연주식 발파(Orchestra Blasting Method, OBM)공법 개발에 대한 기초적 연구

윤지선[1] · 김수현[1] · 이진무[2] · 이 효[2] · 배상훈[3]

1. 서 론

산지가 많고 국토면적이 작은 우리나라의 현실에서 지하공간개발에 대한 수요와 필요성은 갈수록 증가하며 그 크기 또한 대형화되고 있는 추세이다. 특히 도심지와 도심 근접지에서의 발파를 이용한 굴착작업 수행 시 진동 및 소음에 대한 민원발생은 점점 큰 사회문제로 대두되고 있는 실정이며 이를 해결할 방법에 대한 필요성과 당위성도 증가하고 있는 실정이다.

이와 관련한 기존의 분할발파 및 지발당 장약량의 감소, 기계굴착 및 차단벽 설치 등의 방법은 시공성과 경제성을 저해하는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 발파 진동과 소음 수치를 최대한 저감하며 발파 Delay Time에 일정한 주기(리듬)를 줌으로써 비슷한 수치에서도 기존 발파공법보다 불쾌감을 줄일 수 있는 연주식 발파공법(Orchestra Blasting Method, OBM)을 소개한다. 또한 OBM공법의 근간을 이루고 있는 발파 파형의 중첩 및 분리의 개념을 이용한 초시결정 방법과 최적의 영역간 시차 결정방법에 관한 기초적 연구를 수행하였다. 이를 토대로 연주식 발파공법에 대한 종합적인 패턴을 수립하고자 한다.

2. 연주식 발파공법 개요 및 목적

음악과 소음의 차이는 공기 중에 전달되는 파동의 합인 파형이 전체적으로 규칙적이며 주기적인 성질을 가지면서 그 음압 또한 너무 크지 않으면 음악이 되고 물리적으로는 불규칙적이고 비주기적인 특성을 나타내며 사람에게 불쾌한 느낌을 주는 음을 소음이라고 한다. 이를 발파 기법에 응용하여 발파음에 일정한 주기(리듬)을 주어 소음으로 느끼던 발파음을 보다 쾌적한 음으로 느끼게 하고자 하는데 그 목적이 있다.

1) 인하대학교

2) SK건설

3) (주)미래공영

3. 연주식 발파 방법

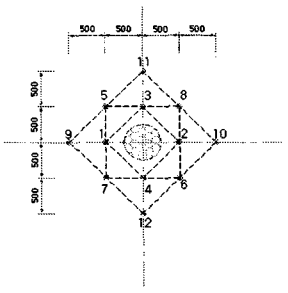
연주식 발파공법 구현의 핵심은 전자뇌관의 사용에 있다. 0~25000ms까지 1ms 단위로 초시적용이 가능한 초시의 자율성과 기존뇌관(초시오차범위 10%이내)보다 정밀한 초시오차 범위(1~2%이내)를 이용해 초시조절과 발파 영역구분으로 발파음의 분할과 주기를 만들 수 있으며 이를 이용해 발파파형을 제어 할 수 있다. 또한, 장약량의 조절로 파형의 세기를 조절하여 발파음의 세기를 조절한다.

4. 연주식 발파공법의 순서

4.1 독립파형 획득

연주식 발파공법은 단발발파를 원칙으로 하므로 본 발파에 앞서 단공 발파를 하여 하나의 완벽한 독립파형을 획득한다. 두개의 장약공을 시차를 두고 발파할 경우 파의 상호 간섭현상이 일어나 중첩을 통하여 상쇄 혹은 증폭이 일어나므로 각 공 사이는 충분한 시차(500ms이상)를 두어 이러한 상호 간섭현상이 없는 완전한 독립파형을 얻어야 한다. 표 1은 경부고철 ○○-○공구 수직구에서 수행되었던 단발발파시험의 예시(2006윤지선, 임종민 외)이다.

표 1. 발파 패턴도 및 발파 제원

발파 패턴도	발파제원	
	발파공	8공
	천공경	Ø45
	천공장	1.5m
	공당 장약량	0.45 kg
	총 장약량	3.6 kg
	적용 지연시차	500ms
	발파개요	
	전자뇌관을 이용하여 독립파형을 획득	

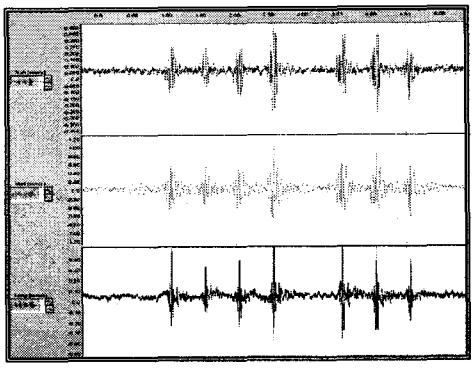


그림 1. 계측된 독립파형의 예

4.2 파형합성 프로그램을 이용한 최적초시 도출

파형과 관계없이 전형적인 발파진동은 종선을 따라 시간이나 거리에 따라 변하는 사인파로 근사할 수 있다. 이 근사는 입자속도로부터 변형률과 가속도를 계산하기가 유용하다.

