

터널확공시 이방향 병용천공 발파공법의 개발 *Development of New Drill and Blast Method with Two Different Drilling Directions for Pilot Tunnel Enlargement*

배규진^{*1}(Gyu-Jin Bac) 분홍득^{*2}(Hong-Deug Moon) 김정용^{*2}(Chang-Yong Kim) 홍성완^{*3}(Sung-Wan Hong) 이관우^{*4}(Chan-Woo Lee)

- * 1 : 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotech. Div. KICT
- * 2 : 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원, Researcher, Geotech. Div. KICT
- * 3 : 한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원, Fellow, Geotech. Div. KICT
- * 4 : (주) 유원건설 차장, Manager, YOONE Engineering & Const.

SYNOPSIS : This paper presents an evaluation of new drill and blast method with two different drilling directions for pilot tunnel enlargement using numerical experiment and field test. To evaluate the efficiency of new tunnel enlargement method, field tests were performed and compared with conventional drill and blast method. Also, three dimensional transient dynamic analysis was made to investigate the effect of the ground vibration when blasting was performed at same position using the equivalent single hole charge.

1. 서론

최근 터널시공시 많이 적용되고 있는 굴착공법은 발파를 주 굴착방법으로 사용하므로 발파시 발생하는 지반진동의 제어문제가 굴착속도, 발파방법 등을 결정하는 주요관건이 되고 있다. 반면, TBM(Tunnel Boring Machine)과 같은 대형 지반굴착 장비를 이용하여 굴착할 경우에는 지반진동 문제가 적고, 시공속도가 빠르기 때문에 국외뿐 아니라 국내에서도 TBM에 의한 기계굴착 방법을 많이 채택하여 시공하고 있는 실정이다. 그런데 국내에서 시공되고 있는 TBM에 의한 굴착은 직경 3~5 m 정도의 소구경 수로 터널이 대부분으로 단면이 큰 지하철이나 도로터널일 경우에는 TBM에 의한 선도갱(pilot)터널 굴진후 확공하는 소위 TBM/NATM 병용공법을 적용하고 있다.

TBM/NATM 병용공법은 터널 전단면 굴착전에 소구경의 TBM으로 주변 암반을 크게 이완시키지 않으면서 pilot 터널을 굴착하는 방법을 취하고 있으므로 본 굴착전에 지반상태를 조사·분석 및 평가할 수 있는 잇점이 있음과 동시에 큰 진동을 야기시키는 심배기 발파를 배제할 수도 있으므로 발파진동 경감효과를 크게 얻을 수 있는 장점이 있다. 특히, 병용공법은 굴착속도가 매우 빠른 TBM으로 선굴착하는 방법을 이용하므로 확공구간 발파방법 및 굴착단계를 적절히 조절하게 되면 공기 단축효과 또한 크게 얻을

수 있는 장점이 있다. 그러나, 현재 국내 현장에서 적용되고 있는 TBM/NATM 병용공법 적용시의 확폭 발파방법은 굴착단면에서 터널굴진 방향과 동일한 방향으로 천공발파하는 이른바 종방향 천공발파 방법이므로 병용공법이 갖는 진동경감 효과를 제대로 얻기 어려울 뿐만 아니라 공기단축효과 또한 크게 얻기 어려울 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 공기단축 및 발파진동 경감효과를 보다 크게 얻을 수 있도록 TBM에 의해 미리 굴착된 pilot 터널속에서 굴착단면의 반경방향 발파공을 일정거리 이상 미리 천공해 놓은 상태에서 여굴여제를 위해 터널 단면 최외곽부를 터널 굴진방향과 같은 종방향으로 천공하면서 발파를 하는, 소위 이방향 병용천공 발파공법을 고안, 이 공법의 효율성을 평가하였다. 본 연구를 위해서 서울 외곽 도시고속도로 건설 공사중 터널 현장을 시험구간으로 선정하여 기존의 종방향 천공공법과 본 연구에서 제안한 이방향 병용천공 발파공법으로 시험시공을 실시하였다. 또한, 본 연구에서는 이와 같은 이방향 병용천공 발파공법의 현장시험 외에 단일 발파공을 기준으로한 종방향 및 횡방향 천공발파에 따른 지표면에서의 진동영향을 평가하기 위해 3차원 수치해석도 함께 실시하였다.

2. 이방향 병용천공 발파공법

2. 1 TBM/NATM 병용공법의 특징

일반적으로 암반터널 공사시 주 굴착방법으로 사용되는 발파방법은 발파원의 발파압 및 에너지를 암반에 전달하는 과정에서 지반진동을 일으키고 인접한 지역의 구조물이나 진동에 민감한 시설물들에 피해를 끼치는 경우가 있다. 반면, 최근에는 국외 뿐 아니라 국내에서도 지반진동 문제가 적고 시공속도가 빠른 TBM과 같은 대형 굴착기계를 이용한 터널공사가 많이 이루어지고 있다. 그러나, 국내의 경우 TBM에 의한 굴착공법은 터널단면이 원형으로 일정하고, 또한 소규모의 TBM이 많이 도입되어 3~5 m 정도의 소구경 수로 터널공사에 주로 적용되어 왔다. 근래에는 단면이 큰 지하철이나 도로터널공사의 경우에도 TBM을 이용하는 사례가 점차 증가하고 있는 실정이다. 이 때에는 TBM으로 선도갱 터널을 굴착한 후 발파방법으로 확폭하는 이른바 양 굴착법을 병행하는 TBM/NATM 병용공법이 국내외 여러 터널현장에서 적용되고 있다.

이러한 병용공법은 다음 몇가지 점에서 다른 공법과 비교하여 유리한 장점이 있다. 첫째, 굴착이 완료된 pilot 터널내에서 지층 및 지질상태를 파악할 수 있기 때문에 갑작스런 지질 변화에 따른 터널의 안정성 검토를 위해 필요한 경우 각종 현장실험을 수행하여 파악할 수 있으며 이에 대한 적절한 대책을 수립할 수 있다. 둘째, pilot 터널이 터널굴착공사시 환기구 역할을 하므로 보다 양호한 작업 여건하에서 터널공사를 수행할 수 있다. 셋째, pilot 터널이 있는 경우는 심패기 발파사와 비교할 때 pilot 터널이 하나의 자유면의 역할을 하므로 기존 발파방법에 비해 지반진동 경감효과를 얻을 수 있다. 넷째, pilot 터널이 매우 큰 cut hole 역할을 수행하기 때문에 확폭 발파시 천공수와 장약량을 줄일 수 있고 발파 round를 길게 할 수 있기 때문에 터널 굴진속도를 증대시켜 공기 단축 효과를 얻을 수 있다.

