

구조물 발파해체 공법 시공사례 연구

한동훈¹⁾, 안명석¹⁾, 공병승¹⁾, 이윤재²⁾, 류창하³⁾

A Case Study on Blasting Demolition Method of Structure

Dong-Hoon Han, Myung-Seok Ahn, Byung-Seung Kong, Yoon-Jae Lee, Chang-Ha Ryu

ABSTRACT. Nowadays it is tendency to make a remodelling or demolition of old structures with the rapid development of blasting technique. In this treatise it is arranged of improvement procedure of blasting demolition method in Korea which was begun since August 1991. Recently, the blasting demolition method has much merits with 60-70% reduction effect of construction period than mechanical demolition method, and so that it has much economical points specially over than 5 storied high buildings. In order to maximalize economical effects of the blasting demolition method, environment safety and recycling, it must be needed, at first to develop the estimating programs against vibration, noise, flying stones, and dust. Also it is required to take a responsibility for using recycling materials after blasting demolition of old structures, and to be invested to advance the blasting demolition techniques.

Key words : Blasting demolition method, Reduction of construction period, Economical Effects, Recycling

초록. 발파기술의 급속한 발전으로 재개발을 위한 노후 구조물에 대한 리모델링, 해체등이 다시 활성화될 조짐이 있다. 이에 1991. 8 이후 시작된 우리나라의 발파해체 공법을 재조명하고 그 개선방안을 정리하였다. 그 결과 최근의 발파해체공법은 기계식해체공법에 비해 약 60~70%의 공기단축효과와 함께 5층이상 고층 구조물의 경우 경제성이 매우 높은 것으로 분석되었으며, 구조물 해체공법의 경제적 효과와 환경안전 및 재활용효과를 극대화하기 위하여 진동·소음·분진·비석 예측프로그램의 활용 및 미비점 개선 등 각종 컴퓨터 예측시스템을 개발해야 할 것이다. 발파해체 시 발생된 건설폐기물의 재활용도를 높이기 위하여 도로 보조기층재 및 콘크리트용 골재활용에 대한 일정비율 사용 의무화 등 관련 법령개정이 필요하며 해체물의 분류, 처리 등에 폐기물 전문업체의 적극적 참여 및 추가적인 연구개발이 필요한 것으로 사료된다.

핵심어 : 발파해체공법, 공기단축, 경제성, 재활용

1. 서 론

최근 생활양식 및 기술의 진보, 지가의 상승에 따른 토지의 고도이용이라는 관점에서 건물은 고층화되고 있으며, 이에 따른 구 건축물의 해체공사 및 재개발공사가 급증하고 있다. 이와 같은 구조물 발파해체 작업은 진동·소음·분진·비석 등의 환경공해 및 안전성 측면에서 취급이나 사용방법이 법적규제 대상이 되므로 주의를 요한다.

이러한 시기에 우리나라에는 K사와 미국 CDI와 기술 제휴를 통하여 서울도심지의 아파트 발파해체

공사를 1994년 11월 20일 수행한바 있으며 2003년 4월 10일에는 우리나라의 순수한 기술로 H사에서 김해국제공항 구 국제선청사를 발파해체하기에 이르렀다.

이에 본 연구에서는 국내의 구조물 해체 시공에 있어서 발파기술, 환경안전, 경제성측면에 대해 연구를 수행하였다.

2. 발파해체공법의 개요

2.1 원리 및 경제성

발파해체공법은 구조물의 주요 지지점인 기둥이나 내력벽과 같은 내하 주부재를 폭약의 폭발력을 이용하여 파괴함으로써 구조물의 안정성을 와해시

1) 동서대학교

2) (주)한화

3) 한국지질자원연구원

접수일 : 2003년 8월 15일

키거나 구조물의 강성을 저하시켜 구조물이 지닌 위치에너지를 자중에 의해 붕락시킬 때 발생하는 운동에너지로 전환시켜 파쇄물 상호간의 충돌작용으로 유도함으로써 짧은 시간에 구조물을 붕괴 해체시키는 공법이다.

철근콘크리트 구조물은 강성이 좋고 동적 거동에 있어서 하중 재분배가 비교적 좋지만 증량이 크기 때문에 외적 또는 내적 불안정요소에 의해 쉽게 변형되고 취성파괴의 특성을 가지고 있다.

특히, 국부적인 기하학적 불안정성에 대단히 취약하여 구조물의 일부가 붕괴되었을 경우 하중 및 모멘트의 재분배 과정을 거치면서 부재응력이 큰 곳부터 파괴되기 시작하여 연쇄적으로 인접부재가 파괴되는 도미노 현상을 초래하여 구조물 전체가 짧은 시간에 붕괴한다.

따라서 콘크리트 구조물의 이러한 특성과 폭약의 순간적 파괴력을 응용하여 발파에 의해 구조물을 붕괴 해체시킬 수 있다.

발파해체공사 시공검토 자료 중 기계해체공법과 발파해체공법을 환경보존성, 공사안전성, 공사기간, 공사비, 기타특징들을 비교분석하여 표1과 그림1에 나타내었으며 이때 발파해체공법이 채래식기계해체공법 보다 훨씬 안전하고 경제성이 우수하였다.

