

암석의 전기비저항 측정을 통한 전기뇌관의 사용 안전성 검토

최병희^{1)*}, 류창하¹⁾, 신승욱²⁾, 김수로³⁾

Considerations on the Safety of Electric Caps Based on Measured Electrical Resistivity of Rock Samples

Byung-Hee Choi, Chang-Ha Ryu, Seung-Wook Shin, Soo-Lo Kim

Abstract Much care should be taken when electric caps are used in blast site than when non-electric initiation systems are used. This is because electric caps can cause premature firing or misfires if stray currents of high magnitude flow into the blasting circuit. If the rock has higher electrical conductivity or lower electrical resistivity, such risks will be increased because the rock will provide more passages for the stray currents to flow into the blasting circuit. In this study, several rock samples obtained at a blast site were tested for electrical resistivity to decide whether electric caps could be used or not in the site. The measured electrical resistivity was 39~47 $\Omega.m$ for the rock samples that had a higher content of metal sulfides. Contrary, the resistivity was 15000~21000 $\Omega.m$ for ordinary rocks. Especially, in the case of the rock of electric resistivity of 39 $\Omega.m$, only 2-V electric potential enables a stray current to flow through the rock of 1-m length, which can cause the premature firing of a detonator whose initiation current is 0.4 A. This result shows that electric initiation system should not be used in the site because rocks containing much amount of metal sulfides are widely distributed there.

Key words electric cap, stray current, premature firing, misfire, electrical conductivity, electrical resistivity

초 록 전기뇌관을 사용하는 발파장소에서는 비전기뇌관을 사용하는 개소에 비해 더 많은 주의를 기울여야 한다. 왜냐하면 전기뇌관은 큰 미주전류가 발파회로 속으로 흘러 들어가면 조발이나 불발을 일으킬 수 있기 때문이다. 만일 암석의 전기전도도가 높거나 전기비저항이 낮으면 이런 위험은 더 증가한다. 왜냐하면 이런 암석은 미주전류가 발파회로 속으로 흘러 들어갈 수 있는 통로를 더 많이 제공할 것이기 때문이다. 본 연구에서는 국내의 한 발파장소에서 채취한 몇 개의 암석시편들을 대상으로 전기비저항 시험을 실시함으로써 대상현장에서의 전기뇌관의 사용가능성 여부를 평가하였다. 시험 결과, 황화금속 광물의 함량이 높은 암석시편에서는 전기비저항 값이 39~47 $\Omega.m$ 로 나타났으며, 이는 여타의 보통암석에서의 15000~21000 $\Omega.m$ 에 비하면 매우 낮은 수치이다. 특히, 전기비저항이 39 $\Omega.m$ 인 암석의 경우, 뇌관의 발화전류를 0.4 A로 가정했을 때 암석 1 m를 통해 미주전류가 흐른다면 외부전압이 2 V만 인가되어도 뇌관이 기폭될 수 있는 것으로 나타났다. 발파현장에 황화금속을 다량 함유하고 있는 암석이 많이 분포하고 있다는 점을 고려할 때, 이 시험결과는 대상현장에서는 전기식 발파를 지양해야 함을 의미한다.

핵심어 전기뇌관, 미주전류, 조발, 불발, 전기전도도, 전기비저항

1. 서 론

본 연구는 서해선 복선전철 건설공사 현장에서 채취한 암석표본을 대상으로 전기비저항(resistivity) 및 충전성(chargeability)을 측정함으로써 대상현장에서 전기뇌관의 사용 안전성을 검토할 목적으로 수행되었다.

일반적으로, 전기뇌관을 사용한 전기식 발파를 수행할 때

¹⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원
²⁾ 한국지질자원연구원 박사후연수자
³⁾ 한국광해관리공단 선임연구원
* 교신저자 : bhchoi@kigam.re.kr
접수일 : 2016년 12월 19일
심사 완료일 : 2016년 12월 22일
게재 승인일 : 2016년 12월 26일

에는 미주전류(stray current), 곧 누설전류(leaked current)로 인해 조발(premature firing)이나 불발(misfire)이 발생할 가능성이 있다. 조발이란 당초 발파하기로 정해놓은 시간 이전에 예상치 못하게 일어나는 폭발을 말하는데, 조발이 일어나면 큰 위해가 발생할 수 있다. 미주전류란 암반 중에서 임의로 형성되는 자연적인 회로를 따라 돌아다니거나 모여 있는 전류를 말하며, 대개 전기적으로 작동하는 장비나 배전시스템에서의 전류의 누설로 인해 생긴다. 태양 표면에서의 폭발이 많을 때에는, 특히 북위지역에서는 추가적인 미주전류가 생성되기도 한다. 미주전류는 그 크기가 크고, 발파회로로 들어갈 수 있는 길이 있을 때에는 위해를 일으킬 수 있으므로 매우 위험하다(Persson 등, 1994).

