

우물통기조해체시험결과보고

On the Test Blasting of Bridge pier foundation Works

池 浩 榮* (Ji, Ho Young)

許 埴** (Huh, Ginn)

1. 개 요

- 일 시 : 1997년 7월 24일, 8월 1일
- 장 소 : 광진교 우물통 4번 교각(광장동 방향)

- 환경공해(소음, 진동 등) 측정 및 예측치의 확인
- 대상구조물에 적합한 본 설계 Pattern의 선정
- 정략적인 공정 습득을 통한 공사 효율의 증대
- 파쇄효율 및 환경 영향성의 종합평가를 통한 안전성, 효율성의 극대화 도모

2. 목 적

본 구조물 해체공사는 광진교 확장공사의 일환으로 해체 대상 구조물이 위치하고 있는 특성상 안전성 및 경제성 등을 고려하여, 대상 구조물을 효율적으로 해체하기 위하여, 시험발파를 통해 다음과 같이 종합적으로 평가 분석하여 발파 시공의 표준 Pattern을 산출하는 데 있다.

- 파쇄계수 산정을 통한 적정 장약량 산출

3. 해체 대상 구조물

: W₄ 중력식 R, C 구조물(타원형 우물통 및 6각 기초)

4. 적용 공법

: 진동 제어 발파 공법에 의한 다단기폭

5. 시험발파 PATTERN

- 계 획

구 분	천공장 (m)	공간격 (m)	저항선 (m)	발파당 공 수	장 약 량		
					Kg/Hole	Kg/Delay	Kg/Round
1	9.4	1.1	1.1	30	4.00~5.85	4.0	147.75
2	9.4	1.1	1.1	30	4.00~5.85	4.0	147.75
3	9.4	1.1	1.1	41	4.00~5.58	4.0	212.65
계				101			508.15

* 試驗者 : 화약류관리기술사
 ** 監督者 : 화약류관리기술사, 工博(서울市諮問委員)

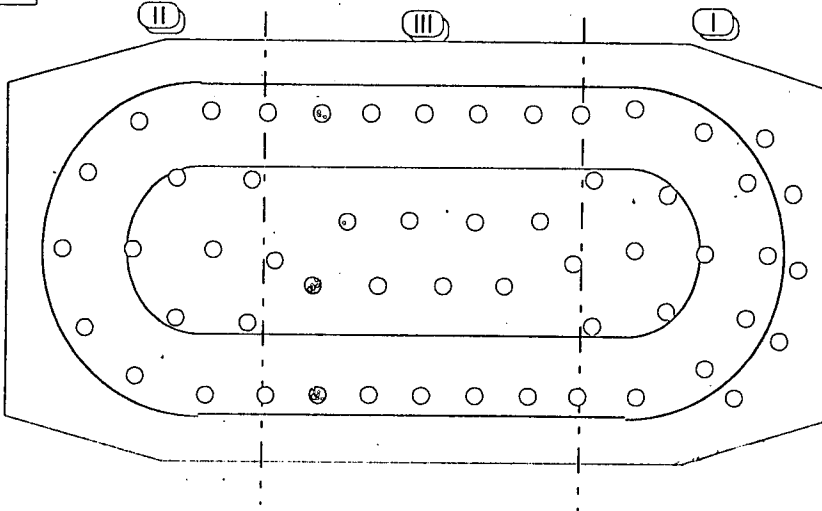
- 시 행

구 분	천공장 (m)	공간격 (m)	저항선 (m)	발파당 공 수	장 약 량		
					Kg/Hole	Kg/Delay	Kg/Round
1	9.4	1.1	1.1	20	1.00~4.0	4.0	77.25
2	9.4	1.1	1.1	15	2.25~6.0	3.0	72.75
3	9.4	1.1	1.1	16	3.00~6.0	4.25	62.00
계				51			242.0

