화약산업의 발파안전 대책

— 소음진동 및 안전거리 설정을 중심으로 —

안 명 석
(한국화약주식회사 부산지점)

1. 연구방법 및 범위

본 글에서는 국내외 문헌과 기술자료, 현장데이타를 이용하여 암반발파현장에서의 폭발사고에 대하여는 소음진동계를 이용한 안전진단결과를 토대로한 소음진동에 따른 피해와 그 방지대책을 위주로 기술하였고, 연화발사현장에서는 휴대용 소음측정기를 이용한 폭음측정과 트랜지트 측정결과를 정리하여 일반안전수칙과 낙하안전거리 설정에 대하여 기술하였다.

2. 화약의 소비추세 및 재해실태

서기 660년경 화약 출현이후[1] 알프레드 노벨의 다이나마이트 발명, 그리고 고려말 최무선의 화약제조, 1953년 조선화약공판의 한국인으로의 불하 폭약제조라는 역사를 거쳐 동남아에서 일본에 이어 폭약소비량이 연 3~4만톤, 연화소비량이 연 3~4만발에 이르며 종류별 소비추세로는 85년 기준으로 일본의 경우는 일반폭약 24%, 함수폭약 10%, 안포 66%이고, 한국의 경우는 일반 폭약 73.5%, 함수폭약 2.5%, 안포 24%이다[2]. 사용용도는 한국의 경우 종래의 탄광, 석회석 및 일반광산위주(87년 기준 64.5%)에서 최근에는 골프장 건설, 지하철 건설, 원유저장소건설, 아파트 건설 등 건설토목현장에서의 사용량이 탄광 석회석 및 광산(90년기준 40.6%)에서의 사용량을 앞지르고 있다.

재해율 역시 전산업 평균강도율 2.7에 비해 비교적 높은 편이며, 재해발생시에는 강도율이 보통 6 이상으로 피해규모 및 사상규모는 매우 큰 편이다[3].

그리고 일본의 경우 발파작업중에 발생하는 사고를 요인별로 분석해보면 대피지연, 조기접근, 대피부적합, 암석낙하, 비석등의 안전지역으로의 대피가 미흡했을 때 41%로 가장 높고 그 다음이 불발 및 잔류 25.9%, 작업 중 11.4% 등으로 나타난다.

3. 화약발파시 안전사고방지대책

3.1 발파공해의 일반적 대책

(1) 발파공해의 발생 및 대책

발파진동은 발파 총 에너지의 0.5~20%가 탄성파로 변환되어 발생하는데[4] 이는 폭원으로부터의 거리, 화약류의 종류, 장약량, 전색상황, 기폭방법, 자유면의 수, 전파경로, 지질조건, 성층상황등의 인자가[16] 영향을 주므로 이러한 인자를 면밀히 분석하여 설계에 참고하여야 하며 인체에 미치는 영향 또한 한 개인차, 신체부위차, 노출방법의 차에 따라 다르며 특히 그때의 주변 분위기나 개인감정에도 많이 좌우한다. 발파진동의 크기는 변위, 속도, 가속도의 세가지 척도 중 진동속도가 구조물의 피해정도와 가장깊은 관계가 있으며 주파수 역시 많은 영향을 미친다.

소음은 보통 천공작업시 발생하는 착암기류 소음과 파쇄암석의 처리를 위한 운반기구 즉 덤프트럭등의 중기류 소음과 화약폭발소음이 있다. 화약을 폭파시 폭발에너지의 일부는 자유면 가까이에서 탄성파가 공중으로 폭발 소음으로되어 주위로 전파된다. 폭발소음은 폭원과 관측점간의 지형이나 구조물의 종류, 성질, 규모에 관계되며 풍속 및 풍향에도 큰 영향이 있다. 인체에 대한 영향으로는 불쾌감, 일상생활의 방해, 생식기 등의 변화, 청력장해 등을 들 수 있으며, 구조물에 대한 영향으로는 건축물의 구조, 재료, 신구의 정도에 따라 차이가 있다.

폭풍은 발파로 인한 암반자체의 변형, 지반진동이 대기중으로 전달되거나 발파공으로부터 방출되는 가스나 전색물이 대기중으로의 확산등으로 발생되며 이는 그때의 기후, 기압, 기온, 풍속 및 측정방향에 따라 고려하여야 하며 크기는

공기의 압력으로 결정된다. 예를들면 유리창이 파손되는 정도의 폭풍피해는 0.60g/cm²에 해당한다.

