

TBM 터널을 이용한 이방향 천공 발파공법의 3차원 동적해석

Three Dimensional Dynamic Analysis of Newly Developed Drill and Blast Method with Bi-directions using TBM Pilot Tunnels

이 찬 우*
Lee, Chan-Woo

1. 서 론

현재 국내외적으로 이용되고 있는 터널 굴착방법에는 TBM 등을 이용한 기계 굴착공법, 폭약을 이용한 NATM 굴착공법, 기계굴착과 폭약굴착을 병행하는 TBM/NATM 병용공법 등이 있다.

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

그러나 여태까지 국내외 TBM/NATM 병용공법 적용시의 확폭 발파방법은 기존의 NATM 공법에서와 같이 굴착단면에서 터널굴진 방향과 동일한 방향으로 천공 발파하는 방법을 답습하므로

써 기 존재하는 TBM 파이롯트 터널의 효율성을 극대화하지 못하였다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 파이롯트 터널 벽면상에 방사상 방향으로의 사전 천공 개념을 도입할 수 있으며, 이 경우 최중면의 여굴이 우려되는 바 이를 방지하기 위하여 최외각면에 한하여 터널길이 방향으로의 천공을 추가하는 발파개념, 이른바 이방향 천공 발파공법의 도입을 생각할 수 있다.

당사가 국내 및 유럽지역에 특허출원한 이방향 천공 발파공법은 대규모 터널을 시공할 경우 1차적으로 TBM을 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 가능케하며 천공수가 감소하므로 직접 공사비의 절약 뿐 아니라 문제되는 터널 직상부 지표면의 진동도 감소할 것으로 예상된다.

그러나 본 공법을 적용하여 실시공을 하기 앞서

* 유원건설 지하공간팀장 차장, 공학박사

TBM에 의한 파이롯트 터널이 존재했을 때, 발파공의 천공방향에 따른 지표면에서의 지반 응답 차이를 확인하는 것이 요구되므로 컴퓨터를 이용한 구조해석이 선행되어야 하며 본 공법의 특성상 3차원 발파 진동해석이 필요하다.

본 공법의 효용성을 평가하기 위한 3차원 발파 진동해석에 있어서 실제의 정밀한 해를 얻기 위해서는 발파패턴상의 모든 발파공을 하나하나 모형화하여 하중조건으로 적용하는 것이 필요하나, 해석목적상 동일 지반조건일 때의 발파공 천공방향에 따른 상대적인 지반응답 차이를 알아보기 위한 것이므로 대표적인 단일 발파공에 대하여 해석을 실시하더라도 기존공법과의 비교를 위한 소기의 성과를 얻을 수 있으리라 판단된다.

2. 이방향 천공 발파공법의 개발

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

- 1) 터널 막장 굴착면의 요철이 심하여 다음 발파공의 정확한 천공이 어렵고,
- 2) 터널굴진 작업시 TBM에 의한 파이롯트 터널의 잇점을 최대한 살리지 못하고 발파공 천공-장막-버럭처리의 반복적인 과정을 되풀이 하며,
- 3) 종방향 천공 발파는 진동 전파특성상 통상적으로 문제시 되는 터널 직상부 지표면에서의 진동치를 크게하는 등 몇가지의 문제점을 내포하고 있다.

따라서 당사에서는 이러한 문제점들을 해결하고 TBM 터널이 가지는 잇점을 최대한 활용할 수 있는 새로운 천공 발파공법을 개발하게 되었다.

이방향 천공 발파공법은 기존의 종방향 천공 발파공법과는 전혀 다른 개념의 신공법으로서 공기 단축 및 발파진동 경감효과를 보다 크게 얻을 수 있도록 TBM에 의해 굴착된 파이롯트 터널속에서 방사상 방향의 발파공을 이미 천공해 놓은 상태에

서 터널단면 최외곽부를 터널 굴진방향과 같은 종방향으로 1회 굴진장만큼 천공하면서 발파함으로써, 방사상 방향만의 천공에 의해서 발파했을 때의 역골문제를 해결할 수 있는 획기적인 공법이라 할 수 있다.

그림 1은 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 있음을 알 수 있다.

