

콘크리트 배수관로 보호구의 지반진동 저감 성능에 관한 수치해석적 연구

정승원¹⁾, 김정규²⁾, 김준하²⁾, Khaqan Baluch³⁾, 김종관^{2)*}

Numerical Study on Ground Vibration Reduction Performance of Concrete Drainage Protection Facility

Seung-Won Jung, Jung-Gyu Kim, Jun-Ha Kim, Khaqan Baluch, Jong-Gwan Kim

Abstract In this study, a series of FEM numerical analyses was conducted to compare the resistance performance of concrete drainage protection facility to blast vibration. Two different types of □-shaped protection facility, which are suggested in the study, were compared to the traditional ▤-shaped one. In the analyses, the vibration resistances of the three protection facilities were evaluated under the varying conditions of the standoff distance from the explosion and charge weight per delay. As a result, it was found that the two proposed types of drainage protection facilities are superior to the traditional one in the vibration reduction performance.

Key words FEM, Blast vibration, Concrete drainage protection facility, Vibration reduction performance

초 록 본 연구에서는 발파진동에 대한 콘크리트 배수관로 보호구의 내진성능을 비교하기 위해 일련의 FEM 수치해석을 수행하였다. 비교 대상은 본 연구에서 제안하는 두 종류의 □ 형태의 보호구와 재래식의 ▤ 형태의 보호구이다. 해석 과정에서는 폭원 이격거리와 지발당 장약량을 변화시키면서 세 종류의 보호구의 내진 저항을 비교하였다. 그 결과, 본 연구에서 제안하는 두 종류의 보호구가 진동저감 성능의 측면에서 재래식 보호구에 비해 더 우수한 것으로 나타났다.

핵심어 유한요소법, 발파진동, 콘크리트 배수관로 보호구, 진동 저감 성능

1) 특수법인 총포화약안전기술협회 화약안전처

2) 전남대학교 에너지자원공학과

3) 전북대학교 토목/환경/자원에너지공학과

* 교신저자: kimjg@jnu.ac.kr

접 수 일 : 2021년 11월 23일

심사완료 : 2021년 12월 7일

계재승인 : 2021년 12월 10일

1. 서론

근래 도심지에서 도로 확폭 공사 등을 위한 발파 작업 중 주변 보안물건으로서 배수시설 등이 위치하는 경우가 많으며, 본 현장의 경우 주변 보안물건으로 ㄷ형 콘크리트 배수관로 보호구와 함께 배수관이 존재한다. 지면에 노출되는 ㄷ형 콘크리트 배수관로 보호구가 일반적인 형태이나 상황에 따라 보호성능이 더 뛰어난 매립형 보호구를 적용하는 현장도 존재한다. 본 현장은 최근 도로 확폭 공사를 계획하면서 시험발파를 통해 허용기준에 따른 굴착공법, 이격거리 그리고 장약량 선정을 마친 상태이다. 이때 배수관로 주변이 콘크리트로 감싸져 있는 정사각형 형태의 새로운 매립형 배수관로 보호구로 대체하여 발파진동에 대한 영향을 감소시켜 이격거리 및 장약량 증가에 따른 공사 기간 단축을 계획하고 있다.

본 연구는 굴착공법과 새로운 매립형 콘크리트 배수관로 보호구의 기하학적 형태별 발파진동 저감 성능 평가를 위한 유한요소법에 기반한 수치해석을 수행하였고, 그에 따른 변형 이격거리와 지발당 최대장약량을 평가하였다.

2. 수치해석 조건

2.1 유한요소법

본 연구에서는 유한요소 해석법(Finite Element

Method, FEM)에 기반한 프로그램인 GTS NX를 사용하였다. 유한요소 해석법은 미분방정식의 해를 계산하는 수치해석 근사해법으로, 미분방정식을 연립대수 방정식으로 변환하여 운동방정식을 구하게 되는데, 이를 위해 모드중첩법(Mode Superposition Method)이나 직접적분법(DirectIntegration Method)이 이용된다(유광호, 2019). 모드중첩법은 각 개별적 모드에 대한 독립적인 응답을 구한 후 조합하는 선형중첩을 이용하는 해석인 반면에, 비탄성해석이나 비례감쇠와 같이 선형중첩이 불가능한 경우 직접적분법을 사용한다(이도형 외, 2008). 지반과 같은 무한한 매질을 모델링할 때 정해석에서는 충분히 멀게 경계를 잡으면 되지만, 동해석에는 일반적인 경계를 잡을 경우 파가 반사되는 효과가 생기기 때문에 큰 오차가 유발될 수 있다. 이를 방지하기 위해 본 해석에서는 파를 그대로 흡수하여 진행되는 1972년 Lysmer와 Wass가 제안한 점성경계(viscous boundary)를 적용하여 수치해석을 진행하였다.

