

광진교의 우물통 기초 발파철거 사례분석

Case Study of Explosive Demolition of Concrete Well Structure

두 준 기

Joon-Kee Doo

(주)청석엔지니어링

초 록

본 논문에서는 수상구간의 우물통 기초 철거공법을 약액(팽창성 파괴제) 주입공법에서 발파공법으로 변경하여 공사기간을 단축시키면서도 주변의 보안물건에 대한 공해를 발생시키지 않고 안전하게 공사하여 원가를 절감한 사례를 중심으로 발파공법을 고찰하였다.

핵심어 : 우물통, 발파철거, 환경공해

1. 서 론

광진교는 한강 상에 2번째로 설치된 교량으로 폭격 및 홍수로 인한 우물통 기초의 손상 및 세굴 등으로 인하여 안전성이 결여되어 현 위치에 새로운 4차선 교량을 설치하기 위하여 상판 및 우물통 기초를 철거하게 되었다. 수상구간 우물통의 철거공법을 결정함에 있어서 하류측 150m 지점의 하저에 매설공법으로 시공된 지하철 5호선이 운행중인 상태이므로 발파공법에 의해 우물통을 철거할 경우 발파진동에 의한 공해로 지하철 운행에 지장을 초래할 우려 있어 설계과정에서 설계자에 의한 면밀한 기술 검토와 여러 차례의 자문회의를 통하여 최적의 공법으로 비발파공법인 약액(팽창성파괴제) 주입공법으로 철거공법이 결정되었을 것이다.

수상구간의 우물통 기초 철거공사를 하기 위한 철거공법 중에서 발파공법은 가장 비용이 절감되고 공사기간이 짧아 효과적으로 철거할

수 있는 최적의 방법이나 철거 대상물 주변에 지하철 5호선과 같은 중요시설물이 150m 이격하여 위치하므로 발파공해에 대한 정밀 영향검토를 소홀히 하는 경우 큰 공해가 발생되므로 발파에 대한 전문적인 기술 검토가 이루어져야 안전한 발파철거가 가능하다.

본 고는 수상구간의 우물통 기초 철거공법을 약액(팽창성 파괴제) 주입공법에서 발파공법으로 변경하여 공사기간을 단축시키면서도 주변의 보안물건에 대한 공해를 발생시키지 않고 안전하게 공사하여 원가를 절감한 사례를 중심으로 발파공법을 고찰하고자 한다.

2. 우물통철거 발파조건 및 주변환경

본 수상구간의 우물통 철거공사를 시작한 이후 우물통 철거를 위한 발파공법이 결정되기까지 많은 우여곡절이 있었다. 공사착수 후 여러 종류의 비발파공법을 적용하여 시험시공 및 공

기분석결과 절대공기 이내에 공사완료가 불가한 상태여서 발파공법으로 공법전환이 불가피한 상태임에도, 발주청의 발파공법에 대한 부정적인 견해로 발파공법에 대한 기술검토가 지연되었고, 심지어는 일본의 발파전문업체에 기술검토를 의뢰하는 사태까지 발생하였으나, 다행스럽게도 국내 기술진에 의해 검토되어 설계된 발파공법이 2차례의 기술자문회의를 거쳐 철거공법으로 채택되었다.

1) 우물통의 구조 및 규격

- *중력식 : 9기(W2 외 8개), 9,736 m³, 8각형
기초: 7.8m x 18.0m, 타원형 교각: 5.268m x 14.6m.
- *구주식 : 5기(W3 외 4개), 1,698 m³
- *라멘식 : 27기(W16 외 26개), 3,905 m³
- *교대 : 2기, 850 m³

2) 우물통의 상태 및 주변환경

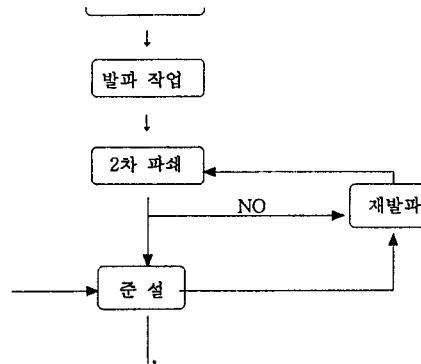
철거대상 구조물의 상황은 1936년에 건설된 후 기존 콘크리트 우물통 및 기초에 보강콘크리트를 타설하였으며 폭격에 의한 균열 및 수류에 의한 침식작용(세굴작용)으로 공동과 파쇄대가 형성되어 있고 하류측 약 150m 지점 하저에 매설공법으로 시공된 지하철 5호선과 약

200m 지점에 있는 천호대교 및 강북 하안 120m 지점에 인접한 식당과 140m 지점에 빌라트가 위치하므로 발파에 의한 환경영향을 평가하여 공해발생 여부를 철저히 검토해야 한다.

