

발파 버력의 재료거동이 프로텍터에 작용하는 충격하중에 미치는 영향

김용구¹, 진병무², 백기현³, 서경원⁴

The effect of material behavior of blasted muck on the impact force applied on a protector

Woong-Ku Kim, Byeong-Moo Jin, Ki-Hyun Baek, Kyoung-Won Seo

ABSTRACT To maintain the traffic flow during tunnel expansion, cars must be protected from falling rocks during excavation and to do so, a protector has to be installed inside the tunnel before beginning the excavation. In Korea, tunnel expansion by blasting rather than by mechanical excavation has been widely achieved. For this reason, a series of numerical analysis were performed to analyze the characteristics of impact load according to material behaviour of blasted rock by using Explicit FEA program. From the numerical results, it is found that the impact loads when rock is assumed as an elastic-plastic material appear to be only 7~12% compared with that when it is elastic.

Keywords: Impact load, protector, blasted rock, existing tunnel expansion

요약 차량이 통행하는 상태에서 기존터널을 확대하기 위해서는 굴착 시 발생하는 버력의 비산으로부터 차량을 보호하고 굴착공간과 차량운행공간을 분리하기 위해 프로텍터를 기존터널 내부에 설치하게 된다. 기존에 제안된 이론해에서는 버력을 탄성체로 가정하였으나 일반적으로 암석은 탄소성거동을 하므로 본 논문에서는 Explicit FEA (ABAQUE) 프로그램을 이용하여 버력의 재료 거동에 따른 수치해석을 실시하였다. 수치해석결과를 토대로 버력의 재료거동에 따른 충격하중을 분석하였으며 제안된 이론해와도 비교분석하였다. 수치해석결과 버력이 탄소성거동을 할 경우 탄성거동에 비해 충격하중이 약 7~12% 수준인 것으로 나타났다. 탄성거동 시 이론해와 수치해석결과를 선형회귀분석한 결과 매우 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 탄소성 거동 시에는 직선선형관계를 보이나 탄성계수별로 직선회귀식의 기울기가 다르게 나타났다.

주요어: 충격하중, 프로텍터, 발파버력, 기존터널확대

접수일(2011.5.12), 수정일(2011.5.19), 게재확정일(2011.5.25)

¹정회원, 대우건설기술연구원 전임연구원, 공학석사

²정회원, 대우건설기술연구원 책임연구원, 공학박사

³정회원, 대우건설기술연구원 책임연구원, 공학박사

⁴정회원, 대우건설기술연구원 선임연구원, 공학박사

*교신저자: 김용구 (E-mail: woongku.kim@daewoocnc.com)

1. 서론

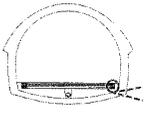
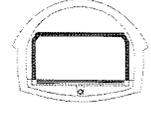
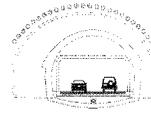
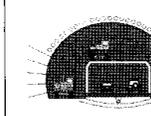
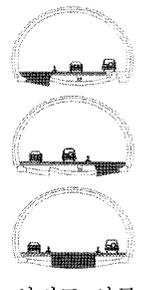
기존의 노후터널을 확대하는 방법으로는 도로를 완전히 차단하고 장기간 교통을 통제한 후 재굴착하거나 기존터널내로 방호공을 설치하고 내부로는 차량을 통행하고 외부를 확대굴착하는 방법이 있다. 이때 차량을 통행시키면서 확대 굴착하는 경우에는 터널내부에 운행차량 및 작업자의 보호를 위해 방호공으로서 강재의 프로텍터를 많이 사용하는데(서경원 등, 2008a; 2008b) 이 프로텍터는 확대굴착의 경제성 확보나 안전성 확보에 큰 역할을 한다. 따라서 안정성과 경제성을 모두 확보할 수 있도록 프로텍터에 작용하는 하중을 정확하게 산정하여야 한다.

프로텍터에 작용하는 하중은 크게 정하중과 동하중으로 나눌 수 있으며 정하중에는 천공, 슛크리트 및 록볼트 타설 장비에 의한 하중과 굴착된 버력에 의한 적재하중이 있으며 발파굴착을 가정하면 동하중에는 발파 시 비산석에 의한 충격하중이 있다. 여기서 장비하중과 버력의 적재하중은 장비나 확대면적을 통해 쉽게 산정이 가능하나 충격하중은 버력의 크기와 재료거동특성 및 발파 시 가스압과 충격압에 의해 비산석이 갖는 초기속도 등 여러 가지 요인에 의해 변화되므로 산정이 용이하지 않다. 국외 사례를 보면 터널확대굴착 시 기계에 의한 굴착이 대부분이나 국내의 경우 공기, 경제성, 발파 굴착에 대한 노하우 등을 고려하면 발파굴착이 효과적일 것으로 예상된다. 따라서 국내에서 차량 흐름을 유지한 채 터널을 확대시공하는 공법을 적용하기 위해서는 발파 시 비산석의 충격하중에 대한 연구가 필요하다.

백기현(2011)은 버력을 완전탄성체로 가정하였을 때 프로텍터에 가해지는 충격하중에 관한 이론해로부터 충격저감재의 효과 및 충격하중에 관한 연구를 수행하였다. 여기서 버력의 충격하중은 버력과 프로텍터의 등가탄성계수, 버력의 무게, 단위중량 및 낙하높이의 함수이며 발파 시 가스압과 충격압에 의해 버력이 갖는 초기속도를 등가의 낙하높이로 환산하여 적용되었다. 하지만 대부분의 암반공학적 문제에서 암석은 탄소성재료로 가정하며, 탄소성재료는 탄성영역에서는 하중증가에 의해 변형이 발생하지만 탄성영역을 초과하여 소성영역에 들어가게 되면 하중의 증가 없이도 변형이 발생된다. 따라서 충격 발생 시 완전탄성체는 하중의 증가가 계속되지만 탄소성재료는 탄성영역에서만 하중의 증가가 이루어지므로 일반적으로 완전탄성체에 비해 탄소성재료의 충격하중이 더 적게 발생된다.