불발이란 당초 발파회로 내에서만 흘러야 하는 전류가 각선이 벗겨지는 등의 원인으로 암반 중으로 누설됨으로써 일부 장약에 기폭전류가 부족하여 생기는 부분적인 불폭현상을 말한다. 불발은 불발 자체보다는 후속작업에서 불발 잔류약이 폭발하여 불의의 사고가 발생할 가능성이 있으므로 매우 위험하다.

본 연구의 대상현장에서는 철분을 다량 함유한 것으로 보이는 암석이 많이 관찰되어 발파 시에 전기뇌관 사용에 대한 안전성이 문제시 되고 있다. 따라서 본 연구의 수행과정에서는 (i) 전기뇌관을 사용한 발파에서 미주전류에 의한 조발의 발생 가능성과 (ii) 전기전도성이 높은 암반을 통해 발파전류가 누설됨에 따른 불발의 발생 가능성을 고찰하고, (iii) 현장에서 채취한 암석시료를 대상으로 전기비저항과 충전성을 측정함으로써 (iv) 당해현장에서 전기뇌관에 의한 발파의 안전성을 평가하였다.

2. 사용안전과 관련된 전기뇌관의 일반적 특성

2.1 미주전류와 전자기장

전기식 발파의 경우에는 일반적으로 발파장소에 전기뇌관을 가져오기 전에 현장에 미주전류가 있는지부터 점검하여야 한다. 전기뇌관을 사용하려는 발파자는 반드시 레이더나 라디오, 또는 TV 지시국이 주변에서 가동 중인지 점검하여야 하며, 만일 그런 시설이 있는 경우에는 그 영향을 알아내야 한다. 발파회로가 수신안테나로 작용한다면 이론적으로는 라디오 주파수 에너지는 조발을 일으키기에 충분하다. 통상 조발을 방지하기 위한 일반 규칙이나 사양, 법규 등이 정해져 있어야 하며, 이들 지침에는 다양한 규격의 전송

기들로부터의 벗어나야 하는 안전거리에 대한 규정이 정의되어야 한다(Persson 등, 1994).

전기뇌관을 사용하는 발파에서는 권고되는 안전거리가 있다. 이런 안전거리는 전기장이나 자기장과 관련하여 변전소나 고압선에 대한 내용도 있다. AC 송전선으로부터 유도된 전류를 통해 전기에너지가 발파회로 속으로 충분히 유입되면 우발적인 폭발이 일어날 수 있다. 고압 AC 전력선의 전기장은 발파회로를 고압으로 충전할 수 있으며, 충전된 발파회로는 용량성 방전(capacitive discharge)을 통해 뇌관에서 땅으로 스파크를 일으킬 수 있으며, 이로 인해 기폭이 일어난다.

2.2 회로저항과 분로균형

발파공에 대한 장약을 완료하고 나면 곧바로 기폭에 들어가지 말고 폭약 제조자가 추천하는 발파용 검류계(blasting galvanometer)를 가지고 각 뇌관의 저항을 점검하여야 한다. 직병렬 회로의 경우에는 분로균형(series balancing)을 이루도록 한다. 즉, 모든 분로(직렬회로)에 전류를 균등하게 배분하기 위해 각 분로의 저항을 일치시킴으로써 서로 균형을 이루도록 하여야 한다. 최종적으로는, 발파모선과 발파회로의 저항을 점검한다. 제조자는 뇌관, 연결선 및 발파모선의 명목 저항치(nominal resistance)를 보여주는 자료를 제공하여야 한다. 국내의 경우에는 통상 서로 다른 길이의 각선을 가진 뇌관들은 그 명목 저항치도 서로 다르게 기재되어 있다. 해외의 경우에는 뇌관들의 각선 길이가 서로 다름에도 불구하고 모두 동일한 명목 저항치를 가진 뇌관들로 공급되는 경우가 있다. 이것은 각 각선들이 서로 다른 금속합금으로 만들어져 있기 때문에 가능한 일이다. 장약 중에 각선의 피복이 벗겨져서 각선의 전선이 땅과 접촉하는 접지결함은 반드시 점검하여 미주전류의 유입 가능성을 차단한다. 이 점검 작업은 폭약 제조자가 추천하는 높은 저항치를 갖는 전압계를 사용하여 수행한다. 접지결함 시험을 실시하면 누설전류 시험을 실시할 필요는 없어진다.