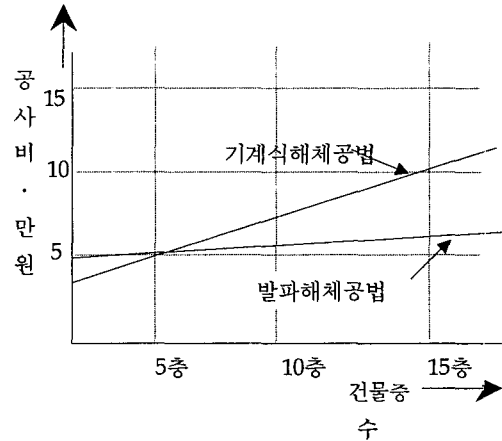


그림1. 기계식과 발파해체공법의 공사비 비교

표1 기계해체공법과 발파해체공법의 적용비교

구분		기계 해체		발파 해체	
환경 안전성	진동	0.05 cm/sec (20m) 허용기준치 이하	양호	0.48 cm/sec (20m) 허용기준치 이하	양호
	소음	장비소음 BREAKER : 91dB(A)(15m) 압쇄기 : 78dB(A)(15m) 지속성 소음	불량	장비소음:91dB(A)(15m) 발파소음:130dB(15m) 발파순간소음(3초)	보통
	비석	낙하 운반시, 해체 공사시	보통	발파시 발생, 보호막 처리	보통
	분진	지속성 분진	보통	발파시 순간분진(1~2분내침적), 살수처리로 대응	양호
	폭풍압	없음	양호	100~130dB 허용기준치 이하	양호
경제성	순 해체기간	장기 (115일)	불량	단기 (45일)	양호
	총 공사비	45억원	불량	30억원	양호
기타 특성	작업안전	예기치 못한 붕괴 발생우려	보통	발파 시까지 구조적 안정 유지, 안전	양호
	기술력 보유 실태	고층건물 공사 실적 없음	불량	실적있음, 외국사와 기술제휴	보통
	기술개발의 기대효과	동일 작업으로 기술개발의 한계	불량	기술 개발의 효과가 높다	양호

2.2 발파해체 공법의 종류

(1) 기존의 해체공법

1) 전도 공법 (Felling)

여유공간이 있는 경우에 한쪽 방향으로 전도시키는 방법으로 기술적으로 가장 간단한 공법이다. 장전공의 천공방향을 조절하므로써 전도방향을 조절할 수도 있으나, 전도시의 충격으로 인한 지반의 진동이 크게 되는 단점이 있으므로 전도방향쪽에 모래 등 충격을 완화할 수 있는 방안을 마련해야 한다. 또한 전도시에는 붕괴되는 방향으로 구조적인 기하학적 불안정을 유도하여 전도가 원활하게 이루어지도록 힌지(hinge)를 설정하기 위한 적절한 파쇄범위를 결정하는 것이 중요하다.

주로 이용되고 있는 것은 굴뚝이나 송전탑 등이 있다.

2) 상부 붕락 공법 (Toppling)

아래의 단축붕괴 공법을 적용하여 구조물이 발파와 함께 붕괴되면서 한쪽방향으로 전도되어 점진적으로 붕괴되도록 하는 방법이므로 한쪽 방향으로 여유공간을 확보한 경우에는 쉽게 적용이 가능하다. 건물내의 기둥열이 2-3열로 한정된 경우에 적용이 가능하며, 지반의 진동을 경감시키기 위하여 점진적인 붕괴가 이루어지도록 기폭시스템을 잘 조절하여야 한다. 발파해체 기법 중에서는 건물을 대상으로 하여 가장 일반적으로 사용되는 공법이며, 포항 학잠 주공아파트의 경우에 이 방법을 적용하여 구조물의 대각선 방향으로 붕괴되면서 전도되어 구조물의 파쇄가 용이하도록 하는 공법을 적용하였다

3) 단축 붕괴 공법 (Telescoping)

해체대상 건물의 주변에 충분한 여유공간이 없는 경우에 적용되는 공법으로 붕괴시의 초기 운동량으로 구조물의 하부로 계속적인 붕괴를 유도하며, 구조물의 하부 중앙쪽으로 파쇄물이 쌓이므로 시각적인 효과가 좋고 하부에 미리 쌓여진 파쇄물이 충격의 흡수제 역할을 하기도 한다.

속초 킹덤호텔 발파해체 시에는 구조물의 중앙

부는 단축붕괴 기법으로 먼저 붕괴되면서 좌우측 부분은 안쪽으로 끌리는 듯이 붕괴되도록 하는 공법이 적용되었다.

4) 내파공법 (Implosion)

제한된 공간을 가진 도심지에서 인접건물과의 거리가 가까운 경우 구조물이 중심방향으로 붕괴되도록 구조물의 외벽을 중심부로 끌어당기면서 붕락됨에 따라 주변의 필요공간을 최소화 할 수 있다. 이러한 경우에는 발파구역의 선정시에 건물의 중심부부터 붕괴되도록 발파시차를 조절해야 한다

5) 점진 붕괴 공법 (Progressive Collapse)

내파공법과 유사한 공법이지만 구조물의 붕괴가 중심으로 이루어지는 것이 아니라 한쪽끝으로부터 선형적으로 붕괴가 이루어지는 공법으로 길이가 긴 구조물에 이용된다.

6) 연속 붕괴 기법 (Sequenced Racking)

복합적인 형태로 이루어진 건물을 순간적으로 붕괴시키는 공법으로 여러 시차를 두고 붕괴가 진행되도록 한다.

(2) 향후 연구과제 공법

1) 역 단축 붕괴공법(By Telescoping)

- 해체대상건물의 주변에 충분한 여유공간이 없는 초고층빌딩 철거의 경우 적용하는 공법으로 중상부층에서 주요지지부를 파괴하고 하부 지지부를 열화함으로써 그 충격압과 파쇄물의 무게로 인해 순간적으로 하부층으로 해체가 진행되는 방법이나 아직 연구결과물 발표사례가 없다.
- 착안점 : 지하6층 지상110층의 WTC 건물 테러시 80층과 52층 충돌파괴로 인해 2시간이 내에 모두 붕괴됨.

2) 역점진붕괴공법 (By Progressive Collapse)

- 해체대상건물의 주변에 여유공간이 없는 길

이가 긴 중고층 구조물인 경우 적용할 수 있으며 중상부층의 주요 지지부를 파괴하고 하부 지지부를 열화 함으로써 그 충격압과 파쇄물의 충격하중 및 지연시차의 고도 활용 및 설계하여 한쪽 끝부터 선형적으로 점진적으로 붕괴 되게하는 방법으로써 연구사례가 아직 없다.

· 착안점 : WTC건물테러 및 김해국제공항 국제선 청사 해체사례를 발전 응용함

2.3 적용 구조물

(1) 건축구조물

건축구조물의 대표적인 것으로 아파트를 들 수 있으며 이는 일반 오피스 건물보다 사용연한이 짧고 재건축이 활발히 이루어지고 있는 사회적 배경이 있다.

