는 극히 불균질하지만 이것은 강도와 탄성률의 불균질성으로써 표현된다. 본 해석에서는 복수균열의 발생 및 성장을 해석하기 위해 균열선단주변에서 파괴프로세스 영역을 유한한 강도를 가진 균열면으로 가정하여 취급하는 인장연화모델을 적용하였다. 균열은 분리된 두개의 경계면으로써 취급되므로 균열면에 수직방향으로 압축응력이 작용한 경우에는 개구변위가 음으로 되는 경우가 발생하게 된다. 이러한 과도폐합이 발생하는 경우에는 균열면상에 대응하는 절점에 대해서 접촉압에 상응하는 절점력을 작용시켜 균열의 개구변위가 0으로 되도록 반복계산하였다. 계산용량 및 계산시간이 증가하게 되는데, 계산용량을 줄이기 위해 전체강성방정식의 매트릭스에서 비영성분만을 일차원배열로 저장시키고, 연립방정식의 계산에는 ICCG법을 채용하여 계산시간을 감소시켰다.

3. 노치 장약공을 이용한 암반의 동적파괴과정

3.1 해석모델

해석모델은 Fig. 1에 보여주는 것과 같이 외곽경계는 직경이 400mm인 원형이고, 내부경계는 모델의 중심부에 날개모양의 노치를 가진 직경 20mm의 원형공으로 구성되어있다. 요소크기가 파괴과정에 미치는 영향을 최소화하기 위해서 장약공 주변은 1mm이내의 크기로 세분화하고, 전체 요소수를 줄이기 위하여 외곽영역으로 갈수록 요소의 크기가 증가하도록 작성하였다. 해석모델의 절점수는 7312개, 요소수는 14264개이며, 계산시간증분은 0.1 μ s로 설정하였다. 장약실내의 폭발생성가스는 등엔트로피 팽창하는 것을 가정하여 장약공벽에 작용하는 폭발하중은 JWL 상태방정식을 적용하였다.

$$P(t) = Aexp(-R_1V(t)) + Bexp(-R_2V(t)) + CV(t)^{\omega+1} \quad (1)$$

여기서 $V(t)$ 는 장약공과 폭약의 체적의 비이다. 이식을 장약공의 체적변화에 따른 압력변화로 표현한다. A , B , C , R_1 , R_2 , ω 는 실험적으로 구하는 실험 변수로서 전기뇌관의 침장약을 고려하여 PETN폭약의 실험값(Table 1)을 사용하였다(Cho et al., 2004). 식 (1)으로부터 계산된 폭발압력값은 장약공벽에 직접 하중백터로 작용하는 하중경계조건을 적용하였다.

해석모델에서 사용된 암반은 밀도 2170kg/m³, 탄성계수 31.6GPa, 포아송비 0.18, P파속도 4000m/s로 가정하고 있다.

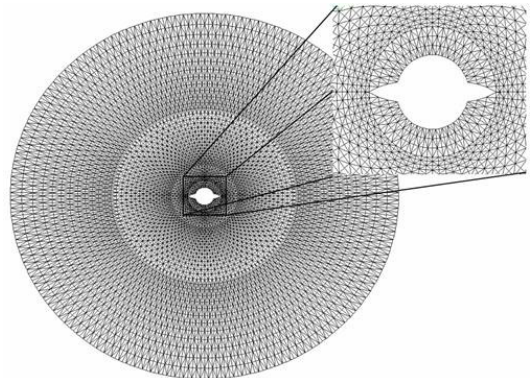


Fig. 1. Finite element layout for the analysis model.

Table 1. JWL parameters for PETN explosive

Parameters	Value
A (GPa)	1032
B (GPa)	90.57
C (GPa)	3.73
R_1	6
R_2	2.6
ω	0.57

3.2 동적파괴과정해석의 결과 및 토론

노치 장약공을 이용한 암반발파의 동적탄성해석

노치 장약공을 이용한 제어발파에서 발생하는 응력 상태를 살펴보기 위하여 동적탄성해석을 수행하여 Fig. 2에 시간의 경과에 따른 최대주응력 분포를 보여 주고 있다. 그림 내에 표시된 시각은 장약공벽에 폭발 하중이 가해지기 시작한 후 경과시간을 의미하며, 최대주응력의 분포에서 인장응력은 적색(+), 압축응력은 청색(-)으로 보여주고 있다(컬러 해석결과에 인터