비산분진은 주로 착암기류에 의한 천공작업시, 발파작업시, 파쇄암석의 적재시 발생하며 습식 착암기의 사용, 집진장치의 설치, 살수작업, 방진 마스크착용 등으로 억제 또는 방지할 수 있으나 완전한 제거는 곤란하므로 다소작업에 주의를 요한다. 또한 발파시 발생되는 비석은 안전사고에 가장 직접적인 요소로서 진색불충분, 암반의 균열, 암석의 강도저하, 천공각도 착오로 장약의 국부적 집중, 점화순서착오 및 지나친 지발시간, 과장약 등으로 발생되며 상기요인을 천공 및 장약량의 조정 및 개선을 통해 제거하고 안전매트로 발파부위를 엄밀히 덮는다거나 안전망을 설치하는 등의 조치로 관심을 집중시 대부분 예방할 수 있다.

(2) 발파소음진동 경감방법

최근에는 도심지에서 건물신축부지 마련을 위한 노천암반발파, 터널굴착 발파, 가동중인 중요 시설물 가까이에서의 발파등으로 소음진동에 대한 문제가 심각해지고 있다. 또한 환경보존관계법령 중 소음진동 규제법에서는 올해부터 1일 200kg 이상의 폭약을 사용시 폭약 사용개시 7일전까지 시도지사에게 신고해야하는 의무규정의 제정 등 점차 복잡해지고 있다[5]. 하지만 공사 또한 소정의 공기내에 마쳐야 하는 어려움이 있기 때문에 시공공법과 함께 경제성도 고려되어야 하며, 7일전 신고의무규정도 재검토할 필요가 있겠다. 일반적으로 소음진동을 경감시키기 위해서는

첫째, 제발효과로 진동을 줄인다. 즉 단발뇌관[6]이나 비전기식뇌관을 사용한다거나 니산 단발 발파기, 연속 발파기 등의 다단식 발파기를 사용한다[7].

둘째, 저비중, 저폭속 화약을 사용한다. 즉 디커플링효과를 이용한 슬러리, 파이넥스폭약을 사용하거나 고열의 고압가스 발생으로 충격파의 발생없이 피폭물이 파쇄되어 진동, 폭음, 비석 등을 감소시켜주는 콘크리트파쇄기(CCR)를 사용할 수 있다. CCR의 경우 동일약량의 다른 폭약에 비해 진동폭음이 약 1/2~1/10 정도가 감소된다[7]. 그리고 화약이 아닌 화학물질을 이용한 무진동 파쇄약품 즉 캄마이트, 브라이스타, 무성파쇄제 등을 들 수도 있다.

셋째, 적정한 최소저항선과 장약량을 가지고 가급적 많은 자유면을 이용한 발파공법의 사용, 즉 계단식 발파법을 들 수 있다.

그리고 실용적이진 못하지만 폭원과 진동을 받는 물체의 중간지점에 도랑을 굴삭하는 방법 등으로 파동의 전파를 차단시키는 방법도 있다.

또한 폭발음을 경감시키는 방법으로는

첫째, 토제 등을 쌓아서 폭음의 전파경로를 막는다.

둘째, 풍향, 풍속의 흐름을 이용하여 전파강도를 분산시킨다.

셋째, 발전기뇌관이나 다단식 발파기를 사용하여 발생음 자체를 분산시킨다.

3.2 암반발파시 안전대책

(1) 안전 기준

미국의 경우 발파작업에 따른 발파진동 안전한계는 보통 5.0카인[6,15], 日本의 경우 1.0카인 정도로 선정하고 있다. 우리나라의 경우는 서울 지하철 건설시 발파진동 허용치는 표 1과 같이 적용하였다[6,9].

이 규정 적용시 일반적으로 주택이나 아파트가 있는 도심지에서의 발파진동 허용치는 0.5cm/sec이다. 이 수치는 인간의 감각으로는 진동을 별로 느끼지 못하고 물 그릇에 물을 떠놓았을 때 잔물결이 생길듯 말듯하는 정도에 해당한다. 또한 건물이 아주 밀집된 곳이나 지반이 특히 약한 곳에서는 0.2 cm/sec면 충분하다고 할 수 있다.

