

원통형 시멘트 사일로 발파해체 시공사례

박 훈* · 박형기 · 김상철 · 석철기¹⁾

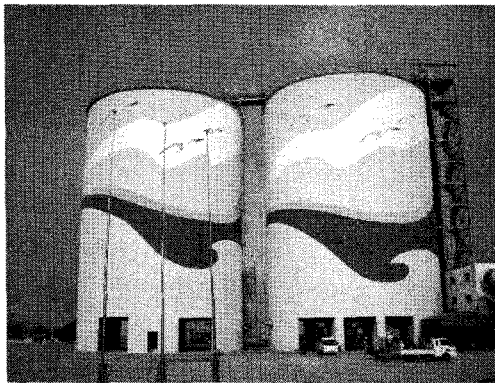
1. 서론

최근 구성재료의 노후화와 설비시설의 기능 상실에 따른 산업구조물의 해체 수요가 증가하고 있다. 산업구조물은 설비시설에 따른 다양한 형태와 구조를 가지고 있으며, 대규모, 고강도, 고강성의 특징을 보인다.

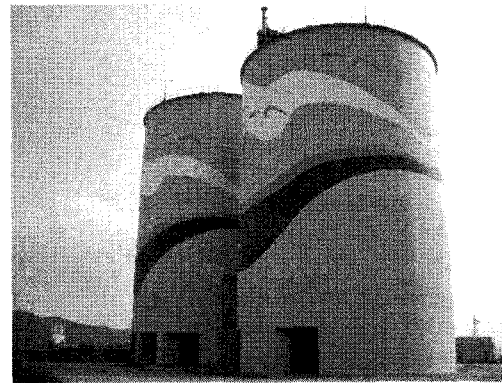
산업구조물 중 시멘트 사일로는 원통형 철근콘크리트 셸(shell) 구조로 슬립폼(slip form) 공법으로 시공하여, 시공 이음(expansion joint)이 없는 구조물이다(Elliot and Woolf, 2000). 또한 콘(cone)과 링거더(ring girder)로 구성된 내부 구조물은 원통형 철근콘크리트 셸과 분리된 독립적인 구조물로서 발파해체가 용이하지 않다.

본 시공사례는 쌍용양회 영종도 출하기지 철거공사 중 시멘트 사일로 발파해체 사례로써 10,000톤급 원통형 시멘트 사일로인 No.2 사일로의 발파해체에 대해 기술하였다.

영종도 출하기지는 인천 국제공항 건설공사의 시멘트 공급을 위하여 1997년에 건설되어 해상 공급을 개시하였으나, 2001년 육상 공급으로 인하여 운영이 중단되었고 출하기지로서의 기능을 상실하여 해체 대상이 되었다. 발파해체 대상 구조물은 출하기지 내의 15,000톤급 No.1 사일도와 10,000톤급 No.2 사일로인 철근콘크리트 원통형 시멘트 사일로이다. 그림 1은 발파해체 대상 구조물의 전경을 나타낸 것이다.



(a) 정면



(b) 측면

그림 1. 발파해체 대상 구조물의 전경

1) (주)코리아카코

2. 발파해체 계획

2.1 해체 대상 구조물의 구조

그림 2는 발파해체 대상 구조물인 시멘트 사일로의 입면도를 나타낸 것이다. 북쪽의 No.1 사일로와 남쪽의 No.2 사일로 2기로 No.1 사일로의 외경 및 높이는 각각 24.9m, 36.1m이며, No.2 사일로의 경우 22.9m, 33.3m이다. 철근콘크리트조 및 철골조로 이루어져 있으며 두 사일로 외벽 간의 거리는 3.6m 이격되어 있다.

No.2 사일로의 원통형 셸과 링거더 사이에 100mm의 익스펜션 갭(expansion gap)인 스티로폼이 있으며, 링거더의 최대 높이는 약 4m, 링거더 하단에서 내부 콘 상부까지의 높이는 약 18.5m로서 전체 높이의 55.6%를 차지하고 있다. 이 링거더와 내부 콘은 원통형 셸과는 분리되어 있으며 독립적인 거동을 한다. No.2 사일로의 높이 대 외경의 비는 약 1.45이며, 원통형 셸의 두께는 450mm이다.

