화약・발파(대한화약발파공학회지)
제36권 제3호, 2018년 9월, pp. 1~9

EXPLOSIVES & BLASTING, Vol. 36, No. 3, 2018, pp. 1-9
Journal of Korean Society of Explosives & Blasting Engineering

콘크리트 블록에서 인공절리에 따른 발파영향 평가

노유송[1], 민경조[2], 오세욱[2], 박세웅[2], 석철기[1], 조상호[2], 박 훈[1]*

Evaluation of Blast influence by Artificial Joint in Concrete Block

You-Song Noh, Gyeong-Jo Min, Se-Wook Oh, Se-Woong Park,
Chul-Gi Suk, Sang-Ho Cho, Hoon Park

Abstract This study was conducted to evaluate the influences of the angle of artificial joints, the distance between the artificial joints and the blast hole, and the number of artificial joints on the pressure wave propagation, crack propagation, and blast wave velocity. The evaluation was conducted numerically by use of the Euler-Lagrange solver supported by the AUTODYN, which is a dynamic FEM program. As a result, it was found that the blast wave velocity was decreased most rapidly as either the distance between the artificial joint and the blast hole was decreased or the angle of the artificial joint was increased. In contrast to the case of no artificial joint, the amount of attenuation of the blast wave velocity was considerably large when an artificial joint was present. However, the effect of the number of artificial joint on the attenuation of the blast wave velocity was negligible under the given condition.

Key words Artificial joint, Numerical analysis, Concrete block, AUTODYN, Blast velocity

초 록 본 연구는 인공절리의 경사, 인공절리와 발파공 간의 거리, 그리고 인공절리의 수가 압력파동의 전파, 균열의 전파, 그리고 발파파동의 속도에 미치는 영향을 평가할 목적으로 수행되었다. 이 평가작업은 동적 FEM 프로그램인 AUTODYN 상에서 지원되는 Euler-Lagrange solver를 사용하여 수행되었다. 주요 결과로서 발파파속은 인공절리와 발파공 간의 거리가 가깝거나 인공절리의 경사가 증가할수록 더 빠르게 감소하는 것으로 나타났다. 인공절리가 없는 경우에 비해 절리가 하나라도 존재하는 경우에는 발파파속의 감쇠가 상당히 크게 발생하였다. 하지만 인공절리의 수가 발파파속의 감쇠에 미치는 영향은 주어진 조건 하에서는 미미한 수준이었다.

핵심어 인공절리, 수치해석, 콘크리트 블록, AUTODYN, 발파속도

1. 서 론

현재 도심지는 공간을 효율적으로 사용하기 위해 주요 사회기반시설들을 지하에 매설하고 있으며, 이에 따른 다양한 지하 공간이 요구된다. 지하 공간 확보를 위해 화약을 이용한 발파공법이 경제성, 시공성 면에서 우수하여 가장 효과적인 방법으로 시행되고 있으나(Berta, 1994), 진동과 소음에 의한 다양한 문제점을 일으킬 수 있어 발파작업을 수행하는 과정에서 큰 제약으로 작용하고 있다(Jung et al., 2011). 이러한 진동 및 소음과 같은 문제를 보완하기 위해 스무스블라스팅과 같은 조절발파가 사용되며, 와이어쏘, 워터젯 등 기계적인 장비를 이용하여 인공절리를 형성한 후 발파작업을 수행하는 방법이 적용되고 있다(Park et al., 2009; Kim, 2012; Oh et al., 2012; Lee et al., 2015).

본 연구에서는 인공절리를 터널 굴착에 적용하기

1) ㈜코리아카코
2) 전북대학교 자원・에너지공학과
* 교신저자 hujin@jbnu.ac.kr
접수일 : 2018년 9월 3일
심사 완료일 : 2018년 9월 7일
게재 승인일 : 2018년 9월 17일

위한 기초실험 해석으로 콘크리트 블록에 다양한 인공절리를 적용하여 수치해석을 수행하였다. 인공절리의 경사, 인공절리와 발파공 사이의 거리, 인공절리 수를 달리하여 AUTODYN를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석의 결과로 압력전파, 균열전파에 대해 평가하였으며, 콘크리트 블록 모델 표면에 게이지를 설치한 후 산출된 발파속도를 비교 분석하였다.

