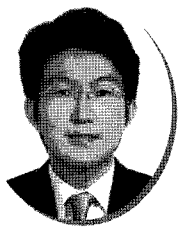
기술기사 | 한국지반공학회지 | Vol.27, No.7 | pp.8~15

기존댐 실대규모 발파진동 시험사례



이 종 욱
K-water연구원
기반시설연구소 책임연구원
(geoljw@kwater.or.kr)

하 익 수
K-water연구원
기반시설연구소 책임연구원

오 병 현
K-water연구원
수석연구원

신 동 훈
K-water연구원
기반시설연구소 소장

1. 서 론

한국수자원공사 K-water연구원에서는 국토해양부 산하 건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업(09기술혁신F05)의 일환으로 2009년 10월부터 2012년 10월까지 3년간 「대형지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 연구」과제를 수행하고 있다. 본 과제의 주요 목표 중 하나인 입경이 큰 조립재료로 축조된 대형 지반구조물의 동적물성 산정기법의 검증을 목적으로 경상북도 청송군 현서면 수락리에 위치한 성덕구(舊)댐에 대해 2011년 3월 7일부터 5월 5일까지 60일간의 기간 동안 발파예정지 현황조사, 발파환경영향평가, 발파설계 및 시추공 천공, 시추공 발파에 의한 응답가속도를 측정하는 실대규모 인공진동실험을 수행하였다(발파일 2011년 4월 19일).

본 과업은 성덕구(舊)댐 실대규모 인공진동 실험을 위해 시추공의 암반내부에 설치한 폭약의 폭발력으로 지반진동을 발생시켜 정밀하고 안전한 인공진동을 얻는데 그 목적이 있다.

2. 발파환경 영향평가

2.1 발파예정지 조사

발파예정지 현황조사는 발파공해(진동, 소음, 비산 등)의 유해여부 등을 기준으로 하여 수행하였다. 발파예정지는 경북 청송군 현서면 수락리 일원에 위치하며 성덕(舊)댐에서 약 40~50m 하류에 위치하고 있으며, 각종 장비 진입로 및 작업장소는 매우 양호한 상태이다(그림 1).

발파예정지 주변은 산과 산 사이의 협곡으로 성덕구(舊)댐의 하류에 위치하고 있으며, 보안물건으로는 성덕구(舊)댐(콘크리트와 사력의 복합댐)과 908지방도 및 낙석지역, 건설 중인 과목교가 있으며, 비교적 원거리에는 종교시설인 보광사와 KT기지국이 위치하고 있다. 성덕구(舊)댐은 1986년 준공된 높이 19m, 길이 150m의 콘크리트댐(좌안)과 필댐(우안)의 복합형 농업용저수지이다.

그림 1. 발파예정지 전경

2.2 발파환경 영향평가

(1) 발파영향에 의한 진동 및 소음의 허용수준 설정

발파영향에 의한 진동과 소음의 허용수준은 국내 · 외 문헌을 기준하였으며 각 보안물건에 설정된 기준은 표 1과 같다.

(2) 발파영향 검토를 위한 발파진동추정식 선정

발파진동 예측을 위한 발파진동추정식은 대상지역에서 시험발파 및 본 발파를 통해서 얻어진 계측 자료들을 회귀분석하여 입지상수인 K와 n의 값이 결정되며, 이를 근거로 도출된 발파진동추정식으로 이격거리에 따른 지발당장약량과 진동속도를 예측할 수 있다.

그러나 설계단계에서는 시험발파에 의한 발파진동예측이 어려우므로 유사조건에서 주로 이용되는 발파진동추정식 5개를 검토하여 당 현장과 발파조건이 가장 유사하고 신뢰도가 높은 식 (1)을 선정하였다.

$$V_{95\%} = 107.904\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)^{-1.6} \quad (1)$$

식(1)은 시추공 깊이 30~50m, 지발당장약량 0.5~2.0kg, 측정위치는 지상에서 측정된 자료를 기준하여 산출된 발파진동추정식으로 측정자료는 유사조건에서 약 900개 이상의 자료를 획득하여 도출한 식이다.

