



콘크리트구조물의 해체

화약에 의한 콘크리트 구조물의 해체 공법 및 특성

Explosive Demolition of Concrete Structures : Method and Characteristics



강 영 철*

1. 서 론

최근 도시의 과밀화와 지가의 상승에 따른 신속 부지의 획득이 어려워짐에 따라 기존 노후 구조물의 해체 및 재개발에 대한 관심이 커지고 있다. 그러나 기존의 재래식 해체 방식은 소음과 진동 및 분진이 상당 기간 발생하는 문제점이 있다. 이에 반하여 공사현장에 인접한 주민들의 쾌적한 주거 환경을 요구하는 목소리는 점점 높아만 가고 이에 따른 행정 규제는 갈수록 엄격해지고 있는 추세이다. 따라서 각종 해체 공법을 심도있게 연구하고 이를 극복할 수 있는 해체 공법의 개발이 필요하다. 이런 시점에서 우리나라에 콘크리트 구조물 해체 공법의 하나로 보급시키기 위해서는 구조물의 붕괴에 따른 개별적인 요소 기술의 개발이 시급한 실정이다.

발파에 의한 해체 공법은 기계식 해체 공법에 비하여 비용을 절감시킬 수 있을 뿐만 아니라 소

음, 진동 및 교통 차단 등의 환경문제에 관한 대책을 단기간 안에 해결할 수 있는 장점이 있다. 그러나 다이내마이트, 뇌관 등의 화약류를 사용하기 때문에 법적 규제, 발파시의 소음과 진동 그리고 비산물에 대한 방호 등의 안전성 확보와 인근 주민의 이해와 협조에 대한 공감대 형성을 필요로 하고 있다.

우리나라에서는 1991년 8월 한국화학 화약 응용팀과 육군사관학교의 필자 등에 의해 국내에서 최초로 발파공법을 적용한 철근콘크리트 구조물에 대한 붕괴 기동 연구가 수행되어진 이후 몇몇 기업이 발파해체공법을 발전시켜 나아가는데 주도적인 역할을 수행하고 있으며, 철근콘크리트 라멘 구조물을 중심으로 기술을 개발하고 경험을 축적해 가고 있는 상태에 있다.

발파해체공법이 우리나라에 소개된 이후 5년이라는 짧은 기간에 20여건의 크고 작은 발파해체를 통하여 상당한 수준의 기술력을 확보한 것으로 평가된다. 또한 1994년 11월 20일 남산 외인 아파트와 11월 26일 여의도 라이프 사옥과 같은 고층 철

* 정회원, 육군사관학교 토목공학과 부교수, 공학박사

근콘크리트 구조물을 화약을 이용하여 발파해체함으로써 저층 구조물의 발파해체에서 얻을 수 없었던 귀중한 기술을 축적할 수 있었으며 본격적으로 고층 구조물에 대한 발파해체의 새로운 장을 열게 되었다.

2. 발파해체 공법

2.1 개설

발파해체 공법을 한마디로 말한다면 폭약의 폭발력 그 자체에 의존하기보다는 해체대상 구조물의 일부분을 발파하여 구조물의 강성저하와 불안정을 유도하여 구조물을 붕괴시키는 것을 의미한다. 여기서 폭파와 발파의 차이점을 사전적 의미로 구분하면 폭파(explosion)는 ‘폭발시키어 깨뜨림’으로 정의되며, 발파(blasting)는 바위와 같은 ‘圓形物에 구멍을 뚫고 화약을 장전하여 폭파하는 일’로 정의하고 있다. 바꾸어 말하면 폭파는 교량이나 구조물의 외부에 폭약을 장치, 폭발시킴으로써 소기의 목적을 달성하는데 비하여, 발파는 암석이나 콘크리트에 천공을 하여 폭약을 장전, 폭발시켜 암석을 절리 또는 제거하거나 구조물을 붕괴시키는 다분히 산업적인 목적을 지닌 협의의 폭파라고 할 수 있다.

콘크리트 구조물의 발파해체에 소요되는 주에너지원으로는 자중에 의한 위치 에너지를 들 수 있다. 위치 에너지는 낙하하는 동안 운동 에너지로 전환되고, 이러한 운동 에너지가 구조물의 파괴에 소모된다. 즉 자중과 같이 구조물에 작용하는 상재 하중이 구조물의 발파 붕괴 기구를 형성하게 된다. 따라서 저층 구조물의 경우 위치 에너지가 작기 때문에 운동량이 적어지므로 붕괴 지점에서 에너지의 양이 불충분하여 붕괴가 중지될 수도 있으며 파쇄 효과도 감소되므로 파쇄물의 크기도 커진다.

따라서 콘크리트 구조물을 안전하고 효과적으로 발파해체하기 위해서는 구조물의 구조 공학적 특성 파악과 발파에 따른 구조물의 동적 거동에 대한 사전 조사 및 발파에 대한 기술적인 조사와 준비 등이 필요하다. 또한 발파가 주변에 미치는

환경 영향 등을 평가하기 위하여 지반 진동, 폭발압 및 소음 등에 대한 대책마련 및 계측이 요구된다.

2.2 발파해체의 기본 메커니즘

콘크리트 구조물을 붕괴·해체시키기 위해서는 구조물의 강성을 저하시키거나 구조물의 전체적인 안정성을 와해시키기 위해 순간적으로 상당히 큰 동적 파괴력을 기동과 같은 특정 부재에 가함으로써 구조물 전체의 붕괴 기구를 형성하도록 하는 것이 중요하다.

재료적인 측면에서 파괴는 구조물이 변형되기 전의 하중 상태와 재료의 강도 그리고 역학적 거동에 대한 운동 방정식이나 평형 조건으로부터 구조물을 해석하여 파괴에 대한 거동을 예측할 수 있다. 그러나 발파에 의한 붕괴 거동은 재료의 파괴 거동과는 달리 재료의 균열 전파 속도와 발파 시간차에 따른 구조물의 불안정 거동과 대변형이 복합적으로 작용하므로 붕괴 거동에 영향을 미치는 변수들을 정의하기가 쉽지 않다. 따라서 발파에 의한 붕괴 거동은 발파 및 기폭 순서에 많은 영향을 받게 되므로 효과적으로 기동을 파괴시키는 과정과 함께 붕괴 구조물의 전반적인 붕괴 거동에 대한 예측과 판단을 필요로 한다.

구조물의 붕괴 형태는 주변 여건, 지형, 해체대상 구조물의 구조적 특성과 형태, 사용 재료, 구조물의 높이, 작업의 난이도, 비용, 인접 구조물과의 이격 거리 등을 종합적으로 고려하여 결정하게 되며 붕괴 형태는 전도 붕괴, 수직 붕괴, 내측 붕괴, 외측 붕괴, 지그재그 붕괴 형태 등 현장 여건과 붕괴 형태에 따라 여러 가지를 조합하여 사용할 수 있다.