본 논문에서는 프로텍터의 효율적인 설계를 위해 발파시 비산버력을 완전탄성체와 탄소성체로 가정하여 프로텍터에 미치는 충격하중을 이론해와 수치해석 값을 비교하여 평가하였다. 수치해석은 ABAQUS 프로그램을 사용하여 동해석인 Explicit 해석을 수행하였다.

표 1. 터널 확대 시공 순서(서경원 등, 2008a)

시공 순서					
	① 기초공	② 프로텍터 설치	③ 사전보강	④ 굴착공	
					
	⑤ 라이닝설치	⑥ 프로텍터 제거	⑦ 포장공		인버트 시공

2. 교통 흐름을 확보한 터널확대공법 개요

김동규와 정호섭(2007)과 서경원 등(2008a; 2008b)은 운영 중 터널확대 공법에 대한 해외사례분석을 통해 본 공법을 소개하였는데 일본의 경우 40여 차례의 터널 확대사례가 있는 만큼(勝間田直乙, 1994; 鈴木雅行, 2005; Kobayashi, 2009; Masayuki, 2005) 본 공법을 적용할 수밖에 없는 현상이 늘어 날 것으로 예상 하였다. 터널확대 시공사례를 분석한 결과 일반적인 확대 공정은 다음과 같다.

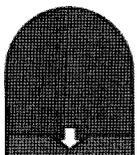
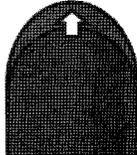
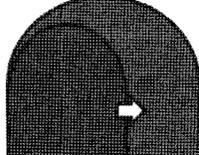
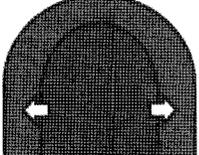
먼저 프로텍터를 설치하는 위치에 기초공을 설치하고 프로텍터를 설치한다. 프로텍터는 갱외에서 조립이 이루어지며 설치하는 야간에 교통통제를 실시하고 이루어진다. 이후 기존터널 주변의 확대되는 부분을 휘폴링 등으로 사전보강하고 굴착하게 된다. 굴착 후 지보는 신설터널과 마찬가지로 슛크리트와 록볼트가 주체가 된다. 굴착이 완료되면 라이닝을 설치하고 프로텍터를 철거하게 된다(일본토목연구소, 2003). 자세한 순서는 다음 표 1에 나타내었다.

기존터널의 확대는 확대량과 확대 방향에 따라 크게 4가지 패턴으로 분류할 수 있다(표 2 참조)

(1) 하부부분 확대공법

기존 터널의 폭원을 변경하지 않고 노반아래 굴착과 포장두께의 축소에 의한 내공높이만을 확대한다. 비교적 비용은 저렴하지만 터널의 지지력확보와 배수공 이설 등에 문제가 있다.

표 2. 터널 단면 확대 분류

확대종류	하부부분 확대공법	상부부분 확대공법	편측확대 공법	양측확대 공법
개념도				

(2) 상부부분 확대공법

기존 터널의 폭원을 변경하지 않고 터널 상부 아치의 일부 또는 전면을 확대 굴착하여 내공높이만을 확대한다. 작업공간이 협소하여 작업효율이 나쁘며 결과적으로는 전단면 확대에 비하여 비용이 높게 되는 경우가 많다. 도로터널에서는 실제 시공사례가 없으며, 철도터널에서는 전기 시설물 공사를 위한 실제 사례가 있다.

(3) 편측확대 공법

기존 터널의 터널 중심선을 이동하여 한쪽 방향으로 집중하여 작업공간을 크게 하고 효율적인 시공작업이 가능하다. 단 도로선형 등의 제약조건을 받는 것 이외에 기존 콘크리트 라이닝의 건전도 및 접속부에 관한 구조 등이 중요한 요소로 된다.

(4) 양측확대 공법

기존 터널의 양측으로 단면전체를 확대한다. 터널중심의 이동량이 크지 않은 경우에 적용한다. 실제 시공사례가 가장 많은 시공패턴이다. 도로선형의 제약이 적지만 작업공간이 협소하고 대형범용기계의 사용이 곤란한 경우가 일반적이다.

3. 비산버력의 충격하중 이론해

발파에 의해 프로텍터에 가해지는 충돌하중은 발파시 발생하는 충격파와 가스압을 받은 버력이 그림 1과 같이 높이 H에서 낙하할 때 프로텍터에 가하는 하중으로 생각할 수 있으며 순차적 발파로 인해 버력의 높이가 증가되지만 기존에 발파된 버력이 적재되어 있기 때문에 충격하중은 최초 발파시 발생하는 버력에 의한 것이 가장 클 것으로 예상할 수 있다.

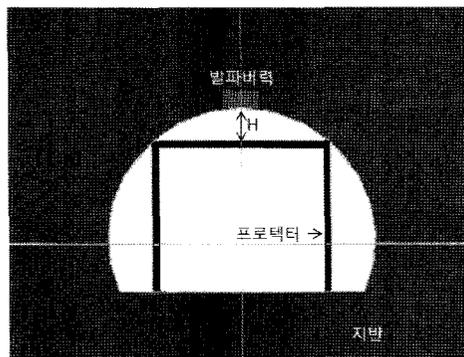


그림 1. 발파 버력

백기현(2011)의 연구에서는 Hertz의 접촉이론과 뉴톤의 가속도법칙 및 에너지보존법칙을 적용하여 충격하중을 다음 식 (1)과 같이 제시하였다.

