

## 발파에 의한 심형기초(深礎杭)의 굴착 시공 사례 연구 A Case Study of Blast Excavation for a Deep Foundation of a Power Transmission Tower

이 송<sup>1)</sup>, Song Lee, 이재현<sup>2)</sup>, Jae-Hyun Lee, 김용진<sup>3)</sup>, Yong-Jin Kim, 임대규<sup>4)</sup>, Dae-Kyu Lim,  
이우진<sup>5)</sup>, Woo-Jin Lee

<sup>1)</sup> 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. Of Civil Engineering, The Univ. of Seoul

<sup>2)</sup> 평원 ENG 대표이사, President Director, Pyoung-Won ENG.

<sup>3)</sup> (주)다산컨설팅트 전무이사, Senior Managing Director, Da-San consultant Co. Ltd.

<sup>4)</sup> 대영 발파 ENG 대표이사, President Director, Dae-young ENG.

<sup>5)</sup> 고려대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. Of Civil Engineering, Korea Univ.

**SYNOPSIS** : In this study, an experimental programme was performed to improve drilling and blasting efficiency. Case study in geologically different strata place showed that a new blasting pattern with different explosive charges and construct procedures to guard a blasted slope should be needed

**Keyword** : blast excavation, deep foundation, power transmission tower

### 1. 서론

최근 급격히 증가하는 전력수요의 충족과 그 수송효율의 극대화를 위해 신규로 설치되는 송전선로에 대해서는 기존의 최고 송전 전압인 345kV를 765kV로 승압시켜 공사가 진행 중에 있다. 현재 진행 중인 765kV 초고압 송전선로 건설사업은 충남 당진에서 시작하여 경기도 양평과 가평 및 강원도 태백을 잇는 총 360km의 대규모 프로젝트이며, 대부분의 송전탑의 위치가 산악지대를 횡단하게 된다. 산악지역에 건설되는 송전탑의 기초는 대형 장비의 반입에 어려움이 있고 지반의 대부분이 암반으로 이루어져 발파에 의한 기초의 굴착 시공이 도입되었다. 심형기초의(深礎杭) 시공은 발파에 의해 1.0m 정도 굴착한 후 두께 5cm, 폭50cm의 원형(圓形) 라이너 플레이트(Liner plate)를 공벽내에 설치하는 일련의 반복작업을 통하여 일정 심도까지 굴착하여 암반의 상태를 확인한 후 철근을 조립, 콘크리트를 타설하므로써 현장타설 말뚝형태의 기초를 형성하는 신공법이다.

주 공정이 발파에 의해 이루어지는 본 시공방법은 단계별 발파작업의 물리적 충격에 의한 주변 암반의 이완과, 이로 인한 암편의 붕락(Fall) 등이 시공상 예측되는 문제점으로 지적되고 있어, 본 연구에서는 발파에 의한 주변암반의 거동 및 손상을 최소화 할 수 있는 발파패턴, 현행 발파굴착에 의한 심형기초(深礎杭)공법의 문제점 및 개선사항 등에 대하여 제안하였다.

### 2. 현장 지질조사

본 조사지역은 강원도 태백, 영월, 삼척, 정선 및 평창지역으로 조사에 의하면, 하부 고생대층과 하부 고생대층이 널리 분포하고 있으며, 이 지역의 석회암층은 층리(Bedding plane)가 잘 발달된 회색 내지

청회색의 석회암으로 구성되며, 담회색 석회암과 암회색 백운석(Dolomite)이 협재되어 있는 복잡한 지질 구조를 나타내고 있다.

이 지역 지반의 지질적 특성으로는 층리(Bedding plane)가 조산운동에 의해 습곡을 이루고 있으며, 지층이 경사구조를 이루고 있다는 점이다. 또한 절리(Joint)가 발달되어 있으며, 오랜 기간 침입수에 의한 화학적 작용으로 지층내에 공동(Cavity)을 형성하고 있으며 이 공동에는 자연함수비가 높은 점토를 함유하고 있다. 그림 1은 절리면에 고함수비의 점토가 Gouge형태로 존재하는 것을 보여주고 있으며, 그림 2는 조사된 절리군의 평사투영 결과의 일부를 제시하고 있다.