3. 발파공 천공방향에 따른 3차원 발파 진동해석

본 공법은 효용성을 평가하기 위한 3차원 발파 진동해석의 목적은 실제의 정밀해를 얻는 것이 아니며 동일 지반조건일 때의 발파공 천공방향에 따른 상대적인 지반응답 차이를 알아보기 위한 것이므로 대표적인 단일 발파공에 대하여 해석을 실시

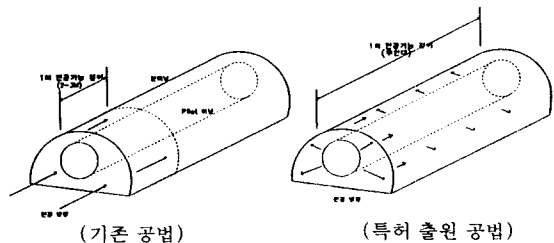


그림 1. 기존 공법과 신공법의 개념도

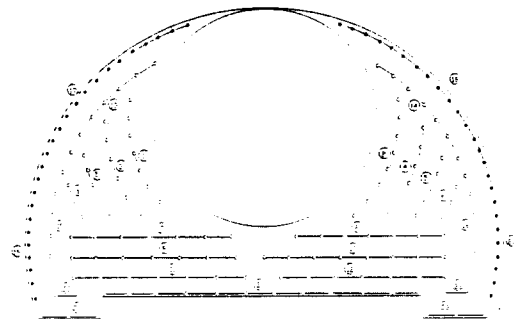


그림 2. 기존 종방향 천공 발파패턴도

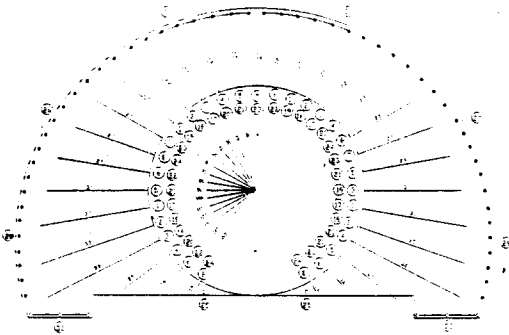


그림 3. 신공법 이방향 천공 발파패턴도

하였다. 등가로 치환된 하중대 시간곡선은 확대발파에 사용된 화약특성치와 장약량을 고려하여 산정하였다.

그림 2는 기존의 종방향 천공 발파공법의 일반적인 발파 패턴도이며, 그림 3은 이방향 천공 발파공법의 패턴도를 나타낸 것으로 하중모형은 각 발파패턴 중 대표적인 방향성을 가진 1개공만을 선택하여 해석하였다.

3.1 해석프로그램의 개요

본 연구에 사용된 프로그램은 미국 HKS사가 개발한 ABAQUS로서 점탄소성 해석은 물론 유체의 비선형 해석을 할 수 있으며 3차원 동적 비선형 해석도 가능하다. 이 프로그램은 현재 상용화된 비선형 프로그램들 중에서 가장 성능과 신뢰도가 뛰어난 프로그램의 하나로서 평가받고 있다. 이 프로그램에는 일반적인 유한요소해석의 대부분의 기능뿐만 아니라 터널해석에 필요한 각종 요소 라이브러리(element library) 및 다양한 소성구성방정식의 표현등 필수적인 기능들이 총 망라되어 있다.

유한요소해석의 전후처리에 사용된 P3/PATRAN은 ABAQUS와 비슷한 시기에 상용화된 3차원 유한 요소 생성을 위한 그래픽 프로그램이다. 이 프로그램은 특히 일반적인 2차원 위주의 프로그램이 생성시키기 어려운, 복잡한 형상을 갖는 구조물의 요소망(mesh)을 생성시키는데 탁월한 기능을 가지고 있다. 따라서 터널의 3차원 동적해

석을 원활하게 하는데 있어서 필수적인 도구라고 할 수 있다. 이 프로그램은 현재 유한요소해석 전후처리용으로 전세계적으로 가장 사용자수가 많은 것으로 알려져 있다.

3.1.1 ABAQUS의 주요기능

ABAQUS에는 현재 100여가지 이상의 유한요소를 제공하는 요소 라이브러리를 보유하고 있다. 이를 통하여 간단한 트러스나 보요소(beam element)로부터 복잡한 판요소 또는 고체요소(solid element), 암반의 절리등을 모델링하기 위한 접촉면요소(interface element), 지반의 무한 경계면을 모델링하기 위한 무한요소(infinite element) 등 매우 다양한 문제의 모델링이 가능하다. 이러한 요소들은 터널 굴착시의 시공단계별 해석을 위하여 해석과정 중에 임의로 제거 또는 추가할 수 있어 시공단계별 해석을 위하여 해석과정중에 임의로 제거 또는 추가할 수 있어 시공단계에 따른 해석을 가능하게 하여준다.

