

BSPE 00284-442-7

수중음파 측정기술 연구

A Study on the underwater
acoustic wave measurement technique

1992. 3.

한국해양연구소

提 出 文

韓國海洋研究所長 貴下

본 報告書를 “水中音波 測定技術 研究”에 관한 보고서로 제출 합니다.

1992. 3

韓國海洋研究所

總括研究責任者 : 全 鎬 景 (海洋器機室)

研 究 員 : 朴 建 泰 (海洋器機室)

咸 錫 賢 (海洋器機室)

朴 東 元 (海洋器機室)

黃 槿 春 (海洋器機室)

研 究 助 員 : 李 忠 雨 (海洋器機室)

韓 東 熙 (海洋器機室)

金 美 垞 (海洋器機室)

要約文

I. 題目：水中音波 測定技術 研究

- 수중에서 음파 전달 원리를 이용하는 관측장비의 효율적인 응용

II. 연구 개발의 목적 및 중요성

해양을 알기 위한 인류의 노력이 음파를 사용하게 됨으로써 미지의 세계였던 해저의 지형과 해저면을 알게되어 해양에 대한 인식전환과 함께 자원확보의 노력이 증대되고 있다.

수중음향분야는 해양(물리, 화학, 지질, 생물)분야의 지식과 음향 장비의 운용기술, 신호 분석 기술 등 복합적인 학문 분야로 해양에서 쓰이는 각종 센서가 반도체 집적회로로 발전되가면서 해양관측의 방법 또한 실시간 자료획득을 위한 방법으로 변화되고 있다. 수중음파를 이용한 장비의 개발은 해양연구의 방향이 기초 연구에서 응용 연구로 전환되는 매우 필요한 일이라고 본다. 해양의 경계 및 내부를 관찰 하기 위한 음향장비의 이용 및 응용은 관련기술의 급속한 발전으로 음향기술의 발전을 더욱 가속화시켜 해양 자원 개발의 범위로 확대되고 있으며, 해양의 중요성이 증대함에 따라 종합적이고 입체적인 자료의 확보와 필요성이 증가되어 변모하는 해양개발연구가 활발하게 이루어져 가고 있다.

수중에서 음파를 이용한 통신, 제어, 탐색 또는 위치와 방향 측정 등의 기술은 현 시점에서 절대적으로 필요한 것인 동시에 일반 산업 및 학술 등의 연구로도 막대한 이익과 부가가치를 가져 올수 있는 고도산업의 한 부분이다. 비록 음파를 이용한 단순한 수중장비일지라도 대단히 고가이며 아직까지도 국내 생산이 없어 막대한 외화의 지출을 가져오고 있는 실정이다.

III. 연구 개발의 내용 및 범위

- 가. 센서(송수파기 센서)소자의 특성 및 교정 기술 분석
- 나. 수중에서 사용하는 송수파기의 측정원리 및 측정 장비 전자회로 분석
- 다. 음파 활용의 기술적 고찰

IV. 연구 개발 結果 및 活用に 대한 建議

- 본 연구를 통한 기술 축적으로 음파를 이용한 해양 관측기기 및 장비의 교정 방법 기초 마련
- 예) 측심기, 수중 이동체의 위치 측정기, 수중 자료 및 통신장비, 지층 탐사기, 해저면 관측장비 등
- 장비의 국산화 자금자족의 기초 마련
- 수중 음향학 연구 개발 증진
- 현장 관측 장비의 활용폭 증대로 연구 업무의 활성화
- 장비의 신뢰도 증진

SUMMARY

I. Title : A study on the underwater sound measurement technique

II. Object and Necessity of the Study

The human has been constant efforts for the understanding and learning to the sea through many kind of methods, today they find a new meaning in the sea and then trying to secure of resources for they own country to beginning a way of research or observations by underwater acoustics.

The field of underwater acoustics consisted of a complex studies and using of physics, chemical, geology, biology etc. Otherwise these field are slowly changed from a way of manual detection and recording type using various underwater sensors to a way of remoted real time observations.

Development of acoustic equipments make a motivated of changing from fundamental studies to application. This technique of practical use to underwater acoustics bring in rapidly expansion of the oceanographic research and subbottom survey.

Also this is a parts of high technical of industrial and take a lots of profit and an added value through the technology of underwater acoustics communication and control system and measuring of underwater position etc.

Such a equipments of underwater acoustics are still hard productions at domestics. Those price are very expensive. Unfortunately, it is depending on all import only.