2.3 누설전류

직렬 혹은 직병렬 회로를 사용할 때 전류의 누설은 어느 정도씩은 항상 일어나게 되어있다. 특히, 이 현상이 많이 일어나는 경우는 지반이 젖어 있을 때, 지반의 전도성이 좋을 때, 또는 ANFO와 같은 전도성 폭약류를 사용할 때이다. 전류의 누설은 기폭전류의 일부가 절연이 손상된 부위를 통해

땅으로 흘러나가 몇 개의 뇌관을 건너 뚫 다음에 어떤 다른 손상된 부위를 통해 되흘러들어오므로써 불발로 이어질 수 있다. 그러면 전류 누설로 인해 부분적으로 단락되어 충분한 기폭전류를 공급받지 못한 뇌관들에 의해 불발이 일어날 수 있게 된다. 전류 누설은 회로의 한쪽 끝과 접지가 좋은 부분(예를 들어, 젖은 땅 속에 박아 놓은 금속막대) 사이의 저항을 측정함으로써 점검할 수 있다.

전류누설 문제는 대부분은 각선의 절연이 불충분하거나 손상을 입어서 생긴다. 이런 문제는 수증 발파용이나 젖은 지반 또는 전도성 암반(자철석 같은) 발파용의 특수하면서도 강력한 절연뇌관(OD 뇌관)을 사용함으로써 피할 수 있다.

2.4 뇌우 및 낙뢰

뇌우는 번개방전을 일으켜서 매우 빠른 속도로 전기장을 변화시킬 수 있기 때문에 이로 인해 뇌관회로에 유도전류가 발생하면 의도치 않게 폭발이 일어날 수 있다. 그러므로 뇌우가 접근할 때에는 전기뇌관을 사용하는 모든 발파작업을 중단하고, 모든 인원을 위험지역 바깥의 안전한 장소로 소개시켜야 한다.

2.5 기폭전류 및 기폭전압

만일, 큰 기폭전류의 지속시간이 너무 길거나 기폭전압이 너무 높거나 하면 아크방전 장애가 일어나 뇌관이 의도한대로 기능하지 않을 수 있다. 아크방전은 전기절연이 불충분하거나 손상된 각선들 사이에서 일어날 수 있다. 뇌관의 내부 관체와 전교(bridge head) 사이에서 내부적인 아크방전이 일어나면 관체가 너무 일찍 파괴되며, 이것이 연시약의 기폭을 방해하게 된다. 또한, 기폭초시의 오류가 발생할 수 있으며, 이는 파쇄도를 나쁘게 하고, 과도한 비산과 큰 지반 진동을 야기할 수 있다. 그 외에 작업자 몸에 축적되는 정전기도 발파회로에 유입되면 위험할 수 있으므로 주의를 기울여야 한다.

3. 암석의 전기비저항 및 충전성 측정

3.1 실험개요

본 실험은 대상현장(그림 1)에서 채취한 금속광물을 수반하는 암석들의 금속함량에 따른 전기전도성을 평가하기 위하여 수행되었다. 일반적으로 암석은 전기전도도가 상당히 낮기 때문에 지구물리학에서는 전기전도도의 역수인 전기

비저항을 이용하여 암석의 전기전도성을 평가한다. 이러한 이유로 본 실험에서는 각 암석시료의 전기비저항 차이를 비교하였다.

그림 2(a)는 현장 시추코어로부터 채취한 5개의 암석시료이다. 이 암석들의 정확한 전기비저항 값을 획득하기 위해서는 외부에서 암석시료로 전류주입 시 암석 내 전류밀도가 균질하게 형성되어야 한다. 가우스 대칭성을 가지는 구형 내지 원통형의 시료는 균질한 전류밀도를 형성시킬 수 있기 때문에 그림 2(b)와 같이 암석시료를 원통형으로 가공하였다.

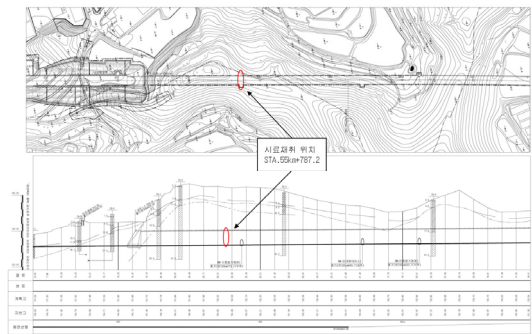
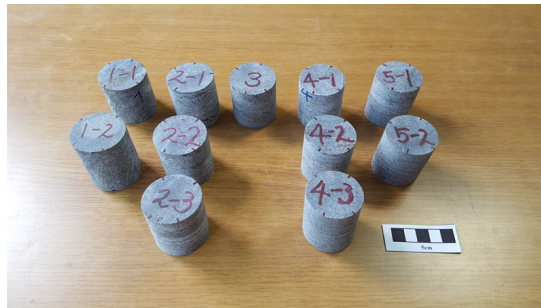


그림 1. 대상현장 도면 및 암석시료 채취 위치.



(a)



(b)

그림 2. 전기전도도 특성 평가용 암석시료: (a) 채취 코어 (b) 가공 시편.