2.2 지반 모델링

연구를 위한 도로 확폭 공사 구간은 Fig. 1과 같다. 수치해석은 콘크리트 관보호구의 진동 저감 효과를 평가하기 위한 과정이기 때문에 전체 구간을 수치해석에 적용하지 않았고, 지반의 형태가 두드러진 세 가지 관심 영역 대표단면을 선정하였다. 굴착 구역에

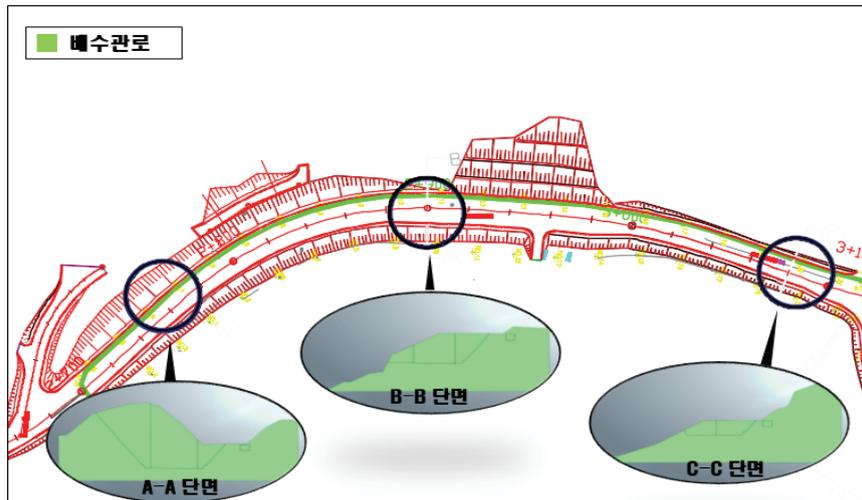


Fig. 1. Overall construction site.

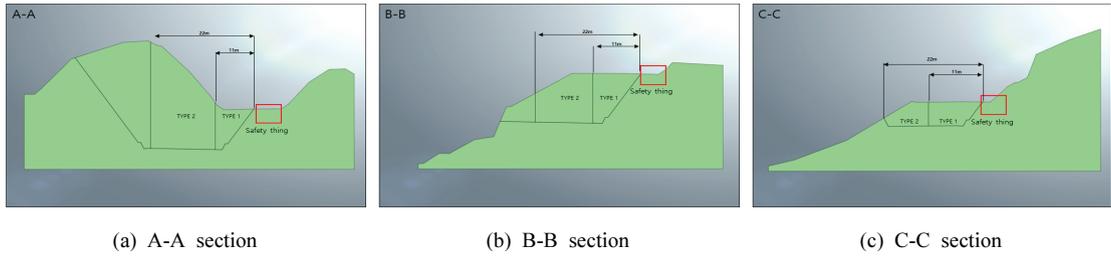


Fig. 2. Different sections of numerical analysis.

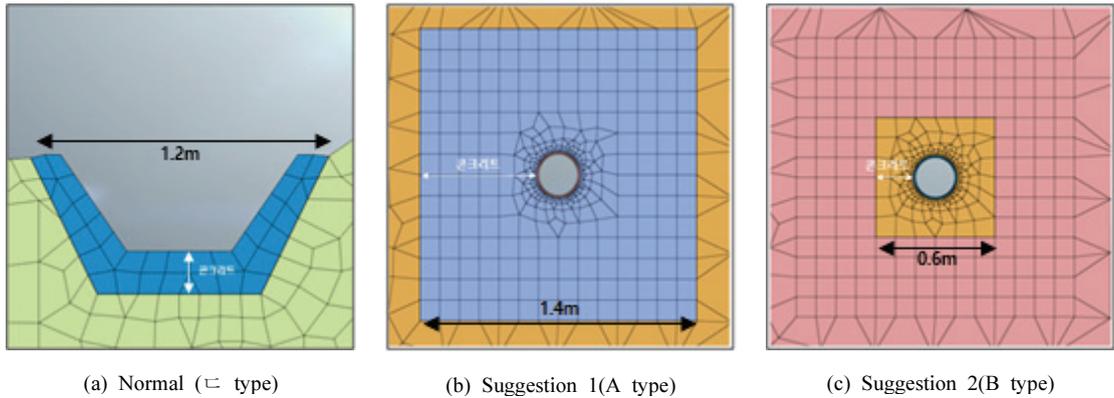


Fig. 3. Normal and proposed protection shield types.

따라 두 타입의 발파 굴착공법을 적용하였다. 각 해석 단면에서의 공통적인 조건으로서 미진동 굴착공법 (TYPE I)과 정밀진동제어 굴착공법(TYPE II)을 해석에 적용하였으며(Fig. 2), 미진동 굴착공법의 경우 보안물건과의 이격거리는 최대 약 11 m, 정밀진동제어 굴착공법은 최대 약 22 m 정도였다. 이때 이격거리는 직선거리를 기준으로 평가하였다.