다양한 재료의 물성 및 구조적 성질을 표현하기 위하여 이 프로그램내에는 현재 강구조물에 많이 적용하고 있는 Von-Mises 및 Tresca 항복조건을 비롯하여 지반문제의 해석에 필수적인 Mohr-Coulomb 및 Drucker-Prager 항복조건 등이 포함되어 있다. 이러한 소성조건들 이외에도 지반의 시간에 따른 추가 응력변화의 해석이 가능한 점탄성 및 점소성 조건들이 내장되어 있다. 또한 이러한 비선형 문제들은 지하수 문제와 연관하여 조합 해석을 수행할 수 있다.

동적해석 기능으로는 기초적인 고유치 해석으로부터 선형문제에 사용되는 모드 천이해석(modal transient analysis) 및 비선형 해석에 사용할 수 있는 직접 시간적분법(direct time integration) 등이 있다. 이러한 동적해석 기능들은 위에서 언급한 모든 비선형 알고리즘과 병행하여 사용될 수 있다.

3.1.2 P3/PATRAN의 주요기능

ABAQUS와 같은 범용 프로그램에서는 대형문제를 원활하게 다룰 수 있는 성능을 갖추고 있으나 현실적으로 3차원 터널과 같이 복잡한 구조물에서는 수천개에서 수만개에 이르는 요소가 생성되기 때문에 이의 모델링은 또하나의 어려운 과정

이다. 따라서 이런 문제의 해결을 위해서는 P3/PATRAN과 같은 강력한 전후처리 프로그램의 사용이 필수적이다.

P3/PATRAN에서는 ABAQUS에서 지원하는 거의 대부분의 요소형태를 자동 생성시키며 이에 따른 입력화일을 작성하여 준다. 또한 ABAQUS에서 계산된 처짐, 응력, 단면력, 속도, 가속도 등의 다양한 결과들을 읽어들이 이를 그래픽 환경에서 출력시켜 준다. 또한 동적해석시 각각 시간단계별 결과를 이용하여 그래프를 작성하거나 이 결과들을 한꺼번에 연결하여 animation화 할 수 있다. 이는 특히 동적해석이나 비선형 해석시 시간경과나 하중증가에 따른 구조물의 변형 및 응력상태를 파악하는데 매우 유용하게 쓰일 수 있다.

3.2 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 42mm, 길이가 1m로서 가급적 실제 상황과 비슷하게 하였다. 요소망 구성을 위한 전체지반은 폭 78m, 높이 78m, 터널 굴진방향 50m로 구성되어 있다. 발파공 해석을 위한 요소망의 크기는 폭 3m, 높이 3m, 터널 굴진방향 3m로 구성되어 있다.

따라서 발파공의 체적은 지반 전체체적에 비하여 매우 미소한 부분에 해당된다. 이와 같은 미소부분을 고려하여 요소망을 생성시키면 정밀한 해석을 위하여 수만개에 이르는 엄청난 숫자의 요소를 필요로 하게 된다. 또한 해석의 목적이 발파진동 분석에 있으므로 요소의 형성에 세심한 주의를 기울여야 한다. 파동 전달문제에서는 그 요소들의 형상에 따라 그 결과가 크게 영향을 받기 때문에 특별히 인접요소의 형상, 크기 차이를 극복할 수 있는 천이요소 또는 적합요소(adaptive element)의 적용이 어려울 경우 가급적 같은 크기나 형상을 가진 요소들로 모형화하는 것이 바람직하다.

이러한 문제들을 종합적으로 검토한 결과, 발파공과 전체요소망을 동시에 해석할 경우 계산시간과 비용면에서 현실적인 어려움이 발생하는 바 이의 해결을 위하여 본 해석에서는 효율성을 고려하여 다음의 두단계로 나누어 수행하였다.

1단계에서는 발파공 주위의 미소부분을 확대하여 이 부분의 정밀해석을 각 하중의 경우에 대해서 수행한다. 이 때 하중은 정적 단위하중(static unit pressure)을 적용하며 경계조건은 각 방향에 대해서 수직방향만을 구속한다. 작용된 하중에 의해서 단일 발파공은 반력이 생성되며 이 반력은 프로그램내에서 함수로 저장되어 2단계 해석에서의 외력으로 바꿀 수 있다.