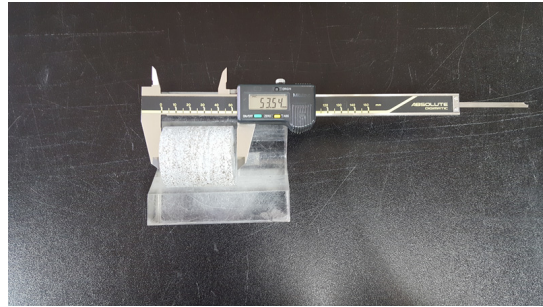
전기비저항은 식(1)과 같이 계산되며, 길이 및 단면적에 따른 영향과 무관한 재료 고유의 물성이지만 각각의 시료의 크기가 다르기 때문에 직접적인 비교를 위해 약 5 cm의 일정한 크기로 제한하였다. 육안관찰 결과 암석시료들은 대부분 운모류와 장석류로 이루어졌고, 편리가 발달한 것으로 보아 변성암으로 판단된다. 맥을 통해 유입된 것으로 판단되는 황철석 내지 자류철석이 확인되었고, 이 광물들은 상대적으로 자석에 달라붙기 때문에 자성을 가지는 자류철석으로 판단하였다. 이러한 황화금속 광물은 다른 시료에 비해 1번과 3번 시료에 상대적으로 풍부하게 함유되어 있다.

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (1)$$

위 식에서, ρ 는 암석의 전기비저항($\Omega \cdot m$), R 은 암석의 전기저항(Ω), A 는 암석시료의 단면적(cm^2), L 은 시료의 길이(cm)이다.

3.2 실험방법

위에서 언급한 바와 같이, 원통형으로 가공된 암석시료의 전기비저항을 평가하기 위해서는 각 시료의 길이와 단면적이 필요하기 때문에 그림 3(a)와 같이 전자식 캘리퍼스를 이용하여 길이와 단면적을 측정하였다. 전기비저항과 금속광물의 함량 간의 상관성을 파악하기 위해 그림 3(b)와 같이 휴대용 XRF 장치를 이용하여 각 시료의 금속성분의 함량 변화를 측정하였다. 휴대용 XRF 장치는 Thermo Scientific사의 NITON XL3t를 이용하였고, 초기에 장치의 캘리브레이션은 제조사에서 제공하는 기준재료(reference material)를 이용하여 수행하였다. 일반적으로 지하의 암석은 대부분 물로 채워져 있기 때문에 현장과 유사한 환경을 조성하기 위해 암석시료는 그림 3(c)의 강제포화 시스템을 통해 완전하게 물로 포화시켰다. 포화과정에서 사용된 물은 보통의 수돗물과 전기전도도 수준이 유사한 NaCl 0.001 M 수용액을 이용하였다. 포화된 암석시료의 전기비저항은 그림 3(d)의 장치인 GDD사의 SCIP tester으로 측정하였다. 이 장치는 전기비저항과 시간영역 유도분극의 충전성(chargeability)을 함께 동시에 측정하기 때문에 전기비저항 결과해석에서 충전성 자료를 함께 검토함으로써 황화금속 광물의 유무와 상대적인 함량을 파악할 수 있다.



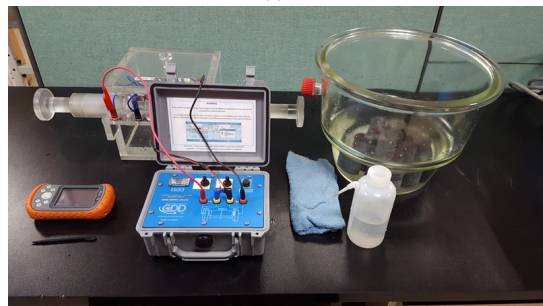
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3. 암석시료의 실험 물성측정 시스템을 이용한 전기비저항과 금속함량 자료취득 과정: (a) 전자식 캘리퍼스를 이용한 시료의 길이 및 직경 측정 (b) 휴대용 XRF 기기를 이용한 암석시료의 금속함량 자료 취득 (c) 진공펌프를 이용한 암석시료의 포화과정 (d) 포화된 시료의 전기비저항 측정.

표 1. 각 암석시료의 철 함량과 전기비저항 및 충전성 측정결과

Sample No.	Fe content (w%)						Resistivity (Ω m)	Chargeability (mV/V)
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th		
1-1	10.83	3.73	5.58	5.04	3.96	6.56	39	298
1-2	4.12	5.31	4.81	4.50	10.21	5.49	47	282
2-1	3.17	3.10	2.33	3.03	1.88	2.59	15,300	30
2-2	5.46	5.94	3.98	3.01	3.25	3.98	16,226	27
2-3	6.35	2.47	4.14	1.28	0.97	3.90	15,394	12
3	7.96	5.85	8.62	7.27	9.53	7.08	40	299
4-1	3.20	3.19	2.03	2.62	1.69	2.05	9,058	172
4-2	3.36	2.46	4.24	3.93	3.43	3.92	FS-over	FS-over
4-3	2.55	2.37	2.13	3.00	3.17	2.68	19,075	20
5-1	2.44	4.75	2.73	3.18	2.29	3.06	20,775	24
5-2	2.37	4.86	1.85	3.57	3.41	2.98	21,743	18

