

# 광양 시멘트 사일로 발파해체 시공사례

박 훈<sup>1)</sup> · 장성옥<sup>1)</sup> · 박형기<sup>1)</sup> · 김래희<sup>1)</sup> · 석철기<sup>1)</sup> · 최창선<sup>2)</sup>

## 1. 서론

산업구조물은 다양한 형태와 구조를 갖고 기능적 요건을 충족하기 위해 주변 시설물과 연계되어 있으며, 대규모, 고강도, 고강성의 특성을 지니고 있다. 이러한 산업구조물 중 최근 노후화와 기능적 요건을 만족하지 못하여 불용되는 시멘트 사일로의 수요가 증가하고 있으며, 이에 대한 해체공사가 주요한 문제로 부각되고 있다. 그러나 기계식 해체는 해체공기의 증가라는 시간적 제약과 함께 환경위해적인 요소를 내재하고 있어서 발파해체 공법을 적용하는 경우도 있다(박 훈 외, 2008).

시멘트 사일로는 원통형 셸 구조로 구조적 특성이나 규모가 굴뚝과는 상당히 다르다. 특히 두꺼운 원통형 철근콘크리트 셸로 구성되어 있고, 슬립폼(slip form)으로 시공되며 신축이음(expansion joint) 및 구조적 취약성이 없는 구조로 되어있다(Elliot and Woolf, 2000). 또한 높이 대 지름의 비가 크지 않고, 내부의 링거더(ring girder)와 콘(cone)은 원통형 철근콘크리트 셸과 분리된 독립된 구조물로 시공되어 있어서 전도가 용이하지 않는 구조적 특성을 지니고 있다. 따라서 시멘트 사일로의 구조적 특성 및 개구부 조건을 고려하여 발파해체 설계를 해야 한다(Stangenberg, 1994).

본 시공사례에서는 기능적 요건에 적합하지 못하여 철거가 결정된 광양 포스코 부지내 시멘트 사일로의 전도공법에 의한 발파해체를 소개하고자 한다.

## 2. 시공 개요 및 주변 현황

### 2.1 시공 개요

발파해체 대상 구조물인 시멘트 사일로는 남쪽의 B 시멘트 사일로 1기와 북쪽의 A 시멘트 사일로 1기로 외경 16.7m, 높이 53m인 원통형 시멘트 사일로이며, 구조는 원통형 셸 구조로 철근콘크리트와 철골로 구성되어 있다. 또한 원통형 철근콘크리트 셸과 내부 콘 사이에 30mm의 익스팬션 갭(expansion gap)인 스티로폼이 설치되어 있어서 서로 분리된 구조를 가지고 있다. 다음 그림 1은 발파해체 대상 구조물인 시멘트 사일로의 전경을 나타낸 것이고, 그림 2는 A 시멘트 사일로의 단면도를 나타낸 것이다.

발파해체공법으로는 전도공법을 적용하였으며, 두 사일로의 중심을 연결한 가상의 선(center line)을 기준으로 A 사일로는 약 20° 상향으로, B 사일로는 약 12° 하향으로 전도되도록 붕괴방향을 선정하였다. 그림 3은 사일로의 전도 붕괴 예측 방향을 도시한 것이다.

1) (주) 코리아 카코

2) 동양시멘트(주)

\* 교신저자 : hujin@chonbuk.ac.kr

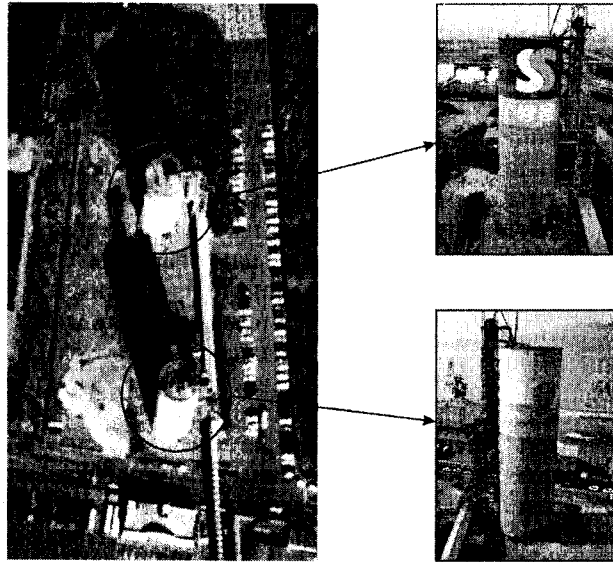


그림 1. 발파해체 대상 구조물 전경

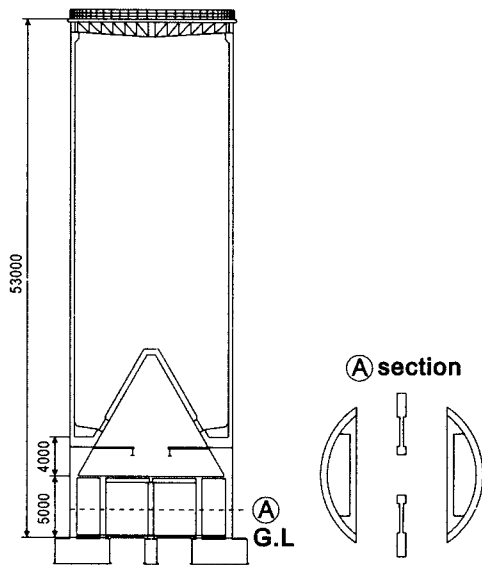


그림 2. A 시멘트 사일로의 단면도(단위 : mm)

