

실측진동파형을 이용한 비탈면 발파진동 해석 사례 A Case on the Blasting Analysis of Slope using the Measurement Vibration Waveform

박도현¹⁾, 조영곤²⁾, 전석원³⁾

1. 서 론

화약을 이용한 지반굴착은 진동 및 소음 등의 공해가 필연적으로 수반되기 때문에 인접 거주자에게 불안감을 조성하여 다수의 민원을 초래할 뿐만 아니라, 주변 구조물이나 정밀기기류에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 특히, 발파작업 구간 부근에 지장물이 위치하게 되는 경우, 발파진동에 대한 안정성 평가는 매우 중요한 항목이 된다. 따라서, 시공전 설계단계에서 이러한 문제점에 대한 영향평가를 반드시 수행하고, 필요시 적절한 진동저감공법이나 대책을 적용하여 안전한 굴착작업이 되도록 해야 한다.

발파진동 안정성 평가법은 진동추정식을 통한 방법과 현장조건을 모사한 동적수치해석법으로 크게 분류할 수 있다. 진동추정식 검토법은 시험발파를 통하여 대상지역의 발파진동식을 추정하여, 거리와 장약량을 고려한 단순평가법으로서 실무에서 가장 많이 사용되어 왔으나, 대상지역의 지형 및 지반조건을 현실적으로 고려하지 못한 방법이다. 이를 보완하기 위해 최근에는 대상지역의 현장조건을 연속체 또는 불연속체로 모사한 동적해석법이 적용되고 있다.

동적 수치해석법 적용시 가장 중요한 항목 중 하나는 발파하중을 산정하는 것으로서, 일반적으로 발파현상을 모사하기 위한 수치해석은 프로그램 내에서 발파현상을 모사할 수 없으므로 모델 경계면에 발파하중을 적용하는 형태로 수행되어 왔다. 즉, 터널이나 비탈면 발파에 대한 동적 수치해석법의 경우 다수의 발파공 모델링이 현실적으로 거의 불가능하여, 단일발파공, 특히 심발공에서 추정된 발파압력을 최종 굴착면에서의 등가압력으로 환산하여 발파하중으로 적용하게 된다. 이와 같은 이론적인 계산식이나 경험식에 의해 추정된 발파압력을 이용한 방법은 단일 발파공에서의 폭발압력에 대해 연구된 결과로서, 폭발상태를 이상적인 것으로 가정하고 폭발에너지를 구하게 된다. 따라서, 최종 굴착면에 적용된 등가압력은 지반조건을 고려하지 못하여 동일한 단면 및 발파조건에서는 동일한 발파하중이 산정된다. 즉, 발파진동 해석시 가장 중요한 항목인 발파하중을 기존의 발파하중 산정법을 이용하여 적용하는 경우 대상지역

1) 서울대학교 지구환경시스템 공학부 박사과정

2) 조은 엔지니어링 대표

3) 서울대학교 지구환경시스템 공학부 교수

의 지반조건을 고려하지 못하여, 해석결과의 신뢰도를 저하시키는 원인이 된다.

본 사례연구의 대상구간은 OO대교 접속도로 개설공사시 발생된 절토구간으로, 주변에 송전탑이 위치한 대절토 비탈면 구간의 단계별 발파굴착시 안정성을 동적수치해석법으로 검토하였다. 특히, 본 연구에서는 발파하중 산정 및 해석결과의 신뢰도를 제고하기 위하여, 대상지역의 시험발파시 획득된 실측진동파형을 이용한 발파하중 산정법을 통하여 비탈면 발파굴착시 지장물 안정성 평가를 수행하였다.

2. 발파진동해석을 위한 발파하중 산정방법

2.1 기존의 발파하중 산정방법

발파하중으로서 발파압력을 추정하는 이론적 계산식 및 경험식은 여러 연구자들에 의해 제시되어 왔으며, 폭굉압력(Detonation pressure)을 폭약 내부에서 직접 계측하는 것은 거의 불가능하여, 폭약의 화학적 평형방정식과 계측실험에 의한 경험적 수정항을 조합하여 폭굉압력에 관한 식들을 제안하였다. 이러한 발파압력 계산식은 주로 폭약의 밀도 및 폭굉속도(Detonation velocity)를 입력변수로 사용하고 있다.

기존 제안식에 의해 계산된 폭굉압력을 터널이나 비탈면 최종 굴착면에 작용하는 발파하중으로 산정하는 방법은 다음과 같다. 식 (1)은 미국 National Highway Institute의 발파압력 제안식으로서 이와 같은 기존 제안식을 이용하여 폭굉압력을 계산한다.

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

여기서, P_{det} : 폭굉압력(kbar)

SG_e : 폭약 밀도(g/cm^3)

V_e : 폭굉속도(ft/s)

기존 제안식들에 의한 폭굉압력은 주로 밀장전된 경우에 적용되는 것으로서, 발파진동 저감을 위하여 사용되는 디커플링 효과를 고려하기 위하여 다음과 같은 보정식이 적용되어 왔다.