*FS-over: full scale over

3.3 실험결과

XRF 장치를 이용하여 암석시료의 여섯 지점을 측정한 결과, 대부분의 금속광물은 1 w% 이내였지만 표 1에서 제시한 바와 같이 금속광물 중에서 철의 함량이 가장 풍부하였다. 이는 육안관찰에서 확인된 황철석 내지 자류철석에 의한 결과로 판단된다. 육안관찰에서 황화금속 광물이 풍부하게 관찰된 1, 3번 시료는 최대 철 함량이 9 w% 이상으로 상당히 높았다. 이 시료들이 상대적으로 높은 황화금속 광물 함량을 나타내는 것은 낮은 전기비저항과 높은 충전성을 보이는 물성 측정결과와 잘 부합한다.

반면, 2, 4, 5번 시료는 상대적으로 높은 전기비저항 값을 보였고, 4-2번 시료의 경우에는 장치의 측정한계를 벗어나서 측정할 수 없었다. 이러한 결과는 시료들에서 황화금속 광물이 확인은 되었지만 산점 상으로 적은 양이 분포하고 있었기 때문인 것으로 판단된다. 4-1번의 시료의 경우 172 mV/V의 높은 충전성이 확인되었는데, 시료의 윗면에 황화금속 광물이 부분적으로 배태되어 있었기 때문으로 보인다.

3.4 실험결과 요약

본 실험에서는 암석 내 금속광물 함량에 따른 전기전도도 특성을 파악하기 위하여 현장에서 채취한 시료들을 대상으로 전기적 실내 물성실험을 수행했다. 그 결과 전기전도성이 좋은 황화금속 광물을 다량 수반하는 암석에서 낮은 전기비저항이 관찰되었고, 상대적으로 황화금속 광물의 양이 적은 암석에서 높은 전기비저항이 관찰되었다. 또한, 충전성 측정결과로부터 황화광물 함량의 상대적 추정이 가능하므로 만일 이러한 특성을 이용하여 현장탐사를 수행한다면 황

화금속 광물이 많은 지역을 찾아낼 수도 있을 것이다.

4. 사고사례 및 전기뇌관의 발화 가능성 검토

4.1 전기뇌관과 비전기뇌관의 일반적인 특성

뇌관은 폭약을 기폭시키는 도구로서 전기를 이용해서 기폭시키는 전기뇌관(electric detonator), 전기를 사용하지 않고 기폭시키는 비전기뇌관(non-electric detonator, NONEL), 전자 회로를 이용하여 기폭을 제어할 수 있는 전자뇌관(electronic detonator) 등이 개발되어 상용화 되어 있다.

전기뇌관은 비전기뇌관과 전자뇌관에 비해 비용이 저렴하지만 발파작업 시 외부 전기로 인해 의도하지 않게 기폭이 되어 불의의 대형 사고의 위험이 있다는 단점이 있다. 비전기뇌관은 상대적으로 비용이 고가이지만 전기뇌관에 대한 안전대책으로서 개발된 뇌관으로서 전기에너지를 사용하지 않기 때문에 전기뇌관에 비해 매우 안전하다. 가장 최근 개발된 전자뇌관은 외부에서 인가되는 전기에너지를 사용하지 않으며(뇌관 자체에 충전기 장착), 또한 뇌관 시차의 정밀성이 매우 우수하여 매우 고가이지만 안전뿐만 아니라 진동과 소음의 정밀 제어 등 특수한 효과가 요구될 때 주로 사용되고 있다.

4.2 전기뇌관 사용 시의 문제점과 사고사례

전기뇌관은 발파기로 전기에너지를 공급하여 기폭시키지만 외부 전기에 의해 의도하지 않은 기폭으로 조발사 사고가 발생할 수 있다. 전기뇌관을 이용한 발파작업 시에 발생 가능한 사고의 원인으로는 낙뢰, 미주전류(stray current), 정

전기(static electricity), 유도전류(induced current), 무선 주파수(radio frequency), 고압선(high voltage power line) 등이 있다. 미주전류는 누설전류라고도 하며, 의도한 회로 이외의 통로를 따라 흐르는 전류로서 전등이나 동력용 전원으로부터의 누전 등에 의해 주로 생긴다. 미주전류가 크면 전기뇌관이 발화될 수 있어 전기뇌관 사고의 원인이 된다. 정전기는 전하가 정지 상태에 있는 정적 상태의 전기를 말하며, 작업자의 몸이나 옷에도 전기가 조금씩 저장되어 있어 마찰을 통해 다른 물체로 쉽게 이동할 수 있기 때문에 전기뇌관을 취급할 때 사고의 원인이 될 수 있다. 유도전류는 자기장의 변화와 같은 외부 요인에 의해 도체 내부에 유도되는 전류이다. 전기뇌관에 인접한 고압선이나 라디오, 휴대폰으로부터의 무선주파수도 전기뇌관의 의도하지 않은 기폭사고의 원인으로 지적되고 있다.