그러나, 병용공법은 다음과 같은 몇가지 문제점이 있다. 첫째, TBM 굴진이 가능한 지반조건을 갖는 현장이어야 하며, pilot 터널의 보강작업이 크게 요구되는 연약지반에서는 사용에 제약은 받는다. 둘째, 발파굴착과 기계굴착이 병용되기 때문에 공정 사이클이 복잡해지고 부대설비가 많아져 체계적인 시공수순 정립이 필요하다. 셋째, 기계굴착시 얻어지는 버력과 발파굴착시 얻어지는 버력의 크기가 다르므로 이중의 버력 처리 시스템이 필요하다.

2. 2 이방향 병용천공 발파공법의 개요

TBM/NATM 병용공법은 여러면에서 장점이 있지만 실제로 국내에서는 병용공법 적용시 확폭발파 방법을 터널단면에서 종방향으로 발파공을 천공하여 발파하는 종방향 천공발파 방법으로 시공하고 있으므로 병용공법이 갖고 있는 장점을 최대한 활용하지 못하고 있는 실정이다. 또한, 종방향 천공발파 공법을 적용할 경우에는

- 1) 굴착면의 요철이 심하여 다음 발파공 작업이 어렵고,
- 2) 터널굴진 방향으로의 천공 드릴의 길이가 제한됨으로 1회 굴진장 중대에 한계가 있으며
- 3) 터널굴진 작업시 TBM에 의한 pilot 터널의 잇점을 살리지 못하고 발파공 천공 장약 비력치리의 반복적인 과정을 되풀이 하며
- 4) 종방향 천공발파는 진동 전파특성상 지표에서의 진동치를 크게 하는 역할을 하는 등 몇가지의 문제점들이 있다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하고 보다 경제적인 방법으로 확폭발파 작업을 수행하기 위해 pilot 터널 내부에서 횡방향으로 발파공 천공을 완료한 상태에서 터널의 최외곽 계획단면의 line drilling만을 추가시키는 이른바 이방향 병용천공 발파공법을 제안하게 되었다. 본 연구에서 제안하는 이방향 병용천공 발파공법은 기존의 종방향 천공발파 공법과는 달리 pilot 터널내에서 횡방향으로 천공을 해야 하기 때문에 횡방향 장약공의 굴착각도와 굴착깊이가 정확해야 한다. 따라서 이를 위해서는 횡방향으로의 정밀 발파공 천공이 가능한 천공장비의 개발이 필요하다.

본 공법에서는 터널 최외곽 계획단면에 여굴이 없는 터널 단면을 형성하기 위해 외곽단면에 대해서는 기존의 종방향 천공공법과 같은 방법으로 확폭하도록 하였다. 그림 1은 기존의 종방향 천공 발파 공법의 일반적인 발파 패턴도이며 그림 2는 본 연구에서 제안한 이방향 병용천공 발파공법의 대표적인 발파 패턴도를 나타낸 것이다. 그림 2(a), (b)는 TYPE A, TYPE B의 횡방향 천공과정을 보여주고 있고, (c)는 pilot 터널벽면에서 TYPE A, B를 교대로 천공하는 과정을 나타낸다. 이 때, 공간거리(D) 및 컷소 저항선(W)은 암반상태 및 터널형상에 따라 달라질 수 있지만, 일반적으로 벤치컷의 발파에 적용하는 $L = C \times D \times W \times \ell$ (L : 장약량 kg, C : 폭파계수, D : 공간거리 m, W : 저항거리 m, ℓ : 천공장 m)식을 적용하여 공간거리와 저항거리를 구하였으며 격자형태로 교대로 천공하는 Type A 중간에 TYPE B 발파공을 천공하였다.

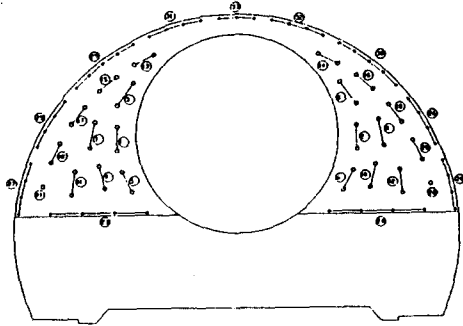
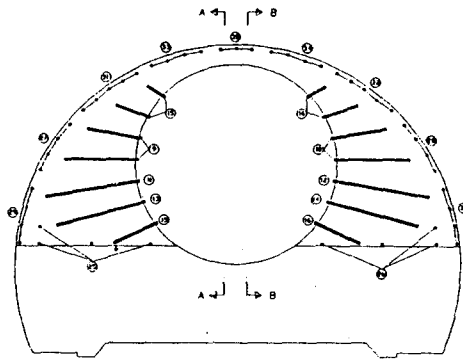
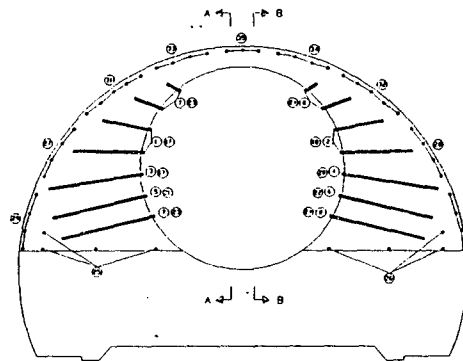


그림 1. 기존 종방향 천공발파 패턴도



(a) Type A



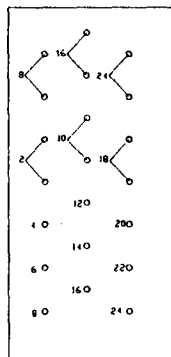
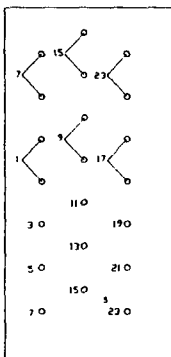
(b) Type B

