수중 발파시 인근 구조물에 미치는 진동의 영향 연구

A Study on the effective Oscillation Characteristics of the Constructions of Blasting Operations in Seaside

이 신[1], 강 대우[1], 박 학봉[2]
Sin Lee, Dea Woo Kang, Hak Bong Park
[1]동아대학교 자원공학과, [2]부경암석발파연구소

Abstract

Korean peninsula has the most mountainous areas such as mountains and hilly country, and it is surrounded by the sea on all sides but one. In this respect, a large scaled construction works have frequently been conducted. However, it is not easy to perform a large scale blasting work without giving any harm to houses or facilities nationwide. Therefore, blasting work becomes more closely related to maintenance thing due to the development of the downtown or a large structure for key facilities. Many researches on blast in the open space and tunnel blasting have been conducted. On the contrary, research on underwater blasting operations is comparatively scanty even though much more necessity of marine development is required. In this respect, this study aims to investigate the characteristics of underwater blasting operations and to make a comparative study with blast in the open space. As a result of examining into the characteristics during underwater blasting operations, the ground oscillation in case of underwater blasting operations shows significantly low compared to that in case of blast in the open space, and this means that much more cautious attitude must be taken in designing underwater blasting operations compared to the design of blast in the open space. As a result of analysis on the difference between a square root and a cube root in the equation of estimating oscillations in the actual site, it is shown that it is easier to apply a square root for the estimation of oscillation at 60 meters in case of underwater blasting operations and at 22 meters case of general blast in the open space.

핵심어 : 수중발파, 일반발파, 장약량, 진동추정식, 발파 패턴

1. 서 론

1.1 연구 배경

우리나라의 지층은 고생대에서 중생대의 견고한 암반이 지표 가까이에 노출되어 있는 경우가 많고, 지형적으로는 산맥과 구릉지대의 산지가 발달해 있으며, 삼면이 바다로 둘러 싸여 있어서 발파를 이용한 대규모 공사가 많이 이루어지고 있는 실정이다. 또한, 좁은 국토에 인구 밀도가 높아 전국 어디를 가더라도 민가나 시설물을 벗어나 대규모 발파 공사를 하기가 쉽지 않으며, 기간 시설물을 위한 대형 구조물이나 도심지 개발 등으로 발파는 더욱 더 보안물건에 근접하게 되었다. 이에, 발파 작업에 따른 피해가 점점 더 사회문제가 되어감에 따라, 노천 발파나 터널 발파에 대한 발파 효과와 구조물의 피해에 대한 많은 연구가 이루어지고 있는 실정이다. 하지만, 삼면이 바다인 우리 국토의 입지조건상 해양 개발의 필요성을 점점 더 크게 느끼며, 실제 수중발파가 늘어나는 추세에 있으나 이에 대한 연구는 아주 미미한 실정이다. 또한, 실무에서는 발파 특성과 현장 특성을 고려하지 않고 단순한 속도치만을 고려한 발파 통제가 이루어지고 있다. 따라서, 본 연구는 부산 감천항 지역의 A공사 현장에서 실시한 발파작업에서 발생되는 수중발파의 진동특성이 구조물(가옥)에 미치는 영향을 검토하고, 각기 다른 형태의 발파 특성을 비교하여 발파 진동이 구조물에 미치는 영향을 검토하려고 한다.

1.2 연구 목적과 범위

최근 지하자원 개발을 위한 노천 채굴장, 채석장 등과 도로, 지하철, 건축 등의 토목 공사에 대한 개별적 발파 특성의 연구는 활발히 이루어지고 있으나, 수압이 작용하는 수중에서의 발파에 대한 연구와 발파특성에 대한 연구는, 현장 특성상 연구가 되고 있지 않다.

지반진동의 크기와 상태에 대해, 화약류의 폭발에 의해 발생하는 진동은 폭발반응에 의한 압력이 일어나는 시간에 관계하며, 응력이 일어나는 시간이 짧은 화약류만큼 폭속은 커짐으로 폭속이 큰 화약류만큼 발생하는 진동은 커진다.

폭발에 의한 Energy의 일부가 진동이 됨으로 약량의 증가와 함께 발생하는 진동은 커지며 일반적으로 진동은 장약량의 1/2~3/4에 비례하여 증가한다는 것에만 주안점을 두어, 발파실무에서는 채석장, 도로, 지하철, 수중발파, 터파기 등의 각기 다른 현장특성에서의 발파 특성을 무시한 채 진동 속도치만을 안전관리에 고려해 왔으며, 건물이 받은 진동에 대해 어떻게 반응하는가하는 점은 심도있게 고려되지 않는다. 이런 현장의 대부분의 발파설계에서 한번에 기폭되는 화약량을 제한하여 진동수준을 조절한다.

그러면서도 암반을 제거하기에 충분할 만큼 파쇄할 수 있는 양이 기폭되도록 설계해야한다. 구조물에 인접한 발파에서는 암반의 단위 부피당 장약량을 유지하면서도 단당 장약량을 줄여서 설계해야 한다. 다시 말하면 화약을 공간적으로가 아니라 시간적으로 나누어야 한다. 이는 단위부피당 천공수를 늘리거나 공내 장약을 분산시킴으로서 이루어질 수 있다. 어느 쪽이든 비용이 더 들고 작업은 더 어려워지며 추가 발파를 해야하거나 발파작업이 더 길어지게 된다. 발파 횟수가 증가하면서 인근의 재산권을 성가시게 할 뿐만 아니라 사고의 가능성도 한층 높아지게 된다. 그러므로 허용진동수준(단당 장약량)을 줄이면 실질적인 애로와 위험성이 증가하는, 최적 조건이 있을 것이다. 즉, 발파특성에 따른 최적 허용 진동치를 찾아 이를 발파설계에 이용하자는 것이다.

본 연구는 국내에서 이루어지는 수중발파의 특성을 연구하여 다른 특성과 비교 분석함으로서 수중발파의 진동이 구조물에 미치는 영향을

검토하고 최적 조건을 추정하려는데 도움을 주려고 한다.

