

구조물 근접 터널발파시 진동제어를 위한 조합형조절발파공법 적용사례 연구 -서울지하철 917공구 현장 중심으로-



유지완
(주)성보지오텍
차장



이태노
(주)성보지오텍
대표이사



노상림
GS건설(주)
기술본부 차장

1. 서론

암반층으로 구성된 터널을 굴착하기 위한 방법은 크게 3가지 정도로 구분할 수 있다. 첫 번째 방법으로는 강력한 폭력을 가진 화약류를 사용하는 발파굴착 방법, 두 번째 방법은 화약류에 비해 폭력이 현저히 작은 화공품류에 의한 미진동굴착 방법, 그리고 세 번째로 유압의 힘을 이용한 기계장치로 암반을 파쇄시키는 기계식굴착 방법이 있다.

최근래 국내의 터널 굴착작업이 증가하는 추세에 맞춰 터널 굴착공법이 다양하게 개발되어 상용되고 있으나, 시공성 및 경제성 측면으로 볼때 화약류를 이용한 발파공법이 가장 적합한 터널 굴착공법이라 할 수 있다. 그러나, 발파굴착은 강력한 폭력을 지닌 화약류를 사용하기 때문에 발파공해(진동, 소음)로 인하여 민원이 빈번히 발생하

고 있으며, 연약한 암반층을 통과할 때는 화약류 폭력으로 발생하는 응력파로 인하여 터널이 부분적으로 붕괴되거나 여굴범위가 확대되는 현상이 발생하여 터널 굴착에 어려움을 주고 있다.

이와같은 발파굴착의 문제점을 해결하기 위해서 터널 굴착선에 제어발파공법을 적용하여 굴착선 암반의 손상을 최소화 하고 진동 전달을 제어하게 된다. 제어발파공법은 3가지 형태로 개발되어 적용하고 있는데, 암반손상을 최소화 하기 위한 공법과 진동을 제어하기 위한 공법, 그리고 암반손상과 진동제어를 동시에 만족하고자 하는 공법으로 분류하여 적용하고 있다.

본 고에서는 서울지하철 917공구 현장 본선터널 노선 중 잠실학생체육관 하부를 통과하는 구간의 여굴을 최소화 하면서 진동을 제어할 수 있는 조합형조절발파공법(Complex Blasting) 적용사례를 소개하고자 한다.

2. 제어발파의 일반적 특성

2.1 개요

제어발파는 조절발파공법(Controlled Blasting 또는 Cautious Blasting)으로 표현하기도 하는데, 넓은 의미에서 정의 한다면 공정상의 요구조건과 발파환경, 규모 대상 등 구체적 조건하에서 파쇄결과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 발파범위, 방향 및 발파공해를 규정한다 내에서 제어할 수 있도록 세밀한 설계, 시공과 방호 등의 기술 조치를 통하여 폭발에너지 방출과정과 매질의 파쇄과정을 제어하는 발파를 총칭한다(표준발파공법, 1997).

국내에서 주로 사용하고 있는 제어발파공법은 스무스블라스팅(Smooth Blastig), 라인드릴링(Line Drilling), 프리스프리팅(Presplitting), 조합형조절발파공법(Complex Blasting) 등이다. 그림 1은 제어발파공법별 기본적 천공패턴 이다.

이중에서 암반손상을 최소화하기 위해 적용되는 발파공법으로 스무스블라스팅공법을 주로 적용하고 있는데, 이 공법은 깨끗한 굴착단면을 얻기 위한 제어발파공법으로서 국내 터널발파의 표준 발파패턴으로 정립되어 있다. 또한, 진동을 제어하기 위해 적용하고 있는 발파공법으로 프리스프리팅공법을 특수한 구간에 적용하고 있는데, 장약공내에 발생되는 압력, 암석의 인장강도를 고려하여 계산되는 공간격의 관계가 형성될 때(Calder, Chiappetta 제안식) 인장균열 효과를 극대화 시킬 수 있다.

$$S = \frac{d_b(P_s + S_t)}{S_t}$$

여기서, S : 프리스프리팅공 간격

P_s : 발파공내의 작용압력(Kgf/cm²)

d_b : 장약공의 지름(cm)

S_t : 암석의 인장강도((Kgf/cm²)

그러나, 터널 굴착선 암반에 형성된 불연속면의 발달상태, 불연속면의 마찰력 및 입사각이 다양한 형태로 존재하기 때문에 응력파의 감소현상이 발생하여 인장균열효과를 제대로 얻을 수 없다.

2.2 국내 적용 제어발파공법별 특성

터널발파에 적용되는 제어발파공법은 터널 굴착선을 매끄럽게 유지시키고 굴착선 암반손상을 최소화 하여 낙반사고를 방지할 뿐만 아니라 여굴범위를 최소화 하여 터널 보강비 과다 투입을 막아주기 위해서 적용된다. 일반적으로 터널 굴착선을 매끄럽게 하는 제어발파공법으로는 스무스블라스팅공법과 라인드릴링공법이 있는데, 스무스블라스팅공법은 천공경보다 약포지름이 작고(디커플링 지수 : 2~3 정도) 저비중 정밀폭약을 사용하므로 폭력이 굴착선 암반층이 직접적으로 미치지 못하게 하여 굴착선을 매끄럽게 형성시켜 준다. 사용되는 정밀폭약 제품의 특성상 약량을 임의로 조절할 수 없기 때문에 극한적

