

NDC 및 Wide Space 혼합공법을 통한 발파효율 개선사례

노상림, 노승환, 이상필, 서정우 (GS건설(주))
이태노 ((주)성보지오텍)

1. 서 론

최근 들어 국도확장, 고속도로건설 등의 대규모 국책사업과 더불어 도심지내 아파트, 고층 건물 신축 등의 부지 조성 공사로 인하여 불가피하게 굴착을 위한 발파작업이 증대하고 있는 현실이다. 이러한 발파작업의 영향으로 진동, 소음 등의 발파공해에 대한 피해보상을 요구하는 민원인의 저항에 부딪혀 공사비 증가와 공기지연 등의 문제가 발생하여 사업에 막대한 지장을 주고 있다. 이에 대한 대비책으로 정밀진동제어발파 또는 암파쇄굴착공법 등의 미진동 및 무진동 공법을 적용하고 있으나 공기가 매우 중요한 공사에서는 현실적으로 적용하는데 많은 어려움이 따르는 것이 일반적이다.

이에 따라 본 사례연구에서는 크게 두 가지 관점에서 발파 시 민원 문제를 해결하기 위하여 접근하였는데, 첫 번째는 종이 분리봉을 이용하여 분산장약을 실시함으로 장약밀도를 조정하는 NDC(New Deck Charge)공법이고, 두 번째는 공저부분에 밀장약이 되지 않는 NDC공법 특성상 발생하는 굴진율 저하 문제에 대한 대처방법으로 최소저항선을 줄이고 공간격을 늘리는 Wide Space공법이다.

본 사례연구에서는 NDC공법과 Wide Space공법의 혼합 적용을 통하여 진동에 따른 민원을 최소화하고, 굴진율을 증가시켜 경제적으로 노천을 굴착할 수 있는 발파공법 개선에 관해 소개하고자 한다.

2. NDC(New Deck Charge)공법

NDC 발파공법은 두 가지 원리를 이용하였다. 첫째, 화약의 공내 순폭(Sympathetic detonation in hole)을 이용하여 화약과 화약 사이의 거리를 띄움으로써 장약밀도를 조정하는 원리이다. 일반적으로 화약의 순폭상태를 평가하기 위한 순폭도는 일반적으로 모래 위에

서 실험하는 사상 순폭시험을 통해 측정하게 되는데, 순폭거리가 보통 화약 직경의 2~4배 정도로 알려져 있다. 그러나 보통 암반에 천공된 공내에서의 순폭도는 밀폐된 공간에서 폭발이 이루어지기 때문에 사상 순폭도보다 10~20배 이상 커진다. 이러한 화약의 순폭도를 이용하여 공내 장약밀도를 조절할 수 있다. 둘째는 Air Deck 효과를 이용하는 것이다. 폭약의 전압력이 기존 발파보다 넓게 분포되어 암석의 고른 파쇄와 디커플링 효과에 의한 진동 저감 효과를 낼 수 있다.

발파공 내에서 적정 장약밀도를 유지하고 시공을 용이하게 하기 위해서, 화약과 화약 사이의 공간을 띄우는 방법으로 종이 관형 분리봉을 개발하였다. 이 분리봉은 종이 재질로 제작되어 비용이 저렴하며, 가벼운 관형(管形)으로 이루어져 있기 때문에 설치가 간편하고 화약간의 간격을 유지할 수 있다. 또한 분리봉의 중심이 빈 공간으로 되어 있기 때문에 폭발 압력이 화약에 직접 전달되어 순폭도를 유지할 수 있다. 그림 1은 분리봉을 이용한 NDC 발파공법의 개념도이다.



그림 1. NDC 발파공법 개념도

본 연구를 통해 개발된 분리봉의 성능과 화약의 순폭상태를 파악하기 위해서 순폭시험을 실시하였다. 시험방법은 암반의 천공상태와 유사한 조건으로 맞추기 위해 직경이 43mm, 두께가 2mm인, 한쪽이 밀폐된 철관을 사용하였다. 철관 내부에 화약과 분리봉을 위치시켜 10회 걸쳐 시험발파를 실시한 결과, 화약간 거리가 50cm 일 경우에도 화약이 완전히 순폭되는 것을 검증하게 되어 분리봉의 길이를 30~40cm로 제작하여 적용하였다.