2. 본 론

2.1 암석의 성질

(1) 지형 및 지질

본 수중발파 현장은 부산 사하구 구평동 감천항 지내에 위치하며 한국전력공사가 발주한 부산 복합 화력 발전소 건설 공사 중 냉각수로 및 배수구 축조 공사로 발파를 통한 수중 암반 굴착을 한다.

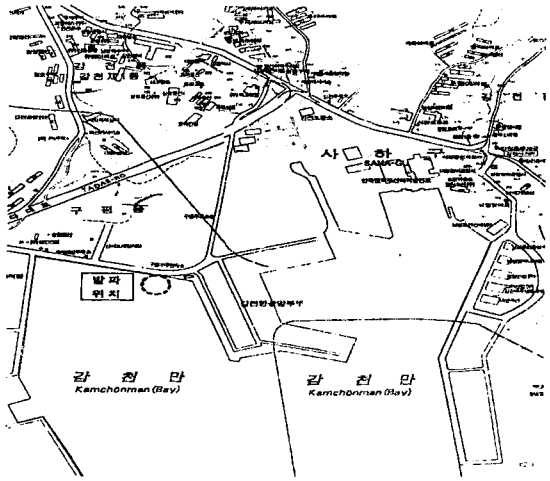


그림 1. 수중발파 현장 위치도

이 지역일대의 지형은 해발고도는 높지 않으나 산사면의 경사가 가파른 편이며 이는 화산암류가 분포하는 지역에서 특징적으로 나타나고 있다. 능선의 발달은 변성암류 분포지에서와 같은 규칙성을 찾아볼 수 없으며 곳곳에 고립된 형태로 불규칙적으로 산재분포를 보이고 있다.

지질은 백악기 유천층군에 해당하는 안산암류이다. 암갈색, 암녹색을 띄는 본 암류는 대부분 괴상이고 반상조직을 가지는 반상안산암으로 송도 등 국부적인 지역에서 치밀한 안산암상을 보여 주기도 한다. 산출상태를 보면 암녹색을 띄는 반상안산암은 풍화정도가 약하고 신선한 상태를 보이고 있으며, 암갈색을 띄는 안산암은 풍화정도가 심하며 균열과 절리가 발달되어 있는 것을 알 수 있다. 발파대상 대부분의 암반은 매우 신선하고 절리가 거의 없는 균질의 세립질 안산암을 기반암으로 하고 있어서 발파시 파쇄율이 부진하여 대괴 발생이 매우 높아 발파효율이 부진할 것으로 평가되는 곳이다.

(2) 수중발파의 목적 및 주변 현황

본 현장은 부산 사하구 구평동 감천항 지내에 위치하며 한국전력공사가 발주한 부산 복합 화력 발전소 건설 공사 중 냉각수로 및 배수구 축조 공사로 발파를 통한 수중 암반 굴착을 한다

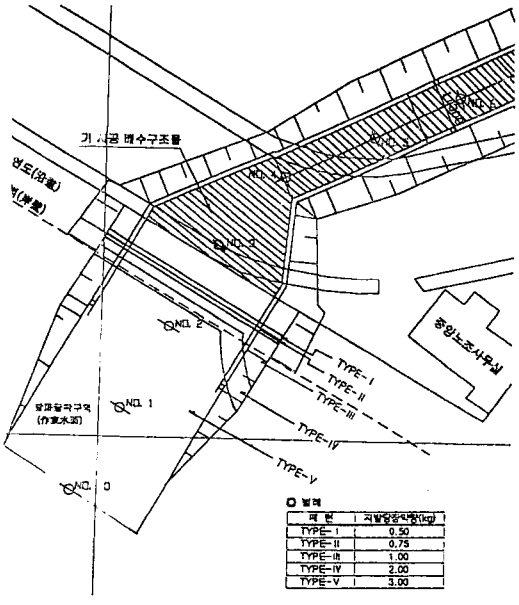


그림 2. 수중발파 현장 주변도

발파현장인 작업 수면과 인접하여 사무실 건물과 항만 시설물 등이 위치하고 있으며, 발파 경계구역과의 최소 이격거리는 다음과 같다.

중앙노조 사무실(2F)건물과 25m거리, 기 시공된 배수구조물(한전구조물 box)와는 1m거리, 정박중인 목재 수송선과는 30m거리에 위치한다.

(3) 암석의 역학적 성질

가. 암석시료 및 시험편 제작

실험실시험에서 사용한 암석시료는 조사부지의 대표적인 암종을 채취하기 위해 발파된 암석을 채취하였다.

암석시험편은 괴상암석시료로부터 원주형 암석시료를 코아링하고 다이아몬드톱으로 절단한 뒤 성형 A/S 평면 연삭기를 사용하여 단면의 오차가 0.05mm 이내가 되도록 연마하였다. 압축 시험용 암석시험편의 크기 및 형태는 단면이 축에 직각인 지름 55.30mm, 길이 104.07mm로 제작하였다. 시료코아 치수는 캘리퍼스로 측정하였다.

나. 시료의 일축압축강도 및 탄성파 시험 방법

암석에 대한 일축압축강도의 측정에는 UNIVERSAL TESTING MACHINE을 사용하였다. 파괴하중을 P Kg, 압축력을 받는 시험편의 단면적을 A㎠라 할 때, 일축압축강도 бc는 бc = P/A 식으로 구해진다.

탄성파 전파 속도시험은 시험편을 탄성파가 통과하는데 소요되는 시간을 측정하여 탄성파 전파속도와 동적 특성을 구하는 비파괴 시험이다. 여기에 사용된 측정기기는 SONIC VIEWER (OYO)이다. 시험편을 발신기(Pulse generater)에 연결된 송·수신자 (Transmitting &Receiving transducrt) 사이에 끼우고 적당히 가압하여 탄성파가 송신자로부터 시험편을 거쳐 수신자에 이르는데 소요된 시간을 Oscilloscope 상의 파형으로부터 계측하여 탄성파 전파속도를 결정한다.

