

교각구조물 발파해체 시공사례

박근순¹⁾ · 이준석¹⁾ · 박상수¹⁾ · 안경로²⁾

1. 서 론

각종 건물이나 토목구조물은 내용 년 한 즉 수명을 다 한 경우 해체하는 것이 일반적이지만 최근에는 쾌적한 환경 추구하고 기능상의 변화, 사회 경제적 가치의 변동 또는 내구성의 자연적 감퇴 등의 이유로 해체가 불가피해지는 경우가 많다. 이와 같은 추세에 비추어 국내에서도 안전하고 정확한 구조물해체에 대한 기술개발이 요구되고 있다. 지금까지의 구조물 해체작업은 크레인, 파쇄기 등의 기계적인 방법에 의존해왔으나 진동, 소음, 분진 등의 생활 환경 공해로 많은 문제점을 야기 시키고 있다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 해체공법에 관심이 높아지면서 대형파쇄기(giant breaker)나 유압압쇄기(crusher) 등을 이용한 기계력에 의한 해체가 이루어져 왔으며 최근에는 해체작업의 신속성, 경제성, 안정성, 주변 환경에 미치는 영향을 고려하여 선진외국에서 적용되고 있는 발파해체공법이 국내에 소개되면서 관련분야의 연구 및 공법개발이 활발히 진행되고 있다.

선진국인 미국이나 영국등지에서는 이미 1950년대부터 각종 산업시설 및 고층건물을 발파해체공법으로 철거하여 왔고 이제는 안전한 해체공법중의 하나로 자리 잡고 있다.

우리나라의 경우 90년대 초반부터 몇몇 업체에서 시작된 발파해체공법의 시도가 외국 기술제휴사의 핵심기술 이전기피, 해체물량 부족과 발파해체에 대한 인식부족 등으로 아직 활성화되지 못한 초기 단계이지만 향후 고층빌딩철거, 각종 산업구조물 및 공장건물 해체작업에도 적용이 가능한 첨단기술이라 할 수 있다.

본 교각구조물 발파해체 시공사례는 고속국도건설 공사중 기 시공된 교각구조물에 안전성 문제가 발생하여 상·하행선 2개의 교각을 후속공정을 고려하여 단시간 내에 해체하고, 재시공하여야하는 현장여건에서 수행되었다.

2. 교각구조물 발파해체

2.1 공사개요

본 발파해체공사는 고속국도 건설중에 시공된 교각이 안전성에 대한 문제가 발생하여 후

1) (주)비엔티데몰리션

2) 기술사사무소 다우구조

속공정을 위하여 상·하행선 교각을 단시간내에 해체하고 재시공하여야 하는 공사이다.

이러한 이유로 안전하고 신속한 발파해체공법이 채택되어 교각의 구조안정성 검토를 실시한 후 발파해체 공사를 수행하였다.

- 1) 공 사 명 : ○○교각 발파해체공사
- 2) 위 치 : ○○도 ○○군 ○○면 ○○리
- 3) 시 공 사 : ○○건설
- 4) 협 력 사 : (주)비엔티데몰리션
- 5) 공사내용 : 교각 2기 발파해체
- 6) 공사기간 : 착공 후 15일(폐기물처리 포함)
- 7) 현 황 도 :

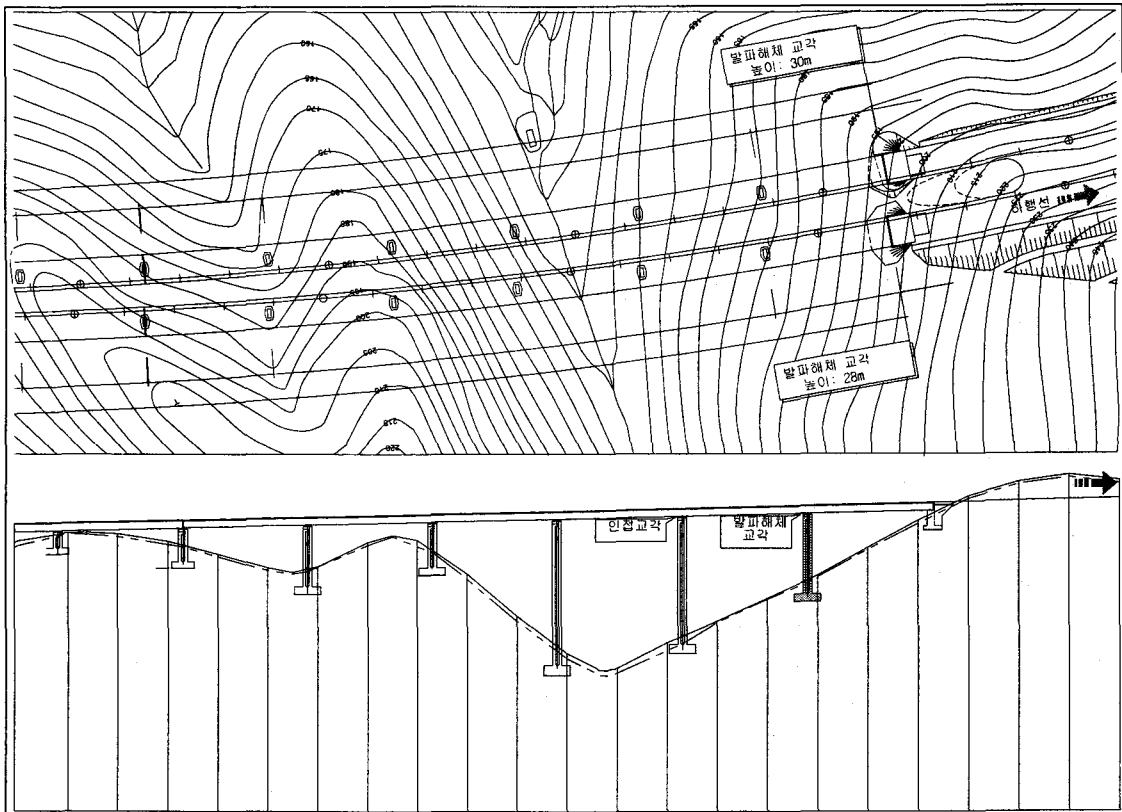


그림 1. 현황도

2.2 발파설계

본 공사에 적용된 발파해체공법은 예정된 방향으로 정확하게 교각을 전도시켜 2차 파쇄 및 폐기물처리가 원활히 이루어지도록 전도공법(Felling Method)으로 설계하였다.