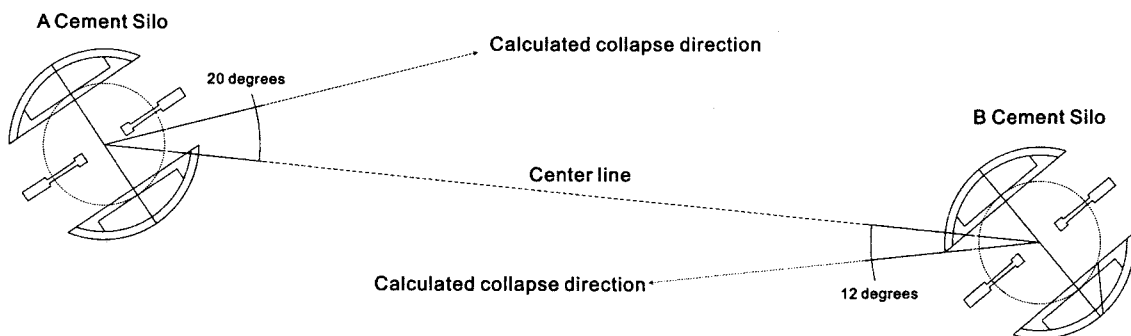


그림 3. 발파해체 대상 구조물의 전도 붕괴 예측 방향

## 2.2 주변 현황

발파해체 대상 구조물의 주변 현황은 그림 4와 같으며, 포스코 시설물과 항만관련시설물 그리고 한유 L&S 시설물 등이 위치하고 있으며, B 사일로 기초로부터 약 2.85m 이격된 지점에 직경 26inch, 내압 70kg/cm<sup>2</sup>의 LNG 고압 가스관이 매설되어 있다. 따라서 콘크리트 구조물의 허용 진동 속도는 1.0cm/sec 이하로 설정하였으며, 발파소음은 85dB(A) 이하, 발파음압은 120dB(L)로 설정하였다. 매설 가스관의 경우에는 안전범위인 1.0cm/sec 이하로 설정하였으며, 매설된 LNG 가스관과 B 시멘트 사일로 기초 구조물 사이에 방진구를 설치하고, 상부를 철골 계단으로 방호하였으며, 가스관 직상부에는 흠뚫을 설치하였다.

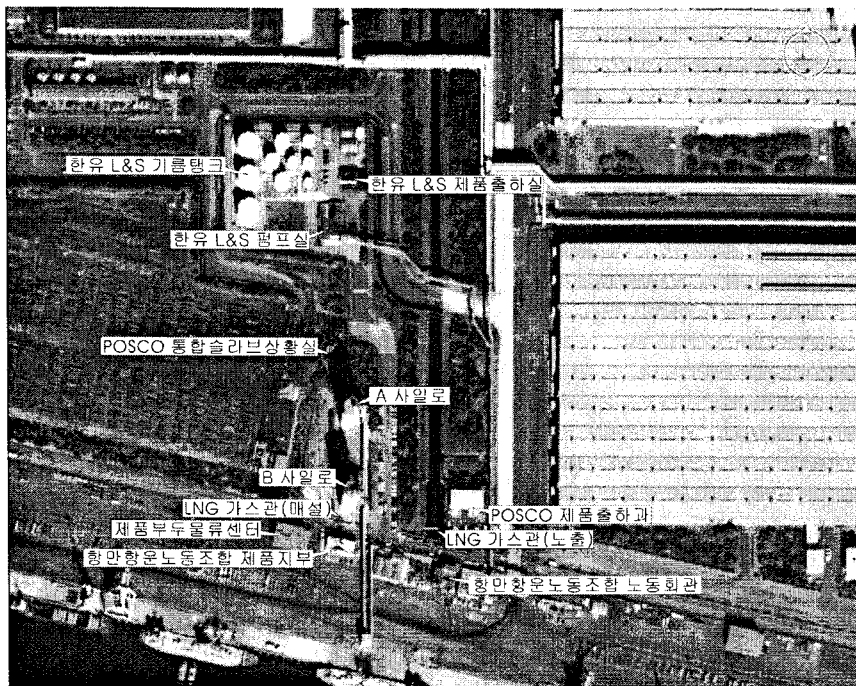


그림 4. 주변 현황도

## 3. 발파해체 설계 및 주요 공정

### 3.1 사전파쇄 작업

계획된 방향으로 발파해체 대상 구조물을 전도시키기 위하여 사전파쇄 작업을 수행하였다. 사전파쇄는 하단부의 기둥 및 일부 전단벽체, 링거더 지지부 그리고 원통형 셸에 대해 실시하였으며, 전도 방향으로 원통형 셸과 링거더, 내부 콘 일부도 파쇄하였다. 또한 사일로 내부에 설치된 시설물이 붕괴 거동에 영향을 주지 않기 위해 철골 및 계단의 일부를 절단하였다. 표 1은 발파해체 대상 구조물의 사전파쇄 구간 및 사전파쇄가 완료된 발파해체 대상 구조물을 나타낸 것이다.

