

역해석기법을 통한 발파하중 산정 및 수치해석을 이용한 구조물의 진동영향평가

최준성^{1)*}, 이진무²⁾, 조만섭³⁾

A Calculation of Blasting Load using Input Identification Method & Evaluation of Structure's Vibration in Numerical Analysis

Jun-Sung Choi, Jin-Moo Lee and Man-Seop Jo

Abstract In this paper, the blasting load has been calculated using Input Identification method and measured data in borehole blasting to reflect the exact blast behavior and soil vibration. The fitness of calculated blasting load is examined by comparing measured data and results of numerical analysis. According to the results, blasting load estimated by Input Identification method was more adequate than proposed blasting pressure equation in the reflection of blast behavior and soil vibration. In addition, it showed more reasonable results at the evaluation of structure's vibration in the 3D finite element method.

Key Words Input identification method, Blasting load, Blasting vibration, Borehole blasting

초 록 본 연구는 실제의 발파현상 및 지반진동을 더욱 정확히 반영할 수 있도록 시험발파에 의한 계측자료와 역해석기법을 사용하여 발파하중을 산정하였다. 실제 계측데이터와 비교를 통해 기존 추정식에 의한 하중에 비해 발파현상 및 지반진동특성을 보다 정확히 반영하는 것을 볼 수 있었으며, 이를 이용한 수치해석을 통해 구조물의 진동영향을 평가하여 타당한 결과를 얻을 수 있었다.

핵심어 역해석기법, 발파하중, 발파진동, 시험발파

1. 서 론

각종 토목공사에 필연적으로 수반되는 암반에 대한 발파작업은 암석의 비산, 폭음, 지반진동과 같은 발파공해를 유발하게 된다. 이 중 발파에 의한 지반진동은 인접거주자에게 불안감을 가중시켜 다수의 민원을 초래할 뿐만 아니라 구조물이나 정밀 기기류에 대해 심각한 피해를 야기할 수 있다. 따라서 시공전 설계단계에서 이러한 문제 요소들을 감안하여 안전한 작업이 되도록 충분한 검토가 요구되며, 적절한 진동저감공법 및 대책을 적용함으로써 예상되는 피해를 최소화 하거나 사인에 제거하여야만 한다.

발파시 인접구조물의 진동영향 예측을 위해 현재까지 진행되어온 연구들은 주로 장약량과 거리의 함수로서 발파진동 예측식을 제안하거나 허용진동기준을 확립하기 위한 연구들이었으며, 실무에서도 개략적인 피해 범위만을 알 수 있는 발파진동 예측식과 허용기준 도표를 이용하여 발파진동에 대한 안전성을 검토하고 있는 실정이다.

이와 같은 지반진동의 이론적 및 경험적 해석에 있어 기존의 예측식이나 허용기준 도표의 경우는 현장여건에 따라 적용이 곤란한 경우가 발생할 수 있으며, 대략적인 범위를 알 수 있을 뿐 구조물이 받는 구체적인 영향은 알 수 없기 때문에 최근에는 이와 같은 문제 해결을 위해 수치해석 기법에 의한 지반진동 해석이 많이 수행되어지고 있다. 일반적으로 발파현상을 모사하기 위한 수치해석은 프로그램 내에서 발파현상을 모사할 수 없으므로 모델 경계면에 발파하중을 가하는 형태로 수행되어 왔다. 이러한 발파하중은 이론적인 계산식 및 경험식에 의하여 추정된 압력치를 사용하고 있으며, 주

¹⁾ 한국유지관리(주) 대표이사

²⁾ SK건설(주) Geotask 팀장

³⁾ SK건설(주) 경부고속철도 14-3공구 설계팀장

* 교신저자 : ceo@kmclab.co.kr

접수일 : 2006년 3월 27일

심사 완료일 : 2006년 5월 30일

로 단일공 발파를 기준으로 제안되었다. 시간에 따른 발파압력곡선은 간단한 정현파의 형태를 갖는 것으로 간주하는 것이 일반적이며, 다수의 공을 사용하는 터널 발파를 모사함에 있어서도 굴착 예정인 터널 주변장에 등가의 압력을 가하는 것으로 해석하는 것이 지금까지의 해석방법이었다. 하지만 이론식 및 경험식으로부터 구한 발파압력을 사용하는 방법은 동해석에서 매우 중요한 입력자료인 실제 발파압력 및 지속시간을 정확하게 추정하기 어렵고 발파로 인한 지반진동을 쉽게 모사할 수 없다는 단점을 가지고 있다¹⁾. 따라서 본 연구에서는 지중 발파시 동적하중에 대한 지반진동을 보다 정확히 예측하기 위한 방법으로 경부고속철도 14-3공구에서의 시험발파 계측데이터와 역해석기법을 통해 시간이력형태의 발파하중을 산정하였으며, 산정된 발파하중을 적용한 동해석을 통해 그 적용성을 기존의 발파압력 추정식과 비교검토 하였다. 또한 경부고속철도 14-3공구의 지반 및 구조물을 유한요소로 모형화한 수치모델에 산정된 발파하중을 적용하여 동해석을 수행함으로써 발파공사시 인접구조물의 진동영향을 검토하였다.