1) 발파해체공사 수행절차

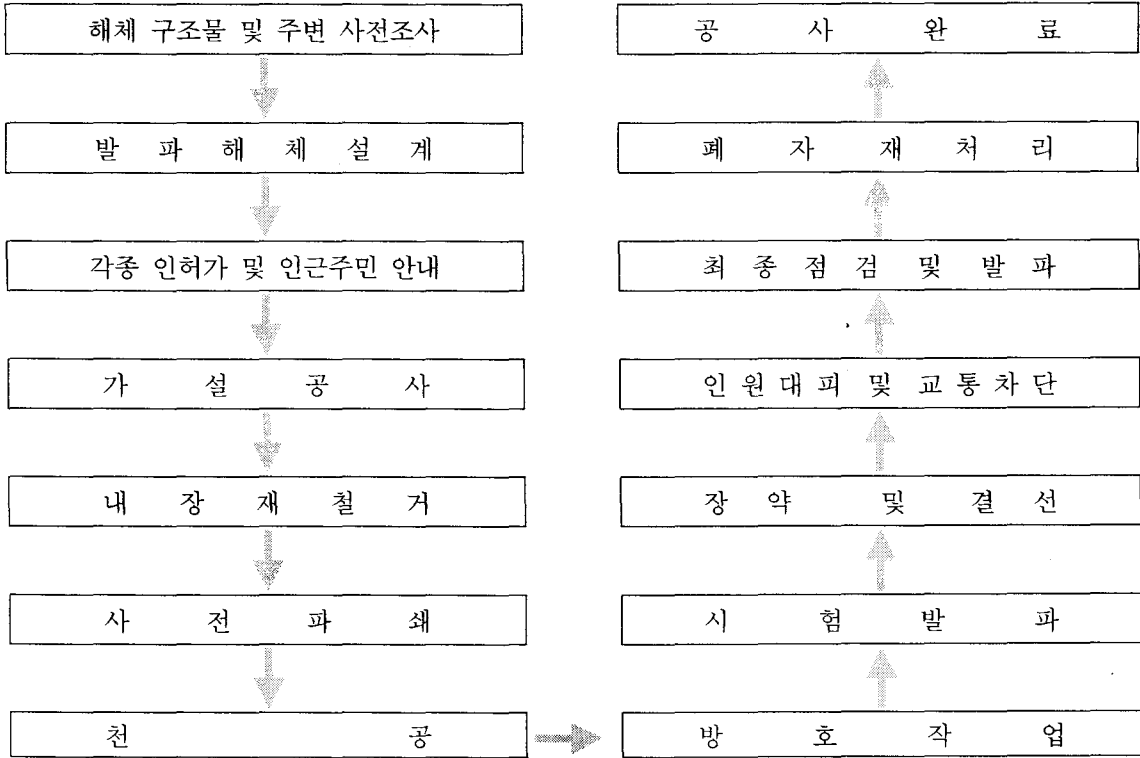


그림 2. 발파해체 수행절차

2) 발파설계

표 1. 발파설계 목적, 고려요소, 반영사항

발파설계 목적	<ul style="list-style-type: none"> • 인근교각 및 주변마을을 고려한 진동제어발파 공법수립 • 콘크리트 교각 특성 및 안전과 2차파쇄를 고려한 효율적인 발파패턴 수립
고려요소	<ul style="list-style-type: none"> • 환경공해에 대해 피해가 발생하지 않도록 현장여건을 고려하여 발파패턴 선정 • 콘크리트 부재의 크기, 강도, 철근 량, 부재의 단면형상, 사용화약류 및 기폭 시스템, 천공 장비 및 방법, 2차 파쇄 장비종류 등
반영사항	<ul style="list-style-type: none"> • 해체교각 안정성 확보를 위한 구조안정성검토 • 보안물건에 대한 진동 및 소음 피해방지(1, 2차 방호) • 진도 시 지반진동 저감으로 인접교각에 진동피해 영향을 최소화 • 코아 및 절단을 고려한 대상 부재의 천공위치 선정 • 발파시 발생하는 발파공해의 최소화하기 위한 안전대책 수립(진동, 소음, 비산)

표 2. 발파설계 세부 항목

설계요소	검토사항
주변환경	·보안물건 이격거리, 인접교각의 구조 및 기초상태 ·해체대상 교각의 구조안정성
사용 화약류	·폭속, 뇌관시차, 약경, 장전밀도 ·진동 및 소음, 기폭방법
발파패턴	·천공경, 천공장, 기폭순서, 최소저항선 ·천공각도, 전색재료, 공간격, 비장약량 ·전도방향을 고려한 작업
천공장비	·천공속도, 천공능력, 등판능력
파쇄 콘크리트 처리	·파쇄입도, 사용용도, 운반거리