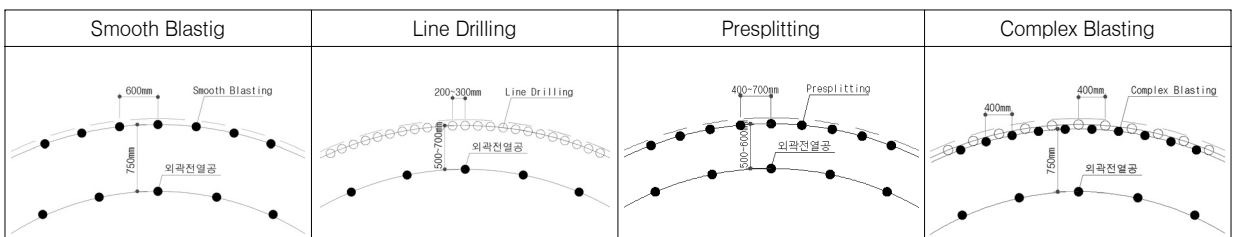


그림 1. 제어발파공법별 기본적 천공패턴

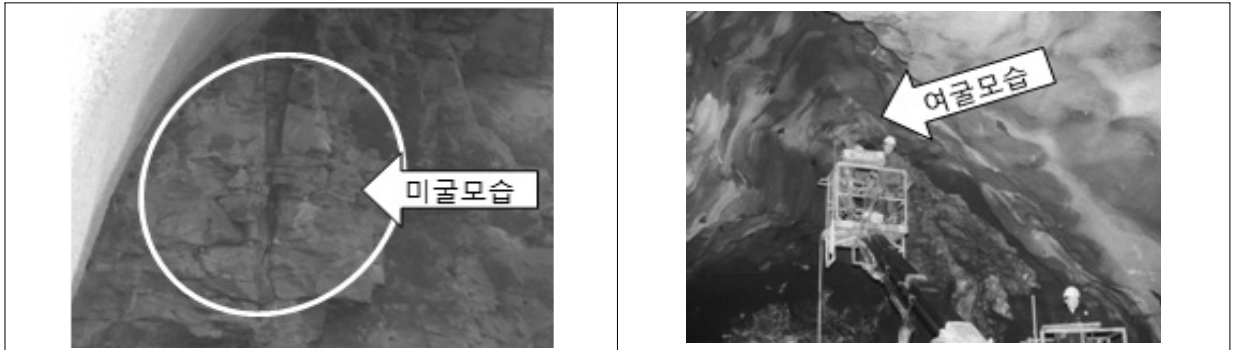


그림 2. 터널 굴착선에 형성된 미굴 및 여굴형태

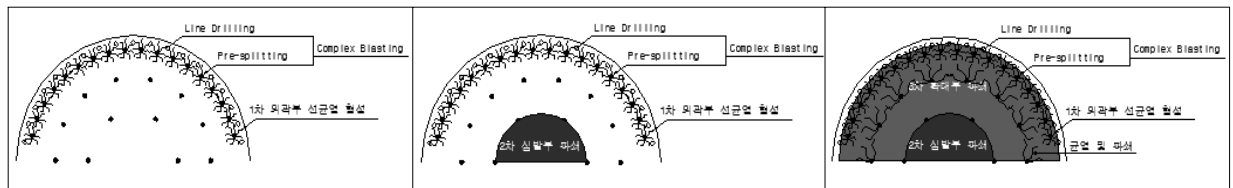


그림 3. 조합형조절발파공법 기폭순서에 따른 암반의 파쇄형태를 나타낸 모식도

인 암반상태에 따라 미굴 및 여굴이 발생할 수 있다. 그림 2는 터널 굴착선에 형성된 미굴 및 여굴의 모습이다.

라인드릴링공법은 굴착선을 따라 무장약공을 조밀하게 천공하여 인위적인 선균열 형태를 형성시킨 후 터널 발파시 충격파가 굴착선 외부로 전달되지 않도록 하기 위해 적용되는 공법이다. 그러나 이와 같은 공법은 천공간격이 매우 좁게(천공경의 2~4배) 형성되기 때문에 천공수가 많아져 천공시간이 상당히 소요되고 천공비용이 증가하기 때문에 특수한 구간에 적용되고 있으며, 미굴이 동반되는 현상이 발생한다.

프리스프팅공법은 주 발파공 보다 사전에 기폭시켜 굴착선에 선균열층을 형성시킴으로서 발파진동이 터널 굴착선 외부로 전달되는 것을 저감시킬 뿐만 아니라 굴착선을 매끄럽게 유지시키는 목적으로 사용된다. 그러나, 프리스프팅공법이 자유면이 존재하지 않는 상태에서 기폭되기 때문에 공발이 많이 발생하게 되고 불연속면이 발달된 암반층에서는 균열형성이 제대로 형성되지 않을 뿐만

아니라 천공방향과 각도가 일정하지 않으면 균열형성을 실패하게 된다. 또한, 균열 효과가 발생하지 않을 경우 화약류 폭발로 생성되는 응력과 에너지가 소멸되지 않고 지반진동으로 전달되어 진동이 더 크게 발생시키는 문제점을 지니고 있다. 따라서, 국내 현장에서는 거의 사용하지 않는 공법이다.