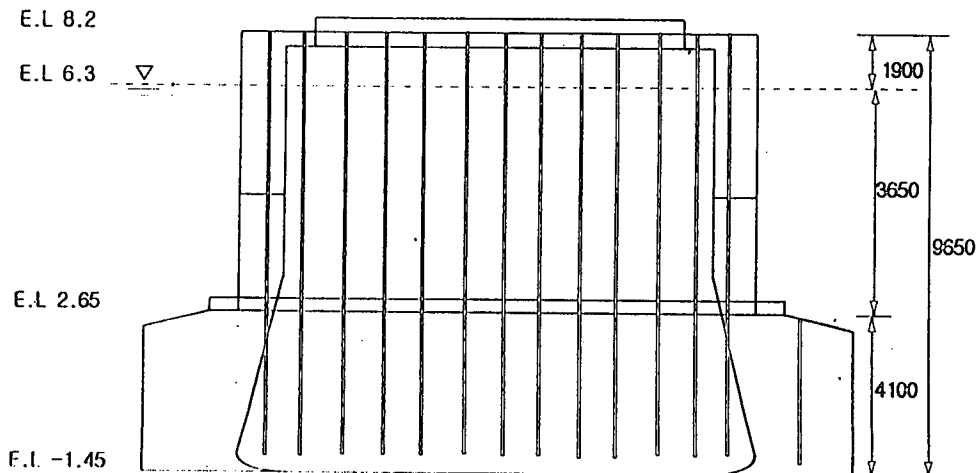
(1) 천공 현황도

- 시행 도면

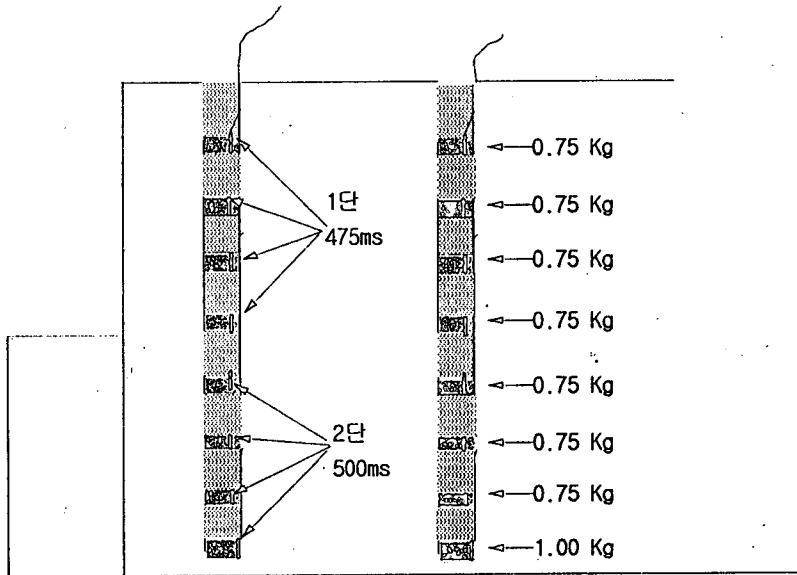
평면도



단면도



(2) 장약 주상도



*주: 콘크리트 구조 특성에 따라 각공의 주상도를 작성 수정 보완 하였음.

6. 수행방법

(1) 천 공

천공은 폭발의 효과에 큰 영향을 미치게 되며 특히 장공발파의 경우 그 영향은 더욱 크게 된다. 또한 본 구조물은 한정된 단면을 가지므로 천공작업의 검토가 필요하였다.

① 천공작업은 크롤러 드릴을 사용하여 천공을 실시하였다.

② 천공각도의 편차에 따라 폭발효과에 큰 영향을 미치게 되므로 천공의 정확을 기하기 위하여 천공작업시에는 Guide Pipe를 설치하여 기계의 수직도를 유지하였고, 천공직경을 $\phi 75\text{mm}$ 로 하였다.(참조: 부록 3. 공사 및 계측사진 19)

③ 천공 작업시 구조물 내에 위치한 철근으로 인하여 천공작업이 불가능하여 Rotary Boring Machine을 사용하여 철근을 절삭한 후 천공을 실시하였다.

④ 천공후 구조물의 노후화에 따른 공내 함몰 및 구조물 하부에 공동이 발생되어 Pipe를 삽입

하여 공을 유지하였으며, 총 80공 천공중 장약 유효공은 57공이었다.

⑤ 천공작업시 각 Hole에 대하여 철근위치 및 공동부위, 콘크리트 연약부위 및 균열부 등을 명시한 주상도를 작성하였다.

(2) 장 약

본 구조물의 경우 하부에 노후화에 따른 균열 및 파쇄가 심하여 공내 함몰과 수공에 따른 장약 작업이 원활하지 못하고, 철근으로 인한 공내 걸림과 등이 발생할 수 있으므로 천공 직경 $\phi 75\text{mm}$ 로 하여, $\phi 65\text{mm}$ Pipe를 삽입하고, $\phi 50\text{mm}$ 폭약을 사용하였다.

폭약의 종류는 구조물의 특성상 고성능 폭약을 필요로 하며 공내 침수시 내수성등을 고려하여 Dynamite 폭약을 사용하였다.