2. 지반진동해석을 위한 국내외 발파하중 산정방법

발파압력을 추정하는 이론적인 계산식 및 경험식은 국내외의 여러 연구자들에 의해 제시되어 왔으며 다음에 언급된 것은 대표적인 발파압력 추정식들을 나타낸 것이다.

2.1 미국 National Highway Institute의 발파압력 제안식

일반적인 발파공에 대한 탄성해석에서 발파압력은 공벽에 수직한 반경방향으로 압력이 가해지도록 하고 미국 National Highway Institute가 제시한 아래의 식을 이용해 왔다¹⁾.

$$P_{det} = \frac{4.18 \times 10^{-7} \times SG_e \times V_e^2}{1 + 0.8SG_e} \tag{1}$$

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

여기에서

- P_{det} : 폭발압력(detonation pressure, kbar)
- SG_e : 화약의 비중
- P_B : 공벽에 가해지는 압력(decoupled detonation pressure, kbar)
- V_e : 폭속(detonation veolcity, ft/sec)
- d_c : 화약의 직경(charge diameter, ft)
- d_h : 장약공의 직경(borehole diameter, ft)이다.

위 식은 화약 1kg당 폭발하중을 기준으로 한 식으로써 발파시에 발생하는 공기 동압력을 정의한다. 실제 공벽에 작용하는 동압력은 시간에 따라 변하는 형태를 취하므로 1968년 Starfield²⁾ 등이 제안한 창함수(window function)를 사용하여 동압력에 대한 시간이력을 적용하는 것이 일반적이다.

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

[B(하중상수)=16338]

2.2 Liu and Tidman의 발파압력 제안식

캐나다 CANMET/MRL의 Liu & Tidman³⁾이 이론적인 모델을 기초로 하여 밀장전된 발파공의 동적압력을 계산하는 반경험식(semi-empirical equation)을 개발하였는데 다음의 식(3)과 같다. 이 반경험식을 이용하여 폭약 및 암반의 특성에 따라 발파공에 작용하는 최대압력을 계산할 수 있으며 시간에 따른 감쇠정도를 반영하기 위한 감쇠함수(decay function)로서 식(3)을 적용하였다.

$$P = p_m \left(\frac{R}{R_0}\right)^\alpha, \quad P_m = 1.62(\rho_0 D^2) \left(\frac{\rho_r \times C}{\rho_0 \times D}\right)^{0.25}$$

$$\alpha = -1.54 \left(\frac{C}{D}\right)^{-0.33} \tag{3}$$

$$F_{decay} = \exp\left(1 - \frac{t}{t_0}\right) \times \frac{t}{t_0}$$

여기에서, P_m 은 발파공 최대 압력(kbar), α 는 압력감쇠계수이며 R_0 는 발파공의 반지름(m), R 은 발파공으로부터의 거리(m)이다. ρ_0, ρ_r 는 각각 폭약과 암반의 밀도(g/cm^3)이며 C 는 암반의 탄성파속도, D 는 폭약의 폭속(VOD, km/sec)이다.

2.3 Park 등의 발파압력 제안식

국내에서 Park⁴⁾ 등은 발파공벽에 작용하는 발파압력을 반응속도모델(reaction rate model)을 이용하여 시간에 따른 발파하중의 변화를 다음의 식(4)와 같이 제안하였다.

$$p(t) = P_x \cdot \left(\frac{t}{t_R}\right)^a \cdot e^{-\frac{t_R-t}{t_n}} \tag{4}$$

여기에서, t, t_R, a 는 발파압력 작용시간, 최대압력 도달시간, 폭굉파속도 매개변수이다. p_x 는 $t = t_R$ 일 때 압력으로 최대 발파압력을 나타낸다.