3. Wide Space공법

Wide Space공법이란 천공간격을 넓히고 반대로 저항선을 작게 함으로써 파쇄버력을 작게 또는 균일하게 하는 발파공법을 말한다. 일반적인 벤치발파의 경우 천공간격은 저항선 길이의 1.0~1.5배를 취한다. Wide Space 공법의 경우, 평면적으로는 1공이 담당하는 파쇄면적은 종래의 방법과 동일하나 최소저항선의 길이에 비해서 천공 간격의 비율을 4~8배로 적용하여 종래의 방법보다 최소저항선의 길이를 매우 짧게 하는 공법이다.

벤치 컷과 같은 주상(柱狀)장약의 경우 폭약이 폭굉하면 폭원 인접구간에 발생하는 반경

방향응력은 주로 압축응력으로 작용하고 그에 직각인 접선방향에서는 주로 인장응력이 작용한다. 이때의 인장응력이 암석의 인장강도를 상회하면 그곳에 균열이 발생하여 폭원을 중심으로 방사선 상태의 균열이 발생하게 된다. 그러나 이것은 한 공이 발파될 경우의 현상이며, 천공 간격이 좁은 경우에는 두공 사이를 연결하는 직선상의 접선방향의 인장응력이 가장 크게 되며 이것에 따른 균열이 먼저 발생함으로써 주변 응력이 해방되어 폭원사이를 연결하는 절단면으로부터 내부로 향하는 균열이 작게 된다. 반대로 천공 간격이 크게 되면 각각의 폭원에서 발생하는 균열이 방사 상태로 발달하여 내부로 향하므로 상당히 많은 균열이 발생하게 된다. 이러한 원리에 의해 Wide Space 공법이 일반적인 벤치 발파공법에 비해 파쇄효과를 높일 수 있다.

4. 현장시험

4.1. 현장개요 및 지질현황

본 과업의 노선구간은 대부분이 산악지형으로 전체적인 지형은 지질분포의 영향을 받아 북한산에서 사패산의 남-북 산계에 대하여 북동 방향으로 위치해 있으며 흑운모 화강암을 기저로 하고 있다. 지형을 종합해 보면 하천들은 각기 발원한 소규모 지천들로 동서방향의 방향성을 보이며 가지상으로 뻗어있고, 사패산 일대의 돌출부 형태의 특징적인 형태로 볼 때 전반적인 지형은 장년기 지형양상을 보이며, 북한산 국립공원 북동부의 광범위한 충적층 지역은 노년기 지형이라 할 수 있다. 본 계획노선에 분포하는 지질을 개략적으로 보면 주로 선 캄브리아기의 편마암류와 중생대 슈라기에 이를 관입한 흑운모 화강암으로 대별할 수 있으며 그 외 암맥류와 충적층 등으로 구분될 수 있는데 시험발파구간의 암질은 서울화강암이 주종을 이루고 있다. 시험발파 구간의 경우 서울외곽순환고속도로 4공구의 의정부 방면 종점부로 북한산 국립공원의 경계부에 위치하고 있으며 그림 2에서 보는 바와 같이 발파구간 인근(100~200m)에 많은 보안물건이 있어 저진동 공법을 적용해야 하는 현장이다.

