노치 형상과 장약밀도 변화에 따른 균열 전파 양상에 관한 수치 해석적 연구

박승환*, 조상호, 김승곤(전북대학교 자원·에너지공학과)
김동규, 김광염(한국건설기술연구원)

1. 서론

발파는 암반터널 또는 지하공동 폐기물 처분시설의 건설 등의 토목, 건축분야에서 암반에 대한 굴착 및 해체방법으로써 널리 사용되고 있다. 그러나 발파 시 지발당 장약량의 증가로 인한 발파공해와 여굴의 발생 등이 문제가 되고 있다. 실제 터널현장에서 지발당 장약량 증가 등과 같은 이유로 터널 내에서 여굴은 필연적으로 발생하는데 과다한 여굴이 발생할 때 그로인한 버럭 처리량의 증가, 추가 지보재 발생의 경제적 손실 뿐 아니라 터널주변 암반의 손상대가 크게 발생하여 터널자체의 안정성에도 나쁜 영향을 미친다. 이러한 단점을 보완하기 위해 화약 발파 시 인위적으로 응력을 집중시켜 주변암반의 손상을 최소화 시키면서 매끄러운 파단면을 만듬으로써, 일반적으로 야기되는 문제점들을 개선할 수 있다. 특히 터널발파의 최외곽공과 같이 균열제어가 중요시 취급되는 부분에서는 노치를 이용한 발파균열의 제어는 굴착되는 영역을 최적하여 여굴이나 미굴의 발생을 최소화 시켜 줄 수 있다.

이러한 제어발파의 효과를 높이고, 정밀한 굴착 면을 얻기 위해서 만든 노치를 가지는 특수한 형태의 장약공이나 장약홀더를 이용한 연구는 국내·외에서 많이 수행되고 있다(정동호 외, 2008; 조상호 외, 2008; 김광염 외, 2008; Nakamura 외, 1992). 이 연구들은 인위적으로 발파공에 노치형태의 선균열을 주어 응력집중이 선균열 쪽으로 유도가 가능하기 때문에 원하는 파단면을 생성할 수 있음을 이론적, 실험적으로 입증하였다. 최근에는 노치발파공실험을 통하여 발파후 공시체의 파단면 평가(그림1)에 대한 실험이 수행되었다(김광염, 정동호외, 2008). 그러나 아직까지 노치의 길이와 개구 폭(각도) 그리고 장약밀도에 따른 균열제어 효과에 대한 실험 및 이론적인 자료는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 노치형상의 변화를 고려한 동적파괴해석법(DFPA)을 구축하여 노치길이와 노치개구 폭 및 장약지수가 균열발생 및 성장에 미치는 영향에 대하여 수치실험을 통해 평가하였다.