2단계에서는 1단계에서 구해진 결과들을 토대로 이를 전체 요소망에 재분배시켜 해석을 수행한다. 즉, 1단계 해석으로부터 정적 단위하중에 의한 외력이 생성되면 이를 시간항이 첨가된 천이하중(transient force)으로 바꾸기 위해서 각 시간증분에 대한 하중비(load ratio)를 산출하여 이를 이미 생성된 외력에 곱함으로써 가정한 발파하중에 대한 해석을 수행한다. 단, 이때의 경계조건은 경계에서의 파의 반사를 방지하기 위하여 무한요소나 경계요소 등 에너지 흡수 요소를 사용하여야만 정확한 결과를 얻을 수 있다.

해석의 각 단계는 다음의 4가지 방향성을 가지는 발파공에 대하여 수행되었으며 1단계 해석에 한해서 발파공 방향에 따라 각각 별도의 요소망을 모형화하였다. 그러나 2단계 해석에서는 1단계에서 해석된 모형을 블록개념으로 전체 지반모형에 삽입할 수 있으므로 1단계에서의 발파공 해석 블록과 2단계에서의 전체 지반모형과의 접촉면에 하중을 작용시키면 된다.

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 단계에서 요소망의 크기, 즉 해석에 필요한 자유도의 수를 최적화시킬 수 있으므로 효율적인 해석이 가능하게 된다.

3.3 해석모형

그림 4는 수치해석 제2단계에서 수행된 요소망의 전체형상이다. 앞서 언급된 바와 같이 제2단계의 해석을 위해서는 전체 모형에 비해 미소한 천공부분에 대한 해석이 선행되어야 한다. 그림 5는 발파공 천공을 터널 굴진방향으로 생성시킬 때(case 1)의 요소망을 그린 것이다. 그림에서는 이

해를 돕기 위하여 대칭면 기준 우측 체적에 대하여만 요소망을 나타내었으나 이 해석의 결과가 제2단계에서 전체 요소망에 재분배되어야 하기 때문에 실제로는 그림에 나타난 체적의 2배의 체적에 해당하는 부분에 걸쳐 요소망을 생성하였다. 그림 6은 case 2에 사용된 요소망이다. 이 경우는 발파 천공의 하단부가 터널 자유면을 향하고 있다. case 3, 4에서는 case 2에서 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, 포아슨비 0.21, 단위중량 2.6ton/m³을 사용하였다.

3.4 하중모형

본 해석에서 가장 중요한 부분으로서 폭발하중을 어떻게 모델링하는가 하는 문제이다. Vallianpan & Ang(1988)에 의하면 발파 모델링에 있어서 가장 중요한 것은 공내에 작용하는 발파하중 및 시간관계를 정확히 설정하는 것으로서, 각 발파공에 작용하는 압력을 폭약의 재하밀도(ρE), 지반탄성계수(E), 지반단위중량(ρ), 폭약의 속도(De)의 함수로 만든 Brown 공식을 적용하여 각 공에 작용하는 압력을 환공에 동가의 압력(equivalent pressure)으로 환산하였으며 이러한 동가하중대 시간곡선을 이용하여 발파하중 모델링을 시도하였다.

Model for Case 2 force(half model view)

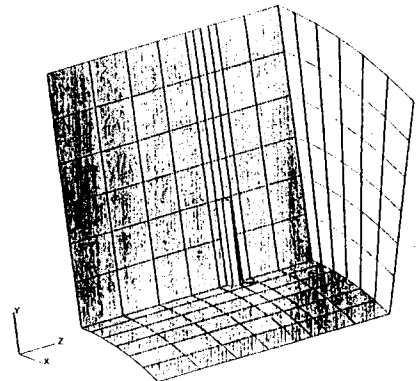


그림 6. 제1단계 해석시 요소망 (case 2)

Model for stage 2(transient analysis)

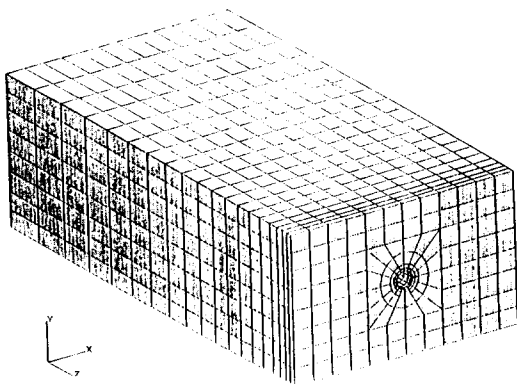


그림 4. 제2단계 해석시 요소망

Model for Case 1 force(half model view)