정현파(正弦波)의 +,− 수치를 조정하여 시간차를 조절하면 수치합성에 의해 간섭 효과로 진동이 제어되도록 한다. 시차별 발파진동을 상호 간섭시켜 진동소음을 저감시키는 발파

로서 보다 상세하게는 복수의 진동원에서 진동을 적극적으로 중복시켜 상호간섭을 통하여 발파진동을 저감시킨다. 단발발파로 얻은 발파데이터에서 독립적인 파형을 분리한 후 파형의 각성분인 T,V,L 성분별로 1ms 단위로 가감한다. 합성 진동치(3성분의 vector의 합)는 실벡터 합으로 하였으며 다음 식으로 구하였다.

$$\text{Vector Sum} = \sqrt{T^2 + V^2 + L^2}$$

기존의 두개의 독립파형만으로 파형합성을 하는 단순 파형합성 방법(2006 윤지선, 김도현 외)에서 실제 발파와 가까운 상태에서 보다 정밀한 최적초시를 구하기 위하여 자유면 효과를 고려한 누적 파형합성 방법을 고안하였다. 단공발파로 얻어진 독립파형을 순서별로 구하여 첫 번째 파형과 두 번째 파형을 합성한 뒤 세 번째 파형을 합성하는 방식으로 단공발파로 얻어진 마지막 파형까지 합성한다.

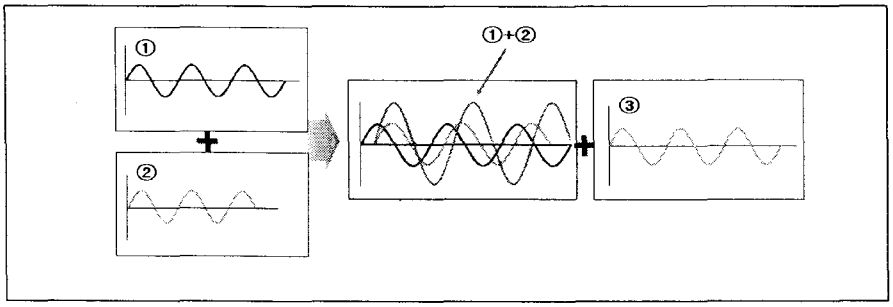


그림 2. 누적 파형합성 모식도

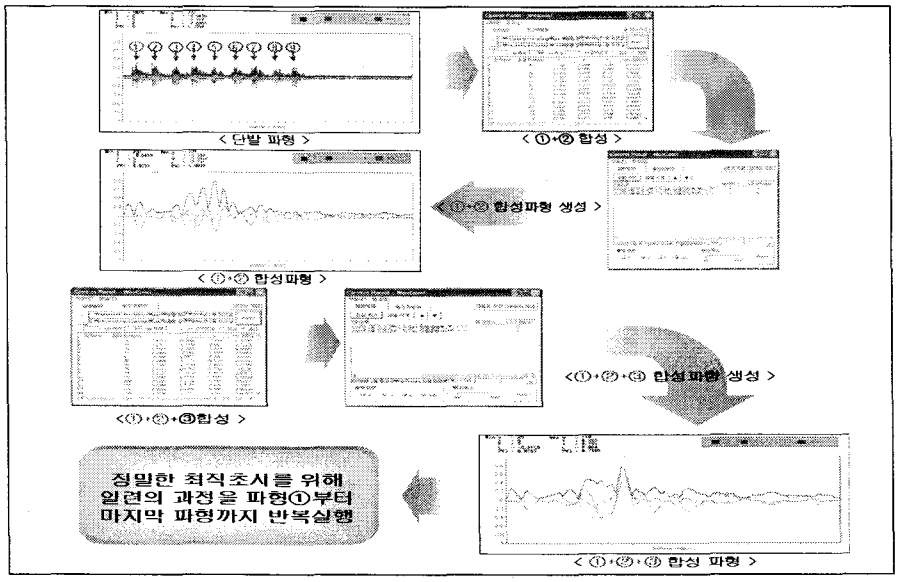


그림 3. 파형합성 프로그램 상에서의 누적파형합성

4.3 예측치 도출을 위한 발파 시뮬레이션(최적초시 적용)

단공발파로 얻어진 독립파형을 누적 파형합성 방법으로 얻어진 각 최적초시와 실제 현장에서 적용할 공수에 맞게 파형합성 프로그램 상에 수치를 대입하여 시뮬레이션 해봄으로써 발파 진동치를 예측 할 수 있다.