표 1. 사전파쇄 구간 위치(단위 : mm)

A 시멘트 사일로의 사전파쇄(하단부)	B 시멘트 사일로의 사전파쇄(하단부)	B 시멘트 사일로의 사전파쇄 완료 모습

### 3.2 시험발파

발파해체 대상 구조물의 사전파쇄 구간 중 일부 구간을 선정하여 철근의 배근상태 및 콘 크리트의 강도를 고려하여 원통형 셀에 적용할 장약량 선정을 위하여 표 2와 같이 시험발파를 실시하였다. 공간격은 500mm로 동일하고, 장약량을 변화시키면서 장약의 중심이 원통형 셀의 중심에 위치하도록 천공하였다. 천공방향은 사일로의 내벽에 직각방향으로 외벽을 향하여 천공하였으며, 4공을 도폭선으로 연결하여 동시에 기폭시켰다. 그림 5는 시험발파에 적용된 천공패턴을 도시한 것이다.

표 2. 시험발파 제원

구분	공수 (EA)	천공장 (mm)	공간격 (mm)	단면적 (m <sup>2</sup> )	체적 (m <sup>3</sup> )	단면계수 (kg/m <sup>2</sup> )	비장약량 (kg/m <sup>3</sup> )	장약량 (g)
TEST 1 (S3)	4	440	500	0.35	0.175	0.54	1.07	187.5
TEST 2 (S4)	4	470	500	0.35	0.175	0.71	1.43	250.0

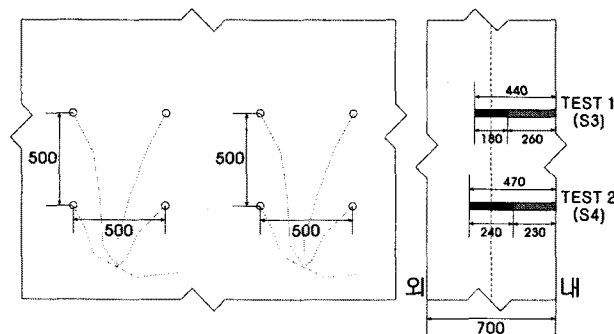


그림 5. 시험발파 천공패턴(단위 : mm)

시험발파 결과, TEST 1(S3)은 내벽과 외벽 모두 양호한 파쇄 상태를 나타냈으며, TEST 2(S4)는 발파공과 발파공 사이의 부분이 관통되었고, 내벽과 외벽 모두 파파쇄가 발생하였다. 또한 도폭선을 사용하여 동시에 발파한 결과, 원통형 구조물의 특성상 구조물 내에서 발생하는 발파소음이 울리면서 상대적으로 큰 소음이 발생하였다. 따라서 발파해체 대상 구조물인 사일로의 본발파에서는 원통형 셀의 두께가 700mm, 공간격이 500mm일 때, 공당 장약량은 187.5g을 기준으로 장약의 중심이 원통형 셀의 중심에 위치하도록 천공하였으며, 원통형 셀의 두께가 변경될 경우 공당 장약량과 천공장을 조절하여 본발파를 시행하였다.

### 3.3 천공작업

#### 1) 단면조사

발파구간인 원통형 셀과 기둥, 링거더에 대하여 단면의 크기를 사전에 조사하였다. 원통형 셀의 경우 단면의 크기가 일정하지 않으므로 각 구간마다 3공 이상의 셀을 관통하는 단면 측정공을 천공하여 셀 단면의 평균두께를 측정하였다.

#### 2) 천공작업 현황

발파구간인 원통형 셀과 기둥, 링거더에 대해 착암기(Leg drill)를 사용하여 천공경  $\varnothing$  38mm인 발파공을 천공하였으며, 평균두께에 따라 천공장을 달리하였다. 발파구간은 A 시멘트 사일로의 경우 3개의 구간으로 구분하였으며, B 시멘트 사일로의 경우 4개의 구간을 발파구간으로 구분하여 천공을 실시하였다. 표 3은 발파해체 대상 구조물인 사일로의 발파구간별 천공 제원을 나타낸 것이다.

철근의 배근 위치에 따라 천공 착점을 잡는데 어려움이 많았으며, 특히 그림 6과 같이 상단부 원통형 셀과 링거더에서는 철근의 배근이 조밀하여 천공 위치를 조절하였다.