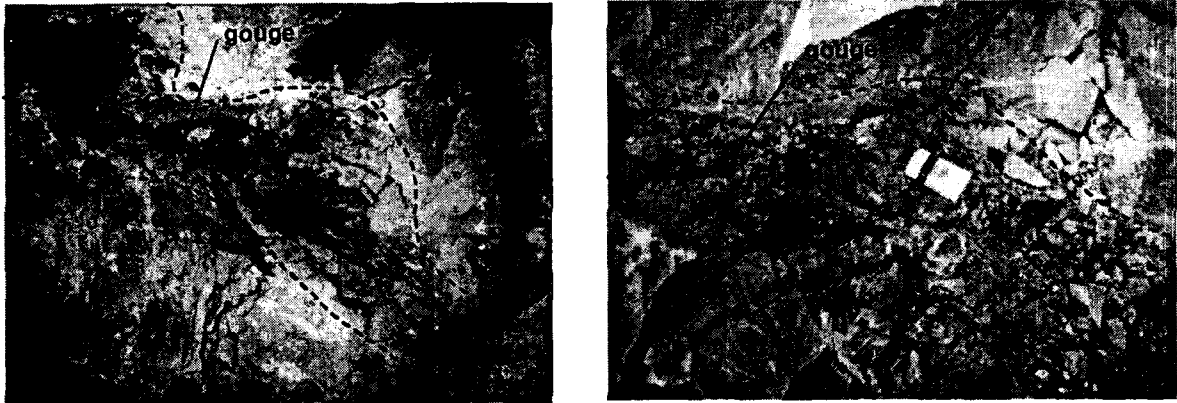


그림 1. 절리면의 충전물질(gouge)

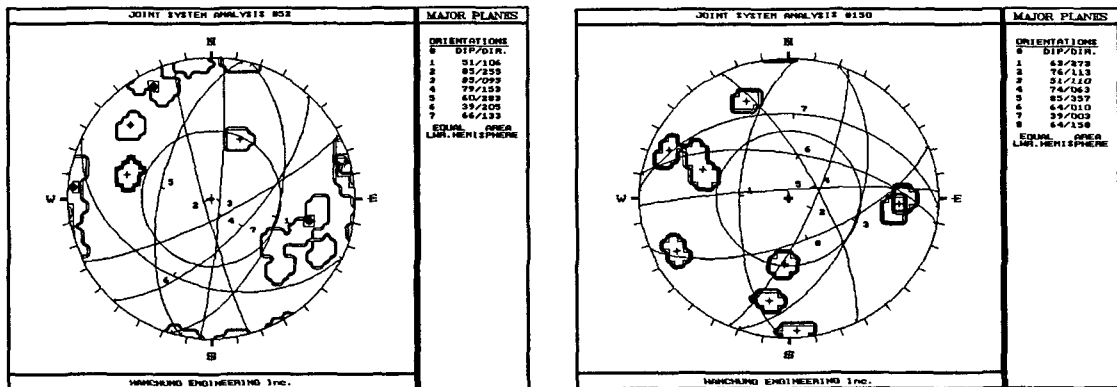


그림 2. 조사된 절리군의 평사투영 결과

수행된 조사결과를 종합하면, 절리군은 평면파괴 영역 및 쉐기파괴 영역에 공히 분포하고 있으며, 심초기초 굴착시 굴착공간의 안정을 유지하는데 불리한 지질구조를 형성하고 있는 것으로 평가되었다.

### 3. 시험발파 및 진동측정

선정된 철담기초(#52)현장을 대상으로 발파공의 배치, 천공수, 천공방향과 깊이, 뇌관의 종류 및 수량, 지반조건 등을 변화시킨 발파패턴에 의해, 5회의 시험발파를 수행하였으며, 이에 따른 여굴량 및 작업 시공성, 진동의 크기 및 영향 정도등을 평가하였다.

#### 3.1 여굴량과 굴착량의 측정

발파패턴 변화에 따른 시험발파 후, 측정된 여굴량과 발파굴착량의 측정결과 및 평가는 다음 표 1과 같다. 시험결과에 의하면 발파패턴의 변화에 의한 여굴량의 차이는 적었으며, 여굴량은 일반적으로 15cm 내외로 측정되었다. TEST#4의 경우 상대적으로 풍화정도가 심하고 절리사이에 충전물(Gouge)이 발달된 지반조건에 영향을 다소 큰 여굴량을 나타낸 것으로 평가되었다.