표 1. 보안물건에 대한 진동 및 소음의 허용수준

구 분	콘크리트 제방	사력 제방	낙석지역	과목교	무계교	KT기지국	사찰	비 고
발파진동 (cm/sec)	5.0	5.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.2	국내외 규제기준 적용
발파소음 dB(A)	-	-	-	-	-	-	70	

표 2. 실험위치(1)에서의 이격거리별 예상진동

구 분	보안물건	이격거리(m)	허용기준(cm/sec)	예상진동(cm/sec)	적합성
1	댐(콘크리트, 사력)	50	5.0	2.267	OK
2	낙석지역	70	1.0	1.323	NO
3	과목교	185	1.0	0.280	OK
4	무계교	660	1.0	0.037	OK
5	보광사	780	0.2	0.028	OK
6	KT기지국	900	0.5	0.022	OK

표 3. 실험위치(2)에서의 이격거리별 예상진동

구 분	보안물건	이격거리(m)	허용기준(cm/sec)	예상진동(cm/sec)	적합성
1	댐(콘크리트, 사력)	47	5.0	2.503	OK
2	낙석지역	120	1.0	0.559	OK
3	과목교	150	1.0	0.391	OK
4	무계교	635	1.0	0.039	OK
5	보광사	740	0.2	0.030	OK
6	KT기지국	880	0.5	0.023	OK

(3) 발파진동추정식에 의한 보안물건에서의 진동크기 예측 결과

발파구역 주변에 위치한 보안물건(성덕구(舊)댐 제방 : 약 47~50m, 낙석지역 : 약 70~120m, 과목교 : 약 150~185m, 무계교 : 약 635~660m, 보광사 : 약 740~780m, KT기지국 : 약 880~900m)의 용도와 이격거리, 검토 선정된 발파진동추정식 (1) 그리고 지발당 최대장약량(발파규모 중, 최대장약량 20kg)에 의한 실험위치(1, 2)별, 보안물건의 예상 진동은 다음의 표 2와 표 3과 같이 예측되었다.

따라서, 각각의 보안물건에 대해 설정된 진동허용수준(댐 5.0cm/sec, 낙석지역/과목교/무계교 1.0cm/sec, KT기지국 0.5cm/sec, 보광사 0.2cm/sec)을 기준하여 검토한 결과, 최대 지발당장약량(19~20kg)에 의한 진동허용수준은 실험위치(2)에서는 발파진동의 영향이 없는 것으로 판단되나, 실험위치(1)에서는 최대 지발당장약량(19~20kg)을 사용할 경우 낙석지역의 허용수준을 상회(1.323cm/sec)하는 것으로 나타났다.

2.3 발파설계 및 시추공 천공

시추공 발파횟수 및 발파규모와 발파패턴은 표 4와 그

표 4. 발파횟수 및 발파규모의 선정

구 분	발파회수	공 수	공당천공심도(m)	총천공심도(m)	총장약량(kg)	사용뇌관
Type-Ⅰ	2	2	6	12	10	전기뇌관
Type-Ⅱ	2	2	12	24	20	전기뇌관
Type-Ⅲ	2	2	18	36	30	전기뇌관
Type-Ⅳ	2	2	25	50	38	전기뇌관
Type-Ⅴ	2	2	25	50	40	전자뇌관
Total	10	10		172	138	

