

파이롯트 터널을 이용한 이방향 천공 발파공법의 진동 저감효과

○ 이찬우*, 유진오**, 이경원***, 배규진****

(Decreasing Effects of Vibration by Drill and Blast Method with Bi-directions using TBM Pilot Tunnels)

(Chan-Woo Lee, Jin-O You, Kyung-One Lee, Gyu-Jin Bae)

1. 서론

TBM/NATM 병용공법은 TBM 을 이용하여 파이롯트 터널을 선굴착한 후 그 주위를 확대발파해 나아가는 공법으로서 터널 전단면 굴착전 1차적으로 TBM 을 이용하여 파이롯트 터널을 굴착하므로 주변지반을 크게 이완시키지 않으면서 본 굴착전 지반상태를 조사·분석 및 평가할 수 있는 잇점이 있을 뿐만 아니라 NATM 공법에서 필연적으로 수반되는 심폐기 발파를 배제할 수 있으므로 발파진동 경감효과를 크게 얻을 수 있다. 또한 이 공법은 굴착속도가 매우 빠른 TBM 으로 선굴착하는 방법을 이용하므로 확폭구간에서의 발파방법 및 시공순서를 적절히 조절하게 되면 직접공사비 절감 및 공기단축 효과를 크게 얻을 수 있는 장점이 있다.

그러나 여태까지 국내의 TBM/NATM 병용공법 적용시의 확폭 발파방법은 기존의 NATM 공법에서와 같이 굴착단면에서 터널굴진 방향과 동일한 방향으로 천공 발파하는 방법을 답습함으로써 기존 존재하는 TBM 파이롯트 터널의 효용성을 극대화하지 못하였다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 파이롯트 터널 벽면상에 방사상 방향으로의 사전 천공 개념을 도입할 수 있으며, 이 경우 최종면의 여굴이 우려되는 바 이를 방지하기 위하여 최외각면에 한하여 터널길이 방향으로의 천

공을 추가하는 발파개념, 이른바 이방향 천공 발파공법의 도입을 생각할 수 있다.

본 연구에서 제안한 이방향 천공 발파공법은 대규모 터널을 시공할 경우 1차적으로 TBM 을 이용하여 파이롯트 터널을 굴착한 뒤 2차로 파이롯트 터널주위를 확대발파해 터널을 완성하는 데 쓰이는 공법으로서 TBM 공법이나 NATM 공법을 혼용한다는 측면에서 TBM/NATM 병용공법의 일부이나 이미 존재하는 TBM 파이롯트 터널을 최대한 활용한다는 점에서 기존의 TBM/NATM 병용공법과 차별화 시킬 수 있다.

TBM 터널을 이용한 이방향 천공 발파공법은 파이롯트 터널내에서 다른 공종의 작업과 동시에 천공작업을 파이롯트 터널 전구간에 걸쳐 사전에 실시해 둘 수 있으므로 천공작업시간의 단축을 가능케하여 직접 공사비의 절약이 가능할 뿐만 아니라 본 공법의 발파패턴 특성상 문제시 되는 터널 직상부 지표면의 진동 저감효과도 클 것으로 예상된다.

본 공법의 실용성 및 진동 저감효과를 파악하기 위하여 본 연구에서는 3차원 발파 진동해석을 수행하였으며, 유원건설 서울 북부 도시고속도로 3공구 TBM 확공현장을 시험 발파현장으로 선정하여 기존의 종방향 천공 발파공법과 본 연구에서 제안한 이방향 천공 발파공법의 시험시공을 실시, 본 공법의 효용성을 검토하였다.

또한 자유면이 발파진동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 심폐기 발파시와 파이롯트 터널의 자유면을 이용한 경우의 발파진동을 측정, 분석하였다.