구조물 주변에 충분한 여유 공간이 있어서 한쪽 방향으로 전도 방향을 유도할 수 있고 주변에 지반 진동으로 인한 피해가 예상되지 않을 경우에는 작업의 용이성과 비용절감 측면에서 전도 붕괴가 바람직하다. 그러나 도심지 내에 있는 구조물이라면 인접 구조물과의 이격거리에 따라 전도 붕괴와 수직 붕괴의 조합 또는 수직 붕괴를 유도하는 것이 바람직하다. 또한 해체 구조물 안에 지하 주차

장파 같은 공간이 있을 경우에는 수직 붕괴를 유도하기가 용이하다.

구조물의 붕괴 형태가 결정되면 붕괴 형태에 따른 발파지점의 선정과 기폭 순서가 중요하다. 일반적으로 5층 이상의 콘크리트 구조물을 전도 발파해체할 경우에는 1, 2, 3층의 기둥을 전도 방향으로 기둥 열에 따른 적정 발파 시간차를 주어 축차적으로 발파 파쇄 시킴으로써 구조물의 저면에서 전도 모멘트가 자중에 의해 발생하도록 한다. 또한 철근콘크리트 구조물의 수직 붕괴시 붕괴 기구 형성을 위해서는 다양한 방법을 사용할 수 있겠지만, 기둥의 발파 위치는 구조물의 층수에 따라 표 1을 참고하여 적용할 수 있다.⁽¹¹⁾ 우리나라에서는 처음으로 시공된 17층의 고층 남산 외인 아파트의 경우 발파 층은 1, 2, 6, 10, 14층의 5개 층을 선정하였다. 그러나 발파층이 같더라도 모든 기둥에 동일한 천공 방법과 장약량을 사용하는 것은 아니다. 기둥 별 천공 수와 장약량 등은 구조물의 붕괴 형태와 연관되어 결정되며 기폭 순서와 밀접한 관계를 가지고 있다. 일반적으로 구조물의 상층부에는 저층부보다 적은 장약량을 장전하고, 전도 방향 쪽으로 더 많은 천공을 하여 구조물의 자중에 의한 붕괴 변형이 쉽게 일어나도록 해야 한다.

표 1 수직 붕괴시 기둥 발파 층

구조물 층수	기둥 발파 층	구조물 층수	기둥 발파 층
4, 5 층	1, 3	12 층	1, 2, 6, 9
8 층	1, 3, 5	15 층	1, 2, 6, 9, 12
10 층	1, 3, 5, 8	25 층	1, 2, 6, 10, 14, 18, 22

일반적으로 철근콘크리트 구조물에 많이 사용되고 있는 압축 강도가 $250\text{kg}/\text{cm}^2$, 휨 철근비가 0.25%, 전단 철근비가 0.06% 정도로 배근된 콘크리트에 천공 직경 40mm로 천공을 하고 여기에 폭약의 직경 30mm, 길이 45mm의 PETN(Pentaerythrite Teternitrate) 45g을 장전하고 폭발시켰을 때 시간 경과에 따른 콘크리트의 변형 상태를 관찰하면 콘크리트의 균열이 시작되는 시간은 폭발 후 $100\mu\text{s}$ ($100 \times 10^{-6}\text{s}$)에서 시작하여 약 $600\mu\text{s}$ 에서 완료되는 것으로 나타난다. $t=600\mu\text{s}$ 에서 균

열부의 변형률은 5% 이상 되는데 이러한 변형률은 강도 설계법에서 채택하고 있는 콘크리트 압축 연단에서의 최대 변형률의 17배에 해당하는 변형률이다. PETN의 폭발 속도는 $8,300\text{m}/\text{s}$ 로써 국내에서 일반적으로 사용하고 있는 젤라틴 다이내마이트의 폭발 속 $6,500\text{m}/\text{s}$ 보다 빠르고 TNT의 파괴 효과를 1.0으로 볼 때 상대 효과 지수는 1.6인 폭약이다.

일반적으로 폭발 후 암석이나 덩치가 큰 콘크리트에 균열이 발생하는데 소요되는 시간은 최소 저항선(burden : 장약 중심에서 자유면까지의 거리)의 길이가 1 m 미만인 발파에서는 폭발 후 자유면(free face)에서 균열이 발생할 때까지의 시간은 1~9ms이며, 응력파의 작용에 의한 암반 속의 균열은 폭발 후 9ms 이내에서 종료되는 것으로 볼 수 있다. 균열 발생 후 구성 물질이 운동하기 시작하는 시간에 대해서는 측정 방법에 따라 차이가 있지만 최소 저항선이 50cm 정도일 때 가장 빨리 파괴되어 운동하기 시작한다.

3. 발파 설계

발파 설계를 지배하는 주요 변수로는 콘크리트와 폭약의 물성과 관련된 변수를 비롯하여 천공과 붕괴 형태를 결정지어 주는 기폭 시스템과 관련된 기하학적 변수들이 있다.

3.1 콘크리트

발파해체와 관련한 콘크리트에 대한 변수에는 콘크리트의 두께, 강도, 철근량, 단면의 기하학적 형태 등을 들 수 있다.

Fleischer⁽¹⁾는 콘크리트 압축 강도와 발파 효과 사이의 관계를 알아보기 위해 콘크리트의 압축 강도가 $200\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 경우와 콘크리트의 압축 강도가 $530\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 두 경우에 대한 누두공(crater) 발파 시험을 통하여 콘크리트의 압축 강도가 누두공 형성에 그다지 큰 영향을 미치지 못하지만 누두공 체적은 다소 증가한다는 사실을 규명하였다. 이것은 고강도 콘크리트가 저강도 콘크리트에 비해 상대적으로 작은 변형률을 가지고 있기 때문

에 폭발 하중과 같이 순간적으로 큰 동적 하중을 받을 경우 보다 더 쉽게 취성 파괴를 일으키기 때문이다.

콘크리트의 압축 강도가 다르고 단면 치수가 같은 경우 동일한 발파 효과를 얻기 위해서는 콘크리트의 압축 강도에 따라 폭약량도 달라져야 하는데 일반적으로 콘크리트의 압축 강도가 $450\text{kg}/\text{cm}^2$ (50MPa) 이하인 경우에는 강도가 증가함에 따라 폭약량도 다소 증가하지만, $450\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상인 고강도 콘크리트에서는 강도가 증가함에 따라 폭약량이 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이는 고강도 콘크리트에서는 변형률이 낮고 취성이 강하기 때문으로 해석된다.

콘크리트의 강도는 하중 재하 속도에 따라 큰 영향을 받는데 압축 강도보다도 특히 인장 강도가 심하다. 폭발 하중과 같은 고속 하중 재하시 압축 강도는 2배, 인장 강도는 4배까지 증가한다. 따라서 하중 재하 속도에 의한 콘크리트의 강도 증가와 압축 강도-폭약량 변화 실험의 결과로부터 콘크리트의 압축 강도가 발파해체에 미치는 영향은 그다지 크지 않다고 할 수 있다.