III. Scope and Contents of the Study

- 1) Calibration and analysis of the characteristics of acoustics sensor.
- 2) Study on the method of acoustic wave measurement
- 3) An investigation and application for the acoustics wave

IV. The Study Result and Proposal for Application

- Development of technology for the method of calibration and measuring technique related on acoustics equipments.
(ex : Echo sounder, Underwater communication, positioning equipment etc.)
- Preparations for the self-sufficiency on the domestic model of acoustics equipments
- A study on underwater sound measurement technique
- Promotions for the reliability of acoustics equipments.

目 次

提出文	1
要約文	3
Summary.....	5
目次	7
List of figures	9
List of tables	10
第 1 章 序論	11
第 2 章 音波	12
第 1 節 음향현상과 측정량	12
1. 음파의 기본 파라미터	12
2. 주파수 분석	13
3. 음파의 실효치	14
4. Intensity와 음향 파워	15
5. 음압도 dB (deciBel)	15
6. 파동 방정식 유도	17
7. 공기와 해수에서의 음파의 차이점	18
第 2 節 水中에서의 음파 특성.....	19
1. 速度 및 屈折	19
2. 전달 손실	20
3. 雜音	22
4. 반사손실	24
第 3 節 초음파의 응용	26
1. 통신분야 응용	26
2. 동력분야 응용	29
第 3 章 음향센서의 교정 및 측정	31
第 1 節 음향 센서	31
1. 音波의 발생 방법	31
2. 용도의 결정	36
3. 트랜지스터에 의한 발전	40
4. 광대역 변환기	46
5. 광섬유 수중 센서	48

第 2 節 음향센서의 교정 방법.....	50
1. 마이크로폰	50
2. Hydrophone	52
3. 광섬유 센서	59
第 3 節 음향센서의 특성 측정 기술.....	60
1. 스피커의 성능	60
2. 마이크로폰	64
第 4 章 해양 관측 장비 응용원리 및 특징	65
第 1 節 SONAR System	68
1. SONAR 방정식	68
2. SONAR 주파수	68
3. 능동 SONAR 시스템의 설계.....	69
第 2 節 위치 측정	73
1. 거리 측정의 원리	73
2. 위치측정의 방법	74
3. 관측 장비	77
第 3 節 수중통신	81
1. 음파의 전달 경로 및 통신	81
2. 수중 자료 전송	83
第 4 節 해저면 관측 장비	85
1. 응용 원리	85
2. 관측 장비	90
第 5 節 해수면 관측 장비	91
1. Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)	91
2. Hydrophone을 이용한 수중소음 측정	93
3. 해수중 음파의 전파특성 관측 및 응용	93
第 5 章 結論 및 建議	95
參考文獻	96
Appendix A 초음파의 응용 분류	98
Appendix B 초음파의 발생 방법	102

List of Figures

Fig. 2 - 1.	Simple sine wave and parameter of wave	12
Fig. 2 - 2.	R.M.S. mean value of sinusoidal wave and random wave	14
Fig. 2 - 3.	Reference pressure levels	16
Fig. 2 - 4.	Typical deep-sea velocity profile divided into layers	20
Fig. 2 - 5.	Volumetric absorption	22
Fig. 2 - 6.	Average deep-water ambient-noise spectra	23
Fig. 2 - 7.	Bottom loss versus grazing angle at various frequencies.....	25
Fig. 2 - 8.	SONAR type.....	26
Fig. 2 - 9.	Ultrasonic nondestructive check method.....	27
Fig. 2 - 10.	Explane of current meter	28
Fig. 3 - 1.	X-cut from crystallization of crystal	31
Fig. 3 - 2.	Example of bolt fasten Langevin vibrator	34
Fig. 3 - 3.	Bimorph diaphragm	35
Fig. 3 - 4.	Recommended frequency distribution	38
Fig. 3 - 5.	20 [kHz] 150 [W] Ultrasonic oscillation circuit.....	41
Fig. 3 - 6.	28 [kHz] 300 [W] MOPA type oscillation circuit	43
Fig. 3 - 7.	20[kHz] 170 [W] vibration feedback oscillation circuit	45
Fig. 3 - 8.	Basic structure of piezoelectric broad-band ultrasonic transducer.....	47
Fig. 3 - 9.	Equivalent circuit of ultrasonic transducer use KLM-model.....	47
Fig. 3 - 10.	Various configuration of optical fiber sensor.....	49
Fig. 3 - 11.	Various frequency regimes for the interaction of a typical fiber configuration with an acoustic wave.....	49
Fig. 3 - 12.	National standard system in acoustic measuerments	50
Fig. 3 - 13.	Equivalent circuit of reciprocal microphone.....	51
Fig. 3 - 14.	Combination method of three microphones	52
Fig. 3 - 15.	Measurement arrangement for calibration in the 0.1 [Hz] ~ 1 [Hz] range.....	54
Fig. 3 - 16.	A calibration measurement set-up for the 50 [Hz] ~ 4 [kHz] range	55
Fig. 3 - 17.	Set-up for calibration in the 3 [kHz] ~ 200 [kHz] range by the calibrated projector method	56