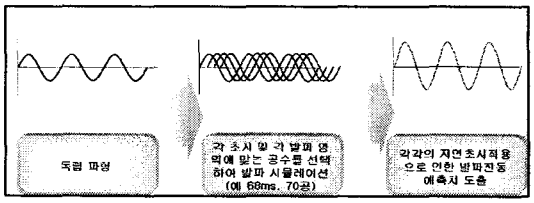


그림 4. 발파시뮬레이션 모식도

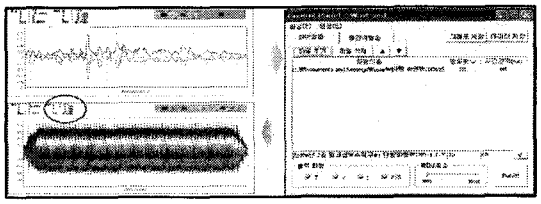


그림 5. 파형합성 프로그램 적용 예

4.4 리듬감 부여를 위한 영역별 시차 결정

진동이 감쇠하는 시간까지의 길이결정을 위해 시험현장의 암진동을 근거로 하여 기준치를 설정한다. 시험현장의 암진동에서 T, V, L 각 성분 중 가장 값이 큰 성분에서의 최대치v 이하를 발파진동의 감쇄치로 한다. 이를 근거로 실제 발파한 단독파형을 통해 감쇄시간을 결정한다. 발파 시작점부터 기준치이하가 되는 점까지의 시간을 찾아 결정한다.

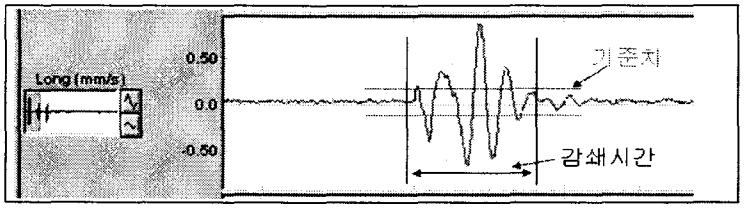


그림 6. 기준치 및 감쇄시간 결정 예

감쇄시간의 기준을 설정한 후 합성프로그램을 통해 발파 시뮬레이션을 하고 마지막 발파공으로부터 기준치가 되는 시간까지의 길이를 통해 영역간 시차의 최소값을 결정한다.

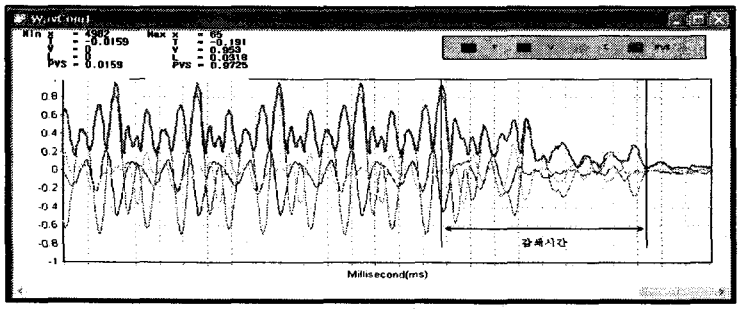


그림 7. 영역간 시차 최소값 결정 예

위의 결과를 토대로 파의 상호간섭을 받지 않는 영역간 시차의 최소값이 결정되면 발파음에 적용할 리듬을 결정한다. 그 다음 실제 적용할 시험현장의 총장약량을 각 박자의 수에 맞게 분할하여 한 박자의 발파음 길이를 결정하게 된다. 연주식 발파는 발파 진동·소음 저감을 위하여 단공발파를 원칙으로 하고 있으므로 장약량과 공수가 같다면 발파음의 길이는 동일한 일정한 길이의 음이 된다. 예를 들어 8분의 6박자로 리듬을 결정한다면 총장약량을 한마디에 다 표현하려면 6등분을 두 마디로 표현하려면 12등분을 한다. 총장약량의 1/6, 혹은 1/12를 한 발파음 길이로 정하면 된다.

