



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

방음구조 설계를 위한 이중금속
특수접합공법의 충격 소음 특성 분석



건 축 공 학 과

정 성 근

공 학 석 사 학 위 논 문

방음구조 설계를 위한 이중금속
특수접합공법의 충격 소음 특성 분석

지도교수 임 영 빈

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2011년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

건 축 공 학 과

정 성 근

정성근의 공학석사 학위논문을 인준함.

2010년 12월 17일

주 심 공학박사 정 근 주 (인)

위 원 공학박사 이 수 용 (인)

위 원 공학박사 임 영 빈 (인)



목 차

1. 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 범위 및 방법	2
2. 충격소음 이론 고찰	4
2.1 충격 소음의 정의 및 특성	4
2.2 폭발 조건에 따른 분류	7
2.3 발파진동과 소음의 차이점	11
2.4 폭발 소음 측정 및 평가 방법	12
2.4.1 센서의 선정	12
2.4.2 평가 단위	12
2.5 폭발소음의 예측 방법	13
2.6 발파소음 허용기준	16
2.6.1 국내 기준	16
2.6.2 외국 기준	19
3. 현장 발파 소음 측정 및 시뮬레이션	21
3.1 측정 시스템	21
3.2 1단계 시험 발파	25
3.3 2단계 근거리 측정	27
3.4 3단계 발파소음 음향시뮬레이션 및 현장측정	35
3.4.1 발파소음 시뮬레이션	36
3.4.2 소음 실측 및 비교	38

4. 폭발소음 차단을 위한 방음구조 설계	39
4.1 방음구조 설계 개요 및 조건	39
4.2 방음설계 목표수준 결정	40
4.3 방음 대책 설계	42
5. 결 론	44
참고 문헌	46
Abstract	50
감사의 글	52



표 목 차

표 1. 폭풍압 크기에 의한 구조물 및 인체 반응	6
표 2. 발파진동과 발파소음의 차이점	11
표 3. 충격소음작업의 정의(산업보건기준에 관한 규칙)	16
표 4. 배출소음 규제 기준	17
표 5. 생활소음 규제 기준	18
표 6. 구역별 충격소음 기준	19
표 7. 충격소음 권장기준	20
표 8. 2단계 근거리 폭발압력 및 소음 측정 결과	28
표 9. 음원 입력 data	36



그 립 목 차

그림 1. 폭약을 이용한 이중금속 특수접합 공법의 개념	3
그림 2. 충격음의 시간 특성	5
그림 3. 폭발 조건에 따른 구분	7
그림 4. 해수면 높이 공중 폭발시 환산 거리별 TNT 폭발압력	8
그림 5. 해수면 높이 공중 폭발시 구형 및 반구형 TNT 입사압 비교	9
그림 6. 공기중 폭발 환경	10
그림 7. 공기중 폭발의 시간별 폭발압력 변화와 입사파 • 반사파 비교	10
그림 8. 동압력 센서의 종류	12
그림 9. BNOISE2 소음평가 사례	15
그림 10. 측정 시스템 개요	22
그림 11. 측정 시스템(데이터 레코더 및 신호 증폭기)	22
그림 12. 센서 설치 모습	23
그림 13. 폭발 전경	23
그림 14. 마이크로폰 사양	24
그림 15. 동압력 센서 사양	24
그림 16. 개활지 폭발소음 측정 결과	26
그림 17. 환산거리 Z 와 폭발 압력과의 관계	29
그림 18. UFC Code 와 실측값 비교	29
그림 19. 근거리 폭발소음 측정 결과(1회)	30
그림 20. 근거리 폭발소음 측정 결과(2회)	31
그림 21. 근거리 폭발소음 측정 결과(3회)	32
그림 22. 근거리 폭발소음 측정 결과(4회)	33
그림 23. 근거리 폭발소음 측정 결과(5회)	33

그림 24. 근거리 폭발소음 측정 결과(6회)	34
그림 25. 3단계 현장 및 측정 지점	35
그림 26. 예측 모델(1:5000 3차원 수치지도 기반)	36
그림 27. 소음 예측 결과	37
그림 28. 3단계 폭발소음 실측 결과	38
그림 29. 미연방 주택국(FHA)이 권장 STC 기준선	41
그림 30. 단일벽의 음향투과손실 예	42
그림 31. 콘크리트 TL	43



1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

이종금속 특수접합공법은 화약의 폭발에너지를 이용하는 폭발응용 분야의 하나로, 화약의 폭발로 발생하는 높은 충격에너지를 이용하여 하나의 금속(접합재)을 순간적으로 가속시켜 다른 금속(모재)에 충돌시킴으로써 두 소재를 접합시키는 기술이다. 이 때 발생하는 금속 제트(JET)로 인하여 두 금속의 표면에 있는 산화피막이나 오염된 물질을 제거하여 접합에 필요한 청결한 표면을 만들고 동시에 화약의 폭발로 생기는 높은 압력으로 인해 접합 계면에서 두 금속의 원자가 원자간 인력이 작용하는 거리까지 접근함으로써 금속학적인 접합이 이루어지게 된다.¹⁾

이렇게 접합된 재료는 일반적인 접합 방법에 비해 모재의 전면에 대해 접합이 이루어지므로 화학적, 물리적인 장점이 크기 때문에 각종 산업용, 열교환기, 압력용기, 저장소, 해수담수화 설비, 제지표백 설비 등 민간 분야 및 군수용, 항공기, 우주산업 등 특수 분야에 적용되고 있다. 이와 같이 화약을 사용하는 특수접합작업은 큰 진동 및 소음을 유발하여 주변의 수 km에 이르는 지역까지 소음 관련 민원을 발생시키는 원인이 되는데, 이 민원에 관한 방폭 및 차음구조물 설치 등의 대책을 수립하기 위해서는 우선적으로 폭발 작업 시 발생하는 소음의 특성분석이 필요하다.

따라서 본 연구는 이종금속 특수접합공법 작업 시 발생하는 소음특성을 실제 현장계측 및 음향시뮬레이션기법에 의하여 분석, 제시하고자 한다. 이를 통하여 접합 작업시 발생하는 폭발 소음을 차단하기 위한 방음 구조물 설계의 소음원 자료를 제공하고, 그 주변 지역의 소음영향 저감대책 수립에 기여하고자 한다.

1) DETACLAD(DMC, www.dynamicmaterials.com, 2010.10)

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 특수집합시설 예정지에서 실제 작업에 필요한 20kg이상 규모의 TNT 등가 폭발물이 폭발할 때 발생하는 소음에 관하여 반복 현장계측 및 음향시뮬레이션으로 소음특성을 비교분석 하기로 하였다.

발파 소음의 특성과 영향을 파악하고 대책을 수립하려면 소음원의 크기와 주파수 특성 및 실제 음원과 수음점에 대한 정보가 필요하다. 그러나 일반적인 소음과 달리 msec 단위의 매우 짧은 시간 내에서 발생 후 소멸하는 폭발음의 특성상 충분한 data를 얻기 위한 반복적인 시험이 어려우므로 사전에 측정의 방법 및 절차를 정확히 규정할 필요가 있다. 또 폭발이 주로 옥외에서 이뤄지므로 인구 밀도가 높은 우리나라 특성상 시험지역 인근의 민원 발생 가능성을 고려해 시험에 적합한 지역을 선정하여 민원이 발생하지 않는 수준의 폭발력을 미리 예측하는 것이 바람직하다. 따라서 실제 폭발 횟수는 가능한 한 적게 하면서 data의 정확성은 높일 수 있도록 측정 전 시뮬레이션을 통해 폭발시 예상되는 주변 지역 소음의 크기를 예측하고, 실제 폭발을 통해 시뮬레이션 결과와 비교 및 추가 측정 여부를 결정 하였다.

시험은 총 3단계로 구성하였으며, 1단계는 시험 발파 단계로서 본 측정에 필요한 적정 폭약량 및 측정 시스템 구성 방법을 수립하기 위한 목적으로 주변지역 민원을 고려한 최소 수준의 폭발시 측정을 수행 하였다. 2단계는 음원 data 확보 단계로서, 1단계 시험을 통해 수립한 측정 시스템으로 시험생산 수준의 폭발시 음원에 근접하여 측정을 수행 하였다. 3단계는 2단계에서 확보된 음원 data와 실제 생산시설 예정지의 3차원 수치지도를 활용한 소음 시뮬레이션을 수행하고 실제 발파 작업을 통해 예측 지점과 동일한 위치에서의 측정 data와 비교 평가를 하였다. 마지막으로 3차 평가 결과에 따라 소음 방지 대책이 필요할 경우 법적 기준 만족을 위한 최적 방음 설계안을 도출하였다. 연구 과정별 수행 절차 및 내용을 정리하면 다음과 같다.

- ① 발파소음 특성, 관련 법적 기준 조사 및 허용기준 설정
- ② 1단계 시험 발파
- ③ 1단계 계측 데이터 분석 : 소음레벨 및 주파수 특성 분석
- ④ 본 발파 시험 측정 방법 · 범위 결정
- ⑤ 2단계 본 발파 : 음원 data 획득을 위한 근거리 측정
- ⑥ 2단계 계측 데이터 분석 : 소음레벨 및 주파수 특성 분석
- ⑦ 3단계 소음 시뮬레이션 : 실측 음원 data 및 현장 수치지도를 활용한 예상
민원지역 파악 및 소음 예측
- ⑧ 3단계 본 발파 : 근거리 및 원거리 민원지역 소음 영향 실측 평가
- ⑨ 소음 저감 대책 설계

앞서 언급한 바와 같이 본 연구의 범위는 소음 영향 평가 및 방지 대책으로 한정하며 실제 생산시설의 방폭 구조 설계 적용 여부에 대한 평가는 제외 하였다.

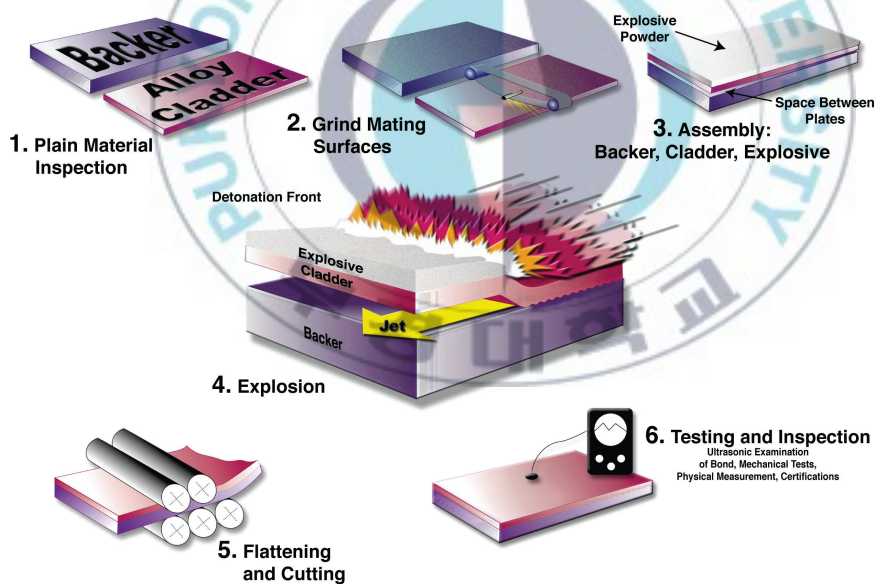


그림 1. 폭약을 이용한 이종금속 특수접합 공법의 개념

2. 충격소음 이론 고찰

2.1 충격 소음의 정의 및 특성

일반적으로 국내에서 볼 수 있는 폭발음은 건설현장의 발파 소음으로, 폭약의 에너지가 파쇄되는 암괴를 통하여 대기중으로 방출되는 압축파에 의해 주로 발생된다. 따라서 본 연구와 같이 암반 중에 천공하여 폭약을 삽입하는 방식이 아니라 지면 위 일정 면적에 폭약을 고르게 분포시켜 폭발 시킬 경우의 소음 특성은 일반 발파소음과 동일하다고 볼 수는 없다. 본 절에서는 일반적인 충격 및 발파 소음의 특성에 대해 알아본다.

ISO 1996-1:2003에서는 TNT 50g 분량을 초과하는 고 에너지 충격음원, 작은 총소리나 햄머 같은 고 충격 소음원 및 종소리, 자동차 문 닫는 소리 같이 앞의 두 분류에 들지 않는 일반적인 충격 소음원 등 3가지로 분류하고 있다.²⁾ ISO 10843:1997은 충격성 소음을 「단일하거나 연속적으로 발생하는 짧은 파열음」으로 정의하고 있고 충격성 소음의 시간적 특성은 급격한 압력의 상승 후의 일정한 감쇠 형태를 나타내는 특성을 가진다.

2) ISO (1996-1 Acoustics –Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 1: Basic quantities and assessment procedures, 2003)

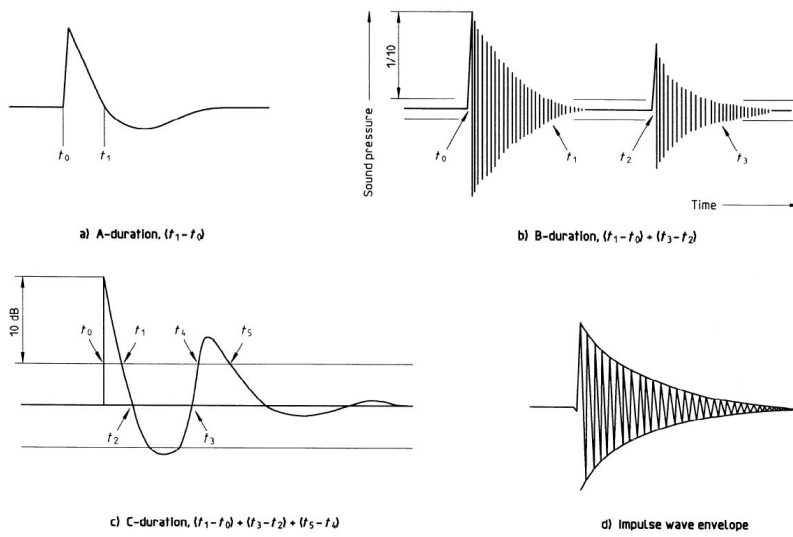


그림 2. 충격음의 시간 특성

이론적으로 delta 함수와 같이 완전한 충격의 주파수 특성은 random noise와 동일하게 전 주파수 대역에서 균일한 에너지 분포를 가지는 형태로 나타난다. 하지만 실제의 경우 충격파형의 상승속도, peak 및 duration이 다르기 때문에 충격 형태에 따라 상이한 주파수 특성을 가지게 된다. 대기 중으로 전파되는 발파음은 0.1Hz에서 200Hz 범위의 저주파 특성을 갖는다. 20Hz이상의 주파수는 가청소음으로 인체에 전달되며 20Hz이하의 초저주파는 귀로 들을 수는 없으나, 비교적 먼 곳까지 에너지의 손실 없이 전파되는 특성이 있으며, 건물과 구조물을 진동시켜서 2차 소음을 발생시킨다. 실제로 지하철의 터널이나 개착구간 발파에서 발파음의 주파수를 분석하면 40Hz이하의 저주파가 우세하며, 풍압 기준으로 110dB(L)이하로 측정되어 건물이나 구조물에 손상을 주지는 않는 정도이지만, 현실적으로 창문이나 문짝등이 덜컹거리는 2차적 영향으로 불쾌감이 많아 인근 주민들은 발파진동으로 오해하여 주된 민원의 대상이 되고 있다.³⁾ 폭음에 대한 구조물 및 인체의 영향은 표 1과 같이 정리할 수 있다.