Fig. 3 - 18. Mounting of Brüel & Kjær hydrophones and their respective couplers onto the calibrator. The insert shows a 1/2" microphone mounted to monitor the sound pressure level inside the coupler.....	58
Fig. 3 - 19. Generalized fiber interferometer system	60
Fig. 3 - 20. Frequency response of speaker measurement system.....	62
Fig. 3 - 21. Harmonic distortion measurement system.....	63
Fig. 3 - 22. Condencer Microphone	64
Fig. 4 - 1. Application of sound wave	66
Fig. 4 - 2. Timing of events in a pulsed sonar	72
Fig. 4 - 3. Propagation of acoustic from under water equipments	74
Fig. 4 - 4. Acoustic position referenceing methods	76
Fig. 4 - 5. MF acoustic short baseline system.....	78
Fig. 4 - 6. Block diagram of acoustic release system	79
Fig. 4 - 7. Block diagram of deck command controller	80
Fig. 4 - 8. Block Diagram of Underwater Unit	80
Fig. 4 - 9. Sound wave path in the ocean.....	82
Fig. 4 - 10. Data telemetry from underwater sensors to onland computer.....	83
Fig. 4 - 11. Word Structure.....	83
Fig. 4 - 12. Block diagram of a acoustic transmission.....	84
Fig. 4 - 13. Block diagram of acoustic receiver and transmitter.....	84
Fig. 4 - 14. Geometry for bottom-scanning and backscattered sound.	87
Fig. 4 - 15. Reflection of p-wave at the seafloor acting as a liquidsolid interface.....	89
Fig. 4 - 16. Measurement method of ADCP.....	92

List of Tables

Table 3 - 1. Typical of ultrasonic oscillation type.....	40
Table 3 - 2. Configuration of interferometer for use with various detection system.....	59
Table 4 - 1. Underwater acoustic instruments.....	67
Table 4 - 2. Acoustic position reference system advantages and disadvantages..	75
Table 4 - 3. A outline of ocean communication.....	81

第 1 章 序論

水中에서 음파의 사용은 船員과 海軍들이 정보의 전달을 위한 노력에 의하여 생기기 시작하였다. 이런 분야의 연구는 20세기 이후 개발되기 시작한 음향장비를 군사용 목적뿐만 아니라 해양자원 개발분야에도 널리 활용 함으로써 큰 효과를 보고 있다.

해양기기의 개발은 해양, 전자, 기계 산업 등의 복합적이고 종합적인 산업 육성으로 유도 하게 되며 원활한 해양 장비의 이용은 해양 연구, 해저 탐사, 해저 구조물 설치, 보수, 해양 상태 파악 연구 등, 학술, 자원, 군사, 산업 등에 적극 이용이 가능하며 이는 국가적으로 필요한 첨단 핵심 기술 개발로 이어지는 것이다.

수중에서의 연구측정이 음향, 전기 그리고 기계와의 상관 관계에서 이루어져 가는 것을 볼때 수중음파를 이용하는 장비의 개발은 해양연구에 있어서 절실한 일이라고 본다. 현재의 해양 연구 방향은 응용적 견지에서 이론과 실험이 더불어 개발 연구되는 것이 대부분이며 각종의 음향 계측에는 전기에너지를 음향에너지로 변환하는 음향센서가 필요하다. 음향계측에 요구되는 조건을 만족 시킬 수 있는 센서의 소자도 세라믹소자에서 압전고분자 필립으로의 실용화가 예상되고 있다. 이러한 변화는 단순한 센서에 의한 관측에서 수중 음파를 이용하는 광범위한 관측으로의 변화를 알 수 있다.

본 연구에서는 해양에서의 음향특성과 음향의 기본적인 소자를 분석하고 교정하는 계측 시스템 개발의 기초단계로 음향 시스템을 구성하는 방법과 센서를 연구하여, 음파를 이용하고 있는 해양 관측 장비의 특성을 파악하고 활용도를 높여 자료의 질적 개선에 이바지하려 한다.