위와 같이 제안된 발파압력 추정식들은 폭약에 의한 폭발상태를 이상적인 것으로 가정하고 폭발에너지를 구하는 것이 대부분이므로 실제 폭발압력보다 높은 압력을 가지는 것으로 계산된다. 하지만, 폭발로부터 발생되는 모든 에너지가 발파진동의 전달에 사용되어지는 것은 아니므로 발파압력을 적절하게 감소시켜야 한다. 즉, 발생에너지의 대부분이 암석의 파쇄 및 균열의 발생에 사용되고 구조물의 안정성에 영향을 미치는 발파진동의 발생 및 전달에 사용되어지는 에너지는 작은 부분을 차지한다. 여러 연구자에 의하여 지금까지 밝혀진 바에 의하면 폭발에너지 가운데 탄성파 전달에 사용되는 에너지는 암종 및 사용된 화약의 종류에 따라 다르지만 대체적으로 5~50%의 범위 내에 있는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 사실로부터 실제로 진동전달에 사용되는 폭발에너지를 정확히 추정하는 것은 거의 불가능하고 발파압력의 지속시간 또한 폭약의 장전상태, 전색조건 및 암반조건 등에 따라 달라지는데 이를 단순한 정현파의 형태로 가정하여 해석하는 것은 다소 무리가 있다고 할 수 있다. 결론적으로, 발파압력 추정식들을 사용하는 동해석은 동해석 대상에 따라 적절한 격자의 크기 및 발파원의 주파수를 고려할 필요가 없으므로 복잡한 지층조건을 쉽게 모사할 수 있다는 장점이 있으며, 간단한 경험식으로 쉽게 발파압을 산정하여 설계단계에서 사전영향평가를 할 수 있는 기본자료를 제공할 수 있기 때문에 많이 사용되고 있지만 가장 중요한 입력자료인 발파하중의 산정에 있어서 많은 문제점을 가지게 된다. 즉, 발파압력의 크기, 형태 및 지속시간, 하중전달을 등을 정확히 산정할 수 없다는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 해석에서는 대상지역에서 시추공발파를 실시하고 시추공 발파시 계측된 진동데이터와 지반-구조물 상호작용해석을 통해 산정된 주파수응답함수(전달함수)를 이용하여 시간이력형태의 발파하중을 역산하였으며, 이를 발파압력 추정식과 비교 검토하였다.

3. 역해석기법을 통한 발파하중의 산정

역해석기법을 통해 산정된 발파하중을 수치해석의 입력 자료로 이용하는 것이 단순한 발파압력을 사용하는 것보다 실제의 발파현상 및 지반진동을 더욱 정확히 반영하게 된다. 그 이유는 구조물의 안정성을 평가하는 기준은 주로 지반의 진동속도를 근거로 하고 있으며, 역해석기법을 통해 산정된 발파하중은 발파진동이 전달되는 지반의 특성을 반영한 진동파형을 모사할 수 있기 때문이다. 또한, 이와 같은 발파하중을 이용할 경우 제안식을 통한 발파하중의 가장 큰 문제점이라 할 수 있는 암석의 파쇄 및 균열의 발생에 사용되는 에너지를

배제하고 완전히 진동의 전파에만 사용되는 에너지를 평가하여 이를 주변구조물의 발파진동 평가를 위한 해석의 입력자료로 활용할 수 있다는 장점이 있다. 역해석 기법은 중점의 원리가 적용될 수 있는 선형구조계에 한하며 식(5)로부터 출발하게 된다.

$$X(\omega) = H(\omega) \cdot P(\omega) \quad (5)$$

여기서, $H(\omega)$ 와 $X(\omega)$ 는 각각 임의 계측지점에서의 주파수영역에서의 전달함수와 발파로 인한 계측된 응답을 의미하며, $P(\omega)$ 는 주파수 영역에서의 발파하중을 나타낸다. 발파원에 의한 계측지점의 전달함수 $H(\omega)$ 를 구하기 위하여 유체-구조물-지반 상호작용해석 프로그램인 KIESSI-A3D를 사용하였으며, 계측지점의 지반 물성치(전단파속도, 포아송비, 밀도, 감쇠비)를 적용하였다. KIESSI-A3D 프로그램은 원통형 축대칭체(구조물, 유체, 지반)에 3차원 하중이 작용될 때 동적상호작용해석을 유한요소, 유체요소, 동적무한요소, 점성경계요소를 사용하여 주파수영역에서 수행하는 전산프로그램으로서, 이론적인 검증과 실험적인 검증작업이 수행된 바 있다⁵⁾. 계측응답 $X(\omega)$ 는 시험발파를 통하여 계측된 속도 응답이 사용되었다.

3.1 시험발파에 의한 전달함수 추출

Table 1에 시험발파 및 계측현황을 나타내었으며, Fig. 1은 계측된 집선, 수평, 수직방향의 속도응답중 장약깊이(43m), 장약량(0.48kg), 계측위치(21m)일 때의 응답으로 발파하중 산정시 계측응답 $X(\omega)$ 으로 적용하였다⁶⁾.

Fig. 2, 3과 같이 KIESSI-A3D 프로그램을 사용하여 시험발파시 계측이 이루어진 지점에서 단위하중에 대한 각방향의 전달함수를 구하였다.

3.2 시간이력의 발파하중 산정

발파하중은 시험발파를 통해 계측된 응답과 KIESSI-A3D 프로그램에서 구한 전달함수를 식(5)에 대입하여 세 방향 성분에 대해 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} H^{LL} \cdot P_L + H^{LT} \cdot P_T + H^{LV} \cdot P_V &= X_L(\omega) \\ H^{TL} \cdot P_L + H^{TT} \cdot P_T + H^{TV} \cdot P_V &= X_T(\omega) \\ H^{VL} \cdot P_L + H^{VT} \cdot P_T + H^{VV} \cdot P_V &= X_V(\omega) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, H, P, X는 각각 전달함수, 발파하중, 임의 지점의 응답을 나타내며, 상첨자는 응답방향을 나타내고, 하첨자는 진동원의 작용방향을 나타낸다.