4.5 최적 공간 시차와 영역별 시차를 적용한 실제 발파

표 2와 같이 6/8박자 OBM공법 적용 실제 발파 사례에서와 같이 8분의 6박자를 구현을 목표로 한다면 총 장약량을 12등분하여 영역간 장약량 비율을 1:1:1:3:1:1:1:3으로 구분하여 리듬감을 살린다.

표 2. OBM공법 적용 실제 발파 예(2006, 윤지선, 임종민 외)

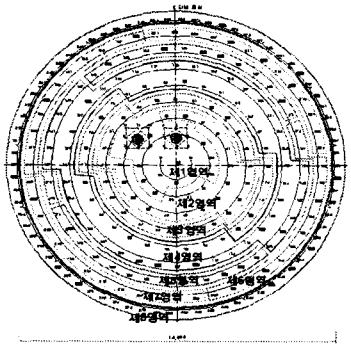
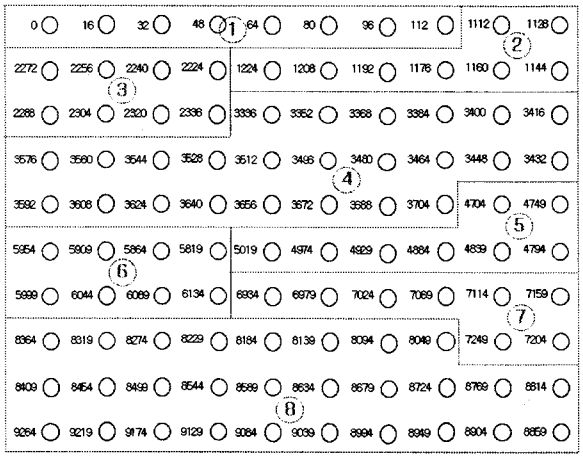
<table>
<tr><td>발파 패턴도</td><td colspan="2">발파제원</td></tr>
<tr><td rowspan="9">  </td><td>발파공</td><td>300공</td></tr>
<tr><td>천공경</td><td>Ø45</td></tr>
<tr><td>천공장</td><td>1.5m</td></tr>
<tr><td>지발당
장약량</td><td>심발부 0.45kg　심발확대부 0.5kg
확대부 0.5kg　최외곽부 0.45kg</td></tr>
<tr><td>총 장약량</td><td>145.5kg</td></tr>
<tr><td>비 장약량</td><td>0.727kg/㎡</td></tr>
<tr><td>적용 초시</td><td>68ms</td></tr>
<tr><td>영역간 시차</td><td>500ms</td></tr>
<tr><td colspan="2">발파개요</td></tr>
<tr><td colspan="2">• 전자뇌관을 이용, 영역간 장약량 비율을 1:1:1:3:1:1:1:3으로 구분하여 보다 쾌적한 발파음 구현을 위한 리듬감 부여
• 8영역 최외곽부는 여굴을 고려하여 10ms 적용</td></tr>
</table>

표 3. OBM공법 적용 벤치 컷 발파 예시(2007, 윤지선, 배상훈)

발파 패턴도	발파 제원
	• 천공경 : Ø 76 • 벤치높이 : 7.2 m • 천공장 : 8 m • 공 수 : 100 공 • 최소저항선 : 2.5 m • 공간격 : 3.0 m • 공당 장약량 : 12 kg • 총 장약량 : 1200 kg
	발파 개요
	• 리듬감 구현을 위해 영역간 장약량 비율 조절과 최적초시를 적용 • 적용초시 : 1~4영역 :16ms 5~8영역 : 45ms • 영역간 시차 : 1 ~ 4영역 : 1000ms 5 ~ 8영역 : 800ms

4.6 예측치와 실제 계측치의 비교분석

실제 시험발파가 수행 후 Blastware 프로그램을 이용하여 실제 파형과 진동치를 획득 한 후 실제 발파 수행 전에 시뮬레이션 했었던 예측치와 비교를 해봄으로써 오차범위를 확인하고 이를 토대로 원인을 고찰할 수 있다.