3) 건설교통부(발파소음·진동허용기준검토(안), 19:2002)

표 1. 폭풍압 크기에 의한 구조물 및 인체 반응 단위: dB(L)

dB (L)	폭 풍 압 (psi)	구조물 및 인체 반응
180	3	←구조물 손상
170	0.95	←대부분의 유리창이 깨어짐
150	0.095	←일부 유리창들이 깨어짐
140	0.030	←피해 한계
130	9.5×10^{-3}	←미광무국 허용 한계치
120	3×10^{-3}	←미광무국 안전 수치
110	9.5×10^{-4}	←고통 한계(고통을 느끼는 시점)
100	3×10^{-4}	←불평 한계 (접시나 창문 흔들림)
80	3×10^{-5}	←안정
60	3×10^{-6}	←일상적대화
20	3×10^{-8}	←속삭임
0	3×10^{-9}	←가청 한계

(1) dB(L) : 음압의 크기, 폭발로 인한 공기압으로 그 크기가 결정된다.

(2) dBA : 주파수별로 감도가 다른 사람의 청감각을 반영하여 보정된 소음.

(3) dB(L)을 dBA로 보정할 때 주파수 영역별 개략적 보정치

주파수(Hz)	20	30	40	50	60	70	80	90	100
소음보정치dB	-50.0	-40.0	-31.5	-29.5	-26.0	-23.5	-22.0	-20.5	-19.0

2.2 폭발 조건에 따른 분류

미 국방부 UFC 3-340-02 에서는 다양한 폭발 조건에 따른 효과를 분류하고 있으며, 폭발 환경에 따라 크게 반사면이 없거나 반사 영향을 주는 구조물의 외부에서 폭발하는 Unconfined Explosion 과 반사 영향을 받는 구조물의 내부에서 폭발하는 Confined Explosion 의 2 종류로 구분하고 있다.⁴⁾

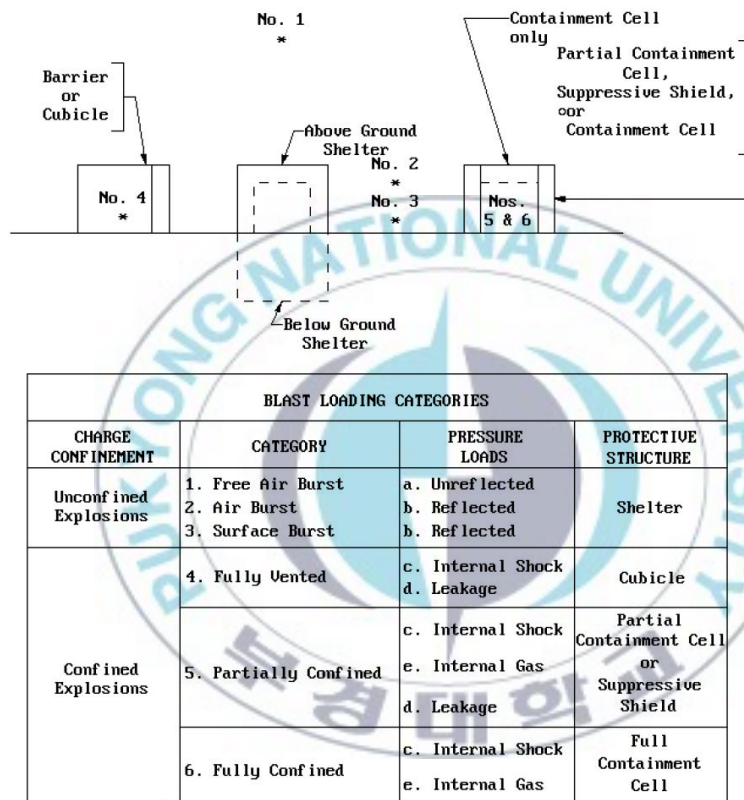


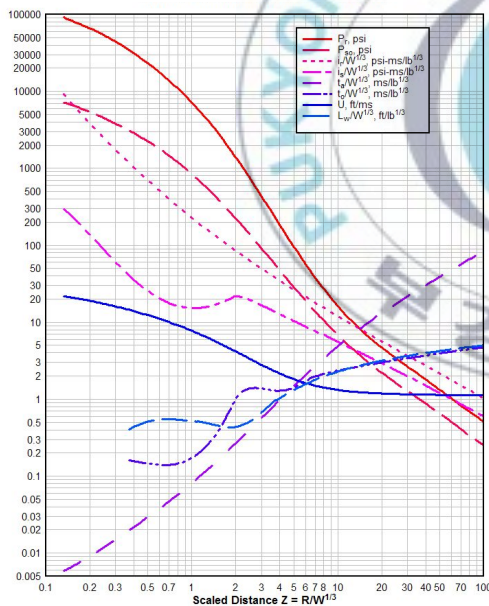
그림 3. 폭발 조건에 따른 구분

4) U.S. DoD(UFC 3-340-02, 41:2008)

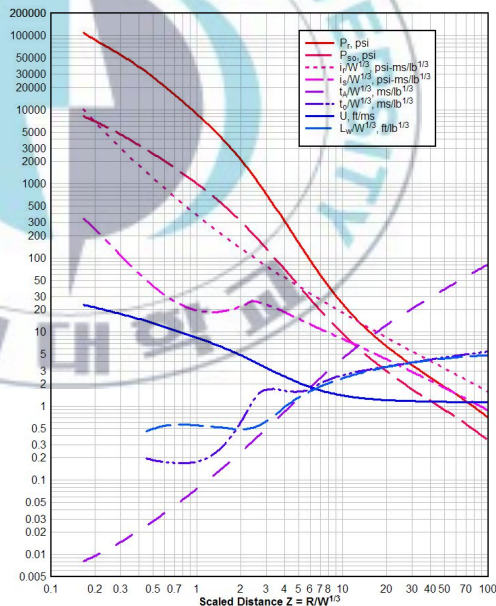
Unconfined Explosion 은 다시 완전한 자유 공간 또는 반사면과 이격된 곳에서 폭발하여 충격파가 가장 먼저 전달되는 공기중 폭발(Air Blast) 과 지면에 매우 근접하여 직접파와 지면으로 인한 반사파의 상승작용이 발생하는 표면 폭발(Surface Blast) 로 구분된다. 본 연구에 적용한 특수접합공법의 경우 Unconfined Explosion 중 표면 폭발에 해당한다.

UFC 3-340-02를 활용하면 화약량과 환산거리를 이용한 거리별 폭발압력을 알 수 있다. 거리별 폭발압력은 폭약량의 1/3 제곱에 반비례하는데 TNT 의 경우 가장 기본적인 구(球)형과 반구형에 대한 폭발력을 비교할 수 있고 기타 폭약 또한 형상에 따른 폭발력 차에 대한 표를 제공하고 있다. TNT 폭발압력 표의 경우 화약 표면부터 환산거리 $Z=100$ 까지의 거리에 대한 압력 수치를 얻을 수 있다.

그림 4는 각각 구형과 반구형 모양의 TNT 가 해수면 높이의 자유공간에서 폭발할 때 환산 거리별 폭발압력의 크기를 나타낸 것이다. 여러 곡선 중 P_{so} 는 입사압, P_r 은 반사압을 나타낸다.



(a) 구형 TNT 폭발압력



(b) 반구형 TNT 폭발압력

그림 4. 해수면 높이 공중 폭발시 환산 거리별 TNT 폭발압력

아래 그림은 앞의 그림 4의 구형과 반구형 폭발의 입사 압력을 동일 환산거리 Z 에 따라 비교한 것이며 두 그림을 비교해 보면 같은 환산거리 Z 일 때 완전한 구형보다 반구형의 폭발압력이 환산거리별로 $Z=1$ 이하는 13~30%, $Z=2$ 이상은 약 40% 가량 크다. 따라서 그림 1과 같이 표면에 얇게 분포시켜 폭발하는 이중금속 특수접합 공법의 경우 구형 또는 반구형 폭발형태와 상이한 폭발압력 양상을 나타낼 가능성이 있다는 추정이 가능하다.

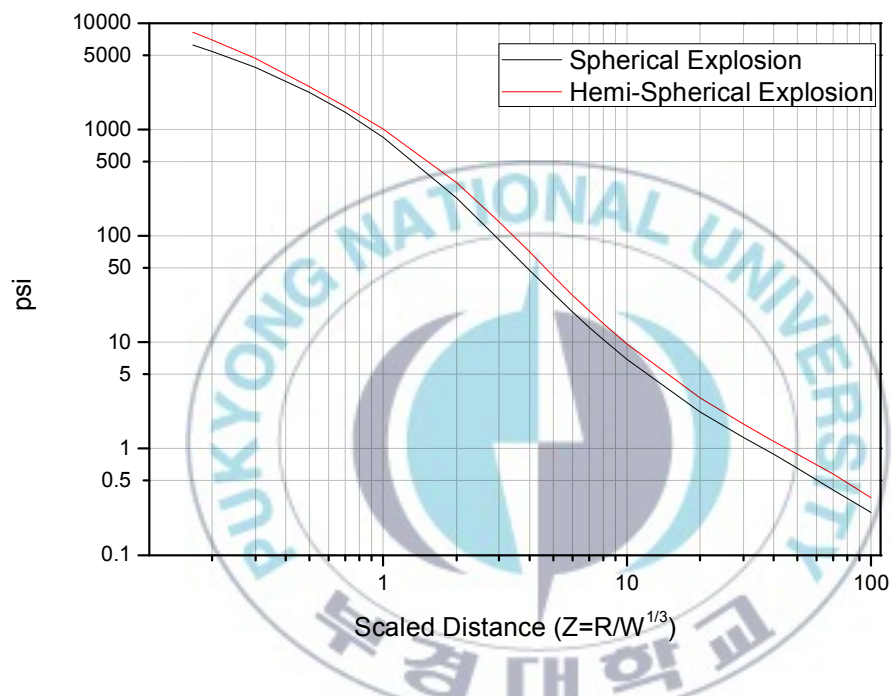


그림 5. 해수면 높이 공중 폭발시 구형 및 반구형 TNT 입사압 비교

또 다음 그림과 같이 공기중 폭발압력이 지면에 반사되면 증폭이 되어 입사압보다 반사압이 더 커지게 된다.

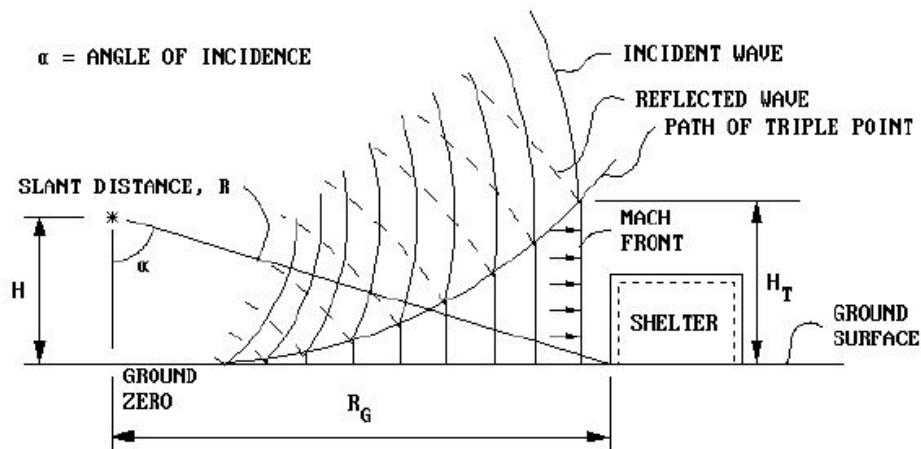


그림 6. 공기중 폭발 환경

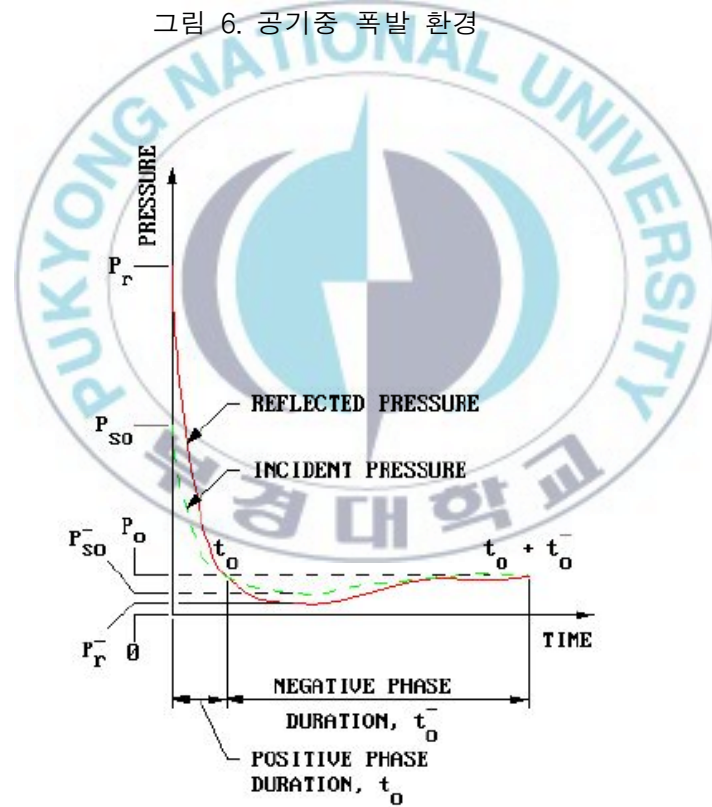


그림 7. 공기중 폭발의 시간별 폭발압력 변화와 입사파 • 반사파 비교

2.3 발파진동과 소음의 차이점

발파진동과 소음은 전파매질(지반,대기)이 다를 뿐 파동 현상은 마찬가지로 파동론 범에 속하는 문제로 같이 다루는 경우가 많다. 발파음은 전술한 바와 같이 발생원은 진동체이며, 초저주파를 수반하므로 크던, 작던간에 진동을 수반한다.

발파음에 의한 영향을 받는 주택이나 건물에서는 창호나 선반등에서 소리를 내는 경우가 많아 일차적으로 도착하는 발파진동보다도 더욱 성가시게 느껴지므로, 발파음에 대한 인체 감응도는 더욱 커서 사실상 민원의 주대상이 되고 있다. 그러나, 발파진동과 달리 발파음은 주택이나 구조물에 피해를 주는 일은 극히 드물기 때문에 인체 감응에 대한 대수척도는 소음 Level(데시벨,dB)을 사용하며, 발파진동은 건물이나 구조물에 직접적인 피해를 주므로 진동 속도(cm/sec,Kine)를 사용한다.

표 2. 발파진동과 발파소음의 차이점

구 분	발 파 진 동	발 파 소 음
(1) 전 달 매 질	지 반(토사,암반)	대 기(공기중)
(2) 전 파 속 도	2,000~5,000m/sec	340m/sec
(3) 인 체 감 응	· 전파속도가 빠르기 때문에 청각으로써는 느끼지 못하고 육체적 신경으로 느낌 · 인체 감응도는 크지 않음	· 대부분 청각으로 느낌. · 소음을 수반하므로 인체 감응도는 크게 느껴짐.
(4) 주택 및 구조물의 피해정도	· 주택 및 구조물에 직접적인 피해 영향을 줌	· 주택이나 구조물에 피해를 주는 경우는 거의 없음.
(5) 측 정 단 위	진동속도(cm/sec,Kine)	음 압(dB)
(6) 민 원 정 도	민원이 적음	발파민원의 대부분임.