표 3. 발파설계 중점반영 세부 항목

반영항목	내용		
발파공해 영향권 검토결과	· 인근마을 및 인접교각에 대한 진동 및 소음 허용치 결정에 따른 지발당 장약량 및 방진작업 결정		
	구분	인근마을	인접교각
	진동 허용치	70dB(V)이내	5.0cm/sec이내
	소음, 음압 허용치	70dB(A)이내	140dB(L)이내
현장여건을 고려한 발파공법 적용	· 해체교각의 안정성에 영향을 주지 않는 범위에서 사전취약화 작업 · 인근마을에 진동 및 소음에 대한 영향을 최소화 · 정확한 방향으로 교각이 전도되도록 뇌관 및 화약사용 · Felling(전도)발파해체공법 적용		
안전 발파대책	· 장약시 완전전색 · 능형철망과 부직포로 장약부위 1차적으로 완전방호 · 부직포 및 가설펜스로 비산 및 소음을 2차적으로 방호 · 인접교각에 진동으로 인한 구조물 안전에 영향이 없도록 충격흡수 토제를 전도방향에 설치하여 방진효과를 높임		

2.3 구조안정성검토

1) 구조물현황

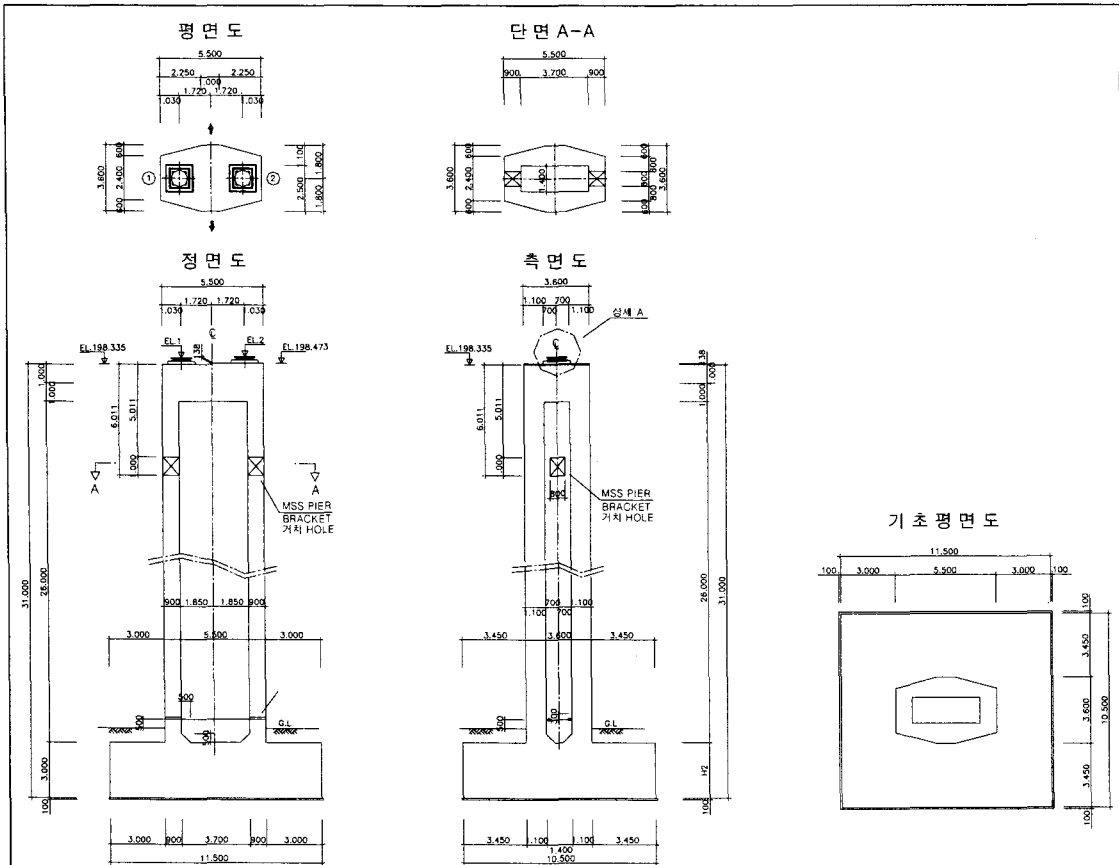


그림 3. 해체교각 구조물도

2) 균열현황

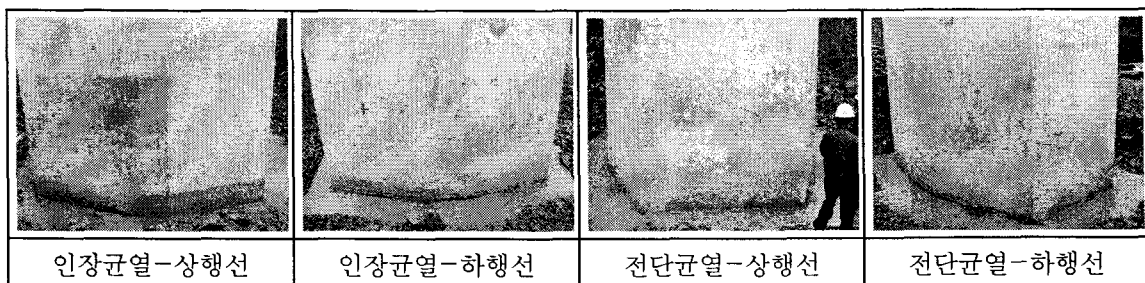


그림 4. 해체교각 균열사진

3) 규격현황

표 5. 발파해체교각 규격현황

구 분	기초규격 [B×W×H]	교각규격 [B×W×H]	P [ton]	모멘트	교각단면적 [m ²]	취약시잔존 [m ²]	비고
상행선	10.5×11.5×3	5.5×3.6×30	758.11	871.67	11.92	5.6	중공단주
하행선	10.5×11.5×3	5.5×3.6×28	700.9	805.88	11.92	5.6	중공단주