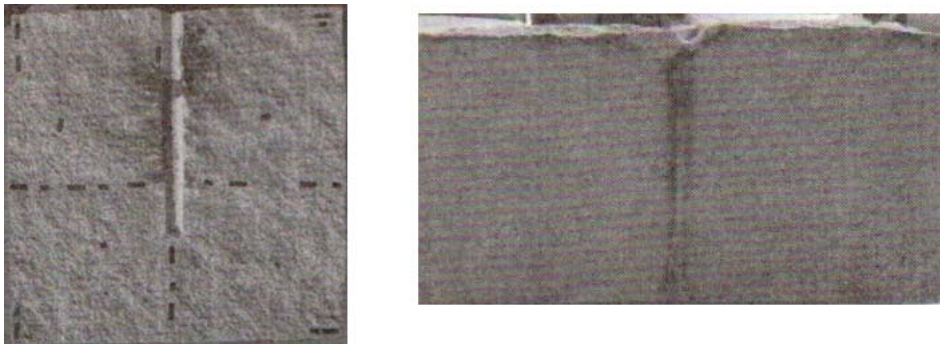


그림1. 노치장약공을 이용한 발파실험후 파단면

2. 노치 장약공을 이용한 암반의 동적파괴과정 해석조건

2.1 해석모델

해석모델은 그림1에 보여주는 것과 같이 외곽경계가 사각 모델의 경우 반사파의 영향으로 균열진전방향이 최단거리 쪽으로 균열이 진전된다. 이는 노치에 의한 균열제어효과를 분석하기에 적절하지 않다. 그러므로 외곽경계를 장약공으로부터 모든 거리가 동일한 직경이 1m의 원형공을 적용하였고, 내부경계는 모델의 중심부를 기준으로 양쪽의 날개모양의 노치를 가진 직경 50mm의 원형공으로 한쪽의 노치길이가 10mm이고, 노치개구 폭이 13mm로 실규모 발파시험과 유사한 형태로 모델링하였다(그림2). 요소크기가 파괴과정에 미치는 영향을 최소화하기위해서 장약공 주변은 1mm이내의 크기로 세분화하고, 전체 요소수를 줄이기 위하여 외곽영역으로 갈수록 요소의 크기가 증가하도록 작성하였다. 해석모델의 절점수는 7254개, 요소수는 14148개이며, 계산시간증분은 0.1μs로 설정하였다.

균열의 성장 방향이나 크기에 대해 정밀한 제어를 성취하기 위하여 본 연구에서는 노치 장약공에서의 노치 형태에 따른 균열전파양상과 주응력 분포 등을 분석하기 위하여 (표1)과 같이 모델을 설정하였다. CASE Ⅰ은 노치의 길이에 의한 영향을 비교·분석하기위하여 설정하였으며, CASEⅡ는 노치개구 폭의 길이에 따른 영향을 비교·분석하기위하여 모델을 설정하였다. 또한 장약지수에 따른 영향을 비교·분석하기 위하여 CASEⅢ과 같이 장약지수를 다르게 설정하여 수치실험을 수행하였다.

표1. 해석조건에 따른 모델정보

CASE	해석조건	모델 유형	노치 길이 (mm)	노치 개구폭 길이 (mm)	장약지수
CASE Ⅰ	노치 길이	Model 1	5	13	4.2
		Model 2	10	13	4.2
		Model 3	15	13	4.2
CASE Ⅱ	노치 개구폭 (각 도)	Model 4	10	8.5	4.2
		Model 5	10	13	4.2
		Model 6	10	17	4.2
CASE Ⅲ	장약지수	Model 7	10	13	3.5
		Model 8	10	13	4.2
		Model 9	10	13	5.0

2.2 장약조건

장약공벽에 작용하는 폭발하중은 장약실내의 폭발생성가스를 등엔돌피팽창으로 가정하여 JWL 상태방정식으로 적용하였다.

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

여기서 V는 장약공과 폭약의 체적의 비이다. 이 식은 장약공의 체적변화에 따른 압력변화를 표현한다. 본 해석에서는 노치를 이용한 발파실험을(한국건설기술연구원) 고려하여 에멀젼계 폭약의 JWL변수를 사용하였다 (Cho외, 2004).

표2. 에멀젼계 폭약의 JWL 변수

Parameters	Value
A (GPa)	351
B (GPa)	5.7
C (GPa)	1.2
R_1	4.0
R_2	0.9
ω	0.35

해석모델에서 사용된 암반은 압축강도 178.5MPa, 인장강도 8.5MPa, 밀도 2140kg/m^3, 탄성계수 49.0GPa, 포아송비 0.25, P파속도 3235m/s을 가정하고 있다.