2.4 폭발 소음 측정 및 평가 방법

2.4.1 센서의 선정

일반적인 소음 측정용 마이크로폰의 성능 기준인 KS C IEC 61672-1 및 KS C 1502를 만족하는 마이크로폰의 측정 소음레벨 범위는 약 150dB(20uPa re.), 630Pa 정도이다. 반면 10~20m 정도의 근거리 폭발음의 경우 일반 마이크로폰의 100배 이상인 190dB, 63kPa 이상의 소음(압력)이 발생하기도 하므로 근거리에서의 폭발 압력을 계측할 경우 이러한 상황에 적합한 동압력 센서(Dynamic Pressure Sensor)를 사용해야 한다. 동압력 센서는 음장의 종류에 따라 자유음장에서 사용되는 Pencil Probe 형 센서와 반사 음장에서 사용되는 반사압용 센서로 다시 구분한다.⁵⁾ 이중금속 특수접합공법은 지표면에서 폭발하므로 이 중 반사음장용 센서를 사용하게 된다.

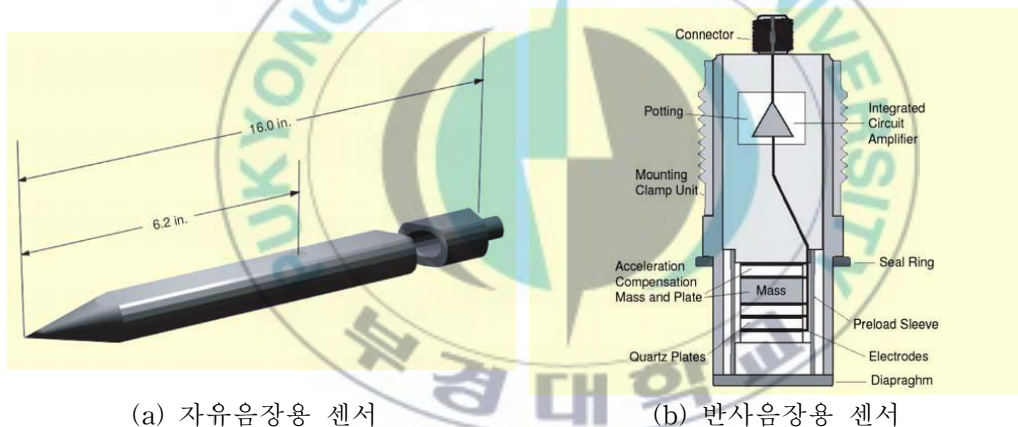


그림 8. 동압력 센서의 종류

2.4.2 평가 단위

충격 소음 평가 단위, 즉 발생 소음을 어떻게 표시 할 것인가는 현재까지 국제적으로 공통된 기준이 마련되지 않는 상태이며 각 표준관련 기구나 국가별로

5) Patrick L. Walter(Air-Blast and the Science of Dynamic Pressure Measurements, 2004)

상이한 몇 가지 지표를 선택하고 있다. 우리나라는 환경부 「소음·진동 공정시험 기준」의 발파소음 측정 기준⁶⁾에서 청감보정회로는 A특성, 소음계 동특성은 빠름(fast)⁷⁾으로 하고 Lmax 또는 hold 로 측정한 값에 시간대별 발파소음 중 소음도가 60 dBA 이상인 보정발파횟수(N)에 따른 보정량(+10 log N ; N>1)을 보정하여 평가하도록 규정하고 있다. ISO 및 WHO 는 매우 짧은 시간 안에 발생하고 소멸되는 충격성 소음의 특성상 C-특성 피크 음압 레벨(C-weighted peak sound pressure level, LCpeak) 또는 리니어 특성 피크 음압 레벨(Linear peak (unweighted) sound pressure level, Lpeak)을 적용하는 것이 바람직하다고 밝히고 있다⁸⁾. 그 외에도 각 나라별로 L_Amax, L_{peak}, L_{AF}max, L_{CE} 등 여러 가지 단위를 사용하고 있으며, 본 연구에서는 국내 규정을 기준으로 평가 하였다.

2.5 폭발소음의 예측 방법

발파로 인한 소음·진동의 영향 예측에는 사용화약의 종류, 장약량 등의 많은 변수들이 작용하여 보편적인 예측식을 도출하기 어려우므로 시험발파를 실시한 이후에 그 결과에 따라 발파소음 예측식을 결정하도록 되어 있다.⁹⁾ 현실적 조건으로 시험발파가 어려운 경우 측정데이터의 회귀분석방법을 기반으로 하여 발파공사에 의한 소음·진동의 영향을 예측하는 식을 적용하는 방안을 고려할 수 있으며 통상적으로 발파에 따른 소음·진동 예측식은 장약량과 이격거리간의 상관관계식으로 표현되어진다. 국내에서는 국토해양부(구 건설교통부)에서 2006년 12월에 「도로공사 노천발파 설계·시공 지침」을 제정하였으나 발파 진동에 대한 예측식만 수록되어 있다.

다음 식은 미 광무국(USBM, 1996년 폐쇄)에서 측정자료의 분석을 통해 이격거리와 지발당 장약량을 고려한 경험식 P 및 SL₁ 과, 이를 바탕으로 국내에서 실시

6) 발파소음 측정기준은 2011년부터 적용(환경부, 소음진동공정시험 기준, 2010)

7) fast의 시간 가중값은 125ms이다.(KS C 1502:2001, KS A ISO 1996-1)

8) WHO(Guidelines for Community Noise 1999)

9) 건설교통부(현 국토해양부)(도로공사 노천발파 설계·시공 지침, 19:2006)

한 발파작업에 의한 소음의 예측결과와 비교적 평탄한 지역에 대한 측정데이터를 비교하여 예측치와 실측치의 분포를 통해 만든 SL_2 이다.¹⁰⁾ 거리별 폭발압력을 추정할 수 있으므로 음원만을 예측하는 식은 아니지만 근거리 폭발 압력을 추정할 수 있다.

$$SL_2 = 0.94SL_1 + 3.42 \text{ ----- (2.17)}$$

$$SL_1 = 20\log\left(\frac{P}{P_0}\right)$$

$$P = 186.36(D/W^{\frac{1}{3}})^{-1.2}$$

P : 발파원에서 D(m) 떨어진 지점에서의 폭풍압(dyne/cm²)

D : 발파원으로부터 예측지점까지의 거리(m)

W : 지발당 총장약량(kg)

SL : 소음레벨, dBA

P₀ : 최저가청음압, 2×10^{-4} (dyne/cm²)

위와 같이 USBM 식을 이용하거나 UFC Code 에 해당하는 폭발 조건이 있을 경우 폭약량 및 환산거리를 계산하면 거리별 폭발압력을 얻을 수 있다.

폭발 지점으로부터 떨어진 특정 지점에서의 소음을 예측할 경우 공기, 지형 조건 등을 고려한 일반적인 음원의 전파 예측에는 ISO 9613 시리즈를 사용한다. 이와 별도로 충격 음원의 크기 및 전달 소음 계산에 적용되는 ISO 17201 시리즈가 비교적 최근인 2005년부터 2010년에 걸쳐 제정되었다. 이 규격은 20mm 구경 이하의 무기나 TNT 50g 이하의 폭발이고, 피크 압력이 1kPa(154dB) 이하인 지역이라는 조건에서 적용하며 비선형 구간에서는 적용할 수 없다.

상기 예측식을 사용하는 방법 외에 실외에서 발생하고 전달되는 소음 예측은 ISO-9613 등의 규격에 의거한 계산 알고리즘을 갖는 상용 소음 예측 소프트웨어

10) 중앙환경분쟁조정위원회(공사장 환경분쟁사건 소음.진동도 산출방법 개선 연구, 30:2007)

를 사용하기도 한다. 이러한 상용 소프트웨어는 자동차, 철도 및 산업 설비 등 소음원에 대한 정보를 일부 내장하고 있어 비교적 편리하게 사용할 수 있는 장점이 있다. 반면 다양한 종류의 폭약이나 군용 무기 등 비정상적인 소음원에 대한 자료는 내장하고 있지 않아 상용 소프트웨어를 활용할 경우 해당하는 폭발 소음원의 실측 자료를 입력해야 한다. 따라서 가급적 폭발소음을 전문적으로 예측하기 위해서는 전용 소프트웨어를 사용해야 하는데 미국의 경우 육군 건강증진 및 예방의학 센터(USACHPPM) 주도 하에 군사 훈련과 테스트 작업으로 인한 주변 지역 소음 영향을 보다 정확하게 예측하고 평가할 수 있도록 「BNOISE2」라는 폭발 충격 소음 평가용 소프트웨어를 개발하여 사용하고 있으나¹¹⁾, 현재 민간 부문에서는 사용할 수 없어 민간에서는 일반적인 상용 소프트웨어에 폭발 소음 측정 자료 및 3차원 수치지도를 입력하여 소음을 예측하는 방법을 사용하고 있다.

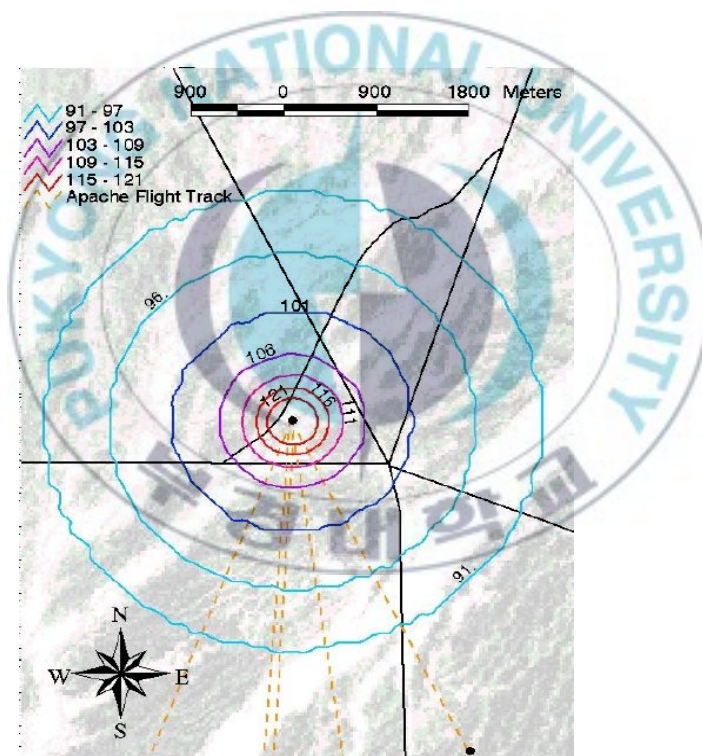


그림 9. BNOISE2 소음평가 사례

11) US Army Engineer Research and Development Center website(erdcd.usace.army.mil), 2009

2.6 발파소음 허용기준

2.6.1 국내 기준

국내 소음 허용 기준을 폭발 지점으로부터 가까운 순서대로 적용하면 작업자는 산업안전 보건법, 공장 또는 사업장 부지 경계선에서는 소음진동 관리법의 배출 소음 허용 기준, 외부 지역은 생활소음 허용 기준을 적용하게 된다.

가. 산업안전 관점

충격 작업을 수행하는 작업자 관점의 기준으로서, 상위법인 산업안전 보건법에 의거하여 고용노동부령 제6호 산업보건기준에 관한 규칙에서 충격소음작업의 정의를 아래와 같이 규정하고 있다. 해당 소음의 측정 방법은 법 42조에 따라 노동부 고시 작업환경측정 및 정도관리규정이 정하는 바에 따른다.

표 3. 충격소음작업의 정의(산업보건기준에 관한 규칙)

제5장 소음 및 진동에 의한 건강장해의 예방 제1절 통칙 제119조
3. “충격소음작업”이란 소음이 1초 이상의 간격으로 발생하는 작업으로서 다음 각 목의 어느 하나에 해당하는 작업을 말한다.
가. 120데시벨을 초과하는 소음이 1일 1만회 이상 발생하는 작업
나. 130데시벨을 초과하는 소음이 1일 1천회 이상 발생하는 작업
다. 140데시벨을 초과하는 소음이 1일 1백회 이상 발생하는 작업

나. 배출소음 관점

발파 작업 현장을 소음 배출시설 관점에서 평가하면 소음진동 관리법 시행규칙 제8조 (공장소음·진동의 배출허용기준) 와 관련된 아래 별표 5 에 근거, 공장 소음 배출 허용 기준에 따른 평가 소음도가 시간대 및 지역에 따라 최저 40dBA 이하가 되어야 한다.

표 4. 배출소음 규제 기준

단위 : dBA

대 상 지 역	시간대별		
	낮 (06:00~18:00)	저녁 (18:00~24:00)	밤 (24:00~06:00)
가. 도시지역 중 전용주거지역·녹지지역, 관리지역 중 취락지구·주거개발진흥지구 및 관광·휴양개발진흥지구, 자연환경보전지역 중 수산자원보호구역 외의 지역	50 이하	45 이하	40 이하
나. 도시지역 중 일반주거지역 및 준주거지역	55 이하	50 이하	45 이하
다. 농림지역, 자연환경보전지역 중 수산자원보호구역, 관리지역 중 가목과 라목을 제외한 그 밖의 지역	60 이하	55 이하	50 이하
라. 도시지역 중 상업지역·준공업지역, 관리지역 중 산업개발진흥지구	65 이하	60 이하	55 이하
마. 도시지역 중 일반공업지역 및 전용공업지역	70 이하	65 이하	60 이하

비고

- 소음의 측정 및 평가기준은 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」 제6조제1항제2호에 해당하는 분야에 대한 환경오염공정시험기준에서 정하는 바에 따른다.
- 대상 지역의 구분은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 따른다.
- 허용 기준치는 해당 공장이 입지한 대상 지역을 기준으로 하여 적용한다.
- 충격을 성분이 있는 경우 허용 기준치에 -5dB을 보정한다.
- 관련시간대(낮은 8시간, 저녁은 4시간, 밤은 2시간)에 대한 측정소음발생시간의 백분율이 12.5% 미만인 경우 +15dB, 12.5% 이상 25% 미만인 경우 +10dB, 25% 이상 50% 미만인 경우 +5dB을 허용 기준치에 보정한다.
- 위 표의 지역별 기준에도 불구하고 다음 사항에 해당하는 경우에는 배출허용기준을 다음과 같이 적용한다.
 - 「산업입지 및 개발에 관한 법률」에 따른 산업단지에 대하여는 가목의 허용 기준치를 적용한다.
 - 「의료법」에 따른 종합병원, 「초·중등교육법」 및 「고등교육법」에 따른 학교, 「도서관법」에 따른 공공도서관, 「노인복지법」에 따른 노인전문병원 중 입소규모 100명 이상인 노인전문병원 및 「영유아보육법」에 따른 보육시설 중 입소규모 100명 이상인 보육시설(이하 “정온시설”이라 한다)의 부지경계선으로부터 50미터 이내의 지역에 대하여는 해당 정온시설의 부지경계선에서 측정된 소음도를 기준으로 가목의 허용 기준치를 적용한다.
 - 가목에 따른 산업단지와 나목에 따른 정온시설의 부지경계선으로부터 50미터 이내의 지역이 중복되는 경우에는 특별자치도지사 또는 시장·군수·구청장이 해당 지역에 한정하여 적용되는 배출허용기준을 공장소음 배출허용기준 범위에서 정할 수 있다.