3) 우물통 기초

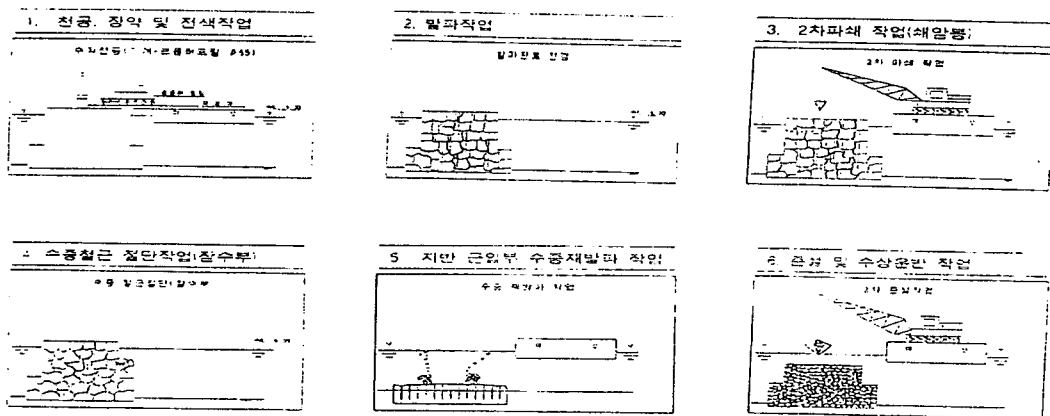
우물통 기초의 상단은 수면에서 약 1.5m이상 노출되어 있으며 하단은 수심 8m 깊이에 위치한다.

3. 철거공사 작업 순서도



4. 철거공사 개념도

철거공사 개념도는 다음 그림과 같다.



철거공사 작업 순서도

5. 발파설계

5.1 목적

서울특별시 광진구 광장동과 강동구 천호동을 잇는 한강상류에 위치한 광진교의 기존교각 철거공사로 인한 인근 주변에 위치한 지하철 구조물 및 건물에 미치는 영향 등을 조사하고 대책을 수립함과 동시에 발파대상지역의 발파 효율 및 주변환경조건을 고려한 안전한 발파작업을 수행키 위함임.

5.2 대상 구조물

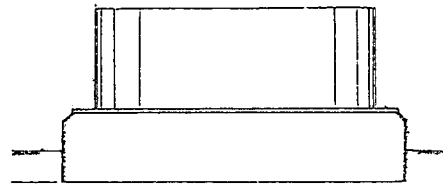
위치 : 기존교각 중력식 W4
 구조 : 철근콘크리트조
 형태 : 타원형 우물통(5.268m x 14.6m.) 및 8각형 기초(7.8m x 18.0m)
 수위 : EL6.3m
 지반고(GL) : EL-1.233m,
 철거한계 : EL-1.85m,
 교각상단 : EL8.281m
 전체길이 : 10.13m (수면하부길이 : 8.15m)
 체적 : 976.09 m³/ W₄
 사용폭약량 : 242 kg/ W₄

5.3 발파진동허용기준

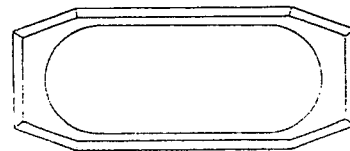
본 공사현장 주변의 가장 중요한 보안물건은 내진 설계하여 철근콘크리트 구조물로 하저에 매설 시공한 서울지하철 제5호선으로서 국내외 연구보고서 및 유사공사 보고서에 의하면 허용

진동속도를 0.5 cm/sec로 기준하면 구조물에 대한 피해는 없는 것으로 발표되어 있으나 안전을 고려하여 0.3 cm/sec로 설정하였음.

