

BSPE 00248-453-7

음원의 공기압과 수심의 변화에 따른
Water Gun 신호음의 특성연구

A Study on the Signal Characteristics of Water Gun
with the Changes of Water Depth and Air Pressure

1992. 4.

한국해양연구소

제 출 문

한국해양연구소장 귀하

본 보고서를

'음원의 공기압과 수심의 변화에 따른 Water Gun 신호음의 특성연구' 과제의
최종보고서로 제출합니다.

1992년 4월

연구책임자 : 김예동, 남상헌

요 약 문

I. 제목

음원의 공기압과 수심의 변화에 따른
Water Gun 신호음의 특성연구

II. 연구개발의 목적 및 중요성

해저지형 및 지층구조 연구를 위하여 여러종류의 탄성파 (Acoustic or Seismic Wave) 탐사장비 System이 이용된다. 탄성파 탐사장비의 성능은 사용되는 음원의 특성과 신호음을 포착하는 수신기 및 획득된 자료의 일차처리 과정에 따라 좌우된다.

그중 수신기나 자료처리장치에 대해서는 많은 개선이 이루어져 왔으나 음원에서 발생하는 신호음에 대해서는 사용장비의 기계적인 특성에 의존하므로 장비의 이용시 반복적인 시행착오를 통하여 획득자료의 품위를 높여왔다. 따라서 보다 효과적인 장비의 이용을 위해서는 장비의 기계적 특성을 확인하고, 음원에서 발생하는 신호에 대한 음향학적인 특성을 규명하는 것이 필요하다.

본 연구는 Water Gun을 음원으로 사용할때, 여러가지 조건하에서 만들어지는 초기신호음의 음향학적 특성을 규명함으로써, 조사목적에 맞게 동장비를 사용하게 하려는데 목적이 있다.

Ⅲ. 연구내용 및 범위

- 해양탄성파 에너지원의 특징
- Water Gun의 구조
- Water Gun의 작동
- Near-field 와 Far-field
- Near-field에서의 Water Gun 파형
- Near-field에서의 파형변화
- Far-field에서의 Water Gun 파형
- Far-field에서의 파형변화
- WATER GUN 초기파형의 주기변화

Ⅳ. 연구개발 결과 및 활용방안

- 음원의 주변조건 변화에 따른 발생신호음의 음향특성자료를 축적함으로써 음향학 분야의 기초자료로 제시되며,
- 장비의 기계적인 특성에 의존하지 아니하고, 실험·관측을 통한 실질적인 음향특성이 파악됨으로써 동 장비의 효율을 극대화하고,
- 관련된 탄성파 탐사장비 사용시 기초자료로 이용한다.

SUMMARY

I. Title

A Study on the Signal Characteristics of Water Gun
with the Changes of Water Depth and Air Pressure

II. Purpose and Importance of the Study

For the study of sea-bottom morphology or Sedimentary structure, various types of seismic system are used. Performance of seismic systems depends on the characteristics of initial pulse, hydrophone which receives seismic signal and primary data processor.

There has been a continuous improvement on seismic receiver and data processor but the seismic efficiency of initial pulse was not great improved. In that, it depends on mechanical aspect of instrument and was developed with try-and-error.

The purpose of this study is to understand the characteristics of water gun signature, and its changes with water depth and air pressure for maximizing the efficiency and proper use of water gun as a seismic source.

III. Contents and Scope of the Study

- Properties of the Marine Seismic Energy Sources
- Structure of the Water Gun S80

- Operating Mechanism of the Water Gun
- Near-field and Far-field
- Water Gun Signature in Near-field
- Changes of Signature in Near-field
- Water Gun Signature in Far-field
- Changes of Signature in Far-field
- Change of Initial-Pulse Period

IV. Results and Suggestions

- To provide basic data for the initial pulse of the water gun in various conditions,
- To maximize the efficiency of the water gun,
- To provide a necessary information when the water gun is used with other seismic instrument.

CONTENTS

1. INTRODUCTION	12
2. PROPERTIES OF MARINE SEISMIC ENERGY SOURCES	14
3. FEATURE OF THE WATER GUN S80	26
A. Structure of the Water Gun	26
B. Operating Mechanism of the Water Gun	28
4. SIGNATURE AND ITS CHANGES OF WATER GUN PULSE	30
A. Near-field and Far-field	30
B. Water Gun Signature in Near-field	32
C. Changes of Signature in Near-field	36
D. Water Gun Signature in Far-field	40
E. Changes of Signature in Far-field	43
F. Change of Initial-Pulse Period	45
5. REFERENCES	47

LIST OF FIGURES

Fig. 1	source comparision criterion (farfield signature) in time domain -----	17
Fig. 2	Source comparision criterion in frequency domain (Amplitude and Energy Spectra) -----	17
Fig. 3	Effect of initial-pulse width (2, 4, 8 and 16 ms) on energy spectrum -----	18
Fig. 4	Effect of source depth on energy spectrum -----	18
Fig. 5	Effect of initial-pulse rise time (of 1,2 and 4 ms) on energy spectrum for an air gun array -----	19
Fig. 6	An idealized air gun array signature -----	19
Fig. 7	Classification of marine seismic energy source signatures Peak to-peak(p-p) initial amplitude have been normalized ----	20
Fig. 8	Effect of gun pressure and volume on source strength for high-pressure air guns -----	20
Fig. 9	a) Farfield Signature and b) amplitude and energy spectra plot for Western array 1050 -----	21
Fig.10	a) Farfield Signature and b) amplitude and energy spectra plot for Flexichoc array 16 ea FHC-50 -----	22

Fig.11	a) Farfield Signature and b) amplitude and energy spectra plot for Sparker 30 kjoule -----	23
Fig.12	a) Farfield Signature and b) amplitude and energy spectra plot for Water gun HWG-57 -----	24
Fig.13	a) Farfield Signature and b) amplitude and energy spectra plot for Soder Water gun -----	25
Fig.14	Schematic diagram of the water gun S80 -----	27
Fig.15	Operating process of the water gun S80 -----	29
Fig.16	Measurement locations for various marine seismic source signatures -----	31
Fig.17	Near-field pressure signature radiated by S80 at a depth of 1.5m and a chamber pressure of 2,000psi -----	33
Fig.18	Comparisions of a) the source signatures and b) the power spectral density functions of 80 inch ³ water gun and air gun -----	35
Fig.19	Typical near-field signatures in true amplitude format, all signatures were recorded separately -----	37
Fig.20	The same signatures as in Fig.19 but with amplitudes to the same size -----	37

Fig.21	Changes in the frequency dimain properties of the near-field field signature with changes in gun depth -----	38
Fig.22	Changes in the frequency dimain properties of the near-field signature with changes in firing pressure -----	38
Fig.23	Changes in the near-field peak pressure with changes in the gun depth -----	39
Fig.24	Changes in the near-field peak pressure with changes in the firing pressure -----	39
Fig.25	Measured and predicted far-field pressure signatures and their amplitude spectra radiated by water gun at 4m ----	41
Fig.26	Measured and predicted far-field pressure signatures and their amplitude spectra radiated by water gun at 6m ----	42
Fig.27	Measured far-field signatures compared to near-field signatures convolved with source ghost operators -----	44
Fig.28	Changes in the far-field peak pressure with changes in the gun depth -----	44
Fig.29	Changes in the far-field peak pressure with changes in the firing pressure -----	44
Fig.30	Comparision of measured water gun period to theoretical air gun period under various firing conditions -----	46

목 차

1. 서 론	12
2. 해양탄성파 에너지원의 특징	14
3. WATER GUN S80의 기작	26
가. Water Gun의 구조	26
나. Water Gun의 작동	28
4. WATER GUN의 파형과 그 변화	30
가. Near-field 와 Far-field	30
나. Near-field에서의 Water Gun 파형	32
다. Near-field에서의 파형변화	36
라. Far-field에서의 Water Gun 파형	40
마. Far-field에서의 파형변화	43
바. WATER GUN 초기파형의 주기변화	45
5. REFERENCES	47

1. 서론

해저지형 및 지층구조 연구를 위하여 여러종류의 탄성파 (Acoustic or Seismic Wave) 탐사장비 시스템이 이용된다. 이것들은 음원으로부터 발생된 신호음이 해수층을 통과하여 해저지층의 정보를 지닌채 지구내부로 전파되며, 그중 일부의 에너지는 지층 불연속면에서 반사 혹은 굴절되며 되돌아오는데, 수신기가 이러한 되돌아오는 신호음을 포착하여 지니고 있는 제반 정보를 획득케 하는 일련의 시스템이다. 따라서 탄성파 탐사장비는 발생하는 음원의 특성과 신호음을 포착하는 수신기 및 획득된 자료의 일차처리 과정에 대한 기능이 매우 중요하다. 그러나 선택되는 장비의 기종 및 이용 방법에 따라 사용되는 수신기는 커다란 차이가 없기때문에, 탄성파 탐사장비 시스템의 우수성은 무엇보다도 음원의 특성과 획득자료의 일차처리기능에 따라 구별된다.

그러나 탄성파 탐사자료의 효과적인 해석을 위한 획득자료의 일차처리 기능과 후속 재처리과정에 관해서 많은 연구가 이루어진 반면, 음원으로부터 발생하는 초기신호음에 대해서는 사용장비의 기계적인 특성에 의존하고 있으므로 장비의 이용시 반복적인 실험을 통하여 획득자료의 질을 높여왔다 따라서 목적하는 바의 탐사자료를 효과적으로 얻기 위해서는 사용장비의 기계적 특성을 이해하고, 이것이 만들어내는 음향학적인 특성을 규명하는 것이 필요하다.

본 연구는 다양한 해양탄성파 에너지원의 종류별 특성을 비교하고, 특히 Water Gun의 부피, 공기압, 수심의 변화에 따른 초기신호의 특성과 세기, 파형변화등을 파악하려는데 목적이 있다.

해상탄성파 탐사를 위한 음파발생장치인 water gun은 국내에서는 처음으로 도입된 것이다. water gun은 고압의 공기를 순간적으로 해수중에 방출함으로써 음파를 발생시키는 air gun이나, 공급되는 공기의 연소를 통하여 폭발·팽창하고 이러한 팽창력을 이용하여 음파를 발생시키는 gas gun과 비슷한 원리로 음파를 발생시키는 장치이다. 그러나 널리 쓰이는 air gun과는 달리, 고압의 공기를 이용하지만 이를 직접 방출하지 않고 공급된 공기가 gun 내부의 shuttle을 움직여, 이에따른 해수의 빠른 운동을 일으킴으로써, 공동(cavity)의 생성과 내사(implosion)에 의한, 음파를 발생시키는 음원발생기이다. 따라서 water gun에 의한 발생신호음의 일반적인 특징은 지속적인 bubble pulse가 발생하지 않고, 주 주파수영역이 air gun보다 약간 높기 때문에 천부층에서의 해상도를 높이는데 유리하다.

본 연구 대상인 water gun은 Seismic System Inc.사 제품인 모델 S80으로 매 폭발시 마다 80 inch³의 공기를 소모하는 gun이다. 본 연구보고서에서는, 남극현장에서의 해저지형 및 지층구조 연구를 위하여 실시된, S-80 water gun을 이용한 탄성파 탐사항해를 통해 얻은 제반의 음향학적인 신호음의 특성과, water gun과 관련된 문헌조사 및 자료의 수집·분석을 통하여 파악된 파형의 특성변화를 정리하였다.

2. 해양탄성파 에너지원의 특징

해양 탄성파 에너지원의 음향학적 특성을 비교·연구하기 위해서는 다음과 같은 두가지의 표준화된 요소가 사용된다(Johnston and Cain, 1982). 첫째, 음원에서 1 m 떨어진 지점에서 수신되는 초기 탄성파 신호(initial seismic pulse)를 0~128 Hz 사이로 필터링한 far-field 파형, 그리고 초기 파 대 거품파 (initial-to-bubble pulse) 의 비율과 둘째, 위에서 규정한 far-field 파형의 energy flux spectral density 이다.

위의 정의에 따르면 음원의 세기란 음원에서 1 m 떨어진 지점에서 0~128 Hz 사이로 필터링된 음향학적압력(acoustic pressure)을 의미하며 total energy flux 란 1 m 지점에서 0~128 Hz로 필터링된 신호의 단위 면적당 에너지를 의미한다. 이러한 비교요소들은 시간 혹은 주파수영역에서 각각 표시될 수 있는데 Fig.1 은 음원의 세기, 사용된 필터의 범위, 초기파 대 거품파의 비등이 시간영역(time domain)에 표시된 예이다. 음원의 세기(Pa)는 near-field 파형에서는 zero-to-peak 사이의 진폭이며 far-field 파형에서는 peak-to-peak 진폭을 의미한다. 이때 압력의 단위는 bar(10pascal)이다. 음원의 세기는 수신장치의 필터에 의해서도 좌우되는데 보통 0~125 Hz(2ms sampling rate)와 0~250 Hz(1ms sampling rate)가 사용 된다.

음원의 특성이 주파수 영역(frequency domain)에서 표시되기 위해서는 스펙트럼 해석(spectral analysis)을 통해 각 주파수에서의 에너지를 산출해야한다. Fig.2는 주파수 영역에서 음원의 특성을 분석한 예이며 total energy flux 값이 동시에 표시되어 있다. Total energy flux는 energy flux spectral density($E(k)$)의 합으로 구해지는데 $E(k)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$E(k) = (\Delta t/PC) \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \pi k n / N}$$

$$k = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$$

$x(n)$ = digital time sample

t = sampling interval

N = time sample의 수

P = 음원 주위 물질의 density

C = 주위 물질내의 음파전달속도

$$j = (-1)^{1/2}$$

$E(k)$ = 주파수 k 에서의 energy flux spectral density

주파수 영역에서(Fig.2) 진폭의 단위는 micropascal/Hz at 1 m 이며 energy flux 의 단위는 Joule/m²/Hz at 1 m 이다.

시간 영역과 주파수 영역에서 음원의 세기와 파형의 특성에 영향을 미치는 각종 요소들을 보면 다음과 같다. 음원의 세기 Pa 와 air-gun 부피 (Vc)와의 관계는 실험적으로 다음과 같음이 밝혀졌다.

$$Pa \propto Vc^{1/3}$$

한편 초기파의 pulse-width에 따른 주파수의 변화를 보면 pulse-width가 커질수록 저주파의 에너지가 방출되며, pulse-width가 작으면 해당 주파수 영역에 에너지가 고루 분산되어 나타난다 (Fig.3). 음원의 깊이에 따른 에너지의 변화를 보면 음원의 수심이 깊을수록 저주파 에너지가 커지는 경향을 보인다 (Fig.4). Fig.5는 initial pulse rise time(Fig.6)의 변화에 따른 에너지 스펙트럼을 보여주는데 125 Hz 이상의 주파수 영역에서는 rise time 이 길어질수록 고주파수 에너지가 커지는 것을 알 수 있다.