다. 생활소음 관점

폭발 인근 지역의 경우 소음진동 관리법 시행규칙 제20조 에 근거, 생활 소음 평가 소음도가 시간대 및 지역에 따라 최저 45dBA 이하가 되어야 한다.

표 5. 생활소음 규제 기준

단위 : dBA

대 상 지 역	시간대별 소음원		아침, 저녁 (05:00~07:00, 18:00~22:00)	주간 (07:00~18:00)	야간 (22:00~05:00)
	사 업 장	공 장	50 이하	55 이하	45 이하
가. 주거지역, 녹지지역, 관리지 역 중 취락지구 · 주거개발 진흥지구 및 관광 · 휴양개 발진흥지구, 자연환경보전지 역, 그 밖의 지역에 있는 학교 · 종합병원 · 공공도서관					
		동일 건물	45 이하	50 이하	40 이하
		기 타	50 이하	55 이하	45 이하
		공 사 장	60 이하	65 이하	50 이하
나. 그 밖의 지역	사 업 장	공 장	60 이하	65 이하	55 이하
		동일 건물	50 이하	55 이하	45 이하
		기 타	60 이하	65 이하	55 이하
		공 사 장	65 이하	70 이하	50 이하

비고

1. 소음의 측정 및 평가기준은 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」 제6조제1항제2호에 해당하는 분야에 따른 환경오염공정시험기준에서 정하는 바에 따른다.
2. 대상 지역의 구분은 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 따른다.
3. 규제기준치는 생활소음의 영향이 미치는 대상 지역을 기준으로 하여 적용한다.
4. 공사장 소음규제기준은 주간의 경우 특정공사 사전신고 대상 기계·장비를 사용하는 작업시간이 1일 3시간 이하일 때는 +10dB을, 3시간 초과 6시간 이하일 때는 +5dB을 규제기준치에 보정한다.
5. 발파소음의 경우 주간에만 규제기준치(광산의 경우 사업장 규제기준)에 +10dB을 보정한다.
6. 2010년 12월 31일까지는 발파작업 및 브레이커·항타기·항발기·천공기·굴삭기(브레이커 작업에 한한다)를 사용하는 공사작업이 있는 공사장에 대하여는 주간에만 규제기준치(발파소음의 경우 비고 제6호에 따라 보정된 규제기준치)에 +3dB을 보정한다.
7. 공사장의 규제기준 중 다음 지역은 공휴일에만 -5dB을 규제기준치에 보정한다.

가. 주거지역

나. 「의료법」에 따른 종합병원, 「초·중등교육법」 및 「고등교육법」에 따른 학교, 「도서관법」에 따른 공공도서관의 부지경계로부터 직선거리 50m 이내의 지역

8. “동일 건물”이란 「건축법」 제2조에 따른 건축물로서 지붕과 기둥 또는 벽이 일체로 되어 있는 건물을 말하며, 동일 건물에 대한 생활소음 규제기준은 다음 각 목에 해당하는 영업을 행하는 사업장에만 적용한다.

가. 「체육시설의 설치·이용에 관한 법률」 제10조제1항제2호에 따른 체력단련장업, 체육도장업, 무도학원업 및 무도장업

나. 「학원의 설립·운영 및 과외교습에 관한 법률」 제2조에 따른 학원 및 교습소 중 음악교습을 위한 학원 및 교습소

다. 「식품위생법 시행령」 제21조제8호다목 및 라목에 따른 단란주점영업 및 유흥주점영업

라. 「음악산업진흥에 관한 법률」 제2조제13호에 따른 노래연습장업

마. 「다중이용업소 안전관리에 관한 특별법 시행규칙」 제2조제4호에 따른 콜라텍업

2.6.2 외국 기준

외국 환경소음 평가 기준은 1980년대에도 마련이 되었으나 고에너지 충격음의 경우 1990년대 들어서 미국 ANSI 및 ISO에서 규정하기 시작 하였다. 미국 청각, 생리음향학 및 생체역학 위원회(Committee on Hearing, Bioacoustics and Biomechanics, CHABA) 에서는 C-weighting을 적용한 주-야간 환경소음 레벨(C-weighted Day-Night Level, CDNL) 기준을 마련하였고 이 기준을 미 국방부에서도 그대로 적용하여 (Army regulation 200-1) 현재에 이르고 있다¹²⁾. 아래 표에서 정의하는 소음 민감 지역은 학교, 병원 및 주거지역을 의미한다.

표 6. 구역별 충격소음 기준 (미 육군 기준 200-1, 2007)

소음 구역	허용 기준	소음민감지역에 대한 권장여부
	충격소음 CDNL	
I	< 62	적용 가능
II	62 - 70	일반적으로 권장하지 않음
III	> 70	절대 불가

일러두기.
 CDNL = c-weighted day-night levels
 < = 이하
 > = 이상

DNL 은 Day-Night Level 의 약자로, 24 시간 동안 평균 소음을 의미하며 시간 대별로 가중치를 두고 있다. 미국 연방 항공국이 지역 사회의 소음 노출 평가를 위해 미국 연방 항공 규정 150 에 따라 정하였으며 ISO 1996-1 에 수학적 정의가 수록되어 있다.

¹²⁾US Army Public Health Command (Explosive Ordnance Disposal (EOD) Monitoring Proposal, 8:2010)

또 Naval Surface Warfare Center에서는 생활소음 또는 환경소음과 별도로 군사 목적의 폭발음 발생시 민원 방지 및 청력 보호 관점에서 충격성 소음의 크기를 규정하고 있다(Pater 1976)¹³⁾.

표 7. 충격소음 권장기준(미해군 기준)

예측 음압레벨, 피크값	민원 위험도	행위제한
< 115	민원 우려 적음	모든 사격 행위 가능
115 - 130	민원우려 있음	중요 시험만 수행. 미리 공지할 것 민원우려가 없는 수준에서 수행 가능한 시험.
130 - 140	민원 우려 높음. 청각손상 가능	매우 중요한 시험만 수행.
> 140	보호구 미착용시 영구 청각손상가능. 신체의 생리적, 구조적 손상 유발.	모든 폭발작업은 미리 공지.

WHO 는 청각 보호 관점에서 귀에서 100mm 떨어진 곳에서 어른은 140dB(Lpeak), 어린이는 120 dB(Lpeak) 이하¹⁴⁾를 권장하고 있어 미 육군 기준과 유사하다.

13) U.S. Army Corps of Engineers(Design Guide for the Sustainable Range Program, Environmental Requirements 4:2007)

14) WHO Guidelines for Community Noise(Table 4.1: Guideline values for community noise in specific environments. 1999)

3. 현장 발파 소음 측정 및 시뮬레이션

3.1 측정 시스템

본 연구에 적용되는 발파 공법은 폭약을 지표면에 고르게 분포시켜 폭발시키는 특성이 있으나, 이러한 폭발 특성에 따른 인접 지역 소음 영향에 대한 국내 연구는 부족하다. 또한 폭발 지점에서 10m~100m 내의 근거리 계측과 수 백m 이상 이격된 원거리 계측을 병행하여 가급적 정확한 음향 파워 추정 및 전달특성을 파악하여 소음 저감 대책 수립에 필요한 자료를 획득할 필요가 있다. 이에 시험 발파, 근거리 발파 및 실제 생산 현장 본발파로 나누어 3차로 측정하여 발파 소음 특성을 파악 하고 3차 현장 본발파는 측정 전 시뮬레이션을 실시하여 측정 결과와 비교 평가 하였다.

시험 현장은 주변에 전력설비가 갖추어지지 않은 실외이고 폭발 압력이 작용할 가능성이 있으므로 센서와 데이터 수집 장치(data recorder) 로 단순하게 구성하고 사후에 분석하는 방법을 사용했다. 폭발로 인한 진동 및 압력 영향으로 인한 장비 오작동을 방지하기 위해 센서를 제외한 데이터 수집 장치는 폭발 지점으로부터 수 백 m 이격된 지점의 방호 구조물 내부에 설치하였다. 센서는 폭압 입사 시 센서 자체의 위치 변화로 인한 측정 오차가 생기지 않도록 지면에 단단히 고정된 Jig를 사용하여 지면으로부터 1.5m 높이에 설치하였다.

측정 위치에 따라 백m 이내 근거리는 대규모 폭발인 점을 고려하여 측정 가능 범위가 큰 동압력센서만 사용하고 수 백m 이상 원거리에서 측정하여 폭발압력이 일반 마이크로폰의 측정 가능범위일 것으로 판단될 경우 센서 종류에 따른 측정 값의 차이를 비교하기 위해 마이크로폰과 동압력센서를 모두 설치하고 동시에 측정하였다.

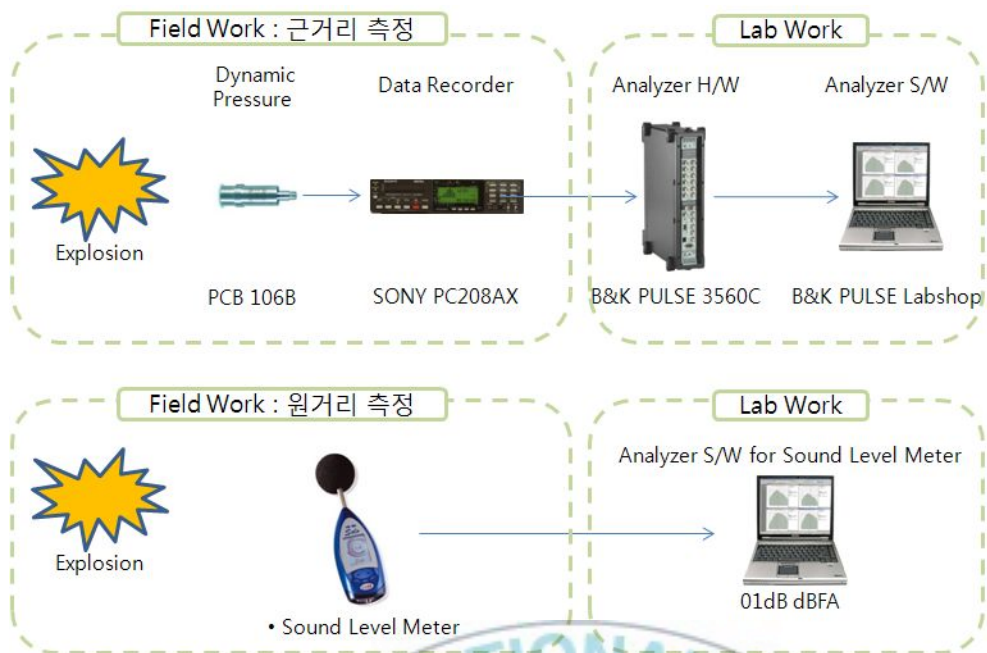


그림 10. 측정 시스템 개요



그림 11. 측정 시스템(데이터 레코더 및 신호 증폭기)



a) 원거리 : (소음계)마이크로폰



b) 근거리 : 동압력센서

그림 12. 센서 설치 모습



그림 13. 폭발 전경

측정에 사용한 마이크로폰의 최대 측정 범위는 146dB(약 400Pa) 이고 동압력 센서의 정격 측정 범위는 그 100배 이상인 57.2kPa 이다.

Microphones*					
Free-field microphones					
Type	40AF/ MCP212	40AE/ MCE212	40BF	40BE	
Sensitivity	50	50	4	4	mV/Pa
Frequency range (± 2 dB)	3.15-20k	6.3-20k	10-100k	10-100k	Hz
Dynamic range	15-146	15-146	40-174	40-168	dB re. 2x10 ⁻⁵ Pa
Polarization voltage	200	0	200	0	V
Outside diameter (with protection grid)	13.2	13.2	6.9	6.9	mm

그림 14. 마이크로폰 사양

Model Number	ICP® PRESSURE	
106B		
Performance	ENGLISH	SI
Measurement Range(for ±2.5V output)	8.3 psi	57.2 kPa
Sensitivity(± 15 %)	300 mV/psi	43.5 mV/kPa
Maximum Pressure(step)	200 psi	1379 kPa
Maximum Pressure	2 kpsi	13,790 kPa
Resolution	0.1 mpsi	0.00069 kPa
Resonant Frequency	≥ 60 kHz	≥ 60 kHz
Rise Time	≤ 9 μ sec	≤ 9 μ sec
Low Frequency Response(-5 %)	0.5 Hz	0.5 Hz
Non-Linearity	≤ 1 % FS	≤ 1 % FS

그림 15. 동압력 센서 사양

측정 소음의 평가 방법은 국내법인 환경부 「소음·진동 공정시험 기준」 중 「발파소음 측정방법」을 따랐다.

3.2 1단계 시험 발파

시험 발파의 목적은 본 측정에 필요한 적정 폭약량 및 측정 시스템 구성 방법을 수립하기 위한 것으로 주변지역 민원을 고려하여 실제 발파에 사용될 최소 폭약량인 21kg을 사용 하였으며 발파 횟수는 총 2회이다. 발파 지역은 가급적 정확한 음원특성 파악을 위해 현재 국내에서 폭발시험이 가능한 지역 중 지면 이외의 반사 영향을 가장 덜 받는 개활지 조건의 시험장에서 시험을 실시하였다. 시험 발파의 폭약량이라 하더라도 ISO에서 규정하고 있는 일반적인 충격음원의 폭약량보다 매우 크고, 동일 공법의 발파 소음 계측 경험이 없는 상태이므로 센서 위치는 폭발 지점으로부터 약 500m 이격된 지점에 설치하였다. 센서는 일반 소음계의 측정 가능 여부를 확인하여 향후 사용 가능성을 판단하고, 센서 종류에 따른 측정값의 차이를 비교하기 위해 마이크로폰과 동압력센서를 모두 설치하여 동시에 측정하였다. 측정 지점은 폭발지점 반경 2km 내에 민가가 없는 개활지(A 지역) 이다.

측정 결과 500m 지점에서의 폭발 소음은 시간축에서 최고 343Pa, 145dB_{Lin}(peak) 이고 A-Duration, 즉 피크음압 발생직전과 직후의 정상상태 까지 걸리는 시간은 22ms 로 나타나 이론적인 폭발압력의 시간이력 특성과 유사한 것을 알 수 있다. 또 narrowband 주파수 분석 결과 폭발 소음의 주요 주파수 대역은 100Hz 이하 대역이며 최대값은 18Hz 일 때 110 L_{max} dB_{Lin}(r.m.s.) 로 나타났다. 마이크로폰의 경우 최대 223Pa, 141dB_{Lin} 까지 측정 되었으나 측정 가능 범위를 넘어 정상적인 평가가 불가능했다.