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

여기서, d_c : 폭약 직경(mm)
 d_h : 장약공 직경(mm)
 P_B : 공벽면에 가해지는 압력(kbar)

실제로 발파에 의해 공벽에 작용하는 동압력은 시간에 따라 변화하는 형태를 보이므로, 발파 동해석을 정확하게 모사하기 위해서는 동압력의 시간이력을 현실적으로 반영해야 한다. 일반적으로 많이 적용되는 감쇠함수는 1968년 Starfield 등이 제안한 창함수(Window function)로 이를 사용하여 동압력에 대한 시간이력을 구하게 된다.

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

여기서, P_B : 공벽면에 가해지는 압력
 B, t : 하중상수(16,338)와 시간
 $P_d(t)$: 시간에 따른 폭굉압력

이와 같이 단일발파공에서 산정된 발파하중은 동적수치해석을 위하여 터널이나 비탈면의 최종 굴착면에 하중으로 보정된다. 보정은 단일 공벽면에 가해지는 최대압력을 단일 공벽면 주변장과 최종 굴착면 주변장과의 비, 심발공에서의 최대 지발당 장약량을 이용하여 수행된다. 앞서 언급한 대로, 이와 같은 방법으로 산정된 발파하중은 동일한 굴착단면과 동일한 발파조건을 갖는 경우, 일정하게 산정되어 지반조건에 따른 발파하중 변화를 고려하지 못하게 되는 문제점을 갖고 있다. 이를 개선하기 위하여, 최근에는 시험발파를 통해 획득된 실측진동파형을 보정이나 역해석을 통하여 발파하중을 산정하는 방법을 적용하고 있다. 본 연구에서는 실측진동파형을 추정된 발파진동식을 이용하여 굴착경계면에서의 발파하중으로 보정하는 방법을 채택하여 적용하였다.

2.2 시험발파에 의한 실측진동파형을 이용하는 방법

앞서 언급하였 듯이, 최근에는 기존 발파하중 산정식의 문제점을 보완하기 위하여, 시험발파를 통해 획득된 실측진동파형을 보정이나 역해석을 통하여 발파하중을 산정하는 방법 등을 적용하고 있다. 이와 같이 발파진동파형을 수치해석의 입력자료로 이용하는 방법은 단순한 발파압력을 이용하는 것보다 실제의 발파현상 및 지반진동을 더 정확하게 반영할 수 있다. 이는 구조물의 안정성을 평가하는 기준이 주로 지반의 진동속도를 근거로 하고 있고, 입력자료인 발파진동파형이 발파진동이 전달되는 지반의 특성을 반영하여 모사될 수 있기 때문이다. 실측진동파형을 보정하는 방법은 추정된 발파진동식을 이용하여 굴착경계면에서의 발파하중으로

보정하는 것이며, 역해석에 의한 방법은 수치해석을 통하여 지반의 전달함수(Transfer function)을 추출하여 시간이력에 따른 발파하중을 산정하는 것이다. 본 연구에서는 해석의 효율성 및 간편성을 위하여 실측진동 파형을 추정 발파진동식에 근거하여 보정하는 방법을 적용하였으며, 산정과정은 그림 1과 같으며, 상세과정은 다음과 같다.

실제 발파작업시 발파지점으로부터 최종 굴착면까지 이격된 지점에서의 발파진동을 정량적으로 산정하기 위하여 시험발파에서 추정된 대상지반의 발파진동식을 이용한다. 즉, 시험발파를 통해 폭원으로부터 특정 거리만큼 떨어진 지점에서 진동을 실측하는 한편, 발파진동 추정식으로부터 그 거리만큼 떨어진 지점의 진동속도를 계산함으로써 실제측정값과 추정값의 비율을 계산한다. 이 비율을 이용하여 발파진동 추정식으로부터 계산된 실제 발파작업시 발파지점에서 최종 굴착면까지의 이격거리에서의 진동속도를 보정한다. 이와 같은 방법은 발파진동식에서 K와 n 상수로 대변되는 지반조건을 고려한 발파하중 산정법으로서 기존의 발파압력에 의한 방법보다 더 합리적인 것이고, 안정성 평가 결과의 신뢰도가 향상될 것으로 판단된다.

$$PPV_c = PPV_{e2} \times \frac{PPV_m}{PPV_{e1}} \quad (4)$$

- 여기서, PPV_c : 계측지점의 발파진동파형을 발파하중으로 적용하기 위한 보정값
- PPV_{e1} : 발파진동식에 의한 계측지점에서의 발파진동 추정값
- PPV_{e2} : 발파하중 산정 위한 이격거리에서의 발파진동 추정값
- PPV_m : 시험발파시 계측지점에서의 발파진동 최대값