또한 폭발 상태에서 발생하는 충격파로 인한 균열의 발생 및 전파 과정은 콘크리트 부재의 균열이 기존의 미세한 균열이나 시멘트 풀(cement paste)과 골재 사이의 경계면과 같은 취약한 곳을 찾아가면서 균열을 형성하는 것과는 달리 폭발 하중 강도가 큰 곳을 따라 형성된다. 따라서 철근콘크리트의 발파에 대한 저항 능력을 표현하는데 있어서 압축 강도를 사용하기보다는 재료의 파괴 에너지(fracture energy)를 사용하는 편이 타당하다고 본다. 파괴 에너지는 재료의 강도 및 변형률과 함수 관계가 있는 것으로 알려지고 있는데 현재 상태에서는 발파해체와 관련하여 파괴 에너지 값을 활용할 수 있는 단계는 아니지만 일반적인 구조물에 적용할 수 있는 강도 범위에서 보면 파괴 에너지와 압축 강도 사이에는 상관 관계가 대단히 높은 것으로 알려지고 있다.⁽³⁾

철골 철근콘크리트 구조물이 아닌 철근 콘크리트 구조물에서 철근의 존재는 발파 해체에서 큰 영향을 미치지 않는 것으로 추정되는데 기동 발파에 사용하는 폭약량으로는 철근 자체가 다소 휘어

지는 것을 제외하고는 그다지 큰 손상을 주지는 못한다.

콘크리트 표준 시방서에는 기둥의 철근비를 1%~8%가 되도록 규정하고 있기 때문에 철근에 의하여 철근 콘크리트의 파쇄력이 다소 영향은 받겠지만 무근 콘크리트에 비하여 크게 고려할 정도는 아니다. 또한 고층 구조물의 경우 하층부에서 주철근으로 직경이 35mm 이상의 철근을 사용할 경우 용접 이음을 하게 되는데 이 경우에도 폭발력에 의하여 철근의 이음부가 전단 파괴되므로 철근에 의한 압축 저항력은 고려할 여지가 없다. 다만 철근이 콘크리트보다 매질의 전파 속도가 빠르기 때문에 철근을 통해 폭발 에너지의 일부가 신속하게 전달되고 복합 재료와 같은 거동을 함으로써 충격파의 진행 속도를 지연시키거나 휘어진 주철근이 파쇄물의 이탈을 막는 역할을 하기 때문에 철근 콘크리트 구조물의 경우 무근 콘크리트에 비해 다소 많은 양의 폭약을 사용해야 한다.

3.2 폭약 및 뇌관

폭약이란 화학 반응을 통하여 가스 형태로 격렬한 변화를 일으키며 사방으로 균일한 압력과 열을 방출하는 물질을 말한다. 폭약은 고체 상태에서 기체 상태로 급속하게 연소 또는 변화하는 과정인 폭발 속도에 따라 저폭속 폭약과 고폭속 폭약으로 구분한다. 저폭속 폭약은 폭발 속도가 $400\text{m}/\text{s}$ 이하의 폭약으로 부연 및 흑색 화약이 여기에 속하며, 고폭속 폭약은 폭발 속도가 $1,000\text{m}/\text{s}\sim 8,500\text{m}/\text{s}$ 이며 파쇄 효과가 요구되는 폭파 작업이나 포탄이나 폭탄 등의 내부 장약으로 사용된다.

폭약의 폭발 효과는 크게 절단 효과, 파괴 효과 및 누두공 형성 효과로 구성되며 폭약의 폭발 속도, 폭약 밀도, 에너지 방출량 및 기타 특성에 의하여 결정된다.

현재 사용되고 있는 폭약 가운데 젤라틴 다이너마이트, 정밀 폭약, TNT, 데트리톨, 콤포지션 C₁, 형성 장약(shape charge) 등이 구조물의 발파 해체에 사용할 수 있으며, 장전공 내에 장전하여 사용할 수 있는 폭약으로는 젤라틴 다이너마이트, 정밀 폭약, 콤포지션 C₁ 등이 있다.

콘크리트 구조물을 해체하는데 있어서 폭약과 관련된 변수로는 폭약 강도, 장약량, 천공 간격 및 천공 길이, 전색 등을 들 수 있다. 폭약 강도는 콘크리트의 압축 강도처럼 그 개념이 명확하게 정의된 것은 아니지만 Langefors와 Kihlstrm가 사용하기 시작하였으며 폭약 강도는 폭발 에너지와 가스 체적의 함수로 정의하였다.⁽⁶⁾

콘크리트에 대한 충격파의 효과는 폭발 속도에 의존하며 폭발 압력은 폭약의 밀도와 속도 제곱에 직접 비례한다. 따라서 무근 콘크리트나 조적조 구조물을 안전하게 발파 해체하는데 있어서 중요한 변수는 폭발 속도를 줄이고 가스압을 줄이는 것이다. 이를 위해 스웨덴의 니트로 노벨사는 폭속이 3,000m/s이고 가스 체적이 0.4m³/kg인 Gurit라는 폭약을 무근 콘크리트 구조물 및 조적조 구조물의 발파에 사용하고 있으며, 일본에서는 폭속이 2,000m/s이고 가스 체적이 0.1m³/kg인 Urbanite라는 저폭속의 폭약을 사용하고 있다. 또한 폭속 60m/s이고 가스 체적이 0.05m³/kg인 콘크리트 파쇄제(concrete cracker)가 있는데 이는 폭연하면서 준정적 압력을 발생시켜 구조물을 붕괴시킨다.

뇌관에는 전기뇌관과 비전기식뇌관이 있는데 지연시간의 유무에 따라 순발뇌관과 지연(delay) 뇌관으로 구분한다. 순발뇌관은 지연시간이 없도록 되어 있으나 발파시의 전류의 방전과 뇌관 폭발 사이에 약 0.2 밀리 초의 시차가 존재한다. 지연뇌관은 DS(decisecond) 뇌관과 MS(milisecond) 뇌관으로 구분되는데 DS 뇌관은 초시 편차를 0.25 초 간격으로 만든 것이고 MS 뇌관은 초시 편차가 0.025 초 간격으로 만든 것이다. 지연 뇌관을 사용하는 이점은 순발 뇌관에 비하여 동일한 제발(齊發) 효과를 얻으면서 지반 진동을 줄일 수 있고 공기압을 줄일 수 있다는 점이다.

미국 Austin 화학 회사에서는 뇌관의 사용 용도 별로 ms(밀리 초) 지연 뇌관을 생산 판매하고 있는데 구조물의 발파 해체에 사용되는 전기 뇌관은 Star(Coal star, Rock star, Time star) 계열 뇌관 중에서 Time star이며 500ms 간격으로 최장 8 초까지 지연시킬 수 있다.