다. 실험결과

대표적인 암석의 물리적 , 역학적 시험결과는 표 1과 같다. 토목공사에 영향을 주는 것은 암석자체 보다는 암반의 특성이 더 직접적인 것으로 암석의 강도가 큰 경우라도 절리, 파쇄대 등의 불연속면의 영향으로 암반으로서의 강도가 약해진다.

표 1. 암석 시료의 역학적 성질

일축압축강도 (kg/㎠)	탄성파속도 (㎞/sec)
1865.6	5.76

2.2 수중발파와 진동 계측

(1) 수중발파 이론

가. 수중발파

수중발파는 장약법에 따라 3가지로 구분된다. 수중에 폭약을 매어 단 형태의 수중 현수막 발파와 수중의 암반이나 구조물 표면에 폭약을 부착하는 수중 부착 발파, 수중의 암반이나 구조물 내부에 천공을 하여 천공속에 폭약을 장전하여 발파하는 수중천공 발파로 구분된다.

수중발파를 하기 위해 수중에 천공 발파법을 행하는 경우에 화약류는 지반 내부에서 폭발시키게끔 되어 있기 때문에 폭발에 의해 발생하는 응력파는 지반 속을 전파해 간다. 이 응력파는 대부분 대상 지반의 파쇄에 관여하지만, 일부는 파괴권을 넘어서 지반 내부를 전파해 가고 그 방향에 따라서는 지반과 물과의 경계면에 도달하는 것도 있다. 이와 같이 지반과 물과의 경계면에 이르는 응력파는 거기서 정해진

법칙에 따라 압력을 수반하면서 일부는 지반내에 반사하여 되돌아가고, 또 다른 일부는 수중에 투과하여 충격파(압력파)가 되어서 수중을 전파해 간다. 수중 천공 발파에 의해 수중에 생기는 충격파 안에 이 같은 경로를 거치면서 전파해 가는 충격파를 일반적으로 지반을 충격파라 이름 붙이고 있다.

더욱이 화약류가 폭발하면 그 장약량에 맞추어 다량의 고온고압가스가 생성된다. 이 가스는 지반에 얼마간의 파괴가 발생하기까지는 장약공 안에서 밀폐된 상태로 주위의 지반에 대해서 강한 압력을 작용시키지만, 지반이 파괴되어 감에 따라 팽창하고 외부로 향하여 빠르게 진행해 나아가게 된다. 그렇지만, 발파에 의해 가장 빨리 파괴되기 쉽고 저항이 약한 곳은 최소저항선 방향이고, 특히 수중 천공발파에서는 발파공이 수직 아래쪽으로 천공되는 경우가 많으므로 이 발파공 방향이 가장 빠르게 파괴되는 방향이 된다. 따라서 폭발생성가스 대부분은 먼저 최초로 발파공 방향으로 불어올라 수중에 투사된다. 이것 때문에 투사된 에너지에 의해 수중에 새로운 충격파가 발생해서 전파해 나간다.

수중발파에 있어서 폭발 에너지는 지반파쇄에 쓰여진 후 나머지는 그 대부분이 수중충격파의 생성에 쓰여지고 있다는 것이 육상발파의 경우와 크게 다른 점이다. 그리고 수중에서 충격파는 감소하기 어려우므로 생성된 수중충격파는 상당히 먼 곳까지 전파해가며, 예를 들면 전방에 있는 그 외의 구조물에 충격을 가하여 지반진동을 일으키는 경우도 발생한다. 또, 수중발파가 육지와 배 가까운 곳에서 실시된 경우에는 수중의 저지반을 통해서 직접 육지로 전파해 가는 파동(주로 탄성파)이 생기게 된다.

수중발파의 과장약으로 인해 수반되는 지반진동에 관해서는 충분히 주의가 필요하며, 수중발파에서 진동수도 육지에서보다 낮기 때문에 진동크기가 작더라도 더욱 주의가 필요하다.

또, 수중발파의 대상이 되는 지반은 수중에 있고, 파동이 전파해 오는 수면 주위의 지반은 대개 포화 함수 상태에 있는 것으로 생각되기 때문에 그러한 지반에서는 진동이 커질 가능성이 있다는 것을 주의 깊게 고려해 두어야 한다.

나. 일반 발파와 수중발파의 차이점

수중이라는 상태에 있는 수중발파는 수심에 따라 수압이 증가하기 때문에 발파대상이 되는 지반특성에 영향을 미친다는 점과 발파에 의해 파쇄된 암편의 비산에 대해 영향을 미친다는 점을 생각해야 한다.

동일 체적당 장약량을 사용한 경우 육상발파에 비해 발파 효과가 대단히 나쁘므로, 수중발파는 대부분 과장약을 하게 된다. 발파진동은 포화 함수 상태에 있는 지반을 통과하므로 이러한 지반에서는 지반진동이 커질 가능성이 있다. 또, 발파 주파수의 형태도 육상에서의 발파보다 진동수가 더 작게 나타난다.

(2) 대상지역 사용 폭약에 대한 일반적 사항

발파진동은 폭약에너지의 충격파에 의한 동적 파괴의 경우에 충격파가 지반에 전달되어 탄성파의 형태로 지표면이나 구조물에까지 전파되어 온 것이므로 폭약의 종류와 폭속은 발파진동에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

수중발파는 소할이 어렵고 되도록 한번에 바닥면을 골라야 하며, 천공 오차가 크고 물과 수압으로 인해 발파효과가 나쁘다는 것 때문에 공간격을 좁히고 화약량을 많이 하여 불발이 있어도 유폭 되게 설계한다. 이에 파쇄의 효과를 높일 수 있는 폭약으로는 다이너마이트(Himite 6000)를 사용하였다.

뇌관으로는 전기를 사용치 않는 비전기식 뇌관을 사용하였다.

(3) 발파 설계 및 현장 작업

가. 발파 패턴 적용

부산복합화력 배수구 구조물 기초굴착을 위한 수중발파는 발파 지점에서 약25m 근접한 중앙노조건물에 대해 발파진동과 소음의 영향을 줄이기 위해 소규모 진동제어발파로 설계되었으며, 계측 기간중 Type-Ⅳ(지발당 장약량 2Kg), Type-Ⅴ(지발당 장약량 3Kg) 발파 pattern에 따라 발파가 진행되었다.