지하철 5호선 : 0.3 cm/sec
 식당 및 빌라트 : 0.3 cm/sec



정 면 도



평 면 도

구조물 정면도 및 평면도

5.4 비장약량 및 지발당 장약량

가. 비장약량

국내의 사례가 없어 외국의 철근콘크리트 발파 사례를 기준; 철근콘크리트를 기준하여 0.8~1.0 kg/m³로 적용

나. 지발당 장약량

서울지하철공사에 적용한 발파진동식이 있으

대상 콘크리트	체적당 장약량(kg/m ³)	정방형 진공패턴	사용 폭약
무근콘크리트(저품질)	0.3	0.7~0.8	17mm Gurit
무근콘크리트(고품질)	0.4~0.5	0.6~0.7	17mm Gurit
철근콘크리트	0.8~1.0	0.5	22mm Em150
건고한 철근콘크리트	1.0~2.0	0.4~0.5	22mm Em150

나 암반을 대상으로 산출되어진 것이고, 콘크리트 발파를 위한 국내의 사례가 없어 일본의 발파진동식을 적용하되 K값을 가장 높게 설정하여 추정식을 설정하였음.

$$V = K * W^{0.75} * D^{-2}$$

V: cm/sec, K: 1000~2000, W: kg, D: m

V를 0.3 cm/sec로 기준하여 지발당 장약량 산출하면,

$$0.3 = 2000 * W^{0.75} * 150^{-2}$$

$$W^{0.75} = 0.3 / 2000 * 150^{-2}$$

$$W = 5.0625 \text{ kg}$$

안전을 고려하여 지발당 장약량을 최대 4.25 kg으로 결정함.

5.5 발파방법 결정

우물통의 구체가 기존우물통에 추가 보강작업으로 우물통 기초와 교각이 덧붙임 콘크리트로 시공되어 있고, 부분적인 세굴 및 침식으로 공동이 발생되어 있는 상태에서 구체를 분할하여 발파할 경우 1차 발파에 의해 구체가 균열되거나 변형되어 천공구멍이 훼손되고 저항선거리가 변하여 2차 발파가 불가능해질 가능성이 많으므로 전체의 우물통을 단일 발파패턴에 의해 발파하되 지발당 장약량을 최소화하여 지하철의 안전을 도모할 수 있는 다단 장약에 의한 진동제어 발파패턴을 결정하였다.

6. 다단 장약에 의한 진동제어발파

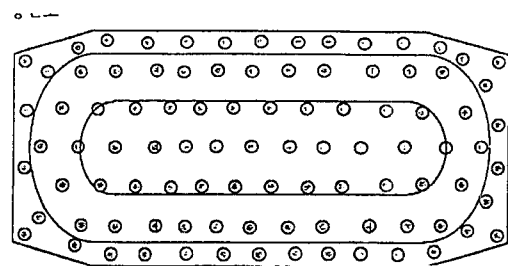
다단 장약에 의한 진동제어 발파패턴은 우물통 전체를 단일 발파패턴으로 일시에 철거하기 위한 발파패턴으로 우물통 전체의 길이를 단일 천공장으로 하여 천공거리 및 간격을 유지하고 각 공을 다단(Deck Charge)으로 분할하여 장약하고 서로 다른 지발초시로 기폭될 수 있도록

시차를 두었다. 사용 지발뇌관은 비전기식 지발뇌관을 사용하였으며 공내 뇌관은 NONEL Unidet 450, 475, 500 ms 뇌관을 사용하고 표면시차 지발뇌관은 42 ms를 사용하였다.

6.1 천공

본 철근콘크리트 구조물은 8 m 이상이 수중에 잠겨 있으며, 천공장이 10 m 이상이고, 구조물의 단면이 한정되어 있으므로 천공구멍의 위치와 진직도에 오차가 발생되면 발파효과에 큰 영향을 미치므로 천공작업에 세심한 배려가 요구된다.