아파트를 건축하기 위한 철근콘크리트 구조를 분류하면 우선 생산방식에 따라 현장에서 만들어지는 일체식 구조와 공장에서 생산된 부재를 현장에서 조립하는 조립식 구조로 나눌 수 있다. 일체식 구조는 건축현장에서 거푸집 및 철근 조립 후 콘크리트를 타설하는 것으로서 최근에도 많이 쓰고 있는 방법이다. 이 일체식 구조는 그 가구(架構)의 형식에 의해서 라멘식구조, 벽식구조, 라멘식과 벽식을 함께 사용한 구조, 거푸집콘크리트 블록구조, 그밖에 막(膜)이론의 응용에 의한 셸(shell)구조, 절판(折板)구조 등으로 나눌 수 있다. 철근콘크리트의 조립식구조(Pre-Cast)에는 각 부재를 미리 공장에서 만들어 현장에서 조립하여 접합부의 금속의 용접이나 콘크리트에 의한 충전(充填) 등으로 현장작업을 마치고 공사의 간이화와 공기(工期)의 단축을 도모하여 건축의 양산화를 목적으로 한 프리캐스트판에 의한 조립식 구조와 프리스트레스트 콘크리트구조가 있다.

일반적으로 기둥과 보의 발파를 통하여 건축물의 자중에 의해 붕괴되도록 하는 공법이므로 건물의 거동에 필요한 주요체를 발파한다.

(2) 토목구조물

토목의 대표적인 구조물로는 교량이며, 이는 상부구조(Super Structure)와 하부구조(Sub Structure)로 구성되어 있다. 상부구조는 구조상으로 교량의 주체가 되는 주형인 거더(Girder), 트러스, 아치, 라멘이 있으며, 바닥, 바닥틀, 브레이싱과 교좌장치가 포함된다. 하부구조로는 교각(Pier), 교대(Abut)와 땅속에 묻히는 기초(Foundation)가 있어 상부구조에서의 하중을 원활하게 단단한 암반으로 전달하는 역할을 한다. 기초에는 지반의 성질과 암반의 깊이에 따라 확대기초, 말뚝기초, 우물통기초 등이 있다. 상부 구조물의 발파는 성형 폭약을 이용한 절단공법 (Cutting method)이 사용되며 이는 철골 구조물에도 적용 가능하다.

3. 구조물 붕괴 거동 예측 프로그램

3.1 개요

발파를 하기 전에 구조물의 구조해석 및 형태를 정확히 분석한 후 구조물을 사전에 적절하게 파쇄시키는 것은 붕괴를 용이하게 하고 계획된 방향과 위치로 붕괴시킬 수 있도록 하며, 최소량의 화약으로 최대의 발파효과를 얻을 수 있다. 발파 해체 시 구조적으로 강성이 큰 부재를 경시할 경우 붕괴과정에서 구조물이 예상치 않았던 방향으로 붕괴되어 인접구조물에 피해를 주거나 완전히 붕괴가 되지 않아서 재발파를 해야하는 경우도 있다.

따라서, 이러한 목적으로 벽체, 계단, 슬라브, 전단벽 등을 사전에 부분적으로 해체하는 작업을 실시한다. 그러나 이러한 작업이 과도하게 이루어지게 되면 사전에 해체하는 작업 중에 또는 발파도 되기 전에 붕괴되는 사고가 발생할 수도 있으므로 취약화되는 부분의 위치와 크기는 정확한 구조해석을 통하여 중요 부재의 용력을 검토하고 안전성을 확인한 후 선정한다.

구조해석은 건축 범용프로그램인 ETABS PLUS를 사용하여 3차원 정적해석을 하며, 각 부재들의 모멘트, 전단력, 축력, 변형도 등을 얻는다. 용력 분포도 및 구조물의 변형형태를 분석하여 변형특

성을 조사한다.

3.2 붕괴거동 예측기술

(1) 구조물의 사전 조사 및 안정성 검토

발파해체공법에서는 해체구조물에 대한 구조역학적 문제와 충격으로 인한 진동의 영향을 고려하여 발파위치의 선정과 시간차 발파계획 뿐만 아니라 발파 자체의 기술도 필수적으로 병행되어야 한다. 이를 위해서는 다음과 같은 사항들이 고려되어야 한다.

- ① 구조물의 안정에 중요한 지지점을 파악한다.
- ② 구조물의 붕괴과정에서 발생하는 거동 상황을 예측한다.
- ③ 구조물의 지지점 파괴에 알맞은 폭약량 산정과 폭약의 종류 및 천공 깊이, 방향을 결정한다.
- ④ 구조물의 용이한 붕괴와 발파효과를 최대한 활용하기 위한 사전취약화 작업과 지지점의 발파 시간차를 배분한다.
- ⑤ 발파로 인한 주변 화약의 영향을 최소화시키기 위한 지발당 폭약량과 뇌관의 시간차를 산정한다.

(2) 붕괴거동 예측 시스템

주변 주요 시설물 및 환경, 주변 지질조건, 건물의 구조형태 및 특성, 각종 환경공해 발생등을 고려한 DIVELCONTM 시스템에 의한 모의 실험결과로 가장 적합한 설계를 분석한다.

DIVELCONTM시스템이란 Different Velocity Control Technical Manual System의 약자로서 뛰어난 기술력을 보유하고 있는 미국의 CDI사가 제공한 발파해체에 관한 총체적인 모의실험 시스템이다.

이 시스템은 CDI사가 지난 45년간에 걸쳐 진 세계적으로 고층건물 1,200건을 비롯한 6,000여건의 발파해체 시공을 하면서 축적한 현장조건, 대상구조물의 구조해석에 따른 장약 및 천공조건, 붕괴거동 결과, 진동 및 소음 등의 결과치와 경험을 Data Base 화한 후 이것을 토대로 각종 실험식을 경험

적으로 유추해 구축한 시스템이다.