이 구간별 발파 pattern 설계는 그림 7 및 그림 8과 같이 되어 있으나, Type-Ⅰ~Ⅲ구간의 발파 pattern 은 1발파 벤치높이가 0.7~0.8m로서 전체 벤처높이 약 6m를 발파하기 위해서는 8~9회의 발파가 필요하므로 공기가 많이 소요된다. 따라서 공기단축을 위해서는 1발파 벤치 높이를 약3m로 하여 2회 정도 발파를 시행할 필요가 있으며. 이를 위해서는 분산장약 발파방법이 효과적이다.

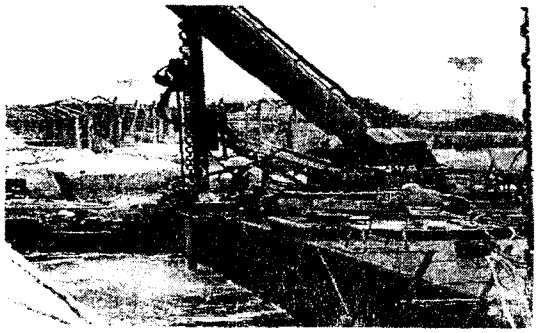


그림 3. 수중 발파 현장 천공 작업

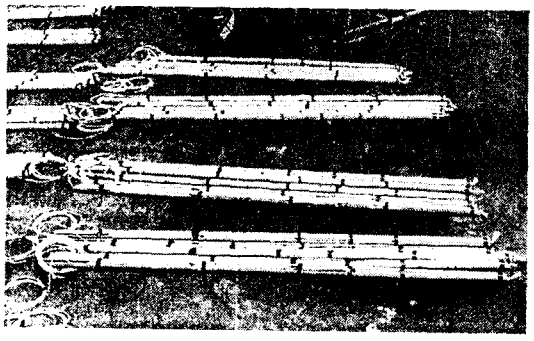


그림 4. PVC 파이프를 전폭약포 제작

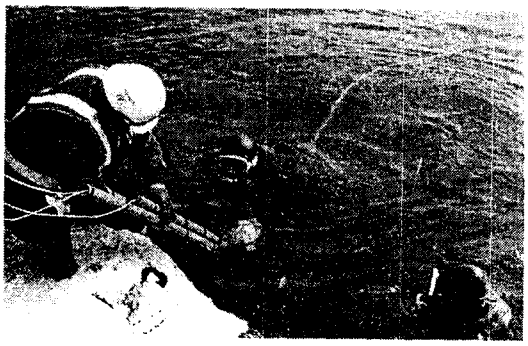


그림 5. 다이버를 이용한 폭약 장전

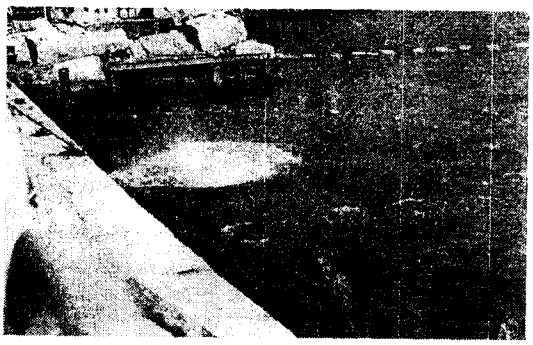


그림 6. 수중 발파

표 2. 구간별 발파 PATTERN 요약

	Type -Ⅰ	Type -Ⅱ	Type -Ⅲ	Type -Ⅳ	Type -Ⅴ
천공경 (mm)	45	45	75	75	75
벤치 높이 (m)	0.7	0.6	0.8	1.2	2.0
천공 길이 (m)	1.2	1.2	1.5	2.0	3.0
저항선 (m)	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
천공 간격 (m)	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
약량 (Kg)	0.5	0.75	1.0	2.0	3.0

나. 현장 작업

바지선을 모선으로 이용하고, 가이드를 설치

한 크로라 드릴을 이용해서 천공을 하였다. (그림.3 참조) 천공경은 ϕ75mm이고, 공깊이 3m, 공간격 1m*1m로 천공하였다.

뇌관은 수중에서도 지장을 받지 않는 비전기 뇌관을 사용하였다.

장약은 ϕ50mm인 PVC파이프에 사전에 준비된 전폭 약포와 매지로 장약 페턴대로 사전에 구성한다.(그림 4 참조) 잠수부를 통해 준비된 PVC통을 천공구멍에 삽입한다.(그림 5 참조)

부산복합화력 배수구 구조물 기초굴착을 위한 수중발파는 발파 지점에서 약25m 근접한 중앙노조건물에 대해 발파진동과 소음의 영향을 줄이기 위해 소규모 진동제어발파로 설계되었으며, 분산장약 발파 페턴 Type-Ⅳ (지발당 장약량 2.5Kg)와 분산장약 변형 페턴 Ⅳ, 설계 페턴 Type-V(지발당 장약량 3Kg), 변형 페턴 V(지발당 장약량 2kg)에 따라 발파가 진행되었다.

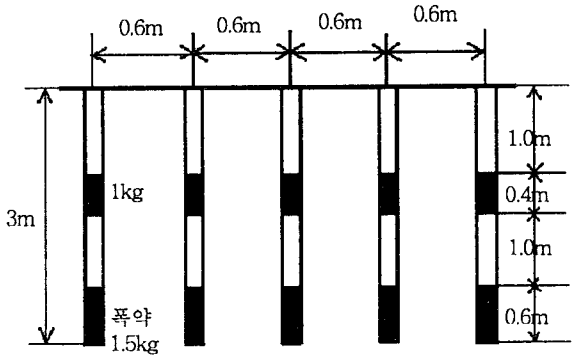


그림 7. 수중 분산장약 발파 패턴 Ⅳ

분산 장약 패턴-Ⅳ는 공간격이 0.6m이고, 장약량은 2.5Kg으로 분산장약을 했다. 상, 하 폭약의 유폭을 방지하기 위한 전색장은 1m이고, 상부 전색장도 1m이다.