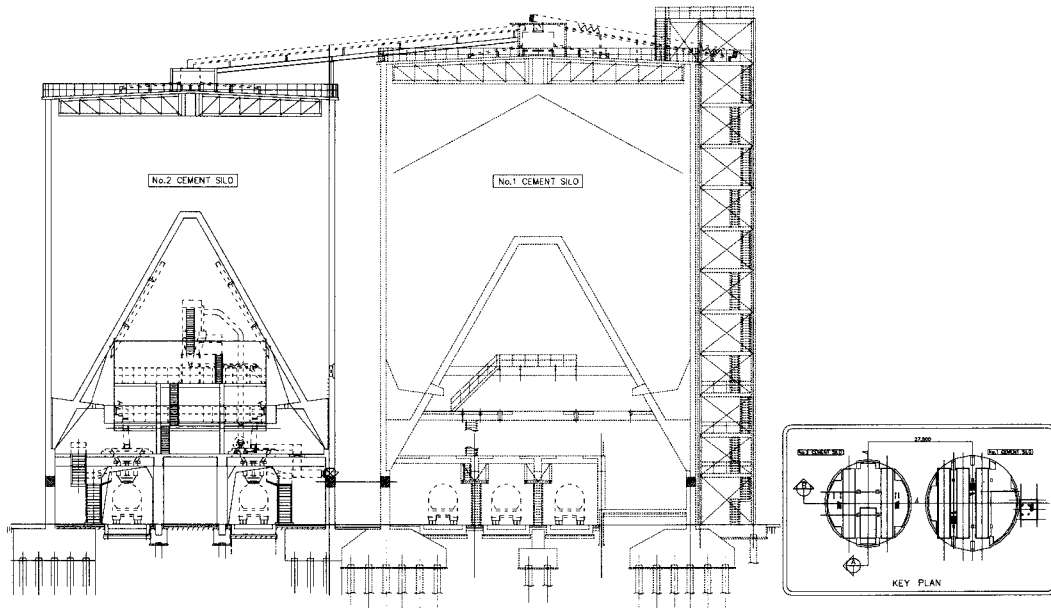


그림 2. 시멘트 사일로 입면도

2.2 해체 대상 구조물의 주변 현황

발파해체 대상 구조물의 주변 현황은 그림 3과 같이 No. 2 사일로를 중심으로 북쪽으로 는 시멘트 수송을 위한 점안시설 및 연결도교가 있으며, 북서쪽으로는 모래 수송을 위한 부두가 있다. 남서쪽으로는 콘크리트 블록조인 군부대 막사가 약 130m 이격되어 있으며, 북쪽에서부터 동쪽까지의 호안은 피복석으로 덮여 있다. 다음 표 1은 주변 구조물의 규모 및 제원을 나타낸 것이다.

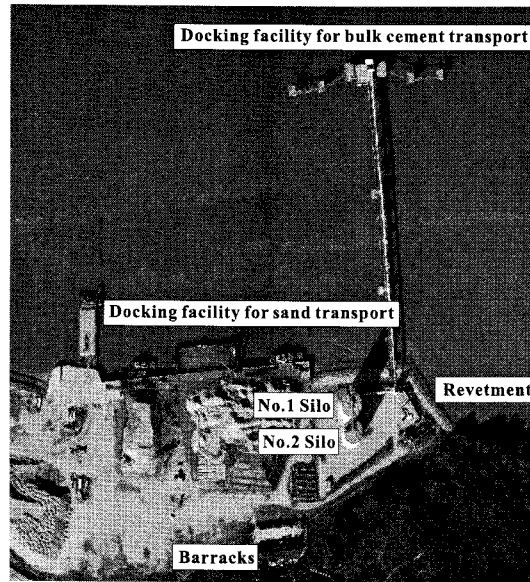


그림 3. 주변 현황

표 1. 주변 구조물의 규모 및 제원

구분	시멘트 부두	모래부두	호안	군부대
구조형식	돌핀식(Dolphin)	중력식(Solid block)	호안(피복석)	콘크리트 블록조
길이	접안시설 : 186.0m 연결도교 : 336.8m	260.0m	183.2m	50m
폭	—	상치콘크리트 : 2.5m	—	17m

2.3 해체방법 및 붕괴방향 선정

발파해체 대상 구조물인 No. 2 사일로는 높이 대 외경의 비가 작고, 원통형 셸과 링거더가 분리되어 있기 때문에 사일로 전체의 완전한 전도가 용이하지 않다. 따라서 정방향(계획된 붕괴 방향)으로 전도시키기 위해서는 역방향(계획된 붕괴 반대방향)에서 원통형 셸의 인장파괴를 유도해야 한다.

본 사일로 발파해체에서는 정방향 쪽의 기둥과 링거더 일부를 발파하여 링거더와 내부 콘이 정방향으로 기울어지면서 역방향의 원통형 셸이 FL+ 5.ᵐ500^{LEV}.~ FL+ 6.ᵐ500^{LEV}. 부분에서 인장파괴가 발생되고 원통형 셸의 회전에 의한 모멘트에 의해 FL+ 11.ᵐ000^{LEV}.~ FL+ 12.ᵐ000^{LEV}. 부분에서 휨파괴가 발생하도록 계획하였다.

또한 발파해체시 정방향으로 다량의 순간분진 및 큰 폭풍압이 발생할 가능성이 크기 때문에 주변 시설물의 위치를 고려하여 그림 4와 같이 동쪽방향으로 붕괴방향을 설정하였다.

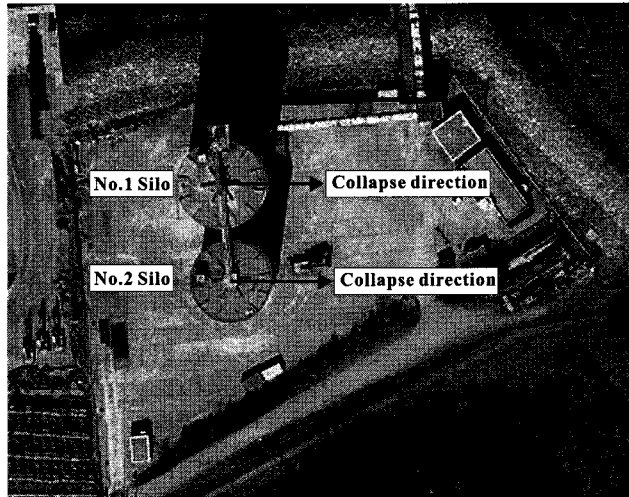


그림 4. 시멘트 사일로의 예측 붕괴방향

3. 발파해체 설계 및 주요 공정

3.1 발파구역 선정

원통형 구조물의 경우에서 한 방향으로 전도를 유도하기 위해서는 개구부의 형태, 개구부의 각도, 개구부의 높이를 고려해야 발파구역을 선정해야 한다(Stangenberg, 1994, 박 훈 외, 2008).

본 사일로 발파해체에서는 사일로가 발파 후 충분한 회전모멘트가 발생되기 전까지 후방 파쇄(kick back)를 방지하기 위해 개구부의 형태를 사다리꼴로 선정하였으며, 개구부의 각도는 수직방향의 초기속도를 증가시키기 위해 원통형 사일로의 약 70%인 25°로 선정하였다. 개구부의 높이는 다음 식 (1)을 사용하였다.

$$H = B \tan \phi \tag{1}$$

여기서, H는 개구부의 높이(m), B는 힌지선(hinge line)에서의 최대거리(m), ϕ 는 개구부의 각도(°)이다. B=18.45m, $\phi=30^\circ$ 일 때, H=10.65m이며, No. 2 사일로에서는 정방향의 원통형 셸이 지면에 직접 충돌할 수 있도록 개구부의 높이를 11.8m로 선정하였다.