해양 탄성파 에너지원의 특성은 크게 impulsive, resonant, implosive 등 세가지로 구분 될 수 있다(Fig.7). Impulsive 타입은 air gun array를

사용할 때 나타나는데, 각 gun 에서 생성된 bubble 들이 서로 상(phase)을 달리 하도록 gun 의 작동 시간을 조정하므로써 initial-to-bubble 의 비를 향상 시킨 것이다. 보통 air gun array 인 경우 initial-to-bubble 의 비는 6~16 사이이다. Resonant 타입은 단일 air gun 을 사용하는 경우이며 에너지 스펙트럼에서는 bubble 의 주파수에 따라 에너지 최대값의 위치가 변한다. Implosive 타입은 해수중 공동이 생성되었다가 내부로 다시 수축될 때에 주 에너지가 발생하는 형태이며, 주 신호(main pulse) 직전에 작은 impulsive 에너지가 수반된다. Implosive 음원은 impulsive 타입에 비해 고주파수 영역의 에너지가 생성되는데, sparker, steam gun, water gun 등에 의해 생성되는 음원이 그 예이다.

최근에 널리 사용되고 있는 air gun 의 경우, 공기의 압력, gun 부피와 음원의 세기는 서로 상관 관계가 있다. 실험에 의하면 100 inch³ air gun 을 6000psi로 가압하는 경우 2000psi로 가압할 때 보다 1.85 배로 음원의 세기가 커진다. Fig.8은 100 inch³, 2000 psi 의 gun 에서 생성되는 음원의 세기를 1로 보았을 때($P_a=1$), 공기압과 gun 부피변화에 따른 음원의 세기변화를 보여주고 있다. 즉 300 inch³, 2000 psi gun 인 경우 $P_a=1.25$ 이며, 100 inch³, 2000 psi gun 을 3 개 연결한 경우 $P_a=3$, 100 inch³, 6000 psi 경우 $P_a=1.85$, 33.3 inch³, 6000 psi gun 3 개를 연결한 경우는 $P_a=3.90$ 인 높은 에너지 음원을 얻을 수 있다. 이러한 결과를 종합해 볼 때 높은 에너지를 얻을 수 있는 가장 효과적인 방법은 gun 의 공기압을 높이는 것보다 gun 의 수를 늘리는 것이다. Fig.9~13은 air gun array, mechanical displacement type array, sparker와 2 종류 water gun 의 far-field 파형과 에너지 스펙트럼을 비교한 것이다(Verma, 1986).

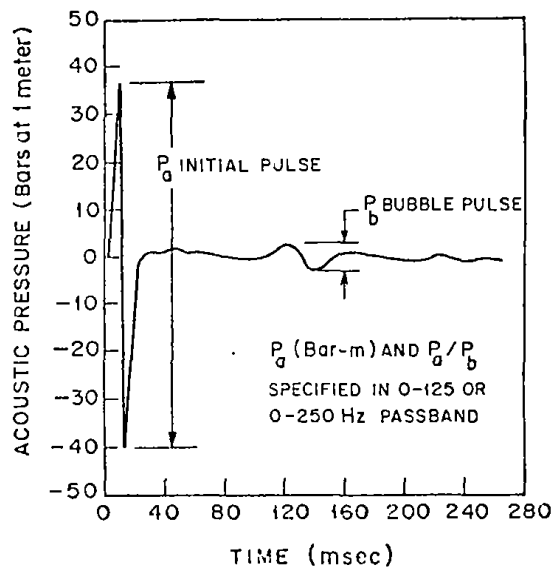


Fig. 1 source comparison criterion (farfield signature) in time domain. (after Johnston and Cain, 1982)

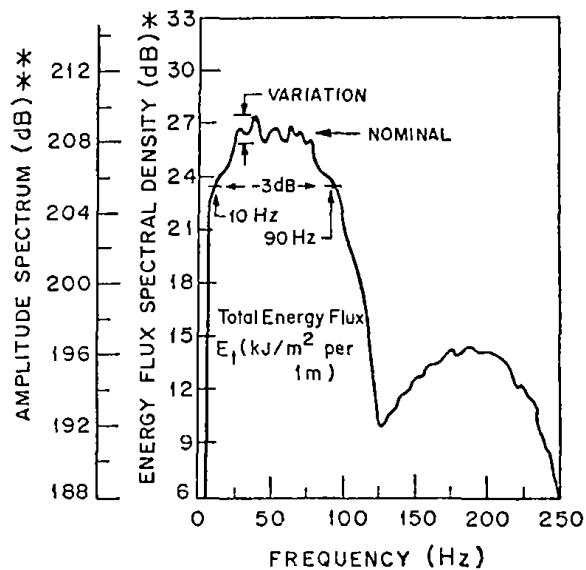


Fig. 2 Source comparison criterion in frequency domain (Amplitude and Energy Spectra).
 * dB refers to Joule/m²/Hz at 1 meter from source.
 ** dB refers to 1 Micropascal/Hz at 1 meter from source
 (after Johnston and Cain, 1982)

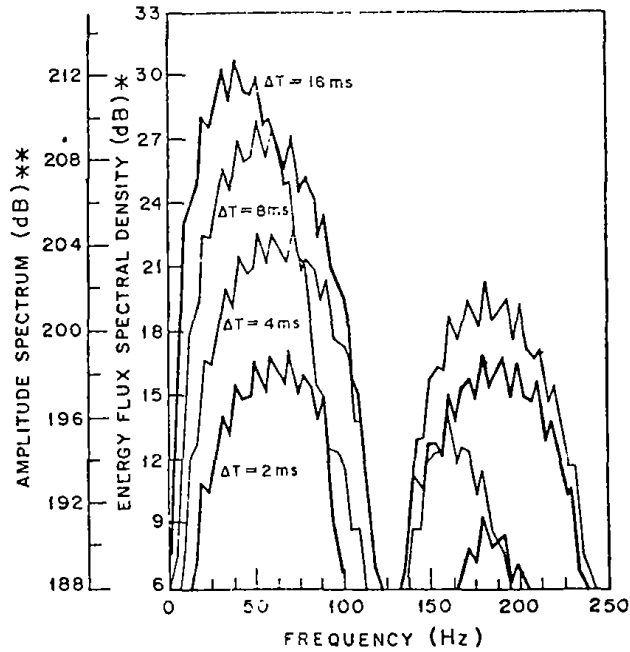


Fig. 3 Effect of initial-pulse width (2, 4, 8 and 16 ms) on energy spectrum. * dB refers to 1joule/m²/Hz at 1 meter from source ** dB refers to 1 micropascal/Hz at 1 meter from source. (after Johnston and Cain, 1982)

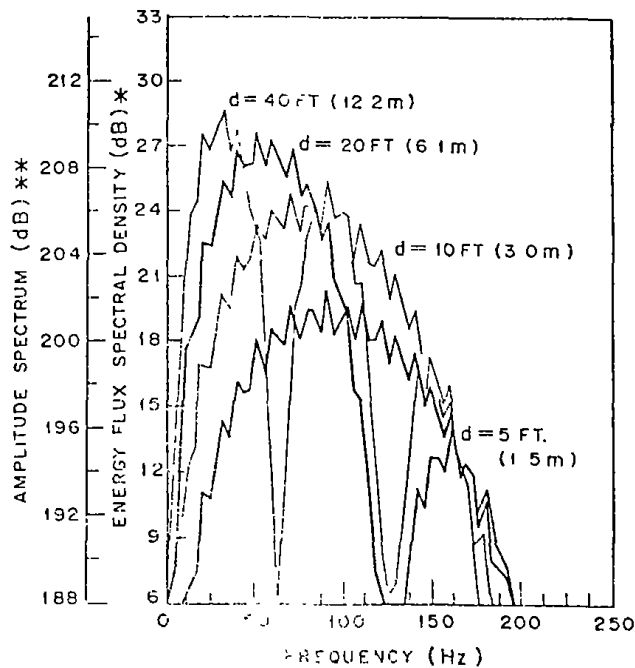


Fig. 4 Effect of source depth on energy spectrum. * dB refers to 1joule/m²/Hz at 1 meter from source. ** dB refers to 1 micropascal/Hz at 1 meter from source. (after Johnston and Cain, 1982)

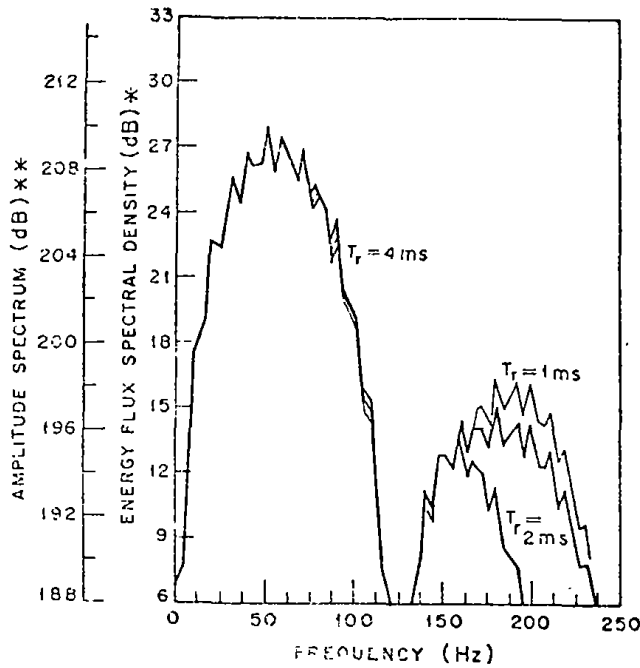
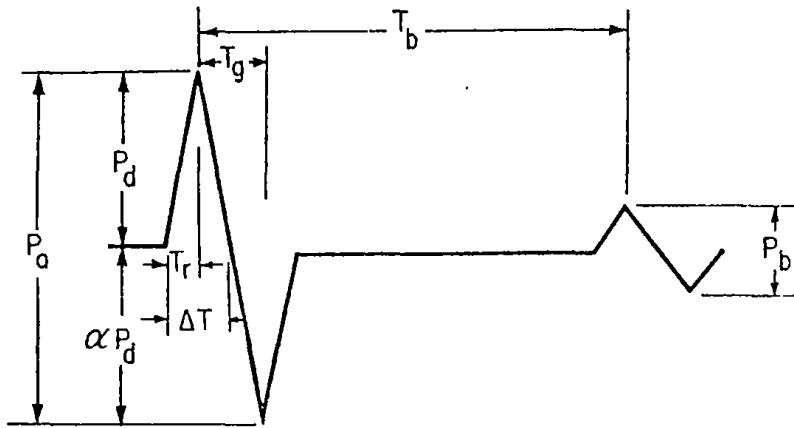


Fig. 5 Effect of initial-pulse rise time (of 1,2 and 4 ms) on energy spectrum for an air gun array.
 * dB refers to 1joule/m²/Hz at 1 meter from source.
 ** dB refers to 1 micropascal/Hz at 1 meter from source.
 (after Johnston and Cain, 1982)



- ΔT : the initial-pulse width (8ms)
- P_d/P_b : the initial-to-bubble pulse ratio (8/1)
- α : air-water reflection coefficient (-0.95)
- $T_s = 2d/c$: d is the source depth and c is the speed of sound in water (d = 20 ft nominal)
- T_r : the initial-pulse rise time (2ms)
- T_b : bubble pulse period (100ms)

Fig. 6 An idealized air gun array signature (after Johnston and Cain, 1982)

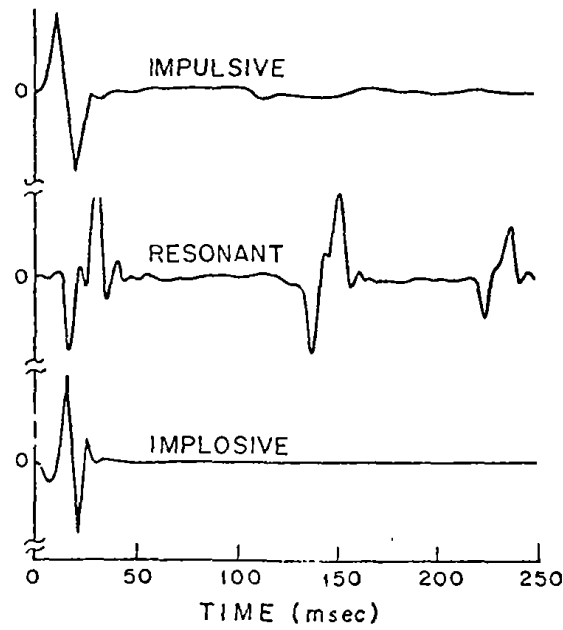


Fig. 7 Classification of marine seismic energy source signatures. Peak-to-peak(p-p) initial amplitude have been normalized. (after Johnston and Cain, 1982)

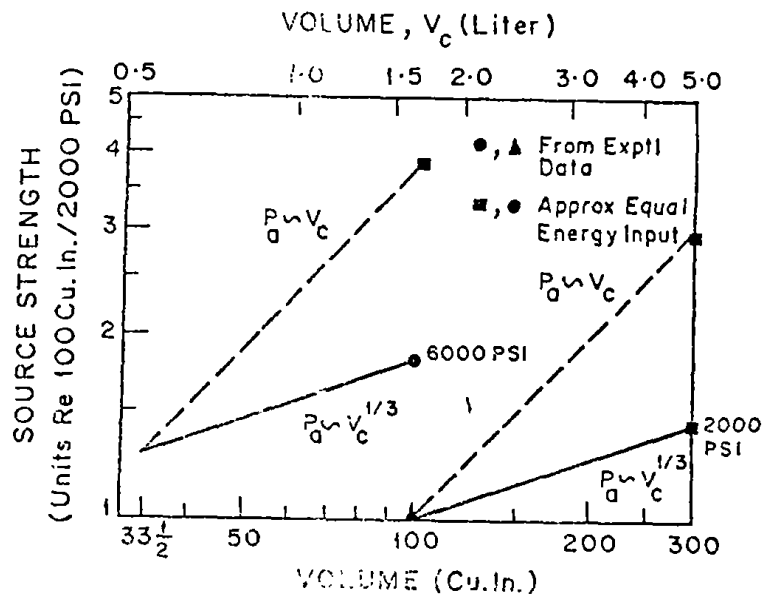


Fig. 8 Effect of gun pressure and volume on source strength for high pressure air guns (after Johnston and Cain, 1982).