약장은 상, 하 각각 0.4와 0.6m이고 뇌관은 비전기 뇌관을 사용하였다.

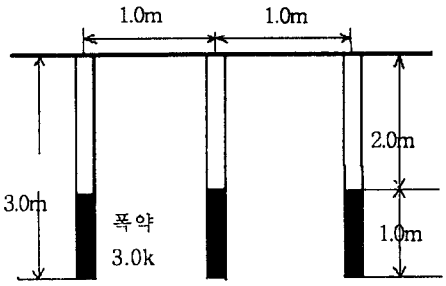


그림 8. 수중 발파 패턴 V

수중발파 패턴-V는 공간격 1m이고, 약량은 3Kg으로 집중장약을 하였다. 전색장은 2m이고 약장은 1m이다. 뇌관은 비전기 뇌관을 사용하였다. 일반 노천 천공발파의 경우 비장약량이 0.24 ~ 0.37 kg/m³의 분포를 보이나 수중발파의 비장약량은 0.6 ~ 2.3 kg/m³를 나타낸다. 일반 발파에 비해 과장약량임을 나타내 주고 있다.

(4) 측정기기 및 측정 방법

본 연구에 사용된 측정기기는 캐나다 INSTANTEL 사에서 제작된 BLASTE MATE (DS시리즈)이며, 대상지반에서의 지반진동에 영향을 받고 있는 구조물의 진동수준을 계측하였다. DS-시리즈(477,677)는 2-100Hz의 지반진동을 측정하고 또한 동시에 발파에 의해 발생되는 폭풍압을 측정할 수 있는 계측기기이다.

그림 9. 발파 진동 및 폭음 측정기기

2.3 계측 결과 검토

현재까지 국내에서는 발파진동에 대한 평가시 최대진동속도 (Peak Particle Velocity)에 대한 고려가 주로 되어 왔으나 최근의 경향은 최대진동속도와 동시에 발생 주파수에 대한 검토가 동시에 이루어지고 있다. 즉. 같은 크기의 진동속도에서도 주파수의 발생대역에 따라 피해의 정도가 달라 질 수 있다고 볼 수 있다.

진동주파수 측면에서 자연지진이 통상 1~5 Hz 정도의 저주파인데 비하여 지금까지의 연구결과(Crenwelge, 1988)에 의하면 발파진동의 주파수는 0.5~200 Hz의 범위 내에 존재한다. 주 주파수를 최대진동속도가 발생할 때의 진동파에 대한 주파수로 정의할 때, 주 주파수의 발생대역은 발파시의 환경, 즉 노천발파, 채석장, 토목 건설현장 등과 같은 발파지역의 특성과 장약량 및 측정거리와도 밀접한 관련이 있다고 알려져 있으며 주 주파수의 발생대역 변화는 지반의 불연속 및 절리등 암반 상태에도 크게 영향을 받는다.

주 주파수의 발생 대역을 결정하기 위해서는 발파진동의 파형을 측정하여 이로부터 최대 진동속도가 나타나는 부분의 주파수를 직접 계산하는 방법과 진동의 속도와 주파수의 변화를 상대진동속도 대 주파수 그래프로 도시하는 퓨리에 주파수 스팩트럼(Fourier frequency spectrum)을 작성하여 가장 큰 진동속도대의 주파수 범위를 분석하는 방법 등이 있다. 최근에 국내에서 사용되는 대부분의 진동 측정기는 기기 내에 분석모듈이 내장되어 있어 주 주파수 대역을 자동적으로 산정 후 출력할 수 있다.

발파작업으로 인한 지반진동의 주파수는 주로 진동의 파형과 발파의 심도에 크게 좌우되는데 건물과 같은 지상구조물의 고유주파수(natural frequency)가 발파에 의한 진동의 주 주파수와 공진현상을 보이게 되는 경우 매우 심각한 피해가 예상되기도 한다.

구조물의 고유주파수는 건물의 높이, 폭등에 따라 다르나 대체로 1층 건물일 경우 약 10Hz 내외, 2층일 경우 5Hz 내외의 값을 갖는 것으로 추정된다.

대체로 구조물의 높이가 높아질수록 저주파대역으로 이동하므로 지진파와 같은 저주파대에서 취약성을 나타내며 전달거리도 저주파일수록 멀리까지 도달되는 것으로 알려져 있다.

구조물의 균열을 측정하기 위하여 구조물에 크랙게이지를 부착한 후 약 6개월의 기간에 8곳의 균열을 5회 측정하였다.

대상 구조물 8곳의 크랙을 조사한 결과 다음의 표 3과 같았다.

표 3. 수중발파 진동 대상 구조물의 크랙게이지 측정자료 (단위 : mm)

번호	부착 위치	1회 99. 12.29	2회 00 .1.28	3회 00. 2.21	4회 00 .4.3	5회 00. 6.3	편차
G1	1층 휴게실 벽체	87.46	87.46	87.49	87.46	87.42	-0.04
2	1층 현관 벽체	87.02	87.02	87.03	87.01	86.98	-0.04
3	2층 계단 벽체	88.86	88.86	88.85	88.85	88.84	-0.02
4	옥상 출입구 벽체	78.23	78.24	78.26	78.24	78.24	+0.01
5	옥상 난간 벽체	111.04	111.05	111.06	111.05	111.04	-
6	건물 외벽 측면(1)	112.15	112.16	112.15	112.13	112.14	-0.01
7	건물 외벽 측면(2)	113.57	113.57	113.56	113.57	113.57	-
8	건물외벽 후면	85.66	85.66	85.64	85.66	85.66	-