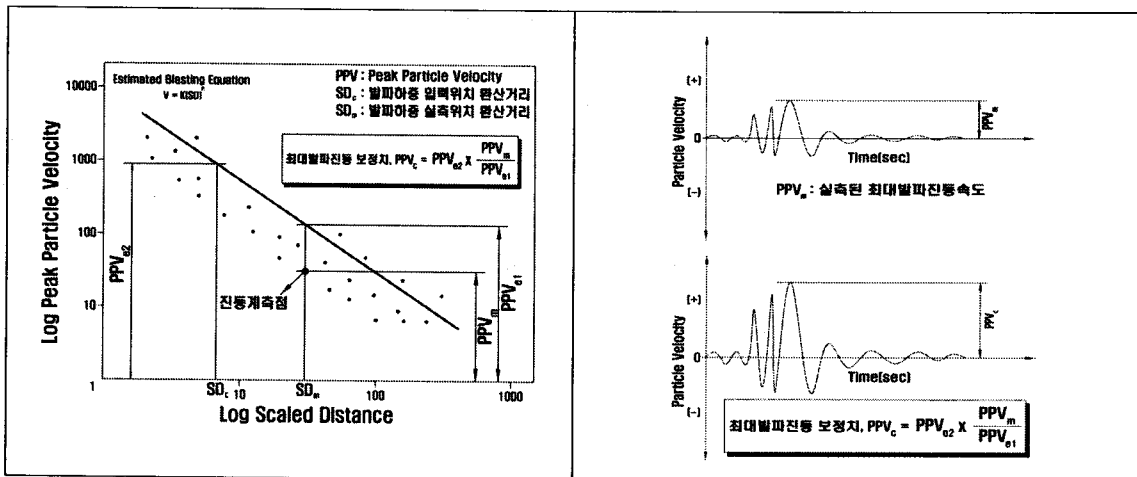


그림 1. 시험발파시 측정된 진동파형을 이용한 발파하중 산정방법

3. 비탈면 발파굴착에 따른 주변 지장물 안정성 평가

3.1 해석조건 및 적용 발파공법

본 대상구간에는 도로공사시 발생된 절토부 중 대절토 구간에서 발파작업시 지장물이 되는 송전탑이 위치하고 있다. 송전탑기초의 이격거리는 적용 발파패턴에 따라, 진동제어(소규모) 영역에서는 30m, 진동제어(중규모) 영역에서는 40m, 일반 발파영역에서는 60m로 산정되었으며, 그림 2는 각 발파공법별 송전탑 기초까지의 최소이격거리 및 지반조건을 나타내고 있다. 한편, 주변 지장물 위치시 발파진동에 의한 피해를 최소화하기 위해, 건설교통부에서 제안한 2003년도 암발파 설계요령에 의거하여 발파공법을 선정하였다. 표 1은 해석구간의 지반등급에 따른 물성치이고, 표 2는 건설교통부 설계요령에 근거하여 적용된 발파공법이다.

표 1. 해석 지반 물성치

구 분	단위중량(tf/m ³)	포아송비	변형계수(tf/m ²)	점착력(tf/m ²)	내부마찰각(°)
연 암	2.50	0.26	260,000	10	33
보통암	2.60	0.23	530,000	20	35
경 암	2.70	0.21	1,700,000	30	40

표 2. 적용 발파공법 상세

구 분	최대 지발당 장약량(kg/delay)	천공장(m)	저항선(m)	공간격(m)
진동제어(소규모)	1.120	2.70	1.00	1.20
진동제어(중규모)	2.500	3.20	1.40	1.60
일반발파	6.500	6.40	1.70	1.90

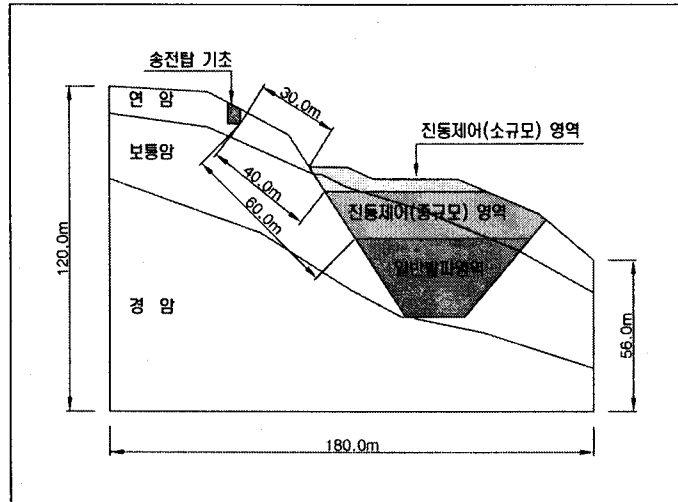


그림 2. 발파진동 해석단면 및 적용 발파패턴

3.2 발파하중 산정

현장의 발파진동식을 추정하고, 주변 지장물에 대한 동적 수치해석에 의한 발파진동 안정성을 평가하기 위한 실측진동과형을 획득하기 위해 시험발파를 수행하였다. 시험발파는 적용되는 발파공법에 따라 3가지 조건(진동제어(소규모), 진동제어(중규모), 일반발파)에서 이루어졌으며, 추정된 발파진동식은 다음과 같다.

$$\text{자승근} : V_{95\%} = 242.4 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.69} \quad (5)$$

$$\text{삼승근} : V_{95\%} = 517.7 \left(\frac{D}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1.84} \quad (6)$$

여기서, $V_{95\%}$: 95% 발파진동값(cm/sec)

D : 이격거리(m)

W : 지발당 최대 장약량(kg)

추정된 발파진동식을 토대로 송전탑의 허용 발파진동 기준치를 1.0cm/sec로 설정하였을 경우, 이격거리 30m까지는 암파쇄굴착공법, 30 ~ 40m까지는 진동제어발파(소규모), 40 ~ 60m까지는 진동제어발파(중규모), 60m이후에서는 일반발파를 적용하는 것이 허용 진동기준치 이내로 안전한 것으로 검토되었다.