구 분		TEST #1	TEST #2	TEST #3	TEST #4	TEST #5	
시험 위치		철탑 #52(A)	철탑 #52(A)	철탑 #52(A)	철탑 #52(B)	철탑 #52(D)	
암 종		석 회 암(Limestone)					
발 파 체 원	천공깊이	m	1.2/1.0	1.0/0.75	1.5/1.0	1.5/1.3	1.5/1.3
	(외곽공) 저항선	m	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6
	(외곽공) 공간격	m	0.43	0.5	0.48	0.52	0.52
	(전체) 천공수	공	42	42	40	39	39
	외곽공 갯수	공	22	19	20	18	18
	폭약량	kg/회	14.000	11.125	9.750	15.063	15.063
	사용 뇌관		순발~MS2	순발~MS9	순발~LP6	순발~MS5	순발~MS5
	기폭시차	ms	20	20	200	40	40
	기폭단수	delay	3	10	4	3	3
	외곽공 장약량	kg/공	0.25	0.25	0.225	0.375	0.375
	굴착면적	m <sup>2</sup>	7.07	7.07	7.07	7.07	7.07
	발파당 파쇄량	m <sup>3</sup>	7.07	5.30	7.07	9.19	9.19
	단위 천공장	m/m <sup>3</sup>	7.13	7.92	8.49	6.36	6.36
	단위 장약량	kg/m <sup>3</sup>	1.98	2.10	1.38	1.640	1.640
	심배기 형태		ring drill	No cut round	V-cut	No cut round	No cut round
	공간격/ 저항선	%	72	100	80	87	87
굴착장	m	1.33	1.48	1.10	0.98	1.25	
발파여굴	m	0.11	0.18	0.13	0.28	0.15	
작업 후 평가		부분적으로 내공 단면 부족 일부 측면에는 여유 굴착됨 Half casting 은 미 발견	내공단면이 부족한 상태로의 2차 발파 극심한 비산석으로 L.P 파손 부분적 여굴발생	외곽공의 정밀 폭약 사용 굴착율(1.5/1.0)이 저조함 부분적 여굴 발생	내공단면 양호 여유굴착 발생 굴착율(1.5/1.3) 파쇄입도 양호	내공단면 양호 여유굴착 발생 굴착율(1.5/1.3) 파쇄입도 양호	

※ 시험발파의 개요 강원도 정선군 사북읍 철탑번호 52번을 대상으로 실시. A각은 경암에 속하고 B, D각은 연암~준경암석에 속함. Test #3은 조사 목적상 약장약 발파 실시 및 정밀폭약과 도폭선을 사용.

표 1. 시험발파 pattern 및 발파에 대한 평가

### 3.2 진동측정 결과 및 평가

발파진동이 기초 굴착면 암반의 낙석 및 붕락에 미치는 영향을 평가하기 위해서 발파원으로 부터 거리별 진동을 측정하였다. 그림 3은 진동 측정 Geophone의 설치 위치를 나타내고 있다.