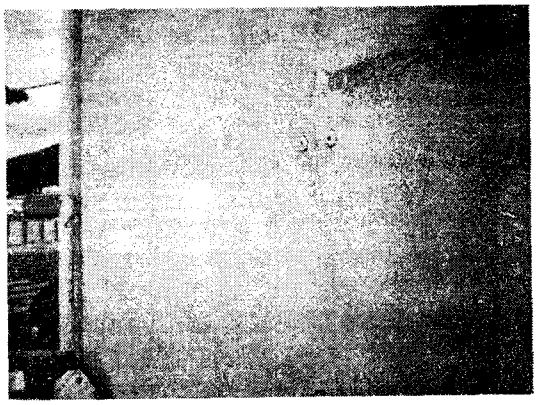


그림 10. 구조물 좌측 외벽 크랙게이지

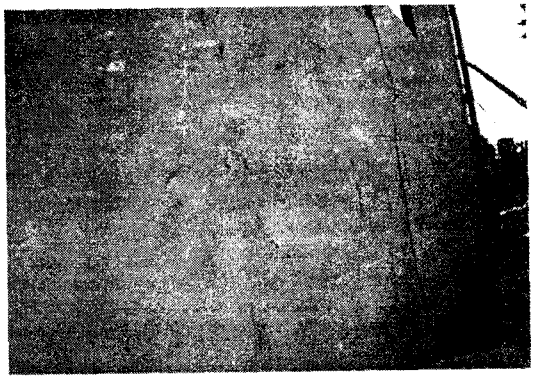


그림 11. 구조물 우측 외벽 크랙게이지

8곳의 변위 측정 장소 중 5곳에서 변위가 있었으나 이는 허용 계측오차 0.04mm 범위내에 있는 것으로, 발파로 인한 건물의 변위는 별다른 변위가 없는 것으로 나타났다.

삼승근을 이용한 수중발파 추정식을 구하면 그림 12와 같다. 삼승근을 이용한 회귀식은 $V=2884*(SD)^{1.74}$ 으로 점선이며, 95% 신뢰구간 추정식은 $V=4287*(SD)^{1.74}$ 으로 실선이다. 발파 추정식으로는 95% 신뢰추정식을 사용한다.

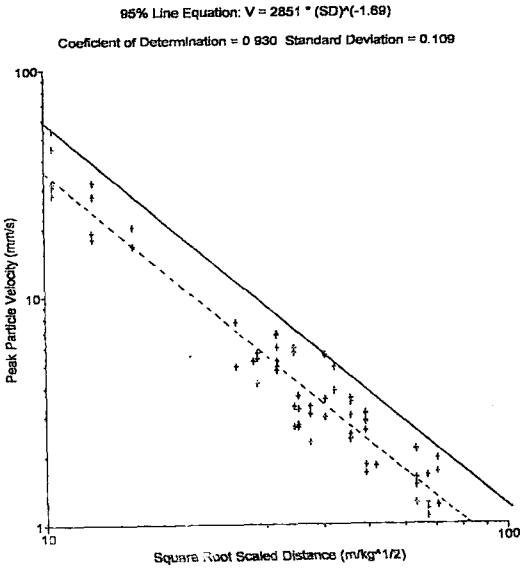


그림 12. 삼승근을 이용한 수중발파 진동 추정 그래프

자승근을 이용한 수중발파 추정식을 구하면 그림 13과 같다.

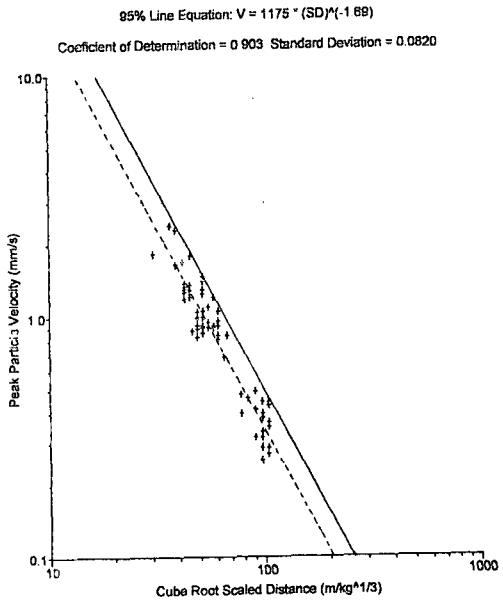


그림 13. 자승근을 이용한 수중발파 진동 추정 그래프

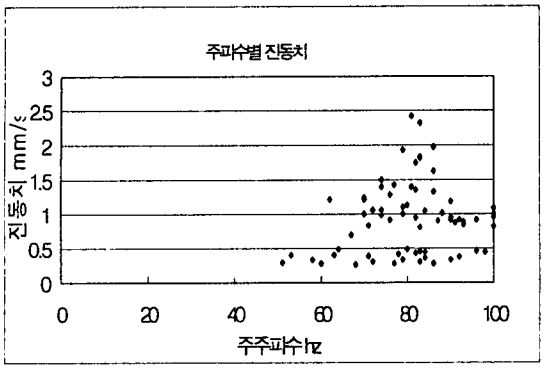


그림 14. 수중발파의 주주파수별 진동크기

수중발파의 주주파수영역은 25~55 hz로 나타나며, 근거리에서도 이와 같이 나타난다.

수중발파를 정리하면 다음과 표 4와 같다.

표 4. 수중발파의 k, n 값

삼승근 적용				자승근적용			
K	N	결정계수	표준편차	K	N	결정계수	표준편차
4287	-1.74	0.937	0.103	2851	-1.69	0.93	0.109

삼승근을 이용한 노천발파의 진동추정식을 구하면 그림 15와 같다. 삼승근을 이용한 회귀식은 $V=1175*(SD)^{1.69}$ 으로 점선이며, 95% 신뢰구간 추정식은 $V=856*(SD)^{1.69}$으로 실선이다. 발파 추정식으로는 95% 신뢰추정식을 사용한다.

자승근을 이용한 진동추정식을 구하면 그림 16과 같다. 자승근을 이용한 회귀식 $V=1874*(SD)^{1.69}$ 으로 점선이며, 95% 신뢰구간 추정식 $V=2851*(SD)^{1.69}$ 으로 실선이다. 발파 추정식으로는 95% 신뢰추정식을 사용한다.