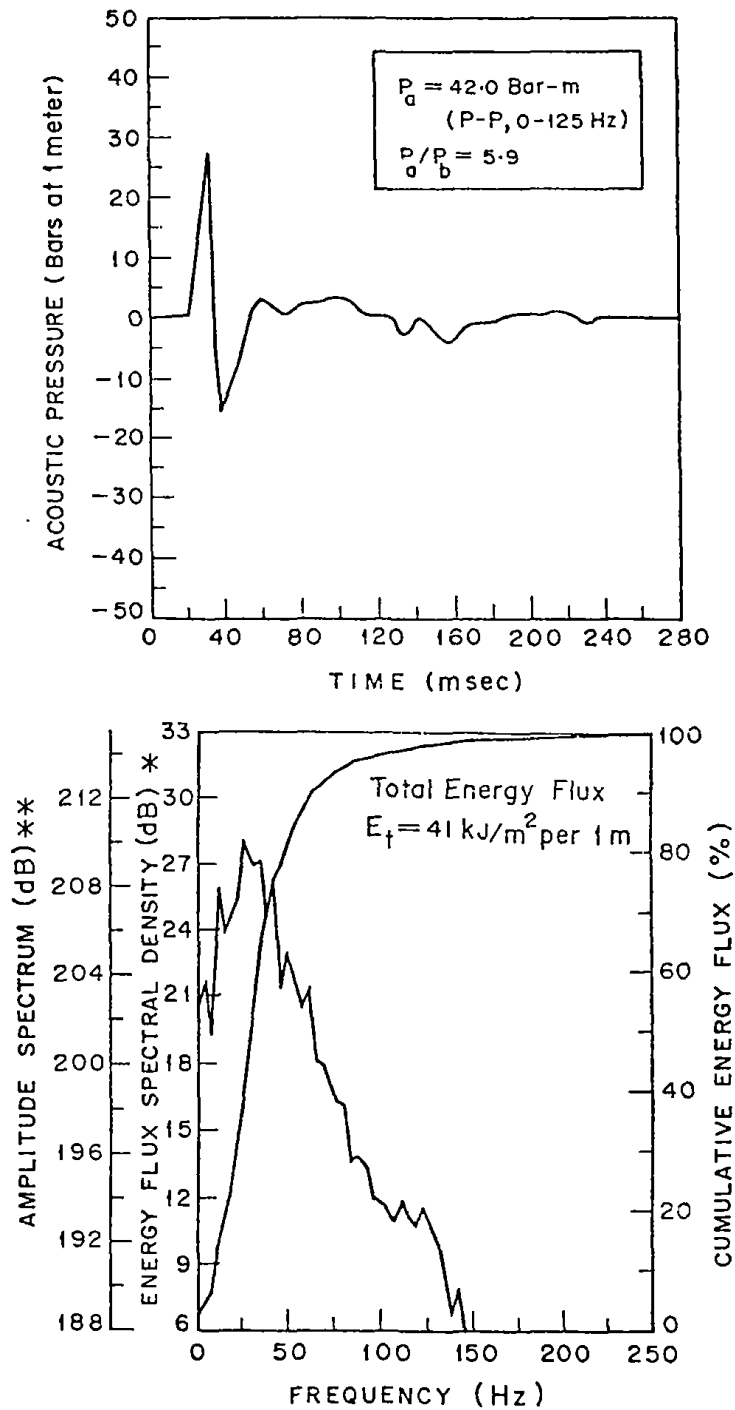


Fig. 9 a) Farfield Signature and b) amplitude and energy spectra plot for Western array 1050.
 * dB refers to 1 joule/m²/Hz at 1 meter from source.
 ** dB refers to 1 micropascal/Hz at 1 meter from source.
 (after Johnston and Cain, 1982)

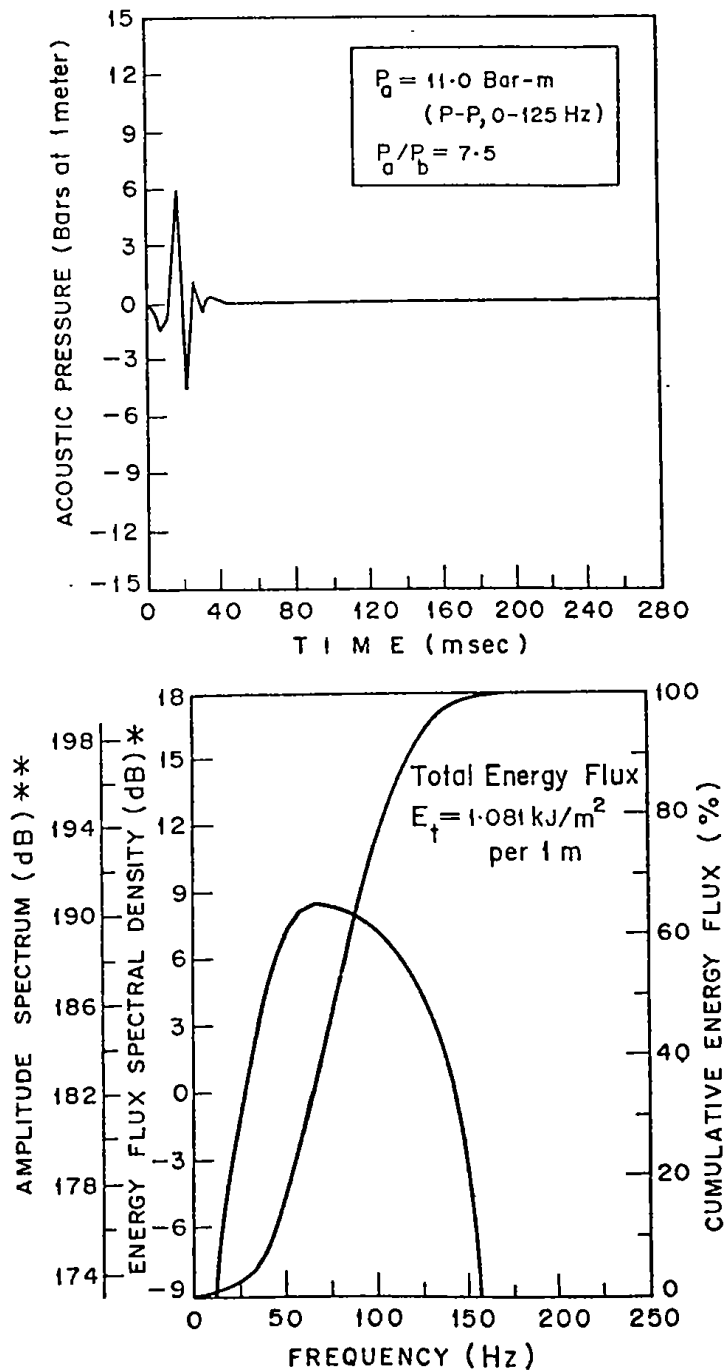


Fig.10 a) Farfield Signature and b) amplitude and energy spectra plot for Flexichoc array 16 ea. FHC-50.
 * dB refers to 1 joule/m²/Hz at 1 meter from source.
 ** dB refers to 1 micropascal/Hz at 1 meter from source.
 (after Johnston and Cain, 1982)

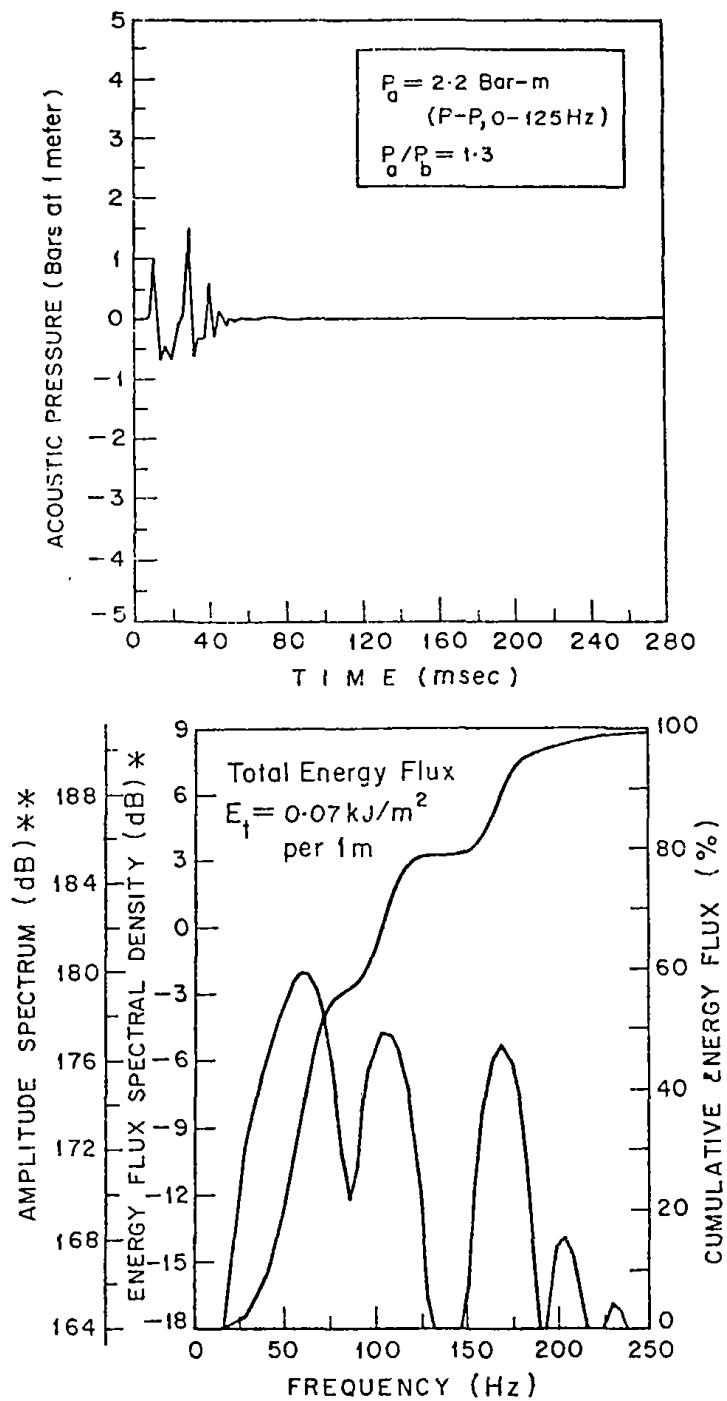


Fig.11 a) Farfield Signature and b) amplitude and energy spectra plot for Sparker 30 kjoule.
 * dB refers to 1 joule/m²/Hz at 1 meter from source.
 ** dB refers to 1 micropascal/Hz at 1 meter from source.
 (after Johnston and Cain, 1982)

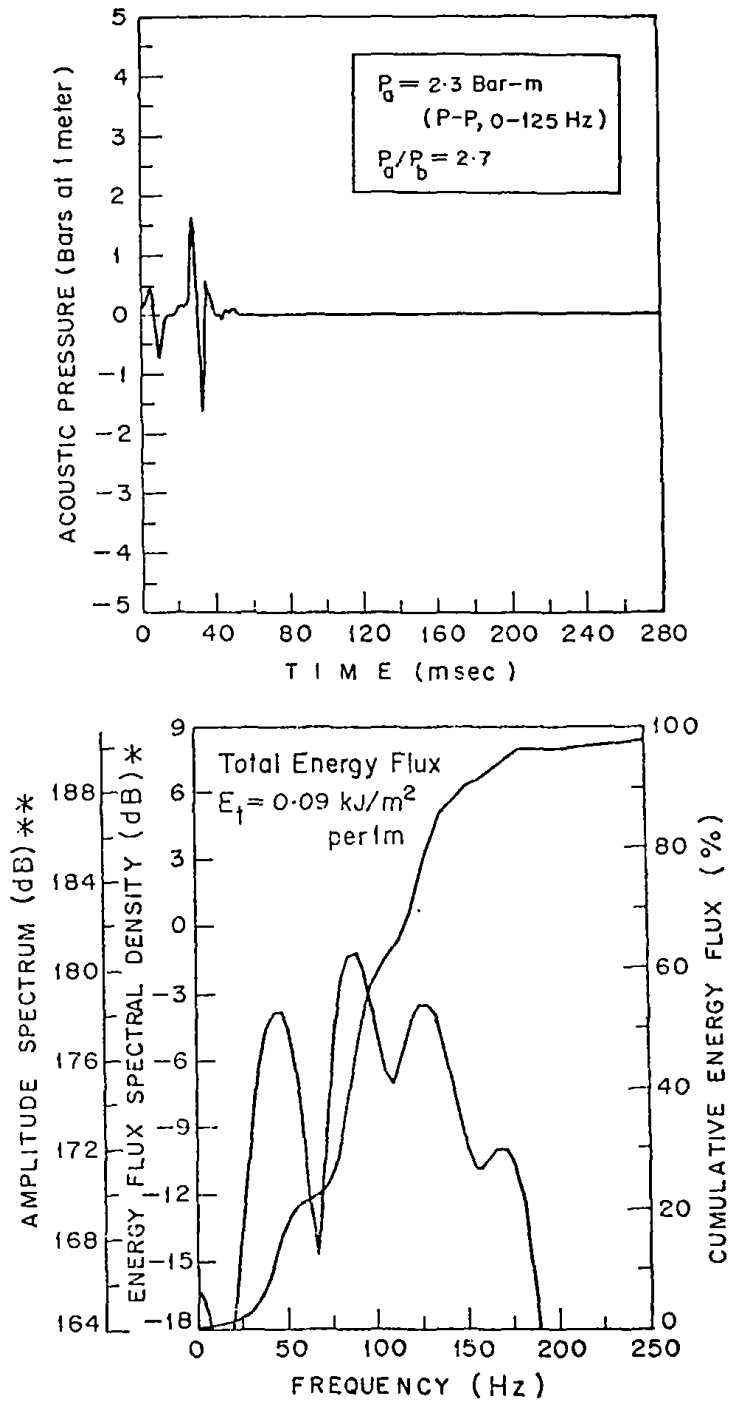


Fig.12 a) Farfield Signature and b) amplitude and energy spectra plot for Water gun HWG-57.
 * dB refers to 1 joule/m²/Hz at 1 meter from source.
 ** dB refers to 1 micropascal/Hz at 1 meter from source.
 (after Johnston and Cain, 1982)