$$F_{\max} = 1.7672(E^*)^{2/5}(\gamma)^{-1/15}(W)^{2/3}(H)^{3/5} \quad (1)$$

여기서, γ : 버력의 단위중량(kgf/m³)

W : 버력의 중량(kgf)

H : 낙하높이(m)

4. 수치해석

4.1 개요

재료의 거동특성에 따른 충격하중의 특성을 분석하고 제안된 이론해와 비교분석하기 위해서 수치해석을 수행하였다. 사용된 프로그램은 충격문제를 해석할 수 있는 ABAQUS 프로그램을 사용하여 동해석인 Explicit 해석을 수행하였으며 버력의 낙하높이를 변화시키며 해석을 수행하였다. 버력은 완전탄성재료와 탄소성재료로 나누어 해석을 수행하였으며 프로텍터는 강체로 모델링하였다. 버력의 모양은 다양하지만 구체가 가장 안정적인 구조이므로 구체로 모델링하였다(그림 2). 충돌시 contact force를 측정하여 이를 충격하중으로 고려하였다.

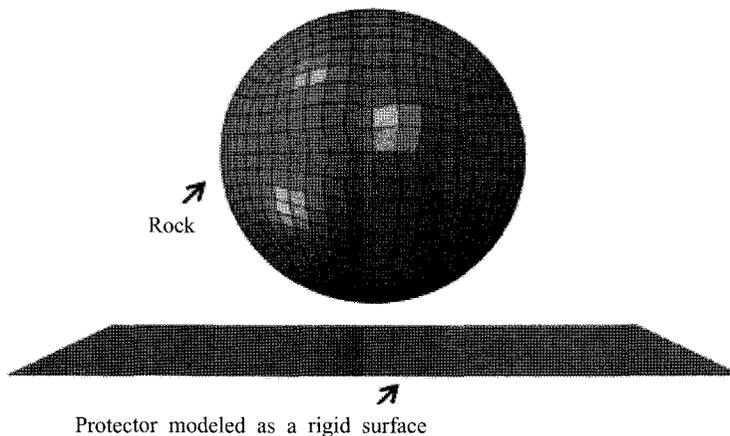


그림 2. 해석모델

표 3. 버력의 재료물성

구분	완전탄성거동	탄소성거동
밀도(kg/m ³)	2500	2500
탄성계수(GPa)	5, 15	5, 15
점착력(MPa)	-	0.5
마찰각(°)	-	40
포아송비	0.25	0.25

4.2 재료물성

버력의 탄소성 거동은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하여 점착력과 마찰각을 고려하였다. 완전탄성체인 경우에는 탄소성재료와 탄성특성은 동일하고 점착력과 마찰각을 제외하였다. 3등급암반에서 발파하는 것으로 가정하였으며 기존의 터널 해석사례를 분석하여 버력의 물성을 적용하였다. 기존 터널 해석사례를 분석한 결과 밀도, 점착력, 마찰각 및 포아송비는 특정값이 높은 빈도로 사용되고 있어 이를 적용하였으나 탄성계수의 경우 암중에 따라 큰 차이를 보이고 있어 가장 빈도가 높은 5 GPa과 가장 큰 값인 15 GPa를 적용하여 해석을 수행하였다. 적용된 버력의 물성을 다음 표 3에 나타내었다.

4.3 해석조건

이론해에서 충격하중은 버력의 무게, 탄성계수 및 낙하높이의 함수이므로 이를 변경시켜 여러 조건에 대해 해석을 수행하였다. 2차선 터널을 확대 시공하는 것으로 가정하였으며 터널 건축한계를 고려할 때 프로텍터의 내공단면은 폭 6 m, 높이 4.5 m가 된다. 따라서 발파가 없을 경우 버력의 높이는 터널 천단높이와 프로텍터 높이의 차이가 되며 약 1.8 m이다. 또한 기존의 연구결과에 의하면 정상규모의 발파에서 비산석의 초기속도는 10~30 m/s이다(한국토지개발공사, 1993). 초속 30 m/s는 에너지보존법칙에 의해 버력을 45.87 m에서 자유 낙하시키는 것을 의미한다. 즉, 초기 버력의 위치에서 45.87 m 상부에서 자유낙하시킬 경우 버력이 초기위치를 통과할 때 30 m/s의 속도를 가짐을 의미한다. 따라서 프로텍터에 작용하는 최대의 충격하중은 초기높이 1.8 m에 45.87 m 를 합한 47.67 m에서 버력이 자유낙하하여 프로텍터와 충돌할 때 발생한다.

본 해석에서는 발파 시 발생할 수 있는 모든 충돌상황을 포함하기 위해 최초 버력의 위치인 1.8 m에서 50 m까지 버력의 낙하높이를 변경시켜 해석을 수행하였다. 또한 해석의 효율성을 높이기 위해 낙하높이를 그대로 모델링하지 않고 프로텍터와 버력을 약간 띄운 상태에서 등가의 속도로 환산하여 이를 버력에 적용하였다. 낙하높이는 1.8 m, 5 m, 15 m, 35 m와 50 m로 각 낙하높이에서 완전탄성체일 경우와 탄소성일경우로 구분하였으며 탄성계수를 5 GPa와 15 GPa로, 직경을 40 cm, 50 cm와 60 cm로 모델링하여 총 60 case에 대해 해석을 수행하였다(표 4참조).