3.2 환경영향 검토

가. 지반진동

구조물 발파해체시 발생하는 지반진동은 폭약의 폭발에 의한 발파진동과 구조물의 낙하에 의한 충격진동으로 대별된다. 본 발파해체 현장에서의 발파진동 예측식(Wang, 2007)은 다음 식 (2)와 같다.

$$V = 32.1(Q^{1/3}/R)^{1.57} \tag{2}$$

여기서, V 는 발파진동속도(cm/s), Q 는 지발당 최대장약량(kg), R 은 이격거리(m)이다. 지발당 최대장약량은 40kg, 이격거리는 130m 일 때 군부대 막사에서 발파진동 예측치는 0.1cm/s 이다.

충격진동을 예측하기 위해 낙하충격에 대한 충격량은 식(3)과 같으며, 낙하충격에 의한 충격진동 예측식(Wang, 2007)은 식 (4)와 같다.

$$I = M(2gH)^{1/2} \quad (3)$$

$$V = 0.08(I^{1/3}/R)^{1.67} \quad (4)$$

여기서, V 는 충격진동속도(cm/s), I 는 충격량(kg·m/s), R 은 거리(m), M 은 낙하중량(kg), g 는 중력가속도(m/s²), H 는 낙하높이(m)이다. 링거더와 내부 콘, 상부 원통형 셸의 중량은 약 3,600ton이며, 링거더 상단까지 높이는 10.3m 일 때 거리가 130m 이격된 군부대 막사에서 충격진동 예측치는 0.46cm/s이다.

따라서, 본 발파현장에서 발파진동과 충격진동을 고려한 지반진동의 허용기준치를 0.5cm/s로 설정하였다.

나. 비석

비석에 대한 영향을 검토하기 위해 다음 식 (5)를 적용하였다.

$$L = 20 \frac{(Q^{1/3}/W)^2}{g} K \quad (5)$$

여기서, L 은 비산거리(m), Q 는 공당 장약량(kg/hole), W 는 최소저항선(m), g 는 중력가속도(m/s²), K 는 경험상수 이다. 공당 장약량은 1.0625kg, 최소저항선은 0.5m, K 는 3.0을 적용한 결과 예측 비산거리는 약 25.5m로 나타났다.

3.3 사전취약화

구조물의 구조적 강성을 작게 하고, 계획된 방향으로의 붕괴를 원활하게 하기 위해 사전취약화를 수행하였다. 사전취약화는 일부 원통형 셸, 링거더에 대해 완전파쇄를 실시하였으며, 설계된 개구부의 형태 및 높이에 맞게 취약화를 수행하였다. 또한 내부 철골 계단은 붕괴방향을 고려하여 산소절단을 수행하였다. 역방향에서 원통형 셸의 인장파괴와 휨파괴를 원활하게 하기 위해 FL+ 5.^m500^{LEV}.와 FL+ 11.^m000^{LEV}. 지점에 각각 1m, 2m의 슬롯을 만들었다. 그림 5는 FL+ 0.^m000^{LEV}.에서의 사전취약화 범위를 나타낸 것이다. 센터라인을 중심으로 좌우 대칭으로 사전취약화를 수행할 계획이었으나, 시공과정에서 구조적 안정성 때문에 우측부분은 발파구간으로 변경하였다. 그림 6은 사전취약화 작업 중으로 링거더 상단의 원통형 셸을 취약화하는 모습이다.

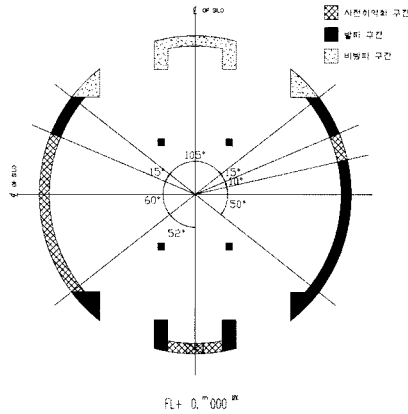


그림 5. 사전취약화 구간

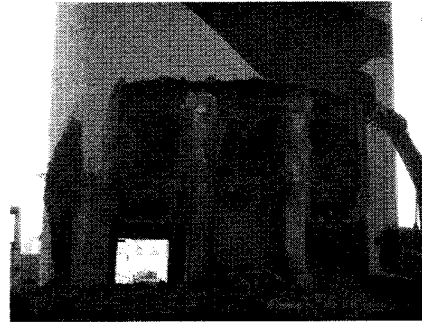


그림 6. 사전취약화 작업

3.4 시험발파

시험발파는 그림 7과 같이 No. 1과 No. 2 사일로에서 발파대상인 기둥 및 원통형 셸에 대해 실시하였다. 발파대상 부재의 형상 및 철근 배열 등을 고려하여 4가지 type에 대해 천공장과 장약량, 장약방법을 달리하여 시험발파를 하였으며, 발파 제원은 표 2와 같다. 그림 8은 각 TYPE 별 천공 및 장약상세도를 나타낸 것이다. TYPE 1, TYPE 2, TYPE 3은 No. 2 사일로 발파해체시 기둥 발파에 대한 시험발파이고, TYPE 4는 원통형 셸 발파에 대한 시험발파이다.