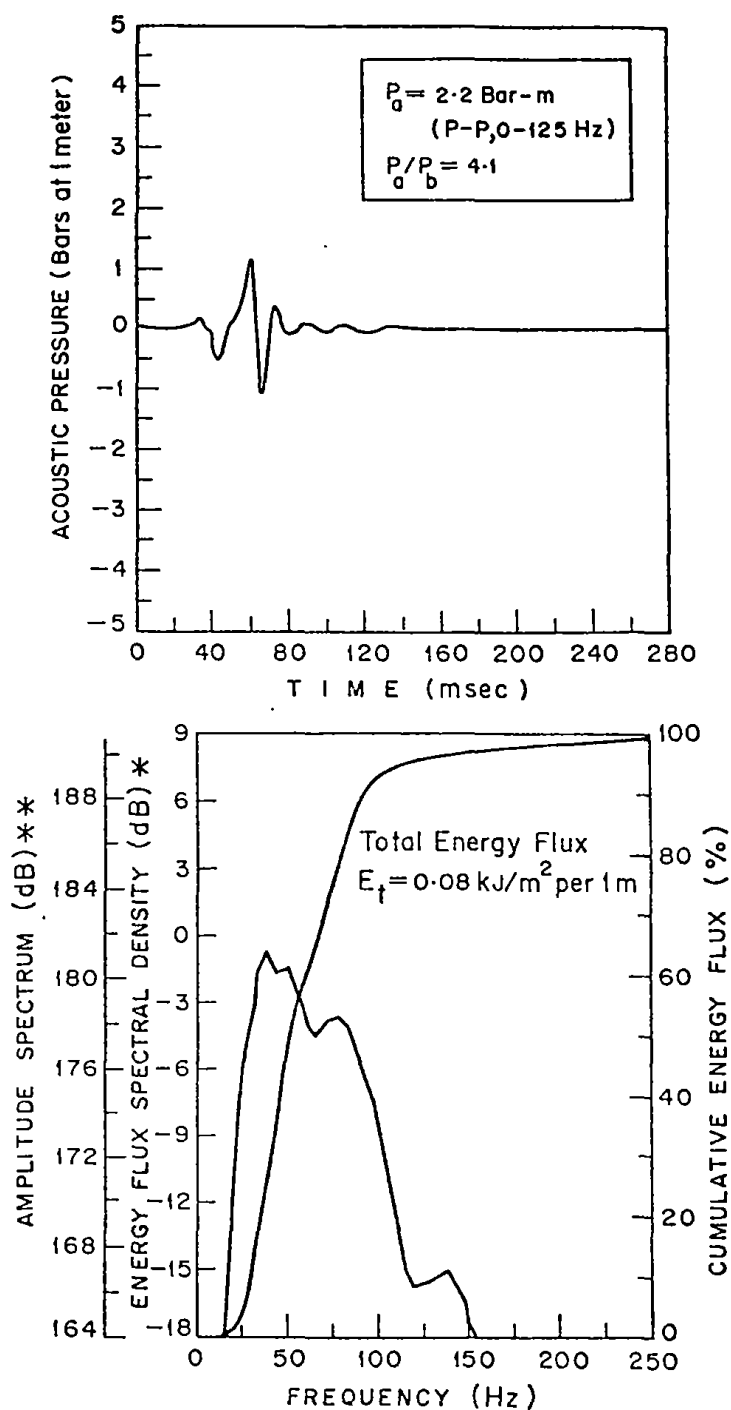


Fig.13 a) Farfield Signature and b) amplitude and energy spectra plot for Sodera Water gun.
 * dB refers to 1 joule/m²/Hz at 1 meter from source.
 ** dB refers to 1 micropascal/Hz at 1 meter from source.
 (after Johnston and Cain, 1982)

3. WATER GUN의 기작

가. Water Gun의 구조

water gun은, air gun과는 달리, 공급된 고압의 공기가 직접 수중으로 방출되지 않고, 내부의 piston과 shuttle을 밀어, gun 하부의 해수가 port 밖으로 배출되면서 음파를 발생시키는 음원장치이다. water gun을 각 기능과 부분품을 중심으로 대별하여 구조를 알아보면 다음과 같다.

- 최상부의 solenoid unit 및 valve, air hole
- 초기에 공급된 고압의 공기를 저장하는 upper chamber
- 폭발순간에 일시적으로 공기가 저장되는 firing chamber
- 폭발시 고압의 공기로 인하여 이동되는 piston과 shuttle
- 해수를 저장하고 있다가 shuttle이 밀려오면 담고있는 해수가 방출되는 lower chamber
- lower chamber로부터의 해수가 외부로 빠져 나가는 최하부의 port
- 기타 각 부분품간의 O-ring등

Fig.14는 이러한 구조를 갖는 water gun S80(Seismic System Inc. 제작)을 보여준다.

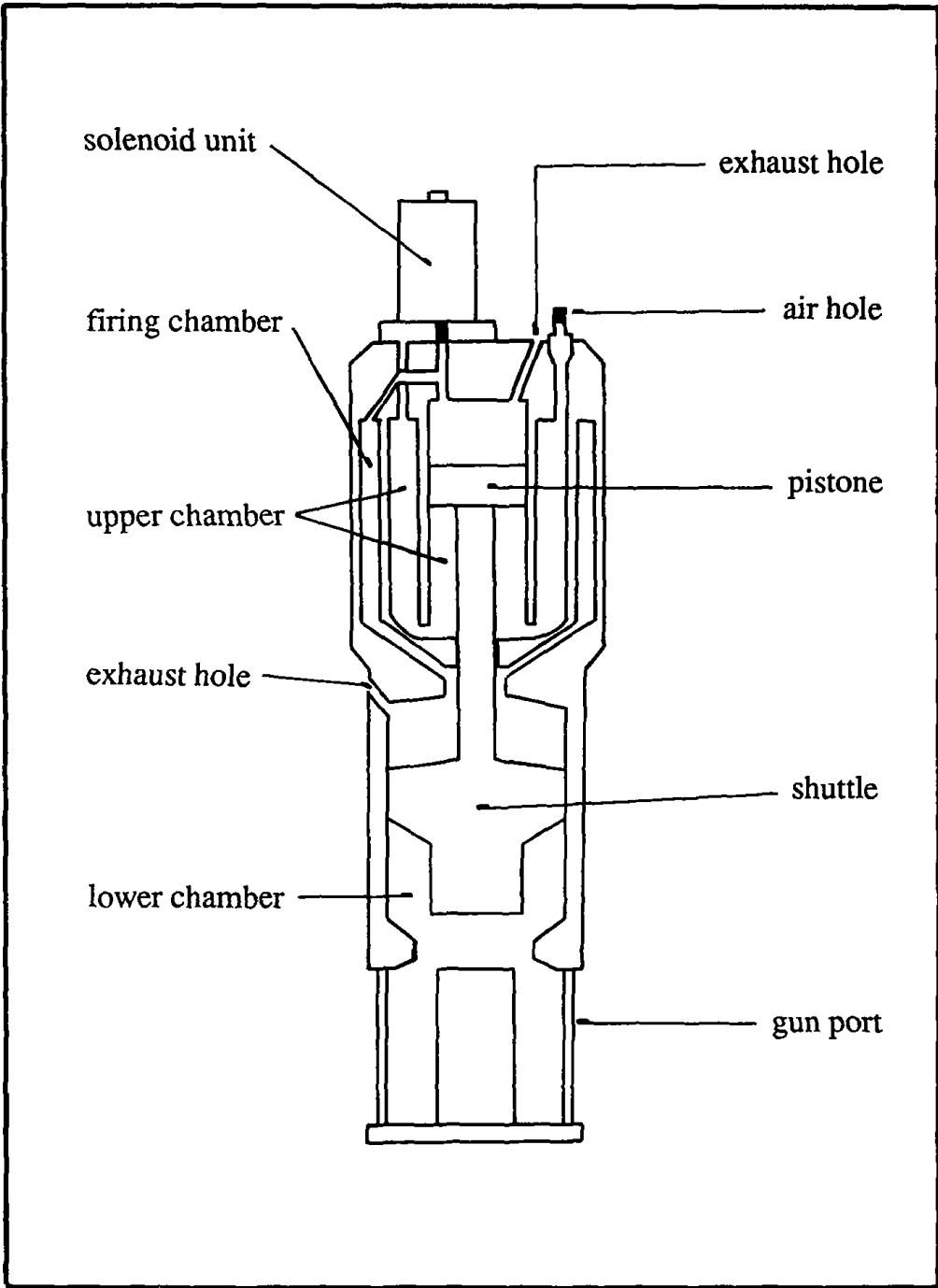


Fig.14 Schematic diagram of the water gun S80.

나. Water Gun의 작동

compressor로부터 만들어진 고압의 압축공기는 air hose를 경유하여 water gun의 air hole을 통하여 upper chamber에 공급된다. 물론 이때의 solenoid valve는 닫혀 있다. 전기적인 신호에 의하여 solenoid valve가 열리면서 순간적으로 firing chamber에 압축공기가 공급되고, 곧이어 공급되는 공기압으로 인하여 pistone과 shuttle 하부를 밀어내어 등 shuttle은 빠른 속도로 lower chamber로 이동하게 된다. 결과적으로 lower chamber에 담겨있던 해수는 gun port를 통하여 gun 주위로 급속히 방출하게 되고 이후 shuttle의 운동이 멈추고 firing chamber로부터 공급된 lower chamber 내의 공기는 gun 몸체에 붙은 배출구를 통하여 gun의 후부로 배출되면서 동시에 shuttle은 주변의 수압에 의하여 원위치된다. 한편 빠른 속도로 gun port를 통하여 방출되는 해수의 흐름으로 인하여 주위에는 공동(cavity)이 형성된다. 이러한 물의 유동에 따른 kinetic energy는 일부분이 acoustic energy로 전이되고 일부분은 공동형성과 관련한 potential energy로 저장된다. 곧이어 공동이 최대의 크기에 이르면 주위의 수압에 의하여 공동 내부로의 수축(implosion)이 이루어지며, 이때 저장된 potential energy는 2차의 acoustic pulse를 생성하며, 한 과정의 water gun 폭발을 마무리한다.

또다시 compressor로부터 고압의 압축공기가 upper chamber에 공급되면서 같은 과정을 되풀이해, 음원장치로서의 water gun이 작동하는 것이다 Fig.15는 이러한 water gun의 일련의 작동과정을 그림으로 표현한 것이다.

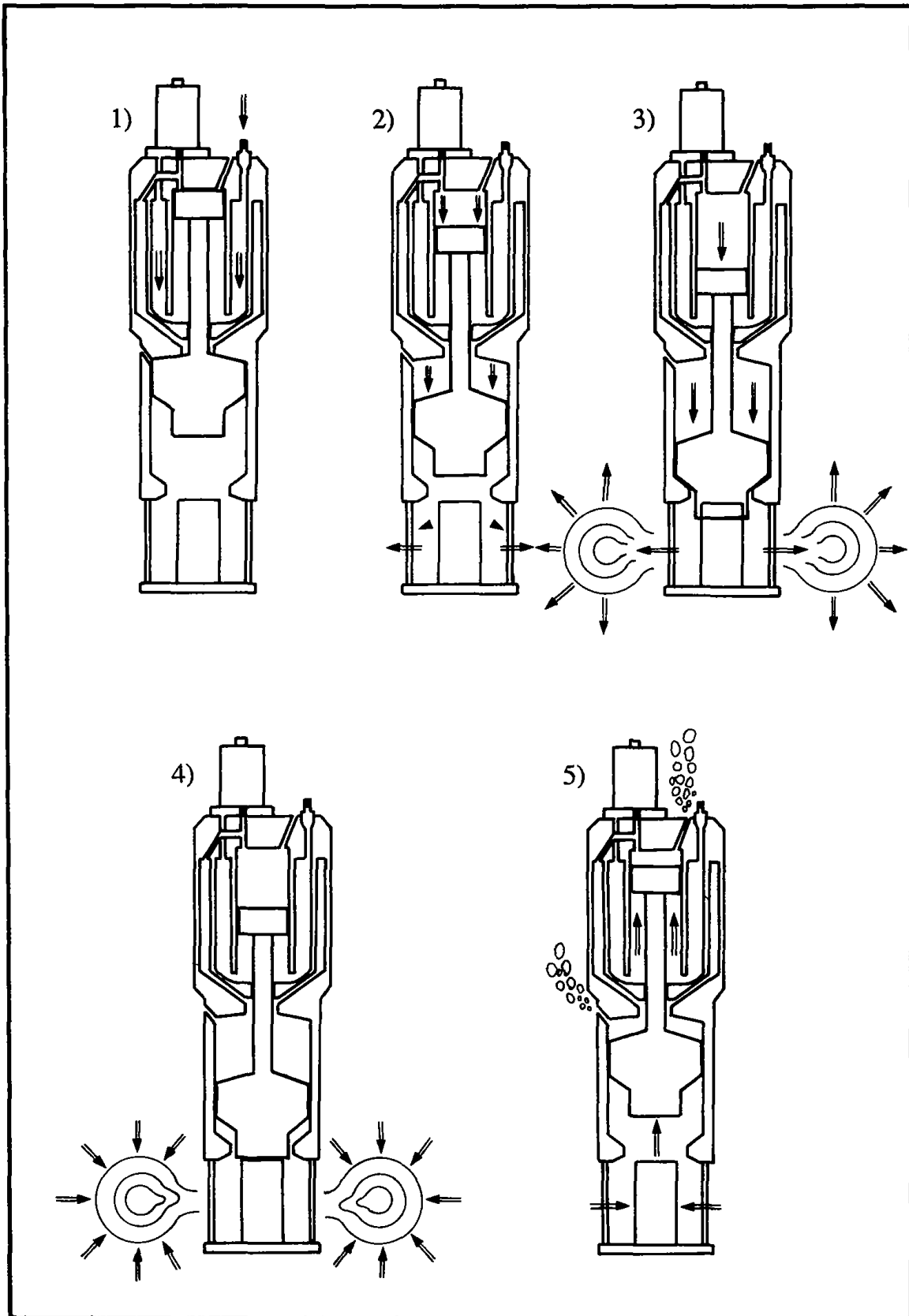


Fig.15 Operating process of the water gun S80.

4. WATER GUN의 파형과 그 변화

가. Near-field 와 Far-field

발생음의 파형(signature)과 관련하여 설명되어 질 때, 통상적으로 발생신호음의 수신위치에 따라서 near-field 혹은 far-field란 용어가 널리 쓰인다. 이러한 용어들은 위치에 대한 한계가 다소 명확치 않아 약간의 혼돈을 불러 일으키는데, 이러한 near-field와 far-field에 대한 수식적 및 기하학적인 접근을 통하여 이해를 돕고자 한다.