4) 사전취약시 안전성 검토

가) 취약화후 단면검토

$$P_u = 758.112 \times 1.4 = 1061.36 \text{ ton}$$

$$f_c = 240 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_y = 3000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\phi P_n = 0.7 \times 0.85 \times f_c \times A_c = 0.7 \times 0.85 \times 240 \times (56000/1000) = 7996 \text{ ton} > P_u$$

O.K

나) 사전취약시 잔존부 단면에서의 단면중심산정

$$\Sigma B = B1 + B2 + B3 + B4 + A5 = 4.7 + 2.5 \times 0.7 + 1 \times 0.4 + 1.5 \times 0.4/2 + 0.9 = 7.45 \text{ m}^2$$

$$B1 \times I0 = 0$$

$$A5 \times I1 = 0.5 \times 0.9 \times 2 \times 1.15 = 1.035$$

$$B2 \times I2 = 2.5 \times 0.7 \times 2.2 = 3.85$$

$$B3 \times I3 = 1 \times 0.4 \times 2.75 = 1.1$$

$$B4 \times I4 = 1.5 \times 0.4/2 \times 2.683 = 0.805$$

$$c = (B1 \times I0 + A5 \times I1 + B2 \times I2 + B3 \times I3 + B4 \times I4) / \Sigma B = (1.035 + 2.625 + 1.59 + 1.148) / 7.45$$

$$= 0.91 \text{ m}$$

다) 응력산정

$$e = \text{하중중심} - \text{단면중심} = 3.6/2 - \{(1.1 - 0.45) + 0.91\} = 0.24 \text{ m}$$

$$I/6 = 3.6/6 = 0.8 \text{ m} > e$$

$$M_u = P_u \times e = 1061.36 \times 0.24 = 254.73 \text{ tm}$$

$$I = 9.6063 \text{ m}^4$$

$$Z = 5.337 \text{ m}^3$$

$$\sigma = P/A \pm M/Z = 1061360/74500 \pm 25473000/5337000$$

$$= 14.25 \pm 4.77 = 19.02 \sim 9.48 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{압축지배}$$

라) 국부 지압검토

$$P_u = 19.02 \times \{(2.5 \times 0.7 + 1 \times 0.4 + 1.5 \times 0.4/2) \times 10000\} / 1000 = 470 \text{ ton}$$

$$req A = P_u / (0.7 \times 0.85 \times f_c) = 470000 / (0.7 \times 0.85 \times 240) = 3291.32 \text{ cm}^2$$

$$30 \times 60 \times 2 = 3600 \text{ cm}^2 > 3291.32$$

USE: PL-300×600×9(2개-상하부각각)

마) 검토결과

사전취약화시 구조물은 안전한 것으로 판단됨.

5) 발파시 응력검토

가) 계수하중 적용하지 않음

나) 강도저감계수 적용하지 않음

다) 작용하중

$$P = 700.896 \text{ ton}$$

$$M = 805.88 \text{ tm}$$

라) 발파시 잔존부 단면에서의 단면중심산정

$$A(\text{발파시}) = 47000 \text{ cm}^2$$

중심까지의 거리 C 산정

$$A1 \times I1 = 2.75 \times 0.25 = 0.69 \text{ m}^3$$

$$A2 \times I2 = 0.6 \times 0.8 = 0.48 \text{ m}^3$$

$$A3 \times I3 = 1.35 \times 0.7 = 0.95 \text{ m}^3$$

$$c = (A1 \times I1 + A2 \times I2 + A3 \times I3) / \Sigma A = (0.69 + 0.48 + 0.95) / 4.7 = 0.45 \text{ m}$$

마) 발파시 잔존부에 대한 응력 산정

$$I(\text{발파시}) = 0.359 \text{ m}^4$$

$$Z(\text{발파시}) = 0.55 \text{ m}^3$$

$$e = M/P = 805.88 / 700.896 = 1.15 \text{ m} \quad \text{하중중심이 기둥단면을 벗어남}$$

$$I/6 = 0.184 \text{ m} < e \quad \text{인장력 지배}$$

$\alpha = 2 / \{3 \times (1/2 - e/I)\}$ 에서 e/I 는 이미 0.5를 넘어서 교각의 인장측에서 인장력을 잡아주어야만 함

$$\sigma = P/A \pm M/Z = 700896/47000 \pm 80588000/550000 = 162 \sim -132 \text{ kg/cm}^2$$

$$x = 132 / (132 + 162) \times 110 = 49.39 \text{ cm}$$

$$I - x = 110 - 49.39 = 60.61 \text{ cm}$$

$$A_c = 550 \times 60.61 - (37.5 \times 10/2) \times 2 = 32960 \text{ cm}^2$$

박근순, 이준석, 박상수, 안경로

$$A_t = 47000 - 32960 = 14040 \text{ cm}^2$$
$$C = 162 \times 32960 / 2 = 2669760 \text{ kg} = 2669.76 \text{ ton}$$
$$T = 132 \times 14040 / 2 = 962000 \text{ kg} = 962 \text{ ton}$$

압축측 콘크리트와 압축철근의 내력

$$C_c = 240 \times 0.85 \times 60.61 \times 550 = 6800000 \text{ kg} = 6800 \text{ ton}$$
$$C_s = 3.0 \times 5.08 \times 55 = 836.6 \text{ ton}$$
$$C_c + C_s = 7636.6 \text{ ton} > C$$

바) 검토결과

압축 측 콘크리트와 압축철근의 내력은 인장측의 철근이 있을 때 압축응력을 충분히 견디고 있어 인장측에 발생하는 응력 962ton을 받고 있는 인장철근을 모두 없애야만 함. 즉 교각의 인장측 외부에서 50cm되는 부분까지 커팅하면서 인장철근을 모두 잘라낸다면 교각은 편심에 의한 모멘트로 인해 전도되어 붕괴될 것으로 사료됨.