2. 수치해석

2.1 해석 모델

비선형성이 큰 동역학 문제를 해결하고 대변위와 대변형 문제에 적용되는 AUTODYN을 해석에 적용하였다. 해석모델은 콘크리트 블록, 폭약, 인공절리로 모형화하였고, 콘크리트 블록의 크기는 길이 2,000mm, 폭 1,500mm이며, 발파공은 ϕ45mm이다. 인공절리의 실제 형성 시 사용한 와이어-쏘의 절삭 폭을 기준으로 11mm로 산정하였으며, 인공절리의 길이는 800mm로 설정하였다. 해석변수로 인공절리 경사, 인공절리와 발파공 사이의 거리, 인공절리 수를 달리하여 해석하였다. 해석조건에 따라 Fig. 1과 같이 총 4회 해석을 수행하였으며, 해석조건은 Table 1과 같다. Case 1은 인공절리가 없는 조건으로 인공절리를 통과한 발파속도와 비교하기 위해 해석을 수행하였다. 발파속도는 발파 후 발생하는 압축파가 콘크리트 블록 모형을 통해 전파되는 압축파의 속도이다. 인공절리의 경사와 인공절리와 발파공 사이의 거리는 콘크리트 블록에 적용 가능한 최대치를 고려하여 결정하였다.

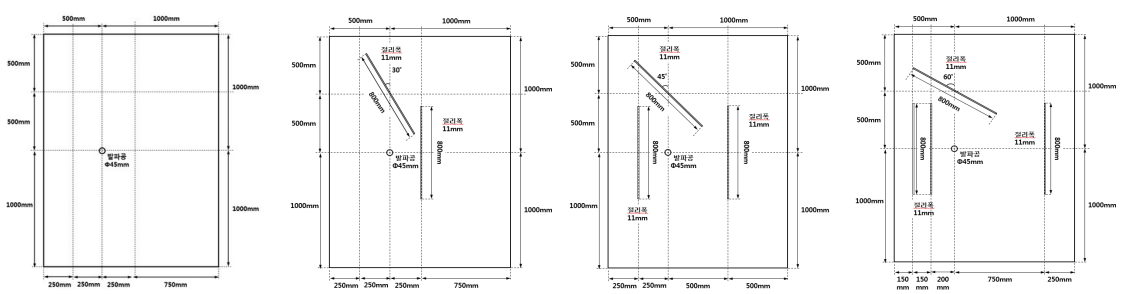
2.2 적용물성

Ridel (Riedel et al., 1999)에 의해 정립된 RHT(Reidel-Hermaier-Thoma) 콘크리트 모델은 일반적인 취성재료를 분석하기 위한 모델로 AUTODYN, LS-DYNA와 같은 프로그램에서 암석과 같은 취성재료의 물성 모델로 사용되고 있다. 특히 동적하중을 받는 콘크리트 모델링에 유용하며, 암석이나 세라믹 등 콘크리트 이외의 암석과 같은 취성재료 모델링에 사용된다. RHT model은 다공성 콘크리트 모델의 압력에 의한 거동을 해결하기 위해 Hermann(1969)이 제시한 식 (1)과 같은 $P-\alpha$ 상태방정식을 사용한다.

$$\alpha = \frac{v}{v_{solid}} = \frac{\rho_{solid}}{\rho} \tag{1}$$

여기서, α는 공극률, v는 부피, ρ는 밀도 이다.

AUTODYN은 zero pressure 상태에서의 서로 다른



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3 (d) Case 4

Fig. 1. Design of numerical model.

Table 1. Condition of numerical analysis

Case	Artificial joint angle (°)	Distance of between artificial joint and blast hole (mm)	Number of artificial joint (ea)
1	-	-	-
2	30°	250	-
3	45°	500	1
4	60°	750	2

내부 고체밀도와 공극밀도의 값을 제공하여 내부 공극률을 계산하여 해석에 사용한다. RHT concrete의 파괴면 식 (2)와 같이 압력 경화, 변형률 경화, 변형률 속도 경화, 손상에 따른 변형률 연화 및 전단강도의 감소의 영향을 고려하고 있다.

$$F_{RHTC} = \sigma_{eq} - Y_{TXC} \times F_{CAP(P)} \times R_{3(\theta)} \times F_{RATE(\epsilon)} \quad (2)$$

여기서, σ_{eq}는 등가응력, R_3은 인장, 압축 상태에 따른 기준면의 차이를 나타내기 위한 항이며, Y_{TXC}는 식(3)과 같다.