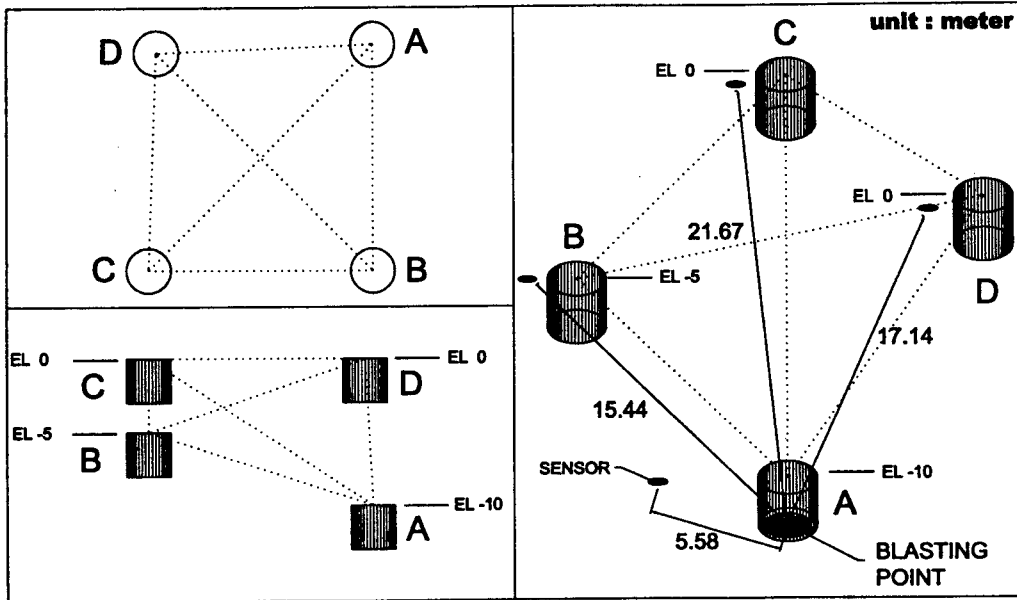


그림 3. 진동 측정 Geophone의 설치위치

시험발파시 측정된 18개의 자료로서 회귀분석을 실시하여 그림 4와 같은 결과를 얻었으며 이를 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$V = 31.3(S.D)^{-0.9701} \quad (1)$$

여기서,  $V$  ; 최대 입자진동속도(PPV) [cm/sec]  
 $S.D$  ; 환산거리(Scaled distance) [ $m \cdot kg^{1/3}$ ]

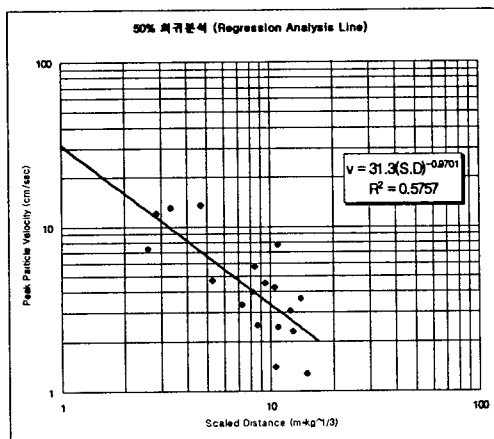


그림 4. 시험발파에 의한 지반진동 회귀 분석 결과

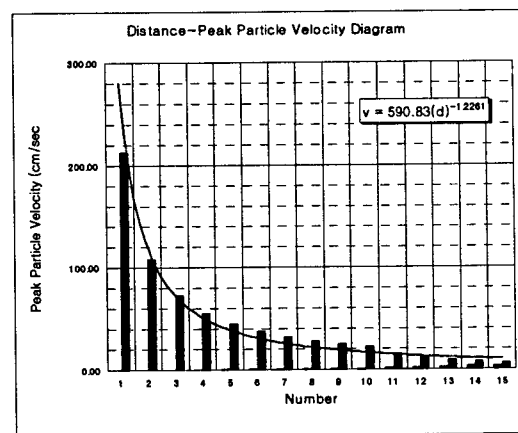


그림 5. 폭원과 거리의 변화에 따른 추정 진동수준

최외곽공은 동시에 기폭시키는 방법을 적용하므로 지발당 장약량 산정시 외곽공수 × 1공당 장약량을 적용하여야 하지만, 굴착 배면으로 향하는 지반진동이 방사상으로 전파되는 특성을 고려하여 1공당 장약량을 지발당 장약량으로 하여 거리의 변화에 따르는 배면 암반에 발생하는 지반진동의 크기를 계산하였으며 그 결과는 위의 그림 5와 같다.

### 3.3 진동에 의한 영향평가

발파진동에 의한 구조물의 피해상황은 여러 학자들에 의해 발표되었고 계속적으로 연구되고 있는 분야이다. 그중 신뢰성이 높은 것으로 평가된 Langerors & Kihlstrom의 연구결과를 기준으로 발파진동에 의한 영향을 평가하였다. 표 2는 Langerors & Kihlstrom의 연구결과를 요약한 것이다.

