

발파 작업과 낙뢰에 관한 사례 연구

A Case Study on the Thunder and Blasting Work

최 찬규

Chan-Kyu Choi

영일 ENG 기술사 사무소

초 록

자연 기상현상의 재해는 인간의 힘으로 극복하기 매우 어렵다. 그 중 낙뢰는 기상 재해로 뇌운과 지면사이의 방전 현상을 말한다. 한반도는 기단이 해상을 통과 하면서 많은 에너지를 공급받아 쉽게 뇌운이 형성된다. 기상청의 자동 낙뢰 관측 장비에 의하면, 연간 1,300회 이상의 낙뢰가 발생 되는 것으로 알려져 있다. 낙뢰는 지상으로 방전되면서 인명·전자기기의 파손등 피해를 일으킨다. 특히 발파공법은 주로 지표 지중에서 실시되는 공법으로 낙뢰에 대하여 매우 취약하고, 그 피해 또한 심각하다. 본 연구는 화약발파 기술자들의 참고 자료로써 낙뢰에 대한 주의와 대책을 연구하는 뜻에서 작성한다.

핵심어 : 낙뢰, 뇌운, 발파공법

1. 서 론

발파라 하면 화약과 뇌관이라는 특정 재료를 이용하여 파쇄 대상물에 설치하여 파괴하는 작업으로 인류문화 발전에 기여하는 바가 크다. 그러나 화약은 그 특성이 극히 위험한 재료로써 그 사용에는 특별한 주의와 안전관리가 필요하다. 발파 작업시 낙뢰에 의한 사고는 폭약과 뇌관과 모선, 각선의 전도체에 강력한 전기적 에너지의 흐름에 의해 발생한다. 낙뢰발파에 대한 사고는 돌발적 기상 상황에 따른 시간적 예측이 어렵고, 결과에 대한 원인과 과정을 가정 또는 개연성으로만 판단할 수밖에 없으므로 낙뢰와 발파에 대한 연구는 극히 미진한 상태이다. 이에 필자는 기상청과 문헌 등을 통하여 자료를 수집하고, 우연히 현장에서 경험한

낙뢰발파 사례를 소개하고, 그에 대한 대책과 예방책을 마련하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 뇌운의 형태와 종류

뇌운(thunder storm)는 적란운 또는 그런 구름의 집합체에서 발생하며, 천둥과 번개를 동반하는 점에서 소나기구름과 다르다. 일반적으로 뇌운은 온난하고, 습하고, 불안정한 공기와 관련 되어 일어난다. 이를 분류하면 기단뇌운, 선형뇌운, 전선뇌운 등이 있다.

(1) 기단뇌운(air-mass thunder storm)

어느 정도 균일한 기단내에서 발견되는 뇌운으로 산발적이다. 주간 가열의 결과

국지적으로 발달하는 것으로써 오후에 잘 발생한다.

(2) 선형뇌우(line thunder storm)

낮은 고도의 바람 방향으로 선형이나 띠 모양으로 배열된다. 낮 시간이면 언제라도 발달하지만 오후에 많이 발생하는 경향이 뚜렷하다.

(3) 전선뇌우(frontal thunder storm)

대량의 찬 공기와 따뜻한 공기를 분리시키는 경사진 기층으로 온난한 공기가 대류적으로 불안정하면 뇌우는 발달한다. 비록 전선뇌우는 산발적이기는 하나 그들은 전선을 따라 이동하고 일반적으로 전선 운역에 속한다는 것이 알려져 있다. 하루 중 어느 때나 발생할 수 있다.