표 4. 수치해석 모델

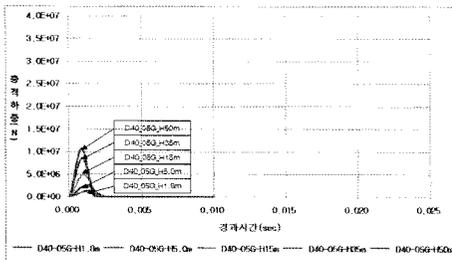
해석변수	해석조건	
낙하높이	1.8 m, 5 m, 15 m, 35 m, 50 m	5 cases
버력모델	완전탄성체, 탄소성체	2 cases
버력 탄성계수	5 GPa, 15 GPa	2 cases
버력직경	40 cm, 50 cm, 60 cm	3 cases
합 계		60 cases

5. 결과분석

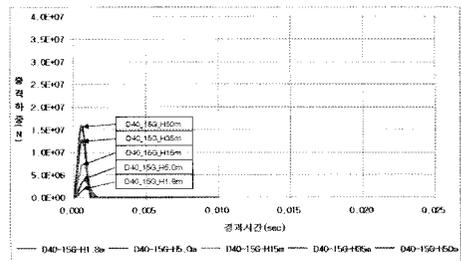
5.1 수치해석에 의한 충격하중 분석

(1) 버력이 완전탄성거동을 할 경우

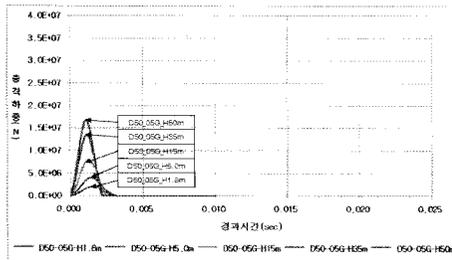
버력이 완전탄성거동을 할 경우 수치해석결과를 그림 3에 나타내었다.



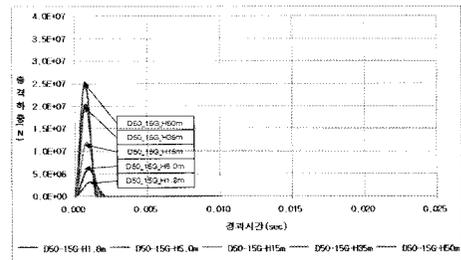
(a) 버력 직경 40 cm, 탄성계수 5 GPa



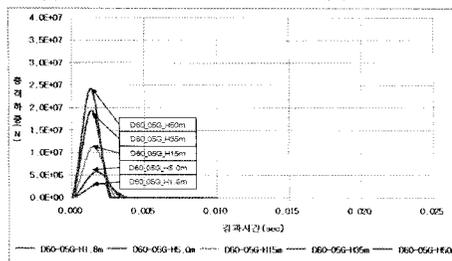
(b) 버력 직경 40 cm, 탄성계수 15 GPa



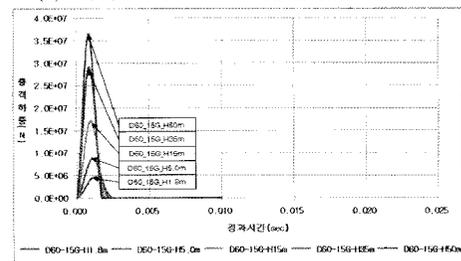
(c) 버력 직경 50 cm, 탄성계수 5 GPa



(d) 버력 직경 50 cm, 탄성계수 15 GPa



(e) 버력 직경 60 cm, 탄성계수 5 GPa



(f) 버력 직경 60 cm, 탄성계수 15 GPa

그림 3. 버력이 완전탄성거동을 할 경우 충격하중

그림 3에서 볼 수 있듯이 버력의 충격하중은 약 0.002초 이내에 최대점에 도달하며 충돌부터 최대점에 도달하는 시간과 최대점 도달이후 반발되는 시간이 동일한 대칭형 형태를 보이고 있다. 최대점에 도달하는 시간은 버력의 크기와는 큰 관계를 보이지 않으며 버력의 탄성계수와 낙하높이가 클수록 짧아지는 경향을 보이고 있다. 이는 탄성계수가 클수록 버력의 저항력이 크고 낙하높이가 클수록 충돌 직전의 속도가 크기 때문에 단위시간동안 속도의 변화가 크게 발생하기 때문으로 판단된다. 최대충격하중은 버력의 크기 즉, 버력의 무게, 탄성계수 및 낙하높이가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 이는 백기현(2011)의 연구와도 유사한 결과이다.

그림 4에 낙하높이와 충격하중의 관계를 살펴보기 위해 낙하높이별 최대충격하중을 도출하였으며 상관관계를 분석하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석을 실시한 결과 충격하중은 낙하높이와 거듭제곱의 관계를 보이며 결정계수 $R^2=1$ 로 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 낙하높이와

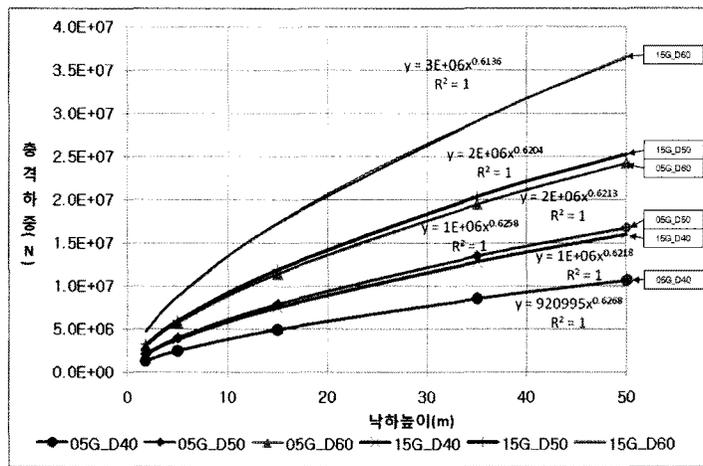
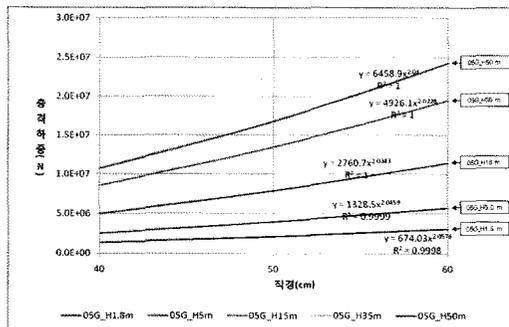
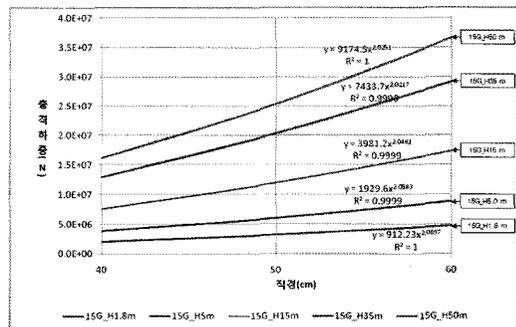