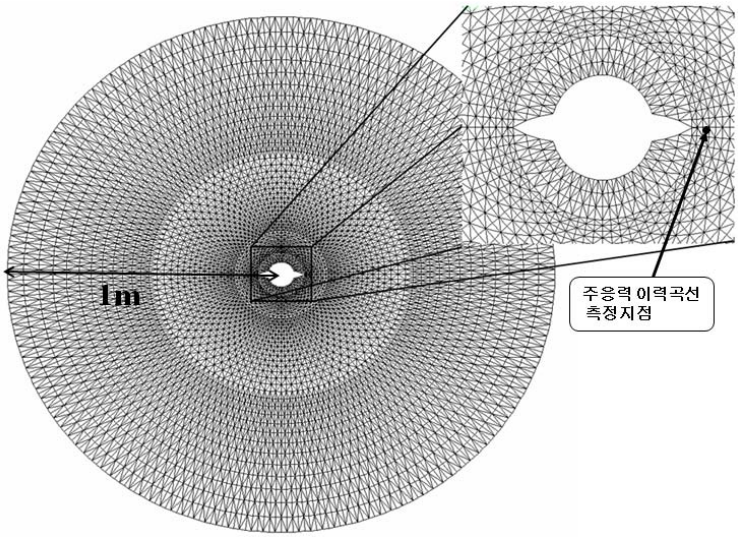


그림2. 노치공을 이용한 유한요소 경계

3. 노치를 이용한 장약공의 암반발파 동적파괴과정해석

노치장약공을 이용한 발파공법은 장약공 노치의 선단부에 인장응력을 집중시켜 균열의 발생위치를 인위적으로 제어하여 균열의 진전방향과 탁월균열의 수를 제어하게 된다.

이러한 노치를 이용한 발파제어기술은 콘크리트 일부분의 제거를 포함하여 실용적인 적용으로 주목되어지고 있다. 균열의 성장 방향이나 크기에 대해 정밀한 제어를 성취하기 위하여 본 연구에서는 노치의 형태와 장약조건 변화에 의한 순수한 균열제어효과를 알아보기 위하여 외곽경계부를 연속경계부로 설정하여 반사파의 의한 간섭을 방지했다. 노치장약공에서 노치의 모양을 고려하거나 장약조건을 고려하여 노치장약공 주변의 균열 면이나 응력분포를 비교・분석하였다. 또한 응력확대계수를 도입하여 길이와 개구 폭, 장약지수의 증가에 따른 효과를 분석하였다.

3.1 노치 형태에 따른 균열 제어효과

3.1.1 노치 길이에 따른 균열 제어효과 비교·분석

노치 장약공에서의 발파제어능력을 가시화하여 비교・분석하기 위하여 동적파괴과정해석 코드(DFPA)를 이용한 소프트웨어를 이용하였다. 먼저 노치의 길이에 따른 효과를 비교・분석하기 위해 CASE I 한쪽노치의 길이가 10mm (Model 2)인 장약공을 기준으로 모델링하여 한쪽 노치의 길이가 5mm (Model 1)인 장약공과 15mm(Model 3) 장약공에 대하여 동적파괴과정해석을 이용하여 비교・분석하였다.

먼저 노치길이에 따른 효과를 분석하기 위하여 노치선단에서 1mm 떨어진 지점(Fig. 1 참조)에서 파괴를 고려하지 않은 동탄성 해석을 수행, 계측하여 응력확대계수를 도입하여 Fig.2에 그래프로 나타내었다. 여기서 응력확대계수는 모든 조건이 동일시 하기위하여 원형공에서도 1mm 떨어진 지점에서 파괴를 고려하지 않은 동탄성해석을 수행하여 최대 주응력값을 구하고 각 조건에서의 최대주응력값을 구하여 식1)과 같이 나눈값으로 정의한다.

SIF = 응력 확대계수 ($Stress\ Increment\ Factor$)

$$SIF = \frac{\sigma_n}{\sigma}$$

σ_n = 노치팁 주변에서의 최대응력값 — 식 1)