표 2의 기준을 현장에서 측정된 “거리에 따른 지반진동수준”에 적용하여 철탑 기초의 굴착면에 발생 가능한 피해 분석을 실시하였다. 피해의 기준은 「라이닝을 하지 않은 터널에서 낙석이 발생」 하는 수준인 30.5 cm/sec를 설정하였다. 즉, 진동속도가 30.5cm/sec 이상이 되는 곳에서는 암반이 발파진동에 영향을 크게 받는 것으로 판단할 수 있다.

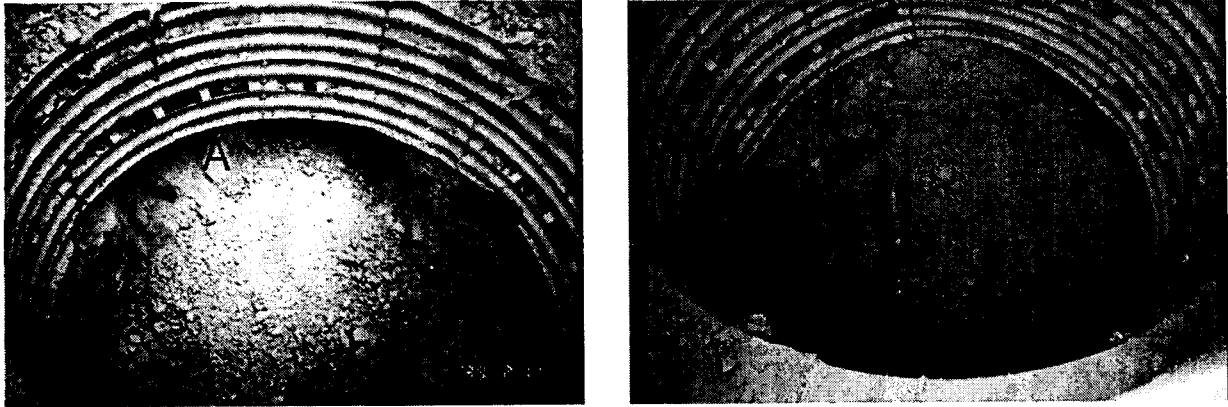
제시된 표 3에서 알 수 있듯이, 발파 굴착에 의한 낙석의 가능성이 있는 영향범위는 굴착 벽면 0.7m 까지 이며, 기초굴착을 위해 연속적으로 단계별 발파가 수행되는 공법 특성상, 발파진동이 굴착상부의 추가적인 낙석을 발생시킬 수 있다고 판단된다. 특히 그림 6과 같이 굴착면과 Liner plate 사이에 공간이 형성되어 있는 경우에는 추가적인 낙석발생 가능성이 매우 높은 것으로 평가되었다.

진동변위속도	피해양상
5.1 cm/sec	진동속도를 이 값 이하로 제한할 경우 보통 건물 심지어 오래된 건물이라 하더라도 피해 위험이 매우 작다(5% 이하).
12.7 cm/sec	경미한 피해, 미장벽체에 균열, 거주민의 불편이 크다.
30.5 cm/sec	라이닝을 하지 않은 터널의 경우 낙석이 발생함.
63.5 cm/sec	암반에 균열발생.
254.0 cm/sec	암반이 파괴됨.

표 2. 진동속도에 따른 구조물의 피해양상

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
거리(m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
진동(cm/sec)	212.8	108.6	73.3	55.4	44.7	37.4	32.2	28.3	25.3	22.8	15.4	11.6	9.4	7.9	6.8
거리/공경	2.63	5.26	7.89	10.53	13.16	15.79	18.42	21.05	23.68	26.32	39.47	52.63	65.79	78.95	92.11
비 고	피해 발생 가능 영역							피해 미발생 가능 영역							

표 3. 피해 가능 영역



(a) A지점에서 Liner plate 후방에서의 추가붕락발생(1차 발파 후, 왼쪽)  
 (b) Liner plate 후방에서의 추가 붕락발생(2차 발파 후, 오른쪽)

그림 6. Liner plate와 굴착면 사이의 공간

#### 4. 현행 발파굴착의 문제점 및 개선사항

##### 4.1 발파작업시의 확천량(Look-out)

터널의 경우 천공작업시 외곽공(천반공, 측벽공과 바닥공)은 작업 여건, 설계단면 및 작업공간의 확보를 위해 그림 7에서와 같이 터널단면 외측으로 천공하여야 하며, 이를 “Look-out” 이라 한다. 이러한 의도적 “Look-out”은 작업진행상 필연적으로 발생하며 여굴을 발생시키는 주요 원인중의 하나이다. 만약 “Look-out”을 고려하지 않을 경우 단계별 굴착이 진행됨에 따라 내공단면(內空斷面)이 축소되어 결국, 설계에서 요구하는 제원의 공간을 확보할 수 없다.