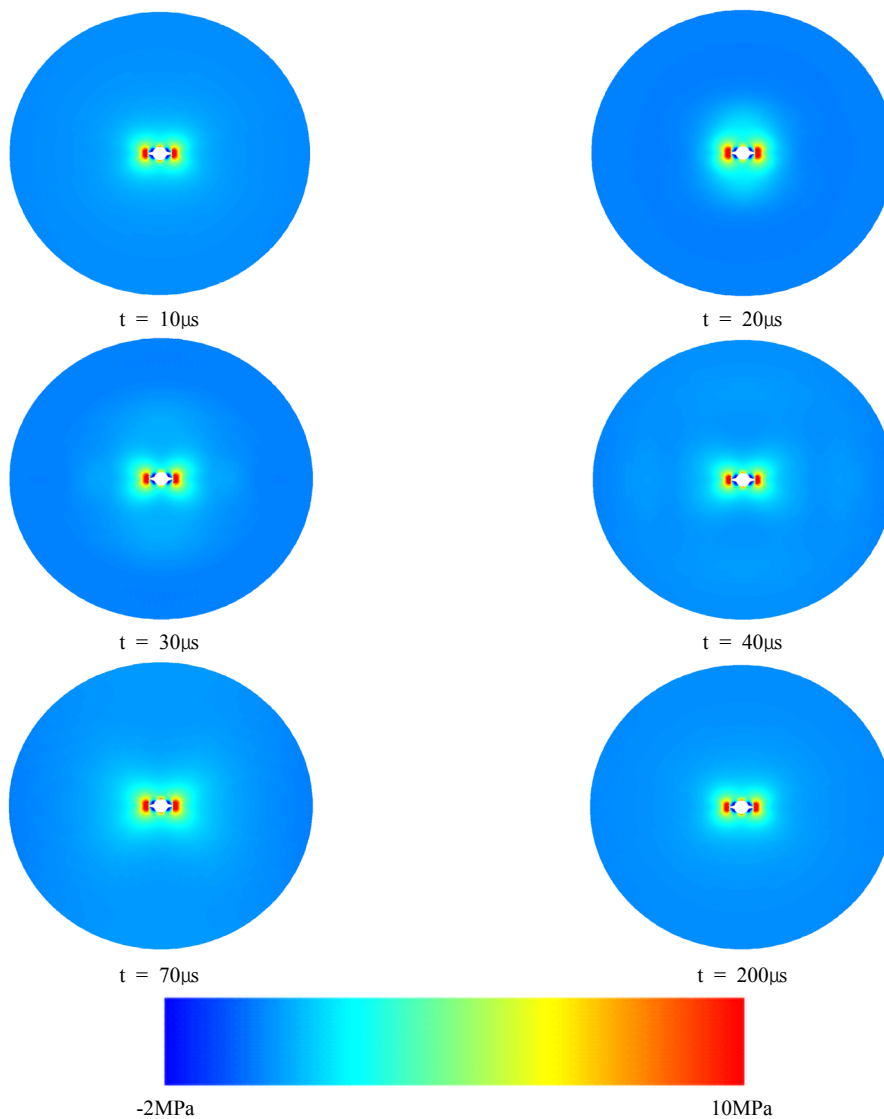


Fig. 2. Maximum principal stress distribution without fracture.

넷 출판물 참조). 경과시간 10 μ s에서의 주응력 분포를 살펴보면 장약공 주변에 동심원상의 반경방향 압축응력파가 전파하고 장약공의 상부, 노치의 침단에 인장응력이 발생되고 있으며, 특히 노치의 침단에는 높은 인장응력이 집중되어 있음을 알 수 있다. 그 이후 반경방향 압축응력파는 바깥쪽 자유면경계를 향해 전파하여 40 μ s과 70 μ s에서 자유면에 도달하고 있다. 이것은 암반모델의 탄성파속도가 4000m/sec이고 외부 경계의 반경이 200mm일 때 이론상 응력파의 자유면 도달시간은 50 μ s가 되므로 동탄성 해석결과의 유효성을 보여

주고 있다. 노치 침단에서 작용한 접선방향 인장응력은 계산이 끝나는 200 μ s까지 지속적으로 집중되어 발생되고 있는데, 이것은 반경방향 압축응력파를 뒤따르는 접선방향 인장응력이 작용하고 있기 때문이다.