표 3. 발파구간별 천공 제원

구분	구간	위치	천공경 (mm)	평균두께 (mm)	평균천공장 (mm)	공간격 (mm)	천공수 (EA)
A 시멘트 사일로	1	셀	$\varnothing$ 38	740	430~460	500	88
	2	기둥	$\varnothing$ 38	2500	620~1450	400~800	20
		링거더	$\varnothing$ 38	700~1862	590~944	500~700	3
3	셀	$\varnothing$ 38	710~1000	415~620	500	92	
B 시멘트 사일로	1	셀	$\varnothing$ 38	850~1000	410~620	500	39
	2	셀	$\varnothing$ 38	710	415~445	500	68
	3	기둥	$\varnothing$ 38	2500	620~1450	400~800	18
		링거더	$\varnothing$ 38	700~2300	498~830	800	4
4	셀	$\varnothing$ 38	480~710	294~445	500	76	

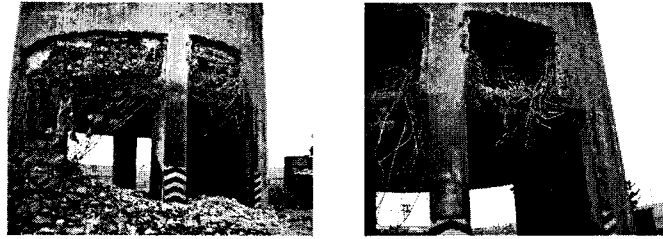


그림 6. 상단부 원통형 외벽과 링거더의 배근상태

### 3.4 방호작업

방호는 직접 발파대상 구간과 비발파대상 구간으로 구분하여 방호 계획을 수립하였다. 표 4는 당 현장에서 사용된 방호 제원을 나타낸 것으로 직접 발파가 이루어지는 원통형 셸 구간은 장섬유 부직포와 능형철망으로 1차 방호를 실시하였고, 외벽에 카펫으로 2차 방호를 실시하였다. 기둥과 링거더 구간은 장섬유 부직포, 능형철망 그리고 일부분에 골합석으로 1차 방호를 실시하였다.

비발파 구간인 사전파쇄 구간, 개구부 구간과 지지부 구간은 부직포와 능형철망으로 2차 방호를 실시하였다. 3차 방호는 현장 부지 경계선을 중심으로 높이 6~12m의 강관외줄비계 및 쌍줄비계를 설치하여 칼라 부직포 및 안전 그물망으로 방호하였다.

표 4. 방호 제원

구분	개 요 도		방호 재료
1차 방호			-능형철망 (#8, 그물눈 63mm) -장섬유 부직포 (350g/m <sup>2</sup> ) -아연도강판 (0.5T×3'×6')
2차 방호			-능형철망 (#8, 그물눈 63mm) -장섬유 부직포 (350g/m <sup>2</sup> )
3차 방호			-부직포 (칼라부직포) -낙하물 방지망 (인장강도 49.3kg/cm <sup>2</sup> 이상)

### 3.5 흙둑 작업

발파해체 대상 구조물인 시멘트 사일로를 전도되면서 낙하 충격에 의한 지반진동을 감소시키고, 측면으로의 비산을 제어하기 위해 흙둑을 설치하였다. 방진 흙둑은 예상 전도방향을 기준으로 사일로의 외벽으로부터 25m, 45m 지점에 지면에서 높이 약 3m로 설치하였다. 방호 흙둑은 예상 전도방향의 양 측면에서 높이 약 3m로 설치하였고, 시멘트 사일로의 최상단부의 비산을 방지하기 위해 62m 지점에 지면에서 약 4m 높이의 방호 흙둑을 설치하였다. 흙둑과 흙둑 사이에는 깊이 약 3m 이상의 방진구를 설치하였으며, 흙둑 위에 부직포를 설치하고 살수를 실시하여 낙하 충격에 의한 흙둑 자체의 비산 및 분진을 방지하였다. 그림 7과 그림 8은 흙둑 설치 평면도 및 단면도, 그리고 설치된 흙둑 전경을 나타낸 것이다.

발파해체 대상 구조물 중 B 시멘트 사일로의 경우 사일로 기초로부터 약 2.85m 이격된 지점에 LNG 고압 가스관이 매설되어 있어서, 그림 9와 같이 사일로 기초와 LNG 고압 가스관 사이에 방진구를 약 2~2.5m의 방진구를 설치하고 방진구 상부에 철골 계단을 설치하고, LNG 고압 가스관 매설지점 직상부로 약 1m 이상의 복토를 실시하였다.