- ① 천공장비는 크롤러드릴을 사용
- ② Bit는 Ø75 mm를 사용
- ③ 천공구멍의 정확도를 유지하기 위하여 수준기를 이용
- ④ 천공중 철근 출현시 보링후 재천공
- ⑤ 천공구멍의 붕괴방지를 위한 PVC파이프 삽입 및 두부정리(우물통 선단과 평활)
- ⑥ 천공중 천공속도 및 배출물을 확인하여 주상도 작성



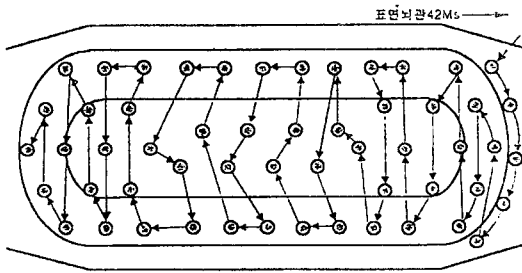
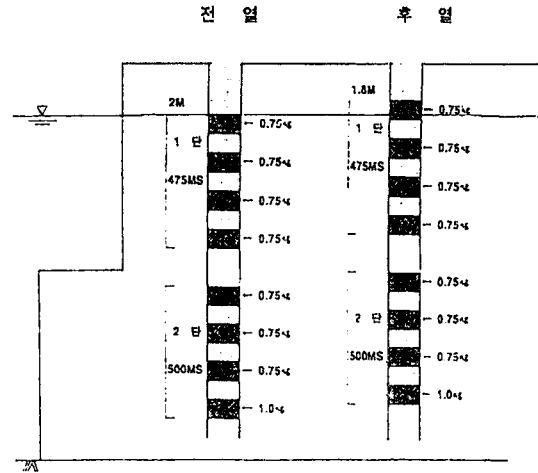
천공 평면도

6.2 장약

- ① 폭약은 내수성이 강한 Ø50mm 다이너마이트 사용
- ② 비전기식뇌관으로 다단 장약을 실시, 하부

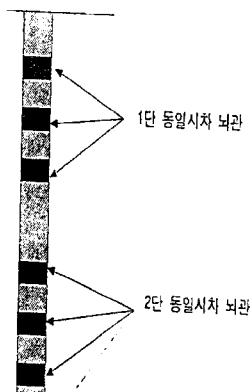
500 ms, 중앙 475 ms, 상부 450 ms, 표면 뇌관 42 ms 사용

- ③ 각공을 2단계 시차로 구분하고 각 단을 동일시차 뇌관에 의해 3단으로 구분하여 다단 장약
- ④ 장전봉 길이를 12 m로 제작하여 사용
- ⑤ 수중장약으로 수압에 의한 폭약의 변형방지가 중요.
- ⑥ 각공의 공구와 표면지연 시차뇌관의 연결 부분은 PVC 파이프의 돌출 및 소음방지를 위하여 모래 마대로 덮는다.



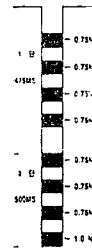
표면뇌관배치도

6.3 주상도 및 장약도



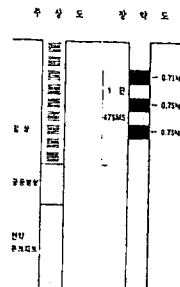
○당초 계획

□시행 (정상함)



□시행 (공동발생함)

□시행 (하부취약함)



■ 장약량 : 비장약량이 계획에 비하여 현저히 적어진 것은 우물등의 세굴 및 침식으로 천공장이 짧아지거나 붕괴되어 장약량이 적어졌기 때문이다. 일부 장약을 하지 않고 발파된 부분은 전체 발파후 파쇄된 콘크리트를 제거하고 재 천공하여 장약 발파하였다. 통계 처리된 장약량은 우물통 전체를 발파하는데 사용된 폭약만을 적용하여 처리하였다.