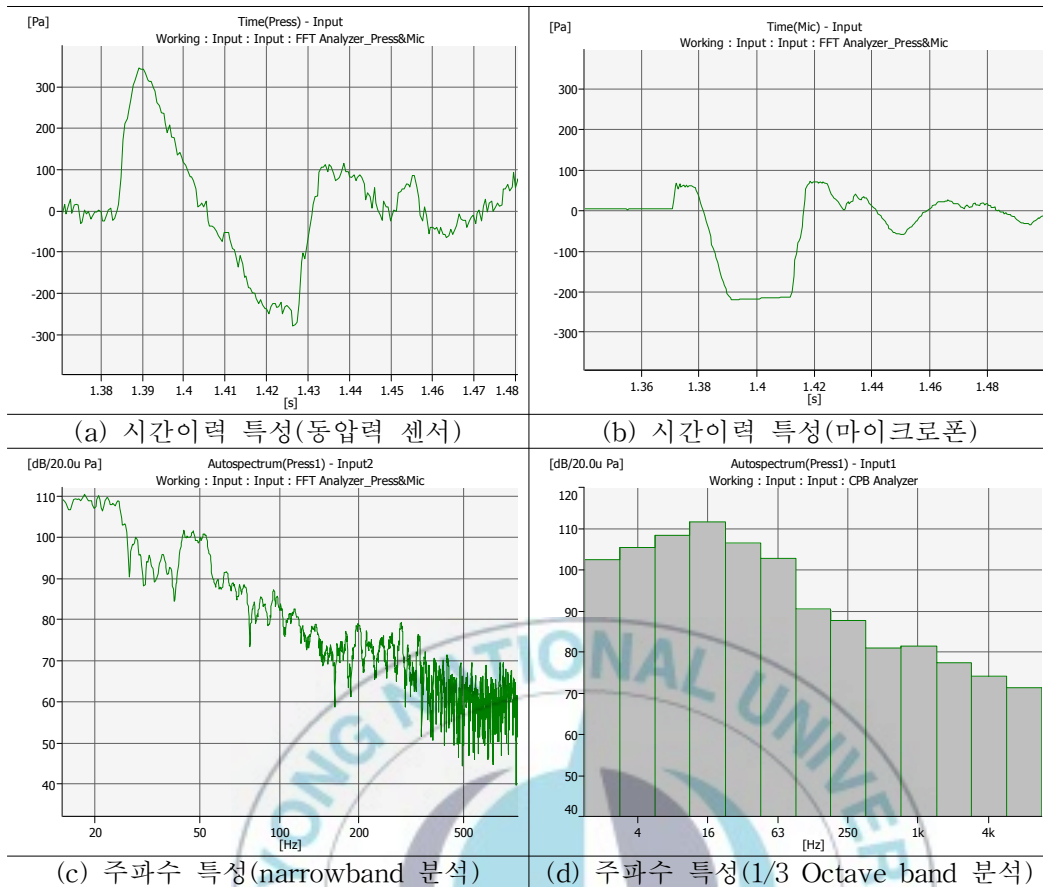


그림 16. 개활지 폭발소음 측정 결과

또 실측과 동일한 거리 및 폭약량으로 중앙환경분쟁조정위원회 예측 식에 의해 계산한 500m 지점의 소음도는 65dB, 0.036Pa 이며 실측값인 343 Pa 의 0.01% 수준으로, 본 연구와 같은 특수접합공법 소음 예측에는 부적절한 것으로 나타났다.

폭약량과 측정 거리의 경우 예측식에 의한 계산값이 맞지는 않으나 실측결과와의 비율과 및 센서의 최대 측정 압력 1379kPa를 고려하면 10m 거리에서 500kg 폭발도 무난하게 측정이 가능할 것으로 판단되어 2단계 측정은 폭발지점에 매우 근접하여 동압력센서만으로 측정하기로 했다.

3.3 2단계 근거리 측정

2단계 발파의 목적은 3단계 실제 생산지역 주변 민가에서 예상되는 폭발소음 피해 예측에 활용될 시뮬레이션의 입력원을 획득하기 위한 것이다. 발파 지역은 1단계보다 매우 큰 폭약량을 고려하여 주변이 산지로 둘러싸이고 폭발지점 반경 2km 내에 민가가 없는 곳으로 정하였다. 폭발지점 반경 20m 이내 3면에 경사면이 있어 반사파의 영향이 있을 수 있으나 실제 생산장소와 조건이 유사한 점을 고려하였다. 1단계 시험발파 결과에 따라 실제 발파공법에 사용할 폭약량 범위는 180kg ~ 450kg, 측정 지점은 폭발 지점에서 10~110m 떨어진 지점 중 2곳으로 하고 발파시험 횟수는 폭약량에 따라 총 8회이다. 폭발은 실제 생산과 동일한 조건을 모사하기 위해 3~4m 간격으로 놓인 폭발물을 동시에 기폭 시켰다. 측정 data 는 총 8회 발파 중 폭발 압력 및 파편 등으로 인한 케이블 단락이나 계측장치 이상으로 인해 data 획득에 실패한 것을 제외한 6회분의 측정 결과를 얻을 수 있었다. 측정 주파수 범위는 시험발파 결과를 바탕으로 2kHz 까지로 한정하였다.

측정 결과는 거리, 폭약량 및 폭발 지점 수에 따라 다르므로 UFC Code에서 적용한 환산거리 $Z=R/W^{1/3}$ 식을 활용하여 정리 하였다. 분석 결과 폭발 압력은 시간축에서 최고 217kPa, 주파수축에서 최고 175 dBLin 이고 가장 높은 레벨값을 갖는 주파수는 16Hz 및 31.5Hz 이다.

표 8. 2단계 근거리 폭발압력 및 소음 측정 결과

측정 횟수	변수			측정값			
				Time Domain	Frequency Domain		
	화약량 W	거리 R	환산거리	Peak Pressure	Max Freq (1/1 Oct.)	Max Level	Overall
	lbs	ft	$Z(R/W^{1/3})$	kPa	Hz	dBLin	dBLin
1-1	403.45	39.37	5.33	71.1	31.5	141	146
1-1	403.45	364.17	49.28	5.6	16.0	129	132
1-2	817.92	39.37	4.21	164.0	31.5	146	152
1-2	817.92	364.17	38.94	3.51	16.0	122	128
2-1	482.81	36.09	4.60	76.9	16.0	147	153
2-1	482.81	49.21	6.27	47.3	16.0	146	150
2-2	992.08	49.21	4.93	96.9	31.5	169	175
2-3	529.11	49.21	6.08	54.5	16.0	144	148
3-3	615.09	26.25	3.09	217.0	16.0	155	160
3-3	615.09	29.53	3.47	142.0	31.5	153	159

상기 측정 결과를 이용하여 환산거리 Z 별 폭발압력 kPa 의 관계를 검토한 결과 UFC Code 와 같이 폭약량의 삼승근에 반비례하며 서로 대수함수 관계를 갖는 것으로 나타났다.

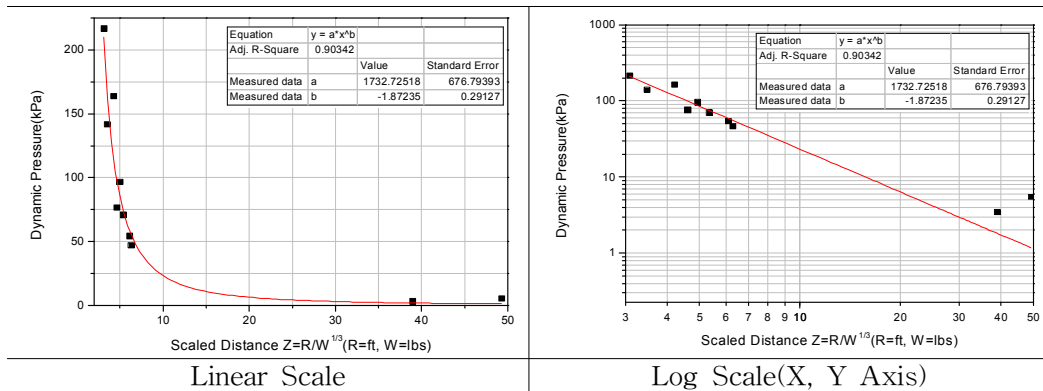


그림 17. 환산거리 Z 와 폭발 압력과의 관계

아래 그림은 「그림 4. 해수면 높이 공중 폭발시 환산 거리별 TNT 폭발압력」의 입사압력과 실측결과를 비교한 것으로, UFC Code 값이 측정 결과값에 비해 동일한 환산거리 Z에서 가까운 곳은 최소 1.93E3 배, 먼 곳은 최대 3.78E3 배 더 큰 값을 갖는 것으로 나타났다.

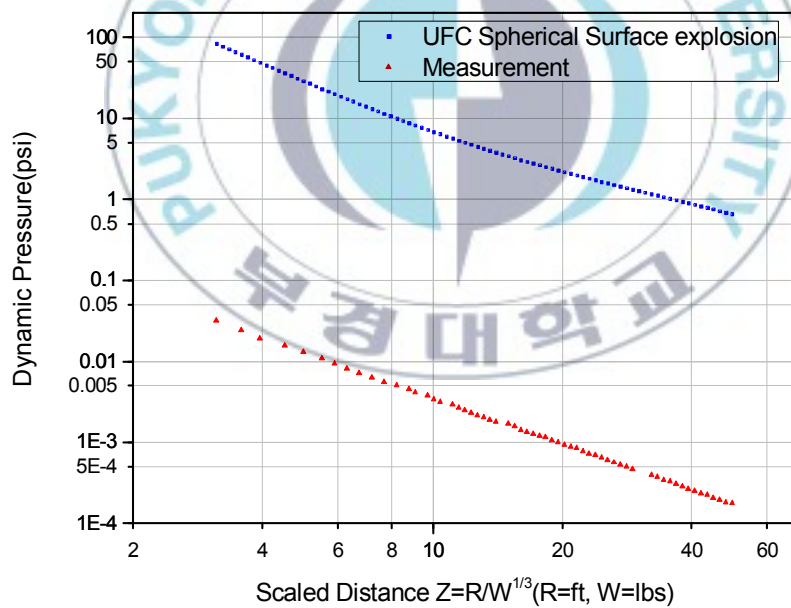
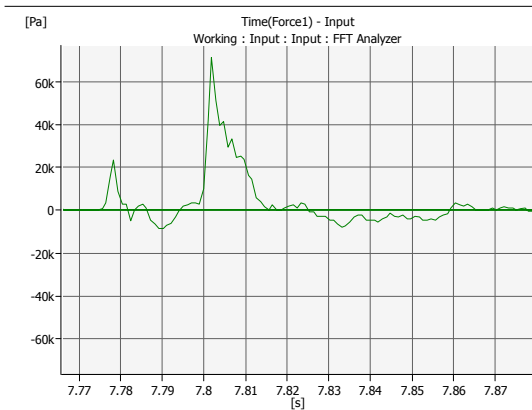


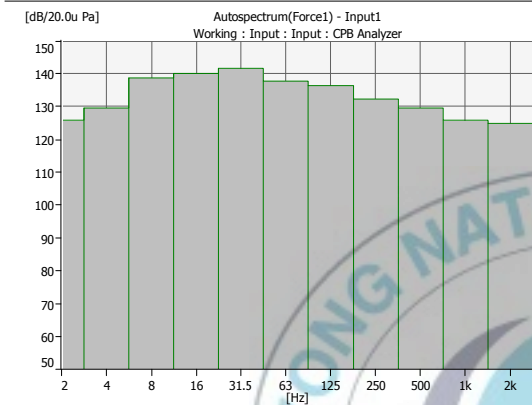
그림 18. UFC Code 와 실측값 비교



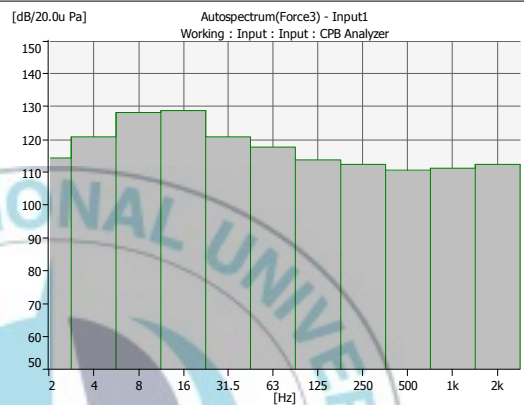
(a) 시간이력(근거리-12m)



(b) 시간이력(중거리-110m)



(c) 1/1 Oct. 주파수 분석(근거리-12m)



(b) 1/1 Oct. 주파수 분석(중거리-110m)

그림 19. 근거리 폭발소음 측정 결과(1회)

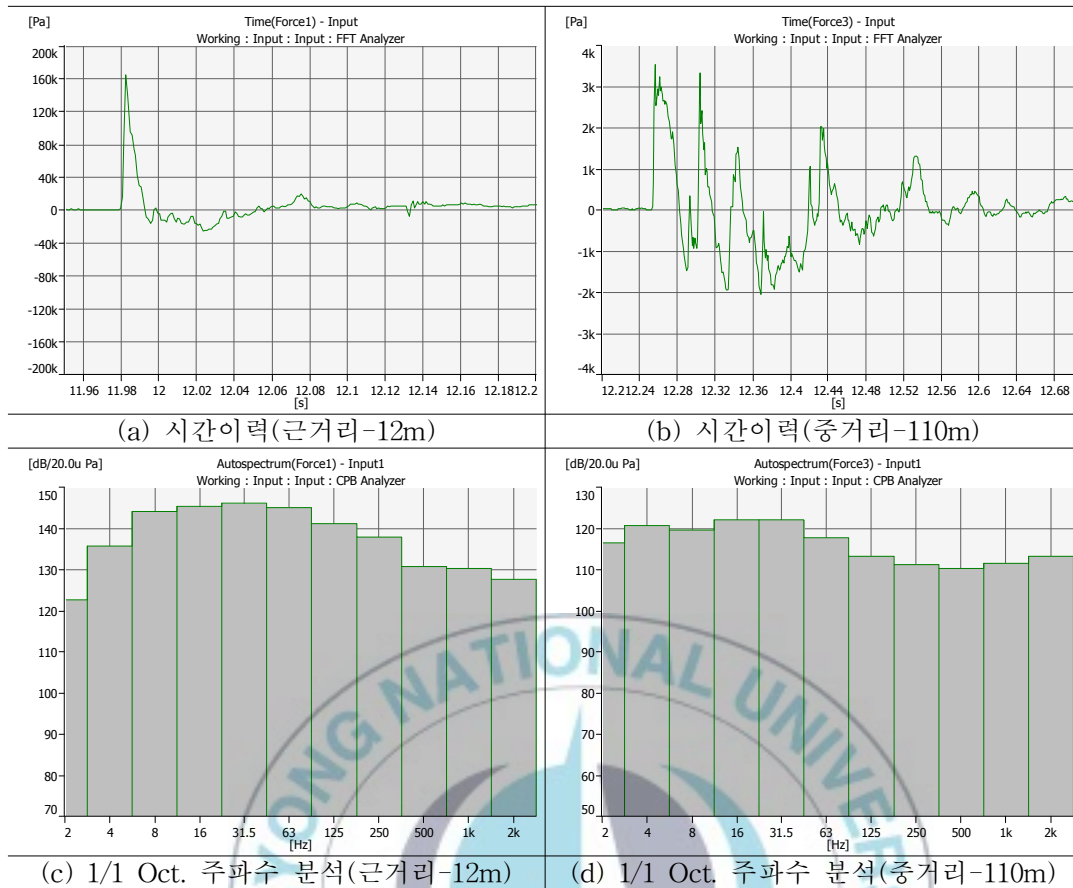


그림 20. 근거리 폭발소음 측정 결과(2회)