$$Y_{TXC} = f_C\left\{A(P^* - P^*_{spall}\, F_{RATE})^n\right\} \quad (3)$$

여기서, f_c는 공시체의 압축강도, A와 n은 각각 파단면을 정의하기 위한 상수와 지수, P^*와 P^*_{spall}은 압축강도에 의해 정규화된 압력과 동적파괴강도이다. F_{RATE}는 변형률속도의 계수이다. RHT concrete 모델에서 손상은 소성변형률의 축적에 의해 발생하며, 다음 식 (4)와 (5)로 정의 된다.

$$D = \sum \frac{\triangle \epsilon_p}{\epsilon_p^{failure}} \quad (4)$$

$$\epsilon_p{}^{failure} = D_1 (P^* - P^*_{spall})^{D_2} \quad (5)$$

여기서, D_1, D_2는 재료상수로 압력의 함수로 표현되는 재료 고유의 파괴변형률을 정의하기 위해 사용된다. 손상은 재료에 변형률 연화 및 전단강도의 감소를 유발한다. 파단면 및 전단강도는 다음 식(6)과 (7)에 의해 감소된다.

$$Y^*_{fracture} = (1-D)\, Y^*_{failure} + DY^*_{residual} \quad (6)$$

$$Y^*_{residual} = \min\left[B(P^*)^M,\, Y_{XTC} \times SFMAX\right] \quad (7)$$

Table 2. Parameter of the RHT model

Parameter	Value	Parameter	Value
Reference density	2.75(g/cm^3)	Shear modulus, G	1.670×10^4(MPa)
Porous density	2.52(g/cm^3)	Compressive strength, f_c	35.0(MPa)
Porous sound speed	2.92×10^3(m/s)	Tensile strength/Compressive strength, f_t / f_c	0.100
Initial compaction pressure	23.3(MPa)	Shear strength/Compressive strength, fs / fc	0.180
Solid compaction pressure	6.000×10^3(MPa)	Intact failure surface constant, A	1.600
Compaction exponent	3.000	Intact failure surface exponent, N	0.610
Bulk modulus, A_1	3.527×10^4(MPa)	Tens./Comp. meridian ratio, $Q_{2,0}$	6.805×10^{-1}
Parameter, A_2	3.958×10^4(MPa)	Brittle to ductile transition, BQ	1.050×10^{-2}
Parameter, A_3	9.040×10^2(MPa)	Elastic shear modulus	16.7(GPa)
Parameter, B_0	1.220	Elastic-plastic shear modulus	8.35(GPa)
Parameter, B_1	1.220	Elastic strength / f_t	0.700
Parameter, T_1	3.527×10^4(MPa)	Elastic strength / f_c	0.530
Parameter, T_2	0.000(MPa)	Fractured strength constant, B	1.600
Reference temperature	300(K)	Fractured strength exponent, M	0.610
Specific heat	6.540×10^2(J/kgK)	Compressive strain rate exponent, α	3.2×10^{-3}
Max. fracture strength ratio	1.000×10^{20}	Compressive strain rate exponent, δ	3.6×10^{-2}

Table 3. JWL, C-J Characteristics value (Emulsion)

A(GPa)	B(GPa)	R_1	R_2	ω
36.53	2.703	4.999	0.89	0.23

여기서, B와 M은 각각 압력에 따른 잔류 강도면을 정의하기 위한 상수와 지수이며, SFMAX는 Max fracture strength ratio로 잔류강도면의 한계를 설정하기 위한 파단면과의 비를 나타낸다. 아직까지 RHT concrete 모델의 매개변수를 결정하기 위한 실험은 압축강도 35MPa와 140MPa에 대해서만 수행되어, 현재 두가지 강도의 콘크리트에 대한 매개변수가 제안되고 있다. 본 해석에는 콘크리트 압축강도가 35MPa인 모델(Riedel et al., 1999)을 사용하였고, 해석에 사용한 물성은 Table 2와 같다.