(3) 구조물의 발파 대상지점 선택

구조물의 붕괴 시 분진을 줄이기 위한 살수 등의 조치와 발파부위를 선정하여 구조물을 의도하는 방향으로 붕괴시킴과 동시에 파쇄물이 일정한 시간간격으로 낙하하게 만들어 지반에 충격을 최소화할 수 있게 설계하는 것 또한 발파해체에서 가장 중요하게 고려해야할 사항 중의 하나이다.

한편, 철근콘크리트 라멘조는 기둥 및 일부 내력벽체에 대해서만 발파를 실시하며 붕괴방향에 따라 내부기둥에만 발파를 하는 경우와 내부 및 외부 전체 기둥에 발파를 하는 경우가 있으며 일반적으로 철근콘크리트 라멘구조의 건물에 대한 폭약이 장전되는 층수는 표 2와 같다.

표 2 건물높이별 폭약 장약층

건물 높이	폭약이 장전되는 층
4, 5층	1, 3층
8층	1, 3, 5층
10층	1, 3, 5, 8층
12층	1, 2, 6, 9층
15층	1, 2, 6, 9, 12층
25층	1, 2, 6, 10, 14, 18, 22층

4. 현장 적용 시공 사례

4.1 미국 Kingdom 구조물발파해체 사례

본 내용은 The Journal of Explosives Engineering (v.17 n.5, 2000)에 기고한 Dr. Douglas A. Anderson (Senior Consultant, West Chester, PA Office of Schnabel Engineering Associates, Inc)이 2000년 3월 26일 미국 시애틀 소재 Kingdom 체육관 시설을 발파해체 공법을 이용하여 해체한 사례를 글로 옮긴 것이다.

먼저 이 사례의 특징으로는 ① Kingdom 체육관 시설은 세계에서 가장 큰 규모의 쉘 콘크리트 돔 구조이다. ② 건물주위에 주요 구조물들이 많이 위

치하고 있다. ③ 이 지역은 과거 지진이 발생한 곳이고 주민들이 지반진동에 대한 피해나 지진을 유발할 수 있다는 위험 가능성에 매우 예민한 곳이다.

내용으로는 이 구조물을 한번 붕괴시킬 경우 지반에 25,000 톤의 중량이 충격으로 작용할 수 있으므로 충격을 최소화하기 위한 방법에 초점을 맞추어 설계되었으며 5,905개의 천공에 4,728 파운드(약 2,145kg)의 폭약이 사용되었고 도폭선을 이용하여 기폭시켰다. 사용된 도폭선의 길이만 해도 약 37.9km에 달하였다. 발파해체 작업결과 주위에 피해를 주지 않고 성공적으로 수행되었다.

4.2 여의도 (구)라이프 빌딩 발파해체 사례

본 내용은 대림엔지니어링(주)에서 1994년 7월 28일 여의도 (구)라이프 빌딩 발파해체 시공사례 발표 내용을 옮긴 것이다.

건물의 특징으로는 ① 철근콘크리트 모멘트 연성골조에 전단벽을 추가한 이중 골조방식으로 인근에 국내 최고층인 63층 대한생명 빌딩이 위치하고 있다. ② 주거용 APT 및 사무실이 밀집되어 있으며, ③ 건물 전면에는 여의도 순환도로와 올림픽대로가 통과하는 교통 요충지의 역할을 하는 지역이다.

내용으로는 주변구조물에 대한 충격진동과 폭발압의 영향을 최소화하기 위하여 Telescoping 공법과 Progressive Collapse 공법을 혼합적용하였다. 발파해체 작업은 발주자측의 일부 공정의 분리 발주로 인하여 작업이 중복되어 공사능률이 저하되고 안전상의 많은 위험을 초래하였으며 특정폐기물에 대한 처리가 완벽하지 못하여 목재류 및 유리섬유, 석면등이 발파해체 작업시 비산되어 환경단체 및 언론기관으로부터 고발성의 비난을 받게 됨.

4.3 남산 외인 아파트 발파해체사례

본 내용은 코오롱건설(주)에서 1994년 11월20일 서울특별시 용산구 한남동 772번지, 이태원동 258번지 소재 남산 외인 아파트 2동을 발파해체한 사

례를 정리한 것이다.

건물 특징으로는 ①1971.12.31 준공된 고층아파트로써 1개동은 16층 210세대이며, 다른 1개동은 17층 217세대 철근콘크리트 라멘조이다. ② 해체대상 건물주변에는 63m 지점에 남산제1호 터널 남측 환기소가 있으며, 75m 지점에는 남산 제1호 터널, 80m 지점에는 소월로의 상수도 및 120m 지점에 하수도, 210m 지점에 보광유원지, 232m 지점에 1일 이용객 5,000명 규모의 하얏트 호텔이 산재해 있다. 특히 22~310m 지점에 개인소유 단독 주택 4동이 산재해 있다. ③주변구조물에 대한 충격진동, 폭발압 및 비산의 영향을 최소화 하기위하여 Telescoping 공법과 Progressive Collapse 공법을 혼합 적용하였다.

본 아파트는 건축 될 당시 구조설계는 일본건축학회 철근콘크리트 기준 JIS 30과 DIN 1045 설계규준을 기준으로 하여 설계하였고, 안전성 검토는 건설부 제정 철근콘크리트 구조계산규준과 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙을 기준으로 검토, 분석 하였으며, 구조해석은 ETABS PLUS를 사용하여 3차원 정적 해석을 하였다.

4.4 김해국제공항 (구) 국제선 청사 발파해체 사례

본 내용은 (주)한화에서 2003년 4월 10일 부산광역시 강서구 대저2동 2350번지 소재 김해공항 2단계 확장공사 중 기존 구조물해체공사로써 김해국제공항 구 국제선청사 발파해체사례를 정리한 것이다.

건물특징으로는 ① 지하1층, 지상3층, 연면적 19,292m²의 철근콘크리트 라멘조로써 Span 간격이 길고 층고가 높은 편이다. 층 당 층고가 높고 가로, 세로의 비는 약 2:1의 직사각형 형태로써 높이는 19.9m, 가로(너비)는 135m, 세로(폭) 60m이다.