σ_c = 일반공 주변에서의 최대응력값

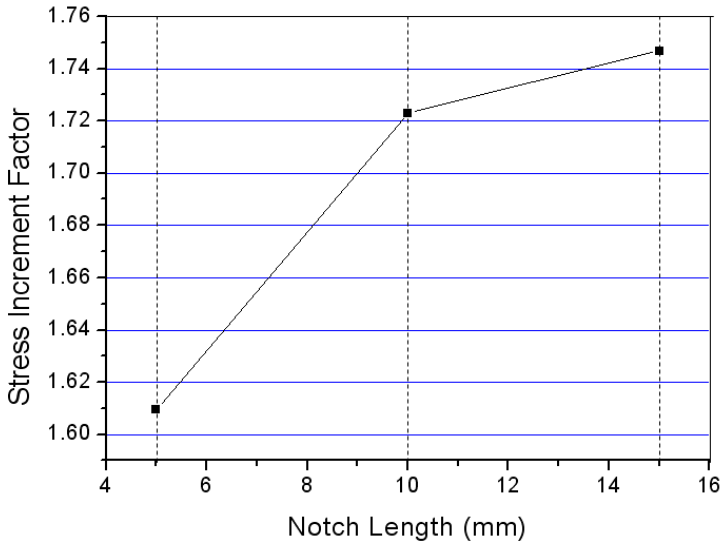
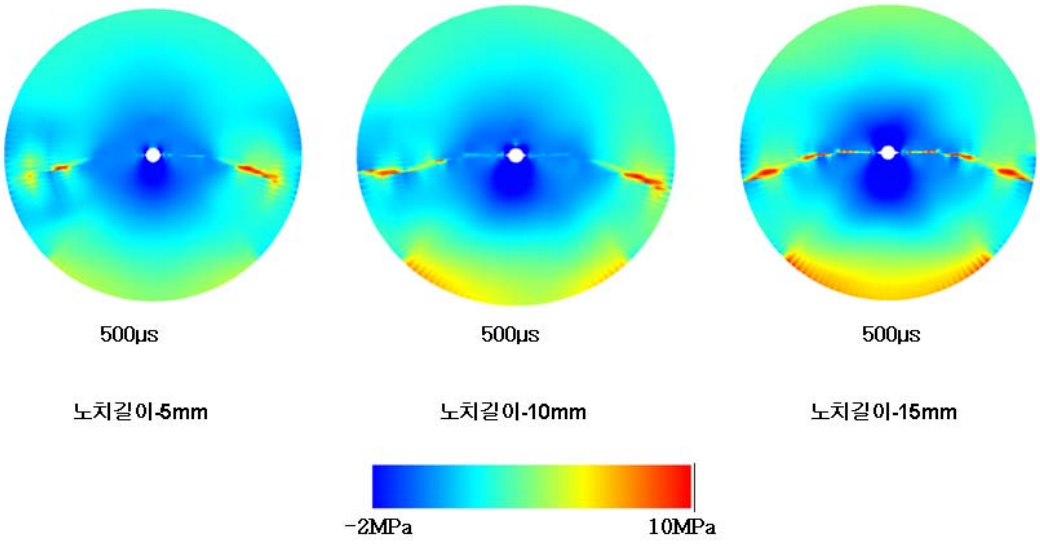


그림3. 노치길이의 변화에 따른 응력확대계수

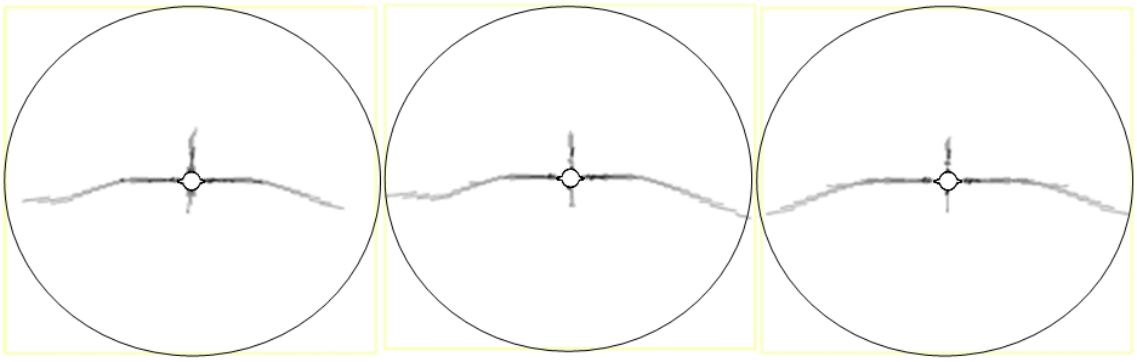
위의 그래프를 보면 노치길이에 의한 영향을 보면 노치길이 10mm이후 증가율이 급격히 감소하는것을 볼수있다. 이 응력집중에 균열 진전 양상 과 주응력 분포를 살펴보기 위하여 노치길이를 5mm(Model 1),10mm(Model 2),15mm(Model 3)로 설정하여 파괴를 고려한 해석을 수행하였다.