SECTION A-A

SECTION B-B

TYPE-A TYPE-B TYPE-A

TYPE-A TYPE-B TYPE-A



(c) 횡방향 천공 상세도

그림 2. 이방향 병용 천공발파 패턴도

이와 같은 이방향 병용천공 발파공법은

- 1) 발파후 굴착전단면이 평탄하고,
- 2) 사전 횡방향 발파공이 모두 천공된 상태에서 굴착단면 최외곽부만 종방향으로 천공, 장약, 발파함으로써 발파공 천공에 소요되는 시간을 줄일 수 있으며,
- 3) 발파후 버력이 굴착면으로부터 멀리 비산하므로 굴착면 하부의 발파가 용이하여 작업시간을 단축시킬 수 있으며,
- 4) 발파진동의 전과 특성상 횡방향 천공발파시 지표에서의 지반진동치는 상당한 경감효과를 가져올 수 있는 공법이며, 공사기간이나 공사비를 절감시킬 수 있는 공법이다.

따라서 이방향 병용천공 발파공법은 이를 위해 개발된 횡방향 천공장비와 함께 천공장비가 들어가서 작업할 수 있는 선진도강터널이 있는 모든 터널현장에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 현장시험에 의한 효용성 평가

3. 1 계측 현장 개요

3. 1. 1 계측 현장 지역의 지형 및 지질

본 측정대상 지역은 서울 외곽 도시고속도로망 건설사업의 일환인 북부간선의 일부구간으로 기존 북악터널로부터 약 200 ~ 400 m 정도 남쪽에 동서방향으로 계획중인 터널시공 현장이다. 이 구간은 터널길이가 1,657 m이고 한 방향의 폭이 13 m인 편도 3차선 도로건설현장이며, pilot 터널을 굴착한 후 나머지 부분은 화공발파함으로써 완공되는 쌍굴터널 구간이다.

본 지역의 지질은 경기육괴에 해당하는 중생대 쥐라기(Mesozoic Jurassic period)의 대보화강암(Daebo Granite)을 기반암으로 하고 있고 풍화대와 표토 및 매립토층 등이 피복하고 있는 단순한 지층 구조를 보여주고 있다. 이 지역의 기반암인 화강암은 일명 서울화강암(Seoul Granite)이라고 불리며, 풍화정도에 따라서 풍화암, 연암, 경암층으로 분류할 수 있고, 일축압축 강도의 범위가 (650) ~ 1,250 kg/cm² 정도이다. 특히, TBM의 굴착 및 확폭이 이루어지는 구간은 일축압축강도 1,200 kg/cm² 이상되는 매우 강한 경암층으로 이루어져 있다.

3. 1. 2 터널공사 개요

본 현장의 시공순서는 쌍굴터널 중 한쪽을 직경 8.0 m의 TBM으로 pilot 터널을 선굴착한 후 반대편에 있는 터널을 직경 6.5 m의 TBM으로 굴착해 들어가도록 계획되었고, TBM 굴착이 끝난후 양쪽방향에서 동시에 확폭발파하는 방법으로 최종단면을 형성하도록 계획되어 있다. 본 현장의 대표적인 설계 단면도를 그림 3에 나타내었는데 그림에서 알 수 있는 바와 같이 먼저 TBM으로 터널면의 상단부를 먼저 선굴착한 후 나머지 부분을 확폭발파하는 방법으로 계획되어 있다.

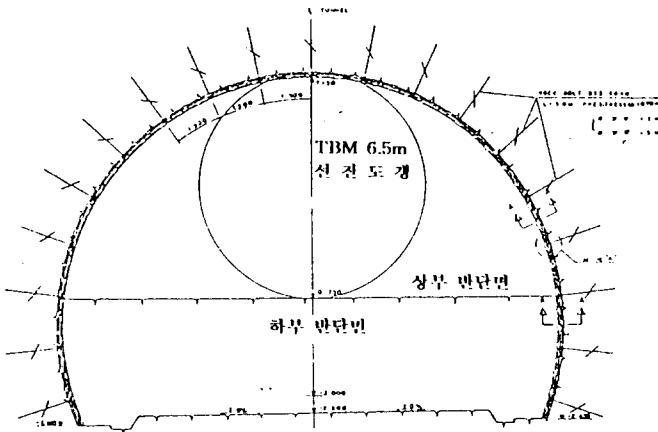


그림 3. 터널 설계 단면도

3.2 측정방법

이방향 병용천공 발파방법의 정량적 효용성 파악을 위해 실시한 현장시험은 6.5 m TBM으로 선 굴착된 터널에서 설계 최종단면까지 발파방법으로 확폭하는 지점에서 이루어졌는데 기존의 확공발파 방법과 병행시공하면서 수행되었다. 먼저 2 막장을 이방향 병용천공방법으로 시험발파한 후 곧바로 기존의 종방향 천공방법으로 시험발파하여 동일한 지반조건에서 시험이 이루어지도록 하였다.

본 연구에서는 시험시공을 통하여 발파지점으로부터 일정거리 떨어진 지점에서의 발파진동 측정과 발파단면의 여굴량 및 발파단면의 평탄성을 관찰하였고 발파시 버력의 비산 정도 등도 현장에서 직접 관찰하였다.

시험 발파시의 지반진동은 발파지점으로부터 15 m, 43 m 떨어진 인접터널의 두지점과 약 152 m 정도 떨어진 지표면에서 각각 측정되었다. 인접 터널 내부에서는 진동 전파 특성을 고려하여 지표면에서와 같은 조건의 발파공 방향이 놓여지는 위치에서 지반진동을 측정하였다. 즉, 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 종방향 천

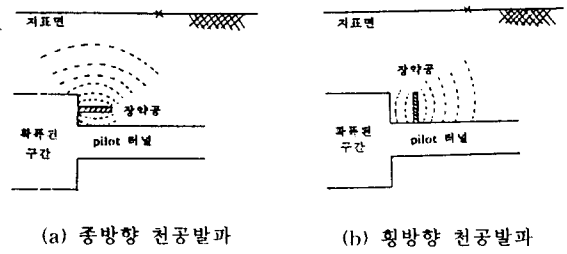


그림 4. 종방향 및 횡방향 발파진동 전파 양상

공 발파의 경우 장약공의 전체길이에 걸쳐 발파진동이 지표면으로 전파되는 반면 횡방향 천공발파의 경우는 장약공의 길이방향을 통해 지표면으로 전파될 것이며 터널굴진방향으로 더 큰 크기의 진동이 전파될 것으로 판단된다. 따라서, 인접 터널 내부에서도 횡방향으로 천공, 발파할 때 지표면의 경우와 같이 장약공의 끝을 통해 지반진동이 전파될 것으로 판단하여 발파지점으로부터 15 m, 43 m 떨어진 지점에 측정위치를 설정하였다.