노치장약공을 이용한 암반발파의 동적파괴과정해석

노치 장약공을 이용한 제어발파에서 암반의 동적파괴과정을 분석하기 위하여 상기 절에서 사용된 동일한 해석모델을 이용하여 동적파괴과정해석을 수행하여 최대주응력 분포와 파괴과정을 Fig. 3(a)와 (b)에

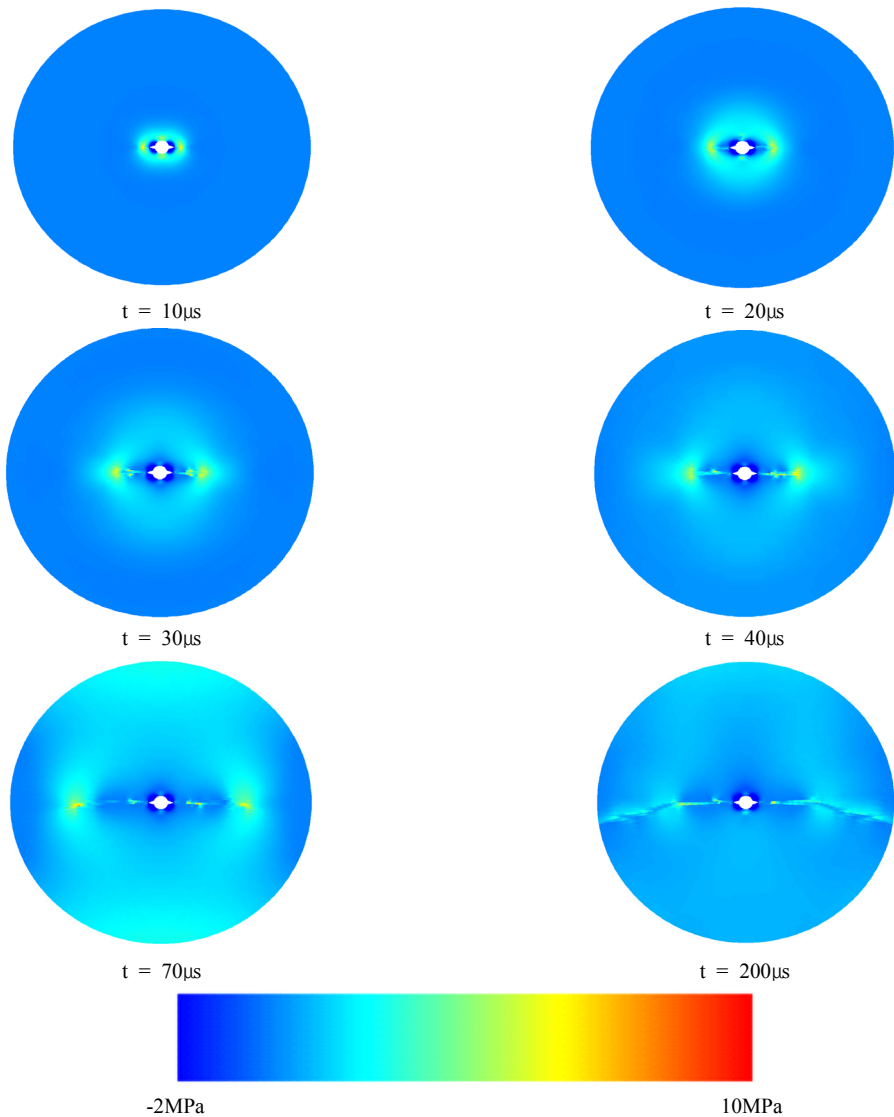


Fig. 3(a). Maximum principal stress distribution and crack propagations. (Continued)