② 해체대상 건물주변에는 4m 거리에 철근구조물의 조명탑이 있고, 34m 지점에 철근콘크리트 구조물의 관리동이 있으며, 48m 지점에 국제선 화물터미널 등이 있다. 이격거리 현황을 표 3에 나타내었다.

③ 사용폭약은 장전밀도가 크고 파쇄력이 우수

한 MegaMITE $\Phi 25\text{mm}$ 를 사용하였으며 선정뇌관은 지연초시가 있는 지발전기뇌관 MS, LP #1~20을 사용하였으며 5.5초의 기폭시차를 두고 약 7초 간에 구조물의 붕괴를 유도하도록 하였다.

이때 천공장비는 TY-24 $\Phi 38\text{mm}$ 이며, 천공길이는 350~400mm로 피 파괴체의 중심이 될 수 있도록 하였다.

④ 본 해체공사는 비산방지등 단기간에 안전하며 최대의 효율을 낼 수 있는 점진붕괴공법(Progressive Collapse)을 적용하여 5.5초의 기폭시차를 두고 약7초간에 구조물의 붕괴를 유도하도록 하였다.

⑤ A 사의 경우 발파비산 최대거리는 5.2m 로 예상되었으나 콘크리트 파편 및 분진을 제어하기 위하여 장섬유 부직포와 능형철망으로 1차방호를 하였으며, 장섬유부직포로 2층건물의 외벽 전체에 2차방호를 하고, 강관 파이프와 일반부직포를 사용하여 해체구조물에서 10m 이격거리를 두고 6m 높이로 3차 방호물을 설치하였다.

B사의 경우 개인주택 3m전방에 높이 5m 정도로 방호막(부직포, 철망)을 설치 하였다.

4.5 발파해체공법의 공종별 시공방법

① 인가 및 허가 사항 검토

표 3 인근 구조물의 이격거리 현황

구 분	이격거리	구조현황	비고
관리동	34m	철근콘크리트 구조물	건물내부 직원 근무
조명탑	4m	철근 구조물	상시 사용
국제선 화물터미널	48m	철근콘크리트 구조물	건물내부 직원 근무
정화 탱크	60m	철근콘크리트 구조물	지하 매설물
소방대	85m	철근콘크리트 구조물	건물내부 직원 근무
한국 항공	121m	철근콘크리트 구조물	건물내부 직원 근무
아시아나	163m	철근콘크리트 구조물	건물내부 직원 근무
고동력동(레이더기지)	152m	철근콘크리트 구조물	정밀기기 사용
레이더 수신소	190m	철근콘크리트 구조물	정밀기기 사용
유류 저장 시설	152m	철근콘크리트 구조물	폭발성 위험물 저장시설
경찰 격납고	190m	철근콘크리트 구조물	위험물 저장시설
국내선 청사	210m	철근콘크리트 구조물	공항 이용객 상시 이용

표 4 인·허가 사항

신고 및 허가사항	신 청 일 시	관 련 법 규
- 건물철거신고	착공 7일전	(건축법 제27조) 시행규칙 제 24조
- 유해위험방지계획서 (지상 높이 30m 이상)	착공 30일전	산업안전보건법 제 48조 시행규칙 제 120조
- 화약류 사용허가	사용개시 7일전	총포·도검화약류 단속법 제 18조
- 폭약사용신고	사용개시 7일전	소음진동규제법 제 27조 시행규칙 제 35조
- 특정공사 사전신고	공사개시 7일전	소음진동규제법 제 25조 시행규칙 제 33조
- 분진발생 비산먼지 발생사업신고	사업시행 10일 전	대기환경보전법 제 28조

발파 해체공법을 시공하기 위해서는 표 4의 인·허가를 받아야 한다.

발파시간은 당 공사현장의 특성상 일반인 출입 금지 특수 지역이며 공공안전을 책임지는 비행기가 항상 이동하고 있으므로 민간인 및 비행기 이동이 없는 AM 05 : 30 에 발파를 시행하였다.

② 주변 건물주와의 협의

대상 건물이 해체된 후 그 위치에 건축할 건물에 따라 주변건물주의 반응이 달라지고 발주자와의 마찰이 심화되어 이를 수습해가는 과정에서 불필요한 공사중단 및 공기의 지연을 초래하게 된다. 따라서 향후 구조물해체공사시 사전에 주변 건물주와의 충분한 협의가 이루어져 공사외적인 요인으로 인한 공기지연 및 비효율적인 공사운영이 되지 않도록 하여야한다.

③ 세부공정 분할 여부판단

공사에서 발파해체와 관계한 일부 공정을 분리 발주하여 이로 인한 많은 문제점이 야기될 수 있다. 발주자측은 대상 건물내에 있는 내장재 철거작업을 발파해체 작업과 분리하여 발주하므로써 작업이 중복되어 공사능률이 저하되고 안전상 많은 위험을 초래한다.

또한, 폐기물처리가 발파해체작업과 분리 발주됨에 따라 해체공사 수행과정에서 발생하는 목재류 및 유리섬유, 석면 등의 특정폐기물에 대한 처리를 완벽하게 하지 못한 관계로 발파 해체 작업시 이들이 비산되어 환경단체 및 언론기관으로부터 고발성의 비난을 받게 된다.

따라서 발파해체공사를 수행함에 있어서는 관련된 모든 공사를 일괄 발주하여 좀 더 치밀한 계획하에 책임시공이 이루어져야 한다.

④ 사전취약화 작업

사전취약화작업(Preweakening)은 구조물의 붕괴를 용이하게 하고, 계획된 방향과 장소로 정확한 붕괴 및 전도를 유도하기 위하여 비내력벽 및 일부 내력벽, 계단부 드을 파쇄하는 작업으로, 이론

적으로는 구조물이 가지고 있는 안전율을 최소화하여 1.0에 가까울 정도로 취약화 시키는 것이 바람직하다고 할 수 있으나, 현실적으로 안전문제나 사전 준비작업의 복잡성으로 인해 완벽한 취약화 작업은 곤란하다.