* 유원건설 지하공간팀장 차장, 공학박사
** 유원건설 지하공간팀 연구원
*** 유원건설 북부도시고속도로 3공구 현장, 과장
**** 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원

2. 이방향 천공 발파공법

TBM/NATM 병용공법은 여러면에서 장점이 있지만 국내의에서 병용공법 적용시 확대 발파는 터널단면을 기준으로 종방향으로 천공 발파하는 방법으로 시공하고 있으므로 병용공법이 가지고 있는 장점을 최대한 활용하지 못하고 있는 실정이다. 또한 기존의 종방향 천공 발파공법을 적용하여 TBM 터널을 확공할 경우에는 터널굴진 작업시 TBM 에 의한 파이롯트 터널의 잇점을 최대한 살리지 못하고 진동 전파특성상 통상적으로 문제시 되는 터널 직상부 지표면에서의 진동치를 크게하는 등 몇가지의 문제점을 내포하고 있다.

이에 비해 이방향 천공 발파공법은 기존의 종방향 천공 발파공법과는 전혀 다른 개념의 신공법으로서 공기단축 및 발파진동 경감효과를 보다 크게 얻을 수 있도록 TBM 에 의해 굴착된 파이롯트 터널속에서 방사상 방향의 발파공을 이미 천공해 놓은 상태에서 터널 단면 최외곽부를 터널 굴진방향과 같은 종방향으로 1회 굴진장만큼 천공하면서 발파함으로써, 방사상 방향만의 천공에 의해서 발파했을 때의 여굴문제를 해결할 수 있는 획기적인 공법이라 할 수 있다.

그림 1 은 TBM/NATM 병용공법을 적용했을 때의 기존공법과 신공법의 개념도이며, 그림으로부터 터널 확대발파시 기존공법의 주 천공 발파방향이 터널길이 방향인 것에 비하여 신공법은 방사상의 방향이 주 천공 발파방향이므로 확대발파 공정 중 터널 전구간에 걸쳐 사전에 천공을 해 둘 수 있는 장점이 있으며, 발파진동의 주 전파방향이 기존공법과 차이가 있음을 알 수 있다.

그림 2 는 터널 종방향과 방사상 방향의 발파진동 전파양상을 나타낸 것으로 종방향 천공 발파의 경우, 장약공 전체길이에 걸쳐 발파진동이 지표면으로 전파되는 반면 방사상 천공발파의 경우는 장약공의 선단부를 통하여 지표면으로 전파될 것이기 때문에 터널 굴진방향으로 더 큰 크기의 진동이 전파될 것으로 판단된다.

3. 발파공 천공방향에 따른 3차원 발파 진동해석

본 공법의 효율성을 평가하기 위한 3차원 발파 진동 해석의 목적은 실제의 정밀해를 얻는 것이 아니며 동일 지반조건일 때의 발파공 천공방향에 따른 상대적인 지반응답 차이를 알아보기 위한 것이므로 대표적인 단일 발파공에 대하여 해석을 실시하였다. 등가로 치환된 하중대 시간곡선은 확대발파에 사용된 화약특성치와 장약량을 고려하여 선정하였다.

3.1 해석방법

본 해석의 목적은 실제의 거동해석보다는 기존의 종방향 발파공법과 당사에서 개발한 이방향 천공 발파공법과의 효율성 비교에 있으므로 파이롯트 터널내의 단일 천공경에 대하여 3차원 선형 동적해석을 수행하였으며, 해석을 보다 원활하게 하기 위하여 지반의 물성은 경암으로 모두 균질하게 이루어져 있다고 가정하였다.

해석에 적용된 발파공의 길이는 직경이 42 mm, 길이가 1 m 로서 가급적 실제 상황과 비슷하게 하였다. 요소망 구성을 위한 전체지반은 폭 78 m, 높이 78 m, 터널 굴진방향 50 m 로 구성되어 있다. 발파공 해석을 위한 요소망의 크기는 폭 3 m, 높이 3 m, 터널 굴진방향 3 m 로 구성되어 있다.