콘크리트 관보호구는 기존 C형 관보호구와 새로

운 타입의 관보호구인 A타입(1.4×1.4 m²)과 B타입 (0.6×0.6 m²) 2가지 타입으로 총 3가지 타입의 관보호구를 각각 모델링 후 수치해석하여 발파진동 저감을 평가하였다(Fig. 3).

Fig. 4는 B-B단면의 정밀진동제어 굴착공법에 C형 관보호구와 A타입 관보호구를 적용한 수치해석 최종 지반모델링 예시이며, 지반과 콘크리트 관보호구에 적용한 물성은 전부 동일한 값을 적용하였다(Table 1).

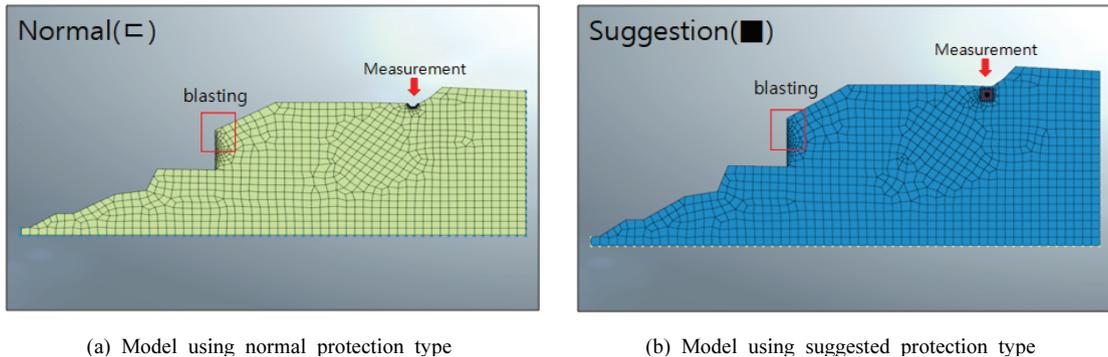


Fig. 4. Example of shield models.

또한, 암석 재료의 동적 구성방정식, 동적 강도 특성 등에 대한 연구를 통해 기존 수치해석적 방법의 알고

Table 1. Ground and concrete properties((주) 마이다스아이티, 2015, 민경조 외, 2019)

Material	Rock	Concrete
Model	Mohr - Coulomb	
Young's modulus [kN/m ²]	65,000,000	29,600,000
Poisson's ratio	0.24	0.25
Unit weight [kN/m ³]	25	23
Cohesion[kN/m ²]	300	7800
Friction angle[deg.]	35	47.5

Table 2. Separation distance(m) and charge weight per delay (kg/delay) of TYPE I

Excavation method	Separation distance [m]	Charge weight per delay [kg/delay]
TYPE I	1	0.001
	2	0.004
	3	0.009
	4	0.016
	5	0.026
	6	0.037
	7	0.05
	8	0.066
	9	0.083
	10	0.103
	11	0.124

Table 3. Separation distance(m) and charge weight per delay (kg/delay) of TYPE II

Excavation method	Separation distance [m]	Charge weight per delay [kg/delay]
TYPE II	12	0.148
	13	0.174
	14	0.202
	15	0.231
	16	0.263
	17	0.297
	18	0.333
	19	0.371
	20	0.411
	21	0.454
	22	0.498

리즘이 보완되어야 할 필요성이 있으나, 발파에 의한 파괴영역과 급격한 에너지 손실을 고려할 때 발파원에서 어느 정도 이격된 거리에서의 해석결과에는 신뢰성에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다(류창하 외, 2015).

2.3 이격거리에 따른 지발당 최대장약량

대상현장 시험발파 데이터를 통해 굴착공법별 보안물건 이격거리와 지발당 최대장약량을 도출하였다. 해당 현장의 에멀전폭약을 사용한 시험발파에서 측정된 진동값의 회귀분석에 의해 상관계수(r)이 0.94인 발파진동 추정식 $V_{95\%} = 94.92(D/W^{0.5})^{-1.324}$ 을 도출하였고, 진동치는 10 mm/s 미만으로 허용 진동기준치의 경우 한국가스공사 매설가스관 진동허용기준, 한국수자원공사 수도시설 안정성 확보를 위한 발파진동 규제기준 수립(2019)에 근거하여 인용하였다(솔하발파환경시스템, 2020). 미진동 굴착공법(TYPE I)과 정밀진동제어 굴착공법(TYPE II)의 이격거리 중 보안물건에서 제일 먼 이격거리와 그에 따른 지발당 최대장약량을 고려하여 수치해석을 하였다(Table 2~3).