따라서 취약화 작업은 구조물에 대한 정확한 지식과 정보를 갖고 있는 구조기술자의 지휘하에 실시되어야 한다.

가. 슬라브 절단

건물 붕괴시 지하층의 Girder 및 Slab가 옹벽을 잡아당길 위험이 있으므로 이에대한 취약화작업을 다음과 같이 실시한다. Girder와 Girder 사이의 Slab를 폭 20cm 정도로 Breaker(B/H 0.12m')를 이용하여 사전 파쇄하고 노출된 철근을 산소절단기를 이용하여 Cutting 한다.

나. 비내력벽 제거

건물 내부에 있는 모든 비내력벽은 Core부에 위치하고 있으며 발파층의 비내력벽은 장비(Breaker)와 인력에 의해 파쇄한다. Pre-weakening 작업범위는 각각의 대상요소에 따라 상이하나 Core부의 경우 Pre-weakening 높이를 Girder의 높이와 동일하게 수행한다.

다. 계단부 사전취약화 작업

계단부의 사전취약화 작업은 계단폭의 1/2을 Hand Breaker를 사용하여 Con'c를 Chpping하여 철근을 노출시켰으며, 건물 붕괴방향과 직교하는 계단실 전면 벽체에 대하여는 건물붕괴시 전단응력이 크게 발생할 것으로 예상되어 Con'c를 파쇄하고 노출된 철근을 절단한다.

라. ELEVATOR GUIDE RAIL 절단

Elevator Shaft 내부에는 36개의 Steel Guide rail을 설치하고 이들은 건물의 붕괴거동을 방해할 수 있으므로 Main Blasting층마다 산소절단기를 사용하여 사전에 절단시켜 놓는다.

마. Core내 내력벽

대상건물에 철근콘크리트 모멘트 연성골조에 전 단력을 추가한 이후 골조방식으로 Core내 벽체가 건물의 구조적 안정에 중요한 역할을 하게 되므로 Preweakening 작업시 신중을 기하여야 한다. 따라서 다음 사항에 중점을 두어 설계 시공을 하여야 한다.

가) 하부층에서의 취약화작업으로 인한 건물의 구조적 안정성

나) Core부 4면의 벽체에 대한 대칭형 작업으로 응력 집중현상의 방지

다) 지나친 취약화 작업으로 장비작업시 발생 할 수 있는 Slab 붕괴에 대한 안정성 검토

㉠ Slotting

Pre-weakening 작업을 수행함에 있어 실시하는 Chipping작업에 일종이다. Cutting과 같은 작업은 주로 Column이나 Slab등을 작업목적에 따라 부재를 취약화 시키는 반면에 Slotting 작업은 건물이 붕괴되는 방향과 공법의 특이성에 따라 길이가 긴 벽체에 대하여 시공하게 된다. Telescoping 공법을 적용한 건물은 구조적 안정문제로 Core부 벽체철거가 곤란한 Elevator 전면 및 배면 벽체에 대하여 Slotting 작업을 실시하여 건물붕괴시 벽체가 격일 수 있도록 한다. Slotting 작업은 Hand Breaker를 사용하여 벽체높이의 1/2 위치에 약 20cm의 폭으로 실시하였으며 Re-Bar는 절단하지 않는다.

㉡ Coner부 Cutting

건물붕괴시 정확한 붕괴거동을 유도하기 위하여 지발사차로 인한 붕괴 회전(Tilting)방향을 방향할 수 있는 Core내 내력벽체의 모서리 부분에 대하여 Cutting 작업이 필요하다. 따라서 상부 미발파층(7, 9, 13 15층) Core Corner부 및 일부계단 Corner부에 대하여 Cutting 작업을 실시 하므로써 건물붕괴시 회전을 유도 할 수 있었으며 건물붕괴시 2차적으로 각층간의 벽체의 파쇄가 이루어지도록 한다. 작업방법은 Hand Breaker를 사용하여 그림과 같

이 실시한 후 Re-Bar는 절단하지 않았다.

㉢ Column Chipping

대상건물이 붕괴되는 과정에서 건물이 잘 격일 수 있도록 하기 위하여 Main Blasting층(4, 6, 10층)의 외곽부(Perimeter) Column 하단부에 1열의 Re-Bar가 노출될 깊이까지 높이 20cm 정도의 Chipping을 실시하고 노출된 Re-Bar를 산소절단기를 사용하여 절단한다.

5. 환경영향검토 및 예측결과

발파해체공법의 최대장점은 첫째, 공사비의 저감 (Lower Cost), 둘째, 공사기간의 단축 (Saving Time), 셋째, 안전사고 저감 (Lower Safety), 넷째, 지속소음·분진의 감소 (Reduces Noise & Dust), 다섯째, 건설폐기물의 재활용 (Concrete Recycling)이다. 이러한 경제적 효과와 환경안전 및 재활용효과를 극대화 하고, 평가하기 위하여 전기한 사례를 종합하여 예측 및 측정결과를 다음과 같이 정리하였다.

5.1 경제성 검토결과

K사 및 H사 시행자료에 의하면 기계식 해체공법은 1층 기준 평당 5만원으로부터 15층 기준 평당 8만원으로써 고층으로 갈수록 공사비용이 커지지만, 발파해체공법의 경우 1층기준 평당 52,000원으로부터 15층기준 평당 58,000원으로 저층에서 고층에 이르기 까지 공사비용이 크게 높아지지 않는다. 대체로 5층 건물 기준으로 그 이상 고층은 발파해체공법의 경우가 훨씬 유리하다. A발파해체공정의 경우 기계식해체공법은 총공사비가 45억원, 발파해체공법은 30억원으로써 무려 33%가량 공사비가 저렴한 것으로 평가하였다.