■ 계획

구분	천공장 (m)	공간격 (m)	저항선 (m)	발파공수 (ea)	장약량(kg)		
					Hole	Delay	Round
1	9.4	1.1	1.1	30	4.0~5.85	4.0	147.75
2	9.4	1.1	1.1	30	4.0~5.85	4.0	147.75
3	9.4	1.1	1.1	41	4.0~5.85	4.0	212.65

■ 시행

구분	천공장 (m)	공간격 (m)	저항선 (m)	발파공수 (ea)	장약량(kg)		
					Hole	Delay	Round
1	9.4	1.1	1.1	20	1.0~4.0	4.0	72.75
2	9.4	1.1	1.1	15	2.25~6.0	3.0	77.25
3	9.4	1.1	1.1	16	3.0~6.0	4.25	92.00

구분	우물통체적 (m ³)	천공장 (m)	저항선 (m)	발파공수 (ea)	장약량			비장약량 kg/m ³
					kg/Hole	kg/Delay	kg/Round	
계획	976.09(596)	9.4	1.1	101	4.0~5.85	4.0	508.15	0.85
실행		9.4	1.1	51	1.0~6.0	3.0~4.25	242	0.406

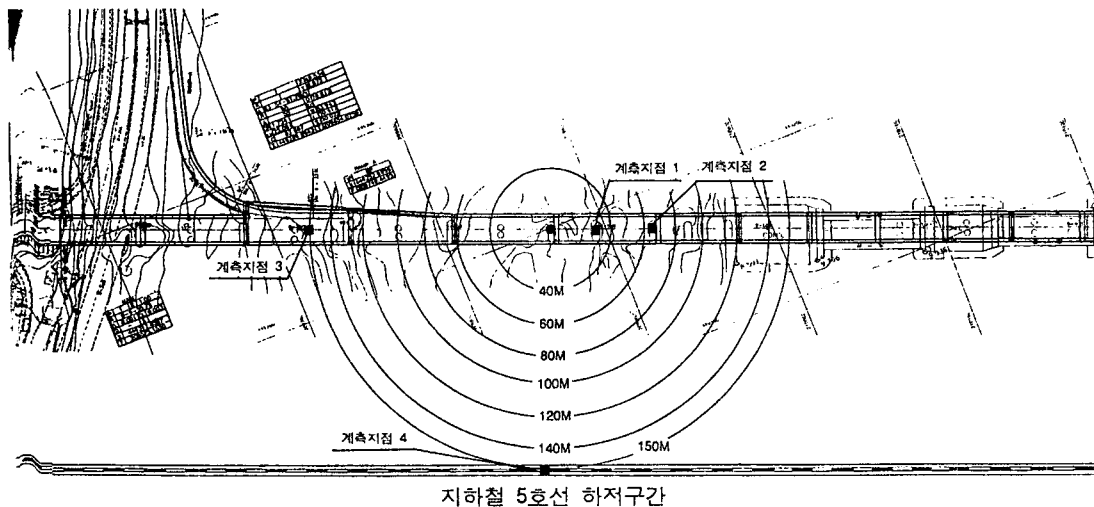
6.4 Hole Deviation 측정

발파대상 철근콘크리트 두께가 얇고 철근이 배근된 상태의 콘크리트에 10 m 이상의 발파공을 천공하여 발파하는 경우에는 천공구멍의 정확도가 발파의 성공여부를 결정하는 중요변수이

므로 Hole Deviation을 측정하여 폭약장전을 고려해야 한다.

7. 지반진동계측 및 분석

7.1 계측위치 및 이격거리



7.2 계측 결과

번호	기기번호	계측위치 (이격거리)	지발당 최대장약량(kg)			비고
			4.0	3.0	4.25	
			진동속도(cm/sec)			
			1회	2회	3회	
1	2575	하안(100m)	NO-T	0.137	0.082	북단
2	2542	하안(120m)	0.117	0.102	0.145	북단
3	2535	하안(140m)	0.124	0.170	0.140	북단
4	2589	교각(32m)	2.430	2.070	0.179	#3
5	5542,5237	교각(56m)	0.326	0.37	0.295	#5
6	5457	교각(97m)	NO-T	NO-T	0.159	#6
7	2544	수중(150m)	0.076	0.119	0.077	하류측

7.3 계측결과 수치해석

1) 회귀선

발파작업의 일반적인 조건을 동일하게 하면 발파지점으로부터 측정 점까지의 거리와 지발당 장약량간의 깊은 함수관계가 있으며 연구기관 및 학자들의 연구결과에 따르면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V = K \left(\frac{D}{W^b} \right)^{-n}$$

V : 최대진동입자속도(PPV)

D : 발파원과 계측점간의 거리(m)

W : 지발당 최대장약량(kg)