3. 조합형조절발파공법 원리 및 특성

3.1 원리 및 메커니즘

조합형조절발파공법(Complex Blasting)은 기존의 라인드릴링공법과 프리스프팅공법의 단점 및 한계성을 개선하여 굴착 예정선에 완전한 선균열층을 형성시키고 진동 전달을 차단시킬 수 있는 새로운 개념의 조합형 제어 발파공법이다. 그림 3은 조합형조절발파공법 기폭순서에

표 1. 기존 라인드릴링공법과 프리스프리티팅공법의 단점 및 한계성

구 분	라인드릴링공법	프리스프리티팅공법
메커니즘	<ul style="list-style-type: none"> - 공간격 : 공경의 2~4배 - 무장약공과 외곽공과의 간격 : 주 발파공 저항선 $\times 0.5 \sim 0.75$ - 외곽공 장약량 : 주발파공의 50% 	<ul style="list-style-type: none"> - 공간격 : 천공경에 따라 조정(0.2~0.8m) - 장약밀도 : 0.11~0.45kg/m - 외곽공과 공간격 : 주발파공 1/2배
단점 및 한계성	<ul style="list-style-type: none"> - 천공시간 및 천공비용이 증대 - 경암구간에서는 굴착선에 미굴발생 - 진동저감 효과 거의 없음 - 빈공 간격이 좁기 때문에 천공작업이 어려움 	<ul style="list-style-type: none"> - 불연속면 발달압반과 경암구간에서 균열효과 미흡 - 균열층 미생성시 진동 저감효과 미흡 - 무자유면 발파로 오히려 진동이 크게 발생하는 현상이 나타남

표 2. 조합형조절발파공법의 천공 및 장약량 산출기준

구 분	천공 및 발파패턴
조절발파 무장약공	<ul style="list-style-type: none"> - 천공경 : 38~76mm - 무장약공 간의 간격 : 200~400mm
조절발파 장약공	<ul style="list-style-type: none"> - 천공경 : 38~76mm - 장약공 간의 간격 : 200~400mm
무장약공과 장약공 조합형태	<ul style="list-style-type: none"> - 무장약공 배열선과 장약공 배열선과의 간격 : 100mm 내외 - 천공형태 : 무장약공과 무장약공이 엇갈리게 설치
사용 화약류	- 암반상태에 따라 일반화약 및 정밀폭약 사용
사용 뇌관류	- MS뇌관(전기 뇌관 또는 비전기식 뇌관)
기폭방법	- 장약공 2공이상 동시기폭을 원칙으로 하되, 진동크기에 따라 각 공별 지발뇌관 사용 가능
장약량 산출식	$L = C \cdot D \cdot l$ <p>L:공당 장약량(kg), C:발파계수(경암:0.5, 보통암 이하:0.3) D:공간격(m), l:천공길이(m)</p>

다른 암반의 파쇄형태를 나타낸 모식도이며, 표 1은 기존 라인드릴링공법과 프리스프리티팅공법의 단점 및 한계성을 나열한 것이다.

조합형조절발파공법은 기존 제어발파공법의 한계성을 해결하기 위해서 두가지 공법(라인드릴링 + 프리스프리티팅)을 이상적인 형태로 천공 및 발파기법을 조합하여 개선 되었는데, 발파에 의한 암반 파쇄 메커니즘상 발파공을 중심으로 형성되는 파쇄대와 원주방향의 균열층을 억제시키고 조절발파 장약공과 무장약공 간의 인장파괴를 유도하여 일방향의 균열효과를 증대시키는 특징이 있다.

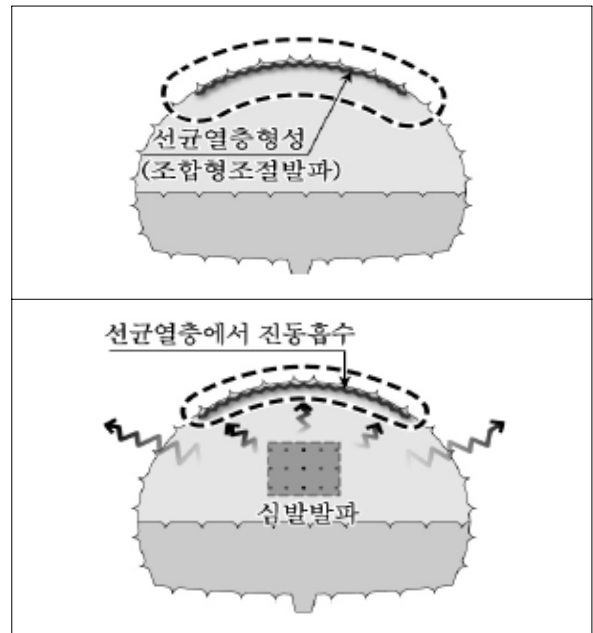


그림 3. 조합형조절발파공법의 균열효과에 대한 모식도

또한, 조절발파 장약공의 공간격을 좁히고 약장약 하여 발파 하므로써 고압의 충격효과를 완화 시키고 인장 파괴력을 증대시켜 조절발파 무장약공과 장약공간의 균열층형성을 유도하게 되며, 조절발파공이 먼저 기폭되어 굴착예정선에 균열층을 형성시켜주기 때문에 주 발파공 발파시 발생하는 진동전달을 차단시키게 된다. 표 2는 조합형조절발파공법의 천공 및 장약량 산출기준이며, 그림 3은 조합형조절발파공법의 균열효과에 대한 모식도이다.