먼저 수식적으로 접근을 해 보면,

기본적인 파동방정식(wave equation)으로부터 압력 P에 대한 일반해는 다음과 같이 표현할 수 있다(Parkes,G. and Hatton,L., 1986).

$$P = 1/r f'(t - r/c)$$

r = 음원으로부터 거리

f' = 파동방정식을 만족하는 일반해 f의 시간미분함수

c = 수중에서의 음파전달속도

뉴턴 제 2법칙으로부터,

$$a = - 1/\rho \partial P/\partial r$$

a = 가속도

ρ = 수중 밀도

따라서 상기식으로부터 전파속도 U는 적분을 통하여 다음과 같이 얻어진다.

$$U = 1/\rho r^2 f(t - r/c) + 1/\rho cr f'(t - r/c)$$

위식을 주목하면 $1/r^2$ 을 포함하는 우변의 첫째항과 $1/r$ 에 의해 지배되는 둘째항으로 구별되는데, 그 첫째항에 의해서 제반 현상이 지배되는 영역을 near-field라 하고, 둘째항에 의한 효과가 보다 우세한 영역을 far-field라

고 할 수 있다.

한편, 보다 손쉬운 구분방법으로는 음원으로부터의 단순거리를 가지고 접근하는 기하학적인 방법이 있는데, 이는 단순히 음원으로부터의 수신거리에 차이를 두고 near-field와 far-field를 정의하는 것이다(Sheriff, R.E., 1976). 즉 수신되는 발생신호음이 음원으로부터 충분히 멀리 떨어졌을 때에는 나타나지 않던 현상이, 음원에 가까워짐에 따라 급격히 감쇄(attenuation)하는, 거리와 관련한 커다란 영향을 갖음에 따라서, 그러한 한계거리 이내를 near-field라 정의하며, $R < \lambda$ 인 영역을 의미한다. 이때 R은 음원으로부터의 거리이고 λ 는 파장이다. 반대로 $R \gg \lambda$ 인 충분히 멀리 떨어진 지역은 far-field임을 의미하는 것이다.

이상의 near-field와 far-field에 대하여 음원으로부터의 영역을 표시한 것이 Fig.16이다.

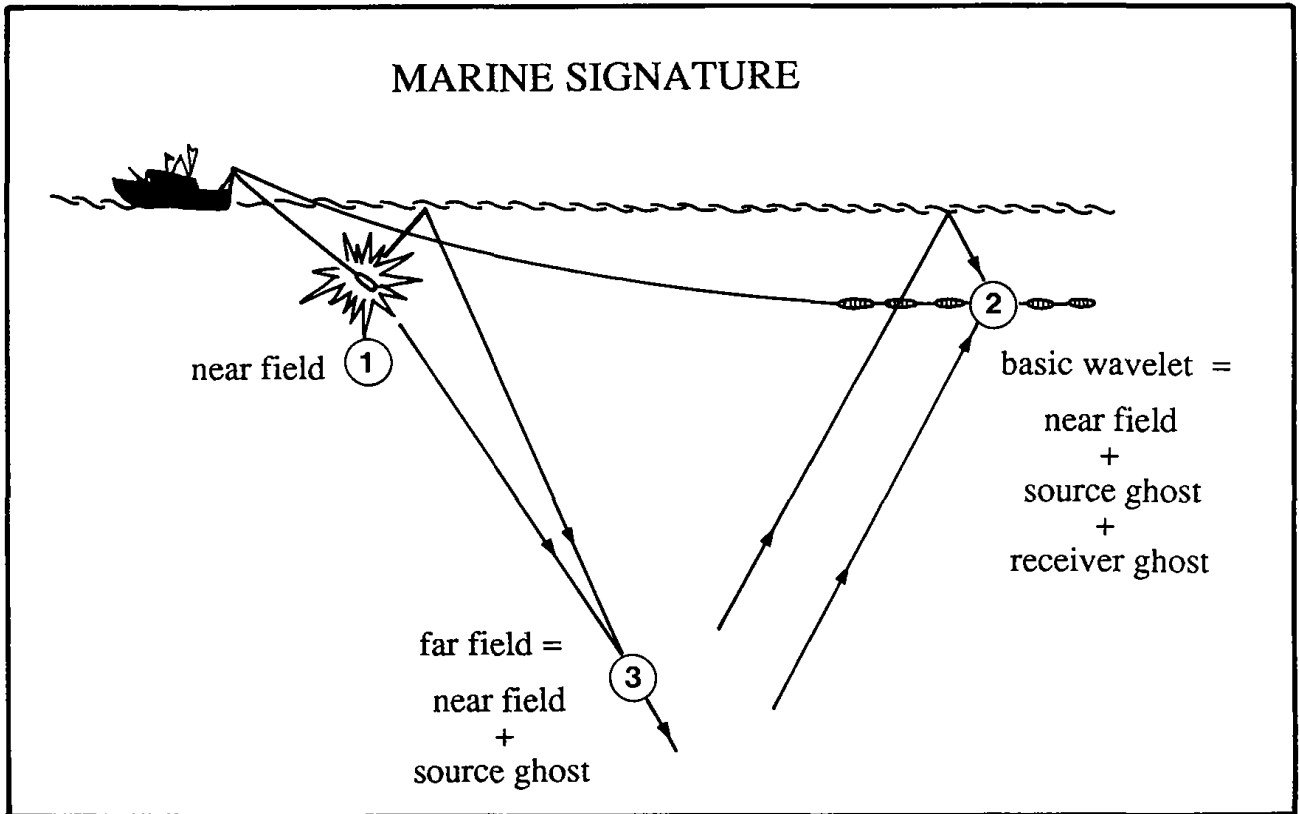


Fig.16 Measurement locations for various marine seismic source signatures.

나. Near-field에서의 Water Gun 파형

앞절에서 언급된 water gun의 작동과정중에서 탄성파(음파)의 발생시점을 중심으로 보다 자세히 검토해 보면, 초기에는 shuttle의 이동에 따라 물의 흐름이 시작되고, 이러한 운동이 빠른 속도로 진행됨에 따라 kinetic energy(KE)가 축적된다. 이 KE는 일부분이 공동을 만들기 시작하면서 potential energy(PE)로 전이되고, 일부분은 acoustic energy(AE)로 최초의 음파가 발생된다. 이때를 "growth phase"라 한다. 곧이어 공동이 팽창하여 최대의 크기에 이르르고, 반면 공동내부의 수압은 주위의 수압보다 매우 작기때문에 순간적으로 붕괴되면서 폭발하여(implosive) 내부에 저장된 PE는 열과 AE로 변환되게 된다. 이때를 "collapse phase"라 하며, 이러한 AE는 강한 음파(strong and discrete acoustic impulse)의 발생을 의미한다. 즉 water gun은 이러한 제 현상을 통하여 음파를 생성하는 발생장치이다.

Fig.17은 전형적인 near-field에서의 파형(pressure signature)을 보여준다. 즉 growth phase 동안 기준치로부터 양의 peak P_1 으로 증가하다가 이후 감소하기 시작하여 음의 peak P_2 에 이른다. 이러한 음의 peak P_2 은 공동이 최대의 크기를 갖는 때이며, 이후의 진행은 collapse phase로서, 내사(implosion)에 따른 최대치의 peak P_2 를 갖을 때까지 진행된다. growth phase와 collapse phase 이후 발생하는 파형으로는, 붕괴된 공동의 반작용(rebound)으로, 약간의 bubble pulse를 형성하는데, 이는 air gun에서 생성되는 경우와는 달리 매우 작다. 한편, 이러한 계속적인 bubble pulse의 발생은 rectified diffusion으로 알려진 공동내의 잔류공기에 의한 제 현상으로 설명된다(Hsieh, D.Y. and Plesset, M.S., 1963; Safar, M.H., 1968).

한편, water gun은 firing 초기의 energy가 상당한 부분 물을 가속하

는데 이용되므로, water pulse인 초기의 peak P_1 는 비교적 작기 때문에, water gun을 air gun에 비해 덜 효과적인 것으로 보는 시각이 있다(Lugg, R., 1979).

또한 파형과 관련되어 water gun과 air gun을 비교하면, water gun의 파형은 air gun과는 달리 minimum phase wavelet이 아니다. 그러나 digital 신호처리시 사용되는 많은 필터는 초기파가 minimum phase임을 가정하고 있으므로, water gun을 사용해 얻은 신호는 자료처리시에 적절한 조치가 요망된다.

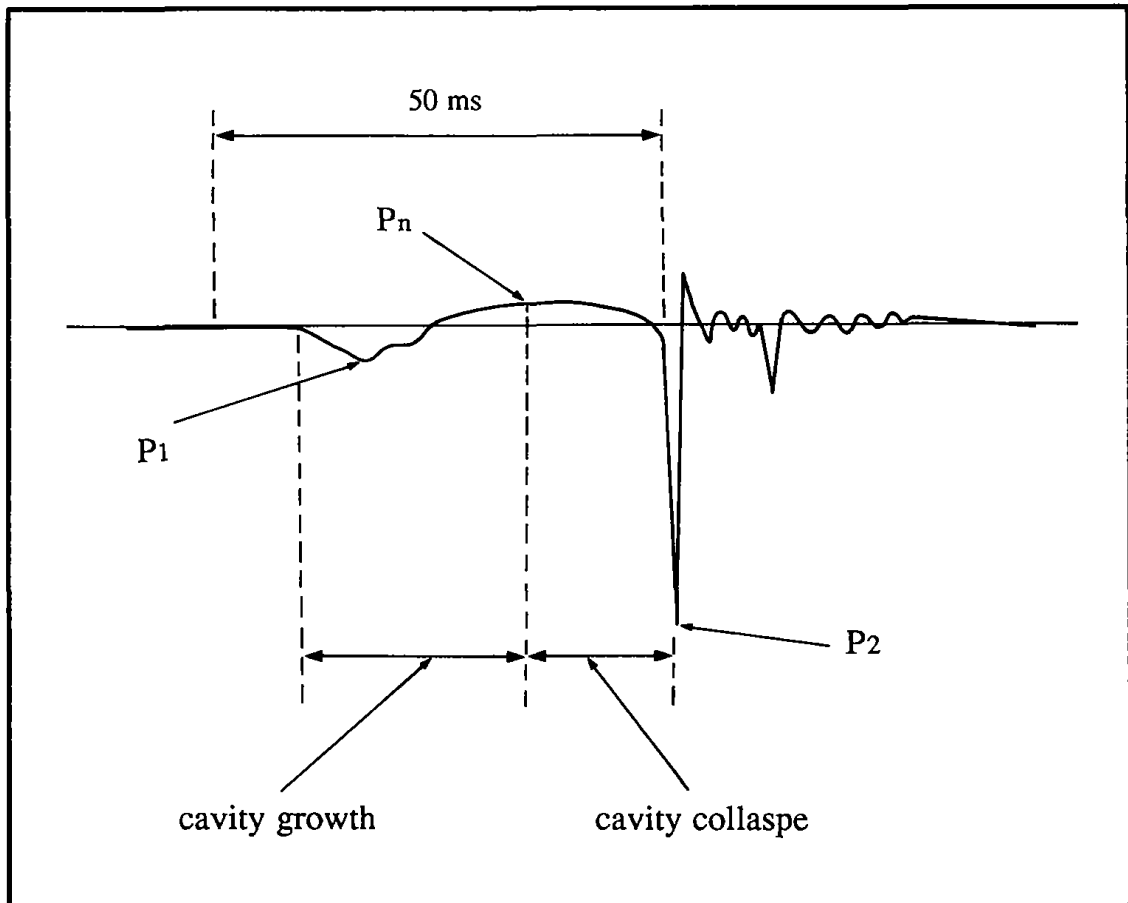


Fig.17 Near-field pressure signature radiated by S80 at a depth of 1.5m and a chamber pressure of 2000psi.(after Safar,M.H.,1985)

Fig.18-a는 동일한 공기 소모량(80 inch³)을 갖는 water gun과 air gun의 파형 및 spectrum을 비교한 것이다. 이미 앞에서 언급된 바와같이, 두 파형의 가장 현저한 차이는 pulse length가 water gun의 것이 보다 짧고 이후의 bubble pulse oscillation이 거의 없다는 점이다. 이것은 air gun의 신호음 발생이 고압공기의 방출을 통하여 최초의 pulse가 생성되고 이후 방출된 공기의 bubble들이 해수 표면으로 떠오르면서, 감소되는 수압으로 팽창·폭발하고 이에 의하여 이차적인 bubble pulse를 생성함에 비하여, water gun의 발생신호음은 앞절에서 설명된 바와같이 growth phase와 collapse phase로서 마무리하기 때문이다. 또한 Fig.18-b에서 보면 spectrum에서는 유사한 power level을 보임에 따라 비슷한 energy output을 갖는다고 볼 수 있다. 다만 water gun spectrum은 air gun의 것에 비하여 비교적 평탄하며 고주파영역(> 200Hz)에서는 다소 큰 반면, 반대로 저주파영역 (< 80Hz)에서는 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