표 2. 시험발파 발파 제원

구분	TYPE 1	TYPE 2	TYPE 3	TYPE 4
천공장(mm)	1,520	600	420	470
공간격(mm)	800	800	800	500
천공수(ea)	2	2	2	12
공당장약량(kg/hole)	0.875	0.3125	0.125	0.1875
비장약량(kg/m ³)	0.625	0.521	0.372	1.0

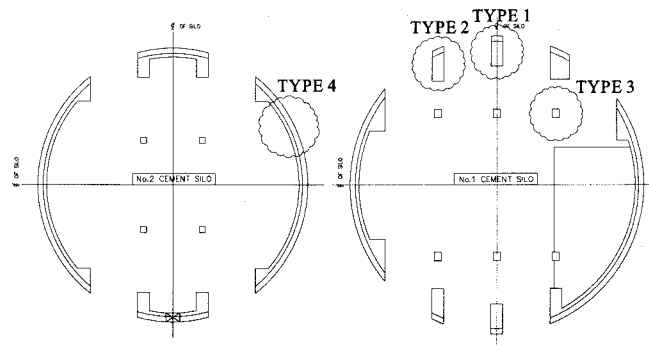


그림 7. 시험발파 위치도

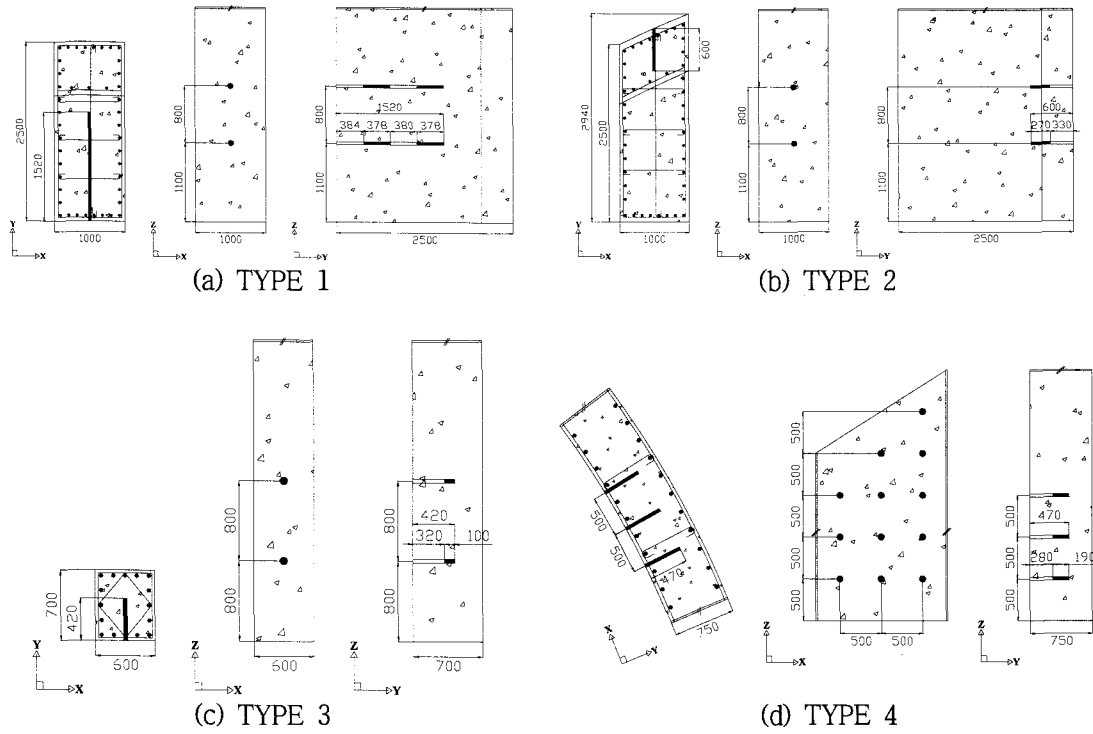


그림 8. TYPE 별 천공 및 장약 상세도(unit: mm)

시험발파 결과 분석은 그림 9와 같이 발파 후 콘크리트의 파쇄와 비산 정도를 육안으로 확인하였다. TYPE 1의 경우 기둥 하부에 이음철근이 배근되어 있어서 기둥 하부공에 의한 파쇄가 부족했으나, 상부공의 경우에는 과파쇄가 되어 비산이 발생하였다. 따라서 본발파 설계에서 기둥 하부공은 비장약량을 증가시키고, 상부공은 비장약량을 감소시켰다. TYPE 3의 경우에는 적절한 파쇄가 발생하였으나 이음철근의 영향을 고려하여 본발파 설계에서는 천공 높이를 조절하여 천공하였다. TYPE 2, TYPE 4는 적절한 파쇄가 발생하여 본발파 설계에 그대로 적용하였다.

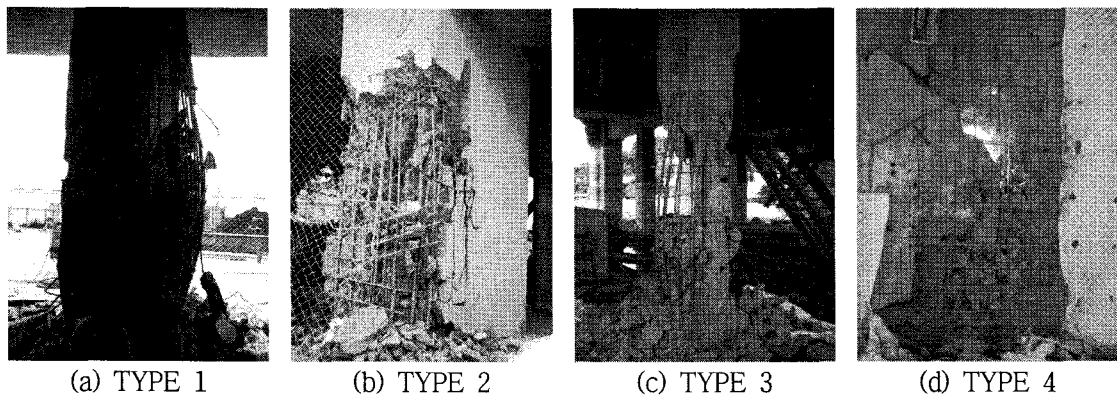


그림 9. 시험발파 결과

3.5 천공, 장약 및 결선

발파대상 부재의 규모, 형태, 파쇄정도 등에 따라 5가지 TYPE로 구별하여 천공 및 장약 패턴을 설계하였다. 천공경은 $\phi 38\text{mm}$ 이고, 천공장은 각 TYPE 별로 상이하며, TYPE 1, TYPE 2, TYPE 5의 경우에는 동일한 TYPE에서도 규모, 형태 및 파쇄정도에 따라 서로 다른 천공장으로 설계하였다.