Table 1. Measured in borehole blasting

발파회수	장약 깊이	지발당 장약량	계측위치				
			X1	X2	X3	X4	X5
1	60m	640g	7m	14m	21m	31m	40m
2	43m	480g	7m	14m	21m	31m	40m

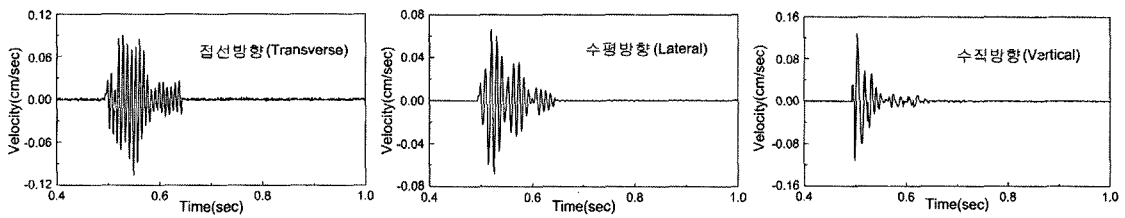
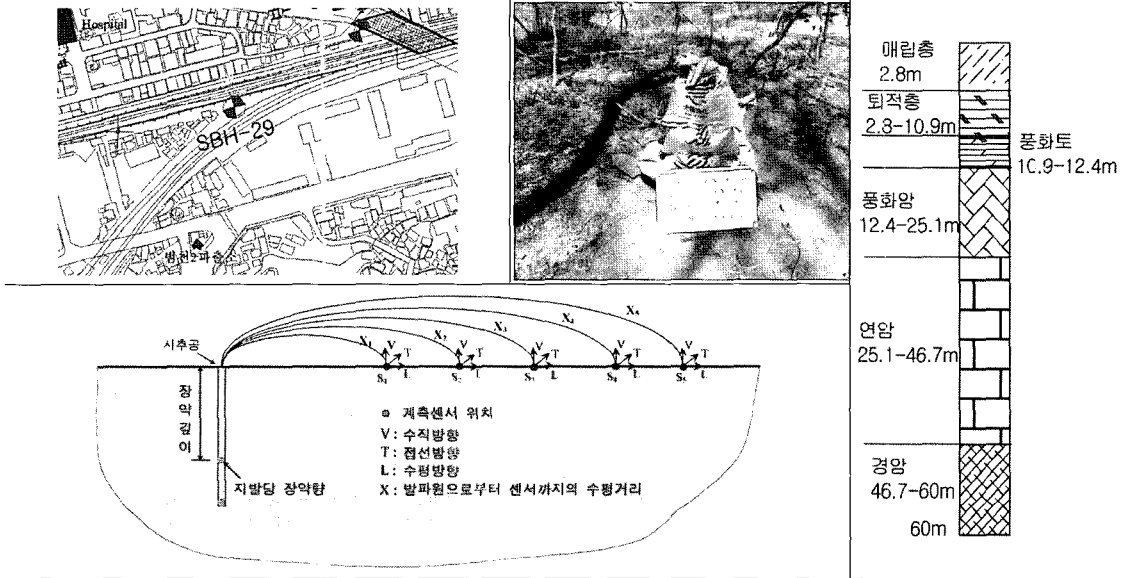


Fig. 1. Measured vibration velocity

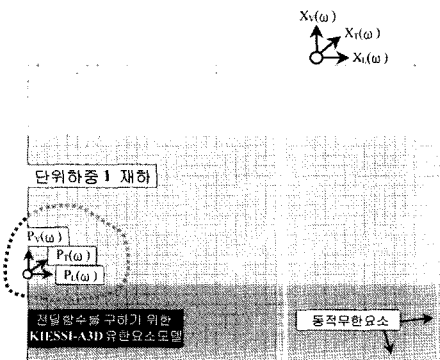


Fig. 2. KIESSI-A3D

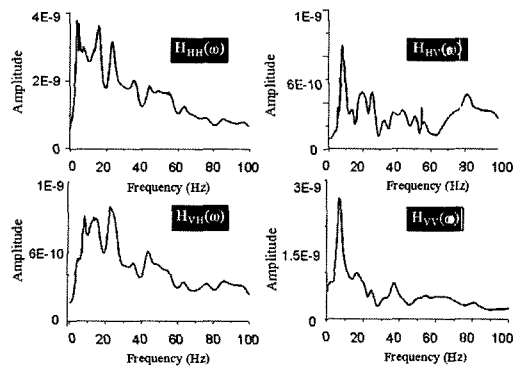


Fig. 3. Frequency response function

또한 진동원의 유도를 위해 전달함수를 다음과 같이 치환하면 진동원은 식(7)~식(12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{H^{TV}}{H^{LV}} = R_1, \quad \frac{H^{VV}}{H^{TV}} = R_2 \quad (7)$$