본 해석에서는 작업의 효율성을 고려하여 다음의 두 단계로 나누어 수행하였다. 1단계에서는 발파공 주위의 미소부분을 확대하여 이 부분의 정밀해석을 각 하중의 경우에 대해서 수행하며, 2단계에서는 1단계에서 구해진 결과들을 토대로 이를 전체 요소망에 재분배시켜 해석을 수행한다.

해석에 적용된 대표적 발파공의 위치는 다음과 같다.

case 1 : 발파공이 터널 굴진방향으로 향하고 있을 경우 (기존 공법)

case 2 : 발파공이 직상부를 향하고 있을 경우 (천정부 이방향 천공 발파)

case 3 : 발파공이 직상부로부터 45도 기울어져 있는 경우 (중간부 이방향 천공 발파)

case 4 : 발파공이 직상부로부터 90도 기울어져 있는 경우 (측벽부 이방향 천공 발파)

이상과 같이 2단계 해석을 수행하면 각각의 단계에

서 요소망의 크기, 즉 해석에 필요한 자유도의 수를 최소화 시킬 수 있으므로 효율적이 해석이 가능하게 된다.

3.2 해석모형

그림 3 은 수치해석 제 2단계에서 수행된 요소망의 전체형상이다. 앞서 언급된 바와 같이 제 2단계의 해석을 위해서는 전체 모형에 비해 미소한 천공부분에 대한 해석이 선행되어야 한다. 그림 4 는 발파공 천공을 터널 굴진방향으로 생성시킬 때 case 1 의 요소망을 나타낸 것이며 그림 5 는 case 2 에 사용된 요소망이다. 이 경우는 발파 천공의 하단부가 터널 자유면을 향하고 있다. case 3, 4 에서는 case 2 에서 사용된 요소망과 그 형상은 동일하나 천공의 방향이 터널의 직상부를 기준으로 45도 및 90도 기울어져 있는 것이 차이점이다.

해석에서의 지반물성치는 경암으로 탄성계수 320,000 ton/m², 포아손비 0.21, 단위중량 2.6 ton/m³ 을 사용하였다.

3.3 하중모형

본 해석에서 발파하중은 동가압력 (equivalent pressure) 으로 환산하였으며 이러한 동가 하중대 시간 곡선을 이용하여 발파하중 모형화를 시도하였다.

제 1단계에서는 그림 6 에 나타난 것과 같이 발파 천공 내부에 단위 압력이 작용한다고 가정되었다. 이 가정은 case 1 부터 case 4 에 걸쳐 모두 동일한 크기로 재하되었다.

제 1단계에서 얻어진 단면력은 그림 7 과 같은 시간대 압력분포를 갖는 천이력 (transient force) 로 환산되어 제 2단계의 요소망에 재분배되었다.

3.4 해석결과

제 2단계 해석에서는 기존의 종방향 및 횡방향 천공 발파에 의한 진동 결과치를 상대적으로 비교해 보기 위해서 지표면에서 두 방향의 경로와 발파공 직상부

지표면 지점을 선택하여 시간에 따른 진동속도를 비교 분석하였다.

그림 8 은 파이롯트 터널 직상부에서 시간변화에 따른 각 하중 경우별 속도응답을 나타낸 것이다. 그림으로부터 case 1 (기존공법) 이 다른 경우 (신공법) 보다 최대치가 높게 형성됨을 알 수 있는데 이는 case 1 의 하중분포가 수직방향 기준으로 볼 때 다른 경우보다 더 크기 때문인 것으로 해석될 수 있다.

4. 시험발파에 의한 본 공법의 진동 저감효과 분석

본 공법의 진동저감 효과를 알아보기 위하여 본 연구에서는 유원건설 서울 북부 도시 고속도로 3공구 TBM 확공현장을 시험발파 현장으로 선정하여 기존의 종방향 천공 발파공법과 신공법인 이방향 천공 발파공법의 시험발파를 실시하였다.