第 2 章 音波

넓은 의미에서 음향 현상은 탄성 매질의 탄성 복원력에 의해서 그 매질을 구성하는 입자들이 평행위치를 중심으로 왕복 운동을 할 때 나타나는 진동 현상을 의미한다. 대기중의 음향 현상을 소리라고 부르고 고체에서는 진동, 물에서는 수중음향이라고 부르지만 이들 모두에 수반되는 물리적 과정은 본질적으로 비슷하다. 음향측정은 파동현상을 대상으로 하기 때문에 다른 측정에서는 볼 수 없는 특별한 절차와 주의를 요구한다. 대상음장의 교란은 측정 결과에 오차가 발생 할 수 있다. 음파는 기본적으로 동적 물리현상이며, 따라서 음파를 설명하는 물리량은 시간변화 함수로서 주어진다. 그러므로 음향측정은 기본적으로 시간신호의 신호처리를 바탕으로 하게 된다. (은희준, 1986)

第 1 節 음향현상과 측정량

1. 음파의 기본 파라미터

음파가 진행할 때 대기의 압축탄성에 의해서 평형상태의 대기압을 중심으로 작은 압력의 변화가 발생된다. 이 압력의 변화를 음압이라고 부르며 p 로 나타낸다. 평형상태의 대기압은 $10^{-5} [N/m^2]$ 가량되는데 반해서 통증을 느끼게 되는 높은 음압의 경우는 $200 [N/m^2]$ 밖에 안되어서 음파에 대한 대기의 섭동이 미세함을 알 수 있다.

간단한 예로서 Fig. 2 - 1과 같은 정현파를 살펴보자. 수평축을 공간변수(x)라 가정하고 한 파동의 크기를 파장(λ)이라고 부르며, 반면에 수평축을 시간변수(t)로 가정 할 때의 한 파동의 크기는 주기(T)를 의미한다. 음파의 주파수(f)는 1초 동안 발생하는 파동의 수로서 결정 된다.

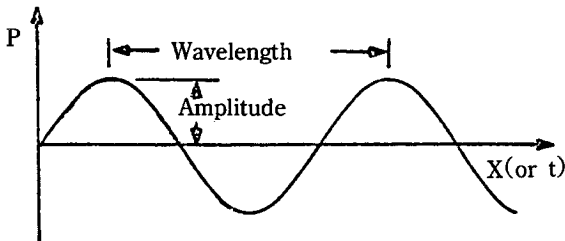


Fig. 2 - 1. Simple sine wave and parameter of wave

즉 주파수와 주기사이에는 다음과 같은 관계가 존재한다.

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{----- (1)}$$

이 같은 주파수의 정의는 음파가 1초 동안에 진행한 길이를 파장으로 나누수와 동일하다. 음파가 1초동안에 진행한 길이를 위상속도(c)라고 부른다. 따라서

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad \text{----- (2)}$$

이상 설명한 파장, 주기, 주파수, 위상속도 및 Fig. 2 - 1에서 정의된 진폭은 정현파의 특성을 나타내는 기본 파라미터들이다. 이들 중에서 진폭을 제외한 네개의 파라미터들은 식 (1), (2)에 의해서 서로 관련되기 때문에 임의의 두개만 알면 정현파를 정의 할 수 있다. 더우기 특별한 경우를 제외하면 위상속도는 정상상태 대기에 대한 값(약 340 [m/s])으로써 가정된다. 따라서 대부분의 실제 음향 문제에서는 진폭과 주파수 (혹은 주기, 파장)의 두가지 파라미터만을 취급한다.

2. 주파수 분석

단순 정현파는 하나의 진폭과 주파수값에 의해서 정의 된다. 이러한 음파를 순음(純音)이라고 부르기도 한다. 순음은 확성기, 마이크로폰, 기타 음향기기들의 주파수 반응 특성조사를 위한 테스트 신호로써 흔히 사용된다. 실제 대부분의 음파들은 시간공간상의 변화가 대단히 복잡하기 때문에 음파를 순음의 성분으로 나누는데 이러한 기술을 주파수 분석이라고 한다.

주파수 분석에는 광대역 분석과 협대역 분석이 있는데 어떠한 주파수 분석에서든 밴드폭(B)과 분석 시간(T)는 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$BT \geq 1 \quad \text{----- (3)}$$

따라서 밴드폭이 좁을수록 분석시간은 증가하며 이러한 이유로 협대역 분석은 음향기기 성능테스트나 기계진동 분석과 같이 신호 내용이 시간에 따라서 거의 변하지 않는 정상신호를 대상으로 할 때 주로 이용된다. 협대역 분석의 대표적인 예가 FFT(Fast Fourier Transform) 분석이다.

반면에 일반환경 소음과 같이 신호내용이 시간에 따라서 심하게 변하는 비정상 신호에 대해서는 분석 시간이 짧은 광대역 분석을 이용한다. 더우기 많은 주파수 성분이 섞여있는 음파에 대한 전반적인 주파수 특성을 바탕으로 하기 때문

에 광대역 분석은 보다 실질적인 의미를 갖는다. 옥타브 밴드 분석은 음향의 광대역 분석에서 가장 많이 사용되는 분석 방법이다.