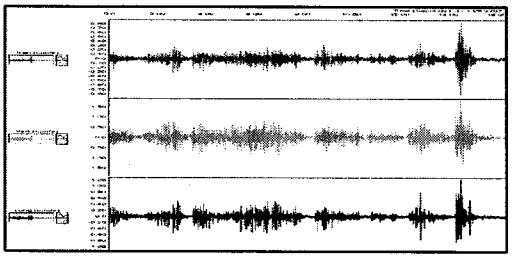


그림 8. 실제 OBM공법 적용 발파파형

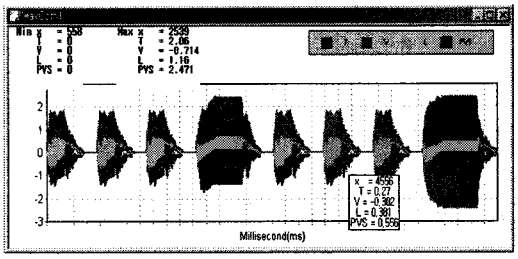
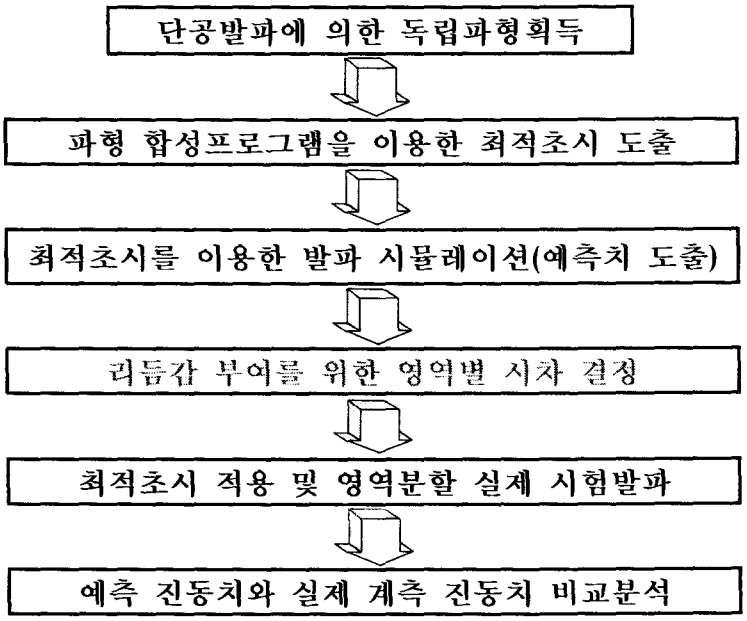


그림 9. 시뮬레이션 예시

5. 결 론

본 연구에서는 단발발파를 원칙으로 하여 발파로 인한 소음·진동과 사람들이 느끼는 불쾌, 불안감의 저감을 목적으로 하는 연주식 발파(Orchestra Blasting Method, OBM)공법에 대한 기초적 연구를 수행하였다. 먼저 그 근간을 이루는 파형합성 프로그램(Program of

wave, PBW)을 이용하여 독립파형의 파형합성으로 진동치를 저감시킬 수 있는 최적초시 획득 방법과 영역별로 장약량 비율을 조절하여 주기성과 리듬감을 부여하는 시차 결정방법에 대하여 연구해 보았다. 이를 바탕으로 종합적이고 체계적인 연주식 발파(OBM)패턴을 아래 Flow Chart와 같이 확립하였다. 다만 지금의 파형합성은 중첩에 의한 감쇄의 효과보다 파형분리의 개념이 짙은 바 이를 향후 더 보완하여 연구해야 할 것이다.



<연주식 발파공법(OBM공법) Flow Chart>

감사의 글

본 논문은 건설 교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)의 지원으로 이루어진 것으로, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 윤지선, 1992, 최신 발파기술, 구미서관.
2. 윤지선, 김도현, 2006, 발파진동 파형합성을 이용한 전자뇌관의 최적지연 초시에 관한 터널기술, Vol. 8, pp. 130-133.
3. 윤지선, 임종민, 배상훈, 이진무, 2006, 발파진동 파형합성과 전자뇌관을 이용한 전단면 다시차 발파에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 정기학술대회 논문집.
4. 이상헌, 윤지선, 조영곤, 안봉도, 2004, 전자기폭시스템을 활용한 터널 시공사례, 화약·발파, 대한화약발파공학회, Vol. 22, No. 1.

5. 윤지선, 조영곤, 이형원, 2001, 외국의 전자뇌관의 시공사례와 그 실효성에 관한 고찰, 대한토목학회 초청 및 구두발표논문 초록집.
6. 선우 춘, 류창하, 2000, 발파진동 측정에 대한 고찰, 화약·발파, 대한화약발파학회, Vol. 18, No. 4.
7. Dowding, C.H., Blast Vibration Monitoring and Control,