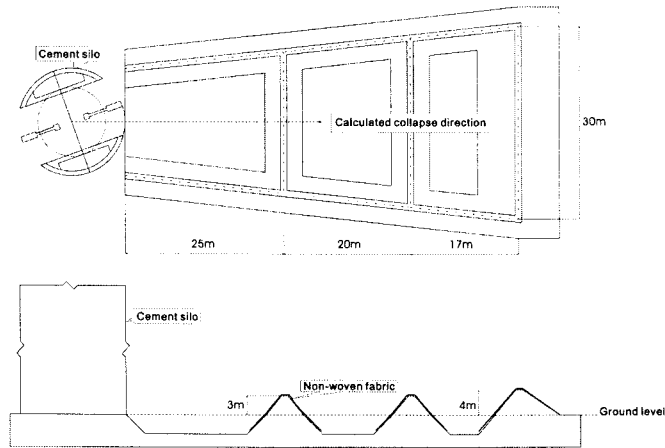


그림 7. 흙둑 설치 평면도 및 단면도



그림 8. 흙둑 설치 전경

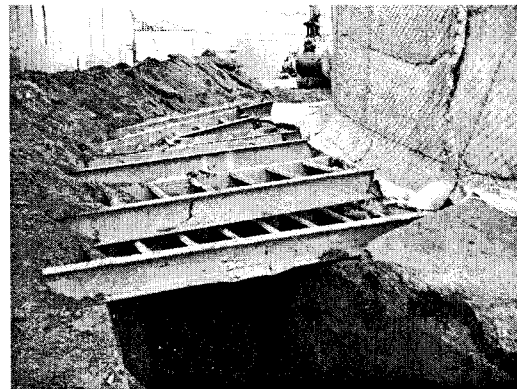


그림 9. LNG 가스관 방진대책

### 3.6 장약 작업

장약 작업은 A 시멘트 사일로의 경우 그림 10과 같이 3개 구간으로 나누어 실시하였으며, B 시멘트 사일로의 경우에는 그림 11과 같이 4개 구간으로 나누어 실시하였다. 폭약은 다이너마이트( $\varnothing 28\text{mm}$ ,  $\varnothing 32\text{mm}$ )를 사용하였고 장약은 역기폭으로 하였으며, 전폭약포를 발파공 내에 장전한 후 쇄석으로 전색하였다.

공당 장약량은 원통형 셀 구간의 경우 112.5~250g이고, 기둥과 링거더 구간은 125~750g이었다. 총장약량은 A 시멘트 사일로의 경우 40.65kg이고, B 시멘트 사일로의 경우 39.7625kg 이었다. 표 5는 발파구간별 장약 제원을 나타낸 것이다.

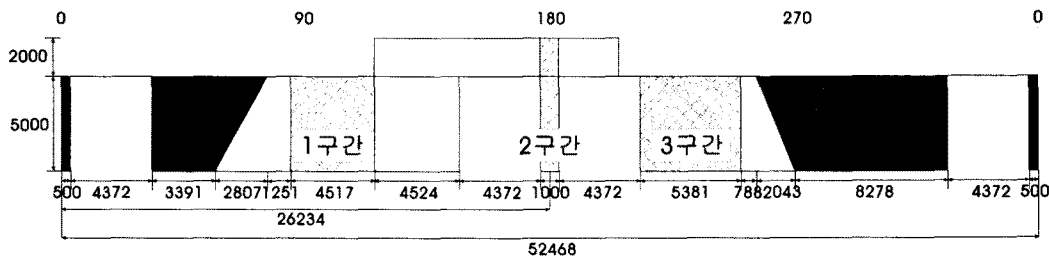


그림 10. A 시멘트 사일로 발파구간 전개도(단위 : mm)

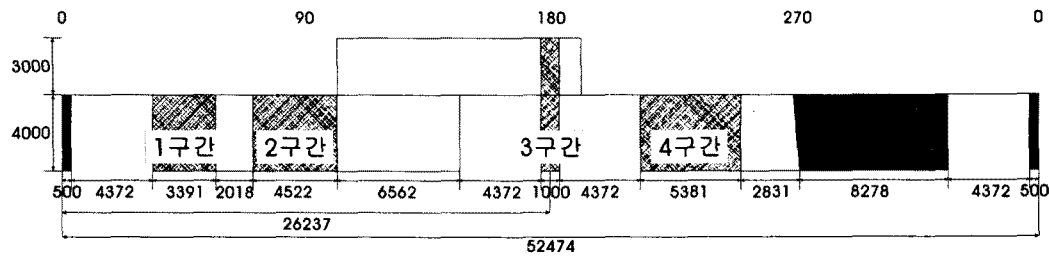


그림 11. B 시멘트 사일로 발파구간 전개도(단위 : mm)

표 5. 발파구간별 장약 제원

구 분	구 간	위 치	공 수(EA)	공당장약량(kg)
A 시멘트 사일로	1	셀	88	0.125~0.1875
	2	기둥	20	0.125~0.75
		링거더	3	0.1875~0.3
	3	셀	92	0.125~0.25
	계		203	—
B 시멘트 사일로	1	셀	39	0.1875~0.25
	2	셀	68	0.125~0.1875
	3	기둥	18	0.125~0.75
		링거더	4	0.123~0.375
	4	셀	76	0.1125~0.1875
	계		205	—



### 3.7 기폭 시스템

본 발파해체 대상 구조물인 사일로의 전도 공법에 적용한 기폭 시스템은 시차가 20ms인 전기뇌관을 사용하였으며, 발파구간별 시차는 그림 12와 그림 13과 같다. 또한 각 구간별 기폭시차는 40ms를 초과하지 않도록 설정하였다. A 시멘트 사일로의 최종 기폭시간은 80ms 이었고, B 시멘트 사일로의 최종 기폭시간은 100ms이었다.