TYPE 1의 경우에는 기둥 하부는 이음철근에 의한 영향과 완전파쇄를 위해 격자형으로 5공을 천공하였으며, 나머지 부분에 대해서는 중앙에 천공을 하였다. 또한 기둥의 단면이 크고, 철근의 배근 및 콘크리트 덧붙이기 때문에 양방향에서 천공을 하였다. 링거더는 부분 파쇄를 위해 2공을 외부에서 중앙에 천공하였다.

TYPE 2의 경우에는 기둥의 형태가 삼각형을 이루고 있어서 양 측면공(A열)과 중앙공(B열)의 천공장이 상이하다. 또한 링거더는 2열로 2공씩 천공하였으며, 링거더의 형태에 따라 천공장을 달리하였다.

TYPE 5는 원통형 셸의 두께가 FL+ 5.㎡900^{LEV}.에서 750mm에서 450mm로 줄어들기 때문에 2가지 천공패턴으로 설계하였다. 750mm의 원통형 셸은 내부에서 천공하였으나, 450mm의 원통형 셸은 링거더의 영향으로 외부에서 천공하였다.

다음 표 3은 TYPE 별 천공 제원을 나타낸 것이다. No.2 시멘트 사일로 발파에 사용된 총 천공수는 343공이고, 총천공장은 173.89m 이다.

표 3. 천공 제원

구분	천공장(mm)		공간격(mm)	천공수(ea)	총천공수(ea)	총천공장(m)	
TYPE 1	1-1, 1-3	내부	600	400	4	8	4.8
		외부	1,126		2	4	4.504
	1-2	내부	600	400	1	2	1.2
		외부	1,188		1	2	2.376
	1-4~1-7	내부	600	800	4	8	4.8
		외부	1,270		4	8	10.16
	1-8	외부	1,000	1,600	1	2	2.0
1-9	외부	1,500	1,600	1	2	3.0	
TYPE 2	2-A	외부	500	800	12	24	12.0
	2-B	외부	1,000	800	6	12	12.0
	2-C-1	외부	1,000	1,600	2	4	4.0
	2-C-2	외부	1,550	1,600	2	4	6.2
TYPE 3	—	—	300	600	2	8	2.4
TYPE 4	—	내부	470	500	12	24	11.28
TYPE 5	5-1	내부	470	500	154	154	72.38
	5-2	외부	270	400	77	77	20.79
계	—	—	—	—	—	343	173.89

본 발파해체에서 사용된 폭약은 MegaMITE I (다이너마이트) 28mm이며, 본당 중량 125g, 약장은 180mm이다. TYPE 별 장약량은 시험발파 후 콘크리트의 파쇄정도, 기둥의 형태 및 철근의 배근 등을 고려하여 설계하였으며, TYPE 1 기둥의 경우 내부에서 천공된 발파공은 분산장약을 실시하였다. No. 2 사일로 발파해체에 사용된 총폭약량은 71.864kg이었다. 다음 그림 10은 천공 및 장약 패턴도를 나타내며, 표 4는 장약 제원을 나타낸 것이다.