또한, 시험발파에서 획득된 실측진동파형을 동적수치해석시 발파하중으로 적용하기 위하여, 여러 계측지점 중 각 발파공법별 이격거리와 가장 근접한 위치에서 측정된 진동파형 자료를 활용하였다. 각 발파공법별 적용된 진동파형은 그림 3과 같고, 앞서 2.2절에서 설명한 진동파형 보정에 의한 수치해석 적용 진동파형은 그림 4와 같다.

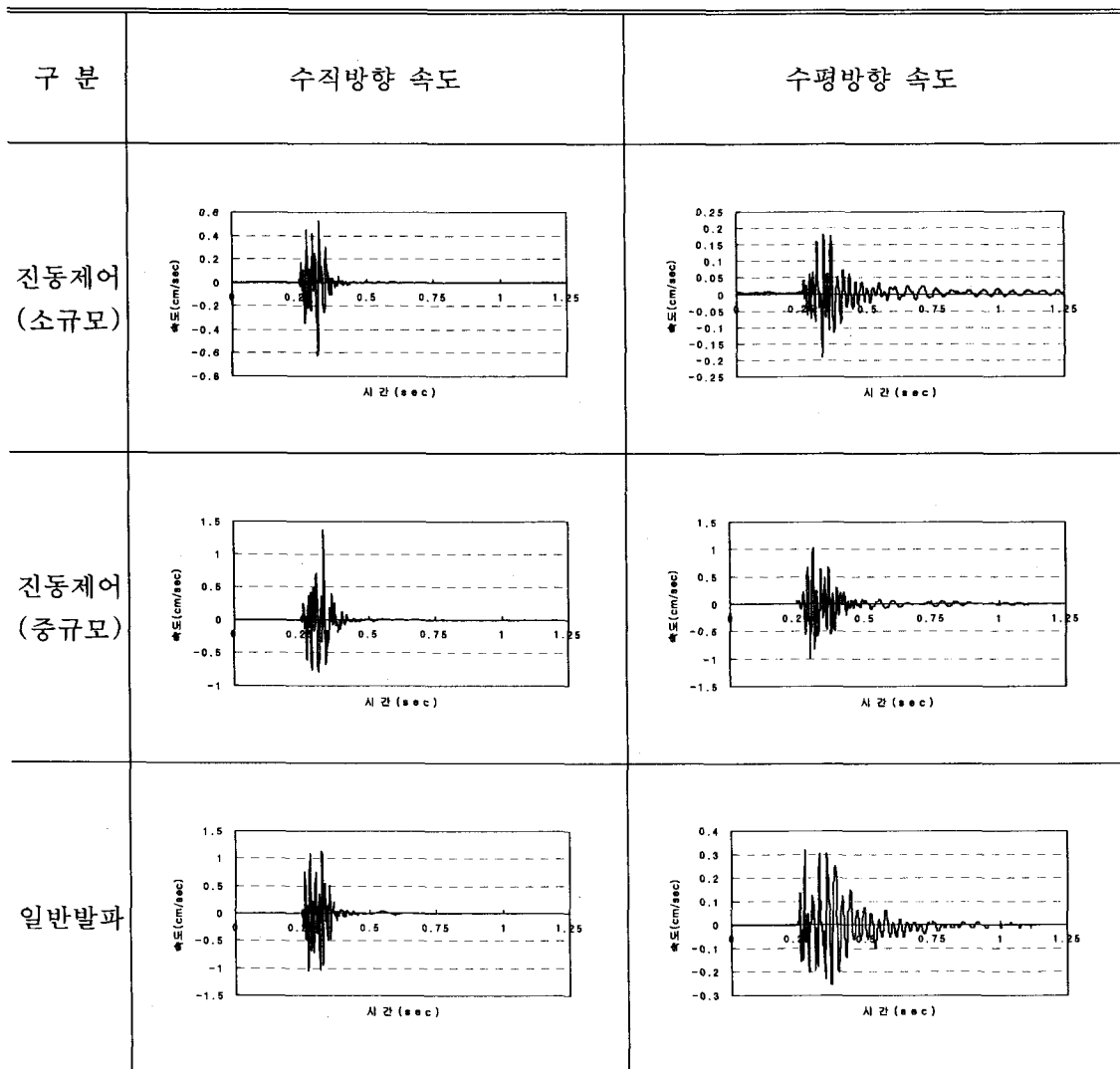


그림 3. 각 발파공법별 적용한 실측진동파형

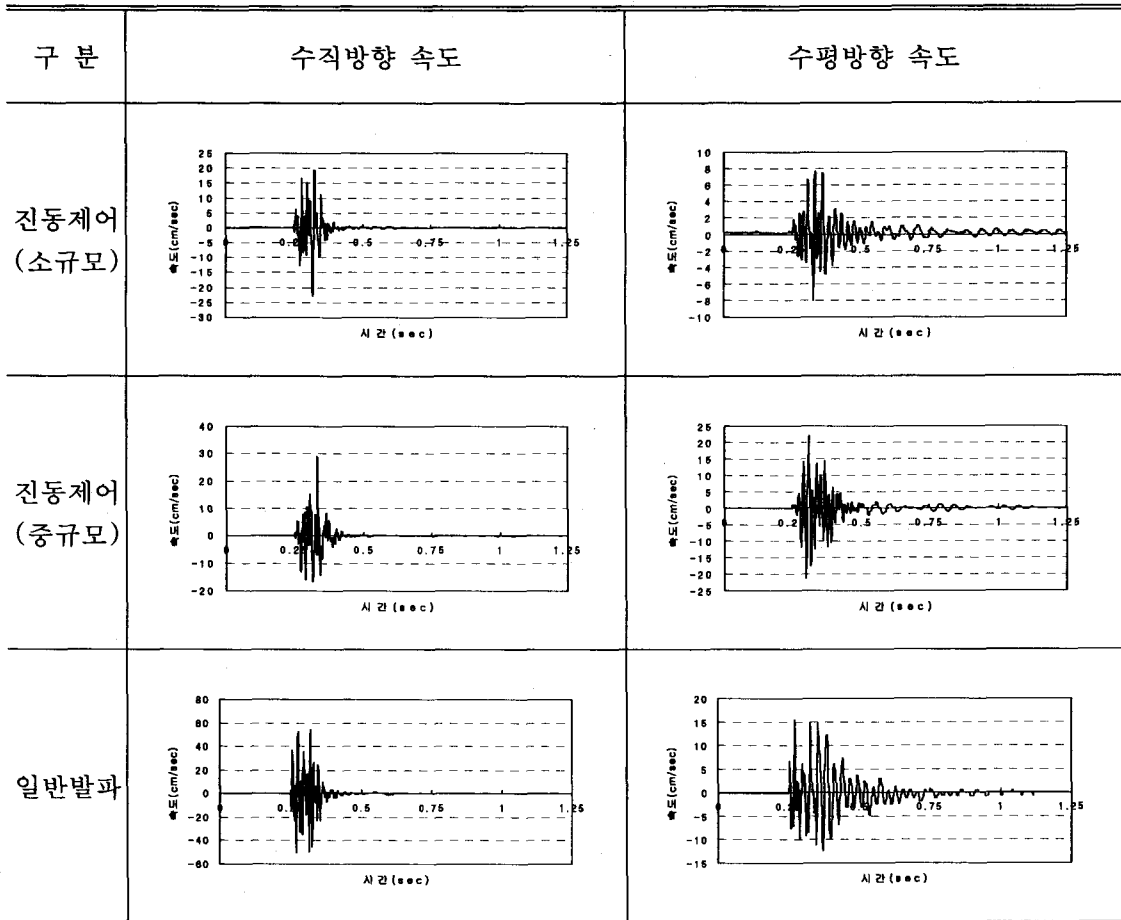


그림 4. 각 발파공법별 보정된 수치해석 적용 진동파형

3.3 단계별 굴착에 따른 발파진동 영향 검토 및 분석

실측진동파형에 의해 산정된 발파하중을 토대로 단계별 비탈면 발파굴착에 따른 송전탑의 안정성 평가를 위해, 각 발파공법별 최소이격거리가 발생되는 지점에 발파하중을 적용하였다. 송전탑에 대한 안정성 평가는 진동속도를 기준으로 하였으며, 허용 발파진동 기준치는 1.0cm/sec로 설정하였다. 해석 프로그램은 FLAC 2D(Itasca)를 사용하였으며, 해석결과는 다음과 같다.

각 발파공법별 최소이격거리는 진동제어(소규모) 발파시 약 30m, 진동제어(중규모) 발파시 약 40m, 일반 발파시 약 60m이며, 송전탑 기초에 대한 안정성 검토를 기초하부의 수직, 수평 방향 진동속도 및 합벡터 진동속도를 계측하여 수행되었다.

그림 5는 진동제어(소규모) 발파시 안정성 검토결과로서, 깎기 비탈면 상부에 위치하는 송

전탑의 경우 최대 지발당 장약량이 1.120kg인 Type III의 발파패턴 적용시 약 30m 이격된 위치에서의 수평 및 수직방향 최대 진동속도가 각각 0.529cm/sec, 0.416cm/sec이고, 수평 및 수직방향 벡터합이 0.673cm/sec로 허용진동치인 1.0cm/sec보다 작아 발파진동에 의한 안정성이 확보되는 것으로 검토되었다.