본 연구에서 수행한 시험발파는 각각 2회씩 실시되었는데 1회의 경우는 최대 지발당 장약량을 5 kg/delay, 2회의 경우는 3.75 kg/delay 를 최대 지발당 장약량으로 하여 실시되었다. 그림 9 는 최대 지발당 장약량 5 kg/delay 일 때의 측정결과를 나타낸 것으로서 신공법이 기존공법에 비해서 20 - 70 % 정도의 진동 경감효과가 있는 것을 알 수 있다. 그림 10 은 최대 지발당 장약량 3.75 kg/delay 일 때의 측정결과로 이 경우에도 20 - 40 % 정도의 진동 경감효과가 있는 것으로 측정되었다.

5. 심폐기 발파와 파이롯트 터널 이용시의 발파진동 분석

본 연구에서는 발파굴착시 문제가 되고 있는 지반진동의 영향을 알아보기 위해 심폐기 발파시와 파이롯트 터널 굴착후 2개의 자유면이 있는 경우의 발파진동을 측정, 분석하였다.

심폐기 발파와 2개의 자유면이 있는 상태에서의 발파 모식도는 그림 11 과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 심폐기 발파후 2개의 자유면이 있는 상태의 발파는 심폐기 발파로 이미 이루어진 자유면을 이용하므로 지반진동을 많이 경감시킬 수 있을 것으로 판단되므로

이에 대한 현장 측정을 실시하였다.

시험발파의 측정결과는 그림 12 와 같다. 그림으로부터 자유면 수가 발파진동에 미치는 영향은 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 예로써 발파원과 아주 가까운 17 m 거리에서 측정된 결과는 파이롯트 터널에 의한 2 개의 자유면이 있는 경우, 심빼기 발파와 비교할 때 20 % 정도의 진동경감 효과가 있었으며 21 m 에서 측정된 결과는 7 % 정도의 경감효과가 있었다.

6. 결론

본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 TBM 에 의한 파이롯트 터널의 효율성을 극대화한 이방향 천공 발파공법을 개발, 현장실험을 통하여 그 효율성을 입증하였다.
2. NATM 공법에 의한 발파보다 TBM 을 이용하여 파이롯트 터널을 굴착하여 확대발파할 경우 상당한 지반진동 경감효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
3. 이방향 천공 발파공법의 현장시험 결과, 측정된 지반 진동치는 20 % 이상의 진동 경감효과가 있는 것으로 분석되었다.
4. 기존공법과 신공법의 상대비교를 위한 수치해석 결과, 신공법의 방사상 방향 발파는 기존공법의 종방향 발파에 비하여 관심의 대상이 되는 발파공 직상부에서 진동치가 크게 경감되었다.

참 고 문 헌

1. 유원건설주식회사, 한국건설기술연구원, TBM/NATM 병용공법의 효율성 평가연구, 1994. 12.
2. 서울대학교 공학연구소, TBM 과 NATM 병용시공의 타당성에 관한 연구보고서, 1991. 7. 15.
3. 서울특별시, 도시고속도로 (북부간선 3공구) 실시계획 종합보고서, 1991.
4. Pelizza, S., 'Pilot Bore Excavation with TBM for the Design and Construction of Larger Tunnels', Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 6, No. 2, 1991, pp. 185-189.

5. Martin, David, 'TBM Pilot the Way for Twin Track Alpine Railway Tunnel', Tunnels and Tunneling, January, 1988, pp. 22-41.
6. Valliapan, S. and Ang, K. K., 'Finite Element Analysis of Vibrations Induced by Propagating Waves Generated by Tunnel Blasting', Rock Mech. and Rock Engr., Vol. 21, 1988, pp. 53-78.
7. HKS, U.S.A., ABAQUS Manual, 1994.
8. 이찬우, 'TBM 터널을 이용한 이방향 천공 발파공법의 3차원 동적해석', 전산구조공학회 기술기사, 1995. 3.