사) 발파되는 부분의 D25 철근의 내력산정

$$i = \Gamma(I/A) = d/4 = 2.5/4 = 0.625 \text{ cm}$$
$$\lambda = I/i = 200/0.625 = 320$$
$$f_c = 0.277 \times 3.0 / (\lambda/\lambda_p)^2 = 0.118 \text{ t/cm}^2$$
$$n(\text{철근갯수}) = (1.4 \times 2 + 5.5) \times 2 \times 10 = 166 \text{ 개}$$
$$C_s/ea = A_c \times f_c = 5.07 \times 0.118 = 0.598 \text{ ton/ea}$$
$$C_s = 166 \times 0.598 = 99.27 \text{ ton}$$

아) 검토결과

발파시 파괴되는 콘크리트부분에서 노출되는 D25철근이 그대로 서있다고 가정하면 99.27ton의 하중을 받게 되므로 이 철근들에 의한 예기치 않은 거동을 사전에 방지할 수 있도록 발파시 화약에 의해 완전히 좌굴되도록 해야 함.

2.4 사전취약화

본 발파해체에서 사전취약는 구조안정성 검토를 거쳐 교각의 이상거동이 없는 범위에서 전도(Felling)공법에 맞게 원활한 전도와 하부 기초 손상을 최소화하기 위해 전도방향 전면부 상·하 절단 및 사전제거, 측면부 일부 사전제거 그리고 배면부 외측 철근 사전절단과 부분제거 작업을 실시하였다. 또한 후속작업인 발파 천공이 가능하도록 하였고, 사전취약화 작업동안에 교각에 경사계를 설치하여 이상여부를 체크하였다.

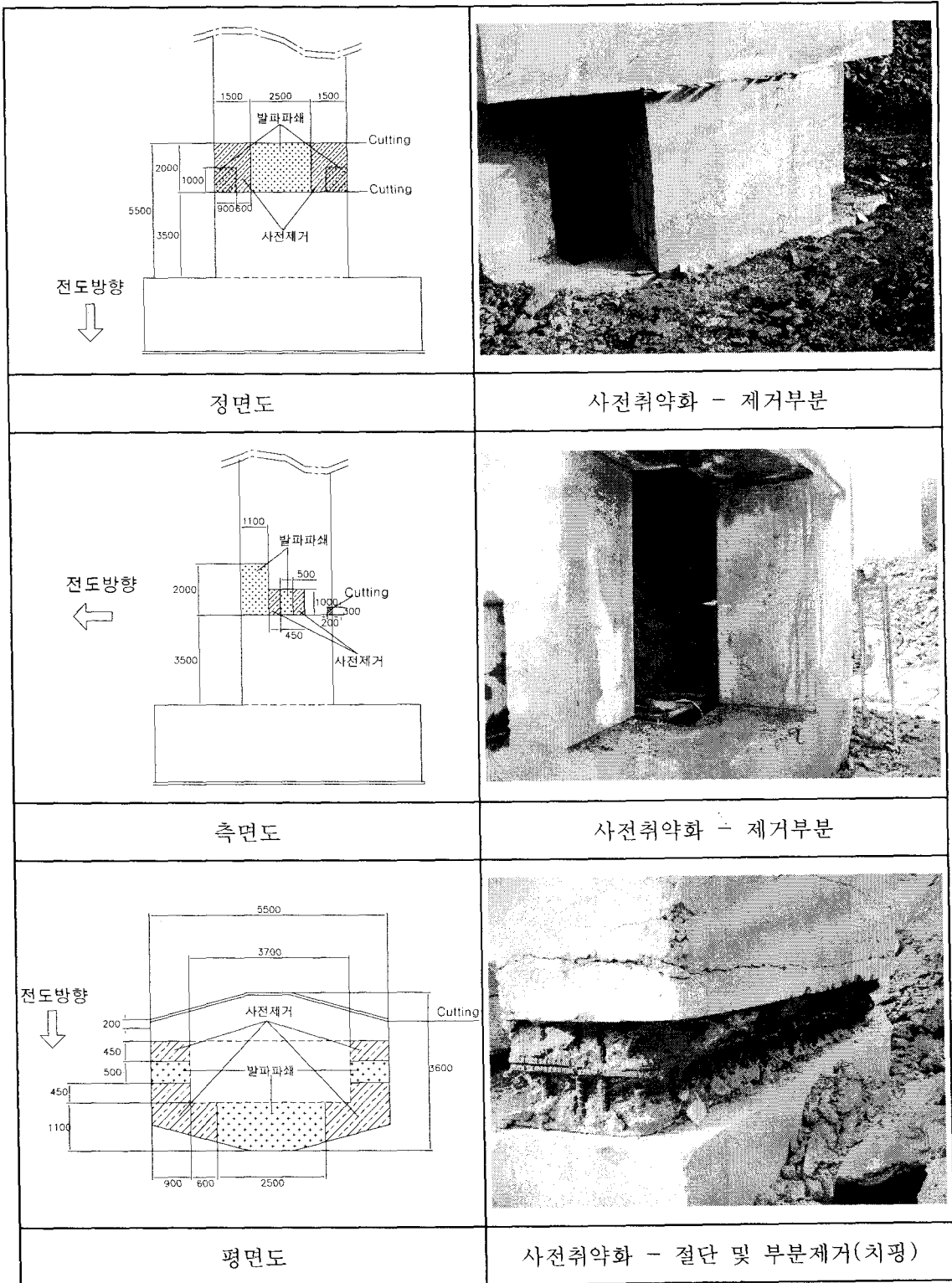


그림 5. 사전취약화 개요도 및 사진

2.5 천공 및 장약

천공작업은 전도방향 전면부와 측면부에 레그드릴(Leg drill)로 실시하였으며, 전면부 발파부재는 길이와 폭이 2.5m와 1.1m로 완전한 파쇄를 위하여 양쪽에서 2열 천공을 실시하였다.