3.3 현장 측정결과 분석

3.3.1 지반진동 측정결과

본 연구에서 수행한 시험발파는 각각 2회씩 실시되었는데 제 1회의 경우는 최대 지발당 장약량을 5 kg/delay로, 2회의 경우는 3.75 kg/delay를 최대 지발당 장약량으로 하여 실시되었다.

그림 5는 최대지발당 장약량 5 kg/delay일 때의 측정결과를 나타낸 것인데 그림에서 알 수 있는 바와 같이 이방향 병용천공 발파일 때가 종래의 종방향 천공발파의 경우보다 20 ~ 70 % 정도의 진동경감 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 그림 6은 최대지발당 장약량 3.75 kg/delay일 때의 측정결과로 이 경우에도 20 ~ 40 % 정도의 진동경감 효과가 있는 것으로 측정되었다. 특히, 본 측정에서는 152 m 지점의 지표면에서 측정된 경우 40 ~ 70 % 정도의 큰 진동경감 효과를 보였는데 이는 발파지점으로부터 상당히 먼 거리인 152 m 위치에서 측정하였고, 또한 진동 측정시 발생할 수 있는 측정오차 등을 감안한다 하더라도 최소한 20 % 이상의 진동경감 효과는 있을 것이라고 판단된다.

3.3.2 여굴량

발파진동의 측정외에도 발파 후 굴착단면의 여굴량을 관찰하였는데 시험시공 현장의 경우는 종방향 및 이방향 병용 천

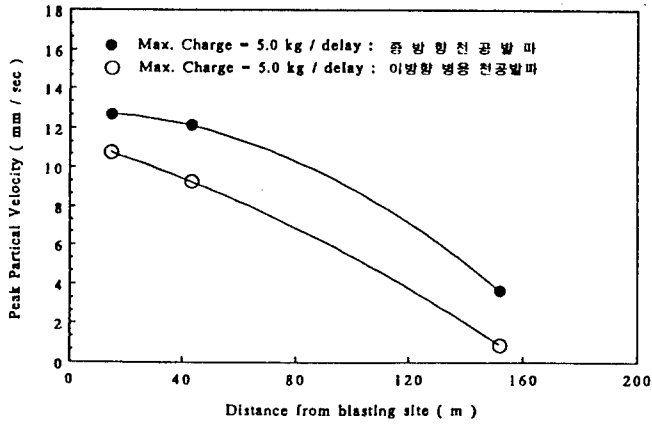


그림 5. 현장 지반진동 측정 결과
(최대 지발당 장약량 = 5 kg/delay)

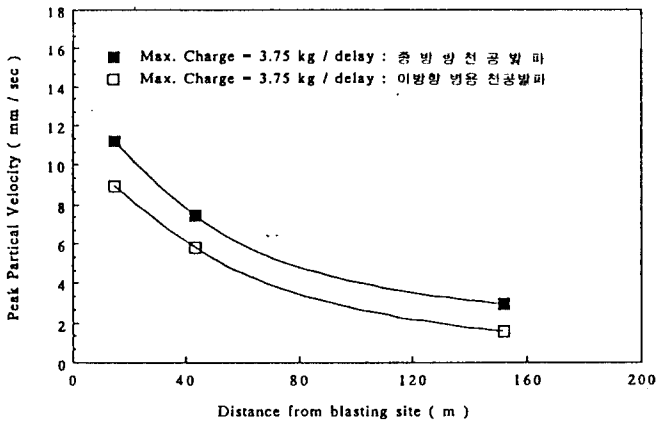


그림 6. 현장 지반진동 측정 결과
(최대 지발당 장약량 = 3.75 kg/delay)

공 발파방법 모두 여굴량이 거의 없는 평탄한 단면으로 굴착이 되었다. 이것은 두 방법 모두 궁극적으로 굴착터널 최외곽부의 단면을 정밀폭약을 사용한 Smooth blasting으로 발파한 점과 시험시공한 지점의 경우 절리가 거의 없는 일축 압축 강도 1200 kg/cm² 이상의 강한 경암지역인 압박상태가 좋은 곳에서 발파를 실시하였기 때문에 두 경우 모두 여굴량이 거의 없는 매끈한 상태로 발파되었다.

3. 3. 3 발파후의 버력

압박 발파시 발파로 인한 버력은 굴착면 바로 밑에 떨어지는 것과 멀리까지 비산하여 떨어지는 것이 있는데 본 시험발파에서 관찰한 결과 이방향 병용천공 발파의 경우는 기존의 종방향 발파방법보다 버력이 더 멀리까지 비산하여 떨어지는 것으로

나타났다. 이러한 사실은 발파효율과도 관련이 있는데 굴착단면 하부의 경우 일반적으로 한번 발파로 굴착이 어려워 두번의 발파로 굴착하는 경우가 종종 발생한다. 따라서, 본 연구에서 제안한 이방향 병용천공 발파방법을 적용하면 발파시 버력이 비교적 멀리까지 비산하므로 굴착단면 하부의 발파에 효과적인 것이라 판단된다.

3. 3. 4 종방향 및 이방향 병용천공 발파방법의 비교

전술한 시험발파의 분석 결과 이외에 발파후 굴착면의 형상, 발파공의 천공작업, 1회 굴진장 변경 및 경제성, 시공성 등의 두가지 확공발파 방법의 특징을 종합적으로 분석하여 표 1에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 이방향 병용 천공방법은 기존의 종방향 발파방법에 비해 발파후의 굴착면 형상이 평탄하며 또한 pilot 터널내에서 미리 일정구간 이상 다른 시공 공정에 차질을 주지 않으면서 발파공 천공작업을 실시할 수 있으므로 작업공기를 단축시키는 효과가 있다.