2.2 천둥

일반적으로 대기에는 수직적인 전기장이 존재하며, 자유전하가 있다. 운물리학자들은 오랜 동안 뇌운의 전기방전에 대한 설명을 생각해 왔으나 아직 논쟁의 여지가 있고, 잘 알려져 있지 않은 과제이다. 뇌운내에서 전하의 분리는 상승기류의 결과로 알려져 있기도 하나 대부분 중력 분리 이론에 찬성한다. 중력이론은 무거운 입자(빗방울·우박)에서는 음전하가 떠나는 반면, 가벼운 입자(구름·빙점·이온)는 양전하로 향하는 전하분리의 미소물리학적 과정을 가정한다.

전자는 구름에서 떨어져서 다소 낮은 지역에 음전하를 방출하는 반면에, 후자는 상층의 양전하 중심을 형성하기 위하여 상승기류에 의해 운반된다. 이 과정에서 적란운 구름에 의해 발생하는 순간적이고, 높은 전기적 방전을 번개라 하며, 번개는 구름과 땅 사이, 또는 구름과 주변 공기사이,

또는 구름내에서 발생한다. 또한 충분히 높은 공간전하가 발달되어 있는 눈보라, 모래보라, 화산폭발의 경우에도 발생한다.

그림 1은 뇌운에 전기적 구조를 도식적으로 표현한 것이다.

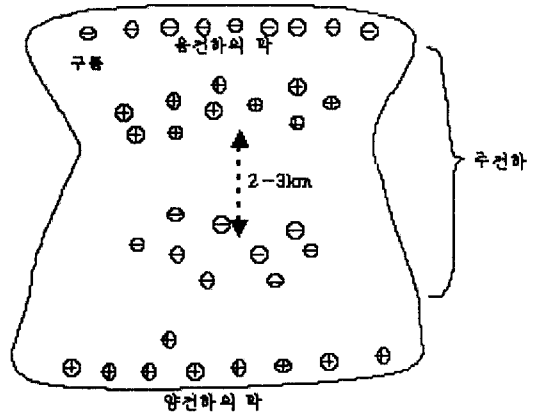


그림 1. 뇌운의 전기적 구조 예

대류운에 의한 구름과 땅 사이에 나타나는 번개의 초기과정은 그냥 눈으로 보기에는 한 방울로 시작되는 것으로 생각할 수 있다. 그것은 극히 짧은 시간적 단계로 들어서면서 때때로 갈라지고 이 가지들도 갈라지는 가지를 나타내서 하향으로 계속하여 지그재그 통로를 만들며, stepped leader가 지상 가까이 도달되면 아래의 높은 물체(큰 건물, 나무, 피뢰침, 철탑, 굴뚝)에서 아주 강력한 방출이 위로 전파되어 구름에 도달하면 이것이 return stroke이다.

번개는 한번의 return stroke로 끝날 수도 있으나 대개의 경우는 여러 번의 방출이후 이온화되었던 번개 통로가 소멸되어 수십분의 일초동안 나타나 번개(방전)로 끝난다.

이러한 번개의 전기적 방전에 따른 공기의 갑작스런 가열(20,000~30,000℃)과 팽창으로 인해 천둥이라 고하는 음파가 만들어진다.

주전하 중심의 가장 큰 번개활동은

하강기류와 폭우역에 존재한다. 대체로 천둥과 번개는 감응률이 아주 커서 강한 연직류가 발달할 수 있는 온난 다습한 공기 안에서 잘 발달한다.

그림 2는 번개의 초기과정에 대한 예이다.

2.3 낙뢰의 전기적 성질

(1) 대기 중의 공기는 어느 정도 절연 내력을 가지고 있으나 전압의 크기가 어느 일정값(임계값) 이상이 되면, 대기는 절연이 파괴되어 빛과 소리를 내면서 막대한 전류가 흐른다.

(2) 낙뢰 방전의 규모는 대단히 크고, 방전직전의 양쪽 전하 중심 사이의 전위차는 1억~10억V, 중화되는 전하는 통상 20~30쿨롬으로써 방전로의 길이는 수km로부터 수십 km 에 이른다.