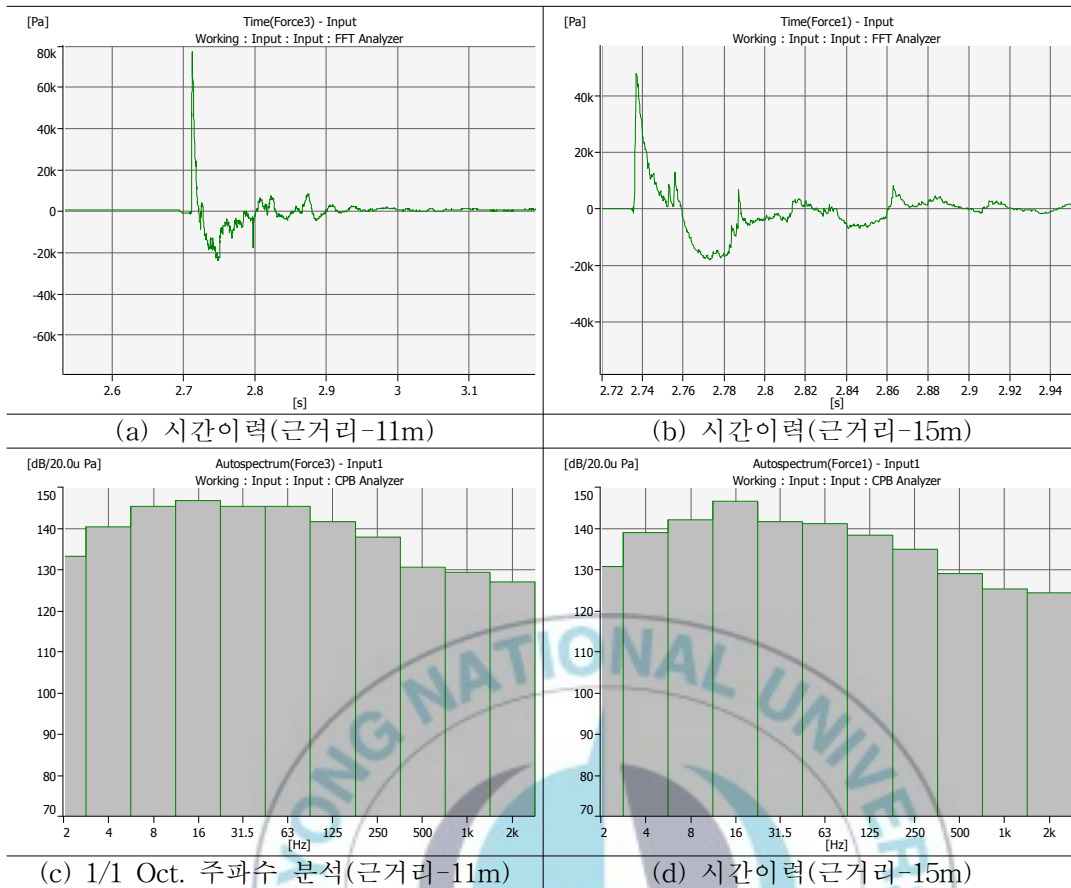


그림 21. 근거리 폭발소음 측정 결과(3회)

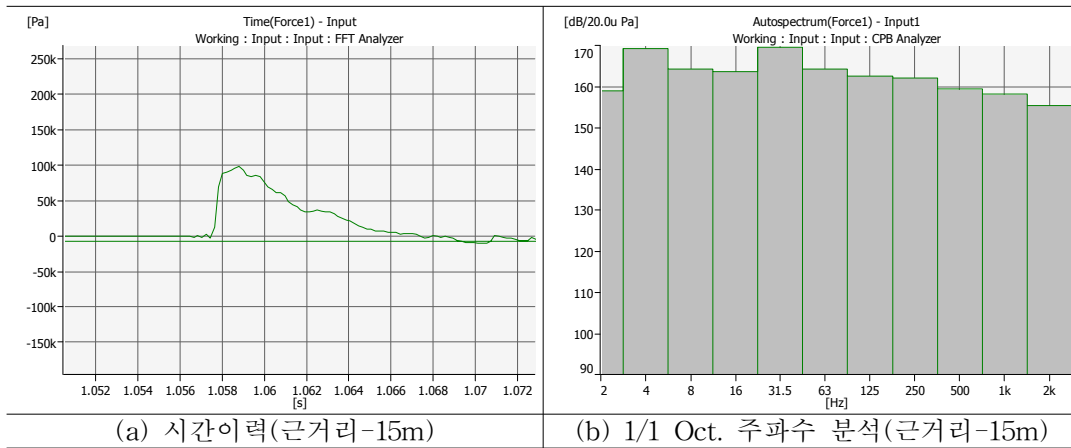


그림 22. 근거리 폭발소음 측정 결과(4회)

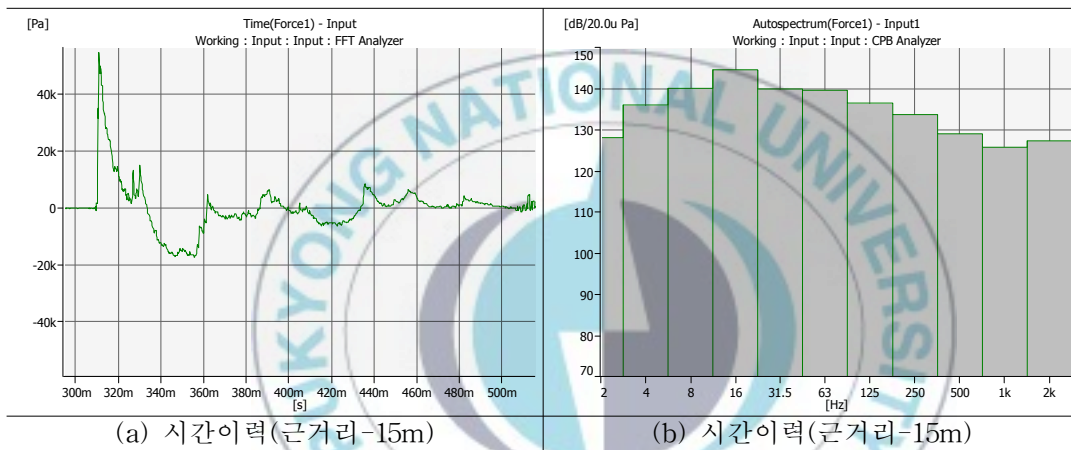
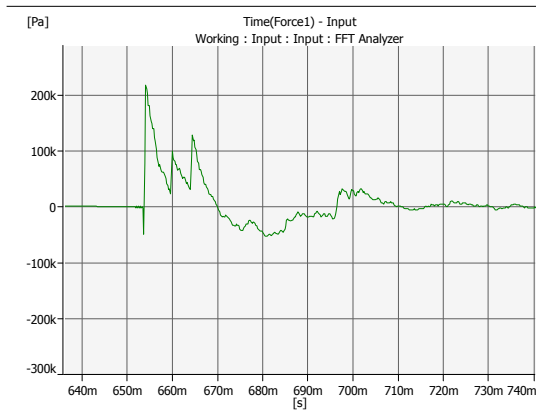
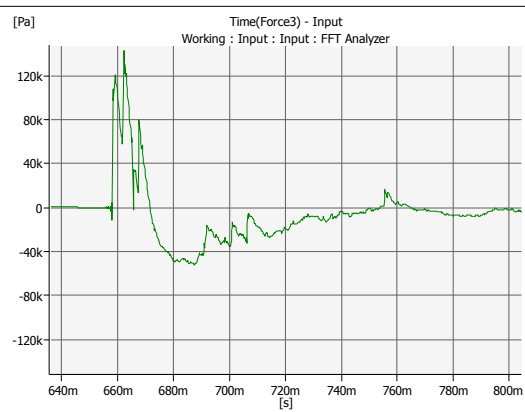


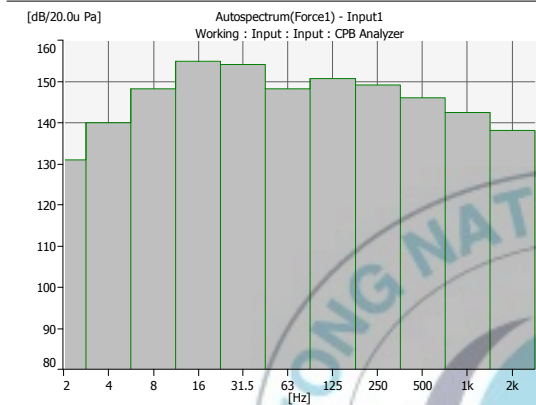
그림 23. 근거리 폭발소음 측정 결과(5회)



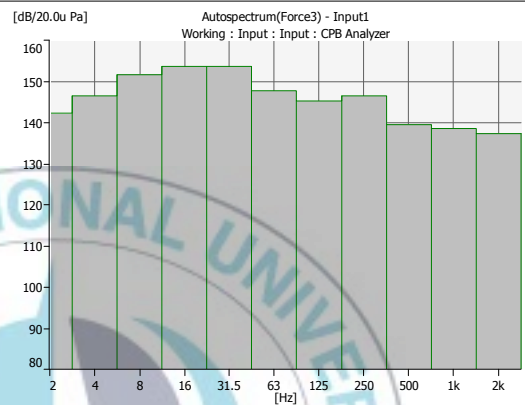
(a) 시간이력(근거리-8m)



(b) 시간이력(근거리-9m)



(c) 1/1 Oct. 주파수 분석(근거리-8m)



(d) 1/1 Oct. 주파수 분석(근거리-9m)

그림 24. 근거리 폭발소음 측정 결과(6회)

3.4 3단계 발파소음 음향시뮬레이션 및 현장측정

3단계 발파의 목적은 2단계에서 측정된 소음 자료를 활용한 실제 생산지역 주변 피해 예측 결과와 비교 평가하고, 최적 소음 저감 대책을 수립하기 위한 것이다. 발파 지역은 주변이 산지로 둘러싸이고 폭발지점 반경 1.4km 지점에 민가가 있는 곳이다. 폭약의 배치는 중심 간격 약 3m인 3개의 모재에 각각 78kg 1개소와 31.5kg 2개소로 분산 배치하였다. 측정 지점은 근거리의 경우 폭발 지점에서 10m 이격 지점 1곳에서 동압력 센서를 이용해 측정 하였다. 민가 지역은 폭발 지점과의 거리를 고려하여 피해가 예상되는 대표 지점에 일반 환경소음 측정용 소음계를 설치하여 별도로 측정 하였다.



그림 25. 3단계 현장 및 측정 지점

3.4.1 발파소음 시뮬레이션

주변지역 소음 예측은 ISO-9613 에 의한 소음 예측 알고리즘을 적용한 독일 DATAKUSTIK 社의 범용 소프트웨어 CADNA-A를 활용하였다. 소음 예측을 위한 음원 data는 3단계 폭약량 및 측정 거리에 따른 환산거리 Z값인 4.9와 가장 유사한 2단계 4회 측정값(Z=4.93)을 사용하였다. CADNA-A 는 SPL 측정값, 음원과 의 거리 등을 입력하면 ISO 3744 또는 3746 에 의해 음원의 음향파워를 아래 식 으로 계산한다. 15)

$$L_W = L_p + 10 \times \lg(4\pi r^2) + 10 \times \lg\left(\frac{n\%}{100\%}\right) \quad \text{-----} \quad (3.1)$$

표 9. 음원 입력 data

Hz	32	63	125	250	500	1000	2000
dBLin	169	164	163	162	159	158	155

15) DATAKUSTIK(CadnaA Version 3.7 Manual, 16.3.2:2007)

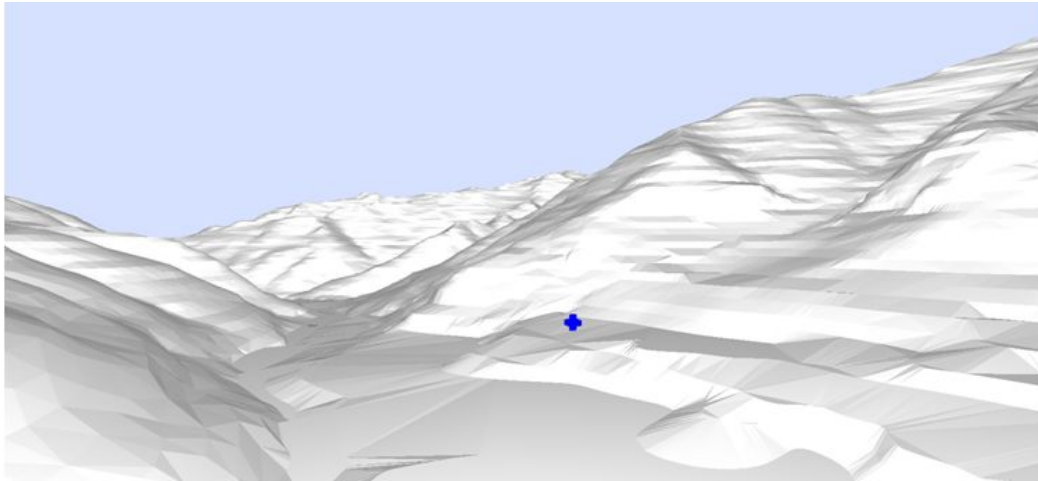


그림 26. 예측 모델(1:5000 3차원 수치지도 기반)



상기 모델로 소음 예측 결과 소음원 10m 이격 지점 소음도는 140dBA, 1.4km 이격된 민가 지역에서 73dBA 가 되는 것으로 예측되었다.