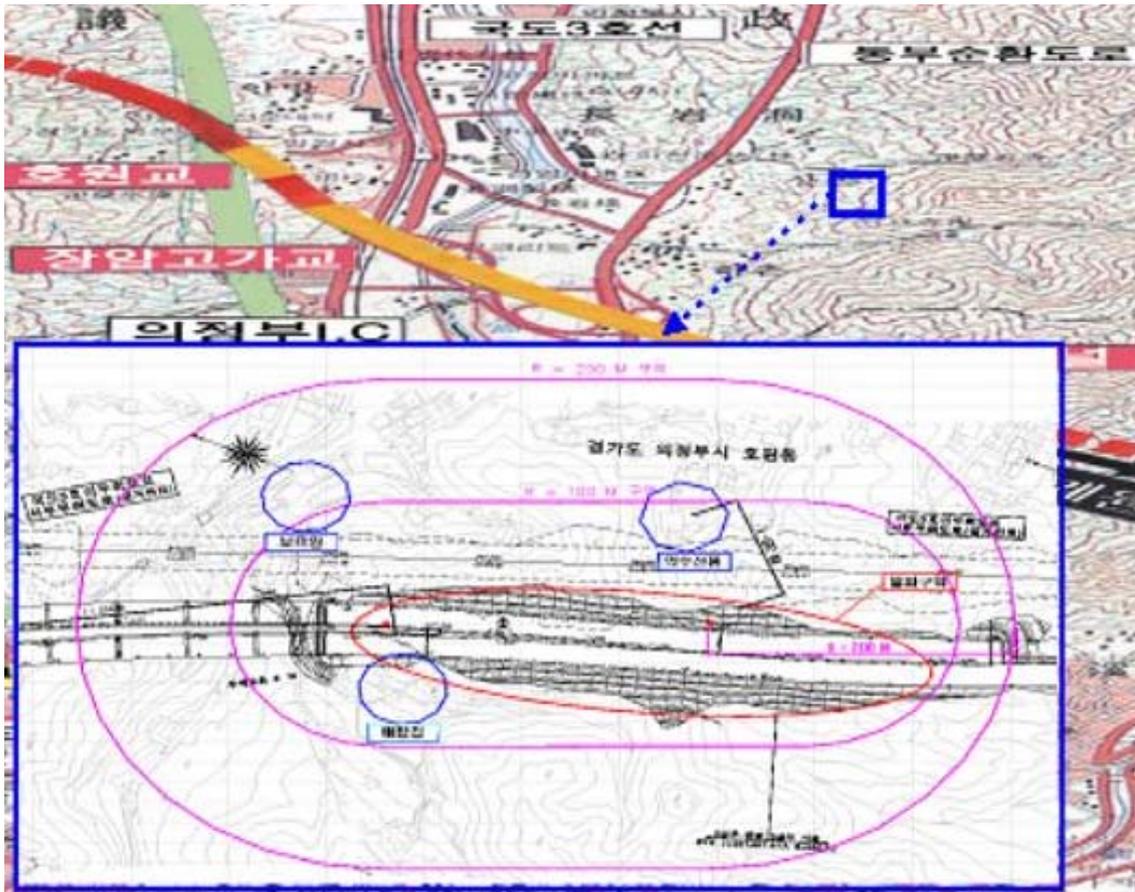


그림 2. 시험발파 현장 및 보안물건 현황

4.2. 시험방법 및 발파제원

본격적인 시험에 앞서 NDC공법과 Wide Space공법에 대한 효용성을 각각의 실험을 통하여 확인하였고, NDC와 Wide Space의 혼합공법에 대한 검증을 실시하였다(표 1~4 참조).

표 1. 시험발파 현황 및 내용

구분	수행현황 및 내용
장소	중점 절토부 STA. 7 + 460 지점
적용 발파공법	① 표준벤치발파공법 ② NDC발파공법 ③ Wide Space 발파공법, ④ NDC + Wide Space 발파공법
천공장	2,700 mm
시험방법 및 분석내용	- 발파공법별 동일한 조건에서 시험발파 수행 - 발파공법별 진동 및 소음측정 - 발파공법별 파쇄상태 및 굴진장 측정

※ 일반발파와 Wide Space발파의 비교는 표 7 참조.

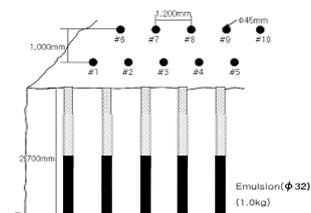
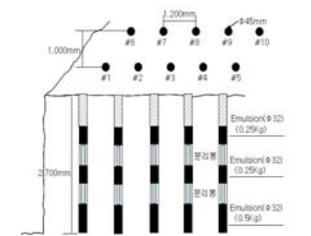
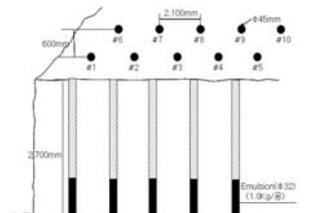
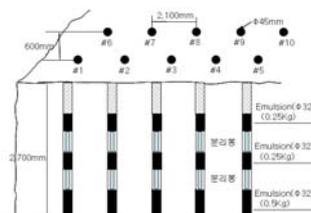
표 2. 발과공법별 특징

구 분	표준벤치발과공법	NDC 발과공법	Wide Space 발과공법
메카니즘	<ul style="list-style-type: none"> • 2자유면 발과공법 • 저항선(W)과 공간격(S)의 비: $S=(1.0\sim 1.25)W$ • 공저에 집중장약 	<ul style="list-style-type: none"> • 2자유면 발과공법 • 천공된 공에 분산장약 (Deck Charge) • 저항선(W)과 공간격(S)의 비: $S=(1.0\sim 1.25)W$ 	<ul style="list-style-type: none"> • 2자유면 발과 • 천공배열은 전열과 지그제그 형태로 천공 • 저항선(W)과 공간격(S)의 비: $S=(2.0\sim 4.0)W$
특 징	<ul style="list-style-type: none"> • 천공 및 장약작업이 단순 • 국내 발과작업자 선호 • 진동 및 소음이 크게 발생 • 파쇄석이 잘게 부숩짐 	<ul style="list-style-type: none"> • 천공작업은 단순하나 장약 작업은 다소 불편 • 화약과 분리봉을 번갈아 가며 장약 • 진동 및 소음이 작음 • 대피발생이 우려됨 	<ul style="list-style-type: none"> • 천공작업은 다소 어려우나 장약작업은 단순 • 진동이 다소 작게 발생 • 집중장약으로 절리면 발달 암반에서 비산발생 • 파쇄석이 잘게 부숩짐
모 식 도			