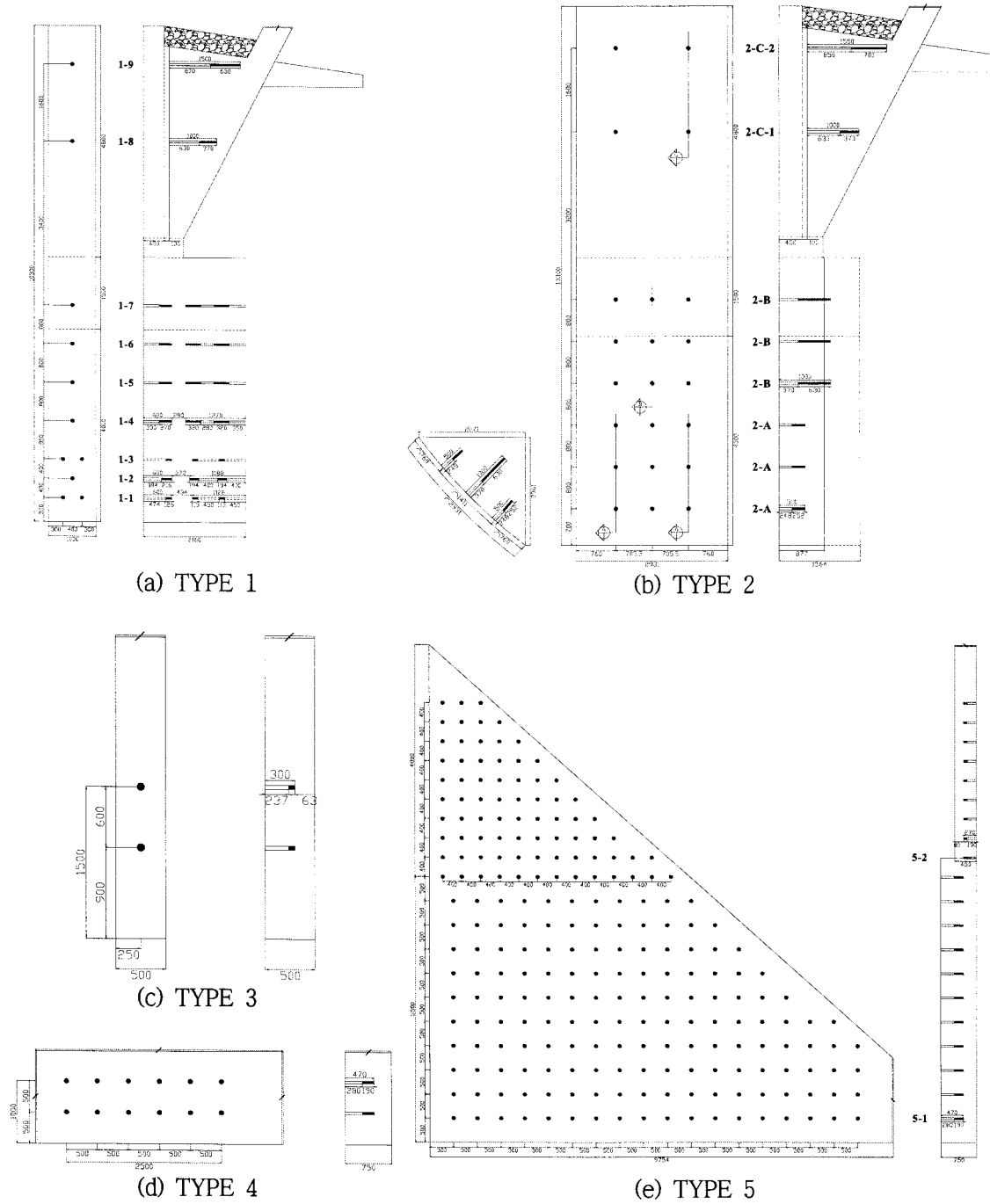


그림 10. 천공 및 장약 패턴도(unit: mm)

표 4. 장약 제원

구분	공당장약량(kg/hole)		비장약량(kg/m ³)	총장약량(kg/tot)	
	내부	외부			
TYPE 1	1-1, 1-3	내부	0.225	0.81	1.8
		외부	0.125		0.5
	1-2	내부	0.45	0.81	0.9
		외부	0.25		0.5
	1-4~1-7	내부	0.75	0.61	6.0
		외부	0.3125		2.5
1-8	외부	0.4375	0.41	0.875	
1-9	외부	0.625	0.36	1.25	
TYPE 2	2-A	외부	0.25	0.51	6.0
	2-B	외부	0.625	0.51	7.5
	2-C-1	외부	0.375	0.24	1.5
	2-C-2	외부	0.5625	0.22	2.25
TYPE 3	—	—	0.0625	0.42	0.5
TYPE 4	—	내부	0.1875	1.0	4.5
TYPE 5	5-1	내부	0.1875	1.0	28.875
	5-2	외부	0.0833	1.16	6.414
계	—	—	—	—	71.864

기폭방법은 TYPE 1, TYPE 2, TYPE 3은 전기뇌관, TYPE 4와 TYPE 5는 10g/m의 도폭선을 이용하여 전기뇌관으로 기폭하였다. 본 발파해체에 사용된 전기뇌관은 118개, 도폭선은 290.6m 이다. 기폭시차는 그림 11과 같으며, 원통형 셀 부분인 TYPE 4와 TYPE 5가 최초 기폭된다. 정방향으로 기둥 및 링거더가 순차적으로 기폭되고 개구부의 각도가 증가되면서 원통형 사일로는 정방향으로 거동하게 된다.

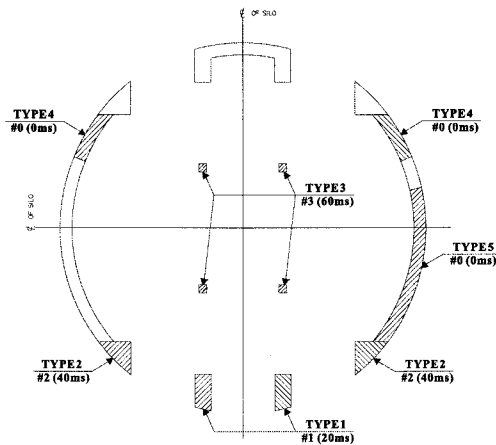


그림 11. 기폭시차

3.6 환경영향 감소 대책

비산을 방지하기 위해 방호는 발파구간에 1차 방호로 장섬유 부직포 150g/m², 200g/m²와 #8 능형철망을 사용하였으며, 원통형 사일로 주위를 구갑망으로 2차 방호 하였다. 충격진동을 감소시키기 위해서 정방향으로 사일로의 외벽에서 20m, 30m 지점에 높이 2m의 흙둑을 설치하고 장섬유 부직포로 흙둑을 덮었다. 또한 발파해체시 발생하는 분진을 제어하기 위해 사일로의 측면으로 살수건을 6m 간격으로 설치하였다. 그림 12는 환경영향 감소 대책으로 방호, 흙둑, 살수장치를 나타낸 것이다.