2.4 하중조건 모델링

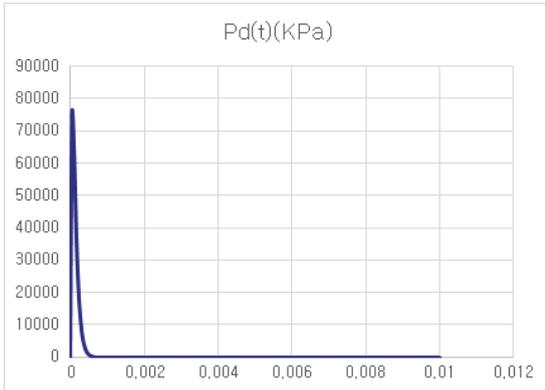
폭굉압력은 이론적인 계산식 및 경험식에 의해 추정된 압력 값을 사용하며, National Highway Institute (US), 1991이 제시한 식 (1) 을 적용한다. 이후 발파 진동의 저감을 위해 decoupling 효과를 고려하는 식 (2) 를 거쳐, 실제 공벽에 작용하는 시간에 따라 변하는 동압력을 1968년 Starfield 등이 제안한 식 (3) 을 사용하여 시간이력에 대한 발파하중 이력곡선을 도출한다.

이번 수치해석에는 두 가지 발파 굴착공법을 적용하며, 두 발파 굴착공법의 발파하중 이력곡선을 도출하기 위한 입력변수는 Table 4와 같으며, 식 (1)~(3) 을 이용하여 얻은 이력곡선은 Fig. 5와 같다.

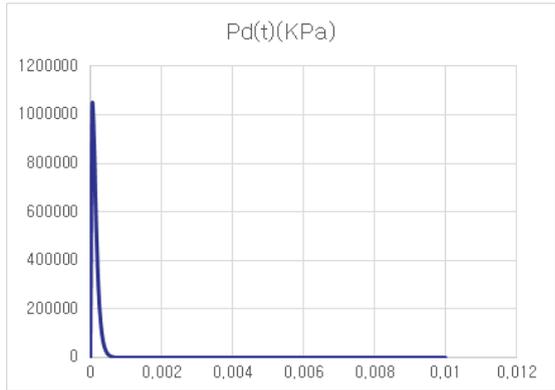
$$P_{det} = \frac{4.18 \times 10^{-7} \times Sge \times V_c^2}{1 + 0.8Sge} \quad (1)$$

$$P_B = P_{det} \times \left(\frac{d_c}{d_h}\right)^3 \quad (2)$$

$$P_D(t) = 4P_B \left(\exp\left(\frac{-Bt}{\sqrt{2}}\right) - \exp(-\sqrt{2}Bt) \right) \quad (3)$$



(a) Blast load wave pressure-time graph of TYPE I



(b) Blast load wave pressure-time graph of TYPE II

Fig. 5. Blast load wave pressure-time graph of different types.

Table 4. Blast load input data and explosive types

Excavation method	TYPE I	TYPE II
Explosive	LoVEX (Ø32 mm, 0.09 kg/ea)	NewMITE Plus (Ø32 mm, 0.25 kg/ea)
Velocity [m/sec]	3,400	5,700
Density [g/cm ³]	0.78	1.2
Charge weight per delay [kg/delay]	0.124	0.498
Hole [mm]	51	

여기서,

$$P_{det}[kbar] = \text{폭발압력}$$

$$Sge = \text{비중}$$

$$V_e[f/sec] = \text{폭속}$$

$$d_c[mm] = \text{약경}$$

$$d_h[mm] = \text{공경}$$

$$P_D(t)[kbar] = \text{시간이력에 대한 동압력}$$

$$B = \text{하중상수}$$

$$t[sec] = \text{시간 이다.}$$

3. 해석 순서

수치해석 순서는 Fig. 6과 같이 네 단계로 총 12가지 case의 수치해석을 진행하였다.

1단계는 사전에 선정된 세 가지 대표단면에 기존 ㄷ형 콘크리트 관보호구를 적용하여 수치해석 모델링 후, 미진동 굴착공법 발파해석을 진행하였다. 이때 최대입자진동속도(PPV) 발생 범위를 확인 후 PPV가 최

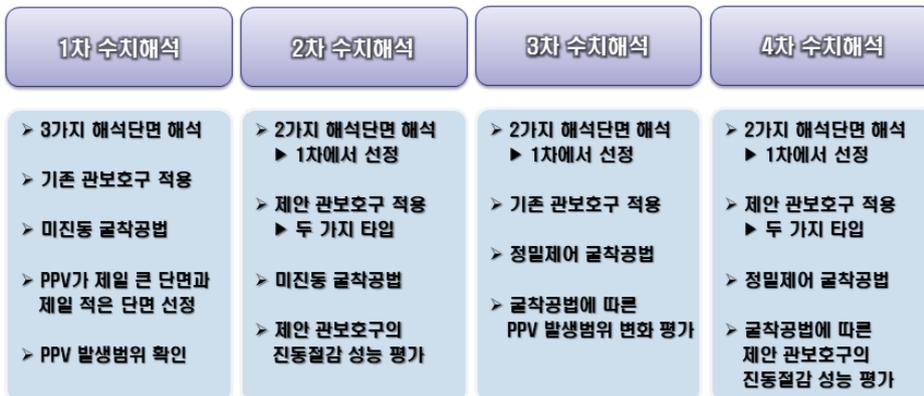


Fig. 6. Process of numerical analysis.