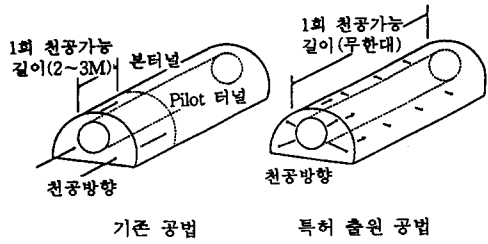


그림 1 기존공법과 신공법의 개념도

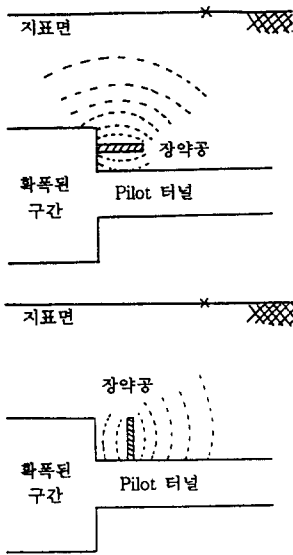


그림 2 종방향과 방사상 방향의 발파진동 전과 양상

Model for stage 2 (transient analysis)

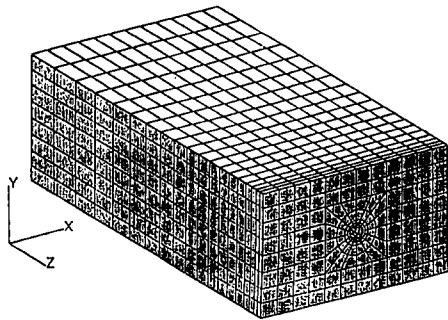


그림 3 제 2 단계 해석시 요소망

Model for Case 1 force (half model view)

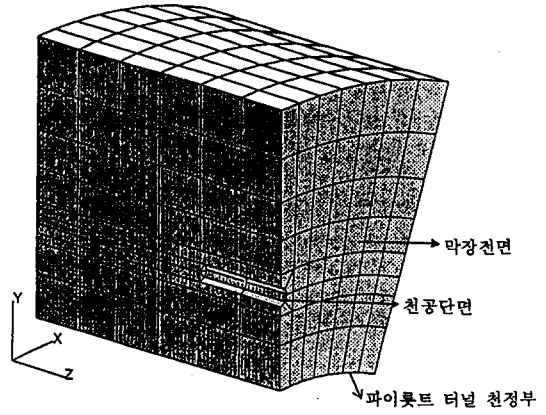


그림 4 제 1 단계 해석시 요소망 (case 1)

Model for Case 2 force (half model view)

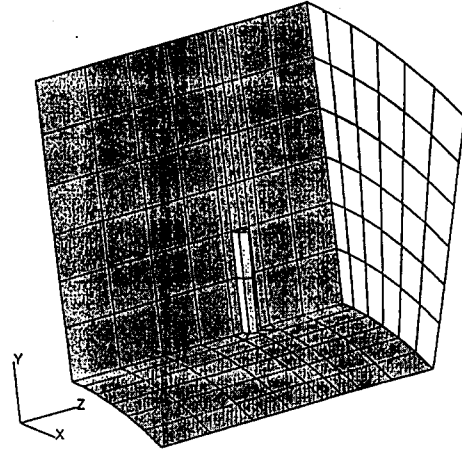


그림 5 제 1 단계 해석시 요소망 (case 2)

Model for Case 1 force (half model view)

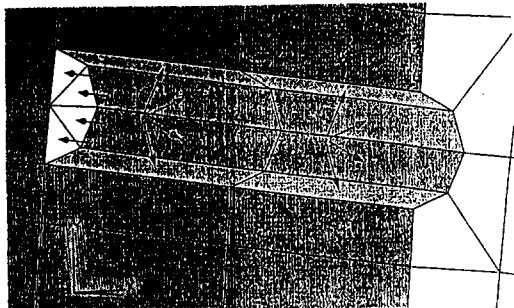


그림 6 제 1 단계 해석시 하중상태 (case 1)