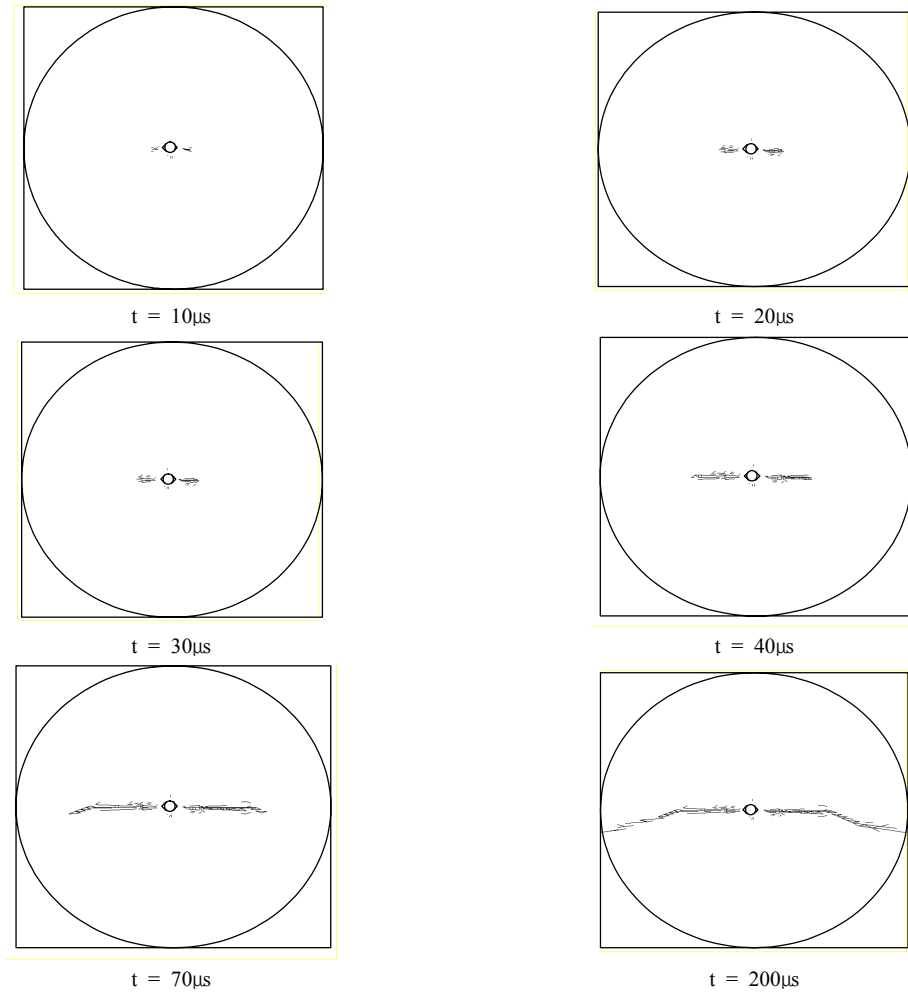


Fig. 3(b). Maximum principal stress distribution and crack propagations.

각각 보여주고 있다. 이때 평균인장강도는 5MPa, 평균압축강도는 70MPa였다. 경과시간 10μs에서 최대주응력 분포를 살펴보면 Fig. 2에서 보여주는 응력상태와 거의 동일하나 노치의 첨단에 균열이 발생하였다. 경과시간 20μs에서 균열은 약 40mm 성장하였으며 노치의 첨단에 작용하던 집중인장응력은 성장하는 균열의 첨단을 따라서 이동하고 있음을 보여주고 있다. 그 이후 시간의 경과와 함께 균열의 성장은 외부 자유면경계면 방향으로 진전하여, 200μs에서 자유면경계와 연결된다. Fig. 3(b)에서 보여주는 최종 파괴패턴을 살펴보면, 장약공 주변에서는 비교적 직선성을 보여주고 있으나, 외부 자유면경계에 가까워 질수록 굴곡이 발생하였음을 알 수 있다. 이러한 파괴패턴은 실

험에서도 종종 발견되는 것으로 주로 반사된 응력파가 성장하는 균열 첨단의 응력상태를 교란하여 균열을 분기시켜 발생하는 현상이다.

노치 장약공에 의한 응력확대 효과에 관한 고찰

장약공의 노치가 암반의 동적파괴과정에 미치는 영향을 분석하기 위하여 파괴를 고려하지 않은 동적탄성해석의 결과로부터 최대주응력-시간 이력곡선 즉 접선방향 응력-시간 이력곡선을 계산하였다. Fig. 4는 노치가 주어진 방향으로 각각 장약공의 중심으로부터 18.5mm, 27.5mm, 42.5mm, 67.5mm, 92.5mm, 117.5mm 이격된 지점을 관측점으로 하여 각각의 관측점에서 획득한 접선방향응력과 경과시간을 나타내고 있다.