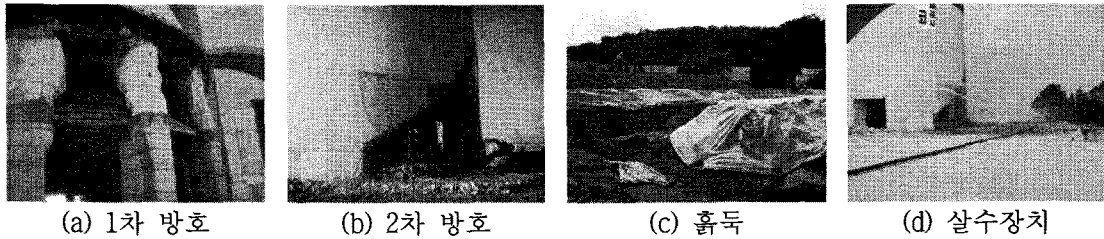


그림 12. 환경영향 감소 대책

4. 발파해체 결과

4.1 붕괴거동

No. 2 사일로의 발파구역이 기폭된 후, 정방향으로 기울어지면서 1.0s 후에 원통형 사일로의 역방향 FL+ 5.000^{LEV} 지점에서 사전취약화한 슬롯을 중심으로 인장파괴가 발생하기 시작하였다. 1.4s 후부터 지지점을 중심으로 사일로가 정방향으로 회전하면서 2.3s 후에 FL+ 11.000^{LEV} 지점의 슬롯에서 휨파괴가 발생하였다. 그 후 FL+ 11.000^{LEV} 이상의 링거더 상부에 있는 원통형 셸이 회전하면서 5.6s 후에 사일로 상단이 지면에 충돌하였다. 그림 13은 No.2 원통형 사일로의 붕괴거동 연속사진이다.

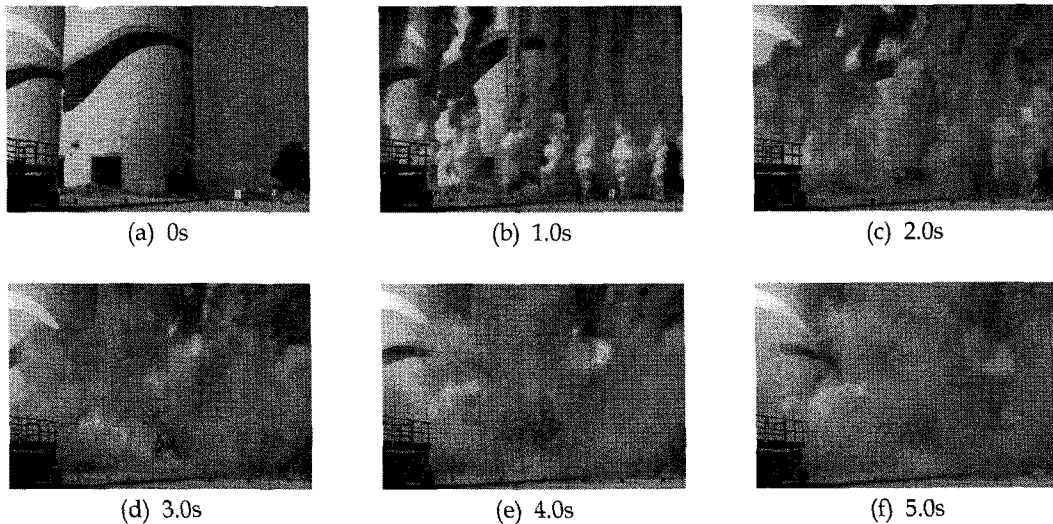


그림 13. 원통형 사일로의 붕괴거동 연속사진

4.2 지반진동

발파해체시 발파진동과 충격진동에 의해 발생하는 지반진동을 No.2 시멘트 사일로 주변 4개소에서 측정하였다. 군부대 막사에서 측정된 지반진동은 0.243cm/s로 지반진동 허용기준치인 0.5cm/s 이하로 발파진동의 예측치인 0.1cm/s보다 크며, 충격진동의 예측치인 0.46cm/s보다 작게 측정되었다. 전체적인 지반진동은 허용기준치 이하로 측정되었으나 본 사일로 발파해체에서는 붕괴거동 특성상 발파진동이 충격진동보다 크게 측정되었다. 그림 14는 지반진동 측정 위치를 나타낸 것이며, 표 5는 지반진동 측정결과를 나타낸 것이다.

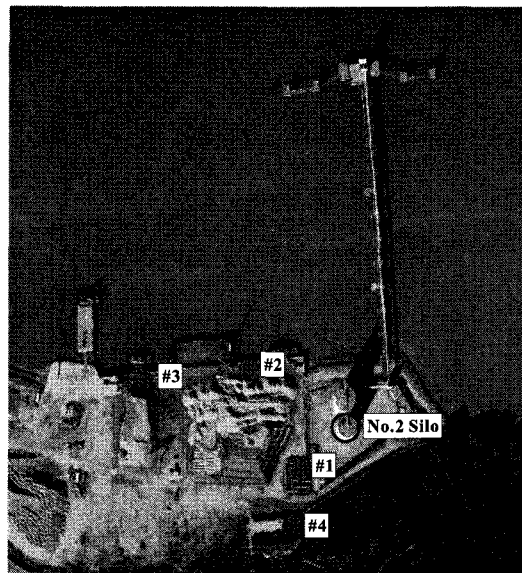


그림 14. 지반진동 측정 위치

표 5. 지반진동 측정결과

구분	PPV(cm/s)			PVS(cm/s)	소음dB(A)	거리(m)	위치
	Tran.	Vert.	Long.				
#1	0.114	0.254	0.191	0.264	93.2	75	야적장
#2	0.114	0.190	0.114	0.192	102.2	110	모래부두
#3	0.038	0.127	0.025	0.128	95.4	215	모래부두
#4	0.114	0.241	0.178	0.243	103.4	130	군부대

지반진동에 대한 영향을 파악하기 위해 그림 15와 같이 발파 전 군부대 막사 외벽에 균열 및 기울기를 측정 후, 발파 후 동일한 위치에서의 균열 및 기울기를 측정하였다. 표 6에 나타난 것과 같이 측정결과 측정값은 거의 변화가 없으며 지반진동에 의한 구조물의 피해가 없음을 확인할 수 있었다.