뇌관 배열은 각 공의 상단에 공저뇌관 475ms, 하단에 500ms의 시차를 두며, 표면 지연시차는 42ms를 두어 작업에 임하였다.

(3) 방호 작업

방호작업은 발파시 발생하는 비석, 분진을 근원적으로 차단시킴으로써 안전을 도모하는 공정으로 본 현장의 특성을 고려하여 다음과 같은 1차, 2차, 3차 방호를 시행하여 발파작업을 수행하였다.(참조 : 부록 3. 공사 및 계측사진 4, 5)

1) 1차 방호

1차 방호는 발파시 대상 구조물의 파쇄에 따른 부피의 팽창이 외부로 표출되지 않도록 비산물 및 분진의 역제를 시켜야 하며 이를 위해 적절한 인장강도를 가진 부직포, 폐고무 벨트등을 혼용하여 사용하였다.

2) 2차 방호

2차 방호는 1차 방호제에 의해 1차적으로 차단되어 상당부분의 에너지가 소실된 파쇄 비산물의 원거리 비산을 방지하고, 폭풍압(폭발음)에 대한 차단 역할을 하기 위하여 설치하였다. 2차 방호장치는 16.5×6.5×4.0(M) 규격의 Box형으로 강관 파이프를 사용하여 제작하였으며, 덮개를 방폭시트 및 능형망(φ5.8×100×100)을 사용하였다.

3) 수중방호

수중 충격압(수압 충격의 효과)을 제어하기

위하여 발파 대상 구조물의 주위에 공기방울의 인공막(Air bubble curtain)을 설치하여 수중에 기포를 발생시켜 방호막을 형성시키는 방법을 이용하였다. 인공막(Air bubble curtain)은 28×38(M)의 사각형으로 제작하였으며, 1590 C.F.M Air compressor를 사용하였다.

4) 오타방지막 설치

발파시 발생하는 부유물 및 작업시 발생하는 기계 Oil등의 유실을 방지하기 위하여 작업장 하류 80M지점에 길이 140M의 오타 방지막을 설치하여 시공하였다.

(참조 : 부록 3. 공사 및 계측사진 20)

7. 발파진동 추정식의 결정

1. 지반진동 측정

지반진동의 측정은 광진교 복단 하안에 3개소와 철거 예정 교각인 #5, 6, 7 지점에 3개소를 설치하였고, 지하철 5호선에 대한 지반진동의 영향을 파악하기 위하여, 수중계측 1개소를 선정하여 계측을 실시하였다. 측정된 계측값은 Table 1과 같다.

(참조 : 부록 3. 공사 및 계측사진 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15)

Table 1. 계 측 결 과

계 측 No.	계측위치(거리)	진 동 속 도 (cm/sec)			계측기기 (Serial No.)
		1 회	2 회	3 회	
1	하 안 (100m)	No - T	0.137	0.082	2575
2	하 안 (120m)	0.117	0.102	0.145	2542
3	하 안 (140m)	0.124	0.170	0.140	2536
4	교 각 (32m)	2.430	2.070	1.790	2589
5	교 각 (66m)	0.326	0.307	0.295	5542, 5237
6	교 각 (97m)	No - T	No - T	0.159	5475
7	수 중 (150m)	0.076	0.119	0.077	2544

2. 계측기기

본 작업에 사용된 계측기기는 Canada Instantel社 제품인 Blasmate II, III를 사용하였다.(참조: 부록 6. 계측기 Calibration Certificate)

3. 측정결과 분석

본 작업장 발파작업시 측정된 DATA를 분석한 결과 시험발파시의 발파 Pattern에 의해서 주변 보안물건에 대한 피해는 없을 것으로 판단된다. 또한 회귀분석에 의한 수치해석 결과 산출된 지발당 허용 장약량이 본 발파시 시험발파 Pattern과 거의 일치하므로 본발파 작업시 시험발파 Pattern을 기본으로 하여 실시하되 구조물의 특성변화에 따라 장약 Pattern 및 천공장, 공간격 등을 재조정하여 작업에 임하여야 할 것으로 사료된다.

발파작업시 발생하는 공해요인중 비산석에 대한 영향은 발파시 천공된 공내에 Pipe 삽입시 공과 Pipe간의 공극으로 인해 Pipe내에 장전된 폭약이 기폭되면서 Pipe 자체에 추진효과를 발생시켜 Pipe가 솟아오르는 현상이 발견되어 이것이 비산 또는 공발의 우려가 되므로 가능한 Pipe 장약을 피하고, 부득이한 경우 공과 Pipe 사이에 쇠석 또는 모래 등으로 충전시켜, 공과의 마찰저항으로 인한 Pipe를 고정하거나, 상하단 분리하여 장약하여야 할 것으로 판단된다.