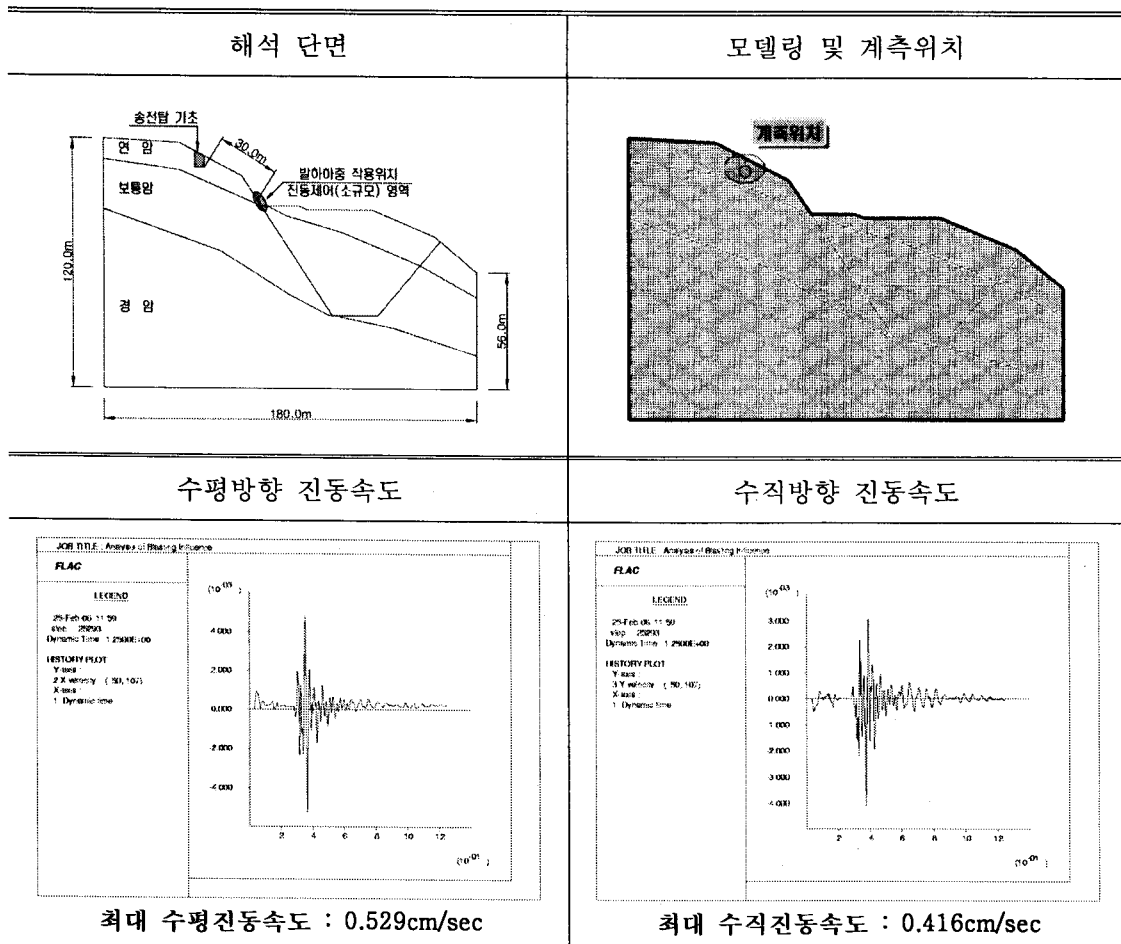


그림 5. 진동제어(소규모) 발파시 해석결과

그림 6은 진동제어(중규모) 발파시 안정성 검토결과로서, 깎기 비탈면 상부에 위치하는 송전탑의 경우 최대 지발당 장약량이 2.500kg인 Type IV의 발파패턴 적용시 약 40m 이격된 위치에서의 수평 및 수직방향 최대 진동속도가 각각 0.557cm/sec, 0.566cm/sec이고, 수평 및 수직방향 벡터합이 0.795cm/sec로 허용진동치인 1.0cm/sec보다 작아 발파진동에 의한 안정성이 확보되는 것으로 검토되었다.