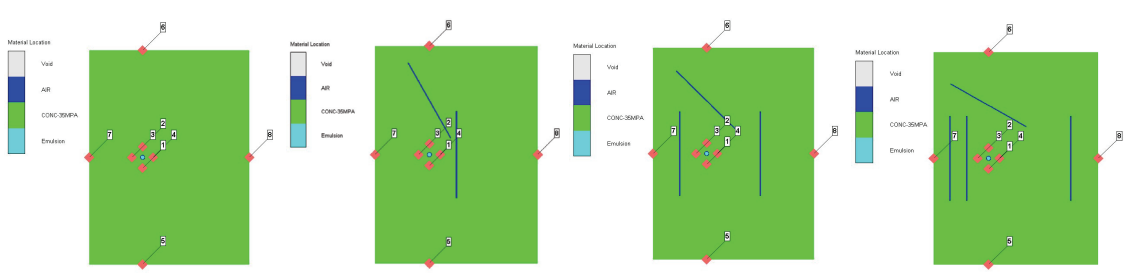
인공절리는 공기로 모델링하였다. 공기의 대기조건 부여를 위해 내부에너지를 표준대기 조건인 2.068×10^5J/kg을 적용하였고, 이상기체 상태방정식을 사용하였다. 해석에 사용된 폭약은 에멀전을 사용하였고, 높은 팽창성을 가진 거동해석에 사용되는 JWL (Jones-Wilkins-Lee) 상태방정식을 사용하였다. JWL 상태방정식은 식 (8)과 같이 폭발 물질을 나타내기 위해 사용되는 경험적 식이다.

$$P_{JWL} = A\left(1-\frac{\omega\eta}{R_1}\right)e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B\left(1-\frac{\omega\eta}{R_2}\right)e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega\rho e \quad (8)$$

여기서, ρ는 밀도, ρ_0는 기준밀도, $\eta=\rho/\rho_0$, e는 단위 질량 당 내부에너지, A, B, R_1, R_2, ω는 경험적으로 파생된 상수이다. 해석에 사용된 에멀전의 JWL 계수와 C-J 특성 값은 Table 3과 같다 (Sanchidrián et al., 2015).

2.3 해석조건

Fig. 2는 수치해석에 사용한 해석 case이며, Euler-Lagrange 2D solver를 적용하였다. 해석에 사용한 폭약의 약경은 ϕ32mm를 사용하여 발파공의 중심에 일치시켜 모형화하였다. 발파공과 폭약사이의 공간은 공기를 이용하여 모형화하였다. 고체와 유체가 함께 포함된 형태의 문제를 해결하고자 할 경우, 고체 부분에는 Lagrange solver를 적용하고, 기체, 유체 그리고 대변형을 갖는 고체에는 Euler solve를 적용하여 여러 가지 물리 현상이 복합된 Multi-physics 문제를 해결한다. 본 해석에 사용한 폭약과 인공절리를 모사하는 공기 부분은 Euler mesh를 이용하였고, 콘크리트 블록의 경우 Lagrange mesh를 이용하여 모형화하였다. 콘크리트 블록의 외부 경계는 자유면으로 모사하였으며, 콘크리트 블록 외부 경계와 자유면 사이에는 공간경계에서의 반사 문제를 해결하기 위하여 AUTODYN Eulerian 코드에서는 flow out 경계조건을 제공하고 있다. 해석에서 콘크리트 블록 주위의 경계면은 무한한 유동흐름을 위해 flow out 경계조건으로 설정하였다. 발파 후 발파속도 및 발파압력을 측정하기 위한 게이지 위치는 Fig. 2와 같다. 발파압력의 초기 전파를 측정하기 위해 발파원에서 사방으로 50mm 떨어진 거리에 4개의 게이지를 설치하였고, 발파원과 수직인 방향으로 콘크리트 블록 경계에 게이



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3 (d) Case 4

Fig. 2. Numerical model.

지를 설치하여 인공절리 모사 구간을 통과한 후 발파속도를 측정하였다.

2.4 수치해석 결과

모든 case에 대해 발파공과 50mm 떨어진 1번 게이지에서 측정된 발파속도와 발파압력의 시간이력 곡선은 Fig. 3과 같다. 수치해석 후 모든 case의 게이지에서 측정된 발파속도는 Table 4와 같다. 해석결과 각 case 별 동일한 이격거리를 갖는 1~4 게이지에서 측정된 발파속도의 값이 거의 유사하게 나타났으며, 인공절리가 없는 case 1의 경우 발파공과 자유면사이의 거리가 1,000mm로 동일한 게이지 5, 6, 8번에서 모두 4.03m/s로 측정되어 발파속도의 전파가 균일하게 발생하였다고 판단한다.