2.4 천둥의 성질

번개의 전기적 방전에 의하여 발생하는 소리로 번개의 방전로는 30,000℃의 고온에

달하여 초음속으로 팽창하게 됨으로 기압의 충격파를 일으켜 천둥을 울리게 한다. 천둥 그 자체는 0.5초 이하의 단시간의 현상이지만 방전로의 길이가 수km 로부터 수십km 에 이르고 있으므로 귀에까지의 도달시간 차이 때문에 소리가 길게 끌면서 들린다.

2.5 피뢰체의 전도방전

(1) 낙뢰는 일반적으로 전운이 형성되어 지상에서 높은 곳으로 떨어진다.

(2) 개활지에서는 높은 나무, 원두막, 농부의 삽이나 쟁이, 보행자의 우산 등 휴대하고 있는 철물, 굴뚝, 첩탑, 피뢰침, 변압기 등에 떨어진다.

(3) 철분을 많이 함유하고 있는 산이나 바위, 바위섬 등에 떨어진다.

(4) 크고 강력한 전압전류로써 지상에 떨어진 후, 소멸하지 않고, 지하수 중에 또는 철분, 구리, 흑연 성분을 함유한 암반 등에

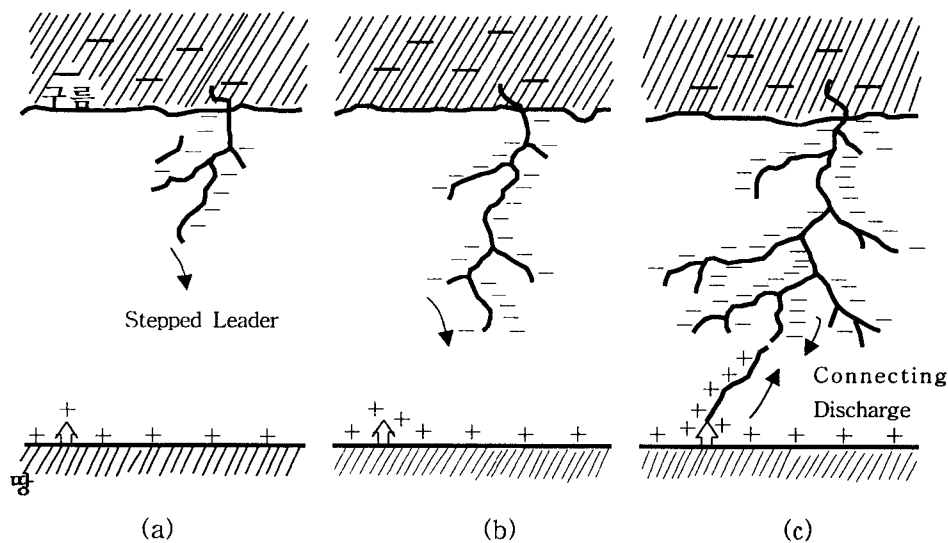


그림 2. 번개의 초기과정에 대한 예

잔류전류로 남을 수도 있다.

(5) 낙뢰 전류는 지하수를 타고 흐를 수도 있다.

2.6 화약류 작업의 전기적 취약성

(1) 화약·폭약은 그 조성상 다양한 산소공급제, 감열소염제, 고화방지제, 예감제, 고화제, 둔감제등을 혼합한 화합물로서 전기적으로 강력한 전류를 통할 수 있는 도체로 생각할 수 있다.

(2) 뇌관의 관체는 금속체로서 낙뢰 같은 강력한 전기적 에너지에는 극히 취약하다. 이는 비전기 뇌관이라 할지라도 결코 안전하지 못하다.

(3) 전기뇌관 발파 시스템에서 뇌관 각선 모선 등은 금속도체로서 전기 작용에 대단히 취약하여 지하 굴착작업 시에는 낙뢰뿐 만 아니라 갱내 인입되는 전기적 에너지에 대단히 취약하다.