우리나라의 경우, 경찰청과 총포·화약 안전기술 협회 자료의 1988년에서 1997년까지 10년간 발파사고 건수를 살펴 보면, 일본의 경우와 같이 발파사고의 원인으로는 비석 및 낙석에 의한 사고가 45.71%로써 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 그 다음이 장전 작업 중 주변화기(소각 중의 사고 포함), 누설전류, 낙뢰(8.57%) 등이었다(서승록, 이정훈, 2003). 비전기뇌관의 보급과 함께 뇌관에 의한 폭발 사고는 감소했지만, 서울 지하철 터널 공사(1993), 차령터널 및 영광1터널 공사(2000), 정선 석회석 광산(2005), 배후령 터널 공사(2009), 강남순환고속도로 터널 공사(2011) 등에서 발생한 폭발사고의 원인은 누전, 낙뢰 등으로 인한 전기 뇌관의 기폭사고로 보고되었다.

해외 사례로서 퀸즈랜드(Queensland) 주정부는 화약고에서 발파지점으로 옮기던 6개의 전기뇌관 중 하나가 기폭된 사고에 대해 미주전류, 정전기 등에 의해 기폭하기 쉬운 전기뇌관의 특성을 언급하면서 전원과 무선주파수로부터 완전히 차단할 것을 권고하였다(Dept. of Natural Resources & Mines, 2013).

캐나다 퀘벡 주정부 보고서에 의하면 발파기에 연결되어 있지 않은 전기뇌관의 기폭 사고에 대한 3건의 원인이 무선주파수와 정전기에 있는 것으로 분석된 바 있다(Explosives Risk Managers LLC, 2015).

4.3 뇌관 선정 및 전기발파 기술기준 검토

발파작업 시 안전을 위하여 각 국에서는 뇌관선정 지침과 전기뇌관 사용 시의 안전 대책 등을 마련하고 있다. 국내 화

약류 단속법에서는 전기발파 시의 낙뢰 및 정전기 위험에 적절히 대처할 수 있도록 몇 가지 규제조항을 제정하여 두고 있다. 몇 가지 관련조항을 예로 들면 다음과 같다.

- (i) 낙뢰의 위험이 있는 때에는 전기뇌관 및 전기도화선에 관계되는 작업을 하지 않도록 한다.
- (ii) 초유폭약 장전기는 장전작업 중에 발생하는 정전기가 소산할 수 있도록 땅에 닿게 한다.
- (iii) 발파장소에 누전이 있는 때에는 전기발파를 하지 아니한다.
- (iv) 전기뇌관을 운반하는 때에는 각선이 노출되지 않는 용기에 넣고, 그 밖의 전선이 노출된 전기기구를 지니거나 전등선, 동력선, 그 밖의 누전 염려가 있는 물건에 접근하지 않는다.
- (v) 발파모션을 부설할 때에는 전선, 충전부 그 밖의 정전기를 일으킬 염려가 많은 것으로부터 거리를 띄워서 부설한다.
- (vi) 전기발파기 및 건전지는 습기가 없는 장소에 둔다.

국내 국토교통부 터널표준시방서(2015)의 제4장 ‘굴착’ 편에 보면 발파 굴착 시 뇌관 사용과 관리를 위해 다음과 같은 지침들을 제시하고 있다.

- (i) 터널 발파 시 비전기식 뇌관 사용을 원칙으로 하며 전기식 뇌관을 사용할 경우에는 안전수칙을 사전에 수립하여 터널 내 발파로 인한 사고가 발생하지 않도록 해야 한다.
- (ii) 전기식 뇌관은 반드시 누설전류 탐지기, 도선연결 시험기, 다짐봉 등 소정의 기구류를 사용하여 점검하고, 순서에 따라 작업을 실시하여야 한다.
- (iii) 전기식 뇌관 사용 시 미주전류, 누설전류, 정전기의 유무 및 크기를 측정하여 안전여부를 확인하여야 한다.

미국 Reclamation Safety and Health Standards(2009) Section 24 ‘발파 작업’ 편에는 전기뇌관으로부터 30 m 이내에서는 핸드폰이나 휴대 라디오도 허용하지 않고 있으며, 이러한 통제가 어려울 경우 비전기뇌관을 사용하도록 규정하고 있다. 또한 폭약 장전 구역에 전기 전도체, 전기를 이용하는 장치를 금하고, 미주전류가 의심될 경우 전 지역을 철저히 점검하도록 하고, 미주전류의 제거가 어려울 경우 비전기뇌관을 사용하도록 규정하고 있다.