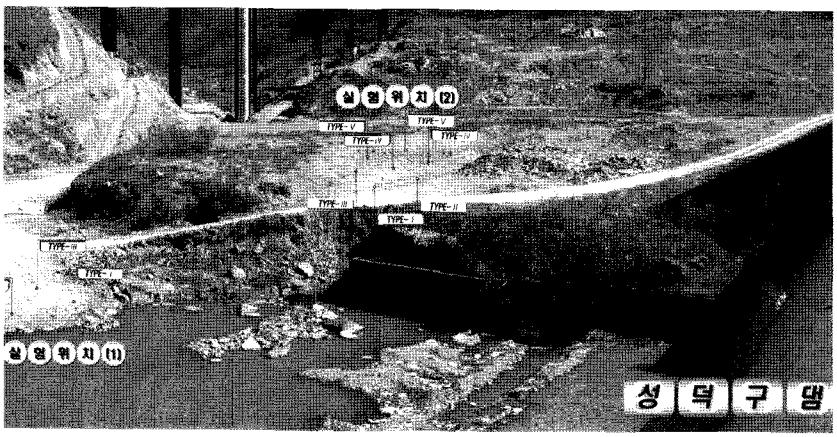


그림 2. 발파패턴별 천공위치

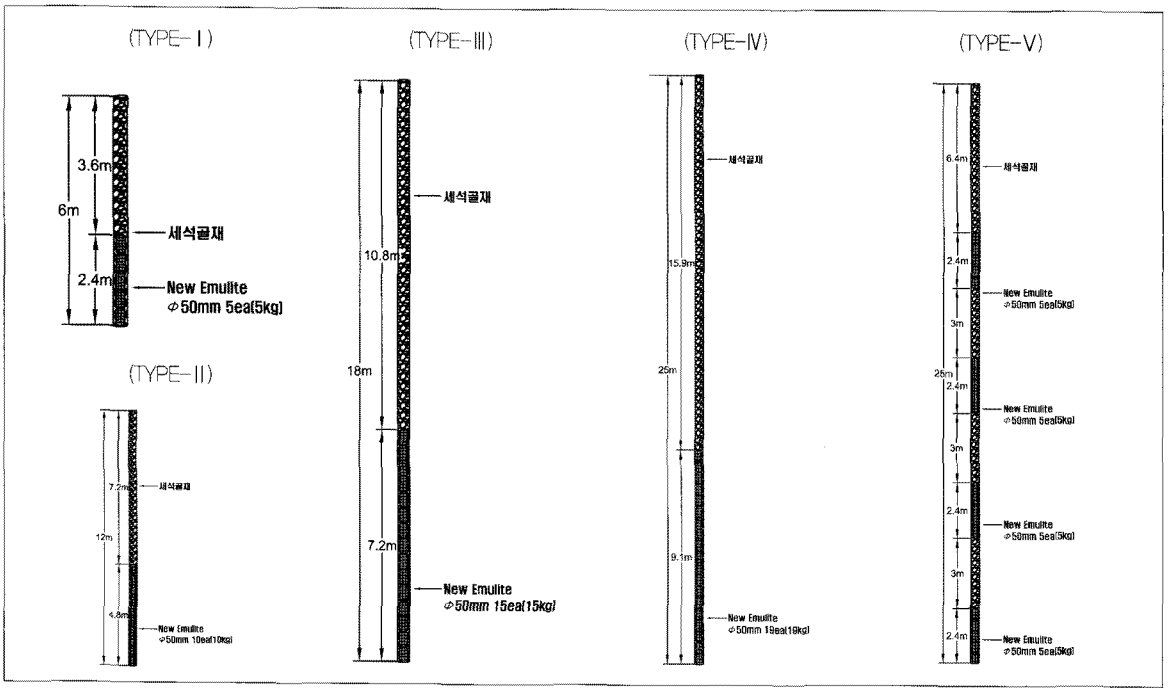


그림 3. 시추공 발파 및 천공위치 상세

림 3과 같다. 발파환경영향평가 결과 시추공 발파횟수와 발파규모를 그대로 적용하여도 무방할 것으로 판단된다. 그러나 실험위치(1)에서는 TYPE-Ⅳ, Ⅴ의 적용은 불가한 것으로 검토되어, TYPE-Ⅳ, Ⅴ는 실험위치(2)에서 시행하였다(그림 2). 단, 실험장소의 면적이 제한적인 것을 감안하면 시추공간 간격은 공간 영향이 없을 것이라고 판단되는 5m 이내로 적용하였다.

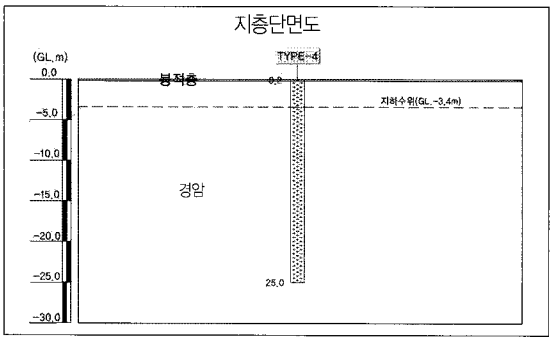
3. 시추공 천공 및 발파작업

발파작업을 위한 시추공 천공은 발파환경영향평가와 발파설계에 의해 2011년 3월 28일~3월 31일(172m 천공)까지 수행하였다.