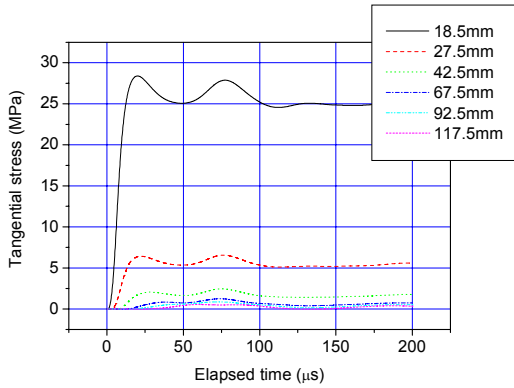


Fig. 4. Tangential stress-time histories at specific positions toward side boundary.

여기서 장약공의 반경은 10mm이고 노치의 길이는 2.5mm이므로 관측점 18.5mm는 노치의 선단으로 1mm 떨어진 지점이 된다. 장약공 노치와 가장 가까운 관측점(18.5mm)에서 접선방향응력은 경과시간 45 μ s에서 최대인장 응력값(28MPa)을 보여주고 있다. 이값은 동적파괴과정해석에서 적용된 평균인장강도의 5.6 배에 해당된다. 또한 최대인장응력값은 거리가 멀어짐에 따라서 감소하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 노치가 주어지지 않은 장약공의 상부방향으로 장약공의 중심으로부터 18.5mm, 27.5mm, 42.5mm, 67.5mm, 92.5mm, 117.5mm이격된 지점을 관측점으로 하여 각각의 관측점에서 획득한 접선방향응력과 경과시간을 나타내고 있다. 모든 관측점에서 인장응력이 발생되고 있지만, 최대응력값이 평균인장강도에 못미치고 있다. 장약공 노치에 의한 응력확대율을 살펴보기 위하여 Fig. 4와 Fig. 5의 결과를 분석하여 응력확대계수(Fig. 4와 Fig. 5에서 보여준 최대응력값의 비)와 중심으로부터 떨어지 이격거리의 관계로 정리하여, Fig. 6에 나타내었다. 장약공 노치선단 부근에서는 7이상의 응력확대계수를 보이고 있으며, 거리가 증가함에 따라 급작스럽게 감소하여 90mm 이후에는 수렴하였다. 이 결과로부터 장약공 노치를 이용하면 노치의 첨단 부근에 균열을 쉽게 발생시킬 수 있지만, 거리가 멀어질수록 균열의 제어가 어려워 진다는 것을 의미한다. 그러나 이러한 노치 장약공 주변의 응력상태는 장약공경, 노치의 길이, 노치의 형태, 폭약의 종류에 따라 변화될 수 있을 것으로 기대된다.

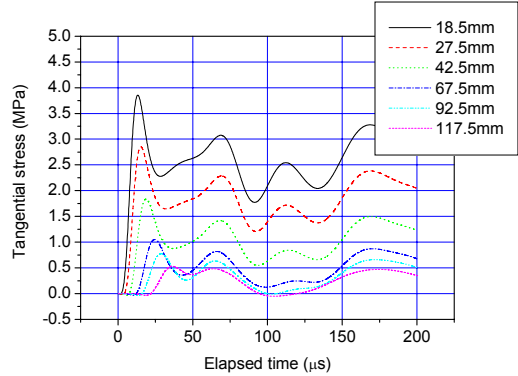


Fig. 5. Tangential stress-time histories at specific positions toward upper boundary.

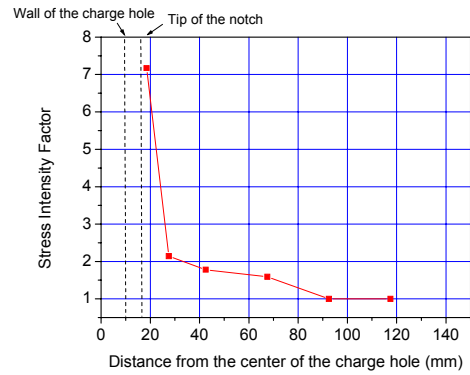


Fig. 6. Stress intensity factor along the distance from the the center of the charge hole.