표 2. 암석의 전기비저항별 미주전류에 의한 뇌관의 발화전압 추정

암 석 시료번호	암석의 전기비저항 측정치 ($\Omega \cdot m$)	뇌관의 발화전류 가정치 (A)	뇌관의 발화전압 추정치 (암석길이 \times 외부전압) (m.V)
1-1	39	0.4	2
1-2	47	0.4	3
2-1	15300	0.4	974
2-2	16226	0.4	1033
2-3	15394	0.4	980
3	40	0.4	3
4-1	9058	0.4	577
4-3	19075	0.4	1214
5-1	20775	0.4	1323
5-2	21743	0.4	1384

버지니아주정부의 DMM Surface Blaster's Certification Study Guide에서는 미주전류와 같은 외부 전류가 0.05암페어 (50 밀리암페어)를 넘어설 때는 반드시 전류원을 찾아 제거한 후 전기뇌관을 사용하도록 되어 있고, 이것이 불가능할 경우 전기뇌관은 사용하지 못하며 비전기뇌관을 사용하도록 명기하고 있다(Department of Mines, Minerals And Energy, 2013). 또한 전류의 누설은 전기뇌관의 기폭 실패, 곧 불발을 일으킬 수 있으며, 암석의 전기전도도도 전류가 누설되는 양에 영향을 주는 주요 요인으로 작용할 수 있음을 지적하고 있다.

4.4 암반 특성과 뇌관 선정 문제

발파대상 암반의 특성은 적정 폭약류의 선정, 폭약의 양 및 발파패턴 설계에서 고려되어야 할 중요한 요소이다. 역학적 특성으로서 암반의 강도가 높으면 적정한 파쇄를 위해 높은 비장약량을 필요로 하며, 또한 지반진동 발생 등의 환경영향 요인을 제어하기 위해서 지발당 장약량을 적절히 유지하려면 많은 단차가 요구된다. 이러한 암반에서는 단차에 제약이 많은 전기뇌관보다는 다양한 단차 설계가 가능한 비전기식 뇌관의 사용이 유리하다.

전기전도도와 같은 암반의 물리적 특성 역시 뇌관 선정 시에 고려해야 할 요소이다. 전기전도도는 물질 내에서 전기가 잘 흐르는 정도를 나타내는 양으로서 전기비저항의 역수이다. 금속은 일반적으로 전기저항이 적어 전기전도도가 높다. 암석의 전기전도도는 전류 누설 양에 영향을 주는 주요 요인으로 알려져 있으며, 따라서 전기전도도가 높으면 전기

뇌관 사용 시 전류의 누설에 의한 기폭 실패의 위험성도 커진다(ISEE, 2011; Department of Mines, Minerals And Energy, 2013).

암반 내에 분포하는 불연속면의 구조적 특성은 발파 효과에 영향을 미치므로 발파 설계 시 절리의 발달상황이 고려되어야 하지만, 이와 함께 뇌관의 비정상적인 기폭에도 영향을 미치는 요인이 될 수 있음이 연구된 바 있다. 차령 터널, 배후령 터널 등 터널 공사 현장과 석회석 광산 발파현장에서 발생한 폭발사고들을 연구한 결과에 의하면, 낙뢰 전류나 기타 누설전류가 암반 중의 파쇄대에 유입되어 전기뇌관의 비정상적인 기폭사고를 일으킨 것으로 분석되었다(김진표, 2012). 이러한 연구결과는 전류 누설의 양에 영향을 미치는 주요 요인이 암반의 전기전도도와 같은 물성이므로 전기전도도가 높은 암반에서 전기뇌관의 기폭사고 위험은 더 높을 수밖에 없음을 보여준다. 따라서 그러한 조건에서는 발파 안전사고 예방을 위해서 전기뇌관의 사용을 피하는 것이 바람직하다.

표 2는 앞의 전기비저항 측정치를 바탕으로 대상현장에서 전기발파를 시행할 때 미주전류에 의해 뇌관이 불시에 기폭될 수 있는 발화전압을 구한 결과이다. 시료번호 1-1 및 1-2의 경우, 측정된 전기비저항이 각각 39 및 47 $\Omega \cdot m$ 로 매우 작으므로 뇌관의 발화전류를 0.4 A로 가정했을 때 미주전류가 흐르는 암석통로의 길이와 외부전압을 곱한 값이 2 및 3 m.V (단위: 미터 \times 볼트) 이상이 되면 뇌관이 폭발할 수 있다. 이는 황화금속을 포함한 암석통로 1 m를 통해 미주전류가 흐른다면 외부전압이 2 V만 인가되어도 뇌관이 기