콘크리트 구조물 발파 해체에 사용할 뇌관은 주

변 여건과 기상 상태, 기폭 시스템의 특성을 고려하여 결정하여야 하지만 상호 보완적 측면이 많이 있으므로 발파 설계를 하는데 있어 충분한 고려가 필요하다. 전기 뇌관은 기폭시키기 전에 결선의 이상 유무를 최종 순간까지 확인할 수 있는 장점이 있으며 일시에 모든 뇌관에 전류를 공급하여 뇌관을 작동시켜 놓음으로써 전기폭이나 cut-off가 발생하지 않는 이점이 있지만 전류의 반응으로 기폭 되도록 만들어져 있기 때문에 발파 전류 이외의 전기적 에너지에 의해서도 기폭될 수 있는 가능성이 있다. 따라서 전기 뇌관을 사용하여 기폭 시스템을 구성할 경우에는 미주 전류(stray current)나 정전기, 낙뢰, 무선 주파 에너지, 고압선 등의 외부 에너지가 발파 회로 내에 유입되지 않도록 안전 대책을 강구해야 한다.

전기 뇌관의 단점을 보완하고 다단계 발파를 위하여 스웨덴의 니트로 노벨사가 개발한 비전기식 뇌관으로 노넬(Nonel; nonelectric) 시스템이 있는데 이 시스템은 노넬 뇌관, 노넬 커넥터(connector), 노넬 튜브(tube)로 구성되어 있다. 비전기식 뇌관으로 국내에 보급되어 있는 것은 Nonel과 Exel이 있는데 그 기능은 대동소이하고 다만 생산회사가 다르다.

노넬 튜브는 내경이 1.5mm, 외경이 3mm인 속이 비어 있는 플라스틱 관으로 관의 내벽에는 HMX(highmelting point explosive)가 단위 미터당 0.02g 도포 되어 있다. 노넬 튜브는 저에너지 도폭선(LED; low energy detonator)이라고도 하는데 플라스틱 튜브에는 아무런 영향을 주지 않고 폭속 2,000m/s로 내부의 HMX가 폭굉하면서 폭굉음없이 충격파가 전파되어 뇌관을 기폭시키는 시스템이다.

노넬 커넥터는 튜브의 폭굉파를 분기시켜 주는 역할을 하며 소뇌관, 커넥팅 블록으로 구성된다. 즉 소뇌관이 폭발하면서 여로 갈래의 튜브를 점화시키게 된다.

노넬 뇌관의 특징은 비전기적이기 때문에 정전기, 미주 전류, 낙뢰 등에 안전하고, 전기 뇌관에 비하여 연결 작업이 신속하며 외부의 충격이나 열 등 기계적 강도가 높고 진동, 마찰, 충격에 대한 안정성이 크며 내화성과 내수성이 좋고 지연 시차

를 다양하게 조절하여 발파 효과를 증대할 수 있다는 점이다.

때에 따라서는 비전기식 뇌관을 기폭 시키거나 조적조 벽을 제거하기 위하여 도폭선을 사용하기도 하지만 점진적으로 노벨 시스템으로 대체되고 있는 실정이다. 그러나 도폭선은 수중 발파와 같이 전기적 장치를 하기에 어려움이 있는 환경에서의 발파에는 유용하게 사용되고 있다. 또한 콘크리트 도관과 같은 것을 절단하는데 도폭선을 이용할 경우 효과적으로 원하는 부분을 절단할 수 있다.

도폭선의 폭발 강도는 도폭선의 중심에 넣은 십약에 대하여 단위 미터 당 그램(g/m)으로 나타내던가 또는 단위 피트 당 그레인(gr/ft)으로 표기한다. 1 그레인(grain)은 1gr로 표기하고 0.0648g의 중량을 나타낸다. 가장 일반적으로 사용하고 있는 도폭선의 강도는 5g/m(25gr/ft)와 10g/m(50gr/ft)이다.

특별한 목적에 사용하기 위하여 보다 높은 강도의 도폭선을 사용할 수 있지만 발파 해체시에는 일반적으로 5g/m~10g/m의 도폭선을 사용하면 소기의 효과를 달성할 수 있다. 도폭선을 이용하여 결선을 할 경우에는 모래를 덮어 줌으로써 도폭선 발화시 생성되는 소음을 감소시킬 수 있다.

구조물의 발파 해체시에는 구조물의 종류, 층수, 형상, 구조물의 폭과 길이의 비, 구조물의 높이와 폭의 비 등에 따라 붕괴 기구 형성을 위해 다양하고 복잡한 자연 시간을 사용하게 된다. 지발 시간차는 저층 구조물의 경우 고층 구조물의 경우보다 일반적으로 길게 주어지는데 이는 저층 구조물이 고층 구조물에 비해 붕괴 기구를 형성하는데 시간이 많이 소요되기 때문이다. 미국에서는 구조물 발파 해체에 사용하는 시차를 암석 발파시 채택하는 25ms 지연 시차보다 상대적으로 긴 500ms를 주로 사용하고 있다.

3.3 천공 설계

발파 효과를 가늠하는 누두공 체적은 폭약량과 천공 깊이에 따라 달라지는데 천공 깊이가 증가함에 따라 누두공 체적은 거의 선형적으로 증가하지

만 누두공을 형성하는데 폭약의 폭발력이 불충분하면 내부에 공동구(camouflet)를 만들게 된다. 누두공은 최소 저항선이 작은 쪽으로 형성되지만, 최소 저항선이 같다고 해도 천공을 포함하는 부분이 천공을 포함하지 않는 부분 보다 발파 효과가 좋다.

암석 발파 이론에 천공 간격은 인접 공과의 영향을 고려할 때 최소 저항선의 0.83 배로 하는 것이 최적의 천공 간격이 되지만, 기둥을 주로 발파하는 구조물의 발파 해체에는 개개 장전공의 파쇄 유효 반경을 증가시키기 위하여 최소 저항선의 1.2배~2배까지 천공 간격을 두어도 된다. 이것은 철근 콘크리트 기둥에서 콘크리트가 파쇄될 때 압축 부재로써의 기능을 상실하는 것을 기준으로 한 것이다. 이론적으로는 파쇄 효과를 중심으로 기둥에 대한 적정 천공 간격을 계산할 수 있지만 구조물의 발파 해체는 구조물 전체의 붕괴 기구를 형성하기 위한 기둥의 파괴 정도와 천공 간격의 최적 상태를 연계시키는 것이기 때문에 기둥의 위치에 따라 일반적으로 3~5개를 천공한다. 필요할 경우 붕괴 방향에 따라 기둥 당 1~2개를 천공하여 붕괴가 용이하게 하기도 한다.