(2) 안전거리 설정방법

암석의 종류를 크게 3가지로 대별하면 화성암, 퇴적암, 변성암으로 나눌 수 있다. 지각은 화성암이 95%를 차지하고 있으며 서울지역의 지반은 대부분 화강암과 편마암으로, 부산경남지역은 안산암과 편마암으로 이루어져 있다.

발파진동 추정공식은 화강암의 경우 $V=KW0.57\ D^{-1.7}$, 편마암의 경우 $V=KW0.5\ D^{-1.5}$를 적용하며[8], 콘크리트파쇄기(CCR)를 사용하여 발파를 할 때는 $V=7W0.5\ D^{-1.75}$를 사용하거나[9,7] 그림 1을 이용하여 안전거리를 추정할 수 있다.

(3) 터널발파시 안전대책

최근 도심지에서의 터널굴착은 소음진동등 생활환경 침해에 대한 민원발생 숫자가 급속히 증가하고 있다. 이를 방지하기 위한 안전대책으로 폭음진동에 가장 큰 영향을 미치는 심발 발파의 종류와 그 선택법, 여굴 및 낙반 안전사고를 방지하기 위한 공법인 정밀면발파법을 권장하면서 다음과 같이 요약정리한다.

가. 심발 발파

터널 발파시 심발 발파는 매우 중요한 기술 중 하나인데 번 커트, 노 컷라운드 코로만드 컷, 실린더 컷, 브이 컷, 피라미드 컷, 다이아몬드 컷, 드라우 컷, 팬 컷 등이 있는데 이중 소음진동, 폭풍, 충격 등이 우려되는 현장에서의 안전발파를 위해서는 브이 컷법을 권장한다. 브이 컷법은 천공장비의 빈약,

표 1 서울지하철 인접건물에 미치는 발파진동 허용치

구 분	1	2	3	4
건물 분류	문화재	주택, 아파트 (실금이 나타나 있는 정도)	상가 (금이 없는 상태)	무근콘크리트 빌딩 및 공장
건물 기초에서의 허용진동치 (cm/sec)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0

정밀천공기술이 다소 부족한 현장에서도 사용이 가능하며 대체로 터널의 폭이 상당히 넓고 진행장이 길때 사용한다. 또한 단면의 폭이 5m이상 일 때 매우 효과적이다. 천공각도는 60도 이상이라야 경제적이고 심배기단면은 1.4*1.4m2이 표준이다[10].

나. 터널 정밀면 발파

1970년 이후 터널이나 지하공동 발파공법으로써 정밀면 발파법(smooth blasting)이 거의 표준화되어있다[10]. 이 공법은 경부고속도로공사 시공중에 아트라스 콤프레샤 장비 도입시 문헌과 외국 기술자의 도움으로 프리-스프리팅 공법을 처음으로 시도하였으며 그 이후 남해고속도로 공사에서 시공하여 안전사고 방지에 좋은 결과를 얻었다.

사용폭약은 서전 니트로 노벨사의 구리트, 나비트와 일본의 울바나이트, 시타겔, 우리나라에는 파이넥스 1호, 파이넥스 2호 등이 있다.