4. 결론

노치 장약공을 이용한 균열제어발파의 설계에 필요한 기초자료를 확보하기 위하여 원형 암반내에 노치 발파공을 모델링하여 동적파괴과정해석을 수행하였다. 먼저 노치장약공의 기폭에 의한 암반내 응력상태를 분석하기 위하여 파괴를 고려하지 않은 동탄성해석을 수행하였다.

암반의 동적파괴과정해석 결과, 발파하중이 가해진 후 10 μ s에서 장약공 노치의 주변에는 접선방향의 인장응력이 집중하고 노치의 첨단에 균열이 발생하였다. 경과시간 20 μ s에서 균열은 약 40mm 성장하였으며 노치의 첨단에 작용하던 집중인장응력은 성장하는 균열의 첨단을 따라서 이동하였다. 노치 장약공에 의하여 발생된 균열은 장약공 주변에서는 비교적 직선성을 보이나 외부 자유경계면에 가까워 질수록 거칠기 심해지고 있음을 보여주었다.

장약공의 노치가 암반의 동적파괴과정에 미치는 영향을 분석하기 위하여 파괴를 고려하지 않은 동적탄성해석의 결과로부터 최대주응력-시간이력곡선을 작성하였다. 특히 노치 선단의 주변에서 발생된 최대 접선방향응력은 28MPa이었으며, 이 수치는 평균인장강도의 5.6배에 해당된다. 응력확대계수와 중심으로부터 이격 거리의 관계로부터 장약공 노치선단 부근에서는 7 이상의 응력확대계수를 보이고 있으며, 거리에 따라 현저하게 감소하여 90mm 이후에는 수렴한다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부재원(교육인적자원부 학술조성 사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007 -030105003)

참고문헌

1. 정동호, 문상조, 안대진, 정원준, 김은관, 김동규, 2007,

발파공해 해소 및 여굴 최소화를 위한 선균열 암굴착 노치장비 개발에 관한 연구, 터널과 지하공간, Vol. 17, No. 3, pp. 216-224.
 2. 조상호, 양형식, 金子勝比古, 2004, SB발파에서 지발 뇌판의 기폭초기오차가 암반파괴과정에 미치는 영향, 터널과 지하공간, Vol. 14, No. 2, pp. 121-132.
 3. 최용근, 이정인, 2000, 장약공 노치와 장약홀더를 이용한 발파균열의 제어에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 37, No. 5 pp. 315-326.
 4. Cho, S.H., Nakamura Y. and Kaneko K., 2004, Dynamic fracture process of rock subjected to stress wave and gas pressurization, Int. J. Rock Mech. and Mining Sci., Vol. 41, No. 3, pp. 439.
 5. Fourny, WL, J.W. Dally and D.C. Holloway, 1978, Controlled blasting with ligmented charge holders, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstract Vol. 15, pp. 121-129.
 6. Nakamura Y, Matsunaga H, Yamamoto M and Sumiyoshi K, 1992, Blasting method for crack control by utilling charge holders, Kayaku, Vol. 53, No. 1, pp. 31-37.
 7. 椋木淳二, 大原直, 秋吉直義, 国武誠二, 1992, 新發破工法の開發, 잉그홀 비트, 잉그홀 블라스팅공법, 터널과 지하, 일본터널기술협회지, Vol. 23, No. 7, pp. 41-45.



조 상 호
 전북대학교 자원·에너지공학과
 조교수
 Tel : 063)270-4636
 E-mail : chosh@chonbuk.ac.kr



박 승 환
 전북대학교 자원·에너지공학과
 석사과정
 Tel : 063)270-4636
 E-mail : twoc011@chonbuk.ac.kr



김 광 엽
 한국건설기술연구원 지하구조물연구실
 Tel : 031)910-0225
 E-mail : kimky@kict.re.kr



Nakamura Yuichi
 Yatsushiro National College of
 Technology, Japan, Professor
 Tel : 81-965-53-1334
 E-mail : nakamura@as.yatsushiro-nct.ac.jp



Kaneko Katsuhiko
 Hokkaido University, Japan,
 Professor
 Tel : 81-11-706-6322
 E-mail : kaneko@geor.eng.hokudai.ac.jp