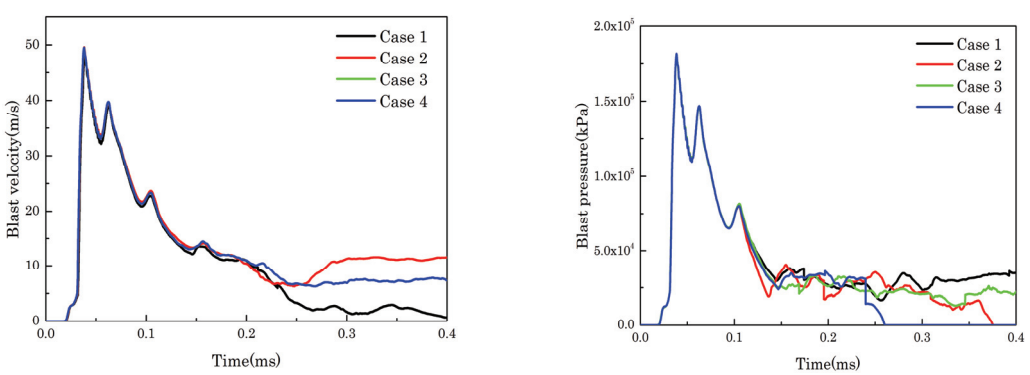
3. 해석 결과

3.1 압력전파

수치해석 시 발생한 발파압력은 발파원은 중심으로 방사상으로 전파되어 진행되다 인공절리 구간에 도달할 때 반사인장파가 발생하였다. 이는 인공절리면이 자유면 역할을 하여 매질차이에 의한 임피던스 차이에 의해 반사인장파가 발생한 것으로 판단한다. 발파압력의 전파는 해석이 진행됨에 따라 인공절리 구간이 폐합되어 인공절리 앞의 콘크리트 블록 요소가 다음 콘크리트 블록 요소에 접촉하였을 때 발생하였다. 인공절리 경사를 모사한 구간은 인공절리 경사방향에 따라 발파공과 수직이 되는 절리구간으로 발파압력이 전파되었으며, 그 구간에서 반사인장파 및 압력전파가 발생하였다(Fig. 4).

3.2 균열전파

Fig. 5는 case 별 콘크리트 블록의 균열전파 모습이다. 인공절리가 없는 case 1의 콘크리트 블록의 균열은 발파공을 기준으로 방사형으로 균열이 신장하다 저항선 방향으로 균열이 우세하게 발생하였다. 인공절리가 형성되어 있는 case 2~4의 경우 발파원과 인공절리 앞 구간에서 균열이 우세하게 발생하였다. 이는 고체물질을 따라 진행하는 압축파가 자유면에 도달할 때 공기와의 임피던스 차이로 인해 인장응력파