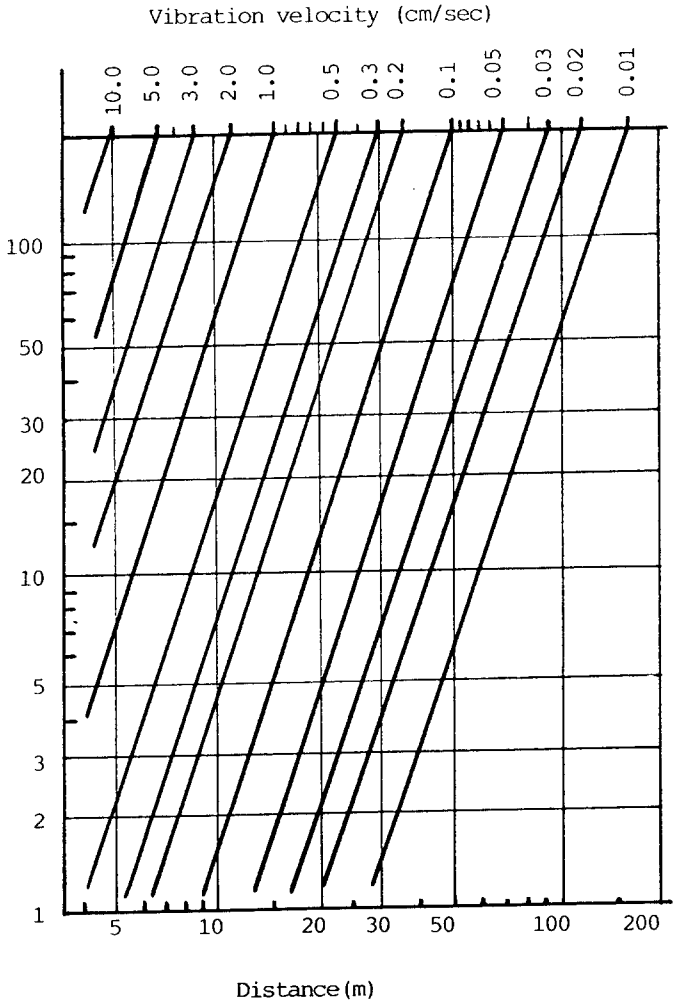

그림 1 콘크리트 파쇄기의 약량과 진동속도와의 관계

(4) 안전거리 설정 실례

1987년 11월 4일 B시 J동에서 암질은 편마암(K=44)이고 사용폭약은 다이나마이트 28mm로써 1천공당 장약량 2.7kg, 거리 70m에서 엠에스 발파시 진동 측정기로 진동을 측정한 결과 0.12cm/sec의 진동이 측정되었다[11].

발파진동공식 $V=KW^{0.5}D^{-1.5}$를 사용하여

안전거리 $D=-1.5\sqrt{\frac{V}{KW^{0.5}}}=$ 27.55m이므로

주택, 아파트 진동허용기준치 0.5 cm/sec를 적용시 최소 안전거리는 27.55m이고 1회 최대 폭약 사용량은 2.7kg이 된다.

3.3 구조물 해체폭파시 안전기준

폭약을 사용하는 구조물의 해체작업은 구미에서는 이미 실용화되고 있으며 우리나라도 이제는 고층빌딩 아파트 등 노후된 건물의 철거를 위해 H회사, D엔지니어링 등 수개의 업체가 구조물 해체기술에 대해 적극적으로 연구 중에 있다. 외국의 경우에는 미국의 BROCO, CDI, EDL, 스웨덴의 NC, UK의 CDG 등 대부분 건물 폭파 전문회사들은 20년 이상의 건물 해

체 경력을 가지고 있으며 이들의 구조물 해체시의 안전대책은 각사에 따라 조금씩 다르지만 대체로 해체될 구조물로부터 반경 15m이상을 안전기준으로 하여 설계, 시공하고 있다.

구체적으로 CDG의 경우는 소음진동 규제대책으로써 발사지점으로부터 14m에서 진동은 5카인, 폭풍압은 160dB 계획하에 시공하고 있다[12].

3.4 연화발사시 안전대책

(1) 안전 기준

• 연화발사 안전수칙 15훈[3,6,13,14]

1. 연화발사장소의 안전거리는 발사장소로부터 반경 200m 이상을 둔다.

2. 연화발사장소로부터 풍하 20 m 이내에서는 흡연등의 화기취급을 하여서는 아니된다. 풍상방향에서는 절대 금한다.

3. 발사작업자 등 연화를 취급하는 자는 음주를 하고 작업에 임하여서는 안된다.

4. 연화를 사용하고자 하는 장소의 부근에는 소화작업에 필요한 소화기, 방화수, 소방차 및 구급차를 필히 대기하고, 우천이나 강풍시에는 발사작업을 중지한다.

5. 연화발사포를 설치시에는 원형의 변형여부 등을 확인하고 설치시 지면과 수직으로 밀착되도록 고정하고 발사시 충격으로 넘어지지 않도록 설치한다.

6. 사용전에는 항시 연화에 부착된 속화선 및 발사약의 흡습과 변형여부, 발사포의 변형여부 등을 점검한 후에 작업에 임한다.

7. 연화를 발사포에 장진할 때는 소량씩 운반하여 발사포를 들여다보지말고 비껴서서 1발씩 천천히 발사약 밑부분이 정확히 포 중심이 되도록 장진한다.

8. 발사작업자는 안전모, 귀마개, 안전장갑, 방열복, 안전화를 착용하고 작업복은 발사작업에 적합한 것을 입어야 한다.

9. 발사자는 특별한 경우를 제외하고는 1명이 점화하여야 하며 점화원은 점화자가 직접 취급하고 관리한다.