비산석에 대한 영향은 전색길이가 공구에서 2m 이상되므로, 장약실이 수중에 위치하고 있는 관계로 공발을 제외하고는 비산석은 발생하지 않을 것으로 판단된다. 우물통 #1~3 상업용 건물(아리수 식당)과의 거리가 약 50~120m 이격되므로 최선의 안전을 위하여 본발파 시공시에는 2차 비산 방호망을 설치하고, 그밖의 우물통 발파작업시에는 고무벨트와 부직포 등을 이용하여, 1차 방호만 실시하여도 무관하다고 판단된다.

4. 측정결과 수치해석

(1) 회귀선(Regression Line)

진동의 크기는 화약류의 종류에 따른 화약의 특성, 지발당 자약량, 기폭방법, 지발시차, 자유면의 상태 및 수, 폭원과 측정점간의 거리, 암반의 역학적 성질 및 지질조건, 지형 등에 따라 다르고, 특히 발파지점으로부터 측정지점까지의 거리와 지발당 최대장약량간에 깊은 함수관계가 있으며, 현재까지의 세계 여러 연구기관 및 학자들의 연구결과를 종합하면 시험식으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V = K(D/W^b)^{-n}$$

V: 최대진동속도(Peak Particle Velocity, PPV: cm/sec)

D: 발파지점까지의 거리(Distance: m)

W: 지발당 최대 장약량(Max charge weight / Delay: kg)

K, n: 지형, 지질, 암석 발파조건 등에 따르는 상수

* 지발당 장약량 W는 8msec 이하의 지연시간내에 폭발하는 폭약량이어야 함.

여기서 거리와 지발당 장약량의 비(D/Wb)를 환산거리(Scaled Distance: SD)라 한다. 이때 b = 1/2이면 자승근 환산거리(Square Root Scaled Distance: SRSD), b = 1/3이면 삼승근 환산거리(Cube Root Scaled Distance: CRSD)라 한다.

위 발파진동식에서 지반의 공학적 특성이나 발파조건 등에 따른 진동 감쇄특성이 결국 상수 K, n에 반영되어 표시되므로, 안전발파 설계를 위해서는 대상지역에서 시험발파 및 본발파를 통해서 K, n 상수치를 결정하는 것이 대단히 중요하다.

$$V = K(D/W^b)^{-n} = K(SD)^{-n}$$

위 식에서 양변에 상용대수 값을 취하면 다음

식으로 만들 수 있다.

$$\text{Log}V = \text{Log}K - n \text{Log}(SD)$$

Log-Log Scale graph에서 x축(SD)를 취하고 y축에 V를 취하면, SD와 V는 기울기 -n과 SD=1에서 y축 절편 K인 직선(이를 회귀선이라 함)을 표시한다.

이와 같은 방법에 의해 본 과업에서는 계측된 계측 결과값을 바탕으로 회귀분석을 실시하여, 다음과 같이 진동추정식이 다음과 같이 도출되었다.

(참조: 부록 2 회귀분석 결과 및 DATA 2-2, 2-4)

$$V = 8651(D/W^b)^{-1.900} \dots\dots (\text{SQUARE ROOT SCALED DISTANCE})$$

$$V = 13967(D/W^b)^{-1.921} \dots\dots (\text{CUBE ROOT SCALED DISTANCE})$$

구조물에 대한 허용 진동 속도치를 0.3cm/sec를 기준하였을 때, 위 식에 따른 거리별 지발당 허용 장약량은 다음과 같다.

(참조: 부록 2. 회귀분석 결과 및 DATA 2-3, 2-5)

Table 2. 거리별 지발당 허용 장약량 (0.3cm/sec 기준)

거리	자승근 환산거리 (Kg/Delay)	삼승근 환산거리 (Kg/Delay)
100	2.285	1.875
110	2.764	2.496
120	3.290	3.240
130	3.861	4.120
140	4.478	5.145
150	5.140	6.328
160	5.848	7.680
170	6.602	9.212
180	7.402	10.94