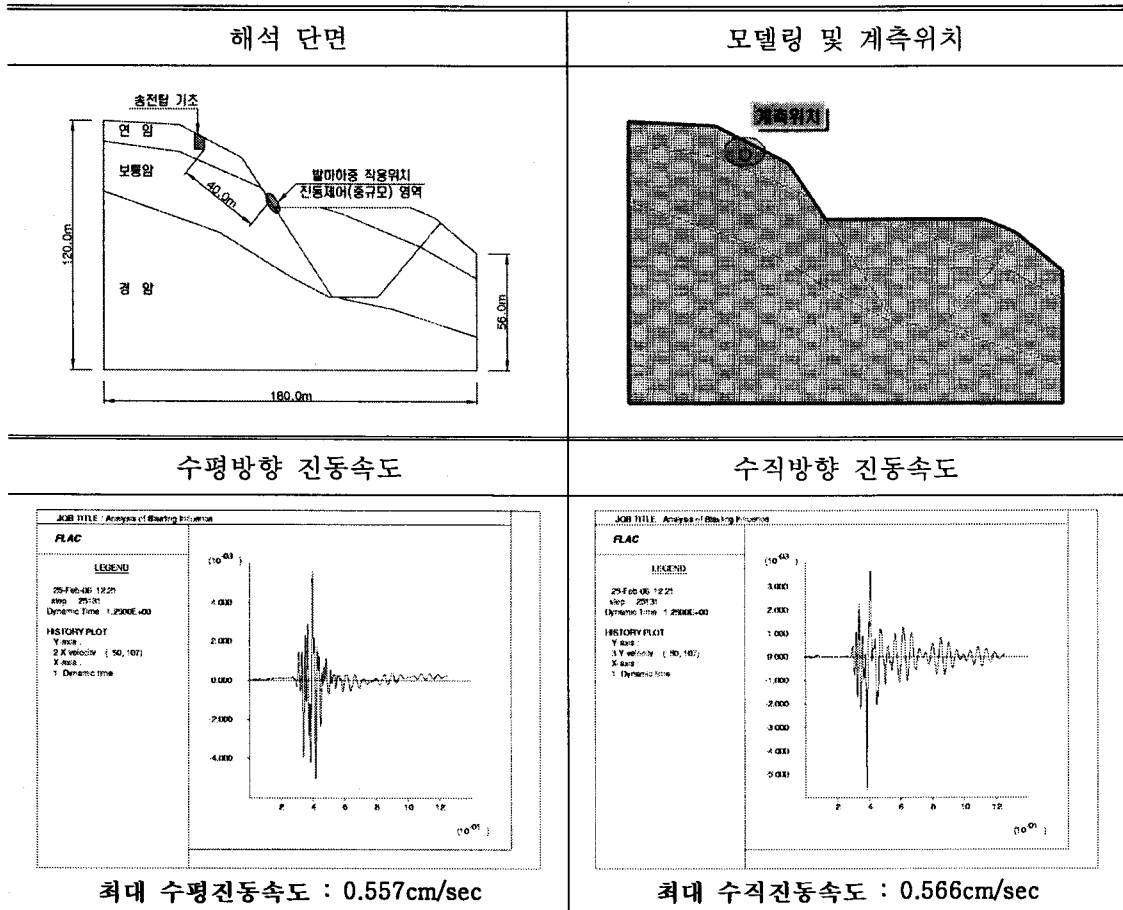


그림 6. 진동제어(중규모) 발파시 해석결과

그림 7은 일반 발파시 안정성 검토결과로서, 깎기 비탈면 상부에 위치하는 송전탑의 경우 최대 지발당 장약량이 6.500kg인 Type V의 발파패턴 적용시 약 60m 이격된 위치에서의 수평 및 수직방향 최대 진동속도가 각각 0.308cm/sec, 0.430cm/sec이고, 수평 및 수직방향 벡터합이 0.529cm/sec로 허용진동치인 1.0cm/sec보다 작아 발파진동에 의한 안정성이 확보되는 것으로 검토되었다.

비탈면의 단계별 발파굴착시 송전탑 구조물의 안정성을 종합적으로 검토한 결과, 최대 수평 및 수직방향 진동속도는 각각 0.557cm/sec, 0.566cm/sec로 진동제어(중규모) 발파시 발생하였으며, 최대 진동속도 벡터합은 0.795cm/sec로 나타났다. 이는 송전탑 구조물의 허용 발파진동 기준치인 1.0cm/sec 이하로 발파에 의한 피해는 거의 없을 것으로 판단되었고, 적용된 발파공법이 합리적이고 적절한 것으로 평가되었다.