구조물의 기둥에 대한 천공은 착암기를 사용하여 기둥면에 수직하게 수평 천공을 하거나 30-45도의 경사각을 갖는 경사 천공을 한다. 경사 천공은 기둥의 상하단부와 같이 착암기를 수평으로 하여 작업하기 어려운 곳이나 기둥의 단면 치수가 작아 수평 천공으로는 천공 깊이를 확보하기 어려운 경우에 효과적이다.

기둥에 대한 천공 방법 및 천공 간격은 표 2와 같이 한다. 표 2에서 H는 기둥의 높이, B와 D는 기둥의 단변과 장변을 각각 나타내며 천공 깊이는 장약량에 따라 기둥의 장변 치수의 0.65D~0.85D가 된다.

표 2 기둥의 천공 방법

천공 수 천공 방법	1	2	3	4
천공 위치	0.5H	0.5H+0.625B 0.5H-0.625B	0.5H 0.5H+0.625B 0.5H-0.625B	기둥 하단부터 1.25B 지점 기둥 상단부터 1.25B 지점 기둥 가운데 부분 3 등분점
천공 간격	-	1.25B	1.25B	(H 2.5B) / 4

3.4 적정 장약량 설계

우리 나라에 발파 해체 공법이 소개되면서 콘크리트 구조물의 발파 해체에 관한 자료들은 대단히 제한적이었으며, 장약량 산정에 대한 기준도 출처가 불분명하거나 기준이나 공식의 적용에 대한 한계와 범위가 명확하지 않은 상태에서 소개되어 오늘에 이르고 있다. 그 대표적인 예가 비장약량(specific charge)에 대한 개념의 혼동이다. 본래 비장약량은 광산 지역에서는 발파 성과의 측정 수단으로 지하 자원을 1톤 채광하는데 소요되는 화약량의 개념으로 사용되어져 왔으며, 터널 공사나 도심지 지하 공간 개발과 같은 토목 공사 현장에서는 재화 가치를 지닌 광석의 채광을 목적으로 하지 않고 대부분의 경우 시공상 장애 요소가 되는 불필요한 암반을 제거하기 위하여 화약이 사용되었다. 따라서 토목 공사와 관련된 곳에서의 비장약량에 대한 개념은 일정한 체적을 가진 불필요한 암반을 제거하는데 필요한 화약량으로 단위 체적의 암반을 제거하는데 소요되는 화약량의 개념으로 사용되어 왔다. 오늘날에는 일반적으로 단위 체적(m³)의 파쇄물을 생성하는데 소요되는 장약량(kg)으로 정의된 비장약량의 개념이 사용되고 있다.

콘크리트 구조물의 발파 해체에 대한 적정 장약량을 계산하기 위하여 우리 나라에 가장 먼저 널리 소개된 장약량은 Gustafsson의 연구가 있다. 1981년 Gustafsson⁽³⁾은 큰 콘크리트 구조체를 파쇄 시키는데 필요한 비장약량과 천공 간격을 표 3과 같이 제안하고 있다. 표 3은 암반 굴착을 위하여 적용하였던 벤치 발파의 원리를 암반과 같이 기대한 콘크리트 구조체에 적용한 것으로 비장약량을 최소 저항선의 함수로써 표현하였으며, 비장약량은 정밀 폭약과 같이 플라스틱의 가는 관 속에 1m 당 320g의 폭약이 균등하게 분포된 Gurit를 기준으로 산정한 것이고 장전공의 배치는 정사각형으로 한 것을 기준한 것이다. 따라서 이와 전혀 다른 상황에서 발파가 이루어지는 콘크리트 기둥을 파쇄하기 위하여 표 3의 비장약량을 무비판적으로 적용하는 것은 무리가 있을 뿐만 아니라 발파 설계가 잘못될 수도 있다고 본다.

표 3 Specific charge for disintegration of massive concrete

Type	Specific Charge (kg/m ³)	Hole Spacing (m)
· plain concrete of poor quality	0.25~0.30	0.80~0.90
· plain concrete of good quality and material strength	0.30~0.40	0.75~0.90
· reinforced concrete with heavy reinforcement	0.80~1.00	0.55~0.60
· extra powerful reinforced concrete of military type	1.50~2.00	0.50~0.55

표 4 Hole geometry and loading for disintegration of concrete columns

Width (largest) (m)	Depth of Hole (m)	Hole spacing (m)	Number of hole rows	Charge /hole (g)	Charge / Area (g/cm ²)
0.30	0.20	0.30	1	50	0.0556
0.40	0.30	0.30	1	100	0.0625
0.50	0.40	0.35	2	85	0.0680
0.60	0.45	0.35	2	125	0.0694
0.70	0.55	0.35	2	171	0.0694

Gustafsson은 철근의 유무에 상관없이 콘크리트 기둥이나 벽체를 파쇄시키기 위한 천공 방법과 장약량을 표 4와 같이 제시하고 있다. 표 4도 우리나라에 가장 널리 소개된 것 가운데 하나인데 이것 역시 오늘날 사용되어 지고 있는 장약량에 비하여 2배 정도의 과도한 장약량일 뿐만 아니라 천공 방향이나 천공 간격 등이 암 발파 설계를 기준으로 한 것으로 콘크리트 기둥 발파에는 부적절한 것으로 판단된다.

따라서 콘크리트 기둥을 파쇄하기 위한 적정 장약량을 산정하는데 있어서 기존의 비장약량 개념인 파쇄물의 단위 체적당 화약량 산정에서 벗어나 보다 실용적이고 간편한 파쇄 대상 기둥의 단면적당 화약량을 구하는 식 (1)을 사용할 것을 제안하는 바이다.

$$q = C_a A \quad (1)$$

여기서 $q(g)$ 는 장약량이고, $C_a(g/cm^2)$ 는 기둥 단면을 파쇄시키는 필요한 발파 효과 상수이며 $A(cm^2)$ 는 기둥의 단면적이다.

기둥의 단면 비가 1 : 1.5 이하인 정사각형에 가

까운 기둥에 대하여 장약량을 최소화하고자 할 때
 예는 식 (1)에서 발파 효과 상수 $C_d=0.03$ 을 적용
 하고, 기둥을 완전히 파쇄시키기 위한 장약량을
 도출하기 위해서는 $C_d=0.045$ 를 적용할 것을 추천
 한다. 기둥의 단면비가 1 : 1.5 이상인 직사각형 기
 둥의 경우에도 단면적에 따른 장약량을 구하고 긴
 변 방향으로 화약을 분포시키기 위하여 약경이 작
 은 화약을 사용함으로써 소기의 발파 효과를 얻을
 수 있다.