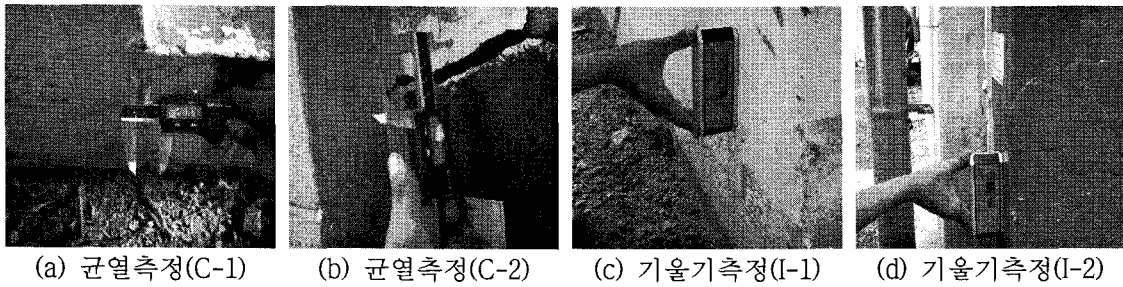


그림 15. 균열 및 기울기 측정

표 6. 균열 및 기울기 계측결과

구분	균열(mm)		기울기(°)		측정위치
	C-1	C-2	I-1	I-2	
발파 전	20.83	36.29	89.2	88.7	군부대 막사
발파 후	20.84	36.29	89.2	88.7	
변형량	+0.01	0	0	0	

4.3 분진

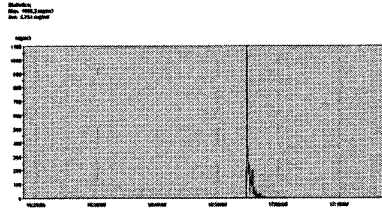
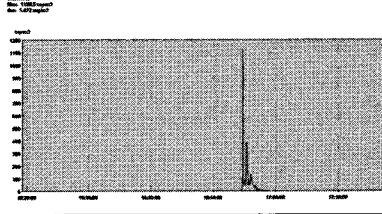
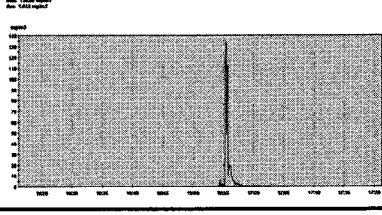
No. 2 시멘트 사일로 발파해체시 다량의 분진 발생이 예상되는 3개의 지점에 분진측정기를 설치하여 발파해체 전부터 해체 후 대기가 안정화되었다고 판단된 시점까지 약 1시간 동안 초단위로 순간분진을 측정하였다.

측정결과 정방향에 위치한 측정점 A와 측정점 B에서는 측정점 C보다 약 8배 이상의 순간분진이 발생하였다. 이것은 사일로 내부에 잔류된 다량의 시멘트 분진이 사일로가 전도되면서 발생하는 폭풍압에 의해 정방향으로 집중되면서 발생한 현상으로 판단된다. 또한 분진제어를 위해 설치한 살수건의 수압이 적어 분진제어 효과는 미미하였다. 표 7은 현장 기상 상태 및 측정점의 위치를 나타낸 것이며, 표 8은 분진측정 결과를 나타낸 것이다.

표 7. 현장 기상 상태 및 측정점 위치

온도	28.7℃	
상대습도	61.2%	
기압	757.55mmHg	
풍속	2.3~4.8m/s	

표 8. 분진측정 결과

측정위치	분진 최대 발생량	시간대별 분진측정 그래프
측점 A	1099.3mg/m ³	
측점 B	1120.5mg/m ³	
측점 C	134.06mg/m ³	

5. 결론

본 시공사례는 산업구조물 중 기능성을 상실한 시멘트 사일로를 정확하고 안전하게 발파해체시킨 사례로서 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 본 시멘트 사일로는 높이 대 외경의 비가 작으며, 내부 콘과 링거더가 원통형 셸과 분리되어 있기 때문에 전도가 용이하지 않지만, 정확한 붕괴거동을 위한 사전취약화 및 발파설계로 주변에 피해없이 발파해체를 완료하였다.
- 2) 사전취약화 시공과정에서 구조적인 문제로 인해 설계상의 사전취약화 구간을 시공과정에서 변경해야하는 문제점이 발생하였으며, 시공과정에서의 구조 안정성 해석이 요구되었다.
- 3) 분진제어를 위한 살수장치는 낮은 수압 때문에 분진제어 효과가 미미하였으며, 설치 및 이동에 따른 효율성이 떨어져 이에 대한 보완이 요구되었다. 또한 구조물의 붕괴거동에 따른 분진 발생 특성을 분석하여, 이에 적합한 분진제어 장치 및 방법에 대한 연구가 요구되었다.

향후, 원통형 시멘트 사일로 발파해체시 발생할 수 있는 문제점들을 검토하고 보완하면, 시·공간적 환경위해요소를 최소화할 수 있는 가장 경제적이고 효율적인 해체공법으로 그 수요가 증가할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 첨단도시개발사업 (06 건설핵심 B04)에 의해 발파해체 기술의 요소시험이 일부 수행되었습니다.

참고문헌

1. 박 훈, 석철기, 김승곤, 2008, 원통형 구조물의 발파해체설계에 대한 최신 발파해체 시뮬레이션기법의 적용, 화약발파, 대한화약발파공학회지, Vol. 26, No. 1, pp. 7-14.
2. Elliott, R. J. and Woolf, 2000, Demolition blasting of reinforced concrete structures, Explosives and Blasting Technique-World conference, pp. 397-404.
3. Wang Hao, 2007, Controlled Blasting Demolition of a High Building with Super-thin Wall Structure by Multi-direction Collapsing, The Asian-Pacific Symposium on Blasting Techniques 2007, pp. 273-277.