노천 발파의 주주파수 영역은 65~95 Hz사이로 나타났다. 진동치가 상대적으로 높은 잔동치의 주주파수도 75-85 Hz사이로 나타났다.

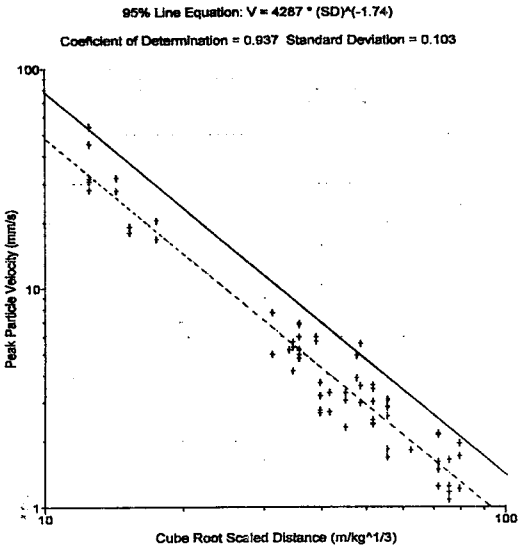


그림 15. 삼승근을 이용한 노천 발파 진동 추정 그래프

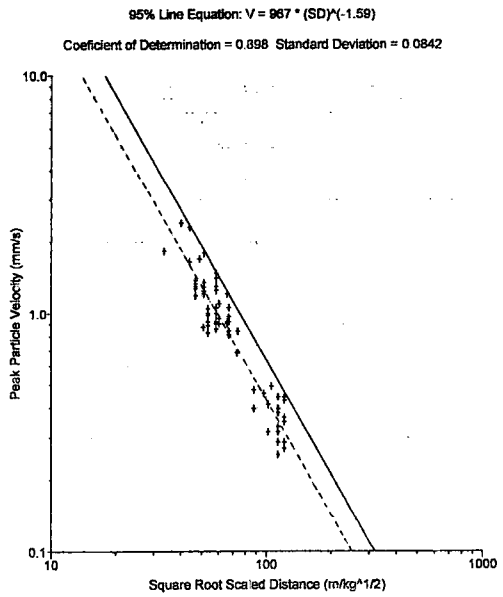


그림 16. 자승근을 이용한 노천 발파 진동 추정 그래프

도심지 발파의 진동추정식을 정리하면 표 5와 같다.

표 5. 노천발파의 K, N 값

삼승근 적용				자승근적용			
K	N	결정 계수	표준 편차	K	N	결정 계수	표준 편차
1175	-1.69	0.903	0.082	967	-1.59	0.898	0.0842

노천 발파의 주주파수를 분석하면 다음과 같다.

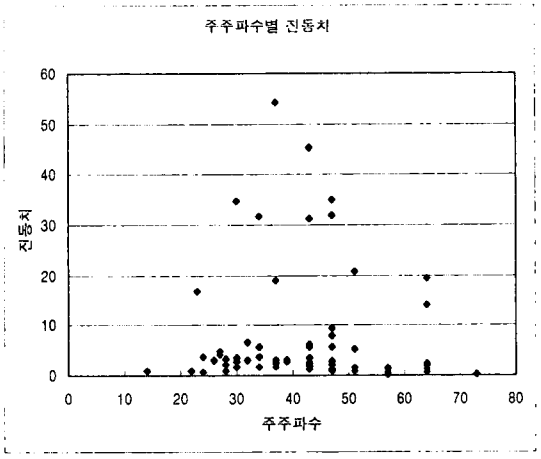


그림 17. 노천 발파의 주주파수별 진동크기 분석

수중발파와 도심지 노천발파의 자승근, 삼승근 교차분석을 하면 그림 18 및 19와 같다.수중발파의 경우 60m의 지점에서 삼승근과 자승근의 교차점이 나타난다.

노천발파에서는 22m 지점에서 삼승근과 자승근의 교차점이 나타난다.

수중발파의 경우 60m 지점과 도심지 발파에서는 22m 지점을 기준으로 이하에서는 삼승근을 이후에서는 자승근을 적용하는 것이 추정에 용이하다.

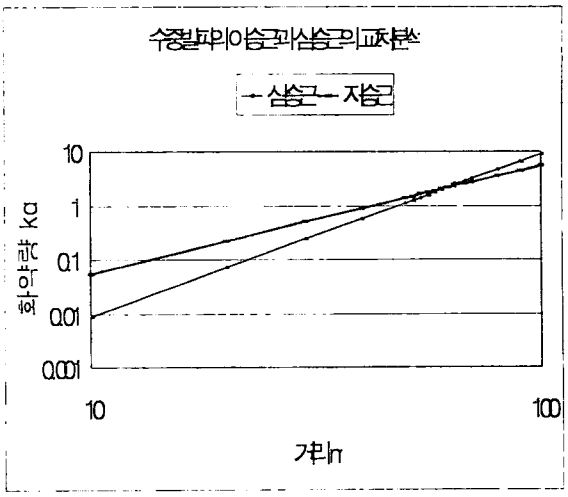


그림 18. 수중발파의 삼승근 자승근 교차분석

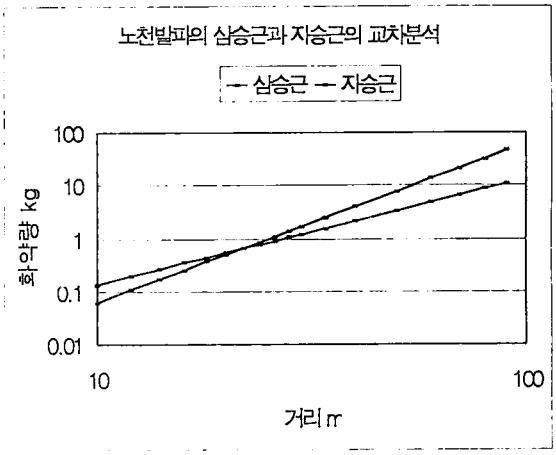


그림 19. 노천발파의 삼승근,자승근 교차분석

수중발파와 노천발파의 주파수를 비교하면 그림 20 및 21과 같다. 수중발파와 노천발파의 주주파수를 비교해보면, 수중발파의 주주파수대는 25~ 55Hz 사이로 전체의 75%가 집중하여 나타나지만 노천발파의 경우 65~ 95Hz 사이가 80%가 나타난다. 특히, 수중발파의 경우 거리가 가깝고 진동치가 큰 주주파수는 30~ 50Hz 사이에 있었다.