K, b, n : 발파상수

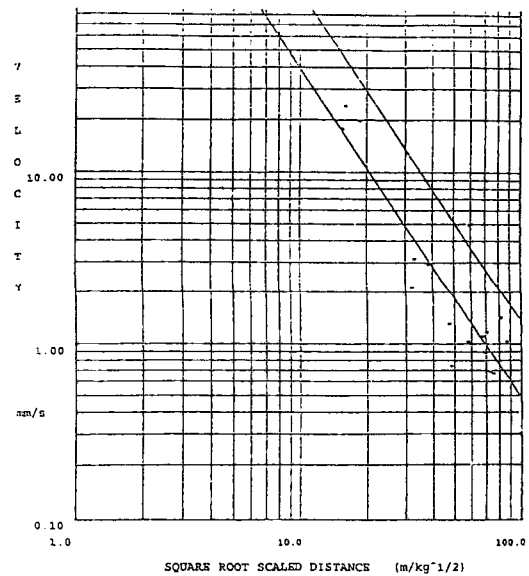
여기에서 거리와 지발당 장약량비를 환산거리(SD: Scaled Distance)라 한다.

$$\therefore V = K \left(\frac{D}{W^b} \right)^{-n} = K (SD)^{-n} \text{ 식에서}$$

양변에 대수를 취하면

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

Log-Log Scaled graph에서 X축에 SD를 취하고 Y축에 V를 취하면 SD와 V는 기울기 -n과 SD=1에서 Y축 절대값 K인 직선(회귀선)을 표시한다.



2) 발파진동 추정식(95%수렴값)

$$V=865.1 (SD)^{-1.9} \text{ (자승근 환산거리)}$$

$$V=1396.7 (SD)^{-1.9} \text{ (삼승근 환산거리)}$$

7.4 거리별 지발당 장약량 산출(자승근 환산 거리식 적용)

발파대상 우물통 위치에서 보안물건간의 거리별로 지발당 장약량을 적용하여 시행

거리 (m)	지발당 장약량 (kg)	거리 (m)	지발당 장약량 (kg)
100	1.785	140	4.478
110	2.496	150	5.140
120	3.200	160	5.848
130	3.861	170	6.602

7.5 시험발파 결과분석

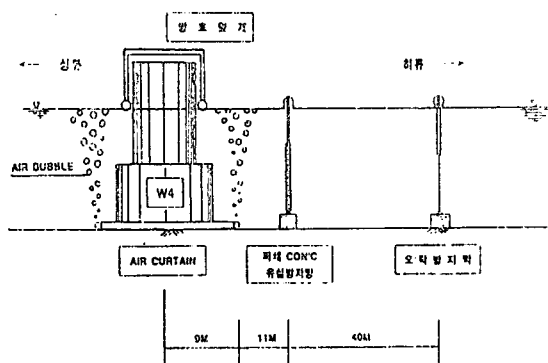
1) 진동추정식에 의한 지발당 장약량을 기준하여 발파작업 수행시 허용진동속도 이내에서 발파작업이 가능하여 공해가 발생되지 않음.

2) 철근콘크리트 구조물의 파쇄 상태가 비교적 양호하여 간단한 2차 파쇄 후 처리 가능함.

8. 환경공해방지

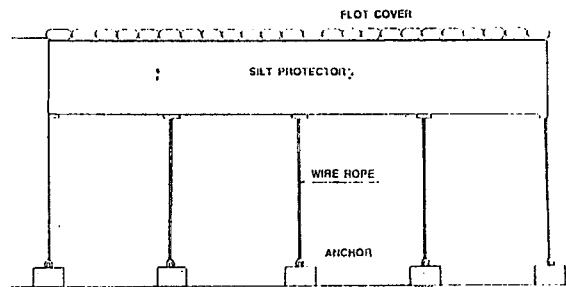
8.1 수질오염 방지시설

당 공사현장은 잠실 수중보 상류에 위치하여 상수원 보호구역으로서 식수원의 오염을 철저히 방지하기 위하여 아래와 같이 방지시설을 설치하였다.