표 3. 조합형조절발파공법의 일반적인 특성과 효과

구 분	특성 및 효과
현장 적용성	기존 라인드릴링공의 무장약공 간격을 2배로 늘려서 천공하고, 무장약공과 무장약공 사이 하부에 기존 프리스프리티공을 설치하여 뇌관시차를 조정한 후 순차적으로 기폭 시키기 때문에 기존 발파패턴과 거의 동일하여 작업상의 혼란 및 어려움이 발생하지 않는다.
친환경성	무장약공과 장약공을 조합한 조절발파공을 먼저 기폭시켜 굴착선에 선균열층을 형성 시킨 후, 주 발파공을 기폭 시키기 때문에 발파진동 저감효과가 우수하여 보안물건을 진동으로부터 보호할 수 있다.
작업성	무장약공과 장약공을 2열로 각각 40cm 간격으로 엇갈려서 천공하기 때문에 천공작업이 용이하며, 뇌관시차를 이용하여 터널 발파가 이루어지기 때문에 별도의 기폭 시스템을 적용할 필요가 없다.
경제성	진동저감이 전혀 되지 않는 기존 스무스블라스팅 공법 보다 약 7% 정도의 추가비용이 발생되나, 진동저감을 위해 축소된 굴착패턴과 특수 굴착공법 적용시 보다 굴착비용이 저렴하고 굴착공기를 단축할 수 있다.

3.2 조합형조절발파공법 특성

조합형조절발파공법은 라인드릴링공법 적용시 발생할 수 있는 문제점인 천공간격의 근접(20cm 내외)으로 인한 시공상의 어려움, 라인드릴링공과 장약공과의 사이에 형성되는 미굴현상을 해결할 수 있다. 또한, 프리스프리티공법 적용시 균열효과가 발생하지 않아 진동저감 효과를 얻을 수 없는 현상을 해결할 수 있다.

조합형조절발파공법은 선균열 효과가 우수하기 때문에 주 발파공 충격파를 차단할 수 있어 터널 굴착선의 여굴을 최소화 할 수 있는 효과가 있으며, 스무스블라스팅공법 적용시 보다 발파진동 전달을 약 30~50% 정도 저감되는 것으로 발표되고 있다(지반환경공학회, 2011, 논문집 12권2호 외).

표 3은 조합형조절발파공법의 일반적인 특성과 효과를 나타낸 것이다.

4. 구조물 근접구간 조합형조절발파공법 적용 사례

4.1 개요

터널노선을 따라 존재하는 각종 지장물은 터널노선과

의 이격거리와 발파조건에 따라 발파진동의 영향을 받게 된다. 일반적으로 터널노선을 따라 적용되는 발파패턴은 주변의 지장물 영향요소보다 암반상태에 따라 결정되기 때문에 경암구간 에서는 발파규모가 클 수밖에 없는데, 지장물에 발파진동의 영향을 줄 수 있다. 또한, 발파규모가 작을지라도 지장물이 터널노선과 매우 근접해서 존재할 경우라도 진동의 영향을 받게 된다. 이럴 경우 터널 굴착방식을 변경(굴진장 축소, 기계식 굴착)하여 공사를 수행하게 되는데, 굴착비용이 과다하게 발생하게 되며, 굴착공기가 지연될 수 밖에 없다.

본 고에서는 도심지 지하철 공사현장인 서울지하철 9호선 2단계 917공구 현장에서 본선터널 직상부에 위치해 있는 잠실학생체육관 구간을 통과하기 위해 적용된 조합형조절발파공법 적용 사례를 소개하고자 한다.

4.2 현장현황

본 현장은 서울지하철 9호선 2단계 917공구 현장으로서 본선터널 직상부에 잠실학생체육관이 위치해 있는데, 터널 천단부에서 구조물 지하실까지 최단거리는 21m, 기초파일 선단부까지는 9.7m에 불과하다. 잠실학생체육관은 건축일로 부터 약 30년 가까이 경과되었기 때문에 노후가 심하여 리모델링 작업이 진행된 구조물이다. 그래서 터널굴착 설계당시 구조물 직하부에 적용되는 굴착공법

은 무진동 기계굴착공법을 적용하도록 하였다. 그러나 기계굴착공법으로 터널을 굴착하는 구간이 약 70m 이기 때문에 시공상에 많은 어려움이 발생할 것으로 예상 되었다. 그림 4는 본 현장 과업구간과 학생체육관 모습이다.

잠실학생체육관 하부구간의 기반암은 호상 흑운모 편마암으로 구성되어 있으며 체육관 하부 지표층으로부터 26.7m 구간은 매립층 및 충적층으로 형성되어 있으며, 풍화암, 연암, 경암순으로 분포하고 있다. 본선터널 막장

(STA.31+840.25)에서 확인된 암반상태를 보면, 불연속면에 약간의 협재물이 존재하나 대부분 신선한 상태로 유지되고 있으며 불연속면은 다소 거친 상태로 존재하고 막장면이 지하수 영향으로 약간 젖어있는 정도이다, 공학적 암반분류 결과 R.M.R값은 53점, Q값은 4.67점 정도로 확인되어 대체적으로 양호한 암반층으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