10. 발사자는 최대한 낮은 자세로 점화하고 점화여부를 확인 즉시 허리를 굽힌 상태에서 신속히 5m 이상 대피한다.

11. 발사시에는 풍향에 의한 불티의 날림을 확인하면서 작업에 임하여야 한다.

12. 연화 적재장소에는 감시자를 두고 화기에 의한 발화, 폭발이 되지 않도록 각별히 주의한다. 특히 위험지역내에는 외부인 출입을 철저히 통제한다.

13. 연화를 장진한 후에는 불연성 시트로 덮어 놓는다.

14. 연화발사포에서 연화가 발사되지 않았을 경우에는 다량의 물을 주입하고 발사작업이 완전히 끝난 후 10분이상 지난 후에 조심스럽게 회수한다.

15. 발사완료후 불발연화 혹은 미연소 화약류가 발견시 즉시 회수하고 주변을 철저히 수색하여 완전히 회수조치하여 물에 넣는 등 안전하게 폐기처리를 하여야 한다.

(2) 안전거리 설정방법

연화발사시 낙하안전거리는 발사고도 계산식 $H=\tan\theta\times L$ 과[13,3]

낙하안전거리 계산식 $2(c=\sqrt{a^2+b^2-2ab\cos\theta'})$를 사용하여 규격별 낙하안전거리를 계산하면 표 2와 같이 최소 129m내지 최고 200m가 된다.

여기서 H : 발사고도

θ : Transit 측정각동

L : 발사포와 측정지점간의 거리

c : 발사지점과 개화점간의 수평거리

a,b : 측정위치와 개화점 간의 거리

가 된다.

300m 거리에서 독일제 휴대용 소음측정기로 폭음을 측정시(dB C 특성치) 표 3과 같이 평균 98.4dB로 소음진동규제법에 의한 생활소음 규제기준[5]에는 초과되나 충격소음 허용농도기준에는 미달된다.

(3) 안전거리 설계 예

88서울올림픽 폐회식 경축행사시에 발사된 6000발의 연화는 세계각국의 많은 귀빈이 참석한 관계로 특히 안전발사에 대해 많은 노력을

표 2 연화발사시 규격별 낙하 안전거리

구분 \ 규격	3″	4″	5″	6″	8″	10″	12″	비 고
연화직경 (mm)	68	94	115	142	178	231	273	*Factor적용방법* 상승고도 50m이하 F=1.1 100m이하 F=1.2 150m이하 F=1.3 250m이하 F=1.4 350m이하 F=1.5 450m이하 F=1.6 600m이하 F=1.7 750m이하 F=1.8 900m이하 F=1.9
상승고도 (m)	100	130	150	180	200	250	300	
산출안전거리 (m)	99	102	105	110	113	123	133	
적용안전거리 (m)	129	133	147	154	158	185	200	
실 례	일본에서 5″연화 발사실험 중 80m 지점에서 흑옥이 발생된 보고 예가 있음.							

표 3 연화 발사시 폭발소음 측정치 단위 : dB

일 시	측정횟수								평 균
	1회	2회	3회	4회	5회	6회	7회	8회	
85.1.31. 16 : 00맑음 (폭발음)	95	95	95	100	107	105	93	97	98.4
상 동 (발사음)	89	90	90	91	90	—	—	—	90

기울였다. 3개소에서 분할하여 발사된 연화는 설치작업 안전거리는 반경 75m, 발사시 안전거리는 반경 200m로 설계하여 안전하게 성공적으로 발사를 완료함으로써 우리나라의 연화발사 기술과 안전관리 측면에서 한층 성숙된 면모를 세계에 과시한 역사의 한 장이 되었다.

4. 결 론

(1) 화약발파작업을 시작하기 전에는 필히 시험발파, 안전진단을 통해 공해 및 안전사고 발생요소들을 면밀히 분석 하고 파악하여 발파공법, 천공방법, 사용폭약의 종류, 사용약량 등을 결정하고 이에 따른 적합한 안전거리의 설정, 안전덮게, 안전망의 사용, 필요시 휀스철망 설치등의 안전조치를 완벽히 취해야 겠다. 또한 현행 소음진동규제법에 의하면 폭약 사용시 7일전 신고의무규정은 우리나라의 공사 현실을 감안해 볼 때 재검토할 필요가 있겠다.