그림 4. 완전탄성거동 시 낙하높이에 따른 충격하중



(a) 버력탄성계수 5 GPa



(b) 버력탄성계수 15 GPa

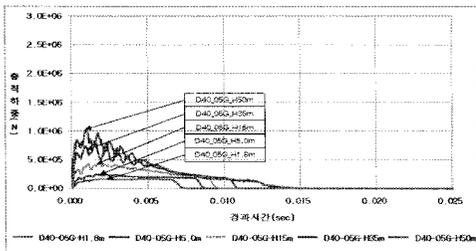
그림 5. 완전탄성거동 시 버력의 크기에 따른 충격하중

관계된 회귀상수는 약 0.62로 백기현(2011)의 연구에서의 0.6과 매우 유사한 결과를 나타내고 있다.

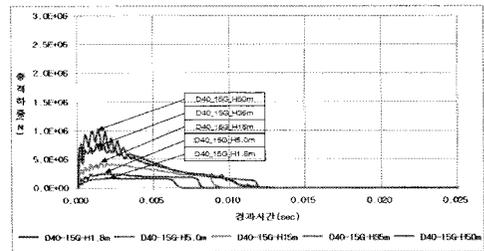
그림 5에 버력 크기와 충격하중과의 관계를 살펴보기 위해 버력 크기별 충격하중을 나타내었으며, 상관관계를 분석하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석을 실시한 결과 충격하중과 버력의 크기는 거듭제곱의 관계를 보이며 결정계수 $R^2 \approx 1$ 로 매우 잘 일치하였다. 버력의 크기와 관련된 회귀상수는 버력의 탄성계수에 상관없이 약 2로 나타났으며 버력의 크기는 무게와 관련되므로 이를 백기현(2011)의 연구에서의 충격하중식의 무게항과 비교할 경우 매우 유사한 결과를 보이는 것을 알 수 있다(무게의 2/3에 비례하므로 $H = \frac{4}{3} \pi R_1^3 \gamma_1$ 의 관계에서 버력 크기(R)의 2승에 비례함).

(2) 버력이 탄소성거동을 할 경우

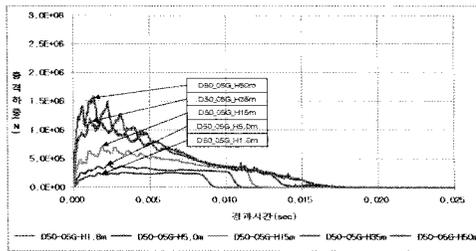
버력이 탄소성거동을 할 경우 수치해석결과를 그림 6에 나타내었다.



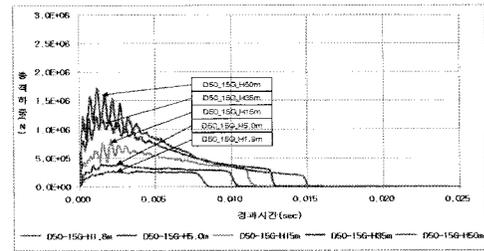
(a) 버력 직경 40 cm, 탄성계수 5 GPa



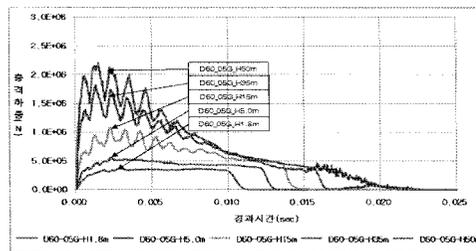
(b) 버력 직경 40 cm, 탄성계수 15 GPa



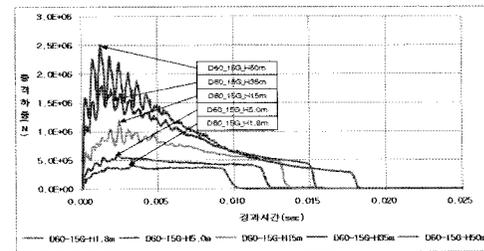
(c) 버력 직경 50 cm, 탄성계수 5 GPa



(d) 버력 직경 50 cm, 탄성계수 15 GPa



(e) 버력 직경 60 cm, 탄성계수 5 GPa



(f) 버력 직경 60 cm, 탄성계수 15 GPa

그림 6. 버력이 탄소성거동을 할 경우 충격하중

그림 6에서 볼 수 있듯이 버력이 탄소성거동을 하는 경우에는 완전탄성과 비교하였을 때 매우 다른 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 충돌직후부터 분리될 때까지의 접촉시간이 매우 긴 것을 알 수 있으며 최대점 도달시간은 유사하나 최대점 이후 접촉시간이 긴 것을 알 수 있다. 특히 완전탄성 거동에 비해 탄성계수에 따른 충격하중의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 하지만 버력의 크기와 낙하높이가 증가할수록 충격하중이 증가하는 경향은 완전탄성거동과 유사하게 나타났다. 가장 큰 차이점으로는 충격하중이 완전탄성거동에 비해 매우 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 버력이 탄성한계를 넘어 소성영역에 들어서면 소성변형으로 인해 버력의 운동에너지가 소산되기 때문으로 판단된다.