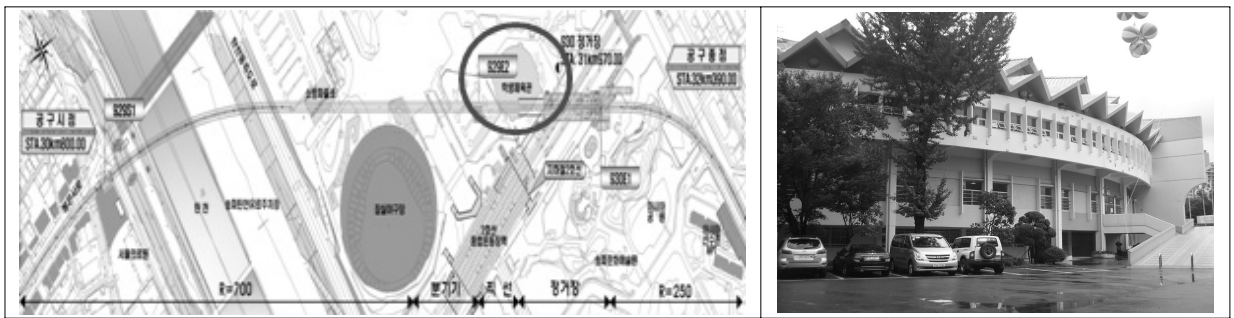
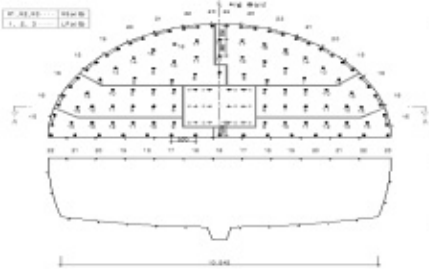
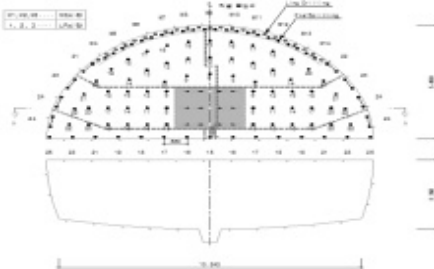


그림 4. 본 현장 과업구간과 학생체육관 모습

표 4. 제어발파공법별 시험발파 패턴 및 수량

구 분	시험발파 내용	
	스무스블라스팅공법	조합형조절발파공법
시험발파 위치	STA.31+840.25	STA.31+841.25
심발공법	SAV - Cut	좌 동
천공장	1,100mm	좌 동
총천공수	125공	152공
총장약량	42.900kg	43.800kg
사용화약	Emulsion $\phi 32$, Finex $\phi 17$	좌 동
사용뇌관	비전기식 뇌관 (MS 및 LP뇌관)	좌 동
발파패턴도		

4.3 제어발파공법별 시험발파 현황 및 결과분석

4.3.1 개요

본 현장 본선터널 노선 중 잠실학생체육관 하부 통과구간을 굴착하는데, 구조물에 진동의 영향을 주지 않고 시공성 및 굴착공기에 차질이 발생하지 않는 굴착공법을 선정하기 위해서 발파진동을 최대치로 제어할 수 있는 발파공법을 적용하여 시험발파를 실시하였다. 시험발파를 통해서 잠실학생체육관에서 발파진동이 허용치 이내로 감지되고 발파공사의 안전성과 효율성이 확인 된다면 잠실학생체육관 하부 본선터널에 발파공법을 적용해도 무방할 것으로 판단되었다. 시험발파는 스무스블라스팅공법과 조합형조절발파공법으로 동일한 암반조건과 위치에서 실시하여 그 결과를 분석한 후 본 구간에 가장 적합한 진동 제어발파공법을 선정하고자 하였다. 표 4는 제어발파공법별 시험발파 패턴 및 수량이다.

4.3.2 시험발파 방법 및 내용

① 천공작업

시험발파를 위한 천공은 본선터널 PD-3E 구간 상부단면에서 이루어졌으며, 천공경은 45mm가 되도록 하였으며, 확대공의 천공장은 1,100mm, 최소저항선과 공간격은 700~800mm 정도로 유지되도록 하였다. 외곽공에 적용된 장약공별 간격은 스무스블라스팅공법의 경우 600mm로 유지 하였으며 조합형조절발파공법은 장약공 공간격

이 400mm가 유지되도록 하였다.

② 장약 및 발파작업

금번 시험발파에 사용된 화약류는 Emulsion계 $\phi 32\text{mm}$ 를 사용 하였으며, 외곽공은 $\phi 17\text{mm}$ 정밀폭약(FINEX)을 사용 하였다. 터널 막장면의 암반특성을 고려하여 설계상의 장약패턴 대로 심발 경사공 및 확대공의 장약밀도를 0.34kg/m 가 되도록 하였다. 기폭 시스템은 비전기식 뇌관 기폭시스템을 이용 하였으며, 발파효과를 제고시키기 위해서 동시기폭 장약공을 확대공은 1공, 제어발파공은 2공으로 하였다.

③ 진동측정

시험발파시 발파진동 및 소음은 잠실학생체육관 지하실과 지상의 3지점에서 진동측정이 이루어졌다. 사용된 계측기는 Instantel사의 Minimate Plus와 BlastMate-III이다.

그림 5는 조합형조절발파공법 시험발파 모습이다.

4.3.3 시험발파 결과분석

잠실학생체육관 직하부 막장에서 동일조건으로 스무스블라스팅공법과 조합형조절발파공법으로 연속해서 시험발파를 실시한 결과, 체육관 지하층에서 측정된 진동값과 추정된 진동추정식을 보면 표 5와 같다.