(2) 선진국의 발파진동 기준을 우리나라의 경우와 비교 분석해 볼 때 우리나라의 경우 발파진동 안전기준은 도심지에는 대체로 0.5cm/sec가 적당하고, 고주택, 아파트 등이 밀집된 지역이나 건물지반이 특히 약한 곳은 0.2cm/sec을 적용함이 타당하다고 판단된다.

또한 도심지에서의 안전발파를 위한 터널공법으로는 주변 생활환경 소음진동방지를 위한 심발법으로 브이 컷법을, 여굴방지와 미려시공 등 공사시 안전사고, 소음진동을 방지하기 위한 공법으로는 슬러리, 파이 넥스 폭약을 이용한 정밀면 발파법을 권장한다.

(3) 연화발사시 안전거리를 3″기준 최소반경 129m, 12″기준 최고반경 200m로 설정하여야 겠다.

또한 연화발사시 발생하는 폭발소음은 80~100dB정도로써 대량으로 장시간 발사시는 청력장해 등의 피해가 발생할 수 있으나 우리나라의 경우는 발사 총 시간이 대체로 30분을 초과하지 않으므로 관람자나 일반인들이 소음피해를 호소할 수준은 아니라고 결론 지을 수 있다.

참고문헌

1. 金鎭學, 최신 火藥發破 總定理, 세문사, (1985) p. 14~16.
2. 金熙昶, 火藥工業의 現況과 展望, 총포화약 안전기술협회, (계간) 銃砲火藥, 1991(추), 제 5호, p. 12, 13.
3. 孫仙官 외 2人, 火藥의 爆發思考防持를 爲한 安全對策에 對한 硏究, 대한화약기술학회, 火藥發破, Vol. 5, No. 2, Dec 30, 1987. p. 11.
4. 安明碩, 火藥産業의 災害分析 및 安全對策에 關한 硏究, 東亞大學校 碩士學位論文, 1987, p. 21, 17, 28, 43, 45, 46.
4. 金載極, 産業火藥과 發破工學, 서울대학교 출판부, (1988.8.25) p. 371, 379, 380, 384.
5. 環境關係法規, 전국환경관리인 연합회편, 홍문관, (1991.5.28). p. 924, 925, 989, 992, 1036.
6. 安明碩, 대한화약기술학회, 火藥發破, Vol. 7, No. 3, Sept, 30, 1989, p. 15, 17, 18, 20, 16.
7. 李在善, 저진동의 발파공법, 총포화약안전기술협회, (계간) 銃砲火藥, 1991(夏), 제 4 호, p. 18, 17.
8. 許 鎭, 서울지하철 3, 4호선 발파작업표준화, 대한화약기술학회, 火藥 發破, Vol. 5, No. 2, Dec 30, 1987, p. 33, 34.
9. 許 鎭, 정밀발파의 표준화, 대한화약기술학회, 火藥發破, Vol. 8, No. 3, Sept, 30, 1990, p. 11, 6.
10. 姜井山, 안전정밀턴널파발파기술, (1981. 7), p. 4, 6, 8, 21, 23.
11. 銃砲火藥安全技術協會, 대한조선공사, 長林現場 試驗發破, 1987. 11. 4.
12. 大韓(專門)建設協會 부산직할시지부, 建築物 解體公法 新技術 세미나 교재, (1988.6.2) p. 30.
13. 許 鎭, 安明碩, 안전한 불꽃놀이를 위한 고찰, 한국기술사회, 技術士, Vol. 20, No. 1, MAR, 1987, p. 21, 22, 27, 25, 26.
14. 銃砲刀劍火藥類等 團束法規集, 치안본부, 총포화약안전기술협회, (1990.8.13) p. 90, 91, 92.
15. 李正仁 외 1人, 발파작업에 의

한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향에 관한 연구, 大韓鑛山學會誌, Vol. 16, No. 1, 1979, p. 44.
16. 李慶雲 외 2人, 화약, 암석강도 및 발파류형이 발파진동에 미치는 영향. 大韓鑛山學會誌, Vol. 21, No. 4, 1984, p. 335, 336.
17. 工業火藥ハンドブシク, 日本工業火藥協會.
18. 火藥類の事故例と解說, 全國火藥類保安協會.
19. Rock Blasting. U. Langefors and B. Kihlstrom.
20. Fireworks Principles and Practice, Lancaster.