8. 결 론

1. 진동속도 허용한계치의 결정

국내외 연구보고서 및 유사공사 보고서에 의하면 진동속도가 0.5cm/sec 이하의 수준에서는 구조물에 대한 피해는 없는 것으로 발표되었으나, 기 발생된 균열에 대해서는 발전할 수 있고, 주변 거주민들의 심리적 불안감과 불쾌감으로 인한 민원 발생이 야기될 수 있다. 본 작업장의 경우 작업장 서쪽에 위치한 지하철 5호선에 대한 진동 제어 대책이 요구되며, 구조물의 결함에 따른 허용 진동 규제치가 하향 조정되어야 할 것으로 사료된다. 따라서 본 현장 1차 허용 진동 규제치를 0.3cm/sec 이하로 설정하고, 이를 초과할 때에는 발파 패턴 및 지발당 장약량을 수정 적용하여야 한다. 따라서 매발파 작업시 발파지점과 지하철 구조물의 최단 거리 지점과 150m 이내의 보안물건등에 대해 2~3개소에서 발파진동 계측을 실시하여야 할 것으로 판단된다.

2. 진동속도 추정식 및 지발당 허용 장약량 결정

시험발파에 의해 측정된 DATA를 기준으로 하여 회귀분석을 실시하여 발파진동 추정식을 다음과 같이 산출하였다. 발파진동 추정식은 다음과 같다.

$$V = 8651(D/W^b)^{-1.900} \dots\dots (\text{SQUARE ROOT SCALED DISTANCE})$$

$$V = 13967(D/W^b)^{-1.900} \dots\dots (\text{CUBE ROOT SCALED DISTANCE})$$

3. 발파진동 추정식에 의해 산출된 지발당 장약량은 다음과 같다.

(0.3cm/sec 기준)

거리(m)	지발당 최대 장약량(Kg)	거리(m)	지발당 최대 장약량(Kg)
100	1.875	140	4.478
110	2.496	150	5.140
120	3.20	160	5.848
130	3.861	170	6.602

4. 천공작업

시험발파 Pattern에 의한 천공을 실시하던중 일부의 위치에서 철근이 도출되어 계속적인 작업이 곤란한 경우가 발생하였다. 이때에 가능한 시험발파 천공 Pattern에 맞도록 천공하기 위하여 Rotary Boring Machine을 사용하여 천공을 실시하였다.

그러나, 본발파 작업시 천공도중 구조물내의 철근 걸림으로 인해 천공작업이 어려운 경우에는 인접부근에 약 10~20cm 정도 이격하여 재천공을 실시하여도 무관할 것으로 사료된다.

5. 수중 충격파의 영향

Air bubble curtain을 설치하여 발파작업전 우물통 주위에 기포를 형성시켜 수류의 와동을 일으켜 수중 충격파의 전파를 차단코져 하였다. 그러나, 제1회(0.076cm/sec), 제2회(0.119cm/sec) 시험발파시 Air bubble curtain을 설치하지 않을 때와 Air bubble curtain을 설치한 제3회(0.077cm/sec) 발파에서 충격파의 차이를 입증할 자료를 얻지 못하였다. 따라서 Air bubble curtain의 설치 필요성에 대하여는 재검토가 필요하리라 판단된다.

6. 파쇄도

발파후 파쇄상황을 점검하기 위하여 잠수부가

수중촬영(카메라, 비디오촬영)을 시도하였으나 수중 시계불량으로 촬영을 하지 못하였다. 따라서 수중 파쇄상황을 단정하기는 곤란하다. 그러나 우물통 상부 미장약부분(Tanping부 2M)에서의 파쇄상황을 확인한 결과 균열폭이 10cm이상인 점으로 보아 우물통 하부의 파쇄가 양호할 것으로 추측된다.

(참조: 부록 3. 공사 및 계측사진)

한편 수중 기초부는 천공 작업후 Con'c의 불량으로 천공 Hole이 함몰되어 발파작업이 곤란하였다. 따라서 이로 인하여 기초하부의 파쇄불량이 나타날수도 있다.

7. 지하철 5호선 및 보안물건에 대한 영향

진동 계측결과 지하철 5호선에 대한 진동 Level (0.076, 0.119, 0.077cm/sec)은 안전한 수준으로 계측되었으며, 따라서 지중 구조물에 대하여 발파진동으로 인한 물리적 영향은 없을 것으로 판단된다.

고찰한 결과 매우 적절하다고 판단된다. 따라서 본 발파 작업시 시험발파 Pattern을 기준 Pattern으로 하여 구조물의 특성 변화가 있을 때에는 현장여건에 따라 적절히 수정 적용하여야 한다.(참조: 부록 4. 발파 Pattern도)