3.5 전색

전색이란 어떤 물질을 사용하여 장전공을 밀폐
 시킴으로써 폭발 효과를 증진시키는 것을 말한다.
 전색재는 충격파의 진행에 거의 영향을 미치지
 않지만 공 내의 가스압을 구속하기 때문에 균열을
 확장시키고 균열을 진전시키는데 효과적이다. 전
 색을 했을 경우에도 어느 정도의 에너지가 장전공
 을 통해 폭발계에서 손실되는 것을 막을 수는 없
 지만 전색을 함으로써 상당 부분의 에너지를 계
 안에 보존시킬 수 있다. 폭발시 대부분의 경우 전
 색재가 축출되지만 천공 깊이가 깊어짐에 따라 마
 찰력이 증가하여 전색 효과가 증가한다.

구조물의 발파 해체용 전색재는 모래, 점토, 석
 고 반죽, 물 등이 사용되는데 구입과 운반이 쉽고
 가격이 저렴하며 연소되지 않는 것으로 시공성이
 좋은 재료를 사용한다. 또한 불발 등으로 인한 잔
 류 폭약을 회수할 때 안전하고 용이하게 제거할
 수 있어야 하므로 일반적으로 모래를 이용한 전색
 을 많이 한다.

기존의 많은 발파 시험에서 얻은 발파 시험 결
 과로부터 젤라틴 다이내마이트의 전색재의 종류
 에 따른 전색 효과를 무전색의 경우와 전색재로
 모래, 점토, 물을 사용한 경우에 대하여 건조한 모
 래의 전색 효과를 1로 했을 때 전색 효과를 요약하
 면 표 5와 같다.

표 5 전색재의 종류에 따른 전색 효과 비교

무전색	젓은 모래	물	점토
0.47	1.08	1.18	1.35

3.6 기폭 설계

구조물의 발파 해체에서 기폭 설계는 붕괴 기구
 선정과 함께 설정된 붕괴 기구가 이루어지도록 하
 는데 가장 중요한 역할을 담당한다. 비록 붕괴 패
 턴과 구조물의 동적 붕괴 거동에 대한 해석이 완
 벽하게 이루어졌다고 할지라도 기폭 설계가 잘못
 되었거나 기폭 순서가 부적절하면 구조물의 붕괴
 가 불완전하거나 예상하지 않은 방향으로 거동 방
 향이 바뀔 수도 있다.

또한 구조물의 발파 해체시에는 여러 장전공을
 동시에 또는 일정한 시간차를 두고 발파하는데 구
 조물의 종류, 층수, 형상, 구조물의 폭과 길이의
 비, 구조물의 높이와 폭의 비 등에 따라 붕괴 기구
 형성을 위해 다양하고 복잡한 지연 시간을 사용하
 게 된다. 지발 시간차는 저층 구조물의 경우 고층
 구조물의 경우보다 일반적으로 길게 주어지는데
 이는 저층 구조물이 하중이 크고, 구조물의 높이
 에 대한 폭의 비가 큰 고층 구조물에 비해 붕괴 기
 구를 형성하는데 시간이 많이 소요되기 때문이다.

장전공 속에서 기폭시키는 방법에는 정기폭(di-
 rect priming)과 역기폭(reverse priming)에 의
 한 방법이 있다. 기둥 발파를 기본으로 하는 발파
 해체의 경우 역기폭에 의한 방법이 정기폭에 의한
 방법보다 기둥의 파쇄 효과가 좋고 전색재의 축출
 이 적다. 역기폭에 의한 장전시에는 너관이 공저
 에 직접 충돌하지 않도록 모래와 같은 전색재를
 조금 넣고 전색봉을 사용하여 서서히 밀어 넣어야
 한다.

4. 방호 설계

발파 해체에 따른 위험 요소들을 줄이기 위해서
 는 해체 구조물의 자유 낙하에 따른 지반 진동과
 폭약의 폭발력에 의한 지반 진동, 폭풍압 그리고
 비석 방지에 대한 안전 대책을 강구해야 한다. 이
 를 위해서는 지발당 폭약량을 제한해야 하고, 폭
 원과 인접 구조물이나 피해 예상 지점까지의 충분
 한 안전 거리가 확보되어야 한다.

방호 설계는 폭약을 사용하는 발파 해체에서 대
 단히 중요한 사항이다. 폭약의 순간적 폭발력을

효과적으로 제어하여 비산물이 발생하지 않게 하는 것이 무엇보다 중요하다.

1990년 이후 우리 나라에 도입된 발파 해체 공법이 적용되면서 초기에는 적절한 방호를 하지 못하여 발생한 피해가 몇 차례 있었다. 이렇게 방호가 적절하지 못한 경우 그 피해액은 발파 해체 공사 수주 금액을 훨씬 상회하는 경우가 대부분이다.

방호 설계는 1차 방호와 2차 방호로 구분할 수 있는데 1차 방호는 구조물 해체시 폭약이 폭발하여 순간적인 폭발력에 의해 파쇄 대상 부재에서 발생하는 비산물과 폭풍압을 제어하기 위하여 파쇄 대상 부재에 설치하는 방호를 말하며, 파쇄 대상 부재에 대한 장약량과 주변 여건 등을 고려하여 발파 순간의 파쇄물 비산에 따른 영향을 최대한 억제할 수 있도록 설계되어야 한다. 또한 2차 방호는 공사 기간 작업장 주변의 안전을 도모하고 실내 작업으로 이루어지는 천공 작업과 사전 취약화 작업에서 발생할 수 있는 작업장 내의 분진과 소음, 낙하물에 대한 차단과 구조물 붕괴시 1차 방호에 의해 비산 에너지의 상당 부분이 소실된 구조 부재의 파편 등이 붕괴 유도 지역 외부로 비산 또는 낙하하는 것을 차단하고 폭풍압에 대한 최종 차단 역할을 수행할 수 있도록 설계 시공되어야 한다.

4.1 기둥 및 내력벽의 방호

발파 대상 기둥은 폭약에 의한 콘크리트의 파쇄물을 적절하게 방호할 수 있어야 하며, 폭약의 순간 팽창력과 폭풍압에 저항할 수 있는 방호 자재를 사용하여야 한다. 이를 위하여 천공이 끝난 파쇄 대상 기둥의 모든 면은 능형 철망으로 두 겹 둘러싸고, 그 위를 부직포(geo-textile)로 두 겹 씌운 후 직경 3mm 이상의 철선으로 묶는다. 이 때 철망과 부직포는 30cm 이상 겹치도록 마감해야 하며 화약을 장전하기 위하여 천공 위치의 능형 철망은 절단기를 사용하여 잘라 놓고, 부직포는 칼을 사용하여 구멍을 뚫어 놓아야 한다. 방호재의 길이는 기둥 상하단 천공 위치로부터 기둥 양단으로 50cm 떨어진 곳까지로 한다.

부분 파쇄하고 남은 내력벽은 전체를 능형 철망, 부직포 그리고 골합석의 순서로 감싸고 3mm 이상의 철선으로 감아 준다. 이 때 천공면은 골합석으로 감싸지 않는다. 폭풍압에 대하여 적절한 완충 작용이 이루어지도록 과도하게 방호막을 감싸지 말아야 한다. 천공면은 폭약을 장전한 후 골합석으로 감싼다.