그 외 발파진동의 경감효과도 20% 이상 얻을 수 있으며 발파시 버력도 기존의 종방향 발파방법에 비해 멀리까지 나아가 쌓이므로 굴착단면 하부의 발파효율을 높일 수 있는 효과도 있다. 또한 주택지 인근지역에서의 터널 굴착작업시 발파진동의 영향으로 1회 굴진장을 중대시키면서 굴착하고자 할 때 진동규제치에 저촉되어 어려운 경우가 종종 있다. 이 때 이방향 병용천공 방법을 적용하면 지표면에서의 발파진동을 경감시킬 수 있으므로 이에 상응하는 굴진장을 중대시켜 굴착할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 수치해석에 의한 효용성 평가

본 장에서는 본 공법의 타당성을 검증하기 위한 목적으로 기존 종방향 천공발파 방법과 이방향 천공발파방법에 대한 동탄성 지붕 해석을 수행하여 두 방법에 의한 지표면에서의 지반진동치를 비교해 보았다.

4. 1 해석 프로그램 개요

본 터널의 동적거동 해석에 사용된 프로그램은 미국 HKS사가 개발한 ABAQUS로서 현재 상용화된 비선형 프로그램 중 성능과 신뢰도면에서 뛰어난 프로그램의 하나로서 평가받고 있다. 본 프로그램은 재료특성을 모델링하기 위하여 프로그램 내부

표 1 종방향 및 이방향 병용 천공발파 공법의 비교

| 비교항목 | 비 교 내 용 | |
|----------------|--|--|
| | 종방향 천공발파공법 | 이방향 병용 천공발파 공법 |
| 발 파 후 굴착면의 형 상 | <ul style="list-style-type: none"> 굴착단면 외곽부는 정밀폭약을 사용하므로 굴착면의 이끝이 거의 없다. 대부분의 굴착단면은 위력이 큰 폭약을 종방향으로 천공발파하기 때문에 굴착면의 요철이 심하여 다음의 발파공 굴착시 어려움이 많다. | <ul style="list-style-type: none"> 굴착단면 외곽부는 종방향 천공 발파방법과 동일하다. 횡방향으로 천공발파하므로 발파후의 굴착단면이 평탄하다. |
| 발 파 공 천공작업 | <ul style="list-style-type: none"> 전단면을 터널 굴진 방향으로 천공한 후 강약을 하고 발파하는 시공수순을 계속적으로 반복한다. | <ul style="list-style-type: none"> 선진도갱내에서 횡방향으로 사선에 천공을 한 상태에서 굴착단면 외곽부만 종방향으로 천공, 강약, 발파하는 순서로 시공하므로 발파공 천공에 소요되는 시간을 내뚝 줄일수 있다. |
| 발파진동영 향 | <ul style="list-style-type: none"> 종방향 및 이방향 병용천공 발파방법 적용시의 지표면에서의 지반진동의 크기는 이방향 병용 천공발파 공법의 경우가 간경경간 효과기 있다. | <ul style="list-style-type: none"> 발파후의 비력은 굴착면으로부터 상당히 멀리까지 미신하므로 굴착면 하부의 발파가 용이하다. |
| 비려처리작 업 | <ul style="list-style-type: none"> 발파된 비려이 굴착면 바로 앞에 쌓이므로 굴착면 하부의 발파시 지형요인으로 작용할 수 있다. | <ul style="list-style-type: none"> 암반상태가 양호한 경우 1회 굴진장을 발파진동 허용기준치 범위내에서는 최대한 증대시켜 굴착할 수 있다. |
| 굴진장중대에 의 적용 | <ul style="list-style-type: none"> 1회 굴진장을 증대시키기 위해서는 다양한 크기의 드릴 룯트가 필요하며 최대 굴진장의 크기에 한계가 있다. | <ul style="list-style-type: none"> Jumbo Drill의 효율성을 극대화하여 임대기간을 줄일 수 있다. 인접지반의 이완영역이 감소하고 비려처리가 용이하여 굴진장을 증대시킬 수 있다. 사전 천공작업이 가능하여 작업시간을 단축시킬수 있다. |
| 경 제 성 | <ul style="list-style-type: none"> 장대터널의 경우 기존의 NATM 공법에 비해 경제성이 있으나 TBM Pilot의 잇점을 충분히 살리지 못한다. | <ul style="list-style-type: none"> 기존의 Jumbo Drill에 전자 제어장치를 부착함으로써 정밀시공을 할 수 있으며 터널벽면에 천공위치를 표시할 필요가 없는 등 작업공정이 단순하다. |
| 시 공 성 | <ul style="list-style-type: none"> 시공에 별 어려움은 없으나 기존 굴착장비를 이용할 경우 정밀시공이 되지 않는 등 문제점이 있다. | <ul style="list-style-type: none"> 기존의 Jumbo Drill에 전자 제어장치를 부착함으로써 정밀시공을 할 수 있으며 터널벽면에 천공위치를 표시할 필요가 없는 등 작업공정이 단순하다. |

에 Von Mises 및 Tresca 항복조건을 비롯해서 지반문제 해석에 필수적인 Mohr-Coulomb 및 Drucker-Prager 파괴조건식을 포함하고 있다. 이러한 소성조건들 외에도 지반의 시간에 따른 추가용력 변화의 해석을 가능하게 해주는 점탄성(visco elasticity) 및 점소성(visco-plasticity) 조건들이 내장되어 있다. 이들 비선형 문제를 지하수(Ground water) 문제와 연관시켜 coupled analysis를 할 수 있다. 특히, 동적해석 기능으로는 기초적인 eigen value analysis로부터 선형문제에 사용되는 modal transient analysis 및 비선형 해석에 사용되는 direct time integration 방법들을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 direct time integration 방법을 사용하였다. 수치적분 방법으로는 implicit method로서 Wilson Theta method를 사용하였다.