땃값과 최솟값을 보이는 두 단면을 선정하여 이번 연구의 해석기준 단면으로 선정하였다.

그리고 2단계는 선정된 두 단면에 미진동 굴착공법과 제안된 콘크리트 관보호구 두 종류를 적용한 네 가지 case을 해석하였다. 이때 제안된 콘크리트 관보호구의 기존 관보호구 대비 진동 저감 성능을 평가하였다.

3단계는 1단계에서 선정된 두 단면에 기존 관보호구 모델링 후, 정밀진동제어 굴착공법 발파해석을 진행하여, 미진동 굴착구간과 정밀진동제어 굴착구간의 PPV값의 발생 범위 변화에 대한 평가를 수행하였고, 4단계는 1단계에서 선정된 두 단면에 제안된 관보호구 모델링 후 정밀진동제어 굴착공법을 적용하여 두 제안된 관보호구의 굴착공법에 따른 진동 저감 성능을 비교하였다.

해석을 다 마친 뒤 시험발파로 얻은 진동회귀식에 감소한 PPV값을 적용하여 변환된 이격거리를 검토하고, 변환 이격거리에 따른 변환 지발당 최대장약량을 검토하여 제안된 콘크리트 관보호구의 진동 저감 성능에 대한 최종평가를 한다.

4. 해석 결과

4.1 1차 수치해석 (기존 ㄷ형 관보호구, 미진동 굴착구간)

수치해석 모델은 발파 후 0.05 s 시간까지, 시간단계(time step)는 0.0001 s 로 해석하였으며, 1차 수치해석 결과로 A-A단면은 9.873 mm/s, B-B단면이 8.961 mm/s 그리고 C-C단면이 9.476 mm/s의 최대입자진동속도(PPV)를 확인하였다(Table 5). 이는 동일 직선거리 조건이지만 각 단면의 지반형태에 따른 발파공에서 발파진동 측정지점까지의 거리차이에 의해 PPV값

Table 5. Results of numerical analysis for TYPE I

	A-A section	B-B section	C-C section
Excavation method	TYPE I		
Charge weight per delay [kg/delay]	0.124		
Separation distance [m]	11		
PPV [mm/s]	9.873	8.961	9.476

의 차이가 발생한 것이라 판단된다. 세 단면의 발파하중 이력곡선은 Fig. 7~9와 같으며, 이 중 PPV값이 제일 큰 단면인 A-A단면과 제일 적은 단면인 C-C단면을 선정하여 2차 수치해석을 진행하였다.

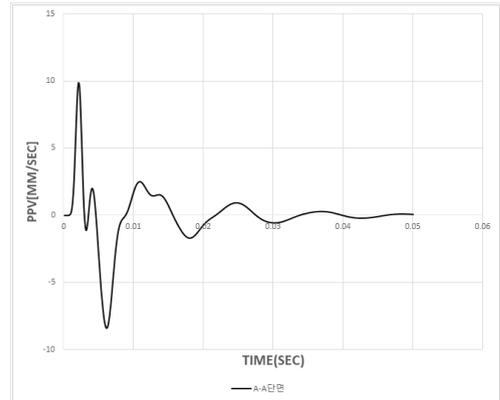


Fig. 7. PPV graph of A-A section.

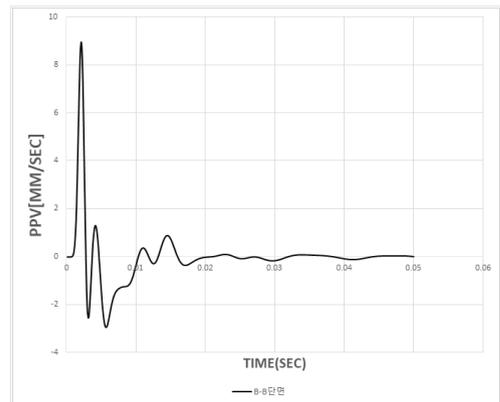


Fig. 8. PPV graph of B-B section.

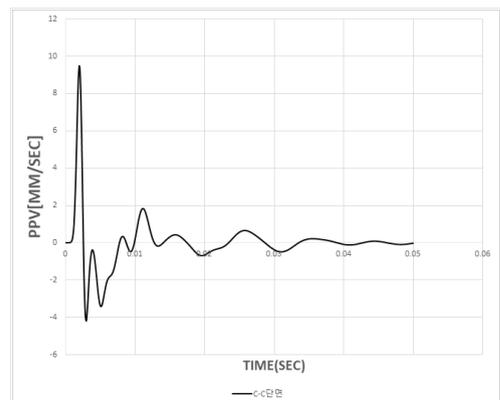


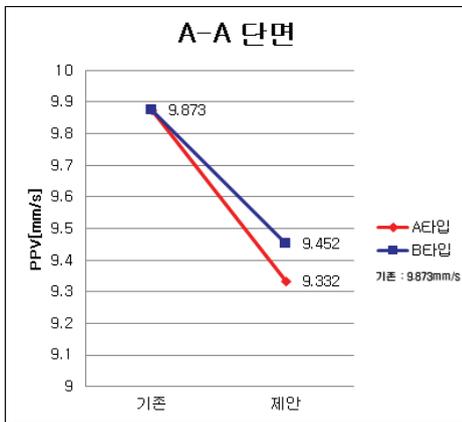
Fig. 9. PPV graph of C-C section.