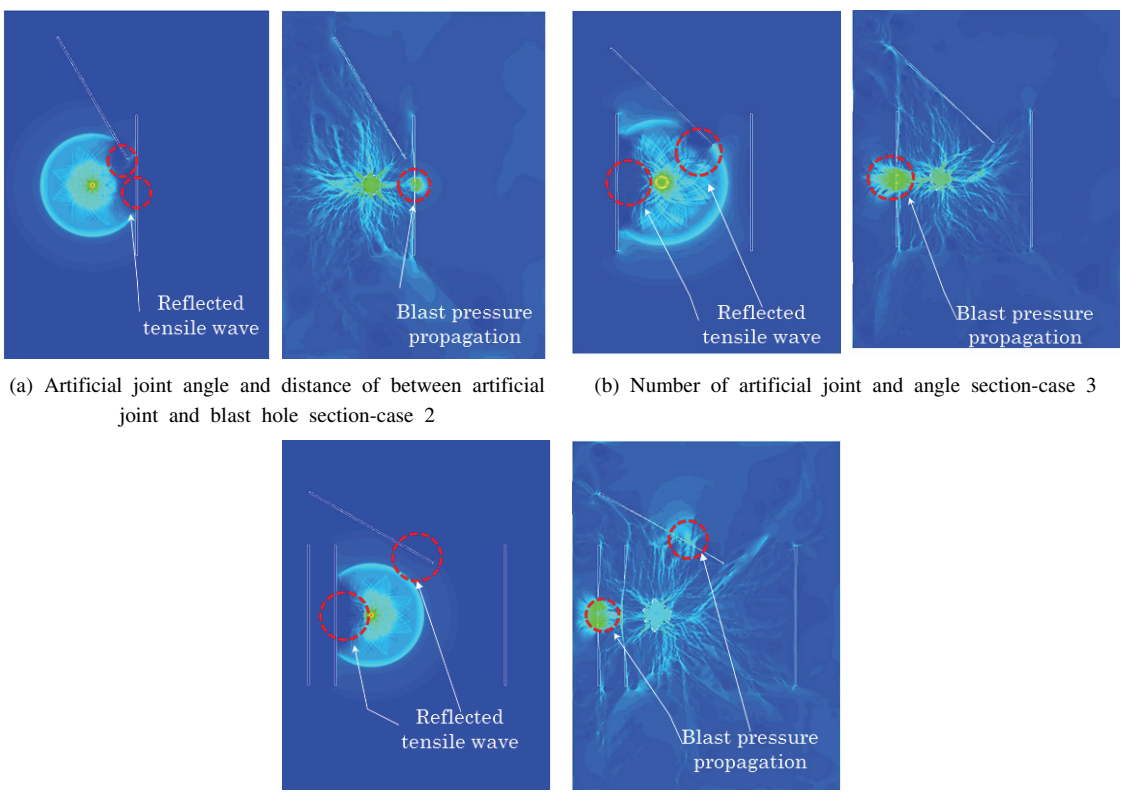
(a) Blast velocity (b) Blast pressure

Fig 3. Time history graph.

Table 4. Result of numerical analysis of maximum blast velocity for each case

Gauge / Case	Gauge 1 (m/s)	Gauge 2 (m/s)	Gauge 3 (m/s)	Gauge 4 (m/s)	Gauge 5 (m/s)	Gauge 6 (m/s)	Gauge 7 (m/s)	Gauge 8 (m/s)
1	49.50	49.07	49.57	49.17	4.03	4.03	9.16	4.03
2	49.50	49.08	49.57	48.80	4.06	0.85	9.17	0.15
3	49.50	49.01	49.56	49.17	4.07	0.61	0.18	0.24
4	49.50	49.01	49.56	49.17	4.09	0.37	0.10	0.42

를 형성한다. 형성된 인장응력파가 콘크리트 블록의 인장파괴를 유도하여 발파원과 인공절리 사이의 콘크리트 블록의 균열이 우세하게 발생하였다고 판단한다. 자유면 역할을 하는 인공절리 구간에서 균열의 전파가 차단되었다가 인공절리 구간이 폐합된 후 인공절리 구간 뒤편으로 콘크리트 블록으로 균열 전파가 발생하였다. 또한, 인공절리 끝단에서 자유면 방향으로 균열이 신장하는 경향을 나타냈다.

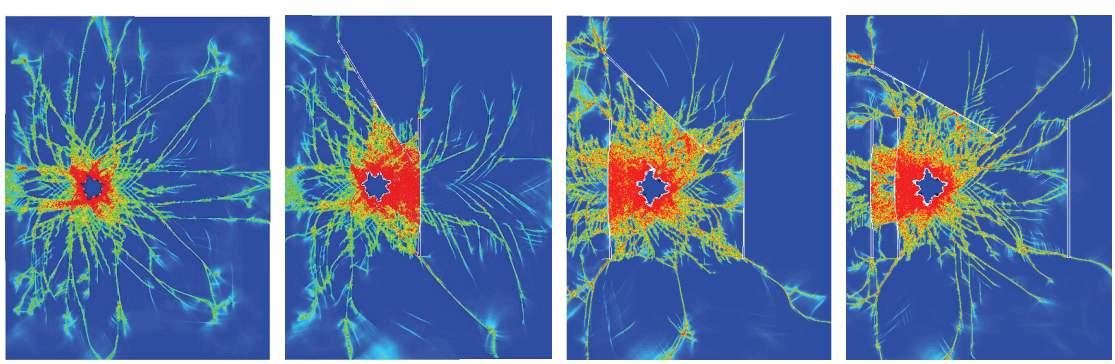


(a) Artificial joint angle and distance of between artificial joint and blast hole section-case 2

(b) Number of artificial joint and angle section-case 3

(c) Number of artificial joint and angle section-case 4

Fig. 4. Occurrence of reflected tensile waves and propagation of blast pressure.



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3 (d) Case 4

Fig. 5. Crack propagation of concrete block.