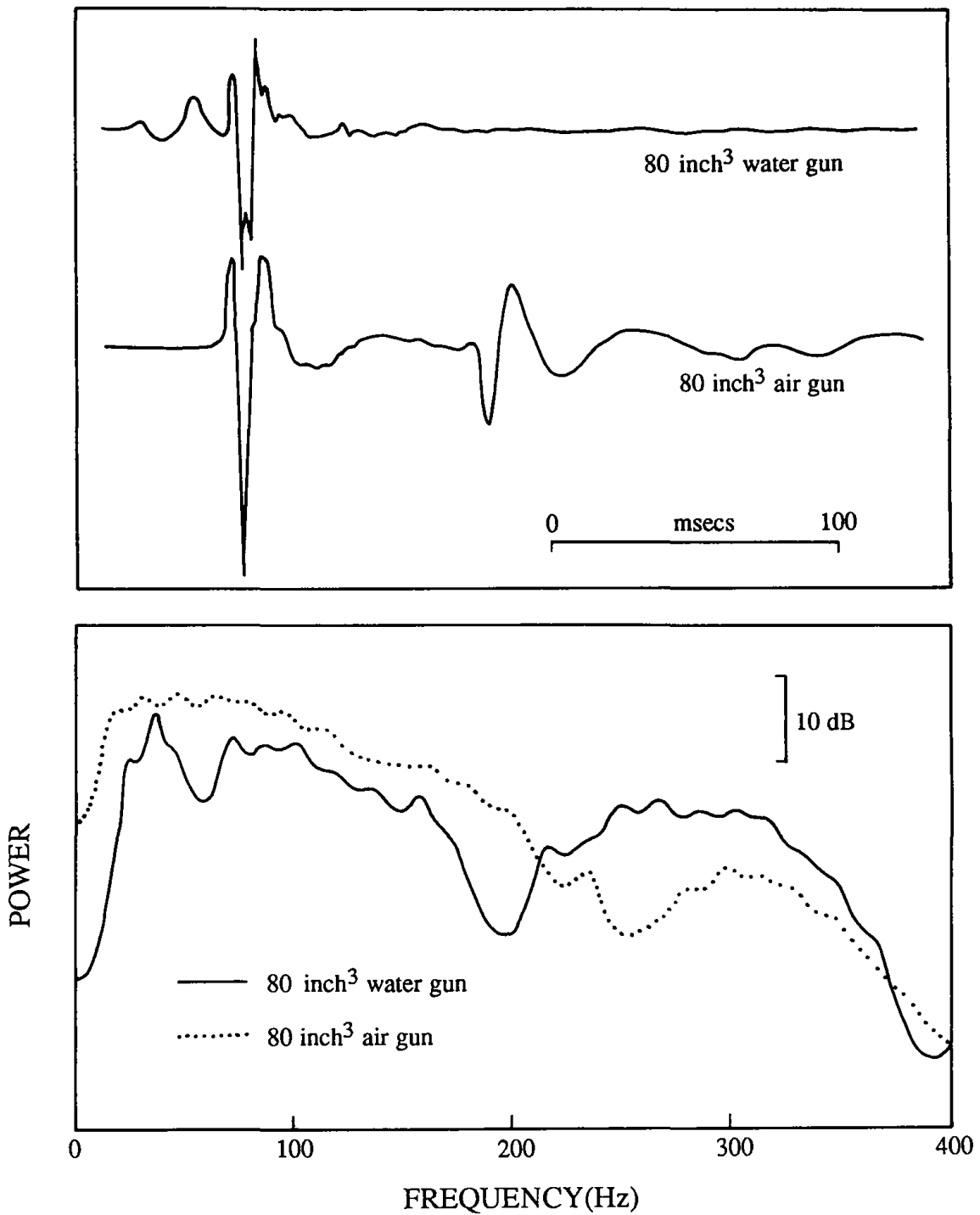


Fig.18 Comparison of a) the source signatures and b) the power spectral density functions of 80 inch³ water gun and air gun (after Hutchinson, D. R. and Detrick, R. S., 1984)

다. Near-field에서의 파형변화

음원의 깊이와 공기압의 변화에 따른 near-field 파형이 실제적인 진폭의 변화를 보여주는 것이 Fig.19이다. Fig.20은 각 파형들의 변화를 보다 쉽게 알 수 있도록 평균화하여(normalized) 10ft에서 진폭이 같도록 한 것이다. Fig.19와 Fig.20에서 알 수 있듯이, 일정한 깊이에서는 공기압이 증가할수록 pressure pulse의 진폭이 증가하며, 일정한 공기압하에서는 깊이가 증가할수록 대체로 진폭은 감소한다. 다만 약간의 오차로 인하여 20ft 깊이에서 1800psi의 압력에 따른 파형의 이상자료가 발생하였다. Fig.19와 Fig.20의 파형은 gun으로부터 3ft 떨어진 곳에서의 MH-1 hydrophone을 이용한 near-field 자료로서, 1ms로 sample된 획득자료이며, 뒷절에서 far-field 파형과 비교될 것이다.

Fig.21과 Fig.22는 위의 자료로 깊이 또는 공기압에 따른 주파수영역(frequency domain)에서의 power spectral density 비교이다. 공기압이 2000psi 아래서 깊이에 대한 spectral density 변화를 살펴보면, Fig.21을 통하여 대략적으로 300Hz 이상까지 널리 분포하며, 깊이의 증가에 따라 그 energy(power spectral density)는 감소하여, 대략적으로 10ft에서 80ft로의 깊이증가에 따라 12dB 또는 그 이상 감소함을 알 수 있다. Fig.22의 깊이 10ft에서의 변화는, 공기압이 감소함에 따라 확연히 power spectral density가 감소하고 있으며, 또한 2400psi로부터 1000psi에 이르면 12dB 또는 그 이상 떨어짐을 알 수 있다.

Fig.23은 gun 깊이에 따른 near-field에서의 최대 peak amplitude의 변화이다. 일반적으로 peak amplitude는 깊이 10ft로부터 증가할수록 약간 커지는 경향을 보이다가, 20ft 이상의 깊이에서는 반대로 감소하게 된다. 한편 공기압의 변화에 따른 peak의 변화(Fig.24)는 확실히 압력이 증가함에 따라 단조증가를 하고있다.

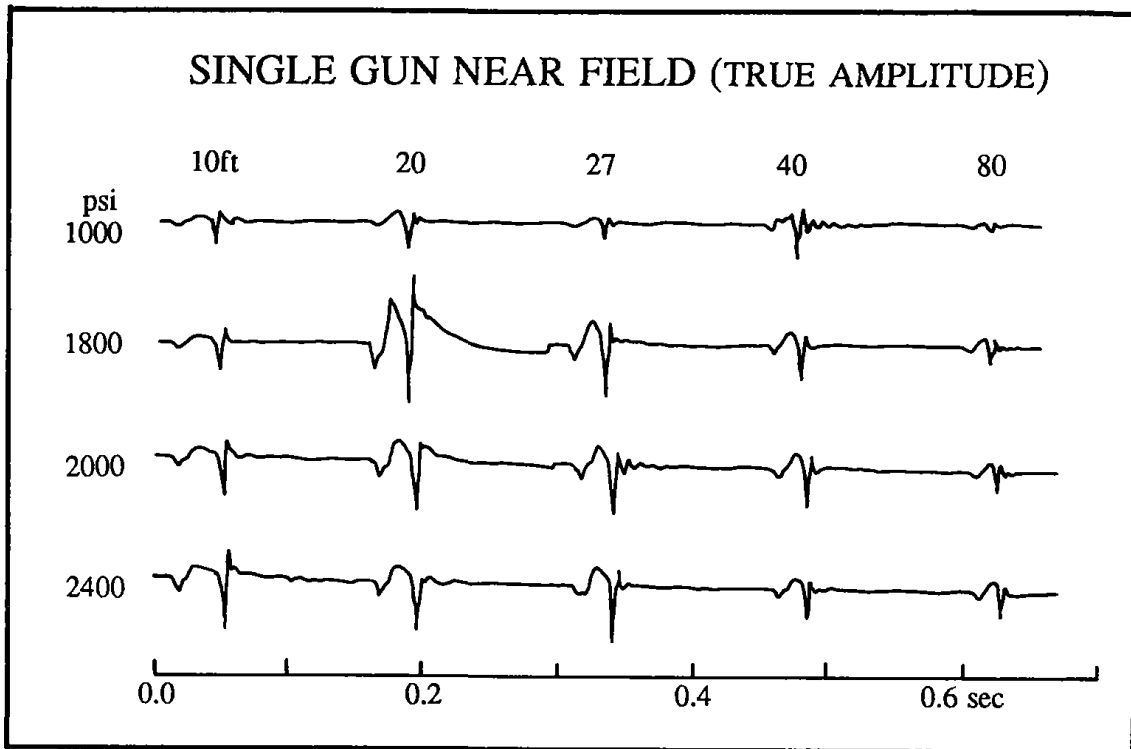


Fig.19 Typical near-field signatures in true amplitude format, all signatures were recorded separately. (after French, W.S. and Henson,C.G.,1978)

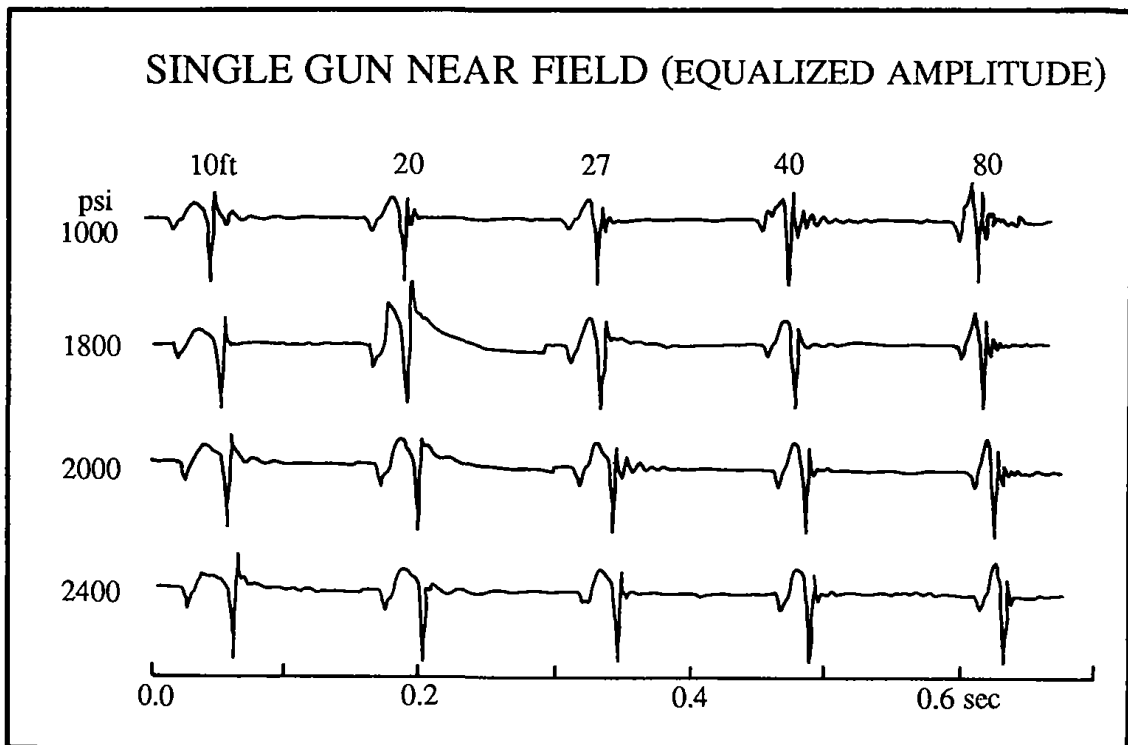


Fig.20 The same signatures as in Fig.19 but with amplitudes to the same size. (after French,W.S. and Henson,C.G.,1978)

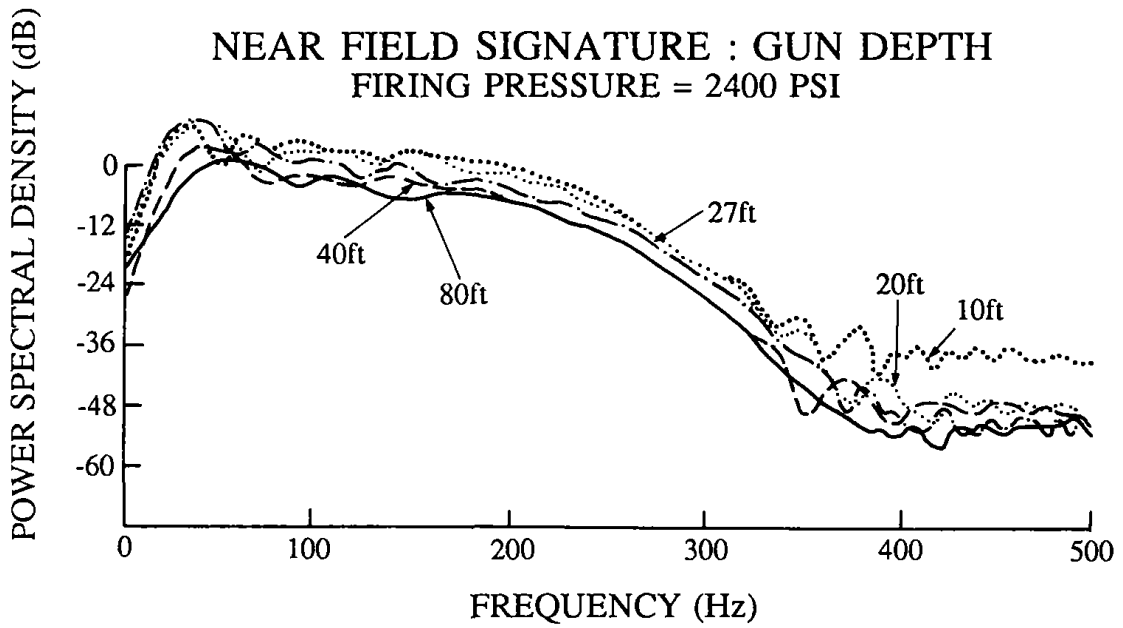


Fig.21 Changes in the frequency domain properties of the near-field signature with changes in gun depth. (after French,W.S and Henson,C.G.,1978)

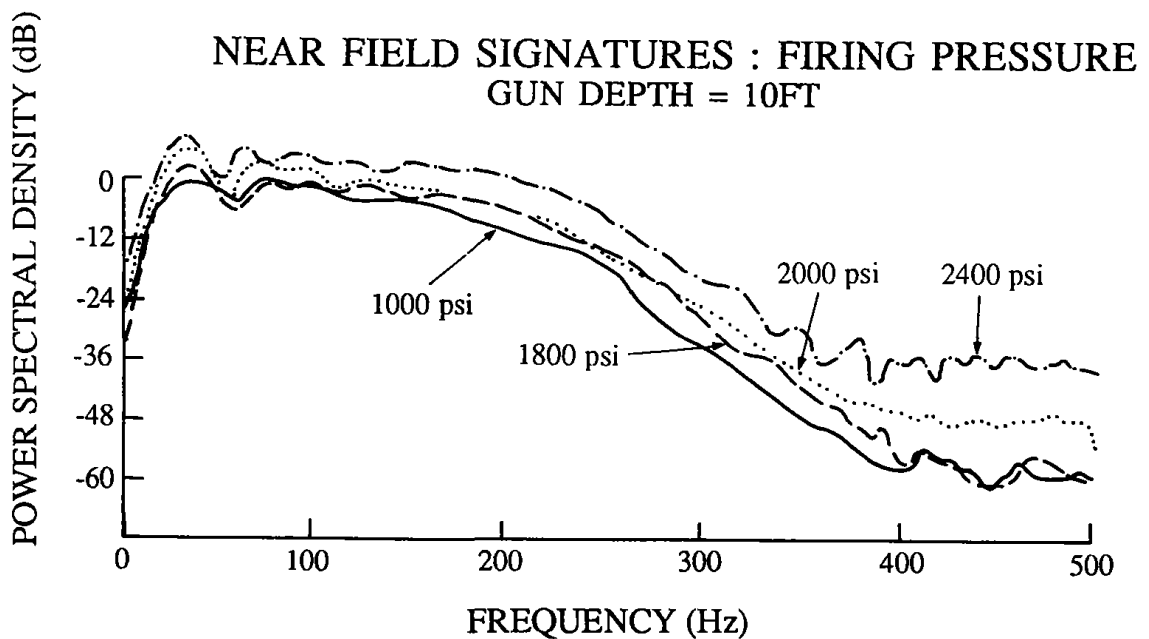


Fig.22 Changes in the frequency domain properties of the near-field signature with changes in firing pressure. (after French,W.S and Henson,C.G.,1978)