$$a_1 = H^{LL}R_1 - H^{TL}, \quad a_2 = H^{LT}R_1 - H^{TT}, \quad (8)$$

$$b_1 = X_L R_1 - X_T$$

$$a_3 = H^{TL}R_2 - H^{VL}, \quad a_4 = H^{TT}R_2 - H^{VT}, \quad (9)$$

$$b_2 = X_T R_2 - X_V$$

$$P_L = \frac{b_1 a_4 - b_2 a_2}{a_1 a_4 - a_2 a_3} \quad (10)$$

$$P_T = \frac{1}{a_2} (b_1 - a_1 P_L) \quad (11)$$

$$P_V = \frac{1}{H^{LV}} (X_L - H^{LL} P_L - H^{LT} P_T) \quad (12)$$

위의 식과 같이 추정된 발파하중을 역푸리에 변환하여 시간이력으로 나타내면 아래의 Fig. 4와 같이 각 방향에 대한 발파하중을 산정할 수 있다.

4. 수치해석을 통한 발파하중의 검증

위와 같이 산정된 발파하중(Fig. 4)과 발파압력 추정식을 통한 발파하중(Fig. 5)의 적용성 비교를 위해 시추

공 시험발파와 같은 지반조건(Table 1)의 수치모델에 각각의 산정된 발파하중을 적용하여 측정지점에 대한 응답을 구하고 실측값과의 비교를 통해 그 적용성을 검토하였다. Fig. 5는 기존 발파압력 추정식인 미국 National Highway Institute의 발파압력 제안식을 사용하여 계산된 발파압력 시간이력곡선이다.

수치해석은 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, 외연적 시간적분법을 이용한 시간이력해석을 수행하였다. 외연적인 방법에서는 시간 간격의 크기가 해의 안정성에 직접적인 영향을 주게 되므로 일반적인 내연적인 방법보다 훨씬 작은 시간 간격을 가지고 해석을 수행하게 된다. 이와 같은 이유로 인하여 충격파의 전파 거동을 관찰하기 위한 해석에서는 외연적 유한요소법이 적합하다. 발파하중은 점하중으로서 방사상으로 전파되는 특성을 가지고 굴착 단면에 재하되므로 2차원 상에서는 이러한 특성들을 정확히 반영한 해석이 어렵다. 따라서 발파하중의 3차원적 전파특성과 구조물의 변형특성을 정확히 반영할 수 있도록 해석대상 구조계를 3차원으로 모형화하여 해석을 수행하였다. 수치해석시 사용된 유한요소모델은 시추공 시험발파(Table 1) 조건과 제원이 같으며 발파원 깊이와 응답검토 위치도 동일하다. 또한 발파하중이 모델의 경계영역에서 반사되는 것을 막기 위해 동적무한요소가 사용되었다. Fig. 6은 검증에 사용된 유한요소모델 및 해석결과이며 해석모델은 8절점 유한요소와 무한요소로 모델링하였다. 역해석기법과 추정식에 의해 산정된 발파하중

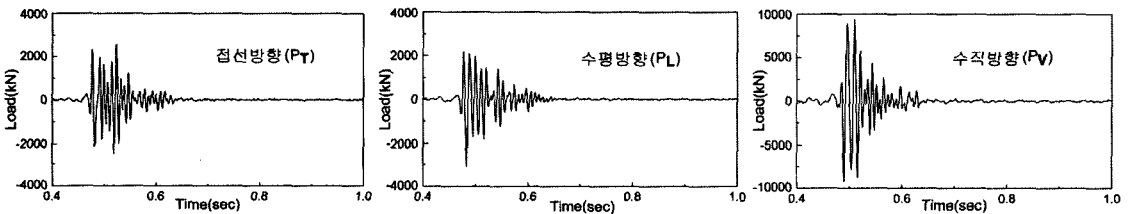


Fig. 4. Blasting load in Input Identification method(PL, PT, PV)

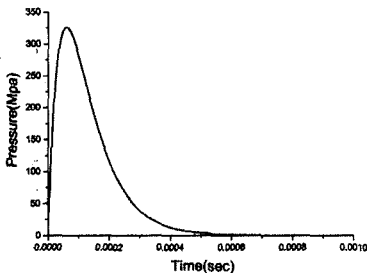


Fig. 5. Blasting load in NHI

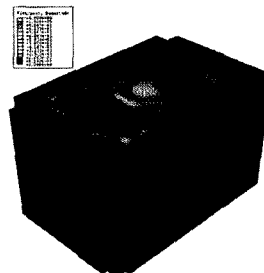


Fig. 6. Finite element model for estimate blasting load

중을 적용한 동적해석 결과는 Fig. 7, 8과 같으며, 시추공 시험발파 계측응답과 발파하중 산정방법에 따른 각 방향의 진동응답의 차이를 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9의 결과를 볼 때 시추공 시험발파와 역해석기법을 통해 산출된 하중이 기존 추정식에 의한 하중에 비해 실제 발파현상 및 지반진동특성을 보다 정확히 반영하는 것을 볼 수 있다. 따라서 역해석기법을 활용한 발파하중이 발파진동예측을 위한 수치해석의 입력하중으로 충분히 타당한 것으로 판단된다.