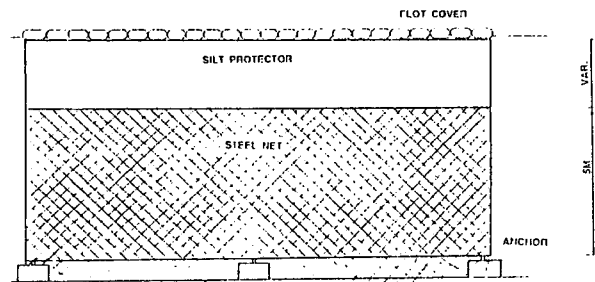
1) 오탁 방지막 설치

발파시 콘크리트의 분쇄로 발생하는 입자와 충격파에 의한 하상 침전물의 부유에 의한 오탁수 발생을 방지하기 위하여 교각하류측 50m 지점에 2중으로 오탁방지막 설치.



2) 파쇄콘크리트 유실 방지막 설치

파쇄된 콘크리트 덩어리의 수류에 의한 유실을 방지하기 위하여 능형 철망으로 제작한 방지막을 하상에 밀착시켜 5 m 높이까지 설치.



3) 수질오염 측정관리 대책

① 측정방법: 발파 전·후 오탁 방지막 설치 지점과 구의 정수장 취수구 부근에서 Sample을 채취하여 전문기관에 의뢰하여 측정.

② 측정항목(환경정책 기본법 기준)

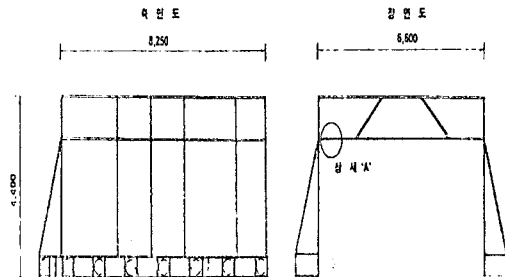
구분	등급	이용 목적별 적용 대상	기준				
			수소이온 농도 (PH)	생물화학적 산소 요구량 (BOD) (mg/l)	부유물질량 (SS) (mg/l)	용존산소량 (DO) (mg/l)	대장균 군수 (MPN/100ml)
생활환경	i	상수원수 1급 자연환경보전	6.5-8.5	1 이하	25 이하	7.5 이상	50 이하
	ii	상수원수 1급 수산용수 1급 수영용수	6.5-8.5	3 이하	25 이하	5 이상	1,000 이하
	iii	상수원수 3급 수산용수 2급 공업용수 1급	6.5-8.5	6 이하	25 이하	5 이상	5,000 이하
	iv	공업용수 2급 농업용수	6.0-8.5	8 이하	100 이하	2 이상	-
	v	공업용수 3급 생활환경보전	6.0-8.5	10 이하	쓰레기 등이 떠있지 아니할 것	2 이상	-

8.2 비산 및 분진, 소음 방지막 설치

포를 이용하여 방호막을 제작하여 설치하였음.

1) 1차 방호막(방호 덮개) 설치

콘크리트 조각의 비산 및 분진방지와 소음방지를 위하여 발폭 시트 및 고무매트를 설치하였음.



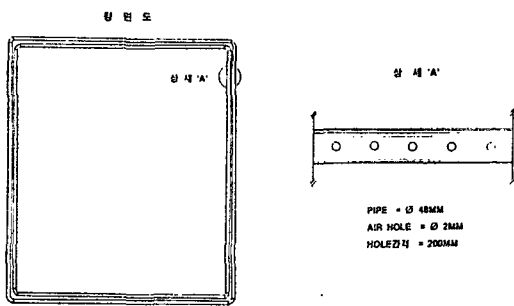
2) 2차 방호막 설치

철제 파이프와 50×50 mm 능형 철망과 부직

8.3 어류 보호시설 설치

수중 서식류에 대한 발파의 영향은 본질적인 기구가 밝혀지지 않고 있으나 물고기에 대한 발파 충격수압과의 관계는 일반적으로 납작하고 골격이 단단한 종류는 약하고, 방추형이고 골격이 유연한 종류는 강하다. 충격수압이 0.3~2.0 kg/cm²일 때 회복이 가능하고, 2.0~3.5

kg/cm²에서는 회복 가능성이 있으며 3.5~7.0 kg/cm²일 때는 거의 회복이 불가능하고 7.0kg/cm² 이상에서는 완전회복이 불가능하다. 발파의 충격수압에 의한 어류의 폐사가 우려되므로 발파전 Air Bubble Curtain을 형성하여 발파에 의해 발생된 충격수압을 흡수하여 어류를 보호하였음.