그림 7에 버력이 탄소성거동 시 낙하높이와 충격하중의 관계를 살펴보기 위해 낙하높이별 최대 충격하중을 도시하였으며 상관관계를 분석하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석을 실시한

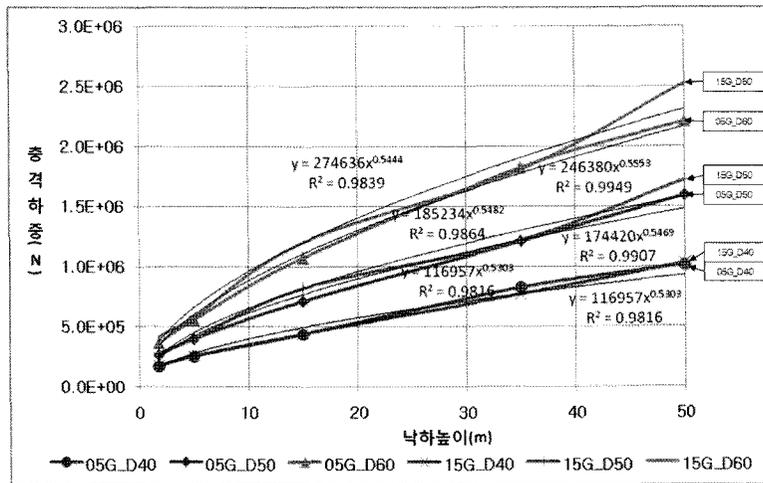
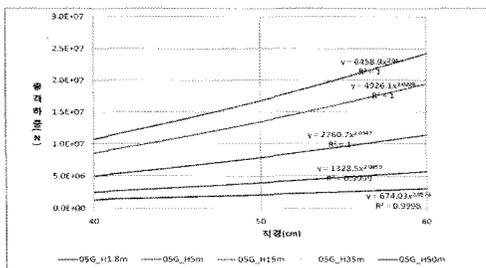
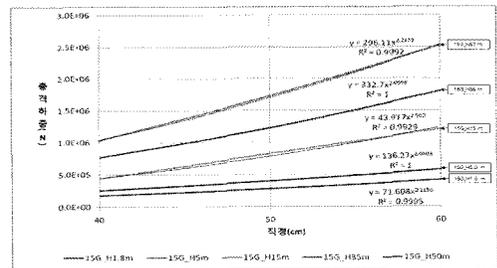


그림 7. 탄소성거동 시 낙하높이에 따른 충격하중



(a) 버력탄성계수 5 GPa



(b) 버력탄성계수 15 GPa

그림 8. 탄소성거동 시 버력의 크기에 따른 충격하중

결과 충격하중은 낙하높이와 거듭제곱의 관계를 보이며 결정계수 $R^2=0.98$ 로 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 낙하높이와 관계된 회귀상수는 약 0.53~0.55로 탄소성거동을 할 경우 백기현(2011)의 연구에서의 충격하중식에 비해 높이에 대한 영향이 적은 것으로 나타났다.

그림 8에 탄소성거동 시 버력의 크기와 충격하중과의 관계를 살펴보기 위해 버력의 크기별 충격하중을 도시하였으며 상관관계를 분석하기 위해 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석을 실시한 결과 충격하중과 버력의 크기는 거듭제곱의 관계를 보이며 결정계수 $R^2=0.99$ 로 매우 잘 일치하였다. 버력의 크기와 관련된 회귀상수는 1.91~2.5의 범위로 완전탄성거동과 유사한 것으로 나타났다. 따라서 탄소성거동을 할 경우에도 버력의 크기 즉, 무게에 의한 영향은 유사할 것으로 판단된다.

(3) 재료거동에 따른 충격하중 비교분석

다음 표 5에 각 해석조건별 충격하중과 완전탄성대비 탄소성에서의 충격하중의 비를 나타내었다.

표 5. 재료거동에 따른 충격하중

직경 (cm)	탄성계수 (GPa)	낙하높이 (m)	완전탄성거동 (N)	탄소성거동 (N)	탄소성/완전탄성 (%)
40	5	1.8	1.3E+06	1.7E+05	12%
		5	2.5E+06	2.5E+05	10%
		15	5.0E+06	4.3E+05	9%
		35	8.6E+06	8.2E+05	10%
		50	1.1E+07	1.0E+06	9%
	15	1.8	2.0E+06	1.8E+05	9%
		5	3.8E+06	2.5E+05	7%
		15	7.5E+06	4.4E+05	6%
		35	1.3E+07	7.7E+05	6%
		50	1.6E+07	1.0E+06	6%
50	5	1.8	2.1E+06	2.6E+05	12%
		5	4.0E+06	3.9E+05	10%
		15	7.9E+06	7.1E+05	9%
		35	1.3E+07	1.2E+06	9%
		50	1.7E+07	1.6E+06	10%
	15	1.8	3.2E+06	2.8E+05	9%
		5	6.0E+06	4.0E+05	7%
		15	1.2E+07	8.2E+05	7%
		35	2.0E+07	1.2E+06	6%
		50	2.5E+07	1.7E+06	7%
60	5	1.8	3.1E+06	3.6E+05	12%
		5	5.8E+06	5.6E+05	10%
		15	1.1E+07	1.1E+06	9%
		35	1.9E+07	1.8E+06	9%
		50	2.4E+07	2.2E+06	9%
	15	1.8	4.7E+06	4.2E+05	9%
		5	8.8E+06	5.8E+05	7%
		15	1.7E+07	1.2E+06	7%
		35	2.9E+07	1.8E+06	6%
		50	3.7E+07	2.5E+06	7%

표 5에서 알 수 있듯이 버력이 탄성거동을 할 경우에 비해 탄소성거동을 할 경우 충격하중은 7~12%의 수준인 것으로 나타났다. 즉, 탄소성에 비해 완전탄성으로 가정할 경우 약 10배의 충격하중이 가해지는 것으로 이는 교통 유지형 터널확대공법의 경제성을 좌우할 수 있는 차이로 판단된다. 따라서 실험을 통해 버력과 프로텍터가 충돌 시 실제 버력의 재료거동을 명확히 파악해야 될 것으로 판단된다.