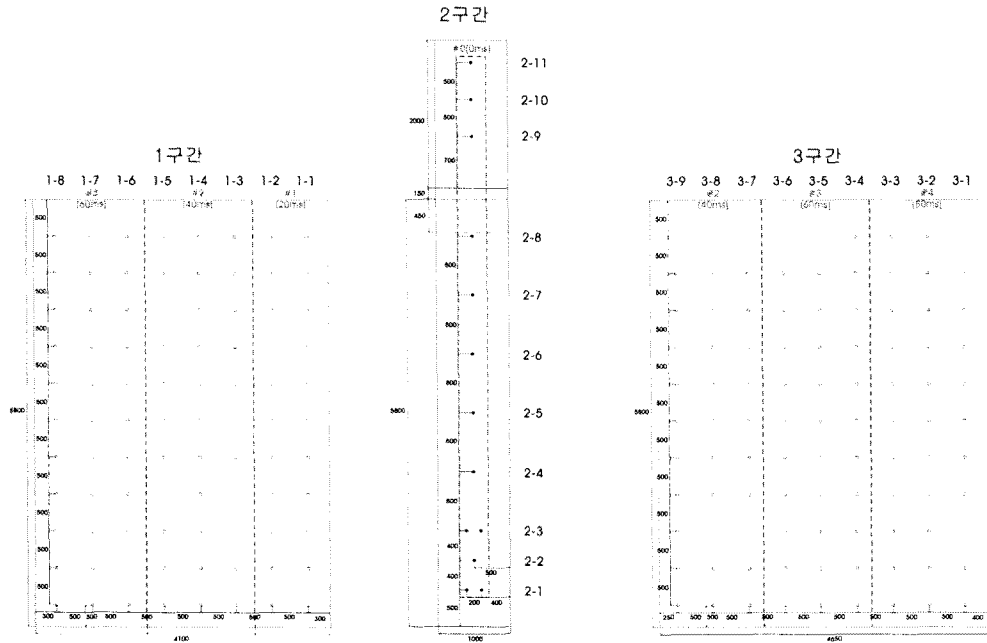


그림 12. A 시멘트 사일로의 기폭 시스템(단위 : mm)

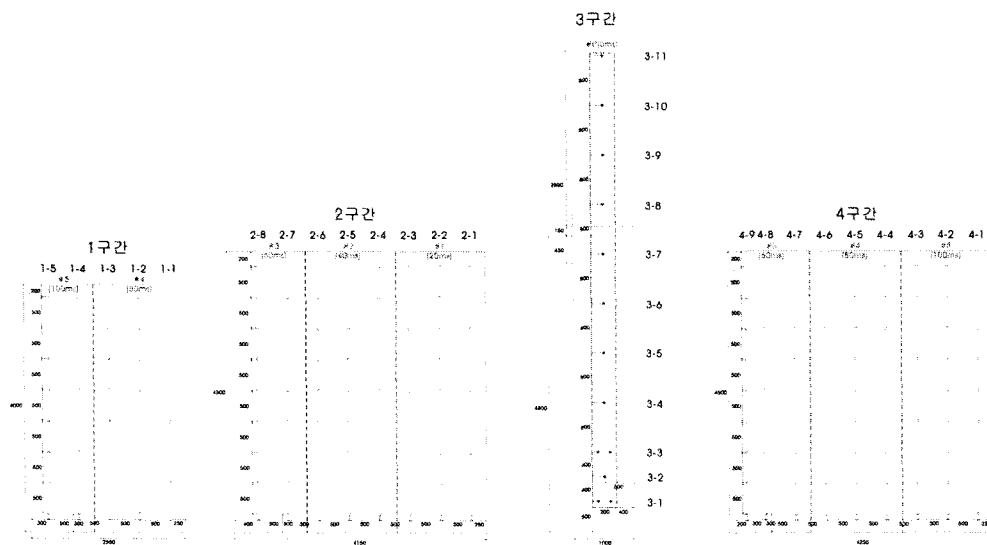


그림 13. B 시멘트 사일로의 기폭 시스템(단위 : mm)

#### 4. 붕괴 거동

그림 14는 발파해체 대상 구조물인 사일로의 전도 붕괴 예측 방향과 실제 전도 붕괴 방향을 도시한 것이다. A 시멘트 사일로는 센터라인을 기준으로 약 20° 상향으로 전도 붕괴되었으며, B 시멘트 사일로는 하향으로 약 12° 기울어지면서 붕괴를 유도하려 하였으나 실제 전도 붕괴 방향은 거의 센터라인으로 전도 붕괴되었다. B 시멘트 사일로의 경우, 270°~0° 사이의 기둥과 링거더 지지부가 전도 붕괴시 힌지 라인(hinge line)으로 설계되었으나 실제 거동에서는 기둥이 사일로의 구조적 지지점 역할을 하지 못하고 링거더 지지부만이 지지점 역할을 한 것으로 사료된다. 또한 링거더 지지부는 링거더의 하중에 의해 거의 수직으로 붕괴되었다.