4.2 2차 수치해석 (제안 관보호구, 미진동 굴착구간)

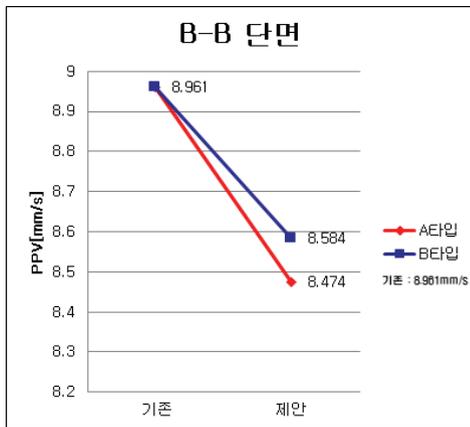
제안 콘크리트 관보호구를 적용한 2차 수치해석 결과로 A-A단면(A타입)은 9.332 mm/s, A-A단면(B타입)은 9.452 mm/s, B-B단면(A타입)은 8.474 mm/s 그

Table 6. Results of numerical analysis for TYPE I

	A-A section		B-B section	
Excavation method	TYPE I			
Charge weight per delay [kg/delay]	0.124			
Separation distance [m]	11			
Type of protection	A type	B type	A type	B type
PPV [mm/s]	9.332	9.452	8.474	8.584



(a) A-A section



(b) B-B section

Fig. 10. Analysis results of PPV.

리고 B-B단면(B타입)이 8.584 mm/s 의 최대입자진동 속도(PPV)를 얻었다(Table 6). A타입을 적용하였을 때 기존 ㄷ형 콘크리트 관보호구를 적용한 1차 수치 해석 대비 PPV가 A-A단면은 5.48 % B-B단면은 5.43 % 감소하였고, B타입을 적용하였을 때는 A-A단면은 4.26 % B-B단면은 4.21 % 감소하였다(Fig. 10).

4.3 3차 수치해석 (기존 ㄷ형 관보호구, 정밀진동제어 굴착구간)

3차 수치해석 결과로 A-A단면은 9.897 mm/s, B-B 단면은 8.998 mm/s의 최대입자진동속도(PPV)를 얻었다. 두 단면 모두 미진동 굴착구간 보다 정밀진동 굴착구간의 PPV가 크게 나타났다(Table 7). 이는 시험 발파결과와 이격거리와 지발당 최대장약량의 상관관계를 미진동과 정밀진동제어 굴착구간으로 나눠서 보았을 때 정밀진동제어 굴착구간의 이격거리에 따른 지발당 최대장약량의 증가율이 미진동 굴착구간의 증가율보다 크기 때문에 이런 결과를 보인 것으로 판단 된다. Fig. 11~12는 발파하중 이력곡선이다.

Table 7. Results of numerical analysis for TYPE II

	A-A section	B-B section
Excavation method	TYPE II	
Charge weight per delay [kg/delay]	0.498	
Separation distance [m]	22	
PPV [mm/s]	9.897	8.998

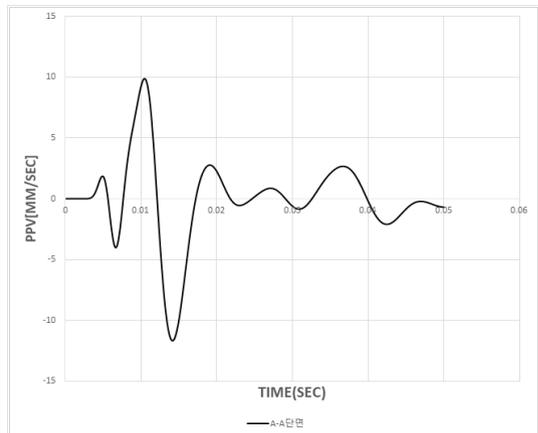


Fig. 11. PPV graph of A-A section.