4. 2 해석 방법

본 해석의 목적은 실제 터널거동의 규명보다는 기존 종방향 천공발파 방법과 이방향 병용천공 발파방법의 효율성을 비교·검증하는데 중점을 두었으므로 해석을 보다 신속하고 원할하게 하기 위하여 다음 두가지의 해석범위를 설정하였다. 첫째, 해석자체는 선형 동탄성(linear transient dynamics)의 범위내에서 수행한다. 둘째, 암반물성은 균질(homogeneous), 등방(isotropic)성의 경암으로 이용하였다. 발파시 사용된 발파공 크기는 직경이 42 mm, 길이가 1 m로 가정하였다. 그리고, 요소망 구성을 위한 지반 전체

의 체적은 폭 108 m, 높이 68 m, 길이 200 m로 구성하였다. 따라서, 발파천공의 체적은 지반 전체 체적에 비하여 매우 미소한 부분에 해당된다. 이와같은 미소부분을 고려하여 요소망을 생성시키면 정밀한 해석을 위하여 수만개에 이르는 엄청난 숫자의 요소를 필요로 하게 된다. 또한 본 해석의 목적이 발파진동 분석에 있으므로 요소의 형상에 매우 세심한 주의를 요하게 된다. 파의 전달(wave propagation)문제에서는 각각 요소들의 형상에 따라 그 결과가 매우 민감하게 반응하기 때문이다. 이러한 문제들을 검토하면 발파 천공 부분을 요소망에 고려할 때 계산시간과 비용면에서 현실적인 어려움이 발생한다.

위에서 언급된 문제들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 해석 절차를 다음의 두단계로 나누어 수행하였다.

1. 제 1 단계 : 발파공 주위의 미소부분을 확대하여 이 부분의 정밀해석을 각 하중의 경우에 대하여 수행한다.
2. 제 2 단계 : 1단계에서 구해진 결과들을 토대로 이를 전체 요소망에 재분배시켜 해석을 수행한다.

4. 3 해석모델

그림 7은 제 2 단계에서 수행된 요소망의 전체 형상이다. 요소망의 경계면에서의 파의 반사를 방지하기 위하여 대칭모델을 사용하지 않고 전체 체적을 그대로 사용하여 요소망을 형성하였다.

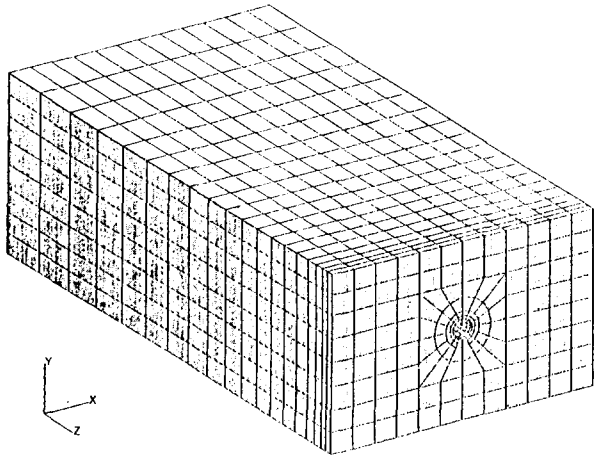


그림 7. 제 2 단계 해석시 유한요소망

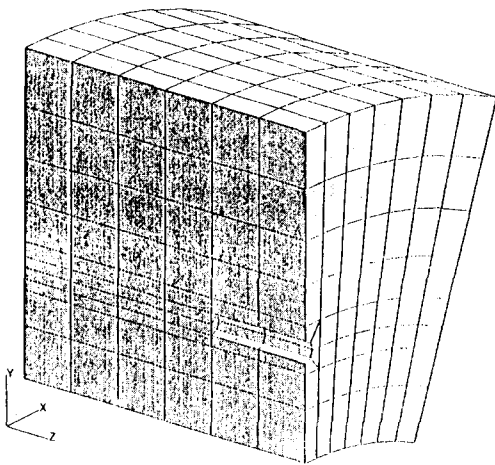


그림 8. 제 1 단계 해석시 유한요소망 (종방향)

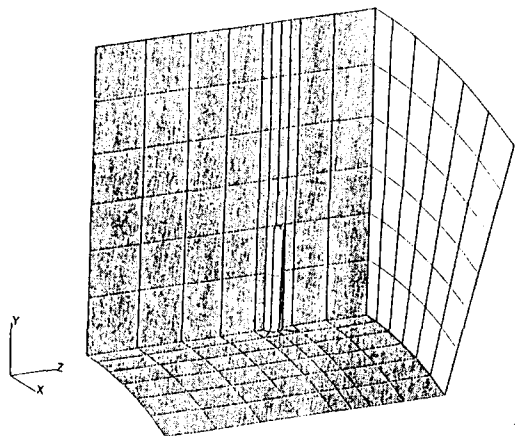


그림 9. 제 1 단계 해석시 유한요소망 (횡방향)

앞 절에서 언급된 바와 같이 제 2 단계의 해석을 위하여는 발파 천공부분의 미소부분에 대한 해석이 선행되어야 한다. 그림 8은 종방향 발파천공을 나타낸 것이다. 그림에서는 이해를 돕기 위하여 대칭면 기준 우측 체적에 대하여만 요소망을 나타내었으나 이 해석의 결과가 제 2 단계에서 전체 요소망에 재분배 되어야 하기 때문에 실제로는 그림에 나타난 체적의 2배의 체적에 해당하는 부분에 걸쳐 요소망을 생성하였다. 그림 9는 횡방향 천공시 사용된 요소망이다. 이 경우는 발파 천공의 하단부가 터널 자유면을 향하고 있다.

해석에 사용된 지반물성은 탄성계수 : 100 kg/cm^2 , 포아손비 : 0.21, 단위중량 : 2.6 ton/m^3 이다.

4. 4 하중조건

Valliappan & Ang(1988)에 의하면 발파 모델링에 있어서 가장 중요한 것은 공내에 작용하는 발파하중 및 시간관계를 정확히 설정하는 것으로서, 각 발파공에 작용하는 압력을 폭약의 재하 밀도(ρ_F), 지반탄성계수(E), 지반단위중량(ρ), 폭약의 속도(D)의 함수로 만든 Brown 공식을 적용하여 각공에 작용하는 압력을 한 공에 등가의 압력(equivalent pressure)으로 환산하였으며 이러한 등가하중대 시간곡선을 이용하여 발파 모델링을 하고 있다.