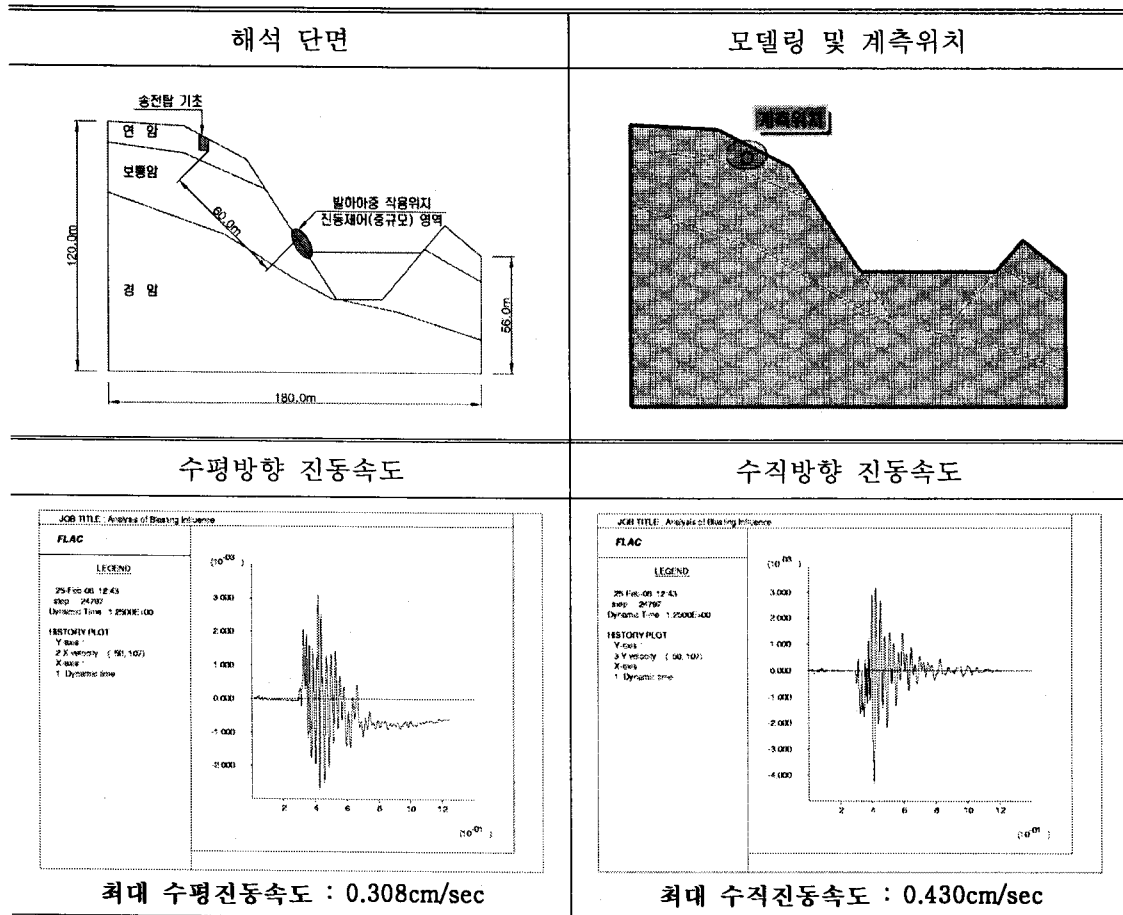


그림 7. 일반 발파시 해석결과

4. 결론

본 연구에서는 기존의 여러 연구자들에 의해 제안된 발파압력 계산식을 이용하여 발파하중을 산정하는 방법의 문제점, 즉 현장의 지반조건을 고려한 발파하중 산정이 어려운 측면을 개선하고, 발파진동에 대한 안정성 평가의 신뢰도를 제고하기 위하여 시험발파를 통해 획득된 시간이력에 따른 발파 진동속도파형 자료를 발파하중 산정시 이용하였다.

적용된 발파진동에 대한 안정성 평가법은 실무에서 가장 많이 사용되어 온 발파 진동추정식을 토대로 이격거리와 지발당 장약량을 이용한 단순평가법이 아닌, FLAC 2D 프로그램을 이용한 연속체 접근법을 활용한 동적수치해석법을 적용하였다.

본 연구가 이루어진 대상지역은 OO대교 접속도로 개설공사시 발생된 절토구간으로 주변에

송전탑이 위치한 대절토 비탈면 구간 발파굴착시 송전탑의 구조적 안정성 평가를 위해 비탈면 굴착단계를 고려하여 해석을 수행하였다. 적용된 발파공법은 진동제어(소규모) 발파, 진동제어(중규모) 발파, 일반발파로 송전탑과의 이격거리를 고려하여 선택적으로 적용되었으며, 발파패턴 설계는 건설교통부에서 제안한 암발파 설계요령에 근거하여 이루어졌다.

발파진동 안정성 해석결과 상기 3가지 발파공법별로 송전탑의 허용 발파진동속도 기준치인 1.0cm/sec보다 작게 분석되어, 발파시 송전탑의 안정성에 문제가 없는 것으로 검토되었다.

본 사례연구에서는 현장조건을 고려한 발파하중 산정을 위하여 시험발파에서 실측된 진동속도파형을 추정된 발파진동식을 이용하여 간편하게 보정하는 방법을 적용하였다. 이러한 간편한 보정법의 신뢰도를 더 향상시키고, 발파하중 산정시 불확실성을 최소화하기 위한 발파하중 산정법에 대한 연구가 향후 더 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 최성웅, 박의섭, 선우춘, 정소걸, 2004, 실측진동파형을 이용한 발파 동해석 기법에 관한 연구, 한국암반공학회, 제14권, 제2호, pp. 108-120
2. 최준성, 이진무, 조만섭, 2006, 역해석기법을 통한 발파하중 산정 및 수치해석을 이용한 구조물의 진동영향평가, 한국암반공학회, 제16권, 제3호, pp. 232-240
3. C. H. Dowding, 2006, Blast and construction vibration monitoring and control : thirty-five-year perspective, Practice periodical on structure design and construction, pp. 8-12.
4. Itasca Consulting Group, INC., 2000, FLAC2D-Theory and Background, Version 4.0, Minneapolis:ICG.
5. 김재극, 1999, 산업화약과 발파공학, 서울대학교 출판부
6. 윤철현, 1998, 화약 발파해설, 구미서관
7. 건설교통부, 2003, 암발파 설계요령