장약작업은 25m/m 메가마이트와 MS전기뇌관을 사용하여 콘크리트 파쇄에 적당한 장약량을 분산장약(Deck charge)하여, 파쇄 효과를 높이면서 비산을 줄이도록 하였다.

표 6. 발파제원

천공경 [mm]	천공장 [m]	천공수 [EA]	뇌관수 [EA]	폭약량 [kg]	공당장약량 [kg/hole]
32	0.7~1.15	52	104	9	0.04~0.18

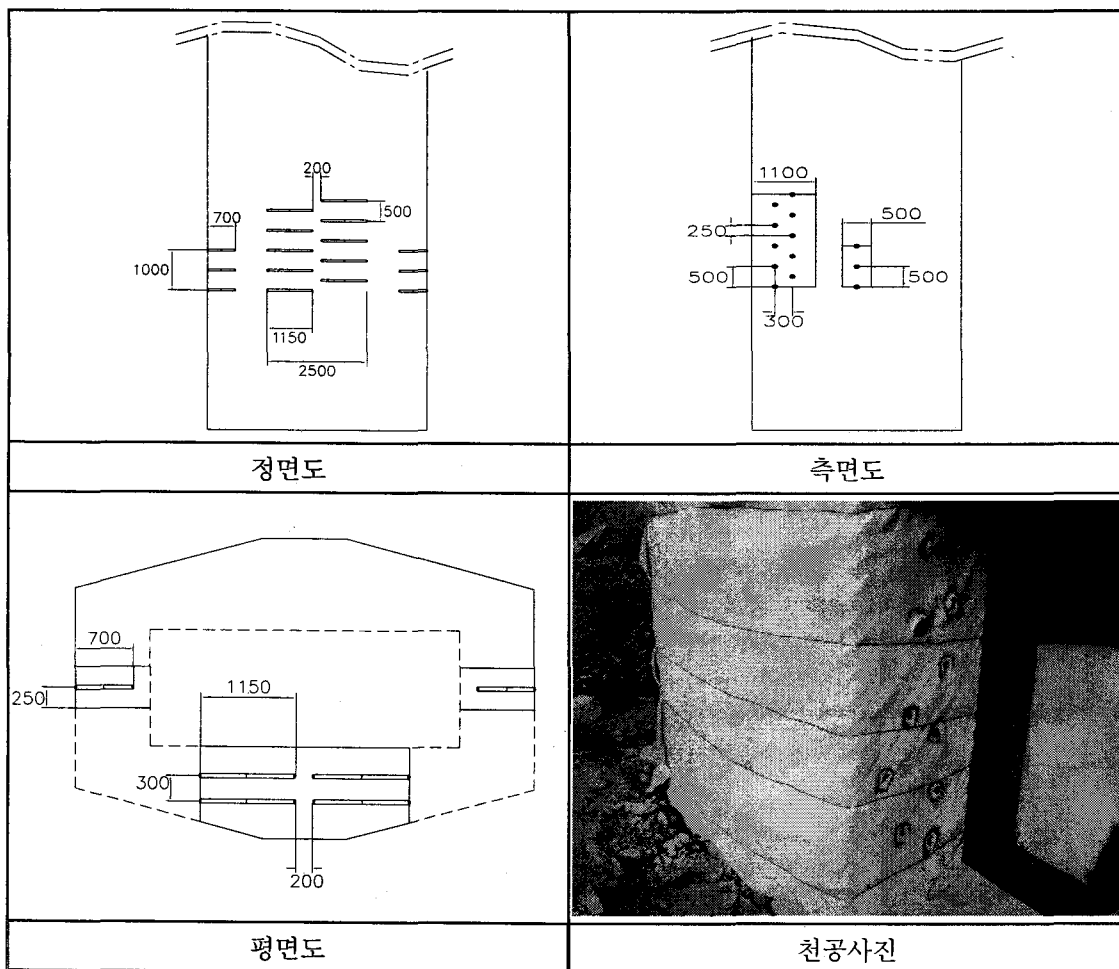


그림 6. 천공패턴도

2.6 방호 및 안전조치

1) 방호

방호는 1차 방호와 2차 방호로 구별된다. 1차 방호는 발파부재에서 화약이 폭발시 순간적으로 발생하는 비산과 폭풍압에 대한 1차 차단벽 역할을 하게 되며, 2차 방호는 구조물 붕괴시 파쇄된 잔재 및 1차 방호를 뚫고 나온 비산 등이 외부로 비산하는 것을 차단하고 폭풍압을 저감시키는 역할을 한다.

본 공사 발파부재에 시공된 1차 방호는 능형철망과 부직포를 설치하였고, 2차 방호는 인접교각 방향으로 강관파이프를 이용하여 가설펜스를 설치 천막과 부직포로 시공하였다.