(4) 발파회로에 양단이 단락된 폐회로 일 때는 유도전류에 의해 전체적으로 폭발의 위험이 있다. rail 이나 pipe등의 금속체에 뇌전류가 흘렀을 때 또는 뇌유도에 의해 전류가 흘렀을 때 발파회로가 단락되고 있으면 전자유도 전류에 의해 발파회로에 전류가 흐르고 폭발의 위험이 있다.

(5) 천공 공내는 지하천공 작업에 특성상 천공수를 사용함으로 항상 공주변이 습한 물이 함유 되어 있기 때문에 천공 자체는 전기적으로 도체라고 생각할 수 있다.

(6) 발파 대상이라는 모임은 광물학적으로

전기를 통할 수 있는 도체적 성분을 만날 수 있다. 이는 석탄, 흑연, 철 등 기타 금속 성분이 많은 지하터널의 굴착 발파시 발파전류의 누설로 인해 종종 불발공이 생기는 것을 경험할 것이다.

(7) 암반의 절리를 따라 흐르는 지하수는 외부에서 접한 강력한 전기적 에너지로 화약류 작업장을 무력화 시킬 수 있다.

2.7 낙뢰에 의한 발파 사례

(1) 사례 개요

1) 시간 : 2001. 7. 23. 07 : 13 분경

2) 장소 : 서초구 우면동 OO터널 현장

상행 STA 0+840 (갱구로 부터 1,360m 지점)

하행 STA 0+714 (갱구로 부터 1,486m 지점)

3) 현장개요

당 현장은 서초구 우면동(과천쪽)에서 예술의 전당(반포쪽)으로 굴진하는 2차선 쌍굴 터널공사로써 NATM 공법을 적용하며 발파공법으로는 다단 발파를 실시. 상행선은 하부 반단면을 하행선은 상부 반단면을 굴진하며, 상행선은 2분할 다단 발파 하행선은 6분할 다단 발파를 진행 중이었음.

4) 일기 상황

오전 6시 50분경부터 강우 시작 (낙뢰 진행 시간 07:10~08:30)

5) 작업 상황

· 05:30 화약 운반 차량 현장 도착

· 05:35 화약 불출

- 상행 폭약 60kg, 뇌관 54EA

- 하행 폭약 110kg, 뇌관 152EA

· 05:40 장약 시작

- 야간 작업반

· 06:45 상행 장약 완료.

- 장약량 52.75kg, 뇌관 45EA

· 06:50 공사과장 현장 점검 차 터널진입.

· 06:55 하행 장약 완료, 화약 잔량 반납, 야간 작업원 철수.

- 장약량 81.4kg, 뇌관 150EA

· 07:00 공사과장 점검 후 철수

· 07:05 화약 장진 이상 유무 최종 점검, 저항측정(저자), 회로 이상 발견. (하행 4번 BLOCK 결선 단선)

· 07:08 화약 기사, 주간 작업반 조장 장약 확인 및 단선 부분 연결차 터널 진입.

· 07:13 낙뢰·천둥 감지, 발파음 감지, 저항 측정기 작동 불능. (낙뢰로 인한 파손)

- 화약기사, 주간 작업반 조장은 막장 80m 전방에서 발파 순간 목격 후 긴급 대피.

· 07:18 공사과장 터널 상황 파악을 위해 상행선으로 진입 수 분후 화약 기사와 주간 작업반 조장 대피 확인 후 함께 터널에서 철수

· 09:40 현장 확인.

하행 150공중 부분 발파 30공 상행 45공중 부분 발파 26공.

상행 - 막장면 습윤 상태로 반짝임.

하행 - 장약 막장 앞 물이 고여 있음.

· 14:00 강우 중단 터널 진입 누설 전류 측정 후 잔류 장약량 안정 정리 후 결선 후 재 발파, 모든 작업원의 무사함에 안도하며 발파작업 완료.