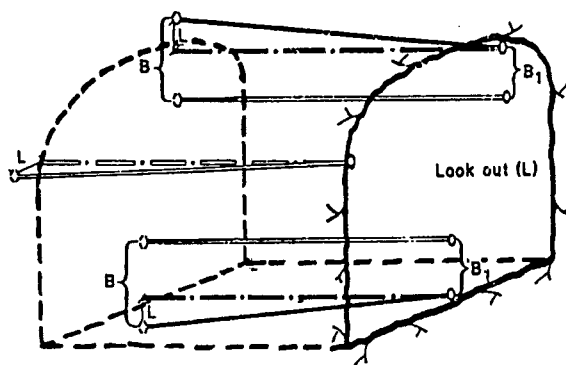


그림 7. 터널에서 외곽공 천공시 고려되는 확천량(Look-out)

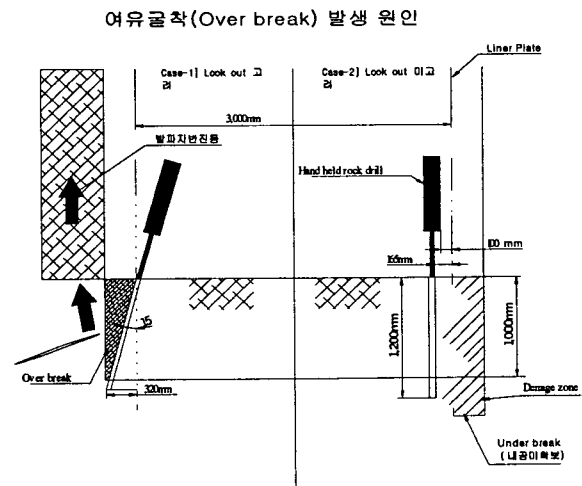


그림 8. Look out을 고려시의 문제점

그림 8은 심형기초 굴착시의 천공기 작업여건을 재현한 그림이다. 연직방향으로 굴착하는 심형기초 굴착시에는 천공면과 작업발판이 동일하고 작업발판에서 이격해서 천공이 불가능하며, 측벽의 영향 및 착암 보조기구(지지다리 ; Pipe leg)의 사용도 제한을 받게 된다. 또한 발파에 의한 버력처리 직후에 공벽내에 Liner plate가 설치되므로 단계별 굴착을 위한 차기 천공작업시 작업공간의 확보가 어려워

확천량(Look-out)이 터널의 경우보다는 증가하게 된다. 그러므로 본 공법의 여굴량 산정시, 발파에 의한 여굴(余掘 ; Back break)과 더불어 천공작업상 불가피하게 발생하는 확천량(Look-out)의 영향을 고려하는 것이 합리적이라 판단된다.

## 4.2 발파 굴착면의 보강

터널의 경우 발파에 의한 굴착 직후 굴착면은 Shotcrete와 Rock bolt 등에 의해 신속히 보강되어 이완영역의 확장 및 암반 불연속면의 활동이나 붕락을 방지하여 터널의 안정성을 확보하고 있다. 그러나 본 연구대상인 심형기초 굴착의 경우 비록 정밀한 천공과 암반의 Damage zone을 감소시키는 제어 발파가 수행되었다 하더라도 터널과 같이 적절한 지보시스템(Shotcrete, Steel rib 및 Rock bolt 등)이 수행되지 않은 상황에서 굴착면의 직하부에서 연속적인 발파가 이루어지므로, 이로 인한 진동의 영향에 의해 Damage zone의 확장과 추가적인 낙석·붕락은 불가피한 상황이다.