5.2 공사기간 및 안전사고율 검토결과

(1) 공사기간 단축율 검토

발파해체공법을 적용한 공사기간은 표5 에서와 같이 A공정의 경우 45일(발파해체 총 공사기간은

105일 소요, 기계식 기준으로 해체 총공사기간 135일 예상), B공정의 경우 13일이 소요됨으로써 기계식에 비해 약 30%이상 공사기간을 단축 할 수 있었다.

(2) 공사 중 안전 사고율 검토

기계식 구조물해체공법의 경우 전체 구조물에 대한 해체가 이루어 지므로 구조물 해체 작업진행 중 역학적 구조가 불안정하게 되어 공사 중 붕괴 등의 재해발생우려가 높은 편이지만 발파해체공법의 경우 발파시 까지 원래구조물의 상태가 그대로 유지되므로 구조적 안정이 확보되어 공사도중 구조물의 붕괴 위험이 없고, 낙하·추락등의 건설안전 사고 방지에도 매우 유리하다.

(3) 인근구조물의 안전사항 검토

발파해체시 진동의 수준은 22m 떨어진 주택지반에서 0.405cm/sec가 측정되었으며 70m 떨어진 주요구조물인 용벽 상부에서 0.3 cm/sec, 기타 167~220m 지점의 아파트 옥상, 주택가 도로변에서 0.052, 0.045cm/sec로써 발파진동 기준치에 미달하였다. 또한 김해공항 (구)국제선청사 해체의 경우 허용진동치 0.5cm/sec 일때, 한계거리는 15m 였으며, 발파 시 실제 측정결과는 40m 떨어진 관리동에서 0.502cm/sec 였으며, 170m 떨어진 대저마을에서 0.302cm/sec였고, 230m 떨어진 국내선청사에서는 0.147cm/sec 가 측정되었다.

측정된 Date를 BlastAZ R3.0으로 회귀분석한 결과 (자승근 환산거리) $k=0.03$, $b=-1.06$ 이었다. 건물 균열측정기의 발파전후 측정결과는 발파전 일상적 변화와 거의 유사하였으며, 기울기 측정기의 측정결과는 0.00015rad이하 (기준치 0.0007~0.001)로써 온도 및 측정오차 변화량을 넘지 않는 수준이었다.

표 5 발파해체공법 시공 시 소요공사기간

구 분	공 사 기 간	발파해체 일시	공기단축율 (발파식/기계식)	비 고
A 공 정	1994.9.12~1995.4.25 (총공사기간 : 220일)	1994.11.20	60%	가시설, 건물해체작업등 순해체기간은 45일 소요
B 공 정	2003.3.28~2003.4.10 (발파해체기간 : 13일)	2003.4.10 AM 05:30	70%	순발파해체기간 13일소요

5.3 지속 소음 및 분진 낙하율 등 검토결과

(1) 소음 및 폭풍압 발생상태 검토

발파로 인한 소음(15m 거리에서 브레이크 91dB(A), 발파 130dB)은 기계적소음(15m 거리에서 브레이크 91dB(A), 압쇄기 78dB(A))에 비해 다소 높기는 하나 소음발생 시간이 3~4초로써 가청범위 내의 인근주민에게 환경공해를 감소시킨다. 폭풍압은 발파해체시에만 발생하지만 15m 거리에서는 유리창이 파손되기 시작하는 169dB이하(214m에서 131dB ~ 232m에서 109dB)에 해당하므로 방호시설을 잘 활용할 때 폭풍압 피해는 방지할 수 있다.

(2) 분진낙하율 및 비석발생정도 검토

발파시에는 분진발생이 불가피하지만 약 1~2분 후에 모두 낙하되므로 공사후 살수로 처리가 가능하다. B사의 계측결과 80m 떨어진 지점에서 595.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 측정되었다. 그러나 기계식 해체작업은 전공사 기간동안 분진이 지속적으로 발생하여 주변에 누적분진이 증가하여 민원발생의 우려가 높다. 또한 발파시 발생하는 비석은 A사 공당장약량 0.18kg장전의 경우

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

식을 사용하여 계산하면 5.2m가 된다. 또한 B사 1층 최외각기둥(45×75cm)기준으로 비석거리는 19m 내지 최대 28m가 된다. 이때 1,2,3차 방호막을 설치할 때 폭풍압제어와 함께 분진 및 비석의 거리를 제어할 수 있다.

실제 발파해체시 파쇄된 콘크리트 비석은 2~3cm 직경의 크기로 약 30m 정도에 비산된 여가 있으며, 김해공항 (구) 국제청사해체의 경우 10m이 내에 해당되는 등 비석피해 우려는 없었다.

5.4 건설폐기물의 재활용 현황

폐기물은 일반폐기물과 산업폐기물로 구분할 수 있으며 파쇄과정 전 내부에 수장재를 처리하여 콘크리트폐기물과 일반폐기물 및 재활용폐기물로 분리하여 각각의 용도로 재분류 처리한다.

(1) A사의 재활용 사례

발파해체된 콘크리트를 재활용 골재로 생산하여 현장 적용시 환경보존과 자원재활용 측면에서 큰 의의가 있다. 남산아파트 발파 시에는 발생된 폐콘크리트를 Impact 와 Jaw Crusher 로 파쇄하여 생산된 골재는 도로공사 표준시방서에 제시된 보조기층 품질 기준치를 상회하므로 모두 사용이 가능하여 20cm 보조기층과 30cm 동상방지층으로 도로공사에 시험 시공하였다.

(2) B사의 재활용 사례

발파해체공법으로 시공하여 경제성을 높이기 위해서는 먼저 발파 전 사전 취약화 과정에서 내장재를 해체하여 분리하여야 하며 이렇게 분류된 폐기물은 발파후의 폐기물과 혼합을 방지함으로써 재활용성을 증대하게 되며, 발생분진의 유해성 억제와 천공, 장막, 결선 등 발파작업성 확보에 따른 작업의 용이성과 발파 붕괴 시 장애요인 제거로 붕괴를 원활히 유도하는데 도움이 된다.