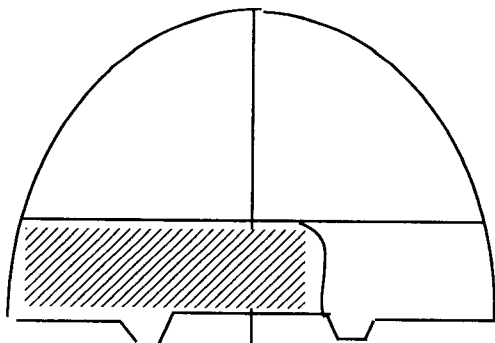


그림 3. 하행 부분발파 단면

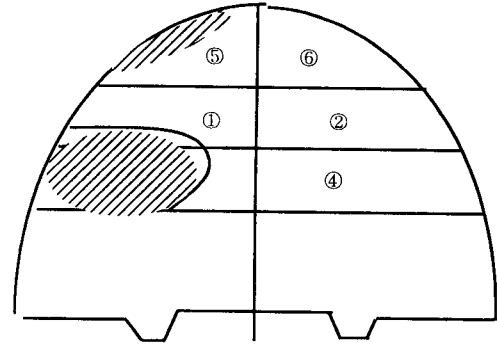


그림 4. 상행 부분발파 단면

6) 낙뢰로 인한 발파를 입증할 수 있는 증거

① 낙뢰 목격자 : 공사과장
화약발파 총괄 담당 (저자)
계측 관리자

② 낙뢰 후 발파음 감지 (오전 07:13분경)

③ 누전전류로 인한 발파로 추정 할 수 없는 이유

㉠ 누전은 다단 발파 공법 특성상 여러 장약 BLOCK이 동시 부분 발파되기 어렵다.

㉡ 발파된 뇌관량이 너무 많다. (상행 26공 하행 30공)

㉢ 누전에 의한 발파라면 2-10발에 불과하며, 다단발파 시스템의 특성상 특정 BLOCK에 집중될 것임.

㉣ 상하행선 동시 발파는 누전에 의해 이루어질 수 없다.

④ 화약 발파 담당 실수에 의한 발파 가능성 여부.

㉦ 낙뢰 때 저항 측정기(B0 1999-10) 파손
- 저항 측정기는 회로 점검을 위하여 회로에 연결되어 있었음.

㉧ 낙뢰 시 공사과장과 화약 발파 총괄 담당(저자)과 같이 있었음.

㉞ 발파기는 차량에 있었음.

㉟ 여러 장약 BLOCK이 상행터널·하행터널 동시에 BLOCK 별로 부분 발파되었다는 점.

⑤ 2001. 7. 23일자 기상청 일기상 통계표 (과측자 서울 송월동)

㉠ T0(S)0706 (07:06분 남쪽 천둥 감지)

㉡ R0(S5-7)0712-0735 (07:12~07:35 남쪽 5~7km 뇌전 감지)

㉢ T0(SE)1007 (10:17분 남서쪽 천둥 감지)

㉣ R1(SE 2-3)1015-1028 (10:15~10:28 남서쪽 2~3km 뇌전 감지)