## 4.3 발파패턴의 획일적인 적용

기초굴착시 효율적인 발파를 수행하기 위해서는 현장의 암중, 암반 불연속면(절리, 단층, 파쇄대 등)의 특성, 굴착 진행에 따른 굴착면 조사 등을 활용한 적절한 발파패턴의 변화가 요구되나 실제 현장의 경우, 획일적인 표준패턴의 적용에 따른 여굴량의 증가 및 추가적 암반의 붕락, 기초의 안정성 저해 등의 문제점을 내포하고 있다..

## 5. 결론

1. 발파에 의한 심초기초의 굴착은 암반의 종류, 불연속면(절리, 단층 등)의 특성, 충전물질(Gouge) 및 공동(Cavity)의 유무 등의 자연적 요인과 발파패턴, 시공법 등의 인위적 요인이 굴착 종료후, 발파시의 여굴과 더불어 단계별 발파진동에 의한 암반의 낙석, 붕락을 포함한 전체 확공량을 지배하는 주요인자가 된다.
2. 시험발파시의 진동측정 데이터를 Langerors & Kihlstrom가 제안한 도표에 의하여 분석한 결과, 발파에 의해 낙석이 우려되는 영역은 굴착면으로 부터 약 70cm까지의 범위이며, 굴착면 보강 또는 지보재가 설치되지 않는 경우에는 추가발파로 인한 굴착면 주변암반의 활동 및 붕락 등에 의해 그 영역은 확장될 수 있다.
3. 발파패턴을 4가지로 변화시켜 시험발파를 실시하여 여굴량을 분석한 결과, 발파패턴 변화에 따른 여굴량의 차이는 적었으며, 여굴량은 일반적으로 15cm 내외로 측정되었다. 그러나 여굴량과 단계별 발파진동에 의한 암반의 낙석, 붕락을 포함한 전체 확공량은 시험현장에 따라 상이하였다. 이는 기초 굴착시의 발파에 의한 여굴 및 추가적 암반의 붕락의 영향으로 판단되며, 전체 확공량은 발파패턴 자체의 영향보다는 불연속면의 특성 및 지층구조, 단계별 굴착에 의한 발파 진동의 영향이 지배적임을 알 수 있다. 따라서 진동을 경감할 수 있는 발파패턴이 효과적이라 할 수 있다.
4. 현행 심초기초(深礎杭)공법의 경우 발파작업시의 확천량(Look-out), 발파굴착면의 보강 미비, 획일적 발파패턴의 적용 등에 의해 여굴량 증가 및 진동에 의한 암반의 추가 붕락이 문제점으로 지적되었다. 이러한 문제점을 현실적으로 해결하기는 매우 어려운 상황이며, 천공장비 및 Liner plate 등의 개량, 암의 종류 및 불연속면을 고려한 표준패턴도의 제정, 간편한 굴착면 보강공법 등의 종합적 개선에 의해

여굴량을 최소화시키려는 의지가 필요하며, 궁극적으로 보다 효율적이고 합리적인 신평법에 대한 지속적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 7. 참고문헌

1. Atlas Powder Company, (1987), "Explosives and Rock Blasting"
2. Goodman, R.E. (1989), "Introduction to Rock Mechanics", John Wiley and Sons
3. Hoek, E., Bray, J.W. (1981), "Rock Slope Engineering", Institution of Mining and Metallurgy
4. Hoek, E., Brown, E.T. (1980), "Underground Excavation in Rock", Institution of Mining and Metallurgy
5. Hoek, E., Diederichs, M. (1989), "Dips : Program Manual", Rock Engineering Group, University of Toronto
6. Johansson, C. (1996), "General Information on Explosives", Nitro Nobel
7. Larsson, B. (1996), "The Role of Correct Interval Time in Rock Blasting"
7. Olsson, M. (1997), "Smooth Blasting Technique : How to Minimize Damage of the Remaining Rock", SteBeFo
8. Olofsson, Stig O. (1995) "Applied Explosives Technology for Construction and Mining", Nitro Nobel
9. Priest, S.D. (1993), "Discontinuity Analysis for Rock Engineering", Chapman & Hall
10. Wyllie, D.C. (1992), "Foundations on Rock", E & FN SPON
11. 梁亭植 (1995) "발파진동학", 구미서관
12. 한국도로공사(1995), "고속도로 터널설계 실무 자료집".