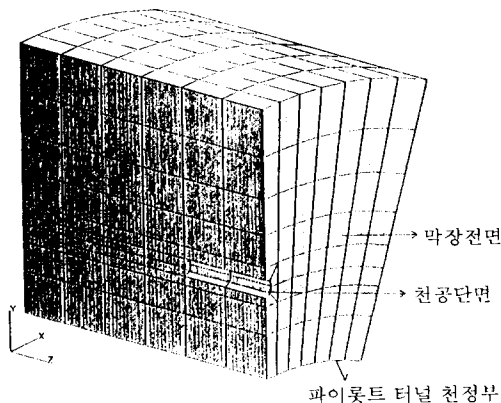


그림 5. 제1단계 해석시 요소망 (case 1)

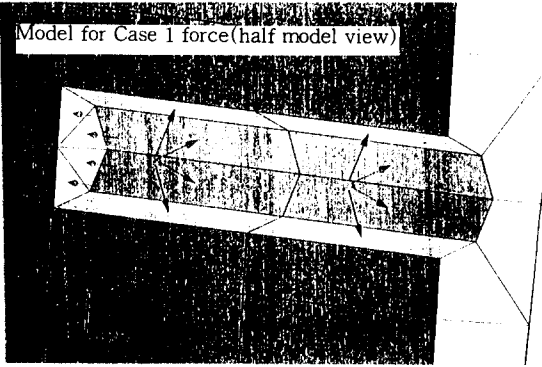


그림 7. 제1단계 해석시 하중상태 (case 1)

Transient function of blasting force

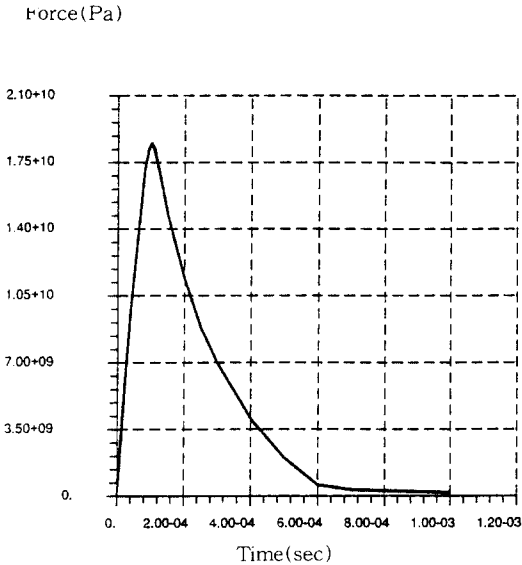


그림 8. 시간대 하중곡선

제1단계에서는 그림 7에 나타난 것과 같이 발파 천공 내부에 단위 압력이 작용한다고 가정되었다. 이 가정은 case 1부터 case 4에 걸쳐 모두 동일한 크기로 재하되었다.

제1단계에서 얻어진 단면력은 그림 8과 같은 시간 대 압력분포를 갖는 천이력(transient force)로 환산되어 제2단계의 요소망에 재분배되었다. 그림에서 나타난 바와 같이 발파력은 최초 발파

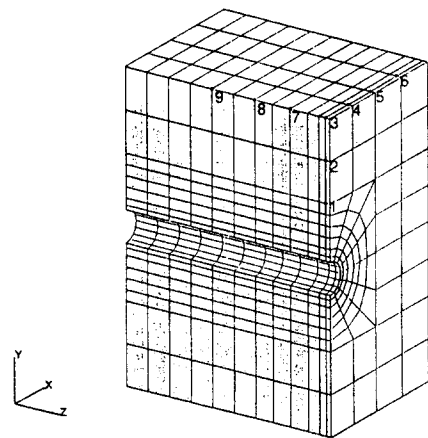
개시후 1.0×10^{-4} 초가 지난 시점에서 최대값을 갖는다고 가정되었다. 동적해석은 그림의 곡선중 0.1초 경과시 까지 해석되었으며, 시간증분(Δt)에는 1.0×10^{-5} 초가 사용되었다. 즉, 전체시간에 걸쳐 동적해석을 수행하기 위하여 전체 10000번의 시간단계가 소요되었다.