3. 1 시추공 천공에 의한 지형 및 지질

표 5. 지층개요

구 분	층 후(m)	출현심도(GL.-m)	구 성 상 태	TCR/RQD
붕 적 층	0.2	0.0	• 자갈섞인 실트질 세립 내지 조립모래로 구성 • 암갈색, 습윤, 느슨한 조밀도를 보임	-
경 암	24.8	0.2	• 보통 내지 약간풍화, 보통 내지 약간균열 • 보통강함 내지 강한강도의 응회암	100/87~93



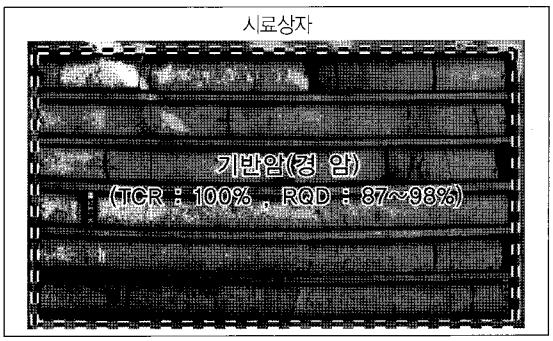


그림 4. 지층 단면도 및 시추코어

조사지역의 지형은 우리나라 동부의 태백산맥에 해당하는 지역으로 전체적으로 지세가 비교적 험준하며, 경상북도 청송군 현서면 수락리 성덕구(舊)댐 인근에 해당되며 908번 지방도가 조사지역에 인접하여 북쪽에서 남쪽으로 지나간다.

조사지역의 지질특성은 선캠브리아기 변성암층의 일부로써 소량의 석회 규산염암층, 중생대의 청송 화강암, 백악기의 경상계 퇴적암층군과 이들을 관입한 화성암류 및 제4기의 충적층 등으로 구성되며, 조사지역 서북부에 주로 분포되는 석회 규산염암, 석회암 및 소량의 변성암류로된 층을 석회 규산 염암층이라 부르며 이 층은 청송 화강암의 관입으로 대부분 규화된 상태이고 결정질석회암이 가끔 불규칙하게 소량으로 분포한다.

3.2 시추공 천공에 의한 지층구조

시추지질조사에 의한 지층개요는 표 5와 같으며, 상부 붕적층이 0.2m의 얇은 층후로 자갈섞인 실트질 세립 내지 조립모래로 분포하며, 기반암은 GL.-0.2m에서 출현하며 TCR : 100, RQD : 87~93%로 보통강함 내지 강한강도의 응회암으로 분포한다.

3.3 시추공 발파작업

폭약은 유중수적형(Water in Oil, 油中水滴型)의 Emulsion 폭약으로 함수폭약(含水爆藥)계열이며 내한성, 내수성, 안전성(열, 마찰, 충격 등) 및 후가스가 특히 우수한 폭약으로 취급이 용이하며 약상을 자유롭게 조절이 가능한 폭약이다.

뇌관은 지발당장약량이 작은 단공에는 기폭력이 우수한 8호 전기뇌관을 사용하였으며 뇌관의 각 구성요소가 내정전에 대한 안전성, 높은 발화에너지가 필요하고 누설전류 및 미주전류에 대한 안전성이 뛰어나다. 그리고, 지발당장약량이 비교적 큰 장공에는 매우 정밀한 시차로 시차 분석이 용이한 외국(호주 오리카 제품)에서 수입된 전자뇌관을 사용하였다.

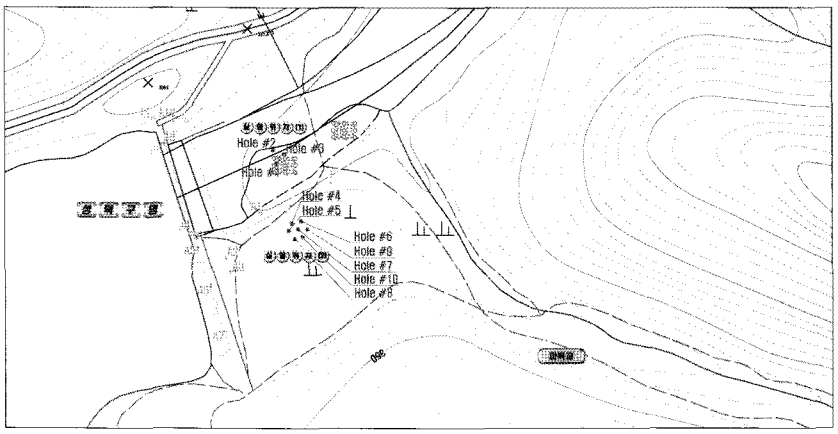
시추공 발파작업에 따른 발파제원과 발파패턴은 표 6과 같다.