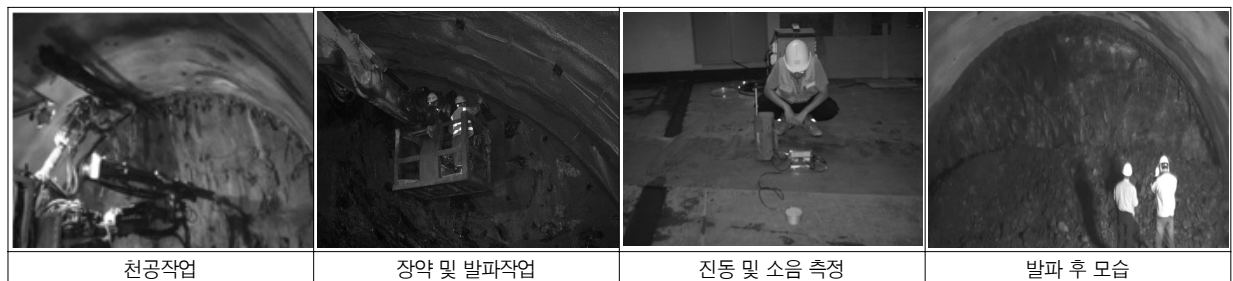


그림 5. 조합형조절발파공법 시험발파 모습

표 5. 제어발파공법별 시험발파 결과

구 분	스프스블라스팅공법	조합형조절발파공법	비교 그래프(V=1.0cm/sec)
이격거리	27m	26m	
진동값(PVS)	0.210cm/sec	0.145cm/sec	
진동추정식(95%)	$V = 56.67 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.50}$	$V = 33.14 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.41}$	

표 6. 터널과 체육관 지하층의 최단거리에서 제어발파공법별 진동을 예측한 결과

구 분	스프스블라스팅공법	조합형조절발파공법	비 고
최단거리지점	STA.31+851.4	STA.31+851.4	
발파패턴	PD-3E	PD-3E	
최단이격거리	21.0m	21.0m	천단부 기준
지발당장약량	0.375kg	0.375kg	심발공 기준
예상진동값	0.262cm/sec	0.211cm/sec	체육관 지하층
진동 영향원			

위 표에서 보는바와 같이 거의 동일한 이격거리를 두고 체육관 지하층에서 제어발파공법별 수집된 진동값을 보면, 조합형조절발파공법이 스프스블라스팅공법 보다 약 31% 정도 진동이 작게 감지되었음을 알 수 있다. 이는 조합형조절발파공의 사전 기폭으로 선균열층이 형성되어 주 장약공(확대 및 바닥공)의 발파시 체육관 방향의 암반 층으로 진동이 상당히 감소된 것으로 파악된다.

또한, 본선터널 노선에서 체육관 지하층과 가장 가까운 지점에서 시험발파 결과로 산출된 발파진동추정식으로 발파진동값을 예측한 결과, 제어발파공법별 모두 허용치 이내로 감지되는 것으로 파악 되었다. 표 6은 터널과 체육관 지하층의 최단거리에서 제어발파공법별 진동을 예측

한 결과이다.

제어발파공법별 예상 진동값의 저감율이 19.5% 으로 산출된 것은 발파진동추정식의 입력 진동값이 체육관 진동값 뿐만 아니라 기타 지점의 진동 데이터까지 포함되어 나타난 결과이기 때문이다.

4.4 조합형조절발파공법 적용

당초 본선터널 발파시 잠실학생체육관에서 발파진동이 허용치를 초과하는 것으로 예측되어 기계식 굴착공법으로 설계 되었으나, 제어발파공법으로 시험발파를 실시한 결과 체육관 지하실에서 0.145cm/sec 정도로 측정되어

표 7. 잠실학생체육관 하부 본선티널 구간에 적용된 발파패턴

공정	구분	패턴 및 수량	발파패턴도
발파 공법	심발부	SAV-Cut	
	굴착선 외곽부	조합형조절발파공법	
천공	천공수	152공	
	천공장(확대공 기준)	1.1m	
장약 및 발파	공당 장약량 (Kg)	심발 중앙공	0.125
		심발 경사공	0.375
		확대공	0.375
		조절발파공	0.225
	총 장약량(상부단면)		43.8 kg
	사용화약류		EM ϕ 32, Finex ϕ 17
	사용뇌관		비전기식 뇌관

허용기준치(1.0cm/sec)의 14.5% 수준으로 확인 되었으며, 최단거리에서 발파할 경우 체육관에서 0.211cm/sec 정도로 예상되어 허용기준치의 21.1%에 불과한 것으로 예측 되었다. 따라서 본 현장 잠실학생체육관 하부를 통과하는 터널노선 구간에 제어발파공법의 시험발파결과를 토대로 조합형조절발파공법을 적용 하였다. 표 7은 잠실 학생체육관 하부 본선티널 구간에 적용된 발파패턴이다.

5. 수치해석을 통한 발파진동 및 암반손상 검토

5.1 개요

본 현장 본선티널 노선 중 잠실학생체육관 하부를 통과하는 구간에 조합형조절발파공법을 적용할 경우 발파진동이 체육관 구조물에 미치는 영향검토를 실시하기 위해서 잠실학생체육관 구조물에 전달되는 발파하중에 대한 동해석을 실시 하였다.

또한, 잠실학생체육관 하부 본선티널에서 발파작업을 수행할 경우 발파 충격파로 인하여 터널 굴착선 암반 손상뿐만 아니라 진동에 의한 피해를 받게 된다. 터널 여굴이 당초 여굴량 보다 많아지고 여굴범위가 확산되면 터널 상부 암반층에 사하중이 증가하여 터널 지보력에 영향을 줄 수 있을 뿐만 아니라 상부에 존재하는 학생체육관 기초지반에 영향을 줄 수 있다. 따라서, 입자유동 수치해석을 통하여 조합형조절발파공법에 대한 암반의 손상범위를 추정하여 적용 발파공법 및 발파수량의 적용성을 파악 하였는데, 입자유동 수치해석에 사용된 프로그램은 DEM (Distinct Element Method)에 기반을 둔 상용 해석프로그램인 PFC2D(Particle Flow Code)를 이용 하였다.