또한 버력의 직경, 탄성계수 및 낙하높이가 증가할수록 재료거동에 따른 충격하중의 차이가 커지는 것으로 나타났다. 즉, 각 변수가 충격하중에 기여하는 비율이 완전탄성에 비해 탄소성에서 작아지는 것을 알 수 있다.

5.2 이론해와 수치해석 비교분석

(1) 버력이 완전탄성 거동을 할 경우

버력이 완전탄성 거동을 할 경우 이론해와 수치해석결과를 그림 9에 도시하였으며 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석결과 이론해와 수치해석결과는 직선선형관계를 나타내며 회귀식의 기울기는 0.925로 거의 1:1의 관계를 나타내며 결정계수 $R^2=1$ 로 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 제안된 이론해는 버력이 완전탄성거동을 할 경우 충격하중을 잘 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

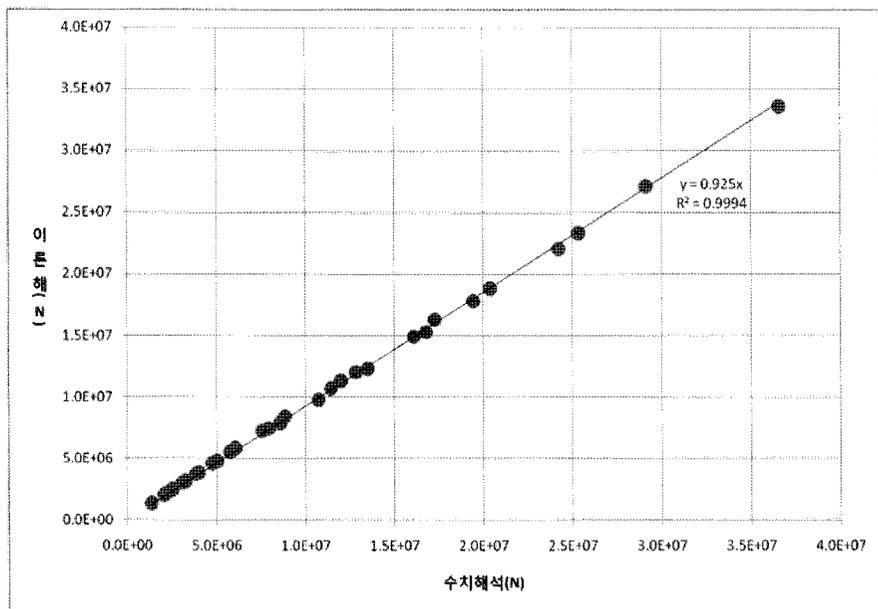


그림 9. 완전탄성거동 시 이론해와 수치해석결과 비교

(2) 버력이 탄소성거동을 할 경우

버력이 탄소성 거동을 할 경우 이론해와 수치해석결과를 그림 10에 도시하였으며 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석결과 이론해와 수치해석결과는 완전탄성거동과 유사하게 직선선형관계를 나타내었으나 버력의 탄성계수에 따라 회귀분석결과가 다른 것으로 나타났다. 그림 10에서 보면 버력의 탄성계수가 클수록 회귀식의 기울기가 증가 즉, 두 결과의 차이가 크게 발생되는데 그 이유는 전술한 바와 같이 탄소성 거동 시 탄성계수의 변화에 따른 충격하중의 변화가 미미한데 비해 이론해에서는 탄성계수가 충격하중에 직접 영향을 주기 때문으로 판단된다. 따라서 실제 버력이 탄소성 거동을 할 경우에는 제안된 이론해를 사용하는 것은 충격하중을 과대평가하여 공법의 경제성을 저하시킬 수 있으므로 각 탄성계수에 맞게 수정하여 사용해야 될 것으로 판단된다. 예를 들어 현재의 수치해석결과를 반영할 경우 다음과 같다.

버력의 탄성계수가 5 GPa일 경우:

$$F_{\max} = 9.8616 \times 1.7672(E^*)^{2/5} (\gamma_1)^{-1/15} (W)^{2/3} (H)^{3/5} = 17.427(E^*)^{2/5} (\gamma_1)^{-1/15} (W)^{2/3} (H)^{3/5}$$

버력의 탄성계수가 15 GPa일 경우:

$$F_{\max} = 14.029 \times 1.7672(E^*)^{2/5} (\gamma_1)^{-1/15} (W)^{2/3} (H)^{3/5} = 24.792(E^*)^{2/5} (\gamma_1)^{-1/15} (W)^{2/3} (H)^{3/5}$$