3. 음파의 실효치

진폭은 음파의 세기를 나타내어서 정현파의 경우에는 그 자체로서 충분한 역할을 한다. 그러나 Fig. 2 - 2 (b)와 같은 랜덤파의 경우에 진폭은 의미가 없으며, 이러한 파동의 세기를 단일지수로써 나타내기 위해서는 적절한 평균치 개념을 사용해야 한다. 시간신호의 순간값의 실효치는 그 신호에 포함된 에너지 양과 직접 관련되는 양으로서 물리적으로 중요한 개념이다. 어떤 물리량 $X(t)$ 의 측정 시간 폭 T 에 대한 실효치는 다음과 같이 정의 된다.

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} \quad \text{----- (4)}$$

음향 측정에서는 X 대신에 음압 P 를 사용한다. Fig. 2 - 2는 정현파와 랜덤파에 대한 실효치의 예이다. 특히 정현파의 경우에는 실효치와 진폭 사이에 다음과 같은 관계식이 존재한다.

$$P_{rms} = \frac{A_p}{\sqrt{2}} \quad \text{----- (5)}$$

여기서 A_p 는 정현파의 진폭이다. 현재 사용중인 모든 음향 측정기기들은 측정된 음압을 실효치로써 표시한다.

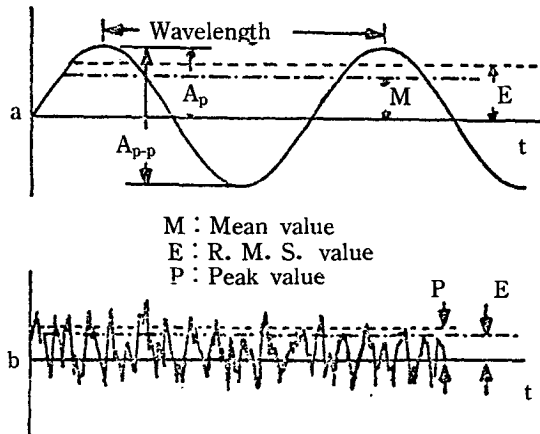


Fig. 2 - 2. R.M.S. mean value of sinusoidal wave and Random wave

4. Intensity와 음향 파워

음향 측정의 기본량은 마이크로폰에 의해서 측정되는 음압이다. 일반적으로 음파에 수반되는 에너지는 음압과 입자속도의 함수이기 때문에 음향에너지를 음압만으로 나타 낼 수는 없다. 그러나 정현평면파(Sinusoidal plane wave)의 경우에는 시간평균 음향에너지 밀도 E와 음압 실효치 P사이에서 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$E = \frac{P^2}{\rho_0 c} \quad \text{----- (6)}$$

여기서 ρ_0 는 대기 밀도이다.

음향 Intensity는 단위 시간당 단위면적을 통해서 흐르는 음향에너지로써 정의된다. 따라서 시간 평균 Intensity I는

$$I = E \cdot c = \frac{P^2}{\rho_0 c} \quad \text{----- (7)}$$

$\rho_0 c$: 대기 음향 특성 임피던스

이때 관계식은 평면파 뿐만아니라 구면파에도 적용 될 수 있다.

이의 대표적인 적용은 음향 파워 측정에서 예를 들 수 있다. 음향파워는 단위 시간당 음원이 방출하는 총 음향에너지로써 정의되며 다른 전자 기계적 특성과 함께 음원의 고유한 물리량 중의 하나이며 스피커의 음향출력 효율 결정 및 소음 발생기계들의 상대적인 비교등에서 활용되고 있다. 음향 파워를 음압의 함수로서 나타내면

$$W = \int_S I \, dS = \frac{1}{\rho_0 c} \int_S P^2 \, dS \quad \text{----- (8)}$$

S : 음원을 둘러싼 임의의 측정면

이다.