4.2 2차 방호

2차 방호는 공사 기간 실내 작업으로 이루어지는 천공 및 사전 파쇄 작업에서 발생할 수 있는 작업장 분진이나 소음에 대한 차폐 및 차단 역할과 구조물 붕괴시 하부층의 1차 방호막에 의하여 상당 부분의 에너지가 소실된 구조 부재의 파편 등이 붕괴 유도 지역 외부로 비산 또는 낙하하는 것을 차단하고 폭풍압에 대한 최종 차단 역할을 하기 위하여 설치한다. 2차 방호 자재는 구조물의 내부에 부직포를 커튼식으로 드리우고 외부에는 능형 철망을 사용하여 방호용 커튼을 형성할 수 있도록 한다.

4.3 지반 진동

지반 진동은 붕괴된 구조물의 낙하 충격에 의한 것과 발파로 인한 두 경우가 있는데 일반적으로 폭발력에 의한 지반 진동이 같은 거리에서 측정된 붕괴 구조물의 낙하 충격에 의한 값보다 큰 것으로 나타났다. 이 결과는 14층 높이의 구조물을 수직 붕괴시켰을 때 얻어진 지반 최대 입자속도와 이 때 소요된 폭약의 폭발력에 의한 지반 최대 입자속도를 자승근 환산 거리를 사용하여 비교 분석한 Folchi⁽²⁾의 연구에 의한 것이다. 이러한 현상은 철근 콘크리트 구조물이 수직 붕괴시 콘크리트가 취성 파괴하는데 소요 시간이 대단히 짧은데 비하여 철근이 파괴점에 도달하여 파단되는데 상대적으로 긴 시간 동안 철근이 구조물의 자유낙하를 구속하고, 운동 에너지의 상당 부분이 발파되지 않은 바닥 슬래브나 보 또는 기둥의 균열 및 파쇄에 사용되고, 자유 낙하한 구조체는 이미 파쇄된 콘크리트 덩어리 위에 떨어짐으로써 충격이 완충

되기 때문에 해석된다. 그러나 전도 붕괴시에는 전도 구조물의 충격으로 인한 지반 진동에 유의해야 한다. 발파 및 낙하 충격에 의한 지반 진동은 폭원을 중심으로 한 일정 반경 내에 국한되며 폭원 및 충격 중심으로부터 멀어짐에 따라 거리의 1.5~2제곱으로 급격히 감소한다.

Folchi⁽²⁾에 의하면 14층 구조물의 낙하 충격으로 인한 반경 30m 이내 지역에서 일시적인 지진파의 주파수는 7-70Hz이고, 발파에 의한 주파수는 전파 매질이 콘크리트 파쇄물일 때 50-100Hz로 측정되었다.

현재 우리 나라에서 사용되고 있는 도심지 암반 발파에 따른 지반 진동 속도식과 발파 해체로 인한 예상 지반 최대 입자 속도를 비교해 볼 때 상당한 차이가 있는데 이것은 지하 또는 노천에서 행하는 암 발파와는 달리 구조물의 발파 해체가 대부분 4 자유면을 가지고 있는 기둥을 발파함으로써 대부분의 충격파가 대기 중으로 소산되고 지반을 통하여 전달되는 에너지가 작기 때문으로 해석된다.

따라서 구조물의 발파 해체시에 예상 지반 진동을 측정하는데 지하철 건설을 위해 제안된 도심지 내의 지하 암반 발파 진동식의 적용은 적절하지 못하다고 보며 발파 해체시 발생하는 발파 진동을 정확하게 규명하기 위해서는 공간상에서 기둥을 파쇄하는데 사용하고 남은 에너지와 지반 진동 사이의 상관 관계에 대한 규명이 필요하다고 본다.

4.4 분진 및 소음 대책

기계식 해체 공법이 장기간에 걸쳐 지속적인 소음과 분진을 발생한다면 화약에 의한 발파 해체 공법은 대단히 짧은 시간에 다량의 분진과 큰 소음을 일시에 발생한다는 차이점을 가지고 있다. 분진을 근본적으로 제어하기는 어렵지만 현재의 기술 수준에서 인간이 강구할 수 있는 제반 노력을 경주함으로써 환경 오염을 줄일 수 있는 분진 저감 방안에 대한 대책을 수립하여야 한다. 사실 콘크리트 구조물의 발파 해체시에 발생하는 분진은 대부분 비중이 큰 콘크리트와 모래 및 자갈의 파쇄에 기인한 것으로 발파 해체 후 수 분 이내에

가라앉는 특성이 있다. 따라서 분진 발생 후 살수에 의한 주변 정리를 통하여 분진을 제거할 수 있다. 그러나 유리 섬유나 석고 보드와 같은 유해한 성분을 함유한 단열재 및 내장재의 분진 발생을 방지하기 위해서는 사전 취약화 작업과 병행하여 구조물 내부에 대한 청소 및 유해 물질 제거 작업을 선행하여야 한다. 노르웨이 같은 나라에서는 발파 해체시 발파를 진후하여 살수를 함으로써 분진을 줄이려는 노력을 기울이고 있으며, 발파 후 파쇄물 처리시에는 스프링 쿨러를 설치하여 분진의 발생 및 확산을 방지하고 있다. 현행 환경 관련 법규의 분진에 대한 허용 농도는 작업장 환경에 관한 것으로 이를 발파 해체 공사 현장에서 발생하는 일시적 분진에 대한 규제를 위한 기준으로 적용하기에는 무리가 있다.

발파 해체 작업에서 발생하는 소음은 크게 천공 작업이나 파쇄물을 적재, 운반하는 중기에서 발생하는 기계음과 발파 소음으로 구별된다. 발파 해체 공법의 가장 큰 장점 가운데 하나는 공사중 발생하는 소음이 적다는 점이다. 천공 등의 준비 작업은 구조물의 실내에서 수행되기 때문에 인근 주민에 대한 소음 공해는 거의 없다. 또한 발파 소음도 수 초 이내에 발생하였다가 소멸되기 때문에 크게 문제가 되지 않는다.

폭풍압은 발파시 발생하는 충격파가 공기 중을 전파함에 따라 발생한다. 가청 영역의 주파수를 갖는 파동과 가청 영역은 아니지만 구조물을 진동시켜 부수적인 소음을 발생시키거나 균열을 전파시키게 되므로 가청 영역의 주파수보다 오히려 더 위험한 저주파의 파동을 총칭하여 말한다.

Siskind의 폭풍압 전파에 대한 연구에 의하면 폭풍압도 발파 진동 값과 같이 환산 거리를 사용하여 예측할 수 있다. 일반적으로 사용하고 있는 자승근 환산 거리보다는 삼승근 환산 거리를 사용하는 것이 폭풍압 계산에는 효과적이다.