9. 결론

본 우물통 철거공사는 발파공법과 비발파 공법을 같이 적용토록 설계되었으나 비발파 공법을 주공법으로 채택하였다. 당초의 발파공법은 정상적인 시공이 불가하여 시공초기 발파공법을 검토하는 과정에서 일본의 발파전문업체에 위주처리를 검토하였으나, 국내의 기술진에 의해 설계된 발파철거공법이 2차례의 기술자문회의를 거쳐 채택되었으며 환경공해를 발생시키지 않고 공기단축 및 원가를 절감시킬 수 있었던 성공적으로 수행한 시공사례이다.

발파작업은 이론적인 면보다 경험적인 면에서 구조공학적인 판단과 발파공학적인 면이 포함되어 이루어지는 것으로서 기 시행된 공사의 사례분석을 통하여 기본적인 시스템을 분석하고 실제 공사 진행시 적용 가능한 범위를 설정하는 것이 중요하다. 전체 우물통을 발파 철거하는 동안 발파진동값이 주 보호대상물인 지하

철 제 5호선 하저 구간 내 계측결과는 하저 수중부와 지하철 내부의 계측자료에 심한 차이를 보이고있으나 발파진동이 최대 0.2 cm/sec 이하로 구조물에 대한 영향은 거의 받지 않은 상태에서 발파작업이 이루어졌으며, 인근의 목조 건물에서 0.3 cm/sec 이상이 2회(0.735, 0.362), 콘크리트 및 조적조 건물에서 0.3 cm/sec 이상이 3회(0.77, 0.61, 0.362)로 나타났으나 목조 건물과 조적조 건물에 균열이 발생되지 않았다. 철거공사에 있어서 발파작업은 신뢰성이 있는 계측을 실시하고 계측자료를 분석하여 지발당 장약량, 체적당 장약량 등의 자료를 Feed Back 하여 차후발파설계에 반영함으로써 발파진동 허용기준 이내에서 최대한의 작업능률을 향상시킬 수 있도록 노력이 필요하다. 아쉬웠던 점은 비발파공법을 발파공법으로 전환하여 20억원의 공사비를 절감하였음에도 발주처의 발파기술에 대한 인식 부족으로 정밀진동계측을 위한 예산이 확보되지 않아 발파진동에 대한 정밀계측을 시행치 못하였다.

최초로 한강상의 교량 우물통 기초를 주요 시설물이 인접한 상태에서 발파공법으로 철거하는 공사이므로, 수중콘크리트 구조물에 대한 발파진동 계측자료 및 관련 기술자료는 향후 수중구조물의 철거공사 설계에 이용될 수 있는 중요한 기술자료를 시험발파 및 시공중의 일부 계측자료 등의 부족한 자료로 발파작업에 대한 진동영향을 검토 분석함으로써 부족한 점이 있었으나 수중구조물에 대한 발파공법을 적용하는데 조금이나마 보탬이 되었으면 하는 바램입니다. 끝으로 발파작업은 작업의 특성상 작업의 오류가 발생되면 심각한 공해문제가 발생하므로 현장의 화약류관리기사 일인에 의한 관리관행을 탈피하고 발파분야의 전문기술인의 영역으로 돌려져야 할 것이며 발파작업에 전문성을 부여하면 안전제고는 물론 작업능률의 향상으로 경제적인 공사가 될 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 대우건설기술연구소, 1989. 건설진동의 영향 평가 및 대책에 관한 연구(Ⅱ) pp. 176~180.
2. Stig O.Olofsson, 1990, Applied Explosives Technology for Construction and Mining, Nora Boktryckeri AB. pp. 242~252, 268~271.
3. 김정진 감수, 1994. 신발파핸드북, 원기술 편집부, pp. 328~358, 443~489, 512~516.
4. 양형식역, 1992, 발파진동학, pp. 153~181.
5. 김재극, 1986, 산업화약과 발파공학. pp. 369~401.
6. 雜喉謙저, 원기술편집부역, 1994, 발파진동의 주변에의 영향과 대책, pp. 142~154, 174~177.