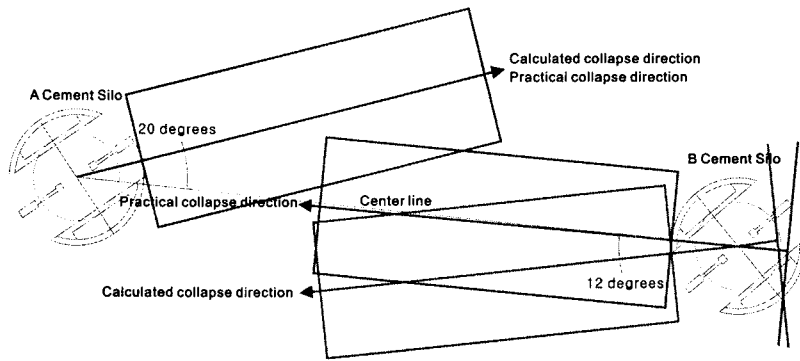


그림 14. 사일로의 전도 붕괴 예측 방향과 실제 전도 붕괴 방향

그림 15는 A 시멘트 사일로의 전방에서 촬영한 연속사진이다. A 시멘트 사일로는 약 8sec 후에 붕괴가 완료되었으며, 예측 방향으로 거의 정확히 붕괴가 이루어졌음을 확인할 수 있다. 그림 16은 B 시멘트 사일로의 측면에서 촬영한 연속사진으로, 발파 후 약 6.6sec 후에 붕괴가 완료되었다.