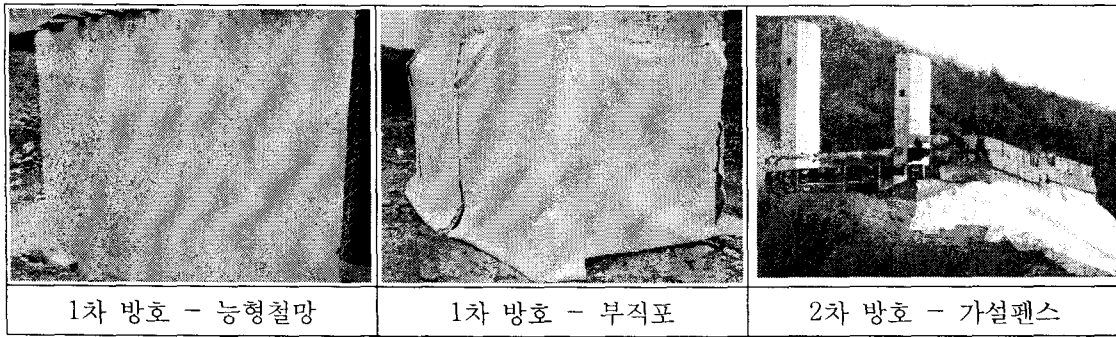


그림 7. 1차 방호 및 2차 방호

2) 안전조치

본 발파해체공사에 중점을 둔 안전사항은 발파 전 해체대상 교각이 사전취약화로 인한 안전에 대한 문제점과 발파 후 전도되는 교각이 인접지반 및 교각에 영향을 최소화 할 수 있도록 하는 것이다.

이를 위해서 해체대상 교각에 경사계를 설치하여 측정된 초기치를 기록 하고, 시간에 따른 경사계의 변위를 관찰하였다. 그리고 발파해체 교각이 전도되는 착지점에 토체를 형성하여 충격하중으로 인한 지반진동을 감소시키도록 하였다.

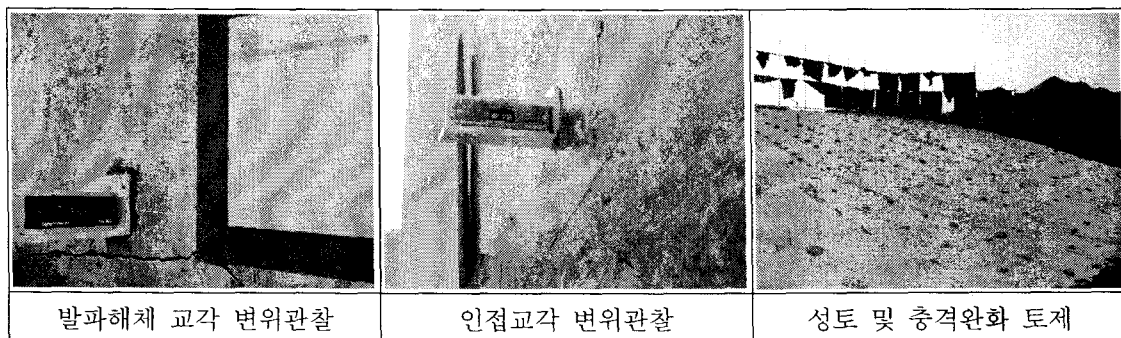


그림 8. 안전조치(변위관찰, 성토 및 충격완화 토제)

2.7 발파 및 계측

1) 발파

발파 전 장약 및 결선상태 그리고 기타 이상여부를 최종 점검 후 발파 1시간 전부터 발파모션을 저항시험기에 연결하여 이상 유무를 확인하였다.

한편 현장 내를 위험구역으로 설정하고, 현장 출입 도로에서 인원 및 장비통제를 실시하였다. 그리고 발파 30분 전부터 무전기를 통한 각 통제지점에서 예행연습을 실시하였고, 발파 시 까지 주기적으로 발파작업을 알리는 경보방송을 하였다.

발파 후 5분 동안은 불발 유무를 확인하는 등 안전 여부를 점검하였으며, 콘크리트 비산에 의한 주변 구조물 피해는 나타나지 않았다.

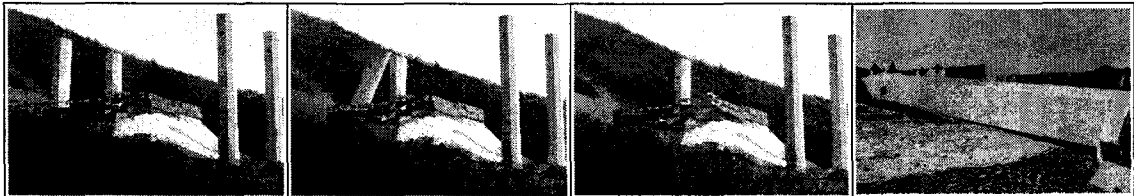


그림 9. 상행선 교각발파해체(높이 30m)

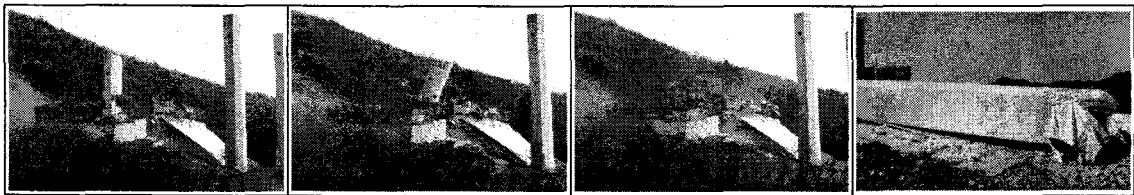


그림 10. 하행선 교각발파해체(높이 28m)

2) 계측

발파시 인접교각 구조물에 진동 및 음압을 측정하였고, 결과는 모두 안전하게 측정되었다. 인근마을에서 측정된 진동과 소음도 모두 허용치 이내로 안전한 수준이었다.