5. 음압도 dB (deciBel)

일반적으로 음향에서는 dB라는 단위로써 음파의 크기를 나타 낸다. 소리는 본질적으로 대기의 압력의 변화를 우리 귀의 고막에 의해서 감지하는 현상이다. 따라서 소리의 크기는 최저 가청 압력(P_0)인 2×10^{-5} [Newton/m²]에서 통증을 느끼기 시작하는 200 [Newton/m²]까지 광범위하기 때문에 압력 자체로써 소리의 크기를 정의하는데 불편하여 물리학이나 공학에서 쓰이는 그 양의 log값을 이용

한다.

dB는 기본적으로 다음과 같이 정의 된다.

$$\text{dB} = 10 \log \left[\frac{\text{power}}{\text{기준 power}} \right] \text{ ----- (9)}$$

음향에서의 dB는 power 대신에 앞에서 정의된 Intensity를 사용하며,

$$\text{Intensity level } L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ ----- (10)}$$

I_0 : 기준 Intensity ($I_0 = 10^{-12}$ [Watt/m²])

식 (7)에 의하면 I는 P의 자승에 비례하므로 식 (11)와 같이 음압의 함수로 쓸 수 있다.

$$\text{음압도 } L_p = 10 \log \left[\frac{P^2}{P_0^2} \right] = 20 \log \left[\frac{P}{P_0} \right] \text{ ----- (11)}$$

이처럼 dB는 어떤 기준값에 의해 정의된 상대적인 양이다. Fig. 2 - 3은 음파의 기준단위를 알아보기 쉽게 만들어 놓은 것이다.

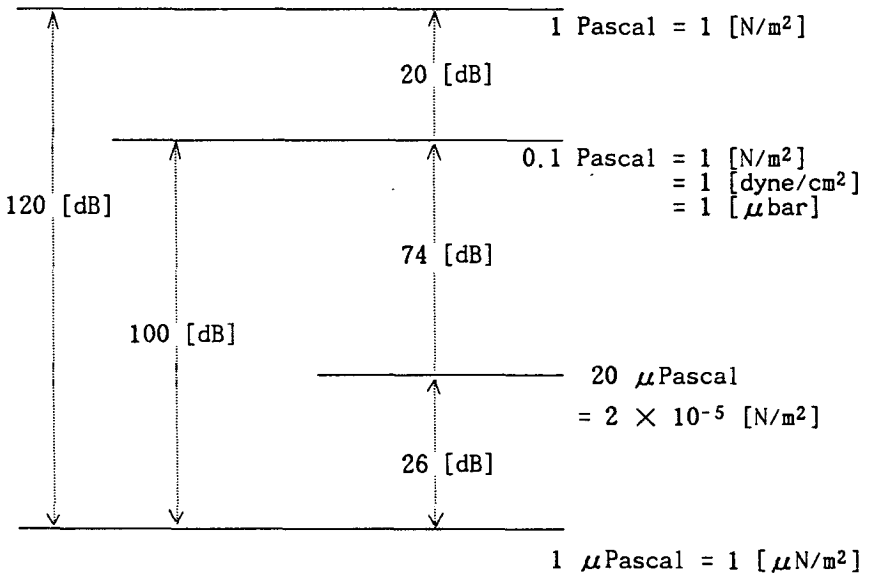


Fig. 2 - 3. Reference Pressure Levels

6. 파동 방정식 유도

음파의 전파는 매질내에서만 가능하며 매질에 역학적 교란을 줌으로써 음파를 발생시킨다. 이러한 역학적 교란은 매질의 압력, 밀도, 입자 속도 및 온도에 변화를 가져 온다. 대부분의 고체와 기체는 비교적 작은 열전도도를 갖기 때문에 음파의 전파는 비록 낮은 주파수 일지라도 주위 매질과 열교환이 이루어지지 않는 단열과정으로 볼수 있다.

매질내에서의 파동 방정식을 유도하기 위해 변수를 정리해 보면

$$\text{압력} : P(\text{압력}) = P_0(\text{대기압}) + P_1(\text{음압})$$

$$\text{시간과 공간으로 표현 하기 위해 } dP = dP_1$$

$$\text{밀도 } \rho = \rho_0 + \rho_1 \quad ; \quad d\rho = d\rho_1$$

$$\text{속도 } V = V_0 + V_1 \quad ; \quad dV = dV_1$$

이다. 이 변수들로부터 세개의 방정식 즉 상태 방정식, Euler 방정식, 연속 방정식을 얻을 수 있다. 압력과 밀도의 관계식을 단열 상태 방정식으로 하여 음파와 관련된 압력과 밀도의 변화량은 작기 때문에 급수전개로 나타낼 수 있으며 여기서 얻어 지는 것을 선형 상태 방정식이라 한다. 미소체적을 일체화된 질량 체로 가정하면 Newton의 운동 법칙을 적용 할 수 있으며 이로부터 얻어지는 결과는 Euler 방정식이라고 하고, 질량 보존의 법칙으로서 유체내에 공동이나 불연속점이 발생하지 않는다는 것이 연속 방정식이다.