본 연구에서는 위와 같은 방법으로 종방향 및 횡방향의 하나의 장약공에 등가하중대 시간곡선을 적용하여 발파 모델링을 수행하였다. 그러나, 본 연구에서는 종방향 및 횡방향 발파공법의 상대적 비교분석을 경제적이고, 효율적으로 수행하기 위해서 하중과 시간을 되도록 단순화하여 해석하였다. 제 1 단계에서는 발파공 내부에 균일하게 단위 압력이 작용한다고 가정되었다. 이 가정은 종방향, 횡방향 모두 동일한 크기로 재하되었다.

제 1 단계에서 얻어진 단면력은 같은 시간대의 하중분포를 갖는 transient force로 환산되어 제 2 단계의 요소망에 재분배되었다. 그림 10에서 나타난 바와 같이 발파력은 최초 발파 개시후 1초 지난 시점에서 최대값을 갖는다고 가정되었다. 동적 해석은 그림 10의 곡선중 3초까지 해석되었으며, 시간중분(Δt)에는 0.05초가 사용되었다. 즉, 전체 동적 해석 시간에 사용된 time step수는 60이다.

4. 5 해석결과

본 해석에서는 기존의 종방향 및 횡방향 천공발파에 의한

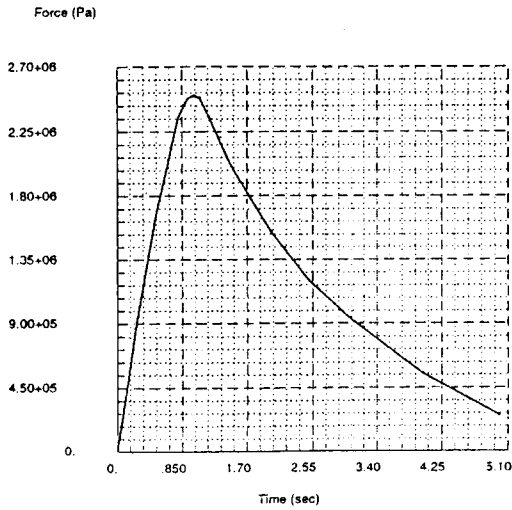


그림 10. 발파하중 대 시간 곡선

진동결과치를 상대적으로 비교해 보기 위해서 지표면에서 2 방향의 경로와 발파공 직상부 지표면 지점을 선택하여 시간변화에 따른 속도변화 및 일정시간에서의 거리별 진동결과치를 비교 분석해 보았다. 그림 11은 해석시 시간에 따른 동적거동 특성을 파악하기 위해 사용된 경로들이다. Path 1은 직상부를 중심으로 횡방향으로 존재하는 절점들로 이루어지며, Path 2는 종방향 절점들로 이루어져 있다. A점은 발파천공 선단의 직상부에 위치한 점이다.

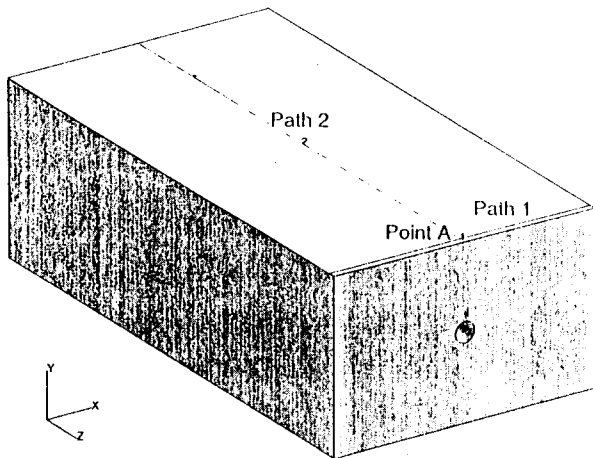


그림 11. 지표면에서의 지반진동 분석위치

4. 5. 1 터널 직상부의 진동결과(A지점)

그림 12는 발파천공 직상부에 위치한 A점에서의 기존 종방향 및 횡방향 천공공법의 진동속도치를 비교한 그림이다. 지

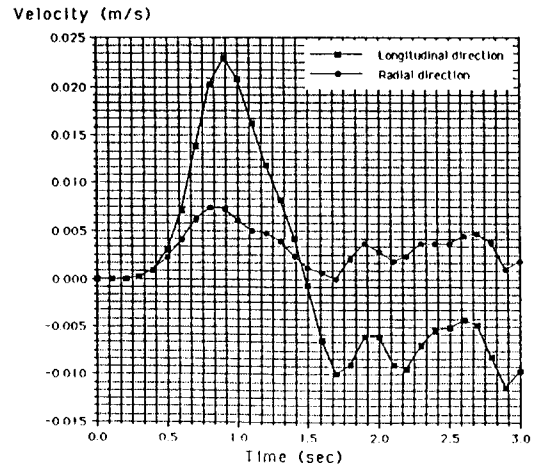


그림 12. A 지점에서의 시간변화에 따른 속도응답곡선

표면에 도달된 Y방향의 속도치를 비교해보면 기존 종방향 천공공법은 약 22.8 mm/sec이고, 횡방향 천공공법은 약 7.0 mm/sec 정도로 종방향 천공공법이 약 3배 정도 큰 진동치를 보였다. 이는 종방향 및 횡방향 전파 특성상 파가 망약면으로부터 터원형태로 전파되기 때문인것으로 생각된다. 특히 이러한 횡방향의 진동감감 효과는 발파하중이 암반에 전달되는 시점에서 최대가 되고 그 진 후로는 점차 감소되는 경향을 볼 수 있었다.