Fig. 3는 Model 1, Model 2, Model 3에 대하여 파괴를 고려한 동적 파괴 수치실험에서500μs 일때의 주응력분포를 보여주고있다. 여기서 적색(+)은 인장응력을 의미하며 청색(-)는 압축강도를 의미한다. 해석 결과 Model 2의 노치 선단에서 인장응력이 발생하여, 균열의 선단을

따라 인장응력이 집중되어 균열이 자유면까지 도달하였다. 그러나 Model 1에서는 노치선단에서 발생한 균열이 진전하였지만 자유면까지는 도달하지 못하였고, Model 3에서는 model 2에서와 같이 자유면까지 도달하는 결과가 나타났다. 이는 노치길이가 13mm에서 효과적으로 균열이 제어됨을 의미한다.



(a) 노치길이의 변화에 따른 주응력분포 비교 (500μs)



(b) 노치길이의 변화에 따른 균열진전양상 비교 (500μs)

그림4. 노치길이의 변화에 따른 주응력분포 와 균열진전 양상 비교

3.1.2 노치 각도(개구 폭)에 따른 균열제어효과 비교·분석

노치 개구 폭의 길이에 따른 효과를 살펴보기 위하여 CASEⅡ와 같이 모델을 설정하여 길이에 의한 효과(CASEⅠ)와 같이 노치선단에서 1mm 떨어진 지점(Fig. 1 참조)에서 파괴를 고려하지 않은 동탄성 해석을 수행, 계측하여 응력확대계수를 도입하여 Fig. 4에 나타내었다. 노치길이가 8.5mm인 경우에는 최대주응력에 대한 응력확대계수가 1.45정도 나타났고, 13mm에서는 1.72의 큰폭의 증가율을 보였다. 그러나 17mm의 경우 1.79정도 나타나 13mm

이후에는 증가율이 감소하는 경향이 나타나는 것을 확인하였다. 이에 대한 응력집중에 의한 효과를 분석하기 위하여 파괴를 고려한 수치해석 실험을 수행하였다.

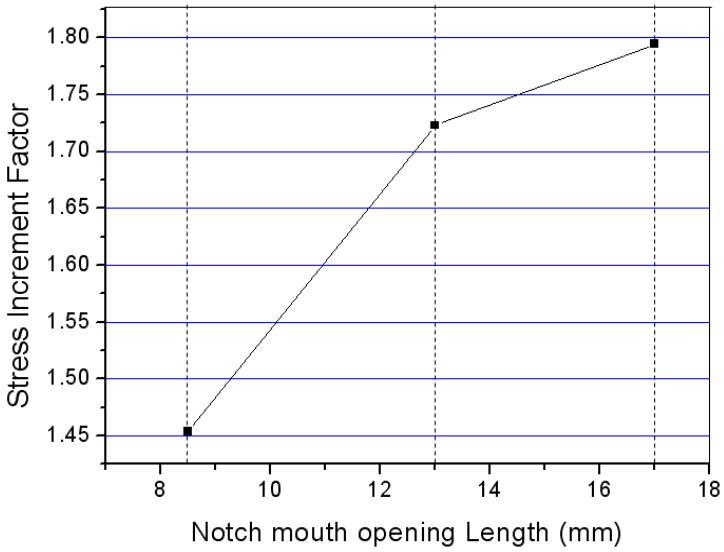


그림5. 노치개구 폭의 변화에 따른 응력확대계수

노치의 폭의 따른 균열제어효과의 비교·분석은 노치의 형태에서 길이를 10mm로 고정시키고, 노치개구 폭이 13mm(Model 5)인 장약공을 기준으로하고 다른 모델들은 노치개구 폭의 길이를 8.5mm(Model 4),17mm(Model 6)으로 다르게 설정한 장약공에 대하여 파괴를 고려한 동적파괴과정해석(DFPA)을 수행하였다.

해석 결과 Model 5에서는 노치 선단에서 인장응력이 발생하여, 균열의 선단을 따라 인장응력이 집중되어 균열이 자유면까지 도달하는 결과를 보여줬지만, Model 4, Model 6에서는 두 모델전부 자유면에 도달하지 못하는 결과를 보여주고있다. 이러한 결과는 노치 개구폭의 길이(각도)가 증가함에 따라 노치팁 선균열의 집중에 의한 균열의 진전속도가 증가되지만, 노치 개구폭 기준이상이 되면은 균열진전 속도가 감소됨을 보여주고있다. 이는 기준이상의 노치 개구폭은 균열제어를 저해한다는것을 의미한다.