본 해석에 사용된 전후 처리 프로그램인 P3/PATRAN에는 어떤 해석의 결과치를 각 절점 좌표값에 대한 함수형태로 저장할 수 있다. 이 함수는 다음 해석의 하중 재하시 활용할 수 있으므로 제1단계에서 구해진 결과치들을 함수화하고 이에 그림 8에 나타난 하중강도를 곱하면 이를 2단계 해석의 입력치로 사용할 수 있다. 또한 모든 하중경우에 대하여 자중의 효과가 고려되었다.

3.5 해석결과

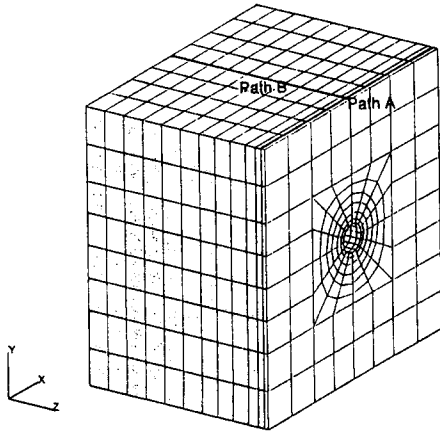
제2단계 해석에서는 기존의 종방향 및 횡방향 천공발파에 의한 진동 결과치를 상대적으로 비교해 보기 위해서 지표면에서 두 방향의 경로와 발파공 직상부 지표면 지점을 선택하여 시간에 따른 진동속도를 비교 분석하였다.

그림 9는 제2단계 해석시 시간에 따른 동적 응답 특성을 파악하기 위하여 사용된 절점들이며, 그림 10은 지표면에서의 진동속도를 분석해 보기 위해 설정한 경로를 나타낸 것이다. 경로 A는 직상부를 중심으로 방사상 방향으로 존재하는 절점



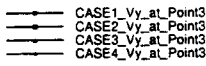
Points for results

그림 9. 제2단계 해석결과 출력에 사용된 절점들



Paths for result

그림 10. 제2단계 해석결과 출력에 사용된 경로들



CASE 1 : 기존공법
CASE 2, 3, 4 : 신공법

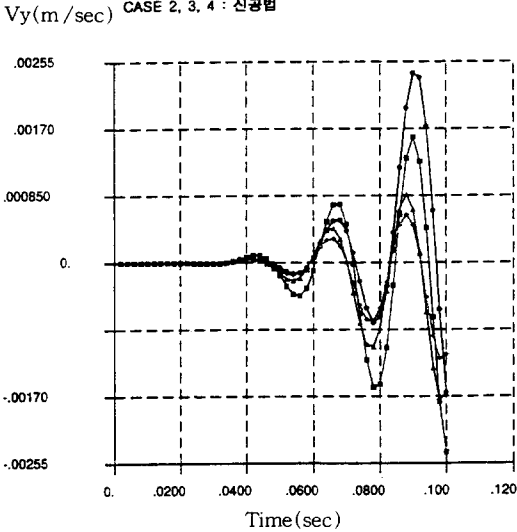


그림 11. 직상부에서의 시간에 따른 속도 응답

들로 이루어져 있으며, 경로 B는 종방향 절점들로 이루어져 있다.

그림 11은 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 있

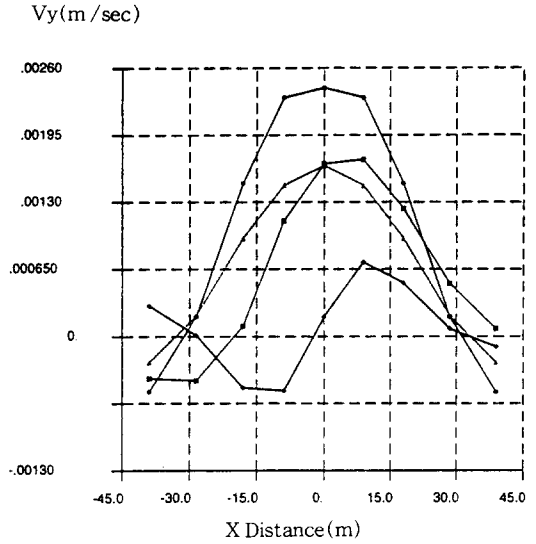
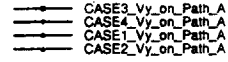