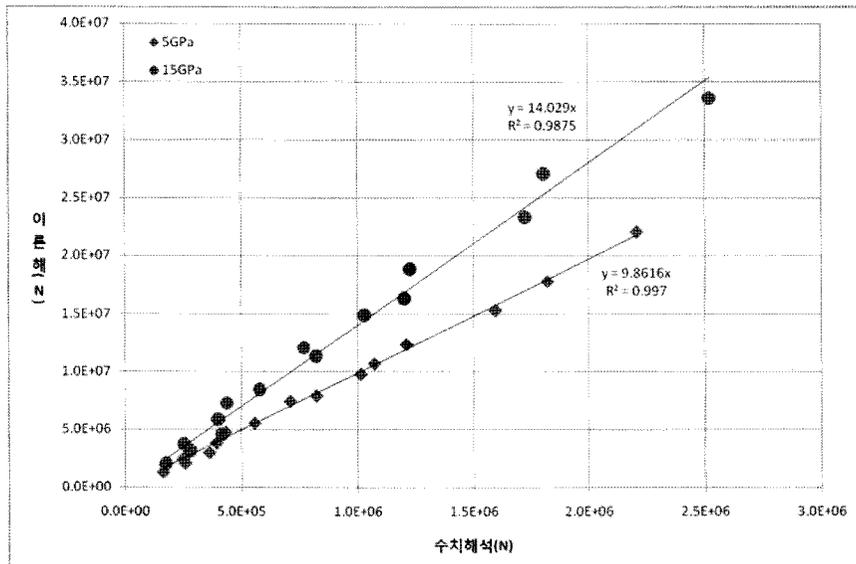


그림 10. 탄소성거동 시 이론해와 수치해석결과 비교

충격하중 산정식은 복잡하고 시간이 많이 소요되는 수치해석 없이 짧은 시간 안에 충격하중을 산정할 수 있는 이점이 있다. 따라서 국내 암석이 가지는 탄성계수에 대해 일련의 수치해석을 실시하고 이론해와 수치해석결과에 대한 각 회귀식의 기울기와 탄성계수와의 관계를 규명하고 제안된 이론해를 수정하여 사용한다면 탄소성거동 시 충격하중을 손쉽게 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 버력의 재료거동이 완전탄성인가 탄소성인가에 따라 프로텍터에 가해지는 충격하중 특성을 살펴보기 위해 충격문제를 다룰 수 있는 ABAQUS 프로그램을 이용하여 일련의 수치해석을 수행하였다. 재료거동에 따른 수치해석결과를 비교분석하였으며 백기현(2011)이 제안한 이론해와도 비교분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 최대충격하중은 완전탄성 거동 시 버력 크기, 탄성계수 및 낙하높이가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으나 탄소성의 경우에는 탄성계수에는 큰 영향이 없고 버력의 크기와 낙하높이에 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 버력이 탄소성일 경우 충돌과 동시에 탄성한계를 넘어 소성상태가 되기 때문으로 판단된다.
2. 재료거동에 따른 수치해석결과를 비교한 결과 버력이 완전탄성거동을 할 경우에 비해 탄소성거동을 할 경우 충격하중은 7~12%의 수준인 것으로 나타났다. 즉, 탄소성에 비해 완전탄성으로 가정할 경우 약 10배의 충격하중이 가해지는 것으로 이는 교통 유지형 터널확대공법의 경제성을 좌우할 수 있는 차이로 판단된다. 따라서 실험을 통해 버력과 프로텍터가 충돌 시 실제 버력의 재료거동을 명확히 파악해야 될 것으로 판단된다.
3. 수치해석결과와 이론해의 결과를 비교한 결과 버력이 완전탄성 거동을 할 경우 직선선형관계를 나타내며 회귀식의 기울기는 0.925로 거의 1:1의 관계를 나타내며 $R^2=0.99$ 로 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 제안된 이론해는 버력이 완전탄성거동을 할 경우 충격하중을 잘 예측할 수 있을 것으로 판단된다.
4. 그러나 버력이 탄소성 거동을 할 경우에는 수치해석과 이론해가 직선선형관계를 나타내나 버력의 탄성계수에 따라 다른 특성을 보이는 것으로 나타났다. 버력의 탄성계수가 클수록 회귀식의 기울기가 증가 즉, 두 결과의 차이가 크게 발생되는데 그 이유는 탄소성 거동 시 탄성계수의 변화에 따른 충격하중의 변화가 미미한데 비해 이론해에서는 탄성계수가 충격하중에 직접 영향을 주기 때문으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술 혁신사업(09기술혁신E01)으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김동규, 정호섭(2007), “공용중인 터널 확폭에 의한 기능향상”, 한국지반공학회지, Vol. 23, No. 3, pp. 14-20.
2. 백기현(2011), “운영중 터널확대 굴착시 지반거동 특성분석과 프로텍터 설계”, 공학박사 학위논문, 인하대학교, pp. 96-101.
3. 서경원, 백기현, 김용구(2008a), “운영 중인 터널의 확폭굴착에 관한 해외사례 분석(II)”, 한국터널공학회지, Vol. 10, No. 2, pp. 71-79.
4. 서경원, 백기현, 노종륜(2008b), “운영 중인 터널의 확폭굴착에 관한 해외사례 분석(I)”, 한국터널공학회지, Vol. 10, No. 1, pp. 40-50.
5. 서경원, 김용구, 백기현, 김진용(2010), “수치해석 및 계측자료 분석을 통한 막장볼트의 보강효과에 대한 연구”, 한국터널공학회논문집, 제12권, 제5호, pp. 359-368.
6. 일본토목연구소(2003), “기존 터널의 단면확대 공법 개발에 관한 공동연구보고서”.
7. 한국토지개발공사 기술연구처(1993), “암발파시 설계 기법에 관한 연구”, pp. 315-326.
8. 鈴木雅行(2005), “운영중 터널의 개축에 의한 도로터널의 시공”, 터널공학 보고집, Vol. 15, pp. 153-160.
9. 勝間田直乙(1994), “공용터널을 단선에서 복선으로 확대”, 터널과 지하, 제25권, 제2호, pp. 15-21.
10. Johnson, K.L. (1985), “Prediction of impact forces using hertzian contact theory and measured modal structural data”, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 4, Issue 4, pp. 287-294.
11. Kobayashi, Y. (2002), “Enlargement of live line tunnel by drilling and blasting”, Proceedings of the 28th WTC of ITA-AITES, Sydney, pp. 261-266.
12. Masayuki, S. (2005), “활선개축에 의한 도로터널의 시공”, 터널공학 보고집, 제15권, pp. 153-160.