4. 발파진동 계측 및 분석

4.1 발파진동속도 측정장비

표 6. 시추공별 발파제원

회차	구 분	공 수	공당천공심도(m)	총장약량(kg)	사용뇌관	비고
1	Hole #1 (Type- I)	1	6	5	전기뇌관	
2	Hole #2 (Type-II)	1	12	10	전기뇌관	
3	Hole #3 (Type-III)	1	18	15	전기뇌관	
4	Hole #4 (Type- I)	1	6	5	전기뇌관	
5	Hole #5 (Type-II)	1	12	10	전기뇌관	
6	Hole #6 (Type-III)	1	18	15	전기뇌관	
7	Hole #9 (Type-V)	1	25	20	전자뇌관	deck charge
8	Hole #10 (Type-V)	1	25	20	전자뇌관	deck charge
9	Hole #7 (Type-IV)	1	25	19	전기뇌관	
10	Hole #8 (Type-IV)	1	25	19	전기뇌관	
Total		10	172	138		



※A1~A10:가속도계위치, B1~B7:진동속도계(보안물건), C1~C4:진동속도계(자유장)

그림 5. 발파진동 속도 및 가속도 측정위치

측정장비는 Canada의 Instantel 社 제품인 Blast Mate series를 사용하였으며, 이들 계측기는 Geo Sensor로 최대 진동속도(PPV, Peak Particle Velocity)의 수직성분(PPV V)과 진행성분(PPV L), 접선성분(PPV T)의 세 성분이 동시에 측정되고, 이 세 성분의 벡터합(PVS, Peak Vector Sum)이 측정된다.

4.2 측정방법 및 측정위치

본 과업 수행에서는 현장 내 동일 암반선상에서 발파진동의 전파 특성을 파악하기 위해 시험대상 시추공을 기준으로 진동측정기를 설치하였다.

Sensor(수진기)는 진동에 매우 민감하므로 발파진동에 의한 자체의 진동발생을 막기 위하여 Sensor의 수평을 유지하고, 바닥면과 밀착시킨 후 Sensor 위에 모래주머니를 올려놓아 측정 면과 Sensor가 가능한 한 일체화되도록 하였다. 진동측정기의 작동은 진동속도 치가 일정치 이상이 되면 자동 작동될 수 있도록 Trigger Source를 Geophone으로 설정하고, Trigger Level은 미세한 진동까지 측정할 수 있도록 0.13mm/sec으로 설정하였으며,

수진시간(Record time)은 1회 발파시간을 계산하여 충분한 여진까지 측정 가능하도록 1.0sec로 설정하였다.

4.3 지반진동속도 계측결과의 분석

시추공 발파에 따라 가장 근접된 보안물건인 성덕구(舊)댐과 낙석지역, 과목교, 보광사(주차장)에 진동 속도 측정기를 설치하여 계측을 실시하였으며, 이에 따른 진동 계측결과의 분석은 다음과 같다.

(1) 보안물건에서의 지반진동속도 계측결과의 분석

시추공 발파진동 측정결과, 단일성분의 3방향 성분중 수직방향 성분이 가장 우세하게 나타났으며, 보안물건인 성덕구(舊)댐 중 콘크리트 부분에서 0.578~2.83 cm/sec, 사력부분에서 0.364~1.40cm/sec, 과목교에서 0.0746~0.222cm/sec의 진동수준을 보여 과업구간 발파진동 허용기준(과목교 1.0cm/sec, 성덕구(舊)댐 5.0cm/sec) 이내의 안전수준으로 성덕구(舊)댐과 건설중인 과목교의 기초에 미치는 피해정도는 없는 것으로 사료된다.

그러나 낙석지역에서는 0.262~1.10cm/sec의 진동 수준을 나타내어 진동허용수준(1.0 cm/sec)을 약간 상회하였으나, 상회한 진동수준은 비교적 낮은 편이며 일회성 진동으로 낙석지역에 미칠 물리적인 영향은 미미할 것으로 판단된다.

또한, 보광사(주차장)에서 이루어진 계측에서는 약 645m 이상의 원거리에 위치하고 있어 시추공 발파에 의해 발생된 지반진동이 미미하거나 소멸되어 계측되지 않았다.