5. 인접구조물의 진동영향평가

역해석기법과 추정식을 통해 산정된 발파하중을 경부고속철도 14-3공구에 적용하여 인접구조물의 진동영향을 평가하였으며, 그 결과를 비교하였다. 해석은 Fig. 10과 같이 향후 시공될 경부고속철도 터널과 근접한 주상복합건물인 네오스포와 경남아파트를 대상으로 하였다. 터널 굴착 시공시 대상구조물과 가장 근접한 위치에 산정된 발파하중을 적용하여 외연적 시간적분법을

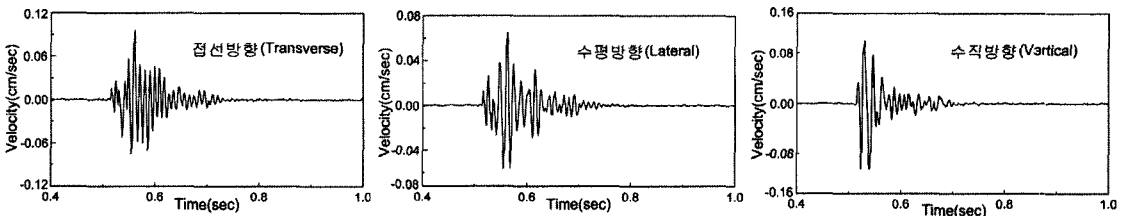


Fig. 7. Results using blasting load in Input Identification method

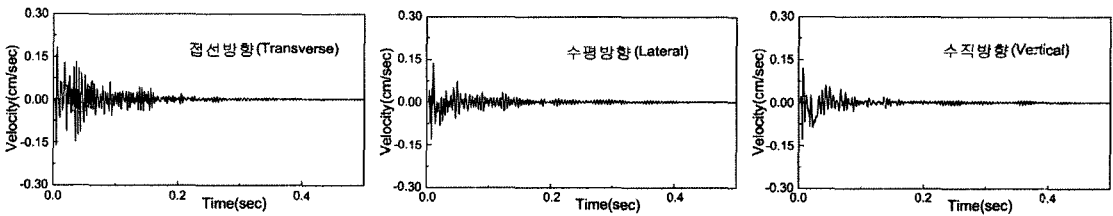


Fig. 8. Results using blasting load in NHI

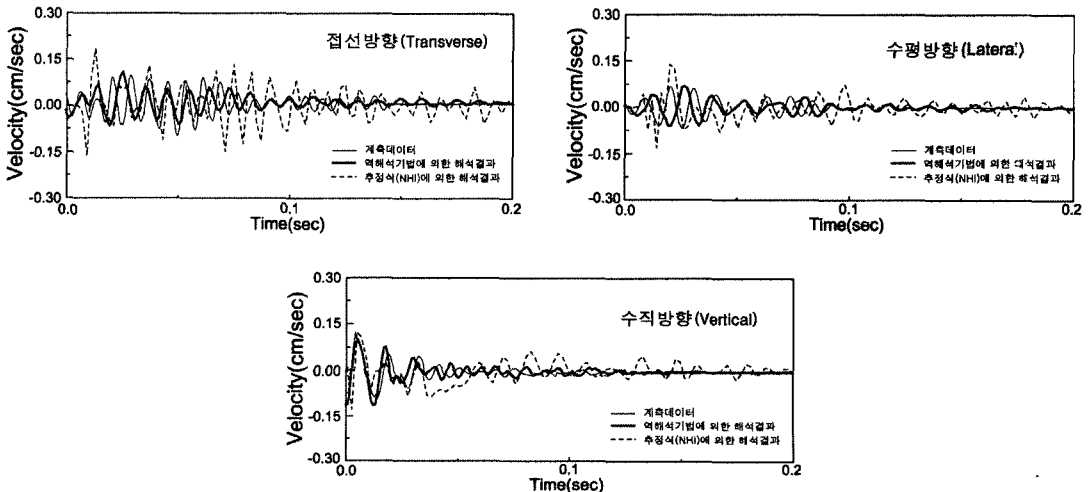


Fig. 9. Comparing measured data and results of numerical analysis

통한 수치해석을 수행하였다. 유한요소모델은 네오스포의 경우 3차원 8절점 유한요소: 101,493개, 3차원 8절점 무한요소: 9,647개, 경남아파트의 경우 3차원 8절점 유한요소: 97,933개, 3차원 8절점 무한요소: 7,697개로 구성하였으며, Fig. 11과 같다. Table 2에 해석시 사용된 지반 및 콘크리트 구조물의 물성치를 나타내었다⁶⁾.