폭될 수 있음을 의미한다. 이에 반해, 보통 암석인 시료번호 2-1 내지 2-3의 경우에는 전기비저항이 약 15000 $\Omega \cdot m$ 로 매우 크므로 암석 1 m를 통해 미주전류가 흘러 뇌관이 기폭되기 위해서는 약 1000 V의 외부전압이 인가되어야 한다. 이상은 발파가 이루어지는 장소에 전기비저항이 매우 낮은 암석(특히, 절리나 편리는 전기의 통로가 될 수 있음)이 있을 경우에는 낮은 발화전압에도 불시에 뇌관이 폭발할 수 있음을 명확하게 보여주는 결과라 할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 서해선 복선전철 건설공사 현장의 암석에 대한 전기비저항 및 충전성 측정을 통해 대상현장에서 전기뇌관을 사용한 발파를 수행할 때 미주전류로 인한 조발 및 불발의 가능성을 검토할 목적으로 수행되었다.

대상현장에서 채취한 암석시료를 대상으로 전기비저항(전기전도도의 역수)과 충전성을 측정한 결과, 대상암석은 황화금속 광물을 함유한 황철석 내지 자류철석으로 분석되었으며, 황화금속 광물의 함량이 많은 암석에서는 전기비저항 값이 39~47 $\Omega \cdot m$ 로 여타의 암석에서의 15000~21000 $\Omega \cdot m$ 에 비해 매우 낮게 나타났다. 즉, 황화금속 광물의 함량이 많은 암석에서는 매우 높은 전기전도도가 관찰되었다. 또한, 전기비저항이 낮은 시료, 즉 전기전도도가 높은 시료에서는 충전성도 10배 이상 높게 나타남으로써 전기비저항 시험치가 신뢰할 수 있는 결과임을 확인할 수 있었다. 특히, 전기비저항이 39 $\Omega \cdot m$ 인 암석의 경우, 뇌관의 발화전류를 0.4 A로 가정했을 때 암석 1 m를 통해 미주전류가 흐른다면 외부전압이 2 V만 인가되어도 뇌관이 기폭될 수 있는 것으로 나타났다.

통상 전기식 발파의 경우에는 인근의 전기장치, 뇌우나 낙뢰, 정전기 등의 여러 요인에 의해 미주전류가 발생할 수 있으며, 이런 미주전류는 예기치 못한 조발사고를 일으킬 수 있다. 또한, 암반의 전기전도성이 높은 경우에는 발파회로로부터 전류가 누설되어 불발사고가 발생할 가능성도 높

아진다. 본 연구의 대상현장의 경우에는 전기전도도가 매우 높은 황철석 내지 자류철석이 많이 분포하는 바, 전기발파로 인한 안전사고를 예방하기 위해서는 당해현장에서 전기뇌관의 사용을 피하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

감사의 말

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 ‘심부 지오시스템 특성 평가기술 개발(과제코드 GP2015-010)’의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 국토교통부, 2015, 터널표준시방서.
2. 김진표, 2012, 암반 파쇄대로 유입된 낙뢰 전류에 의한 산업 안전사고에 대한 연구, 국립과학수사연구원, p. 92.
3. 서승록, 이정훈, 2003, 화약류 발파사고원인의 AHP 기법에 의한 분석, 산업안전학회지, Vol. 18, No. 3, pp. 120-125.
4. Department of Mines, Minerals, and Energy, 2013, DMM Surface Blaster's Certification Study Guide Section 2-Hazard Recognition In Blasting, Commonwealth of Virginia.
5. Dept. of Natural Resources and Mines, 2013, Unintended initiation of electric detonator, Explosives safety alert no.65 version1, Queensland Government.
6. Explosives Risk Managers LLC, 2015, Reports of Premature Initiation of Electric Detonators by Radio Frequency Energy, Province of Quebec Seismic Blasting Accident.
7. The Ontario Ministry of Labour Mining Health & Safety, 1984, Health and Safety Guideline RS 151, "Stray Current Hazards Associated with Electric Blasting Caps", September 1984.
8. ISEE, 2011, ISEE Blaster's Handbook, 18th edition, ISEE, p. 1030.
9. Persson, P.A., Holmberg, R. and Lee, J., 1994, Rock Blasting and Explosives Engineering. CRC Press, USA.
10. US Bureau of Reclamation, 2009, Reclamation Safety and Health Standards, Section 24 Blasting Operations, US Department of the Interior, USA, pp. 24-1-24-15.



최 병 희

한국지질자원연구원 전략기술연구본부
책임연구원

Tel: 042-868-3237
E-mail: bhchoi@kigam.re.kr



류 창 하

한국지질자원연구원 전략기술연구본부
책임연구원

Tel: 042-868-3236
E-mail: cryu@kigam.re.kr



신 승 욱

한국지질자원연구원 박사후연수자

Tel: 042-868-3922
E-mail: sw.shin@kongju.ac.kr



김 수 로

한국광해관리공단 선임연구원

Tel: 033-902-6733
E-mail: kimsoolo@mireco.or.kr