표 7. 인접교각 진동 및 음압 계측결과(교각간 이격거리 46m)

구분	진동				음압
	Tran Peak [cm/sec]	Vert Peak [cm/sec]	Long Peak [cm/sec]	PVS [cm/sec]	Mic [dB(L)]
상행선 (1회 발파)	0.171	0.089	0.171	0.222	139.1
하행선 (2회 발파)	0.057	0.032	0.045	0.068	134.5

표 8. 인근마을 진동 및 소음 계측결과

구분	진동[dB(V)]	소음[dB(A)]	비고
상행선(1회 발파)	41.8	69.9	소음은 Max, LF
하행선(2회 발파)	42.8		

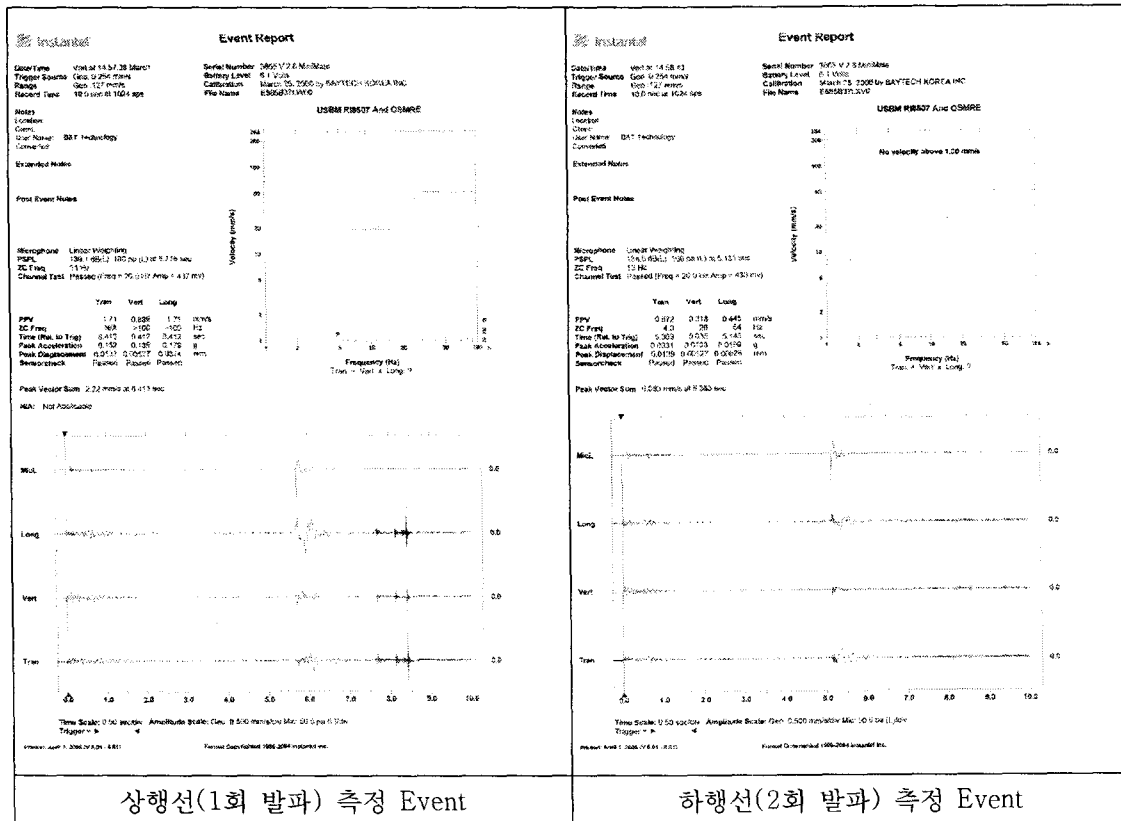


그림 11. 인접교각 진동 및 음압측정 Event Report

2.8 폐기물처리

전도된 교각은 대형 브레카와 압쇄기로 콘크리트와 철근 분리작업을 하였고, 콘크리트 파쇄 시 발생하는 먼지를 줄이기 위해 살수작업을 실시하였다.



그림 11. 콘크리트파쇄 및 철근분리

3. 결 론

- 1) 본 현장에 적용된 발파해체공법은 전도방향의 비탈면을 성토하여 공간을 확보한 후 기술적으로 가장 간단하고 경제적인 전도공법(Felling Method)으로 설계하였다.
- 2) 구조안정성 검토를 거쳐 교각의 원활한 전도와 하부기초 손상을 최소화하기 위해 전면부 상단 절단과 일부 사전제거, 측면부 일부 사전제거 그리고 배면부 외측 철근 사전절단과 부분제거 작업을 실시하였고 지속적인 변위상태를 확인하며 안전하게 작업을 수행하였다.
- 3) 천공과 장약은 전도방향 전면부 양쪽과 측면부에 각각 실시하였으며, 분산장약(Deck charge)을 실시하여 파쇄 효과를 높이면서 비산을 줄이도록 하였다.
- 4) 발파 시 인접교각 및 마을에서 측정된 발파진동 및 음압, 충격진동은 안전한 수준으로 계측 되었으며, 계획된 방향으로 정확히 전도된 교각은 2차 파쇄와 철근분리 작업 후 신속하게 폐기물로 처리하였다.
- 5) 본 현장 교각구조물의 성공적인 발파해체 시공사례로 볼 때 향후 대형 콘크리트구조물의 기능상실, 설비교체 또는 재건축을 위한 철거작업 시 발파해체공법 적용은 보다 안전하고 경제적인 공법으로 판단된다.