발파하중 산정방법에 따른 해석결과는 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다. 대상구조물의 진동속도는 역해석기법의 발파하중을 적용한 결과에 비해 추정식을 사용한 해석결과가 각각 48%, 57% 높게 나타났다. 이는 앞서 말한 바와 같이 발파압력 추정식은 폭약에 의한 폭발 상태를 이상적인 것으로 가정하고 폭발에너지를 구하

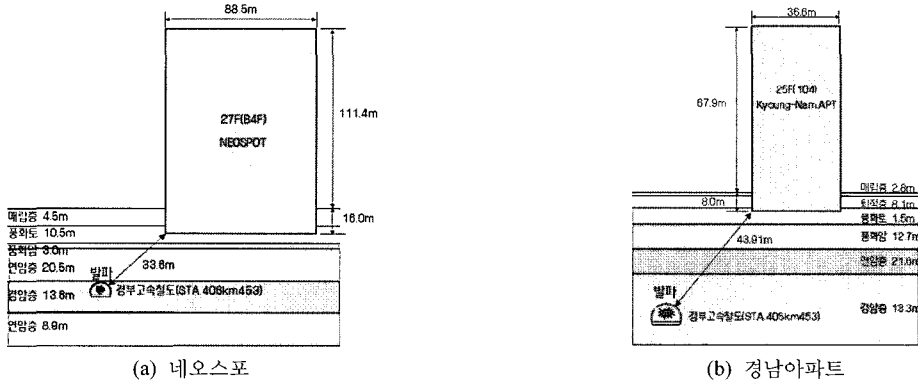


Fig. 10. Section of Analysis

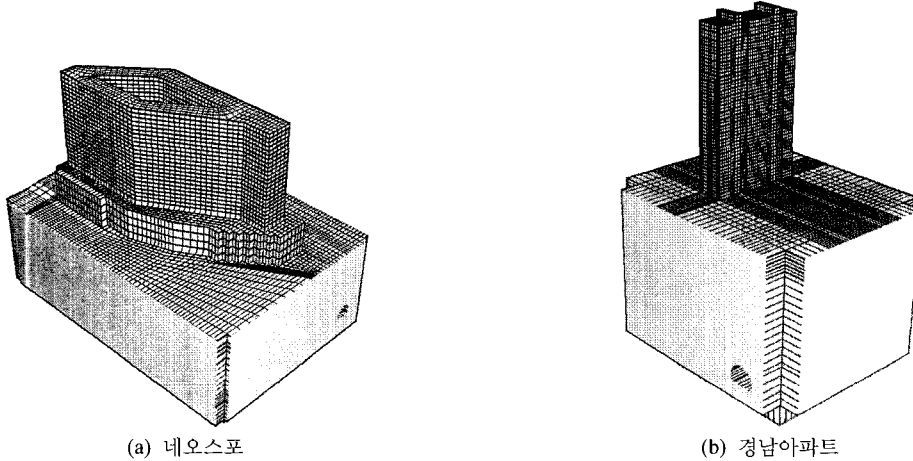


Fig. 11. Finite element model

Table 2. Material property of soil and concrete structure

지반층	탄성계수(N/m ²)	포아송비	단위중량(kg/m ³)
매립층	1.8×10 ⁸	0.41	1,800
퇴적층	-	-	-
포화토	4.39×10 ⁸	0.38	1,900
포화암	1.45×10 ⁹	0.33	2,100
연암층	4.77×10 ⁹	0.31	2,600
경암층	1.23×10 ¹⁰	0.30	2,700
콘크리트	2.49×10 ¹⁰	0.17	2,400