5.2 수치해석 조건

해석에 적용되는 암반의 기본 물성값은 굴착패턴 PD-3E의 연암에 해당하는 것으로, 각 암반의 단위중량, 점착력, 내부마찰각, 변형계수, 포아송비를 표 8과 같이 설정

표 8. 암석 물성값

구분	변형계수(MPa)	포아송비(ν)	단위중량(kN/cm ³)	내부마찰각($^{\circ}$)	일축압축강도(MPa)
실제암반	1,500	0.30	24	31	1.77
PFC 모델	1,345	0.24	24	31	1.73

* 일축압축강도의 경우 점착력(C)과 내부마찰각(ϕ)으로부터 추정된 값임. $\left[\sigma_u = 2 C \tan \left(45^{\circ} + \frac{\phi}{2} \right) \right]$

표 9. 사용 화약류 제원

화약종류	약경(mm)	약장(mm)	가비중(g/cm ³)	폭발속도(m/sec)	폭발열(kcal/kg)
에멀전 폭약 (뉴마이트플러스 I)	32	295	1.1~1.2	5,700	880
조절발파용 폭약 (뉴화이넥스)	17	500	1.0	4,400	640

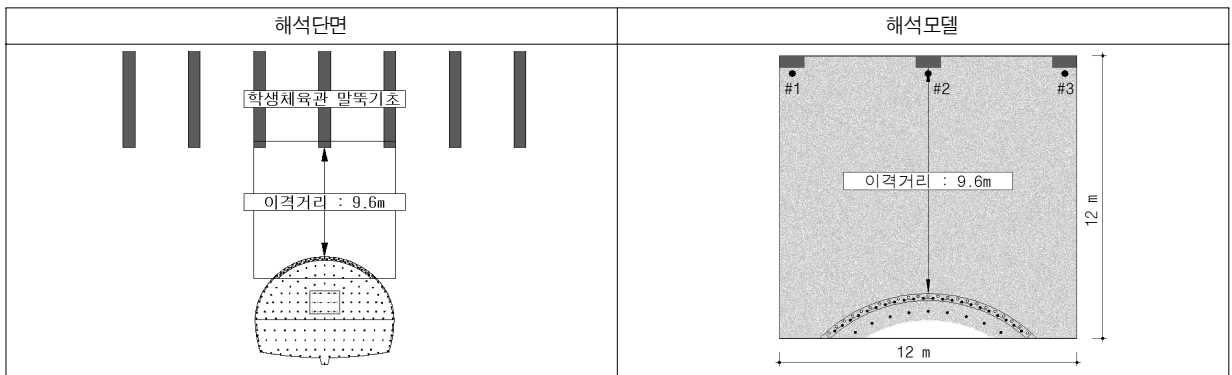


그림 6. 해석모델

하였다. 또한, 발파에 사용되는 화약은 에멀전 폭약과 조절발파용 폭약의 두 종류이며, 장약 화약의 직경은 발파 패턴도에 따라 결정하였다. 화약의 특성을 모델링하기 위해 각 화약의 가비중, 폭발속도, 폭발열을 기준으로 표 9와 같이 발파압력을 산정하였다.

5.3 PFC 2D 모델형성

암반모델은 시행오차 방법을 이용하여 모델생성에 필요한 변수를 산정하고, 일축압축 모델을 통해 암반모델의 물성값을 결정하였으며, 발파패턴을 고려하여 모델의 크

기는 가로 12m, 세로 12m의 정사각형 형태로 생성하였다. 최대발파압력은 보어홀 압력 산정을 위한 경험식 중 Sanchidrian 등의 식을 사용하였으며, 본 해석에 사용되는 천공직경(45mm)과 화약의 직경(최대 32mm) 차이에 따른 디커플링효과를 고려하였다. 잠실학생체육관 하부 통과 모델은 터널로부터 9.6m 이격되어 있는 기초파일에서의 발파의 영향을 평가하기 위해 해석을 수행하였다. 또한, 터널 상부의 확대공 일부와 외곽공을 모델링하여 총 31개의 발파공을 설정하였으며 최외곽공 23공은 빈공으로 설치하여 조합형조절발파의 효과를 검증하고 그 결과를 반영할 수 있도록 해석 모델링하여 적용하였다. 그림 6은 해석모델이다.

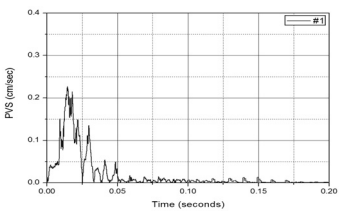
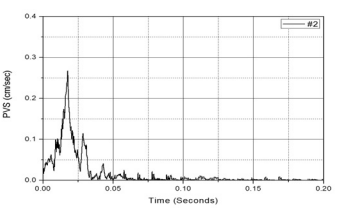
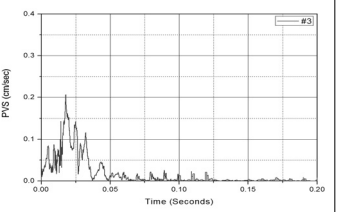
구 분	#1	#2	#3
진동 이력곡선			
결과	0.227cm/sec	0.267cm/sec	0.207cm/sec