3.2 장약지수에 따른 균열제어 효과

3.2.1 노치장약 공에서의 장약지수에 따른 균열제어 효과 비교·분석

노치장약 공에서의 장약지수에 따른 균열제어 효과를 알아보기 위하여 CASE Ⅲ와 같이 모델을 설정하여 동적파괴과정해석(DFPA)을 수행하였다. 위와 동일한 방법(CASE Ⅰ,CASE Ⅱ)으로 파괴를 고려하지 않은 동탄성 해석을 측정한결과, 장약지수가 작아짐(장약지수는 장약경의 면적을 폭약의 면적으로 나눈지수를 말함)에 따라 응력확대 계수는 증가하였다. 그러나 CASE Ⅰ,CASE Ⅱ의 경우와 같이 장약지수 3.5에서 4.2로 증가함에 따라 응력확대계수는 거의 같은 비율을 나타났다. 그러나 4.2이상에서의 급격하게 감소하는 경향이 나타났다.

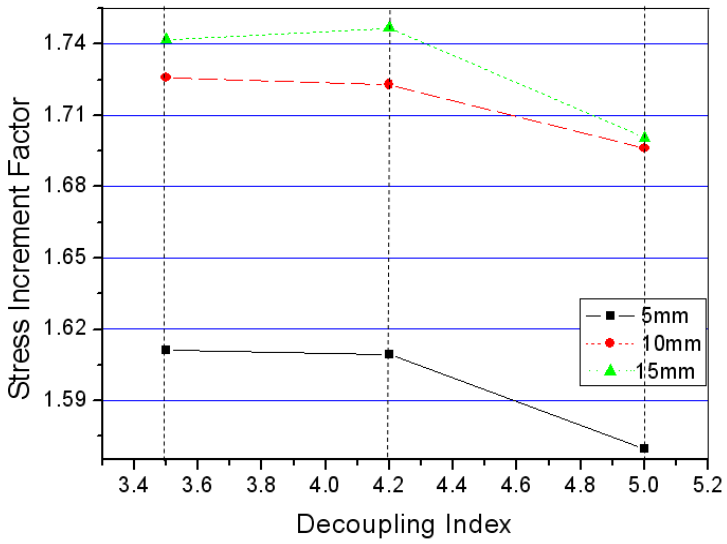


그림6. 장약지수의 변화에 따른 응력확대계수

이러한 응력집중에 따른 균열진전형태를 분석하기 위하여 파괴를 고려한 동적파괴과정해석(DFPA)을 수행하였다. 노치의 모델 기준모델인 Model 2를 적용하였고, 다만 장약지수를 3.5와 4.2, 그리고 5.0으로 나누어 4.2를 기준으로 장약지수가 작아졌을때와 커졌을때, 500μs 일때의 주응력 분포와 균열 진전 형태를 대하여 비교 분석하였다. 기준인 4.2일때의 장약지수에서는 노치팁에서 선균열이 생성되고, 그 선균열을 따라 응력이 집중되면서 균열이 진전되어 자유면에 도달하는 결과를 가져왔으나, 폭약이 적은 5.0일때를 보면 자유면까지 도달되지 못한 결과를 가져왔다. 반면에 폭약이 많은 3.5인 경우에는 강한 폭발력으로 인하여 노치팁에 의한 균열이외에 장약공 상하부에서도 균열이 발생하였다. 이는 노치를 이용한 발파의 경우라도 기준이상의 장약시에는 노치에 의한 균열 이외에 다른 균열이 발생하였다. 이는 과대한 장약량을 장전 시에는 균열제어효과가 나타나지 않음을 의미한다.

4. 결론

발파시 지발당 장약량의 증가로 인한 발파공해와 여굴의 발생 등이 문제가 되고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 제어발파의 효과를 높이고, 정밀한 굴착 면을 얻기 위해서 만든 노치를 가지는 특수한 형태의 장약공에 대하여 연구가 수행되어지고 있다. 그러나 노치의 길이와 각도, 장약밀도에 따른 균열제어 효과에 대한 이론적인 자료가 미비하다. 본 연구에서는 노치를 이용한 새로운 기법 등을 개발하기 위한 전 단계로써 노치에 대한 균열제어 평가에 역점을 두었다. 노치효과의 기초 자료획득을 목적으로 노치장약공을 가지는 모델실험을 동적파괴과정분석(DFPA) 프로그램을 이용하여 수치 해석하였다.