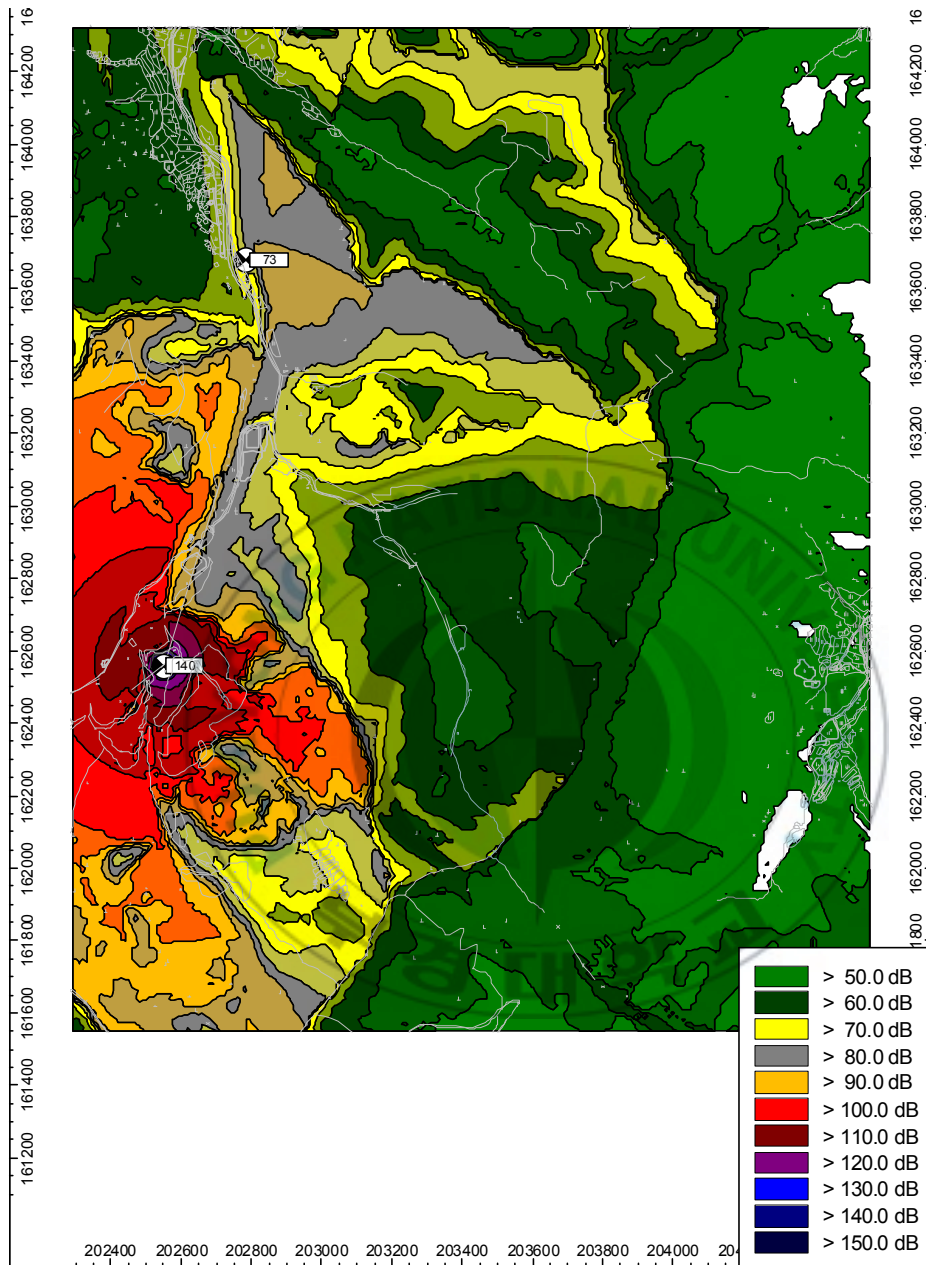


그림 27. 소음 예측 결과

3.4.2 소음 실측 및 비교

136kg 용량의 폭발 압력 및 소음은 10m 지점에서 시간이력상 최대 압력 64.3kPa, 주파수분석기준 138 dBA(rms) 이다. 1.4km 원거리 지점은 48.4 Pa, 74dBA(rms) 로 측정 되었다. 이는 같은 지점 예측값인 10m 140 dBA, 1.4km 73dBA 와 유사해 예측 결과가 타당함을 보여준다.

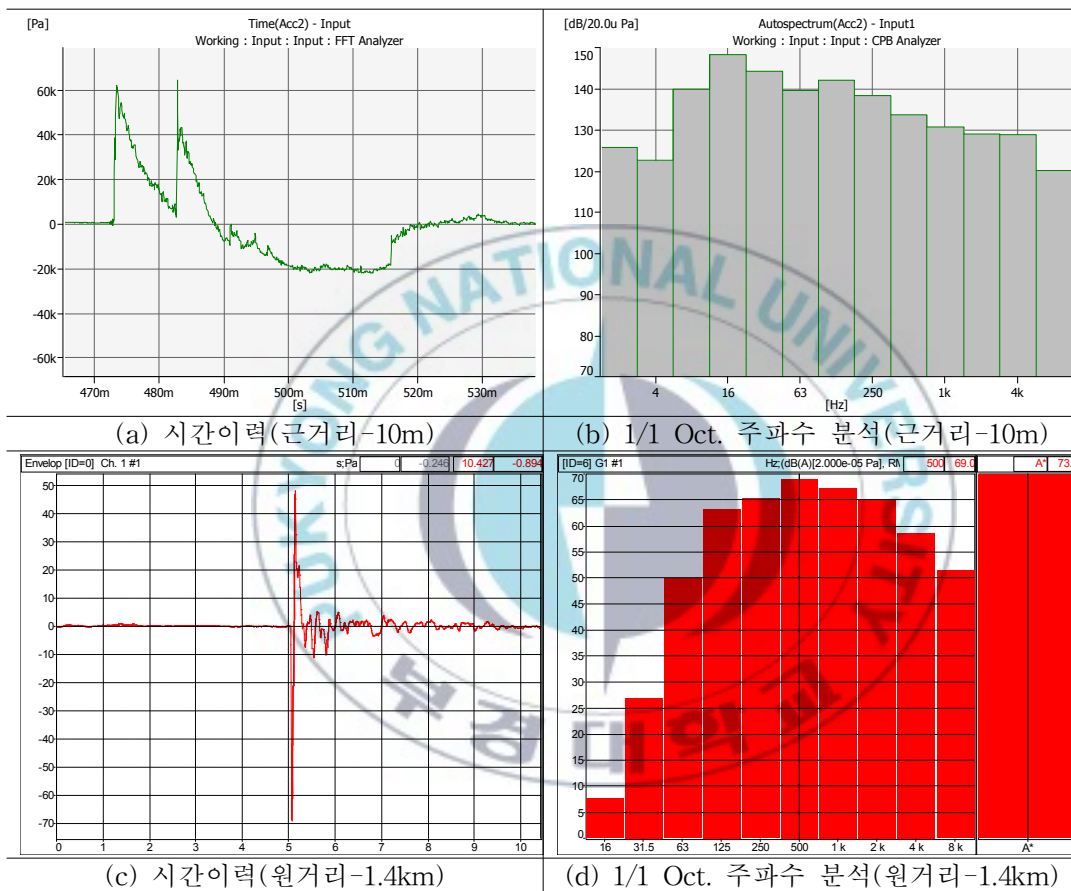


그림 28. 3단계 폭발소음 실측 결과

4. 폭발소음 차단을 위한 방음구조 설계

4.1 방음구조 설계 개요 및 조건

가장 효과적인 소음 저감 방법은 소음원 자체의 크기를 줄이는 것이다. 이는 폭발의 효과는 유지하면서 폭약량이나 폭발 소음을 줄일 수 있는 공정 개선 또는 폭약의 화학 성분 변경 등의 차원에서 접근해야 하므로 건축적인 대책에서는 검토하지 않았다. 또 실제 소음 피해를 입는 작업자 및 인접 지역 거주자들이 폭발 시간에 귀마개 등 청력 보호기구를 사용하는 것은 가장 소극적인 대책이고 모든 피해 대상자들에게 완벽하게 적용되기 어려우므로 논외로 하였다. 따라서 본 절에서 다루는 소음 저감 대책은 소음원과 수음점 사이의 소음 전달 경로상 어느 지점에 건축적인 차음 대책을 수립하는 방법에 한정하였다. 이 경우 폭발 작업장을 차음성능을 갖는 구조물로 감싸는 Enclosure 형태의 대책이 일반적이다.

UFC Code에서는 공기중 폭발이나 지면 자유음장의 폭발에 비해 장애물이 있을 경우 반사파에 의해 폭발 압력이 커진다고 되어 있다.(Confined Explosion) 이 경우 장애물이 폭발물의 전, 후, 좌, 우 및 상부 중 몇 개의 면을 막고 있는가에 따라 반사파의 크기 또한 상대적으로 커지게 된다. 극단적으로 6면이 모두 막힌 곳에서 폭발할 경우 구조물에 가해지는 충격으로 구조물의 붕괴 등 안전 문제가 발생할 가능성이 매우 높다. 그러므로 실제 이러한 방폭 구조물을 설계할 경우 일반적인 구조설계 외에 폭발 압력에 의한 구조물의 응답을 예측하여 안전성을 담보하는 비선형 해석이 이뤄져야 하며 실제 선박, 항공기, 철도, 교량 등 충격이나 충돌이 발생하는 구조물의 해석에는 ABAQUS, LS-DYNA, NASTRAN 등 비선형 해석 도구를 활용하고 있다. 본 연구 과제 역시 방음을 위한 구조물이라 하더라도 실제 적용을 위해서는 발생 가능한 충격하중을 예측하여 구조물의 설계에 반영해야 한다. 다만 본 연구의 범위가 단순히 소음 부분에 한정하여 진행 하므로 이러한 선행 과정은 제외하였다.

4.2 방음설계 목표수준 결정

생산시설 설치 예정지에서 실시한 소음 예측 및 실측 결과 인접 지역에서 최소 138dBA 이상, 민원 예상 지점에서 73dBA 이상의 소음이 발생할 것으로 판단된다. 실측으로 확인한 발파작업 공정상 작업시간을 08시~18시의 10시간으로 할 때 1일 최대 작업 가능 횟수는 6회 이하, 1회 최대 폭약량은 500kg 이하이고 1회 폭발시 소음 발생시간은 반사음을 고려해도 최대 30초를 넘지 않을 것으로 사료된다.

이를 앞서 살펴본 국내 소음 기준과 비교시 산업보건기준에 관한 규칙의 충격 소음작업 한도 이내가 되어 산업안전 관점의 법적 문제는 없을 것으로 예상된다.

배출소음의 경우 해당 기준은 보정 후 75dBA 이며 폭발 지점으로부터 120m 거리로 잠정 계획된 부지 경계선의 소음도는 시뮬레이션 및 Z값 계산 결과를 고려한 500kg 급의 대규모 폭발시 110dBA 이하일 것으로 예상되므로 허용 기준을 만족하려면 35dB 이상의 소음이 저감되어야 한다.

또 민가지역에 대한 생활소음 기준은 보정 후 65dB 이고 136kg 폭발시 73dBA 이므로 소량 생산 만으로 8dB 를 초과하고 있다. 따라서 500kg 급의 대규모 폭발의 경우 최대 20dB 가량 허용 기준을 초과할 수 있다.

위와 같이 법적 기준, 예측의 부정확성, 시공 오차 및 향후 대규모 생산을 고려하여 법적 기준을 만족하기 위한 소음 저감 목표는 Overall 기준 45dB 가 적합하다.

어떤 판넬(벽체)의 차음성능은 1/3옥타브대역으로 측정한다(ASTM E 90-70) 주파수별 투과손실을 판넬의 음향투과등급(STC, Sound Transmission Class) 수치로 나타낼 수 있다. STC 값은 벽체 등의 차음 투과 손실을 나타내는 단일지표로 미국에서 건축자재의 차음 특성을 표현하는데 사용하기 위해 개발되었으며 현재 보편적으로 사용되고 있는 평가 지표이다. STC 의 평가는 ASTM E90 시험실 시험 방법에 의해 나온 1/3 옥타브 밴드 125~4000 Hz 사이의 투과 손실의 그래프와 ASTM E413 에서 규정된 기준곡선과 비교하여 각 주파수에서의 측정치의 부족분

의 합이 32dB 이하이고 측정치의 최대차이가 8dB를 넘지 않을 때 기준 곡선의 500 Hz 에서의 차음 값을 취한다.

단일벽을 통한 음의 투과현상은 단위면적당 질량(m) 과 탄성계수(E) 를 통해 비교적 정확히 예측할 수 있으며, 저주파 및 중주파 대역의 음향투과손실(TL) 은 mass law 에 관한 아래의 식에 의해 구할 수 있다. 또 아래 그림과 같이 mass law 에 의한 저주파 대역의 음향 투과손실은 계산적으로 낮은 주파수의 값이 가장 낮고 옥타브 밴드에 따라 6dB 상승하게 된다.

$$TL = 20 \log (mf) - 48 \text{ dB} \text{-----} (4.1)$$

여기서, m=벽체의 단위면적당 질량(kg/m²)

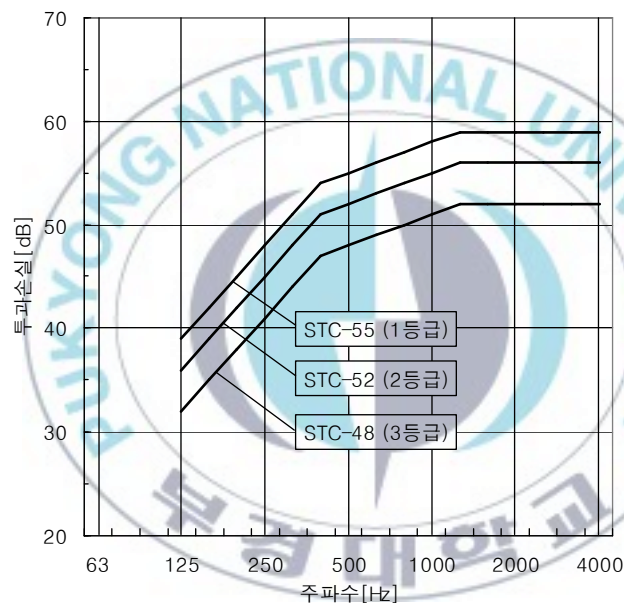


그림 29. 미연방 주택국(FHA)이 권장 STC 기준선

저주파 대역에서는 칸막이 크기에 따라 방사 효율이 저감됨에 따라 측정값이 mass law 에 의한 이론값보다 높아지게 된다. 이러한 현상은 상대적으로 작은 면

적의 유리창류 에서 두드러지게 나타나는 현상이며, ISO 140 에 따라 10-12m² 면적의 시편으로 시험할 때 가장 낮은 주파수 대역에서 두드러지게 나타나게 된다.

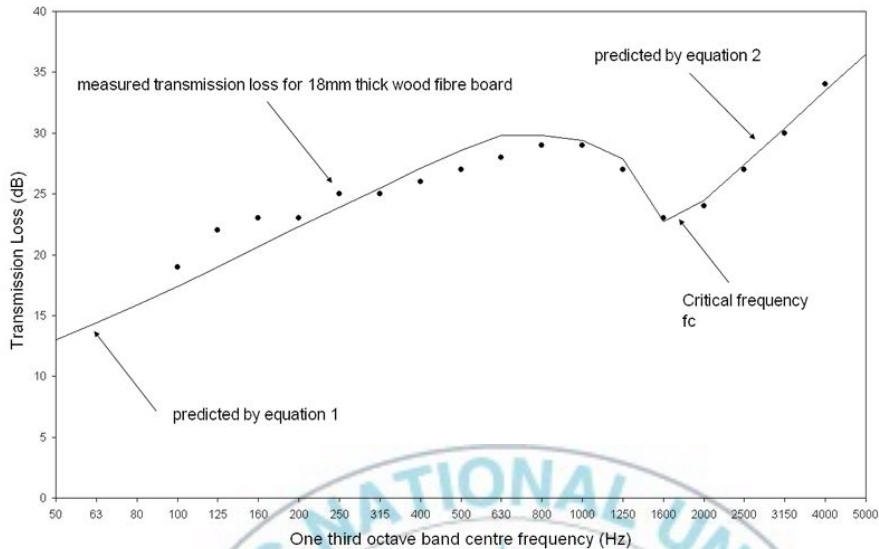


그림 30. 단일벽의 음향투과손실 예

4.3 방음 대책 설계

살펴본 바와 같이 일반적인 소음 저감 대책 설계는 1/3 옥타브 밴드의 경우 최저 50Hz, 1/1 옥타브 밴드의 경우 최저 63Hz 이상에 대해서 규정하고 있을 뿐 실측된 폭발 소음의 peak 주파수인 16Hz 및 31.5 Hz 에 대해서는 언급이 없다. 이는 현재 ISO 등 소음 측정 기준에서는 이처럼 낮은 주파수의 경우 파장의 길이가 매우 길어 기존 잔향실법 음향 투과손실 측정 기준으로는 정확한 측정이 어려운 한계가 있기 때문이다. 따라서 현재로서는 4.1 식에 의해 해당 주파수 16Hz 와 32Hz 대역의 음향 투과손실을 계산할 수밖에 없다. 단위면적당 질량이 동일한 재료의 경우 식 4.1 및 그림 41 과 같이 가장 낮은 주파수인 16Hz 대역의 음향 투

과손실이 정해지면 그 다음 밴드 주파수의 음향 투과손실은 그보다 더 높게 되므로 16Hz 대역의 음향 투과손실 목표를 45dB 로 하면 된다. 따라서 식 5.1 에 의해 16Hz TL 이 45dB 가 되려면 $[45 = 20 \log (m \times 16) - 48]$ 이므로 단위면적당 질량 $m = 2790\text{kg}$ 이 된다. 이 정도의 질량을 갖는 재료 중 쉽게 사용 가능한 것은 철근콘크리트 이므로 일반적인 철근콘크리트의 질량을 2500kg/m^3 로 하면 필요한 두께는 1116mm 가 되며 전용 계산 소프트웨어인 INSUL을 사용하여 구한 해당 재료의 주파수별 음향 투과 손실은 다음 그림과 같다. 이 때 콘크리트 벽의 크기는 임의로 10 x 10m 로 설정하였다.