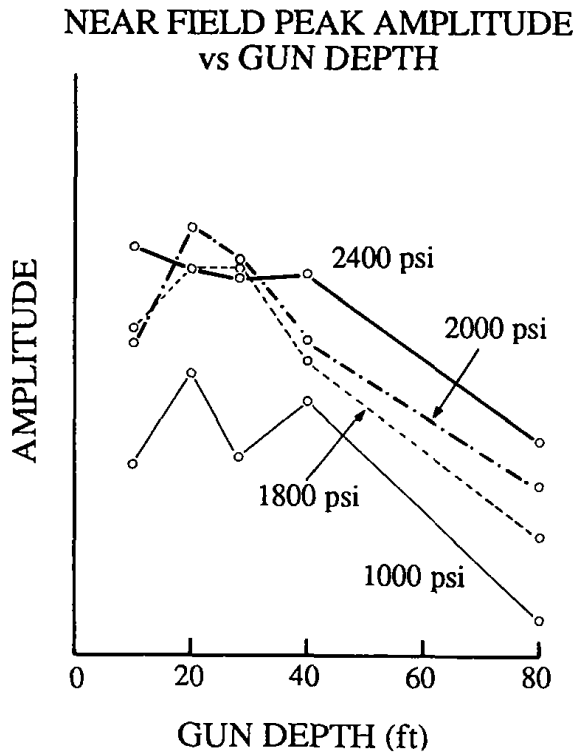


Fig.23 Changes in the near-field peak pressure with changes in the gun depth. (after French,W.S. and Henson, C.G., 1978)

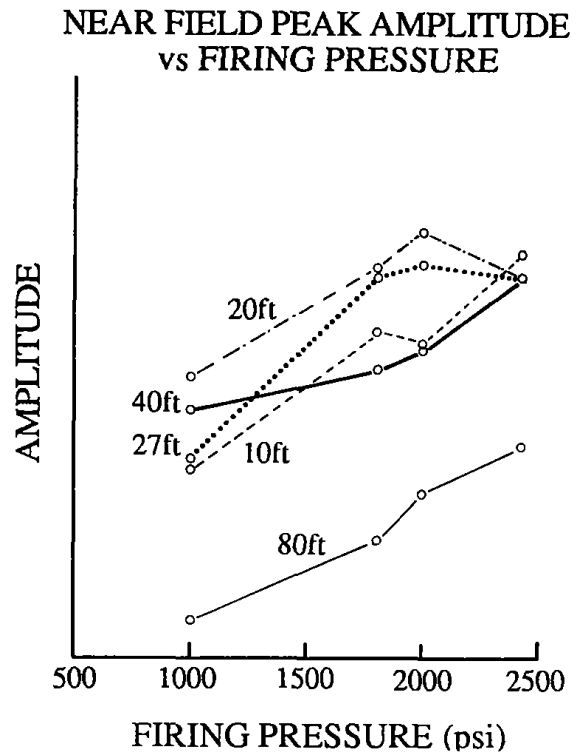


Fig.24 Changes in the near-field peak pressure with changes in the firing pressure. (after French,W.S. and Henson,C.G., 1978)

라. Far-field에서의 파형

앞절에서 언급된 바와 같이 far-field에서의 신호음은 음원으로부터의 발생신호음과 해수면에서 반사된 surface ghost와의 합성으로 나타난다. 즉 near-field signature 뿐만 아니라 표면에서 반사되면서 약간 지연되고(delayed in time) 파형이 역전된(inverted in polarity), surface ghost가 추가되어 합성파로써 나타나는 것이다.

이에대한 검증으로서, far-field에서 pressure pulse이 전파경로를 선형변화(linear process)로 가정해 보자. 즉 파형의 진폭(amplitude of pressure signature)은 water gun으로부터의 거리에 반비례한다면 gun으로부터 방사된 pressure signature는 near-field에서의 pressure signature와 다소 지연된 해수 표면에서의 반사파(surface ghost)와 합으로 주어진다. 이것은 만약 gun의 깊이를 알고있다면, 단순히 near-field 파형의 측정을 통해서 far-field 파형을 충분히 예상(predict)할 수 있음을 의미한다. 만약 해수 표면에서의 반사계수를 -1이라고 한다면, far-field 파형의 amplitude spectrum $P_r(w)$ 는 near-field에서의 amplitude spectrum $P_n(w)$ 와 다음의 관계식을 갖는 것을 알 수 있다.

$$P_r(w) = 2 P_n(\theta) \sin(kD \cos \theta)/r$$

w = angular frequency

k = w/V 로 주어지는 wave number

V = 수층에서의 음파 전달속도

θ = direct path와 연직선간의 사이각

따라서 상기식을 이용하여 near-field의 amplitude spectrum $P_n(W)$ 로부터 계산된 far-field에서의 predicted signature 및 amplitude spectrum을 얻을 수 있다.

Safar(1984, 1985b)는 앞에서 언급된 far-field에서의 predicted

signature와 predicted amplitude spectrum을 계산하고 이를 far-field에서의 실측치와 비교연구를 실시한 바 있다. 즉 170 m 깊이에서 model이 S80과 P400인 water gun을 사용하여, Reg-Tek hydrophone을 통한 near-field 및 far-field에서의 실측치와, 등 near-field에서 얻어진 파형을 이용한 far-field의 predicted signature를 계산·비교하였다. Fig.25와 Fig.26이 비교연구의 결과로서 제시된 것으로, 실측치와 예상치가 매우 근사하며 이를 통하여 합성파로서의 far-field 파형을 확인할 수 있다.

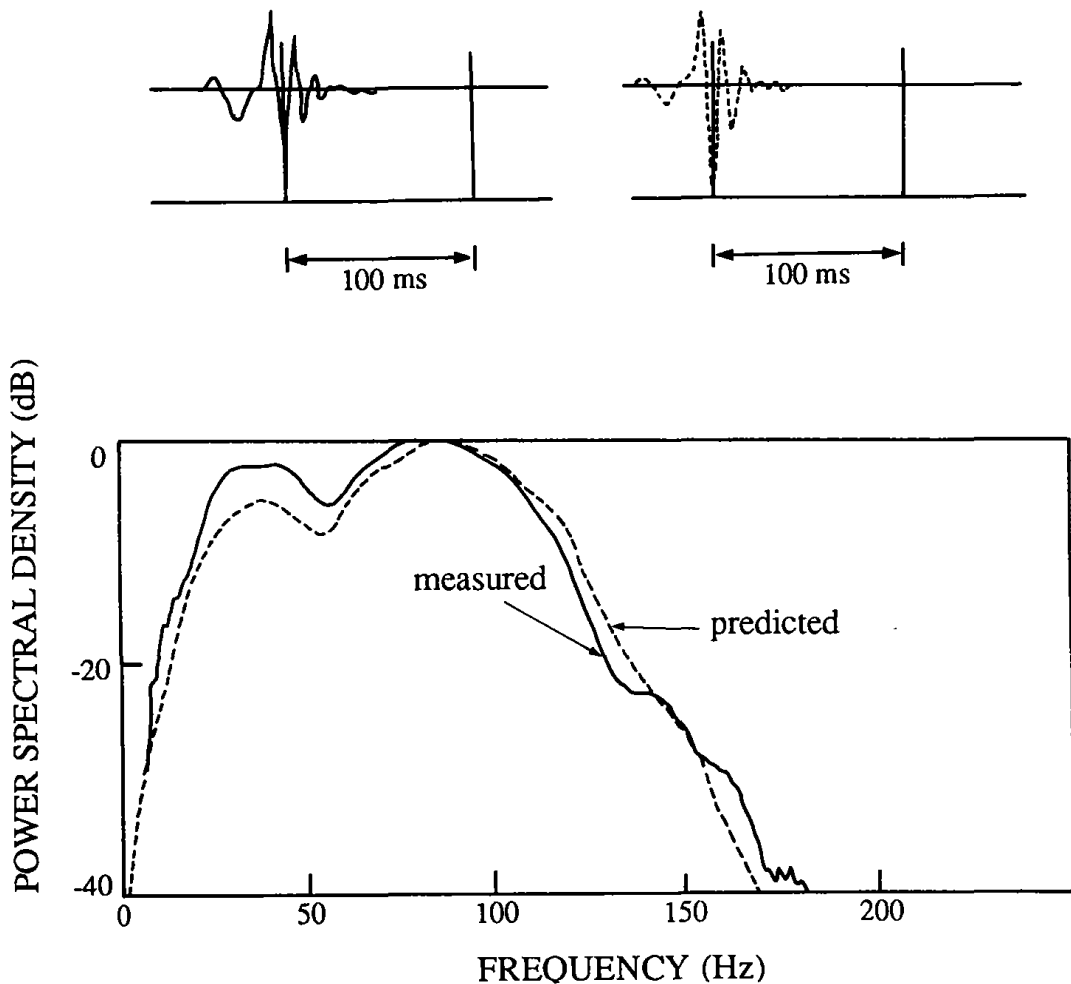


Fig.25 Measured and predicted far-field pressure signatures and their amplitude spectra radiated by the S80 water gun (gun depth,4m; gun pressure,2000psi). (after Safar, M.H.,1985)

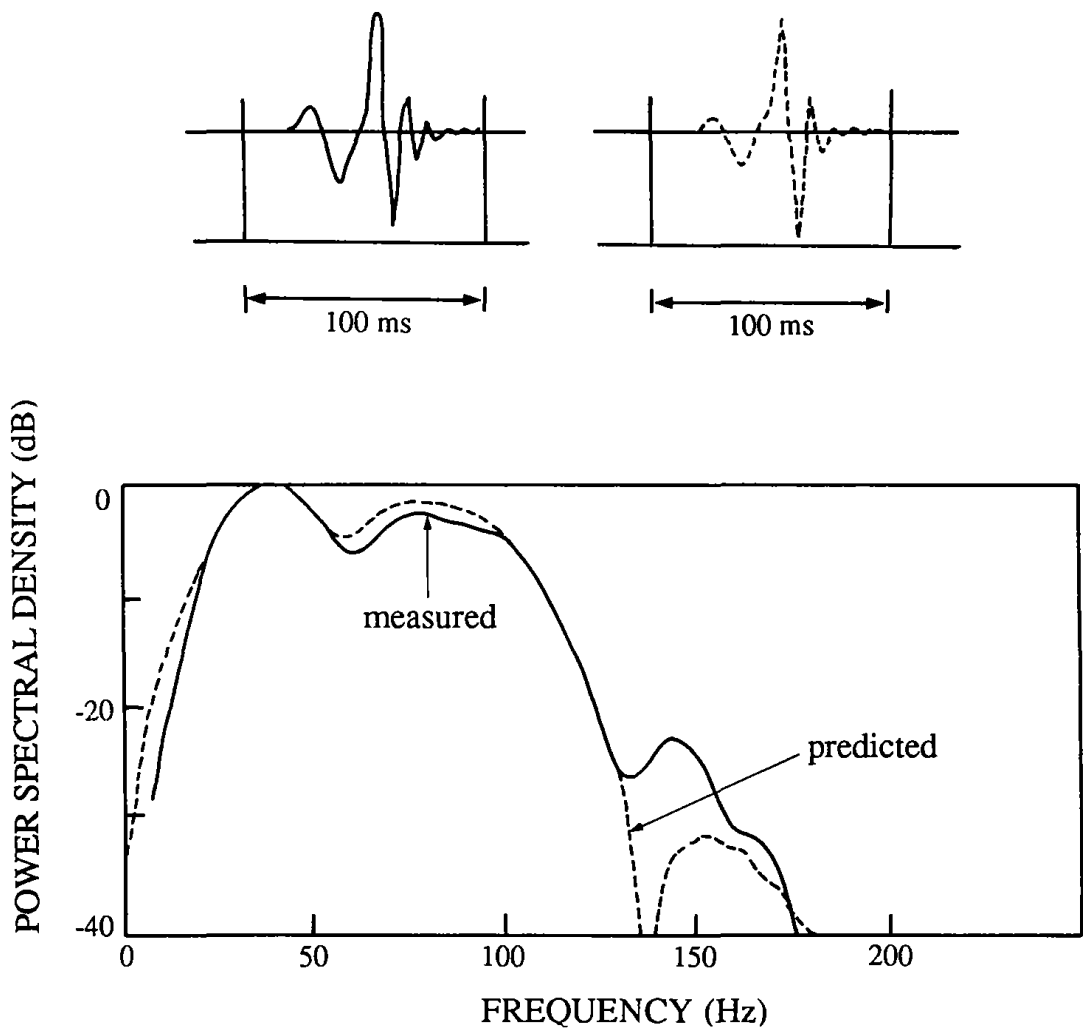


Fig.26 Measured and predicted far-field pressure signatures and their amplitude spectra radiated by the S80 water gun (gun depth,6m; gun pressure,2000psi). (after Safar, M.H.,1985)

마. Far-field에서의 파형변화

near-field에서의 파형변화와 비교하여, far-field에서의 그 변화를 살펴보면 다음과 같다.

Fig.27은 공기압 2000psi일 경우, 깊이에 따른 far-field 파형들을 보여주고 있다. Fig.27의 아래부분은 Fig.19에서 나타나는 near-field에서의 각 깊이에 따른 파형과, 동 깊이에서의 surface ghost를 합해(convoluted) 계산된 파형이며, 윗부분은 실측된 파형들이다. 이러한 두 파형들은 각 깊이에 따라 매우 유사함을 보여주며, 이를 통하여 far-field의 파형은 합성파임을 다시한번 확인할 수 있다. 이때 far-field에서의 실측치들은 앞절에서 언급된 near-field에서의 파형자료와 같이 MH-1 hydrophone을 이용한 1ms의 sampling 자료이다.

Fig.23과 비교되는 Fig.28은 상기의 획득자료를 각각의 공기압에 따라 깊이의 변화에 의한 peak amplitude의 변화를 보여준다. 즉 near-field에서의 파형과는 달리 40ft 깊이까지는 amplitude가 급속히 작아지다가 그 이상의 깊이에서는 별다른 변화를 보이지 않는다. 또한 far-field에서의 공기압대비 amplitude의 변화를 보면, 각각의 깊이에서 공기압의 변화에 따른 peak amplitude의 변화는 near-field에서와 매우 유사하여, 압력이 증가할수록 그의 amplitude는 단조증가함을 알 수 있다(Fig.29).