Table 5. Data for blast velocity analysis

Artificial joint angle		Distance of between artificial joint and blast hole		Number of artificial joint	
Angle (°)	Velocity (m/s)	Distance (mm)	Velocity (m/s)	Joint number (ea)	Velocity (m/s)
30	0.85	250	0.15	0	9.16
45	0.61	500	0.24	1	0.18
60	0.37	750	0.42	2	0.10
90	0.24	1000	4.03	-	-

3.3 발파속도

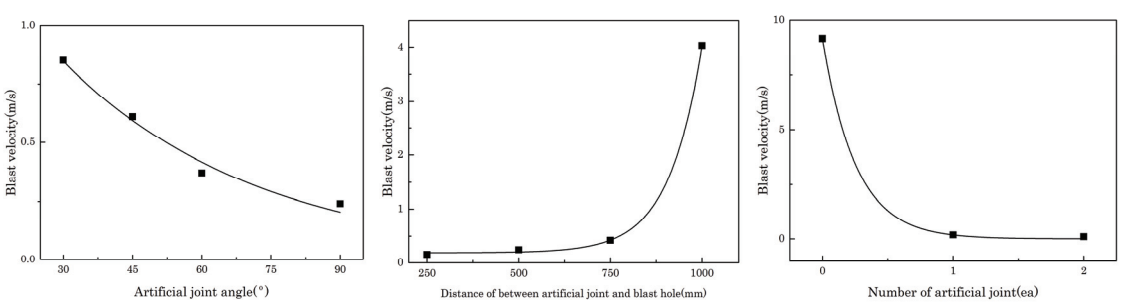
각 case 별 측정된 최대 발파속도 값을 인공절리 경사, 인공절리와 발파공 사이의 거리, 인공절리 수에 따라 비교하여 발파속도의 감소 경향을 확인하였다. Table 5는 각 해석에 사용된 발파속도이다. 각 조건별 발파속도 감쇠 경향을 파악하기 위해 회귀분석을 수행하여 Fig. 6의 그래프와 인공절리 경사, 인공절리와 발파공 사이의 거리, 인공절리 수에 대한 회귀분석식 (9)~(11)를 도출하였다.

$$V_{angle} = 1.72 \times e^{-0.023x} \ (R = 0.97) \quad (9)$$

$$V_{distance} = 0.0000582 \times e^{0.01x} + 0.18 (R = 0.99) \quad (10)$$

$$V_{number} = 9.16 \times e^{-3.91x} (R = 0.99) \quad (11)$$

인공절리 경사의 경우 case 별 Fig. 2의 6번 게이지에서 획득된 발파속도와 인공절리와 발파공 사이의 거리가 동일한 case 3의 8번 게이지에서 획득된 발파속도를 해석에 사용하였다. 해석결과 인공절리 경사가 30°, 45°, 60°, 90°로 증가함에 따라 발파속도 감쇠율이 78%, 84%, 91%, 96%로 측정되었으며, 인공절리 경사는 발파원에 수직일수록 발파속도의 감쇠율이 증가하는 것으로 판단한다. 인공절리와 발파공 사이의 거리의 경우 case 별 Fig. 2의 8번 게이지에서 획득된 발파속도를 해석에 사용하였다. 인공절리가 없는 case 1의 8번 게이지의 발파속도와 비교한 결과 인공절리와 발파공과의 간격이 250mm, 500mm, 750mm로 증가함에 따라 발파속도 감쇠율이 96%, 94%, 89%로 측정되었으며, 인공절리와 발파원과의 거리가 750mm 이내일 때 발파속도의 감쇠가 두드러졌다. 또한, 인공절리의 수의 경우 Fig. 2의 6번 게이지의 발파속도를 사용하였으며, 해석결과 인공절리의 존재로 인해 발파속도의 감쇠가 확연히 발생하였으나, 인공절리의 수가 증가함에 따른 발파속도의 감쇠경향은 미미하였다.



(a) Artificial joint angle (b) Distance of between artificial joint and blast hole (c) Number of artificial joint

Fig 6. Regression analysis graph.

4. 결 론

인공절리에 의한 압력전파, 균열전파, 발파속도의 영향을 AUTODYN을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 해석변수는 인공절리 경사, 인공절리와 발파공 사이의 거리, 인공절리 수이다. 각 해석조건별 발파압력과 균열양상은 인공절리 구간에서 분석하였으며, 발파속도는 콘크리트 블록 경계면에서 비교 분석하였다. 모든 case의 동일 지점에서 계측된 초기 발파속도 및 발파압력이 유사하게 측정되어 균일한 발파속도 및 발파압력의 전파를 확인하였다.