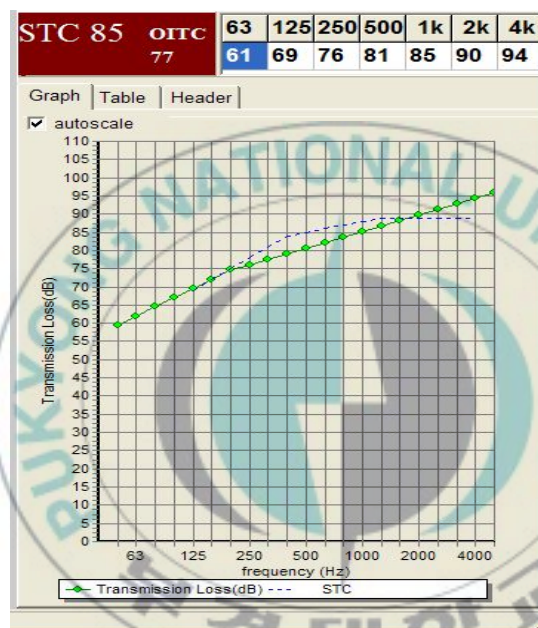


그림 31. 콘크리트 TL

위 그림처럼 16Hz 음향투과손실 45dB를 만족하는 콘크리트 벽의 음향투과손실은 STC 85 이다. 그러나 이는 이론에 의한 계산 값이며 50Hz에서 오차가 최대 7dB 까지 발생 가능하다.

5. 결 론

본 연구는 폭발물을 이용한 이중금속 특수접합공법 작업 시 발생하는 충격소음 분석을 통해 폭발 소음 차단용 방음 구조물 설계의 소음원 자료를 제공하여 주변 지역의 소음영향 저감대책 수립에 기여하고자 수행 하였으며 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 기존의 미 광무국 발파소음 예측식과 이를 이용한 중앙환경분쟁조정위원회 제안식은 실제 해당 공법 소음 발생 및 전파 양상과는 상이하여 소음 예측에 적합하지 않다.

둘째, 발파 소음원의 특성을 알아보기 위하여 폭발지점에서 8~110m 내의 근거리 및 중거리 지점에 동압력 센서를 배치하고 소음을 계측하였다. 그 결과 해당 발파 소음의 시간별 파형 특성은 전형적 발파소음 특성과 유사하였으며, UFC규정의 사례와 유사하게 폭약의 삼승근과 밀접한 관계가 있었고, 폭발 지점과의 거리와 대수적으로 감소하는 특성을 갖는다.

셋째, 현장 계측 결과 발파 소음의 주된 주파수는 16Hz 및 31.5Hz의 저주파 대역에서 가장 높은 특성을 보였으므로, 차음 대책 수립 시 이 저주파를 차단 하는 방법의 강구가 필요하다.

넷째, 소음원 크기가 적절하게 정의될 경우, 실제 지형을 반영한 ISO 9613 기반 범용소음시뮬레이터는 비교적 정확한 소음전달 예측이 가능하다.

끝으로 본 연구의 결과를 바탕으로 다음과 같은 후속 연구가 필요하다고 생각된다.

- ① 폭발지점 주변에 벽 또는 지붕 등 반사면이 존재할 경우의 발파소음
특성 변화
- ② 환경소음 측면에서의 저주파 충격음 측정 및 평가 방법
- ③ 저주파 충격음의 효율적인 차단 및 저감 대책



참고 문헌

1. ISO 1996-1 Acoustics Description, measurement and assessment of environmental noise Part 1: Basic quantities and assessment procedures, 2003)
2. 건설교통부, 발파소음·진동허용기준검토(안) : 2002
3. U.S. Department of Defense, UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC) 3-340-02. Structures To Resist The Effects Of Accidental Explosions, 2008
4. Patrick L. Walter, Air-Blast and the Science of Dynamic Pressure Measurements, 2004
5. 환경부, 소음진동공정시험 기준, 2010
6. KS C 1502 : 2006 소음계
7. WHO, Guidelines for Community Noise, 1999
8. 건설교통부, 도로공사 노천발파 설계·시공 지침, 2006
9. 중앙환경분쟁조정위원회, 공사장 환경분쟁사건 소음·진동도 산출방법 개선 연구, 2007
10. US Army Engineer Research and Development Center website(erd.c.usace.army.mil), 2009
11. OAK RIDGE National Laboratory, Demonstration Of The Military Ecological Risk Assessment Framework (MERAF): APACHE Longbow-Hellfire Missile Test At YUMA Proving Ground, 2001
12. 노동부, 산업보건기준에 관한 규칙, 2007
13. 환경부, 소음·진동관리법, 2010
14. U.S. Army Corps of Engineers, Design Guide for the Sustainable Range Program, Environmental Requirements, 4:2007
15. Timo Markula, Propagation, measurement and assessment of shooting noise, 2006

16. John C. Freytaga 外T, he Acoustics of Gunfire, 2006
17. Tadeusz Wszolek & Maciej Klaczynki, Accuracy of Assessing the Level of Impulse Sound From Distant Sources, 2007
18. Lisse Holland, Defence Research and Explosive Processing of Materials Defence, 2008
19. Jan Jera, Impulse Noise In Industrial plants: Satistical Distributions Of Levels, 2001
20. Colin H Hansen, FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS
21. Gordon F. Revey, Blasting Impacts Assessment for Proposed Idaho-Maryland Mine Project, 2008
22. Explosive Ordnance Disposal (EOD), Monitoring Proposal, Explosive Ordnance Disposal (EOD) Monitoring Proposal, 2010
23. U.S. Army Corps of Engineers, Design Guide for the Sustainable Range Program Infantry Platoon Battle Course(IPBC) Volume, 2004
24. NORTH ATLANTIC TREATY ORGANISATION, Reconsideration of the Effects of Impulse Noise, 2003
25. George Goley, Investigation and Improvement of Occupational and Military Noise Exposure Guidelines: Evaluation of Existing and Modified Noise Exposure Metrics Using Historical Animal Data, 2010
26. 서울대학교 수의과학연구소, 소음·진동으로 인한 가축피해 평가 및 배상액 산정기준의 합리적 조정방안 연구, 2009
27. 건설교통부 감사관실, 발파소음·진동허용기준검토(안), 2002
28. 서울시립대학교, 발파소음·진동측정방법 및 규제기준 개선방안에 관한 연구, 2003
29. Patrick L. Walter, Air-Blast and the Science of Dynamic Pressure Measurements, 2004
30. 박준호/강추원, 폭풍압 및 소음의 실측치와 예측치의 상관관계 검토, 2007

31. Defence R&D Canada, Impulse Noise: Measurement Techniques and Hearing Protector Performance, 2006
32. Heinz H. Brinkmann, Techniques And Procedures For The Measurement Of Impulse Noise, 2000
33. 1. U.S. Department of Defense, MIL-STD-1474D Design Criteria Standard : Noise Limits, 1997
34. George A. Young, John G. Banker, Explosion Welded, Bi-Metallic Solutions to Dissimilar Metal Joining, 2004
35. B.H.Sharp, Prediction Methods for the Sound Transmission of Building Elements. Noise Control Engineering Vol 11 1978
36. L.Cremer M.Heckel E.E.Ungar, Structureborne Sound (Springer Verlag,1988)
37. F.Fahy, Sound and Structural Vibration (Academic Press, 1985)
38. S. Ljunggren, Airborne sound insulation of thin walls. Journal of the Acoustical Society of America Vol 89, 1991
39. J. H. Rindel, Sound Radiation from Building Structures and Acoustical Properties of Thick Plates. COMETT-SAVOIR Course Notes, CSTB Grenoble
40. Marshall Day Acoustics, Insul 6.2 manual
41. ISO 10843 : 1997, Acoustics - Methods for the description and physical measurement of single impulses or series of impulses
42. ISO 13474 : 2009, Acoustics . Framework for calculating a distribution of sound exposure levels for impulsive sound events for the purposes of environmental noise assessment
43. ISO 1996-1 : 2003, Acoustics-Description, measurement and assessment of environmental noise-Part 1: Basic quantities and assessment procedures
44. ISO 1996-2 : 2007, Acoustics-Description, measurement and assessment of environmental noise-Part 2: Determination of environmental noise levels
45. PCB Piezotronics, Inc., Model 106B ICP Dynamic Pressure Sensor Installation and Operating Manual

Impulse Noise Assessment of Dissimilar Metal Cladding Using Blast Energy For Noise Insulating Structure Design

by Seong-Geun Jeong

Department of Architectural Engineering, Graduate School
Pukyong National University

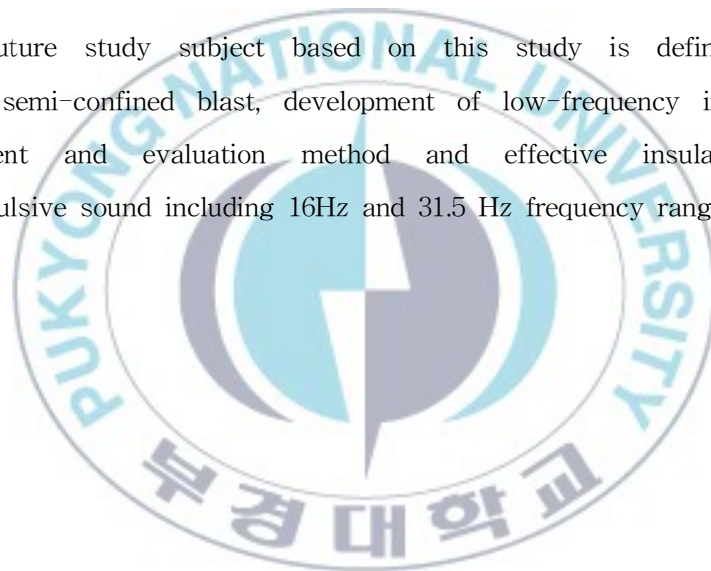
Abstract

Recently, a specific applied cladding method by rapidly accelerating cladder metal to the backer(the parent metal) using explosive energy enables each dissimilar metals welds overall surface. For its such chemical and physical advantage, It is used to the specific commercial and military purpose and domestic technical development is in progress recently. But The noise from blast has been provoking a complaints from the neighboring residents. So the necessity of blast noise assessment is raised prior to the explosion resistive and sound insulating structure design.

The scope of this study includes noise assessment by simulation, repetitive site measurement of impulsive sound of detonating more than 20kg of TNT-equivalent explosives and proposal of sound insulation design. The measurement configured as 3 steps. The 1st step is test blast to determine the close measurement range and methode of 2nd step. The 2nd step is close blast test to determine blast sound source and the 3rd step is actual place blast measurement to obtain actual community noise countermeasure design.

According to those assessment described above, corrected noise prediction method of USBM equation suggested by National Environmental Dispute Resolution Commission, a government-affiliated organization of Korea, is not applicable to the studied type of impulse noise. If the sound source is properly determined, a general outdoor noise simulation software adopting ISO 9613 noise propagation calculation method is applicable to the impulsive sound prediction for community noise assessment. The time duration characteristics is similar to the that of impulsive sound described in ISO 10843. The dynamic pressure of blast is proportional to the distance from explosives and inversed cube root of explosive mass. The sound insulation design should focusd on the 16 Hz and 31.5 Hz, the measured peak frequency of explosion.

The suggested future study subject based on this study is defining the characteristics of semi-confined blast, development of low-frequency impulsive sound measurement and evaluation method and effective insulation of low-frequency impulsive sound including 16Hz and 31.5 Hz frequency range.



감사의 글

석사과정을 시작하고 10년이 지나도록 지지부진하던 논문을 마칠 수 있게 영감을 주신 임영빈 지도교수님께 마음 깊이 감사드립니다. 선배이자 주심으로서 아이디어를 논문으로 열매 맺도록 도와주신 정근주 교수님께 진심으로 감사드립니다. 따뜻한 마음으로 논문을 지도해 주신 이수용 교수님께 감사드립니다.

늦게나마 연구를 매듭지을 수 있도록 격려와 함께 지도해 주신 부경대학교 건축학부의 류종우 교수님, 조홍정 교수님, 신용재 교수님, 박천석 교수님, 김기환 교수님, 김영찬 교수님, 이재용 교수님, 조영행 교수님, 오장환 교수님, 홍성민 교수님, 노지화 교수님, 송대호 교수님께 감사드립니다.

좋은 주제를 제공 해 주시고 논문으로 이끌어 낼 수 있도록 많은 도움 주신 (주) 한화 민형동 부장님, 공중옥 부장님, 이광일 과장님 및 이계섭 대리님 감사드립니다. 처음 소음 엔지니어의 길로 이끌어 주신 부산정보대학 박민용 교수님, 김동완 박사님, 조성우 박사님, 부족한 저를 사회인으로 키워 주신 사차원 엔지니어링의 양원선 사장님 감사드립니다.

일과 학업을 병행할 수 있도록 배려해 주신 멋진 리더 이흥기 박사님, 손성완 박사님을 비롯한 RMS 가족 여러분께 너무 많은 도움을 받았습니다. 특히 기꺼이 오지에서 위험을 무릅쓴 김주영 과장, 송준한 대리, 장민성 대리 덕분에 좋은 자료를 얻을 수 있었습니다. 박지훈, 박상환, 권용준 선배, 문보형, 유동우 소장님, 이갑택 과장님, 이봉두 사장님, 늦깎이 졸업생 때문에 고생하신 오근숙, 조은경, 서민호 후배를 비롯한 환경설비연구실의 선후배님들 감사합니다.

저와 저희 가족을 있게 하신 어머니, 장모님 존경합니다. 살아계실 때 보다 지금 더 커 보이는 아버지의 그림자가 오늘따라 더 그림습니다.

나의 에너지, 아들 지성 딸 지나 사랑한다.

소중한 동역자 이은영, 사랑하오.

하나님께 감사드리며 모든 분들 삶에 은총이 임하시기를 기원 드립니다.

2010년 12월

정 성 근