B/H 03, 06을 투입하고 개구 출입문을 재밀폐하여 소음, 분진을 차단하고 내장재 해체, 집적, 옥외 반출을 하였고 3층부 및 1,2층 협소구간 해체 및 소형 부재집적은 인력 해체로 하였으며 옥외 반출된 내장재 및 폐기물은 폐기물 처리업체에서 전담 처리 하였다. 폐기물은 철물폐기물과 천정재 폐기물 및 벽돌등 콘크리트 폐기물, 목재 폐기물, 섬유류·비철 폐기물로 분리하였다. 표 6과 같이 고철류와 천정재, 창문틀등은 재활용이 가능하며, 목재류와 섬유류는 재활용을 할 수 없다. 그러므로 재활용이 가능한 배관류 등 고철 폐기물과, 문틀, 바닥재, 천정재 폐기물 등은 전담 업체에서 처리하고 벽돌, 콘크리트 등은 철근과분리·파쇄하여 골재로 사용하였다.

표 6 재활용여부 분류표

재활용 가능	재활용 불가
- 철물류 :배관류, 문틀, 바닥재, 천정재 등 고철류, 기타 노출철물 등	-목재류 :집기류, 내부칸막이, 합판, 마감재
- 콘크리트류 :철근과 분리하여 재활용 골재로 사용	- 섬유류 : 보온재, 미관재, 마감재 등 - 기타 : 유리, 비철, 비금속 등

6. 결 론

우리나라의 구조물 발파해체 역사는 1991.8 육군 사관학교 지상 1층 식당의 실험용 발파해체로 부터 1992.6 지상 6층의 부산 애런유스호스텔의 상업성 발파해체 및 최근의 김해 국제공항 구 국제선 청사 발파해체로 이어지고 있다. 이들 남산 아파트 발파해체 및 김해국제공항 (구)국제선 청사 발파해체 등 주요 해체 사례를 경제성, 안전성 측면에서 정리한 결과는 다음과 같다.

(1) 현재의 발파해체 공법은 기계식 해체공법에 비해 약 60~70%의 공기단축을 확보할수 있으며 5층이상 고층인 경우 경제성은 매우 높다. 향후 진보된 공법이 연구 개발될때 더욱 높은 경제성

을 기대할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 10~20층 이상 고층빌딩 해체의 경우 기계식해체로는 거의 불가능 하므로 고층의 재래식공법의 불가영역 확점 및 공사비 절감효과는 매우 높다.

(2) 구조물 붕괴거동 예측을 위해서는 구조 해석용 ETABS PLUS 3차원 정적해석을 적극활용하고, DIVELCONTM 모의 실험결과 분석 및 각종 발파관련 회귀분석 프로그램 등을 활용한 합리적이고 공학적인 예측이 필요할 것이다.

(3) 인근 건물에 대한 안전성 검토 결과 진동안전기준이 5cm/sec 내지 0.5cm/sec 일때 실측결과는 22m 지점에서 0.405cm/sec, 40m 지점에서 0.502cm/sec 로 안전하였으며, 인근 건물의 균열 및 기울기 측정결과는 온도 및 측정오차 변화치를 넘지 않는 양호한 수준이었고, 비석은 10m 내지 30m 이내에 콘크리트 파편이 소량 비산하였다. 분진 낙하율은 80m 지점에서 595.5 ug/m³ 으로 대기분진 안전기준을 초과하였으나 1~2분후에 모두 낙진하므로 인근 주택에 대한 비산 안전조치 및 공사 후 즉시 청소 및 살수조치가 필요하였다.

(4) 발파소음 및 폭풍압은 기계식해체 공법에 비해 다소 높기는 하지만 지속시간이 3~4초로 짧은 점에서 가청 범위내의 인근 주민에게는 오히려 환경공해를 줄이는 역할을 한다. 특히 소음, 폭풍압, 비석, 분진 등을 줄이기 위하여 1,2,3차 방호막을 설치하고 예상 프로그램 운영으로 사고 및 피해 대비책에 만전을 기해야 할 것이다.

(5) 발파해체공법의 경제성 향상에 중요한 요소인 건설 폐기물의 재활용을 위해 일반폐기물과 산업폐기물로 구분하고 다시 재활용 가능폐기물과 불가능폐기물로 분류하여 도로용 보조기층재 및 콘크리트 골재원 사용을 위한 일정비율 사용 의무화 등 관련법령 개정 등 법적 보완이 필요하며, 배관류, 철근, 문틀, 천정재 등의 재활용 활성화가 필요할 것이며 집기류, 마감재, 보온재, 유리, 비철, 비금속 등 재활용 불가능폐기물의 활용방안 강구 및 효율적 폐기처리 방안을 마련하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 김재극, (1997.3), "산업화약과 발파공학" 서울대학교출판부, pp.50
2. 김희창·안명석·김종현, (2000.9), "화약 및 화공품의 역사와 향후 전망에 관한 연구" 화약발파, 대한화약기술학회, pp.9~10
3. 이정인·류창하, (1977), "발파작업에 의한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향에 관한 연구", 대한광산학회지, 대한광산학회, Vol. 16, pp.41~50
4. 최영천·최원규·안명석,(1997), "구조물발파 효율 개선방안", 한국소음진동공학회지, 제7권 2호, pp.179~188
5. 안명석 外,(1996), 구조물 발파해체의 NEAR-MISS 사례와 개선방안, Journal of Natural Sciences, Vol. 10, pp.32~44, Dec, 1996
6. 構造物 解體工法, 대림엔지니어링(주)
7. 남산아파트 철거(발파해체)공사기록지, 코오롱건설(주), 1995, pp.64~87
8. 안명석 外, (2002), 구조물 발파공법 시공사례 및 향후 발전방향, 대한화약발파공학회 영남지회, Vol. 4,
9. 공병승 外, (2000.7) 강구조공학 도서출판 구미서관 (사) 한국강구조학회
10. Charles H. Dawding, (1984), "Blast Vibration monitoring and control "Northwestern University
11. Stig. O. Olofsson, (1988), Applied Explosives Technology for Construction and Mining, pp. 33~199
12. 기경철· 김일중, (1999), "산학인을 위한 발파공학" 기술도서출판 기공사, pp. 181~194