폭풍압의 전파는 발파 진동과는 달리 온도와 바람 등 기후의 영향을 크게 받는다. 즉 풍향과 기온의 역전으로 인하여 특정 지역에 예상 압력보다 더 높은 폭풍압이 집중될 수 있으므로 장약량과 거리뿐만 아니라 기상 조건과 발파 형태 등의 영향도 동시에 고려해야 한다.

폭풍압의 영향은 구조물의 유리창에 가장 먼저 나타나는데 일본 통상성의 연구 결과에 따르면 창문의 유리창이 파손되기 시작하는 폭풍압은 0.02kg/cm²이며 음압 수준으로는 대략 160데시벨에 해당한다. 미 광무국에서는 구조물에 영향을 미치지 않는 폭풍압의 세기를 계측 장비에 장착된 필터의 종류에 따라 129dB에서 134dB로 정하고 있다.

현행 우리 나라의 소음 규제법에는 지역별, 시간대별, 소음원에 따라 45dB에서 80dB 사이의 값을 정하고 있으나 발파 해체의 경우 일반 공사에서 발생하는 단속적이면서 지속적으로 발생하는 공사 소음과는 달리 불과 수 초 사이에 대략 150dB 정도의 순간 소음이 발생하기 때문에 이러한 특수한 경우의 발파 소음을 일반 소음 규제법으로 규제하는 것은 조속히 개정되어야 할 것으로 사료된다. 또한 발파 해체 공사에서 발생하는 발파 소음은 흡음성의 방호 재료인 부직포를 사용함으로써 기존의 골합석과 나일론 합성 섬유를 방호재로 사용하는 것보다 상당량의 소음을 줄일 수 있다.

5. 맺는 말

우리 나라에서 화약에 의한 콘크리트 구조물의 발파 해체가 시작한 지 얼마 되지 않았지만 그동안 발파 해체에 관한 사회적 관심과 몇몇 기업의 선구적 역할에 힘입어 이 분야에 눈부신 업적을 쌓았다고 본다. 그러나 발파 해체 분야에 대한 학술적 연구 업적의 축적이 일천하고 발파 설계에 대한 기준 등이 준비되어 있지 않은 게 현실이다. 우리 나라와 같이 도심지에 지반 진동에 취약한 구조물과 고층 구조물이 혼재되어 있고 도심을 통과하는 다양한 지중 시설물과 가스관, 상하수도 관로의 위치가 정확하게 도면화되지 못한 상황에서 효과적인 발파 해체를 수행하기 위해서는 주변 환경에 대한 철저한 조사와 대상 구조물에 대한 심도 있는 해석을 통하여 구조물의 붕괴 거동을 예측하고 또한 필요한 계측을 실시하여 측정 결과를 분석할 필요가 있다.

특히 발파 진동 및 비석, 소음 등을 효과적으로

제어할 수 있는 붕괴 기구 형성에 필요한 적정 장약량의 산출과 발파 해체와 관련한 제반 변수들을 고려한 모의 시험(simulation)에 대한 기법과 제안된 구조물의 발파 해체안 등에 대한 정량적인 평가 방법등을 개발하고 활용함으로써 도심지 구조물에 대한 안전한 발파 해체 시공을 도모할 수 있을 것으로 사료된다.

앞으로 이 분야가 보다 이론적으로 명쾌하게 발전하기 위해서는 철근 콘크리트 구조물의 폭발 직후 시간 변화에 따른 응력/변형률 관계가 규명되어야 하겠고, 재료의 물성과 변형률 비와의 관계가 연구되어지면 보다 이론적이고 실제적인 붕괴 기구를 선정할 수 있을 것이다.

국내에서 그 동안 여러 건의 구조물 발파 해체가 실시되었는데 전반적으로는 성공적이라고 평가할 수 있으나 그 간의 국내 발파 해체에서 발생 하였던 여러 문제점들을 심도있게 분석하고 부족한 부분을 보강한다면 이 분야의 기술 수준도 조만간 국제적 수준에 도달할 것으로 전망된다.

끝으로 발파 해체가 화약과 뇌관과 같은 위험물을 취급하는 분야이므로 본 특집에서 사용한 제반 자료는 필자가 최대한도로 정확성을 기하려고 하였지만 본의 아닌 오류가 있을 수도 있음을 참작하여 실무에 적용하기 전에 보다 많은 자료와 정보를 이용하여 지식과 자료를 확장하고 전문가에 의한 타당성 검증을 통하여 사용할 것을 추천하며 앞으로 발파 해체 분야에 관심을 갖고 있는 많은 분들께 소중한 기술 정보를 제공하는 자리가 되었으면 하는 바램을 갖고 본 특집 기사를 마치고자 한다.

참 고 문 헌

1. Fleischer C.C. "A Study of Explosive Demolition Techniques for Heavy Reinforced and Prestressed Concrete Structures" 1985.
2. Folchi R. "Demolition of an Industrial Building in an Urban Site" Jr. of Explosives Engineering, Vol. 10 No. 1 May / June 1992.
3. Gustafsson, R. "Swedish Blasting Technique", Dynamit Nobel Wien, 1981.
4. Henrych Josef "The Dynamics of Explosion

- and Its Use” Elsevier Scientific Publishing Co. 1979.
5. Kasai Y. “Demolition Methods and Practice” Proceedings of the Second International Symposium held by RILEM, Vol. 1, Tokyo Japan, Nov. Chapman and Hall 1988, pp.7-11
 6. Langefors, U. and Kihlstr m, B. “The Modern Technique of Rock Blasting” 3rd ed., Stockholm 1978.
 7. Williams G.T. “Explosive Demolition of Tall Buildings in Inner City Areas”, Municipal Engineer Vol.7 No.4, Aug. 1990, pp.163-173
 8. 강영철, 김운영, “건물 발파 해체의 붕괴 거동” 대한 토목학회지 제 41권 제 1호, 1993. 2, pp. 71-80
 9. 강영철, 오경두, “발파 해체를 위한 전문가 시스템의 개발” 육군사관학교 화랑대 연구소, 1993. 10.
 10. 강영철 외 7인, 구조물 붕괴 요소 기술 개발에 관한 연구, 코오롱 건설(주), 1995. 5.
 11. 김상수, 황현주, “국내 도심지 건물 폭파 해체 사례와 평가” 대한 토목학회지 제 41권 제 1호 1993. 2, pp.81-92
 12. 이정인, “발파 진동, 발파 풍압 및 비석의 조절을 통한 안전 발파” 대한 토목학회지 제 41권 제 1호 1993. 2, pp.99-117
 13. 임한욱, “건설 현장에서의 특수 발파” 대한 토목학회지 제 41권, 제 1호 1993. 2, pp.117-139
 14. 허진, “정밀 발파의 표준력, 도심지 건축물의 폭파 해체 공법 세미나 KTIC, 91043, 한국 기술정보 컨설팅, 1991. 