해석결과 발파압력은 발파원을 중심으로 방사상으로 전파되어 진행되다 자유면 역할을 하는 인공절리 구간에서 반사인장파가 발생하였다. 또한, 발파원과 인공절리 사이에서 콘크리트 블록의 균열이 우세하게 발생하였는데, 이는 자유면 역할을 하는 인공절리에서 발생한 인장응력파가 콘크리트 블록의 인장파괴를 유도하여 균열이 우세하게 발생하였다고 판단된다. 해석조건별 인공절리 구간을 통과 한 후 발파속도를 비교하였을 때 인공절리와 발파공의 간격이 가까운 구간에서 감쇠가 가장 크게 평가되었다. 인공절리 경사의 경우 인공절리 경사의 증가에 따라 발파속도 감쇠율이 78%, 84%, 91%, 96%로 측정되어 인공절리 경사가 발파공에 수직일수록 발파속도의 감쇠율이 증가하는 경향을 보였다. 인공절리와 발파공의 사이의 거리의 경우 발파공과 인공절리의 간격이 증가함에 따라 96%, 94%, 89%로 측정되었고, 인공절리와 발파공과의 간격이 짧을수록 발파속도의 감쇠율이 증가하는 것으로 판단된다. 인공절리가 존재할 때 확연한 발파속도의 감쇠를 확인하였으나, 인공절리의 수가 증가함에 따라 발파속도의 감쇠는 미미하였다.

감사의 글

“본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 18CTAP-C130130-02).”

참고문헌

1. Berta, G., 1994, Blasting-induced vibration in tunnelling, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 9, No. 2, pp. 175-187.
2. Hermann, W., 1969, Constitutive Equation for the Dynamic Compaction of Ductile Porous Materials, Journal of Applied Physics, Vol. 40, No. 6, pp. 2490-2499.
3. Jung, H. S., K. S. Jung, H. N. Mun, B. S. Chun and D. H. Park, 2011, A study on the Vibration Propagation Characteristics of Controlled Blasting Methods and Explosives in Tunnelling, Journal of Korean Geo- Environmental Society, Vol. 12, No. 2, pp. 5-14.
4. Kim, J. G., 2012, Reduction of blasting-induced vibration in tunnelling using avrasive water jet notch and disc cutting, Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Korea.
5. Lee, H. H., S. K. Ahn, K. C. Lee, C. S. Bang and M. Sagong, 2015, Study on a Wire Saw Rock Cutting Model for Tunnel Excavation and Cutting Performance Improvement, Transactions Korean Society of Mechanical Engineering A, Vol. 39, No. 10, pp. 1069-1077.
6. Oh, T. M., G. C. Cho, K. I. Song and I. T. Ji 2012, A new rock excavation method using an abrasive waterjet to minimized excavation damaged zone, Proceedings of World Tunnel Congress 2012, Bangkok, Thailand, pp. 340-341.
7. Park, D. H., B. K. Jeon and S. W. Jeon, 2009, A numerical study on the screening of blast-induced waves for reducing ground vibration, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 42, pp. 449-473.
8. Riedel, W., K. Thomas, S. Hiermaier and E. Schmolinske, 1999, Penetration of Reinforced Concrete by BETA-B-500 Numerical Analysis using a New Macroscopic Concrete Model for Hydrocodes, 9th International Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Berlin-Strausberg, Germany, pp. 315-322.
9. Sanchidrián, J. A., R. Castedo, L. M. López, P. Segarra and A. P. Santos, 2015, Determination of the JWL constants for ANFO and emulsion explosives from cylinder test data, Central European journal of energetic materials, Vol. 12, No. 2, pp. 177-194.

노 유 송
㈜코리아카코 연구원

Tel: 02-834-4590
E-mail: nomoosong1@naver.com

민 경 조
전북대학교 공과대학
자원 · 에너지공학과 박사과정

Tel: 063-270-4636
E-mail: felsmechanik@gmail.com

오 세 욱
전북대학교 공과대학
자원 · 에너지공학과 박사과정

Tel: 063-270-4636
E-mail: oseo5353@naver.com

박 세 웅
전북대학교 공과대학
자원 · 에너지공학과 석사과정

Tel: 063-270-4636
E-mail: willysw@naver.com

석 철 기
㈜코리아카코 대표이사

Tel: 02-834-4590
E-mail: kacoh@hanmail.net

조 상 호
전북대학교 공과대학
자원 · 에너지공학과 교수

Tel: 063-270-4636
E-mail: chosh@jbnu.ac.kr

박 훈
㈜코리아카코 책임연구원

Tel: 02-834-4590
E-mail: hujin@jbnu.ac.kr