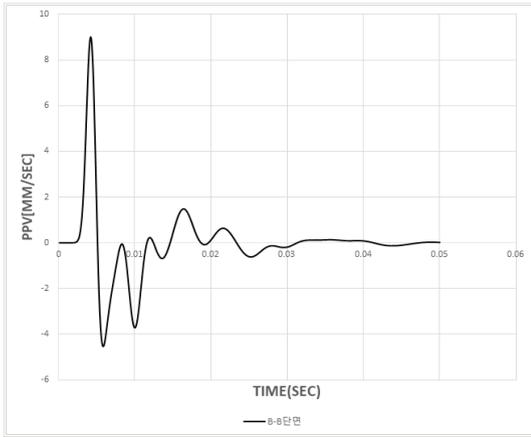
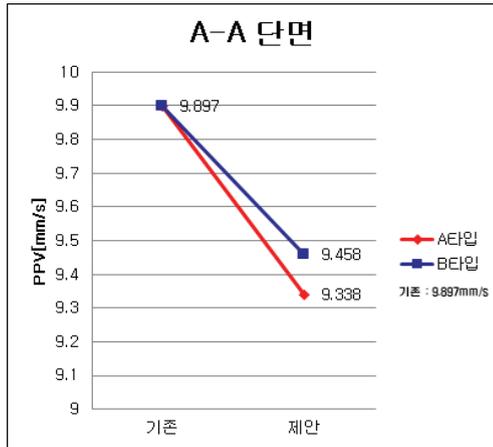
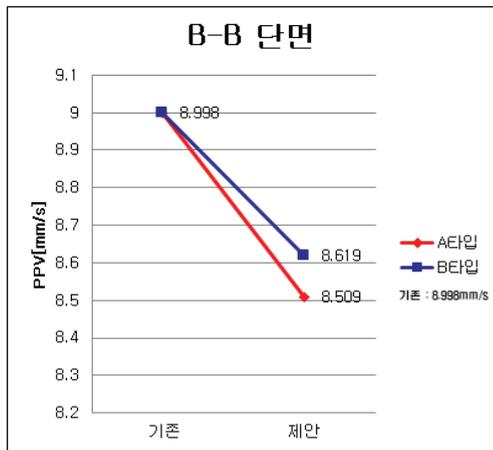


Fig. 12. PPV graph of B-B section.



(a) A-A section



(b) B-B section

Fig. 13. Analysis results of PPV.

4.4 4차 수치해석 (제안 관보호구, 정밀진동제어 굴착구간)

제안 콘크리트 관보호구를 적용한 4차 수치해석 결과로 A-A단면(A타입)은 9.338 mm/s, A-A단면(B타입)은 9.458 mm/s, B-B단면(A타입)은 8.509 mm/s 그리고 B-B단면(B타입)이 8.619 mm/s의 최대진동입자속도(PPV)를 얻었다(Table 8). 3차 수치해석 대비 최대입자속도는 2차와 같은 감소폭을 보인다(Fig. 13).

Table 8. Results of numerical analysis for TYPE II

	A-A section		B-B section	
Excavation method	TYPE II			
Charge weight per delay [kg/delay]	0.498			
Separation distance [m]	22			
Type of protection	A type	B type	A type	B type
PPV [mm/s]	9.338	9.458	8.509	8.619

5. 이격거리 및 장약량 평가

Table 9에서 ‘변환 이격거리’ 이란 시험발파 진동회귀식에 수치해석에 적용한 미진동 굴착구간과 정밀진동제어 굴착구간의 장약량과 감소한 각각 최대입자진동속도(PPV)를 대입하였을 때 변화한 이격거리를 의미하며, ‘변환 지발당 최대장약량’은 진동회귀식에 변환 이격거리에서 허용기준치 10 mm/s가 될 때의 장약량을 의미한다. 결과적으로 제안된 관보호구를 적용하였을 때, 미진동 굴착구간의 경우 11 m, 정밀진동제어 굴착구간의 경우 22 m에서 증가한 변환 지발당 최대장약량을 적용하여도 보안물건의 진동허용치인 10 mm/s를 넘지 않는다.

미진동 굴착구간의 변환 이격거리의 경우 A-A단면은 A타입의 콘크리트 관보호구를 적용하였을 때 0.56 m, B타입을 적용하였을 때 0.45 m 증가하였고, B-B 단면은 각각 1.43 m, 1.31 m 증가하였다. 변환 지발당 최대장약량의 경우 A-A단면은 A타입 적용 시 0.014 kg, B타입 적용 시 0.011 kg 증가하였고, B-B 단면의 경우 각각 0.035 kg, 0.032 kg 증가하였다.

정밀진동제어 굴착구간의 변환 이격거리의 경우 A-A단면의 A타입은 1.15 m, B타입은 0.93 m 증가,

Table 9. Evaluation of separation distance(m) and charge per delay(kg/delay)

Excavation method	Section	Type	Conversion separation distance [m]	Conversion charge weight per delay [kg/delay]
TYPE I	A-A	A	11.56(+0.56)	0.138 (+0.014)
		B	11.45(+0.45)	0.135 (+0.011)
	B-B	A	12.43(+1.43)	0.159 (+0.035)
		B	12.31(+1.31)	0.156 (+0.032)
TYPE II	A-A	A	23.15(+1.15)	0.552 (+0.054)
		B	22.93(+0.93)	0.542 (+0.044)
	B-B	A	24.83(+2.83)	0.635 (+0.137)
		B	24.59(+2.59)	0.623 (+0.125)

B-B단면은 2.83 m, 2.59 m 증가하였다. 변환 지발당 최대장약량의 경우는 A-A단면의 A타입은 0.054 kg, B타입은 0.044 kg 증가, B-B단면은 0.137 m, 0.125 m 증가하였다. 결과적으로 변환 이격거리는 정밀진동제어 굴착구간이 미진동 굴착구간보다 약 2배 더 증가하였으며, 변환 지발당 최대장약량은 약 4배 더 증가하였다.