(2) 주파수 대역 분석

단일성분의 우월 성분 최대 입자 속도 대 주 주파수 발생범위는 21~30Hz, 31~40Hz, 41~50Hz의 3가지 대역으로 볼 수 있는데 31~40Hz의 주파수 대역이 가장 우세한 분포도를 보였다. 이는 전형적인 발파진동으로 생성되는 진동주파수로서 거리가 멀어질수록 고주파수 대역은 암반 중에서 쉽게 소멸되고 상대적으로 에너지 수준이 높은 저주파수 대역의 진동만이 멀리 전파되기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결론

대형 지반구조물의 동적물성 산정기법의 검증을 목적으로 경상북도 청송군 현서면 수락리에 위치한 성덕구(舊)댐에 대해 발파예정지 현황조사, 발파환경영향평가, 발파설계 및 시추공 천공을 시행하였고, 2011년 4월 20일에 시추공 발파에 의한 실물 인공진동실험을 수행하여 댐체 응답가속도와 거리별 진동속도를 측정하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 시추공 발파진동 측정결과, 단일성분의 3 방향 성분 중 수직방향 성분이 가장 우세하게 나타났으며, 보안물건인 성덕구(舊)댐 중 콘크리트 부분에서 0.578~2.83 cm/sec, 사력부분에서 0.364~1.40 cm/sec, 과목교에서 0.0746~0.222cm/sec의 진동수준을 보여 과업구간 발파진동 허용기준(과목교 1.0cm/sec, 성덕구(舊)댐 5.0cm/sec) 이내의 안전수준으로 성덕구(舊)댐과 건설중인 과목교의 기초에 미치는 피해정도는 없는 것으로 사료된다. 그러나 낙석지역에서는 0.262~1.10cm/sec의 진동 수준을 나타내어 진동허용수준(1.0 cm/sec)을 약간 상회하였으나, 상회한 진동수준은 비교적 낮은 편이며 일회성 진동으로 낙석지역에 미칠 물리적인 영향은 미미할 것으로 판단된다.

(2) 주파수 대역 분석결과 단일성분의 우월 성분 최대 입자 속도 대 주 주파수 발생범위는 21~30Hz, 31~40Hz, 41~50Hz의 3가지 대역으로 볼 수 있는데 31~40Hz의 주파수 대역이 가장 우세한 분포도를 보였다.

본 과업을 통해 측정된 성덕구(舊)댐의 가속도 측정결과는 향후 추가 분석을 통해 댐체의 진동특성 파악과 입경이 큰 조립재료로 축조된 대형 지반구조물의 동적물성 산정기법의 검증을 수행할 예정이다.

감사의 글

본 기술기사는 국토해양부 산하 건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업(09기술혁신F05) "대형지반구조물 대입경 조립재료 동적물성 산정기법 연구" 과제의 지원을 받아 수행하였습니다. 그리고 본 과업의 수행에 협조해주신 한국수자원공사 성덕댐건설단과 한국농어촌공사 청송 · 영양지사 임직원분들에게도 감사드립니다.

참고문헌

1. 김재극 저, 1992 산업화약과 발파공학, 서울대학교 출판부 pp.380.
2. 이종욱, 하익수, 오병현(2010), "기존댐 발파진동 현장실험을 위한 기초연구", 한국구조물진단유지관리공학회, 봄학술발표 논문집 제14권, pp.174~177.
3. 최성웅, 김재동, 선우춘, 2008, 현장계측 진동파형을 이용한 발파 동해석에 관한 연구, 추계학술발표회 논문, 대한화약발파공학회 pp.47~53.
4. DIN 4150 Teil 3, 1986, Erch terungen im Bauwessen - Einwirkungen auf bauliche Anlagen.
5. 국토해양부, 2006 도로공사 노천발파 설계시공 지침 pp.5~7.
6. 조영곤, 원연호, 박근순, 2010, 地震 振動源提供 大發破, 2010 발파기술공동심포지엄 논문, 대한화약발파공학회, (주)한화, pp.67~73.
7. 최형빈, 원연호, 2010. 12, 전자뇌관과 전기뇌관을 사용한 시추공 발파 시험에서의 지반진동 특성에 관한 비교 연구, 학회지 제28권 제2호 논문, 대한화약발파공학회, pp.37~49.
8. 최병희, 유창하, 이경진, 양형식, 2008, PPV, PVS에 의한 지반진동 허용기준의 설정에 관한 고찰, 추계학술발표회 논문, 대한화약발파공학회, pp. 31~38.

축하합니다.

6월 30일 대한민국학술원 우수학술도서에 아래와 같이 우리학회 회원의 도서가 선정되었습니다.
'대한민국학술원 우수학술도서' 는 매년 기초학문분야의 연구와 저술 활동을 활성화하기 위해
우수학술도서를 선정하고 이를 전국 대학교와 연구소 등에 보급합니다.

- 지질공학 (도서출판 씨아이알) : M. H. de Freitas 저 / 선우춘 · 이병주 · 김기석 역
- 토질역학 (도서출판 씨아이알) : 장연수 저