그림 12. 경로 A에서의 속도 응답 (t=0.1 sec)

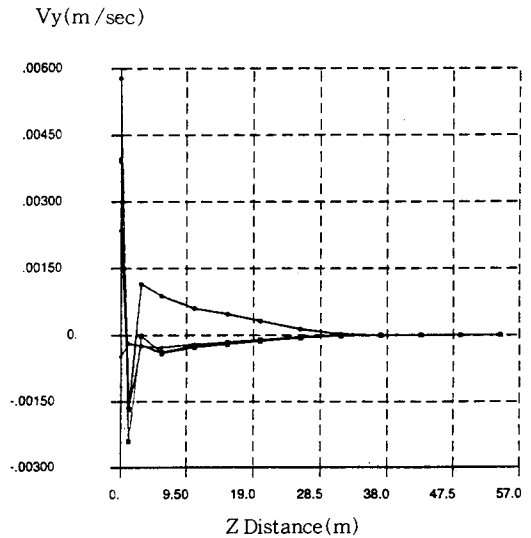
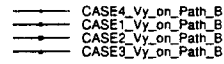


그림 13. 경로 B에서의 속도 응답 (t=0.1 sec)

표 1. 기존공법과 신공법의 비교

비 교 항 목	비 교 내 용	
	중방향 천공 발파 공법	이방향 천공 발파 공법
발 파 후 굴 착 면 의 형 상	<ul style="list-style-type: none"> 굴착단면 외곽부는 정밀폭약을 사용하므로 굴착면의 여굴이 거의 없다. 대부분의 굴착단면은 위력이 큰 폭약을 중방향으로 천공발파하기 때문에 굴착면의 요철이 심하여 다음의 발파공 굴착시 어려움이 많다. 	<ul style="list-style-type: none"> 굴착단면 외곽부는 중방향 천공 발파방법과 동일하다. 방사상 방향으로 천공 발파하므로 발파후의 굴착단면이 평탄하다.
발 파 공 천 공 작 업	<ul style="list-style-type: none"> 전단면을 터널굴진방향으로 천공한 후 장약을 하고 발파하는 시공순수를 계속적으로 반복한다. 	<ul style="list-style-type: none"> 선진도갱내에서 방사상 방향으로 사전에 천공을 한 상태에서 굴착단면 외곽부만 중방향으로 천공, 장약, 발파하는 순서로 시공하므로 발파공 천공에 소요되는 시간을 대폭 줄일수 있다.
발 파 진 동 영 향	<ul style="list-style-type: none"> 중방향 및 이방향 천공 발파방법 적용시의 지표면에서의 지반진동의 크기는 이방향 천공발파 공법의 경우가 진동감감 효과가 있다. 	
버 려 치 러 업 작	<ul style="list-style-type: none"> 발파된 버력이 굴착면 바로 앞에 쌓이므로 굴착면 하부의 발파시 저항요인으로 작용할 수 있다. 	<ul style="list-style-type: none"> 발파후의 버력은 굴착면으로부터 상당히 멀리 까지 비산하므로 굴착면 하부의 발파가 용이하다.
굴 진 장 대 종 대 용	<ul style="list-style-type: none"> 1회 굴진장을 증대시키기 위해서는 다양한 크기의 드릴 로드가 필요하며 최대 굴진장의 크기에 한계가 있다. 	<ul style="list-style-type: none"> 암반상태가 양호한 경우 1회 굴진장을 발파진동 이용기준치 범위내에서는 최대한 증대시켜 굴착할 수 있다.
경 제 성	<ul style="list-style-type: none"> 장대터널의 경우 기존의 NATM공법에 비해 경제성이 있으나 TBM 파이롯트 터널의 잇점을 충분히 살리지 못한다. 	<ul style="list-style-type: none"> 굴착장비의 효율성을 극대화하여 임대기간을 줄일수 있다. 인접지반의 이완영역이 감소하고 버력치러가 용이하여 굴진장을 증대시킬수 있다. 사전 천공작업이 가능하여 작업시간을 단축시킬 수 있다.
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"> 첨단 천공제어장치를 조합함으로써 정밀시공이 가능하며 터널벽면에 천공위치를 표시할 필요가 없는 등 작업공정이 원활하다.