Transient function of blasting force

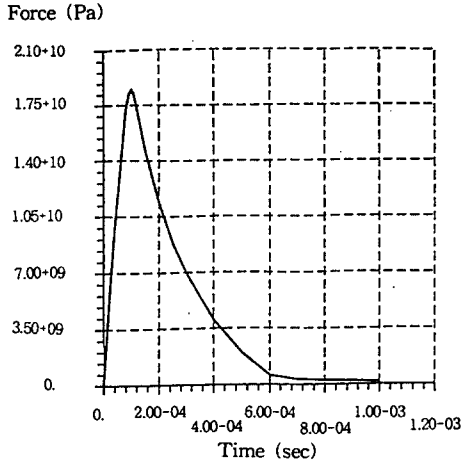


그림 7 시간대 하중곡선

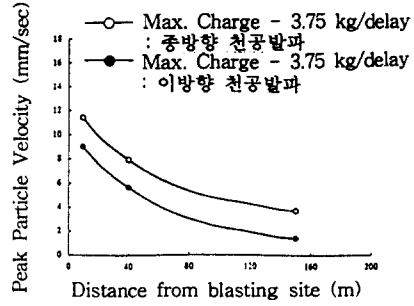


그림 10 현장 지반진동 측정 결과
(최대 지발당 장약량 = 3.75 kg/delay)

- CASE1_Vy_at_Point3
- CASE2_Vy_at_Point3
- ▲ CASE3_Vy_at_Point3
- ◆ CASE4_Vy_at_Point3

CASE 1 : 기존공법

CASE 2, 3, 4 : 신공법

Vy (m/sec)

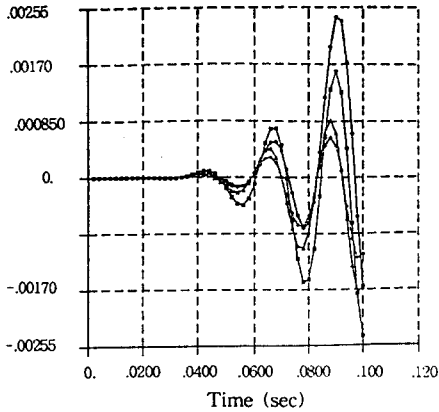


그림 8 직상부에서의 시간에 따른 속도 응답

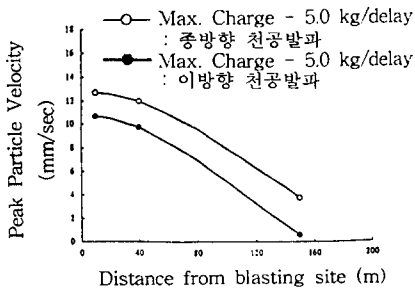
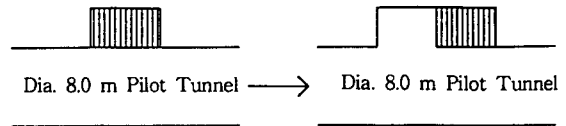


그림 9 현장 지반진동 측정 결과
(최대 지발당 장약량 = 5 kg/delay)



심폐기 발파 2개의 자유면이 있는 상태의 발파

그림 11 심폐기 발파 및 2개의 자유면이 있는 경우의 발파 모식도

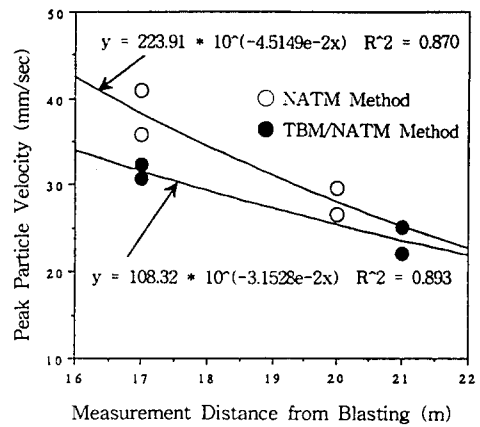


그림 12 심폐기 및 2개의 자유면이 있는 경우의 발파진동 비교