그러므로 1 차원상에서 음파의 전파는 다음과 같은 세개의 방정식에 의해 정의 될 수 있다. 즉

$$P = c^2 \rho + \text{const} \quad : \text{ 선형 상태 방정식} \quad \text{--- (12)}$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial X} \quad : \text{ 선형 Euler 방정식} \quad \text{--- (13)}$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial X} = - \frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \quad : \text{ 선형 연속방정식} \quad \text{--- (14)}$$

$$c^2 : \text{ 음파의 전파 속도 } \quad V_x : \text{ 입자속도 (x의 함수)} \quad t : \text{ 시간}$$

식(13), (14)에서 각각 x와 t에 대해 미분하고 V_x 에 관한 항을 소거하면 1 차원 파동 방정식(15)를 얻을 수 있고 이와같은 방법으로 3 차원 파동 방정식 (16)을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial X^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad \text{--- (15)}$$

$$\text{div grad } P = - \rho_0 \frac{\partial \text{div } V}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad \text{----- (16)}$$

$$\nabla^2 P = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad \text{----- (17)}$$

∇^2 : Laplacian operator, $P = P(x, y, z, t)$, $c = c(x, y, z)$

7. 공기와 해수에서의 음파의 차이점

앞서 논의 되어온 바와 같이 매질의 차이로 인해 음파가 차이가 있음을 알았다. 일반적으로 해수에서의 음속은 공기중에서 보다 약 4.4 배가 빠르며, 해수에서의 Acoustic impedance, ρc 는 1.5×10^6 [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$]이고 공기에서는 약 420 [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$]이다. 두 물질간의 Intensity의 비는

$$\frac{I_{\text{air}}}{I_{\text{water}}} = \frac{(p^2/\rho c)_{\text{air}}}{(p^2/\rho c)_{\text{water}}} = \frac{(\rho c)_{\text{water}}}{(\rho c)_{\text{air}}} \approx 3570$$

이고, 만약 공기와 해수에서의 Intensity가 같다면 음압은

$$\frac{p^2_{\text{water}}}{p^2_{\text{air}}} = \sqrt{3570} \approx 60$$

이 됨을 알 수 있다. 그러므로 수중에서 사용되는 센서 Hydrophone과 Projector의 특성은 공기 중에서 사용되는 Microphone과 Loudspeaker의 구조와 특성이 달라야 한다는 것을 알 수 있다.

第 2 節 수중에서의 音波 特性

1. 速度 및 屈折

해양에서의 음파의 속도는 온도, 염분도 및 압력에 의해 결정되며 수중에서의 속도에 대한 일반 공식을 보면

$$C = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.010T)(S-35) + 0.016Z \quad \text{--- (18)}$$

C = Velocity of sound [m/sec], T = Temperature [°C],

S = Salinity [‰], Z = Depth [m]

이다. (Carl Eckart, 1977)

수심에 따른 음파의 속도 분포는 전형적으로 Fig. 2 - 4와 같이 나뉘어 지며 이들 각층의 형성과 두께는 위도, 계절, 시간 및 기상조건에 따라 바뀌게 된다.

해양의 음파의 속도 분포는 깊이에 따라 달라지므로 음원을 떠난 음파는 굴절에 의해 음선의 경로가 바뀌게 되며 에너지가 음원으로 부터 전 공간을 향하여 고르게 퍼져 나가지 않음을 알 수 있다. 이 때 굴절의 영향으로 인해 해양에는 음파의 통로가 형성되며 이러한 통로가 형성되면 음파가 2차원적으로 확산되므로 전달 손실이 적어지게 되어 원거리에 있는 목표물의 탐지가 용이해진다. 이 밖에도 수렴 영역 및 다중 경로가 형성 된다.