표 3. 발과공법별 발과패턴

구 분	표준발과공법 (진동제어발과)	NDC 발과공법	Wide Space 발과공법	NDC + Wide Space
천 공 장(mm)	2,700	2,700	2,700	2,700
천 공 경(mm)	45	45	45	45
최소저항선(mm)	1,000	1,000	600	600
공 간 격(mm)	1,200	1,200	2,100	2,100
천 공 수 (공)	10	10	10	10
공당 장약량 (kg)	1.0	1.0	1.0	1.0
분리봉	미사용	사 용	미사용	사 용
장약방법	1.0kg + 전색	0.5kg+분리봉 +0.25kg+분리봉 +0.25kg+전색	1.0kg+전색	0.5kg+분리봉 +0.25kg+분리봉 +0.25kg+전색

표 4. 발파공법별 발파패턴 모식도

발파공법	발파패턴도	사용 화약 및 뇌관
표준발파공법 (진동제어발파)		<ul style="list-style-type: none"> • 화약(Emulsion(φ32)) : 10kg(40EA) • 뇌관(MS1~MS10) : 10EA
NDC 발파공법		<ul style="list-style-type: none"> • 화약(Emulsion(φ32)) : 10kg(40EA) • 뇌관(MS1~MS10) : 10EA • 분리봉 : 20EA
Wide Space 발파공법		<ul style="list-style-type: none"> • 화약(Emulsion(φ32)) : 10kg(40EA) • 뇌관(MS1~MS10) : 10EA
NDC + Wide Space 발파공법		<ul style="list-style-type: none"> • 화약(Emulsion(φ32)) : 10kg(40EA) • 뇌관(MS1~MS10) : 10EA • 분리봉 : 20EA

4.3 시험결과 분석

NDC 시험발파의 진동저감 효과를 확인하기 위하여 표준발파공법과 비교시험을 실시한 결과는 표 5 및 표 6과 같다. 이때 지발당 장약량을 2.4kg로 유지하고, 측정거리를 40~220m까지 같은 조건에서 3차에 걸쳐 시험을 실시하여 서로 상대적인 비교가 가능하도록 하였다. 일반발파와 분산장약을 실시한 NDC 발파를 비교한 결과 일반발파에 비하여 NDC 발파의 진동속도가 거리별로 약 20~40%정도가 감소하였으며, 평균 26.6%정도의 감소효과를 확인할 수 있었다.

표 5. 표준발파와 NDC발파의 진동 측정결과

방법	거리(m)	지발당 장약량(kg)	진동속도(cm/sec)				
			T	V	L	Sum	
표준발파 공법	40	2.4	0.614	0.451	0.311	0.638	
	60	2.4	0.337	0.286	0.230	0.432	
	80	2.4	0.195	0.238	0.256	0.333	
	220	2.4	0.019	0.019	0.057	0.061	
NDC 발파 공법	1차	40	2.4	0.403	0.443	0.306	0.523
		60	2.4	0.283	0.151	0.189	0.320
		80	2.4	0.192	0.164	0.138	0.240
		220	2.4	0.032	0.018	0.041	0.044
	2차	40	2.4	0.268	0.262	0.211	0.373
		60	2.4	0.144	0.117	0.151	0.198
		80	2.4	0.198	0.133	0.083	0.210
		220	2.4	0.022	0.018	0.056	0.056
	3차	40	2.4	0.354	0.498	0.36	0.582
		60	2.4	0.132	0.171	0.171	0.241
		80	2.4	0.227	0.211	0.103	0.305
		220	2.4	0.021	0.016	0.046	0.050

표 6. 표준발파와 NDC발파의 진동 비교

측정거리(m)	표준발파 진동 (cm/sec)	NDC발파 진동 (cm/sec)	진동감소 효과 (%)
40	0.638	0.493	22.7
60	0.432	0.253	41.4
80	0.333	0.252	24.3
220	0.061	0.050	18.0
평균	-	-	26.6

그러나 NDC공법이 기존 공법에 비하여 진동속도 저감이라는 점에서는 매우 유리하나, 공저부에 밀장약이 되지 않음으로써 공저부의 암반이 강할 경우 미굴 등이 발생할 우려가 있다. 이러한 점에 대한 해결책으로 Wide Space 공법을 적용하게 되었다(표 7 참조).