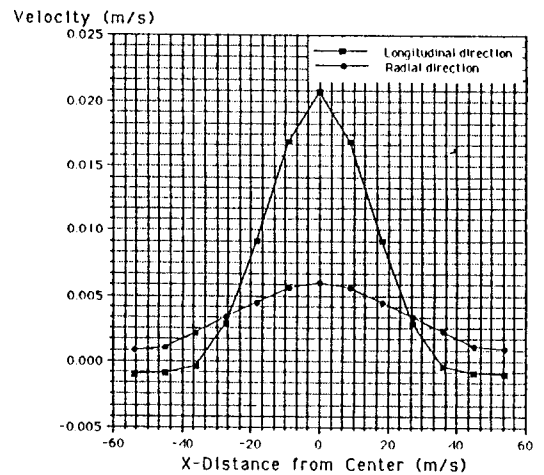


그림 13. t=1.0 일 때의 Path 1에서의 속도응답곡선

4. 5. 2 터널 직상부의 횡방향 진동결과(Path 1)

그림 13은 터널 직상부의 횡방향 진동결과를 t=1.0 일

때 Path 1 절점들에서 거리별로 측정한 결과들이다. 역시 Y방향의 속도치로서 기존 종방향과 횡방향 모두 터널 직상부에서 가장 큰 값을 보였고, 그 값은 종방향의 경우 약 21 mm/sec, 횡방향의 경우 6 mm/sec로 약 4배 정도 종방향의 경우가 크게 나타났다. 그리고 터널 직상부를 중심으로 좌우로 약 30 m되는 지점들까지는 종방향 진동치가 크게 나타났지만, 30 m를 넘어서는 지점부터는 횡방향 진동치가 약간 크게 나타났다. 그러나 이 지점들에서의 진동치는 아주 적게 나타나고, 실제로 진동 피해를 줄 수 있는 부분이 터널 직상부임을 감안한다면 본 횡방향공법 적용시 주변 지표구조물을 고려한 공법설계가 필요하다는 점을 숙지시켜주는 결과이다.

4. 5. 3 터널 직상부의 종방향 진동결과(Path 2)

그림 14는 터널 직상부의 종방향 진동결과를 t=1.0 일때 Path 2 절점중에서 거리별로 측정한 결과이다. 기존 종방향 결과

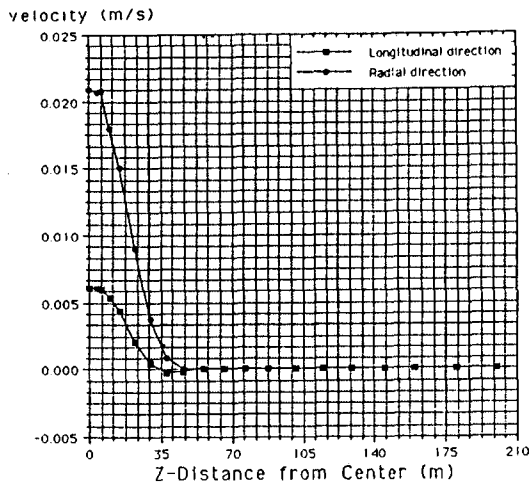


그림 14. t=1.0 일 때의 Path 2에서의 속도응답곡선

가 횡방향 결과보다 크게 나타났고, 약 4배 정도의 차이를 보였다. 발파지점으로부터 터널 길이방향으로 약 (X) m되는 지점부터는 진동속도가 감지되지 않았다. 특히 종방향으로의 거리별 수치가 급격히 감소하고 상대적으로 횡방향 진동결과는 완만한 감소곡선을 이루고 있음을 알 수 있었다. 이는 횡방향 천공공법이 종방향 천공공법에 비해서 지표면에서의 진동치는 거리별로 보면 그 편차가 적게 나타남을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 이방향 병용천공 발파방법의 효용성을 분석하기 위하여 터널현장에서 현장시험을 실시하였으며 이를 기존의 종방향 확폭 발파 방법과 비교 분석하였다. 또한 종방향 및 횡방향 천공발파에 따른 지표면에서의 지반진동의 영향을 알아보기 위해 3차원 수치해석을 실시하였다. 이와 같은 현장 시험발파 및 수치해석 결과로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 기존의 종방향 천공발파 방법과 달리 pilot 터널내에서 횡방향의 발파공을 미리 천공하여 통상의 발파공 천공에 소요되는 작업시간을 단축시킬 수 있는 새로운 터널 확폭 발파방법인 이방향 병용천공 발파방법을 제안하였다.
- 2) 이방향 병용천공 발파공법의 현장시험 결과, 측정된 지반진동치는 약 20% 이상의 진동감감 효과가 있는 것으로 분석되었다. 또한 발파후 관찰한 터널 최외곽 단면부는 종방향 발파공법과 같이 여굴이 거의 없는 상태였으며, 비록은 터널굴착면으로부터 상당히 멀리까지 비산하므로 터널 하반부의 발파시 효과적인 것으로 판단되었다.
- 3) 기존 종방향 천공발파 방법과 횡방향 천공발파 방법의 상대적 비교를 위한 3차원 동적 거동해석 결과, 횡방향에 비해서 기존 종방향의 경우 진동치가 특정 지역에서는 크게 나타나고, 특히 관심의 대상이 되는 발파공 직상부에서 이러한 결과는 두드러지게 나타난다. 후속 연구과제로서 현실적인 발파특성 자료를 이용한 해석이 추가적으로 요구되어진다.
- 4) 이방향 병용천공 발파방법은 pilot 터널내에서 횡방향 발파공 천공을 위한 천공장비의 개발이 필수적이며 이에 대한 지속적인 연구개발이 필요하다.

참 고 문 헌

1. Atlas Powder Company, (1987) Explosives and Rock Blasting, (632 p).
2. Dowding, C. H., (1985) Blast Vibration Monitoring and Control, Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, NJ 07632, 297 p.
3. Swoboda, G., Zenz, G. (1988) "Practical Considerations of Blast

Loading in Tunnelling using Numerical Modelling", Num., Meth., Geomech., (Innsbruck), pp 1681-1688.

4. Valliappan, S. & Ang, K. K., (1988) "Finite Elements Analysis of Vibrations Induced by Propagating Waves Generated by Tunnel Blasting", Rock Mech. and Rock Engng. Vol. 21, pp 53-78.
5. Valliappan, S. and Ang, K. K., (1988) "Numerical Modelling of Tunnels Blasting", Numerical Methods in Geomechanics, Balkema, Rotterdam, pp 145-154.
6. 서울특별시, (1991) 도시고속도로(북부간선 3공구) 실시설계 종합 보고서.