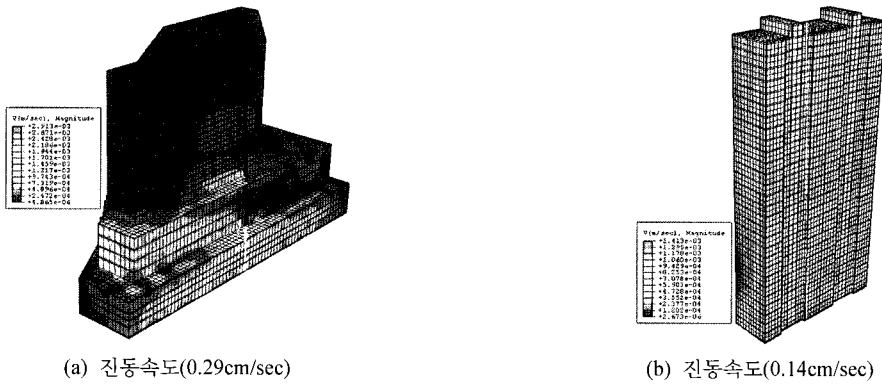


Fig. 12. Results using blasting load in Input Identification method

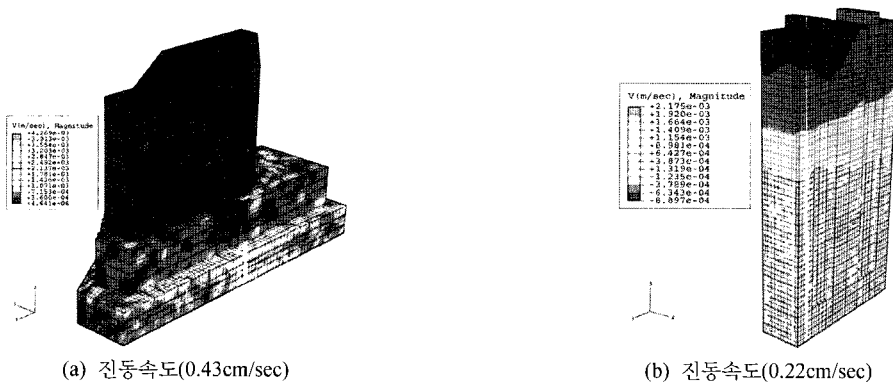


Fig. 13. Results using blasting load in NHI

므로 실제 폭발압력보다 높은 압력을 가지는 것으로 계산되기 때문이다. 하지만 역해석기법의 발파하중을 적용할 경우 암석의 파쇄 및 균열의 발생에 사용되는 에너지를 배제하고 완전히 진동의 전파에만 사용되는 에너지를 산정하여 이를 주변구조물의 발파진동 평가에 활용 할 수 있으며, 지반의 특성을 반영한 진동파형을 모사할 수 있는 장점이 있다. 따라서 역해석기법을 통해 산정된 발파하중을 수치해석의 입력 자료로 이용하는 것이 단순한 발파압력을 사용하는 것보다 실제의 발파현상 및 지반진동을 더욱 정확히 반영하게 된다.

6. 결 론

본 연구에서는 단순한 발파압력을 사용하는 것보다 실제의 발파현상 및 지반진동을 더욱 정확히 반영할 수 있도록 역해석기법과 시험발파에 의한 계측자료를 사용하여 발파하중을 산정하였다. 수치해석에 사용된 프로그램은 지반과 구조물의 상호작용을 모형화하여 지

반의 엄밀한 전달함수를 산정할 수 있는 KIESSI-A3D 프로그램을 사용하였으며, 발파하중의 검증 및 발파시 진동영향평가를 위해서는 3차원 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 산정된 발파하중의 적용성을 검증하기 위하여 수치해석을 수행하여 계측 지점에 대한 응답을 구한 후 실측값과 비교 분석을 통해 사용된 하중의 신뢰성을 검증하였다. 이와 같은 역해석기법을 통해 산정된 발파하중을 3차원 유한요소모델에 적용함으로써 실제 발파공사시 인접한 구조계의 진동영향을 예측할 수 있었으며, 기존의 발파압력 추정식에 의한 해석결과에 비해 합리적인 결과를 얻을 수 있었다. 향후 공사시 발파로 인해 인접구조물에서 발생하는 진동응답을 계측하여 수치해석 결과와 비교를 통해 해석의 신뢰성을 검증하고, 하중원의 모형화에 관해 좀 더 면밀한 검토를 함으로써 수치해석시의 오차를 최소화할 수 있다면 상당히 정확하고 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 최성용, 박의섭, 선우춘, 정소걸, 2004, “실측진동파형을 이용한 발파 동해석 기법에 관한 연구”, 한국암반공학회지, 제14권, 제2호, 108-120
2. Starfield, A. M. and Pugliese, J. M., 1968, “Compressional Waves Generated in Rock by Cylindrical Explosive Changes, A Comparison between a Computer Model and Field Measurement”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts. Vol. 5, pp. 65-77.
3. Liu, Qian and Tidman, j. P., 1995, “Estimation of the Dynamic Pressure around a Fully Loaded Blasthole”, MRL 95-014 Technical Report, CANMET/MRL Experimental Mine
4. 이인모, 박봉기, 박재우, 2004, “터널발파로 인한 굴착선주변 암반거동의 확률론적 연구”, 한국지반공학회지, 제20권, 제4호, 89-102
5. 김재민, 1995, “다중 파동함수를 가진 축대칭 동적무한요소의 개발 및 이를 이용한 지반-구조물 상호작용해석”, 공학박사 학위논문, 한국과학기술원.
6. 경부고속철도 제14-3공구 노반신설 기타공사 구조 및 수리계산서

최준성



1992년 연세대학교 토목공학과, 공학사
1994년 한국과학기술원 토목공학과, 공학석사
1999년 한국과학기술원 토목공학과, 공학박사

Tel: 02-830-7071
E-Mail: ceo@kmclab.co.kr
현재 한국유지관리(주) 대표이사

이진무



1984년 연세대학교 지질학과, 이학사
1986년 연세대학교 대학원 지질학과, 이학석사

Tel: 02-3700-7483
E-Mail: jmlee-d@skec.co.kr
현재 SK건설(주) Gcotask 팀장

조만섭



1991년 전북대학교 자원공학과, 공학사
1993년 전북대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
2001년 전북대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel: 051-894-5970
E-Mail: mscho66@cricmil.net
현재 SK건설(주) 경부고속철도 14-3공구 설계팀장