그림 7. 발파진동 해석 결과

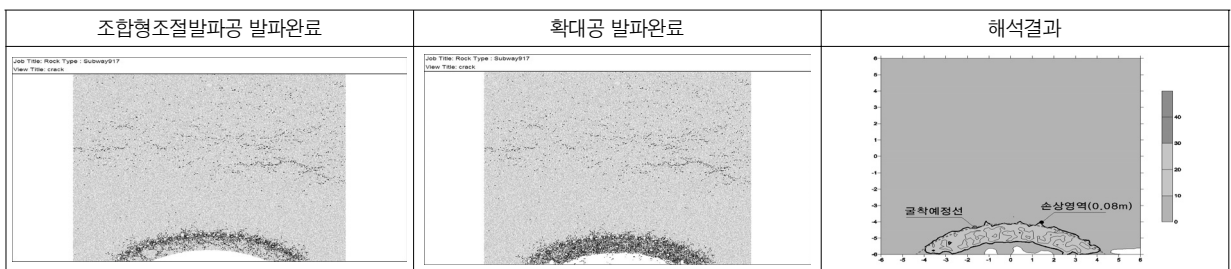


그림 8. 암반 손상범위 추정에 대한 해석결과

5.4 발파진동 영향검토

각 발파공의 발파시차는 실제 초시순서에 맞게 설정하였고, 각 발파공의 영향이 없도록 조절하였으며, 진동 계측지점(#1, #2, #3)은 체육관 구조물 기초파일 선단부 세 군데를 선정하였다. 각 지점에서 발파진동을 예측한 결과, 잠실학생체육관 하부 본선터널에서 발파작업을 수행할 경우 직부 기초파일에서 감지될 것으로 예상되는 발파진동값은 0.207~0.267cm/sec로 허용치(3.0cm/sec)의 7~9% 수준으로 진동에 의한 피해는 발생하지 않을 것으로 예상된다. 그림 7은 발파진동 해석 결과이다.

5.5 암반 손상범위 검토

잠실학생체육관 하부 본선터널에서 발파작업을 수행할 경우 터널 굴착선에 미치는 암반의 손상정도를 입자유동 해석결과, 그림 8과 같이 굴착예정선으로 부터 평균 약 0.08m의 손상범위가 형성되는 것으로 해석 되었다. 이와

같은 손상범위는 체육관 기초파일과 이격거리(9.6m)와 연암층 두께(약 10m)에 비해 상당히 작기 때문에 발파 충격파로 인한 암반 손상으로 체육관 구조물에 영향은 없을 것으로 판단된다.

6. 결론

터널발파시 터널과 근접해서 구조물이 존재할 경우 발파진동으로 인해 구조물 피해가 우려되기 때문에 진동을 제어할 수 있는 방법을 강구하게 된다. 일반적으로 진동을 제어할 수 있는 방법으로 기계식 굴착공법, 화공품류를 이용한 미진동굴착공법, 화약류를 이용한 진동제어발파공법 등이 있는데, 현장여건을 고려하여 가장 적합한 방법을 선정하여 적용하게 된다. 본 고에서는 서울지하철 917공구현장 본선터널 노선에서 약 21m 상부에 존재하는 잠실학생체육관 구조물의 피해를 최소화 하기 위해서 적용된 조합형조절발파공법에 대한 현장 시험발파 결과와

적용사례를 소개 하였다.

당초 본 현장 본선터널 굴착시 잠실학생체육관 구조물 보호를 위해서 기계식 굴착공법을 적용하도록 설계되어 있었으나, 굴착 시공성과 공기지연 등의 어려움에 봉착되어 화약류를 이용한 제어발파공법 적용 가능성을 검토하게 되었다. 제어발파공법별 시험발파는 일반적인 스무스블라스팅공법(Smooth Blasting)과 터널 굴착선에 선균열층을 형성시킬 수 있는 조합형조절발파공법(Complex Blasting)을 동일위치와 동일조건으로 비교시험을 실시하였는데, 잠실학생체육관에서 진동을 측정한 결과 조합형조절발파공법이 스무스블라스팅공법 보다 진동이 약 31% 정도 저감되는 것으로 파악 되었다. 또한, 조합형조절발파공법으로 발파할 경우 터널노선과 잠실학생체육관 지하층과의 최단거리(21m)에서 진동추정식으로 예측되는 진동값이 0.211cm/sec 으로서 허용치(1.0cm/sec) 보다 훨씬 작게 전달될 것으로 파악 되었다.

수치해석을 통해 조합형조절발파공법 적용시의 굴착선 암반 손상범위를 추정한 결과, 약 8cm 정도로 나타나 터널 발파시 여굴현상이 거의 나타나지 않을 것으로 예측

되었다.

그러나, 본 현장에 적용된 조합형조절발파공법은 외곽 공을 사전에 기폭시켜 선균열을 형성시킨 후 주 발파공을 기폭 시키기 때문에 선균열의 완벽한 효과를 얻기 위해서는 막장 암질에 적합한 발파패턴을 수립해야 하며, 경암 구간 발파시 조절발파공과 확대공 사이의 암반에 형성할 수 있는 미굴현상을 억제하기 위해서 장약밀도와 천공패턴을 정확히 산출한 후 적용해야 한다.

참고문헌

1. GS건설(2010), “서울지하철917공구현장 본선터널 발파진동이 잠실학생체육관 구조물에 미치는 영향검토 보고서”
2. 한국석유개발공사(1997), “표준발파공법”, pp. 117-125.
3. National Highway Institute(1991), “Rock Blasting and Overbreak Control”, pp. 181.
4. Italesplosivi(1990), “Explosives: an engineering tool”, pp. 95-108.
5. Rune Gustafsson(1981), Blasting Technique, Dynamit Nobel Wien, pp. 174-189.