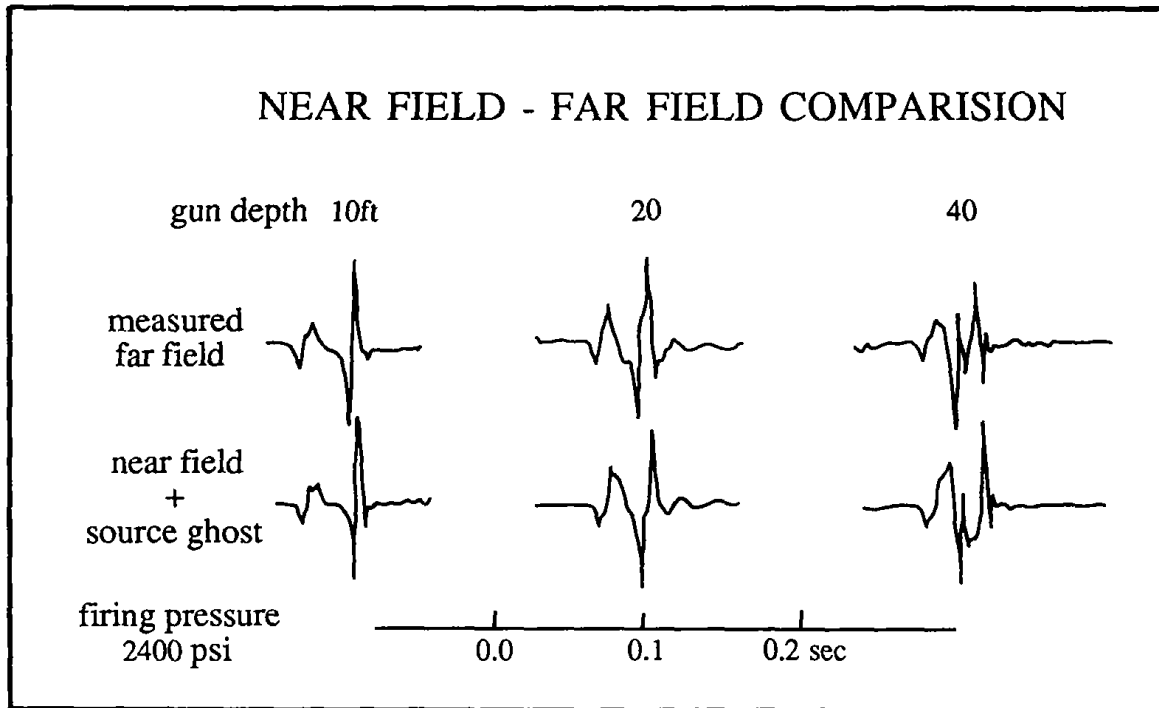


Fig.27 Measured far-field signatures compared to near-field signatures convolved with source ghost operators. (after French, W.S. and Henson, C.G., 1978)

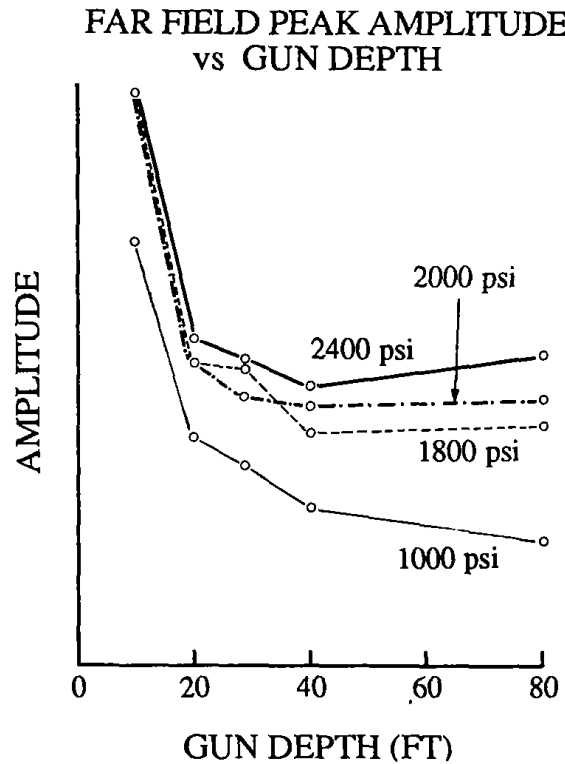


Fig.28 Changes in the far-field peak pressure with changes in the gun depth. (after French, W.S. and Henson, C.G., 1978)

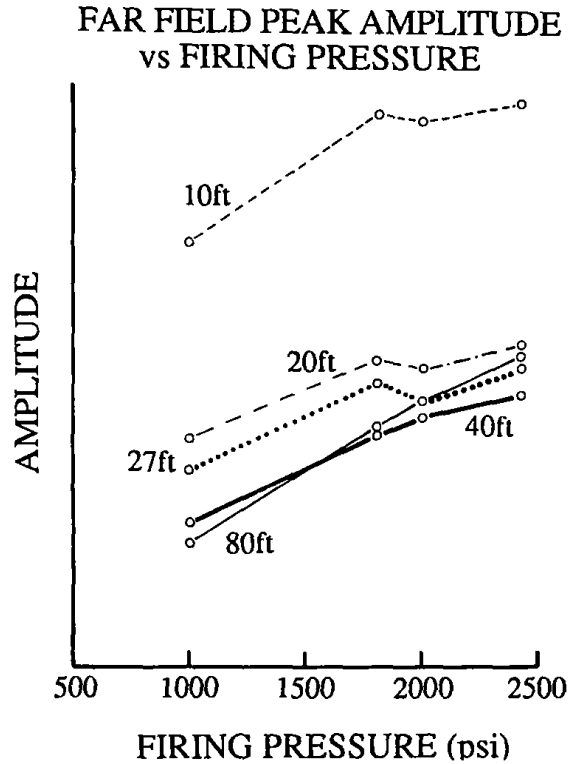


Fig.29 Changes in the far-field peak pressure with changes in the firing pressure. (after French, W.S. and Henson, C.G., 1978)

바. Water Gun 초기신호의 주기변화

앞절에서 설명된 water gun 파형의 주기는 growth phase와 collapse phase의 합으로 표현된다고 할 수 있는데, 이러한 water gun 신호음의 주기는 air gun과 같이 gun의 작동깊이에 따라 차이가 난다.

깊이에 따른 이론적인 air gun의 bubble pulse period의 변화는 Rayleigh-Willis formula로써 알려져는데(Rayleigh, L.J.W., 1917; Willis, H.f., 1941; Krame, F.S. et al, 1968), Newman(1979)에 의하여 실험적인 관측을 통하여 입증되었다. 즉 주기 T는 gun의 깊이 H에 의하여 다음과 같은 관계식을 만족한다.

$$T = (PV)^{1/3} / 510(1 + H/33)^{5/6}$$

T = period in second

H = gun의 깊이(ft)

P = firing pressure in psi

V = gun의 부피(inch³)

또한 Safar(1985a)는 water gun의 작동시 생성되는 공동(cavity)과 이것의 붕괴(collapse)와 관련하여, 붕괴시 나타나는 pressure bubble pulse의 주기와 pressure를 계산하였다. 즉 이러한 negative peak bubble pulse의 주기는 붕괴시간(collapse time)의 두배로 가정하여 다음과 같이 유도하였다.

$$T = -0.183 P r / (1 + d/d_0)^{3/2}$$

P = pressure bubble pulse negative peak(bar · m)

d = water gun depth

d₀ = depth of the collapsing cavity

Fig.30은 gun의 깊이에 따른 주기의 변화를 보여준다. 실선은 이론적인 air gun 파형의 주기변화로서 공기압이 1000, 2000 및 2400psi 일때의

차이를 나타내며, 표시된 water gun 파형의 주기는 각 공기압에 따른 실측치를 보여준다. 한편 이때의 air gun의 주기에 관한 이론식은 상기의 관계식의 변형으로서, C는 비례상수이고 Z는 gun의 깊이이며, P는 당시의 공기압이다.

Fig.30에서 보면, water gun의 주기는 air gun의 변화와 같이, 깊이에 반비례하여 감소하고 있다. 그러나 air gun과는 달리 공기압의 차이에 의해서는 그다지 민감하지 않음을 알 수 있다.

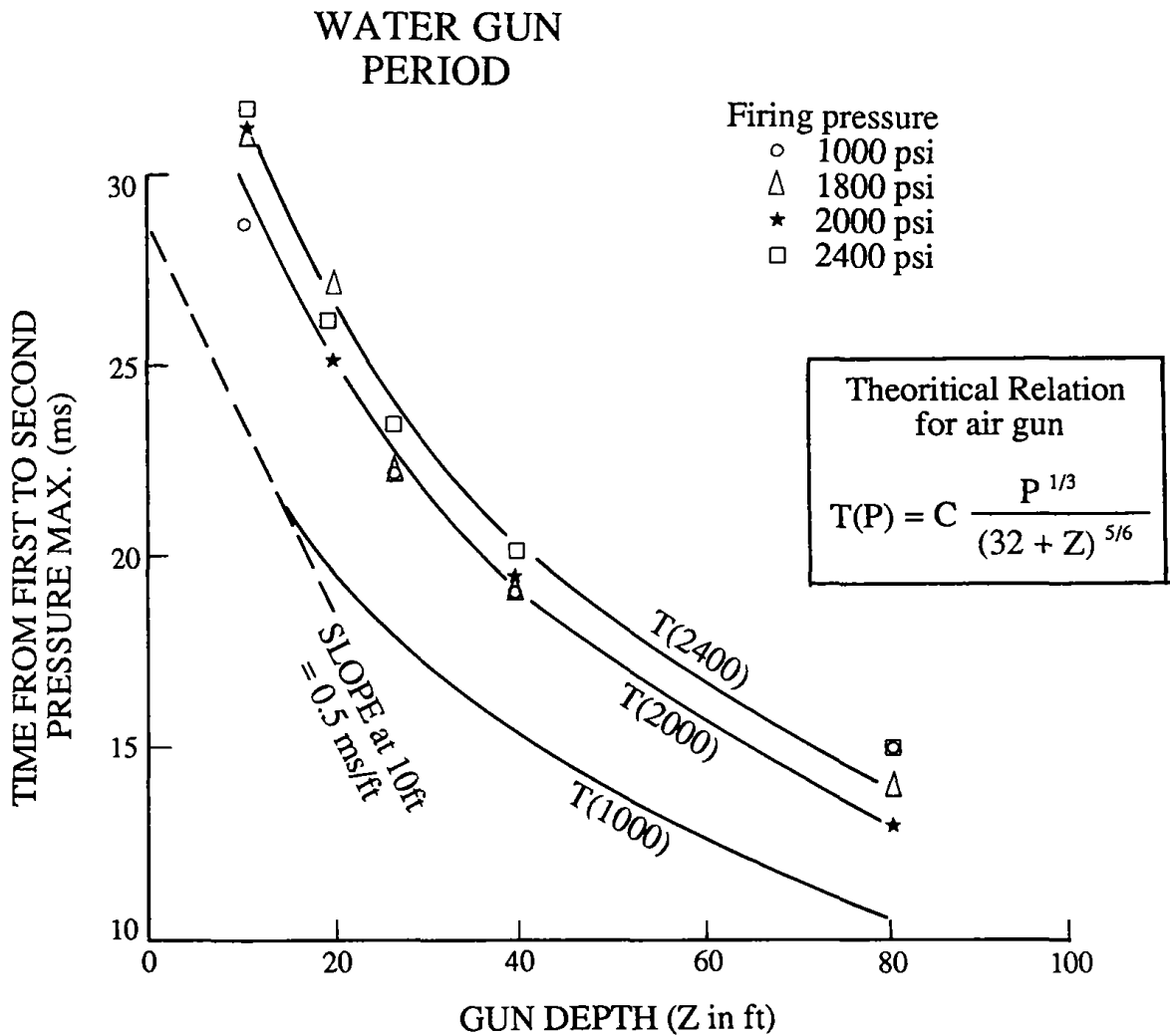


Fig.30 Comparison of measured water gun period to theoretical air gun period under various firing conditions. (after French, W.S. and Henson, C.G., 1978)

참고문헌

- French, W.S. and Henson, C.G., 1978, Signature measurements on the water gun marine seismic source, in paper presented at Offshore Technology Conference, Houston
- Hsieh, D.Y. and Plesset, M.S., 1963, Theory of rectified diffusion of mass into gas bubbles, Journal of Acoustical Society of America 33, 206-215
- Hutchinson, D.R. and Detrick, R.S., 1984, Water gun VS air gun: a comparison, Marine Geophysical Researches 6, 295-310
- Johnston, R.C. and Cain, B., 1982, Marine Seismic Energy Source : Acoustic Performance Comparison, paper presented at the 14th Offshore Tech. Conf., Houston, Texas.
- Kramer, F.S., Peterson, R.A. and Walter, W.C., 1968, Seismic energy source handbook, Bendix United Geophysical Corp., Pasadena
- Lugg, R., 1979, Marine seismic sources, in developments in geophysical exploration methods, ed. A.A.Fitch, Appl. Soci. Publ., London
- Newman, P., 1979, In a paper presented at the comparison of the European Communities Symposium in Luxenberg
- Parkes, G. and Hatton, L., 1986, The Marine Seismic source, D.Reedel Publishing Cmpany, Holland, 114

- Rayleigh, L.J.W., 1917, On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity, *Philosophical Magazine* 34
- Safar, M.H., 1968, Comment on papers concerning rectified diffusion of cavitation bubbles, *Journal of Acoustical Society of America* 43, 1188-1189
- Safar, M.H., 1984, On the S80 and P400 water gun: a performance comparison, *First Break* 2, 20-24
- Safar, M.H., 1985a, On the calibration of the water gun pressure signature, *Geophysical Prospecting* 33, 97-109
- Safar, M.H., 1985b, Single water gun far-field pressure signatures estimated from near-field measurements, *Geophysics* 50, 257-261
- Sheriff, R.E., 1976, *Encyclopedic dictionary of exploration geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma
- Verma, R. K., 1986, *Offshore Seismic Exploration*, pp. 279-314, Gulf Publishing Co., Houston.
- Willis, H.f., 1941, Underwater explosions, time interval between successive explosions, *British Report WA 47.21*