표 7. 일반발파와 Wide Space발파의 굴진효율 비교

구 분	일반 벤치발파	Wide Space 발파공법
굴진효율측정		
천공장(m)	2.0	2.0
굴진장(m)	1.5~1.8	2.0
굴진율(%)	75~90	100
파쇄용적(m³)	9.21	10.40
비장약량(kg/m³)	0.40	0.36
비천공장(m/m³)	2.17	1.92

동일한 조건에서 시험발파를 한 결과, 굴진효율의 경우 Wide Space 발파공법이 기존의 벤치 발파공법에 비하여 10%~25% 정도 증가하였다. 발파비용에 직접적 영향을 주는 비장약량 및 비천공장의 경우 또한 기존의 벤치 발파공법보다 Wide Space 발파공법이 더 경제적임을 확인하였다.

NDC공법과 Wide Space공법의 효용성을 확인한 후, 이 두 공법을 혼합하여 발파를 하는 방법으로 개선하여 현장에 적용하였으며 그 결과는 다음 표 8과 같다. NDC공법 또는 Wide Space공법이 각각 단독으로 쓰일 경우에는 굴진효율 감소 혹은 진동속도 증가 등의 문제점을 안게 된다. 본 개선사례에서는 이러한 점을 개선하기 위하여 두가지 공법을 혼합하여 상호 보완할 수 있는 공법을 개발하였고 현장에서 시험한 결과 표 8과 같이 기존의 공법보다 굴진율이 높아지고 진동속도가 저하되는 결과를 얻을 수 있었다.

표 8. 발파공법별 굴진효율 및 진동속도 비교

구 분	NDC공법	Wide Space 공법	NDC+Wide Space 공법
천공장(m)	2.7	2.7	2.7
굴진장(m)	2.1	2.5	2.5
굴진율(%)	81	93	93
진동속도(cm/sec)	0.401	0.502	0.379

5. 결 론

본 사례연구에서는 진동저감을 위하여 분산장약을 실시한 NDC(New Deck Charge)공법과 굴진을 증가를 위하여 최소저항선을 줄이고, 공간격을 늘린 Wide Space공법을 혼합 적용하여 굴진발파효율을 개선시키고자 하였다. 이 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 발파공 내에서 적정 장약밀도를 유지하고 시공을 용이하게 하기 위해서, 화약과 화약 사이의 공간을 띄우는 방법으로 30~40cm 종이 관형 분리봉을 개발하여 NDC공법에 적용한 결과, 일반발파에 비하여 NDC발파의 진동속도가 거리별로 약 20~40%정도, 평균 26.6%정도 감소됨을 확인하였다.
- 2) NDC공법이 기존 공법에 비하여 진동속도 저감이라는 점에서는 매우 유리하나, 공저부에 밀장약이 되지 않음으로써 공저부의 암반이 강할 경우 미굴 등이 발생할 우려가 있다. 따라서 발파효율을 증대시키기 위해 Wide Space 발파공법을 적용하였으며, 기존의 벤치 발파공법에 비하여 10%~25% 정도 발파효율이 증가하였다.
- 3) 본 개선사례에서 개발한 NDC와 Wide Space의 혼합공법은 기존의 발파공법에 비해 적은 진동으로 굴진효율을 확보하며 굴착이 가능한 공법이기에 때문에 도심지 굴착 혹은 민원이 강하게 제기되는 현장에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 본 사례연구에서 사용된 NDC와 Wide Space의 혼합공법에 대한 자료는 시험발파 결과에 의한 것으로, 향후 본 발파에서 더욱 많은 실험을 통해 자료를 축적한다면 민원 저감 및 공기단축에 기여할 수 있는 최적의 발파패턴을 정립할 수 있을 것이다.

■ 참고문헌 ■

1. 이태노, 김동현, 서영화, 2002, 터널 굴착면 여굴최소화를 위한 발파암 분류(안) 및 공법 개발 연구, 한국지반공학회, pp. 303~310
2. 윤지선, 1992, 최신발파기술, 구미서관, pp. 64~74
3. R., Gustafsson, Blasting technique, Dynamit nobel wien, pp. 75~76
4. P., Persson and R., Holmberg, J. and Lee, Rock blasting and explosives engineering, pp. 252~253
5. NDC 시험발파 결과보고서, 2005, GS건설(주)