6. 결론

본 연구에서는 발파 굴착공법(미진동 및 정밀진동 제어)과 콘크리트 배수관로 보호구 조건에 따른 최대 입자진동속도(PPV)의 경향을 4단계로 수치해석 평가를 하였고, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 두 가지 제안된 콘크리트 보호구의 경우 콘크리트 관보호구와 지반의 입력변수 중 탄성계수 값의 차이가 주요 변수로 작용하여 기존 ㄷ형 콘크리트 관보호구 보다 높은 진동 저감 성능을 보이고, 보호구 면적이 더 큰 A타입의 보호구가 B타입보다 약 1.23 % 더 저감하여 그 차이가 미비한 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 각각 A타입과 B타입의 면적에 길이가 동일한 보호구의 부피로 비교하였을 시 더 작은 규격인 B타입을 적용하는 것이 콘크리트 관보호구 시공 과정에서 약 18.37 % 더 경제적이라고 평가된다.
- 3) 감소한 진동에 따른 변환 이격거리와 지발당 최대장약량 평가 결과로는 두 단면의 미진동 굴착구간과 A-A단면의 정밀진동제어 굴착구간은 변

환 이격거리와 변환 지발당 최대장약량의 변화가 적어 작업성까지 고려하였을 때 제안된 콘크리트 관보호구 적용 시 공사 기간 단축 효과의 이점을 얻기 어렵다.

- 4) B-B단면의 정밀진동제어 굴착구간은 미진동 굴착구간 대비 지발당 최대장약량이 큰 폭으로 증가하였고, B-B단면의 정밀진동제어 굴착구간이 미진동 굴착구간보다 넓은 굴착 범위가기 때문에 최종적으로 제안된 콘크리트 보호구 중 B타입 보호구를 B-B단면에 적용 시 공사 기간 단축 효과의 이점을 가장 많이 얻을 수 있다고 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 해외자원개발협회의 지원(스마트 마이닝 전문인력 양성사업)과 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-현장맞춤형 이공계 인재양성 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019H1D8A1109673).

참고문헌

1. 류창하, 최병희, 장형수, 강명수, 2015, 발파하중을 받는 지반의 동적 거동 수치 모델링에서 입력변수의 영향, 한국암반공학회지(터널과 지하공간), Vol. 25, No. 3, pp. 255-263.
2. 민경조, 고영훈, 오세욱, 김정규, 정문경, 조상호, 2019, 발파 암반-콘크리트 경계면에서의 전단거동특성에 대

한 수치해석적 연구, 대한화학발파공학회지(화학·발파), Vol. 37, No. 4, pp. 26-35.

3. 슬하발파환경시스템, 2020, 시험발파에 의한 발파환경 영향평가 보고서, pp. 1-97.
4. 유광호, 2019, 초고층 건물과 인접지하구조물의 SSI 해석을 통한 수치해석 프로그램 비교 연구, 한국터널지하공간학회(한국터널지하공간학회논문집), Vol. 21, No. 2, pp. 211-255.
5. 이도형, 김두기, 이기학, 2008, 지진, 폭발, 피로 등을 포함한 동적하중에 대한 해석 기술, 한국콘크리트학회(콘크리트학회지), Vol. 20, No. 4, pp. 36-44.
6. (주) 마이다스아이티, 2015, GTX NX TUTORIALS, pp.

5-19.

7. Lysmer, J., Wass, G., 1972, Shear waves in plane infinite surface, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 98, No. 1, pp. 351-358.
8. National Highway Institute, 1991, Rock Blasting and Overbreak Control, US DOT, Publication No. FHWA HI-92-001, 430.
9. Starfield, A.M., Pugliese, J.M., 1968, Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: A comparison between a computer model and field measurements, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. and Geomech. Abstr. 5, pp. 65-77.



정 승 원
 특수법인 총포화약안전기술협회
 화약안전처
 전남대학교 에너지자원공학과
 박사과정

Tel: 02-3272-4104
 E-mail: wjd071722@naver.com



김 정 규
 전남대학교 에너지자원공학과
 학술연구교수

Tel: 062-530-0826
 E-mail: evangelong@hanmail.net



김 준 하
 전남대학교 에너지자원공학과
 석사과정

Tel: 062-530-0824
 E-mail: wns0412gk@gmail.com



Khaqan Baluch
 전북대학교 토목/환경/자원에너지공학부
 박사후연구원

Tel: 063-270-4636
 E-mail: khaqan_baluch@hotmail.co.uk



김 종 관
 전남대학교 에너지자원공학과
 조교수

Tel: 062-530-1723
 E-mail: kimjg@jnu.ac.kr