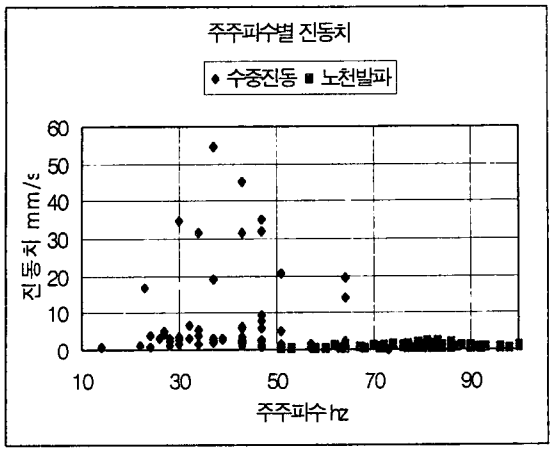
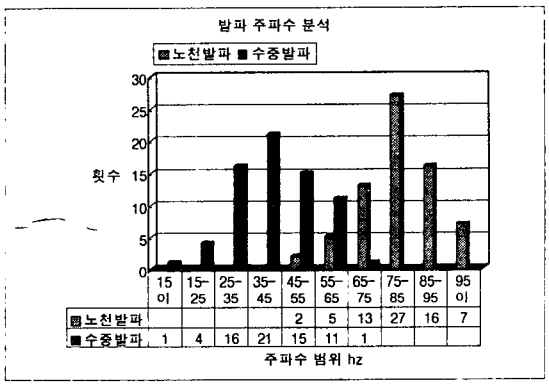


그림 20. 발파 주주파수별 진동치 비교



	15 이	15-25	25-35	35-45	45-55	55-65	65-75	75-85	85-95	95 이
▨노천발파					2	5	13	27	16	7
■수중발파	1	4	16	21	15	11	1			

그림 21. 발파주파수 비교 분석

노천발파의 경우 주주파수대는 65~ 95Hz 사이로 80%가 집중하여 나타난다. 그림 21에서와 같이 노천발파에 비해 수중발파가 저주파수로 나타났다. 진동값도 수중발파가 노천발파에 비해 더 높게 나타나고 있다.

수중발파와 노천발파의 진동추정식을 비교해 보면, 삼승근을 기준으로 감쇠율은 -1.74 및 -1.69로 비슷한 경향을 보이나, 발파진동상수는 4287과 1175로 큰 차이를 보인다. 수중발파와 노천발파의 진동추정식을 그래프로 표현하면 그림 22와 같다.

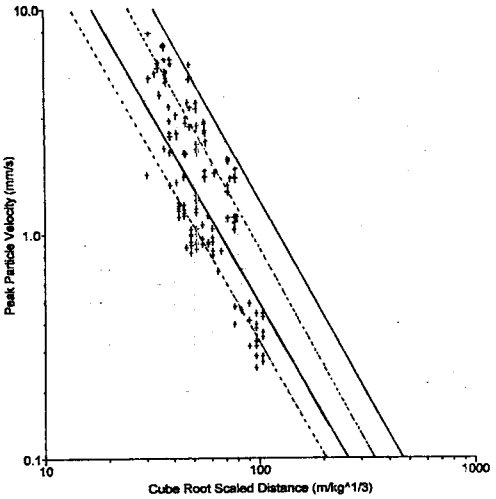


그림 22. 수중발파와 노천발파의 진동추정 그래프 비교

3. 결 론

수중발파에서의 진동크기 및 진동수에 대해서 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 진동크기는 동일한 거리 50m로 가정하고 동일한 지발당 장약량일 경우 화약량 1kg일 때 수중발파의 경우 4.7mm/s이고, 노천발파의 경우 1.2mm/s로 수중발파의 진동이 일반노천발파의 진동보다 크게 증가한다.

2) 진동수는 수중발파의 경우는 대개 25~55Hz가 가장 많은 분포를 보였고 일반노천 발파는 65~95Hz가 가장 분포도가 높았다. 따라서 일반노천발파 보다 수중발파가 저 진동수를 나타냈다.

3) 진동 추정식에서 자승근과 삼승근의 차이를 분석한 결과 수중발파는 약 60m지점에서 일반노천발파는 약 22m지점에서 각각 삼승근에서 자승근 식으로 변화되어 이들 지점이후에서는

자승근 식의 적용을 시키는 것이 진동추정이 더 용이한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 강대우 "알기쉬운 발파공학" 구미서관 pp. 288 ~ 296(1999).
2. Charhles H. Dowding "Blast Vibration Monitoring and Control" 양형식 역 pp.10~17(1995).
3. 토지개발공사, "岩發破 設計技法에 관한 연구", pp.254-256, pp.257, pp.301-304.
4. 심동수, "터널. 발파기술자를 위한 발파실무", pp.262-263.
5. 기경철, 김일중 "발파공학" 기공사 pp. 167-168(1999).
6. 강대우 "알기쉬운 발파공학" 구미서관 pp.263~265(1999).
7. Stig O Olofsson "Applied Explosives Technology for Construction and Mining" Printed by Nora boktryckeri AB, pp.202, pp.201.
8. Uif Langefors & Bjorn Kihlstrom, "The Modern Technique Rock Blasting" AWE/GEBERS, Stockholm, pp.265(1978).
9. K-G. Hinzen, "Modeling of Blast Vibrations" pp.439-446(1998).
10. E,I. Dupont DC Ncmours & Co, Inc.(Wilmington, DE), "Blaster's Handbook", 16th ed, 1978, pp.494.