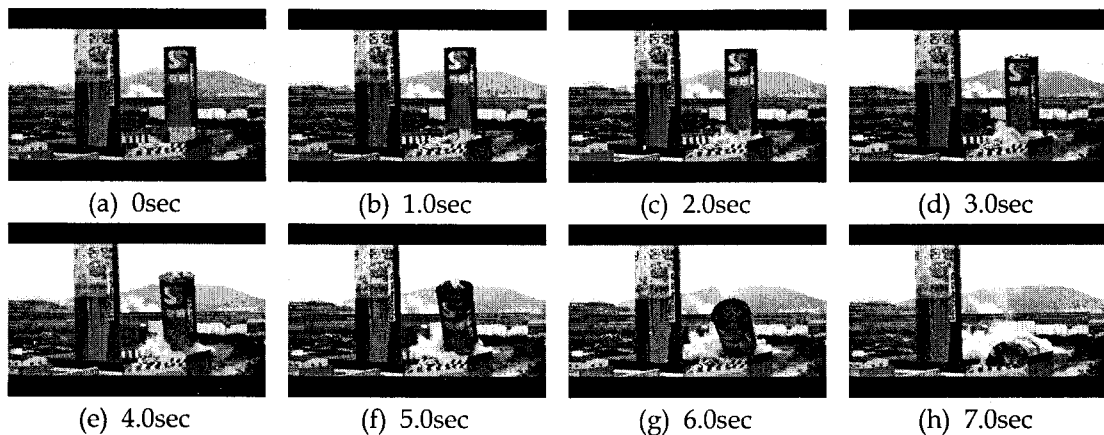


그림 15. A 시멘트 사일로 붕괴 거동 연속 사진

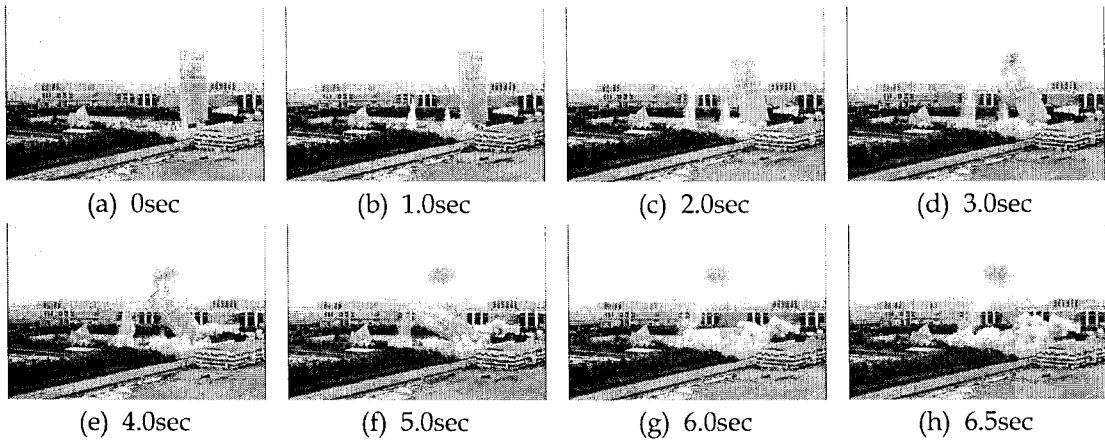


그림 16. B 시멘트 사일로 붕괴 거동 연속 사진

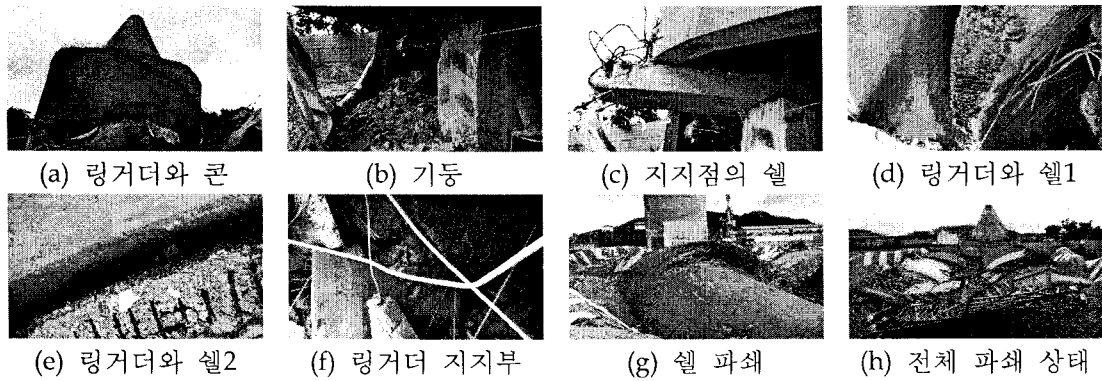


그림 17. A 시멘트 사일로 파쇄 사진

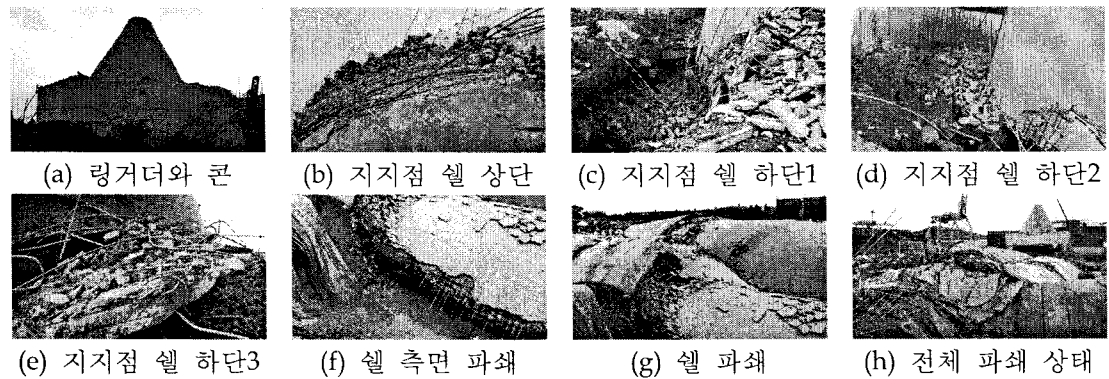


그림 18. B 시멘트 사일로 파쇄 사진

그림 17과 그림 18은 각각 A와 B 시멘트 사일로 발파 후 사진들이다. 그림 17(a)는 발파 후 잔존되어 있는 링거더와 내부 콘이며, 링거더의 회전각은 수직을 기준으로 약  $10^\circ$  이며, 원통형 셸의 인장파괴에 의한 회전각은 약  $15^\circ$ 이다. 그림 17(c), 그림 17(d), 그리고 그림 17(e)와 같이 링거더와 원통형 셸은 완전히 분리되어 있기 때문에 구조적으로 독립된 거동

을 하였다. 그림 18(a)에서 링거더와 내부 콘은 거의 수직으로 내려 앉았으며, 그림 18(c)에서 그림 18(e)은 지지점에서의 원통형 셸이 후방으로 밀려 내려온 것이다.

## 5. 결론

대단면 원통형 구조물인 시멘트 사일로 발파해체 공사에 대하여 전도공법을 이용한 발파해체를 수행한 결과, A 사일로는 예측한 방향으로 정확한 붕괴가 이루어졌으며, B 사일로의 경우는 사일로 하단부 기둥과 링거더 지지부가 전도 붕괴시 힌지 라인(hinge line)으로 설계되었으나 실제 거동에서 사일로 하단부 기둥이 구조적 지지점 역할을 하지 못하고 링거더 지지부만이 지지점 역할을 하여 예측한 방향과 다소 차이가 발생하였다. 또한 내부의 링거더와 콘은 외부의 원통형 셸과 분리되어 있어서 향후 동일한 구조의 사일로를 발파해체할 경우 고려하여 설계를 해야 할 것이다.

향후 시멘트 사일로의 발파해체를 전도공법 뿐만 아니라 다양한 발파해체 공법을 개발하고 적용하여야 하며, 동시에 시멘트 사일로의 특성상 다량의 시멘트 분진 발생에 대한 분진 제어 방안을 모색해야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(과제번호:06건설핵심B04)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 박 훈, 석철기, 김승곤, 2008, 원통형 구조물의 발파해체를 위한 사전 취약화에 따른 구조물의 안정에 관한 수치해석적 연구, 화약·발파, 대한화약발파공학회지, Vol. 26, No. 1, pp. 1-5.
2. Elliott, R. J. and R. Woolf, 2000, Demolition blasting of reinforced concrete structures, EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE-WORLD CONFERENCE, pp. 397-404.
3. Stangenberg, F., 1994, Blast Demolition of Reinforced Concrete Industrial Chimneys, International symposium Spatial, lattice and tension structures, pp. 290-299.