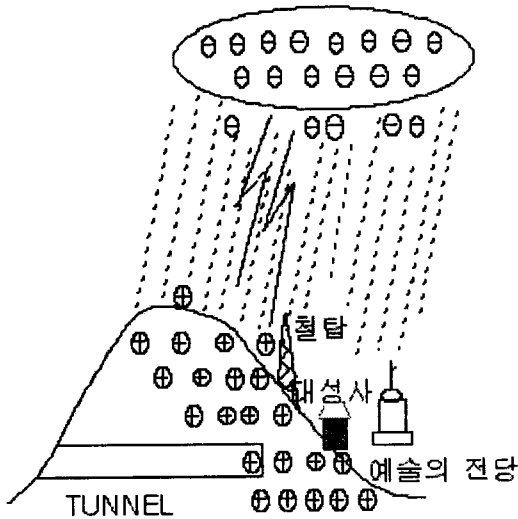


그림 4. 낙뢰에 대한 상상도

7) 사례 현장의 문제점

① 지역적 낙뢰 빈도, 지형, 주변 구조물에 따른 취약성에 대한 사전 예지 부족

② 사전 예지가 있었다 하더라도 현장 여건상, 시간적·공간적 제약이 있다

③ 장약 막장 상부 50M 지점에 송전탑이

있다

④ 장약 막장 상부에 예술의 전당, 대성사 등에 피뢰침이 설치되어 있었다.

8) 그 밖의 낙뢰 사례

- 1990. 07. 18 영월군 서면 광진2리 시멘트 터널.

- 1993. 05. 13 전북 무주군 적상면 괴복리 무주 유니버살 터널.

- 2000. 06. 09 충남 천안시 광덕면 무학리 천안-논산간 고속도로 터널.

- 2000. 06. 29 전남 영광군 영광읍 학정리 서해안 고속 도로 터널.

3. 화약작업 현장의 낙뢰 대책

1) 연중 낙뢰 발생 빈도는 6월부터 9월까지 가장 많으므로 최선의 대책과 대피 교육을 해야 한다.

2) 현장 주변의 지형·지질·지하수·구조물·피낙뢰체 등의 관한 사항을 숙지 대피에 참고한다.

3) 작업 당일의 기상예보 숙지 뇌전의 예보가 있으면 이를 공시 대피에 대한 전달체계를 확립하고, 대피방법, 대피장소 등을 교육한다.

4) 낙뢰 경보기를 설치하거나 라디오를 틀어 놓고 낙뢰 발생시 들리는 잡음을 감지하며, 천둥소리와 시간차를 계산 낙뢰의 접근거리를 판단하여 대피에 참고한다.

5) 번개의 섬광과 천둥소리의 시간차가 20초 이내 일 때는 즉각 작업을 중지하고,

안전한 장소로 대피한다.

참 고 문 헌

- 6) 작업장내의 도체적 성질을 가진 가시설물 (풍관, 레일, 에어파이프, 급 배수파이프, 전선, 벌크 사이로) 등은 피뢰 시설을 하거나 접지하여 낙뢰시 전류를 지하로 균일하게 흐를 수 있도록 하고 뇌전류가 갱내로 침입하는 것을 방지한다.
- 7) 발파 회로는 결선·나선부가 없게 하고, 부근에 있는 금속체나 지면에 접촉되지 않도록 하고 전선 등에 최대한 멀리 띄워서 설치한다.

1. 기상청, 2002, 기상학 개론
2. 윤지선, 1993, 최신 발파 기술, pp.191~193
3. 한국화약, 2002, 그림으로 이해하는 발파 실패, p.11
4. 한국화약, 1980, 전기 발파, p.36
5. 고려화약, 1993, NONEL 뇌관, p.24

4. 결 론

낙뢰의 강력한 전기적 에너지의 흐름으로부터 완벽한 안전을 확보하기는 매우 어렵다. 따라서 대피가 최선이지만 낙뢰 예상시 즉각적인 결단과 행동이 어렵다. 그것은 낙뢰 가능성에 대한 의구심 때문에 시간적·공간적 제약을 받는 것이 일반적이다.

일반적으로 발생하는 확률에 대한 개념과는 전혀 다른 것으로 생각하고, 화약 기술자들은 안전과 생명에 대한 것으로 판단해야 한다. 아울러 항상 교육과 훈련으로 준비하고, 가능성에 대한 예지와 긴장을 하여 작업시 결단을 내려야 한다.

좁은 막장 단면에 뇌관이 150공 설치되어 있다면 그것이 피뢰침의 접지(earth)판과 같은 역할을 한다고 생각하면 낙뢰 위험의 심각성을 실감할 것이다.