먼저, 분석모델의 노치의 길이와 노치개구 폭과 장약지수를 다르게 하여 파괴를 고려하지 않은 동탄성해석을 수행하였다. 측정위치는 노치팁에서 1mm 떨어진 지점을 기준으로 하여 설정하여 측정하였다. 이에따른 결과를 응력확대계수를 도입하여 비교해본결과 노치의 길이, 노치개구폭이 증가할수록, 장약지수가 감소할수록 응력확대계수는 증가하였다. 그러나 노치

길이는 10mm, 노치개구 폭의 길이는 13mm이상, 장약지수의 경우는 4.2이상에서는 응력확대계수가 급격히 감소하는 경향을 보였다. 또한 노치형태와 장약지수의 변화에 따른 영향을 분석하기 위하여 동적파괴과정해석(DFPA)를 이용한 수치해석을 통하여 주응력분포 및 균열진전형태를 비교·분석하였다.

1) 노치의 길이변화에 의한 효과의 경우에는 기준모델인 노치길이 10mm(Model 2)에서는 노치선단을 따라 응력이 집중되어 균열이 발생하고 이 선균열을 따라서 응력이 집중됨에 따라 균열이 진전되어 자유면까지 도달하였다. 하지만 기준모델 보다 작은 5mm(Model 1)에서는 자유면에 도달하지 못하였고, 15mm(Model 3)에서는 기준모델과 비슷한 응력분포및 균열패턴을 가져왔다. 이는 10mm의 노치길이에서 균열제어가 효율적임을 보여준다.
2) 노치개구 폭의 효과를 알아보기 위하여 노치개구 폭을 8.5mm(Model 4), 13mm(Model 5), 17mm(Model 6)에 대하여 모델을 설정하고 동적파괴과정해석을 이용한 수치해석을 수행하였다. 그 결과 기준모델인 13mm인 경우에서만 균열이 자유면에 도달하였고, 그 이외의 8.5mm와 17mm에서는 자유면에 도달하지 못하는 결과를 가져왔다. 이는 노치개구 폭의 길이가 균열진전속도등에 영향을 미치는 중요한 인자중 하나임을 의미하며, 이 실험에서는 13mm인 경우에 효과적임을 나타났다.
3) 노치를 이용한 발파공에서의 장약지수를 변화하였을 때의 영향을 분석하기위하여, 장약지수가 4.2인 모델(Model 8)을 기준으로 하여 장약지수가 3.5인 경우와 5.0인 경우에 대하여 비교・분석하였다. 이 경우 5.0에서는 선균열에서 응력집중에 의한 균열진전이 자유면에 도달하지 못하였다. 3.5에서는 노치선단에서의 균열진전 뿐만아니라, 장약공 상하부에서 잉여의 균열이 발생하여 최종적으로 4등분되었다. 이로써 장약지수에가 약 4.2정도에서 가장 효율적인 결과가 나타남을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 07첨단도시 개발사업(과제번호: 07도시재생A03 및 07A060000220)에 의해 수행되었습니다.

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. pp. 216-224
2. 김광염, 김동규, 김광식, 김창용, 정동호, 문상조, 2008 디지털 영상측량에 의한 노치발파공 파단면 평가, 한국 터널공학회 No. 1, pp. 49-55
3. 조상호, 박승환, 김광염, 나카무라 유이치, 카네꼬 카츠히꼬, 2008, 노치 장약공을 이용한 발파제어에 관한 수치해석적 연구, 화약・발파공학회, Vol. 26, No. 1, pp. 49-55
4. 박승환, 조상호, 김광염, 김동규, 나카무라 유이치, 카네꼬 카츠히꼬, 2008, 노치 형상의 변화에 따른 균열 전파 양상에 관한 연구, 화약・발파공학회,
5. 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. 96m 41, No. 3, pp. 439.