는데 이는 case 1의 하중분포가 수직방향 기준으로 볼 때 다른 경우보다 더 크기 때문인 것으로 해석될 수 있다. 그림 12, 13은 경로 A 및 B에서의 거리에 따른 속도분포를 도시한 것이나, 앞의 경우에서와 같이 case 1이 다른 것에 비하여 높은 값을 보이고 있다.

4. 시험발파에 의한 본 공법의 효용성 평가

본 공법의 실용성을 증명하기 위하여 당사에서는 서울소재 유원건설 북부 도시 고속도로 3공구 TBM 확공현장을 시험발판 현장으로 선정하여 기존의 중방향 천공 발파공법과 신공법인 이방향 천공 발파공법의 시험발파를 실시하였다. 표 1은 기존공법과 신공법의 특징 및 장단점을 비교한 것으로 지반진동 저감 및 경제성 등에서 기존 공법에

비하여 탁월함을 보였다.

5. 결 론

이방향 천공 발파공법의 실용성을 입증하여 실시공에 착수하기 위해서는 수치해석을 통하여 사전에 중방향 및 방사방향 천공발파에 따른 지표면에서의 지반진동의 영향을 알아 보는 것이 필요하였다. 정확한 현장조건과 발파하중이 주어진 상태에서의 정밀해를 구하기 위해서는 시공상의 발파 패턴대로 전체 발파공을 모형화하는 것이 필요하나 앞서 언급한 바와 같이 해석목적상 기존공법과 신공법의 지반응답의 차이를 비교하는 것이 주목적이었기 때문에 해석조건을 동일하게 가정하고 발파공도 대표적인 방향성을 가지는 1개공만을 선택하여 해석을 수행하였다.

기존 종방향 천공 발파공법과 신공법인 이방향 천공 발파공법의 상대적 비교를 위한 3차원 동적 해석 결과, 관심의 대상이 되는 터널 직상부의 경우 기존의 종방향 천공 발파에 비해 이방향 천공 발파는 진동이 두드러지게 감소함을 알 수 있었으며 이는 발파공의 방향성에 따라 지반응답이 크게 영향을 받는다는 것을 의미한다. 따라서 터널굴착 시 문제시 되는 지상구조물의 위치에 따라 발파공의 위치를 적절히 조절함으로써 문제발생 예상지역의 진동치를 감소시킬 수 있을 것이라 판단된다.

그러나 이러한 잇점은 확대발파전 파이롯트 터널이라는 자유공간이 존재할 때만 가능하므로 이방향 천공 발파공법은 TBM의 효율성을 극대화시킨 것이라 할 수 있다.

본 수치해석과 관련한 추후 연구과제로는 다음과 같은 것들을 생각할 수 있다. 먼저 대표적인 방향성을 가지는 1개 발파공에 대하여 3차원 비선형 동적 해석을 수행함으로써 발파공의 위치에 따른 소성영역 생성의 변화를 읽을 수 있으며, 이로부터 터널시공중 기존공법과 신공법간의 막장 부위별 안정성의 차이를 비교할 수 있다. 이러한 차이는 막장면 위험지역의 분포를 나타내는 것이므로 서로 다른 공법적용에 따른 터널의 안정성 및 그에 따른 최적 지보재량 추정을 위한 의미있는 자료가 될 수 있을 것이다. 이는 각 공법의 대표적 발파방향의 방향성을 생각해 볼 때 기존의 종방향 천공 발파는 주 소성영역이 발파방향의 특성상 터

널 진행방향인 터널 천정부인 것에 비해 이방향 천공 발파는 다음 막장 전면이 되기 때문이다.

또한 여러 방향성을 가지는 실제의 발파패턴을 모형화할 수 있는 수치해석기법의 연구 및 화약의 종류 및 지연시간에 따른 정확한 하중모형을 개발하는 것이 필요하다. 아울러 터널 굴진장을 증대시킬 수 있는 기본 자료로써 막장의 무지보 자립시간(stand-up time)의 추정이 필요한 바 3차원 점소성 해석기법의 연구가 필요하다.

参 考 文 献

1. 유원건설주식회사, 한국건설기술연구원, TBM / NATM 병용공법의 효율성 평가연구, 1994. 12.
2. 서울대학교 공학연구소, TBM과 NATM 병용시공의 타당성에 관한 연구보고서, 1991. 7. 115.
3. 서울특별시, 도시고속도로 (북부간선 3공구) 실시 설계 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.