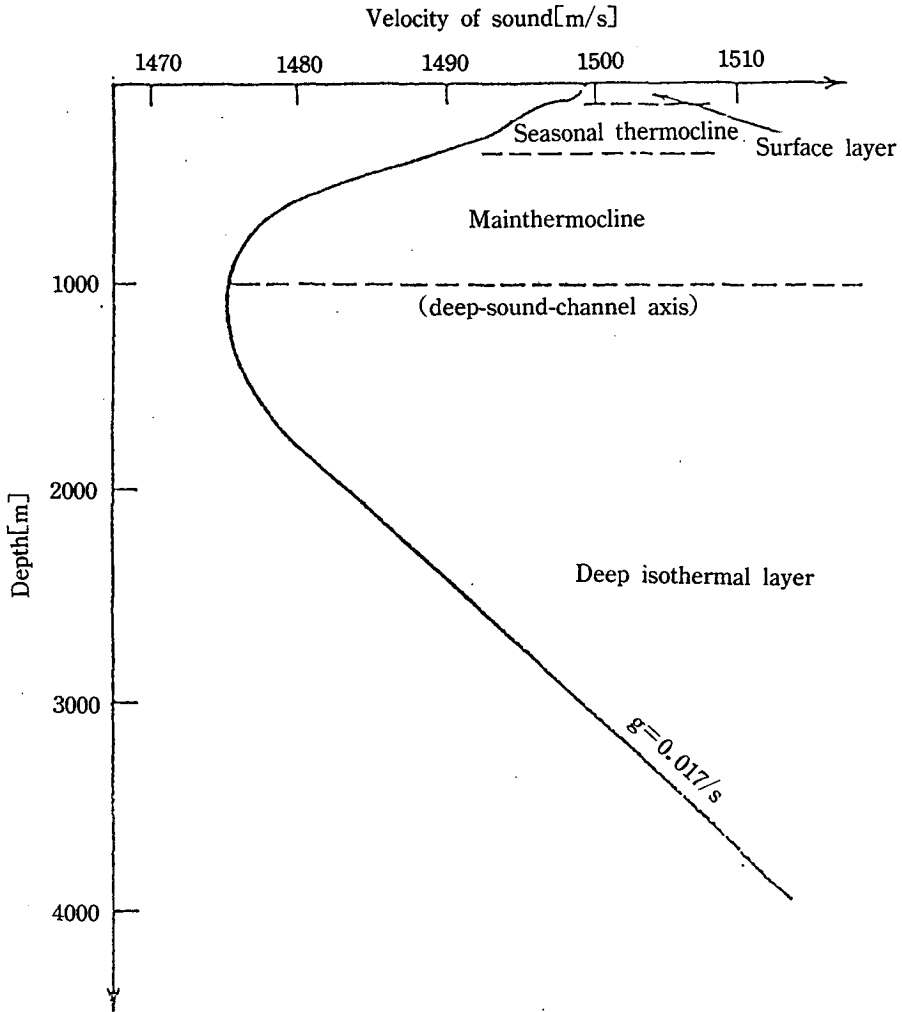


Fig. 2 - 4. Typical deep-sea velocity profile divided into layers

2. 전달 손실 (Transmission Loss ; TL)

수중에서의 음향 신호의 전달 손실에는 발산현상(Spreading)과 흡음현상(Absorption) 등이 있다. 발산 현상에 의한 음향에너지의 감쇠는 흡음 현상에 의한 감쇠보다 비교적 적은 근거리 전파 현상 해석시 중요하며, 원거리 전파 현상 해석시에는 흡음 현상이 음향에너지의 감쇠를 지배한다. (이종식, 1990)

발산 현상은 음파의 기하학적 전파에 따른 음향에너지의 감쇠현상이며 음파 에너지가 음파 전달거리(r)의 자승에 반비례하는 구면으로 생각할 수 있다. 음파가 r [m]까지 전달될 때의 손실을 식으로 표현하면

$$TL = 10 \log (I / I_{ref}) = 20 \log(r) \text{ [dB] re 1 [m]} \quad \text{--- (19)}$$

(I : Intensity at target, I_{ref} : Intensity at 1 [m])

이다.

해양을 구성하고 있는 성분이 수심별, 지역별로 다르기 때문에 계수가 다양하게 나타나며 흡음계수에 영향을 미치는 것은 물의 구조, 해수성분, 주파수의 변화가 있다. 매질 흡음에 대한 전달 손실은 전달 거리에 비례하며 다음과 같이 표현 된다.

$$TL = \alpha r \text{ [dB]} \quad \text{--- (20)}$$

α = 흡음 계수 (Absorption Coefficient) [dB/km]

r = 전달 거리 [km]

Fig. 2 - 5에서 보면 흡음계수 α 는 주파수에 따라 다르게 나타남을 알 수 있다. 고주파 영역에서는 주로 流體의 전단점성 및 체적점성으로 부터 발생하는 것으로서 해수의 구성성분과는 관계 없이 물의 구조적 성질로 부터 결정 된다. 중간 주파수 영역에서는 물의 구조적 흡음계수 α_1 과 해수의 성분인 MgSO₄의 화학 작용에서 기인하는 성분 α_2 가 더해진다. 저주파수 대에서는 이에 또다시 해수중에 극히 미소량 존재하는 Boron이라는 화학 성분으로 부터 기인하는 흡음손실 α_3 가 더해 진다. 즉 흡음계수 α 는

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \quad \text{--- (21)}$$

로 계산된다.

그러므로 전달 손실은 발산과 흡음 현상의 합으로 표시하며 식으로 나타내면 식(19)와 식(20)를 더한 값으로

$$TL = 20 \log r + \alpha r \text{ [dB]} \quad \text{--- (22)}$$

α : 흡음 계수, r : 거리

이 얻어진다.

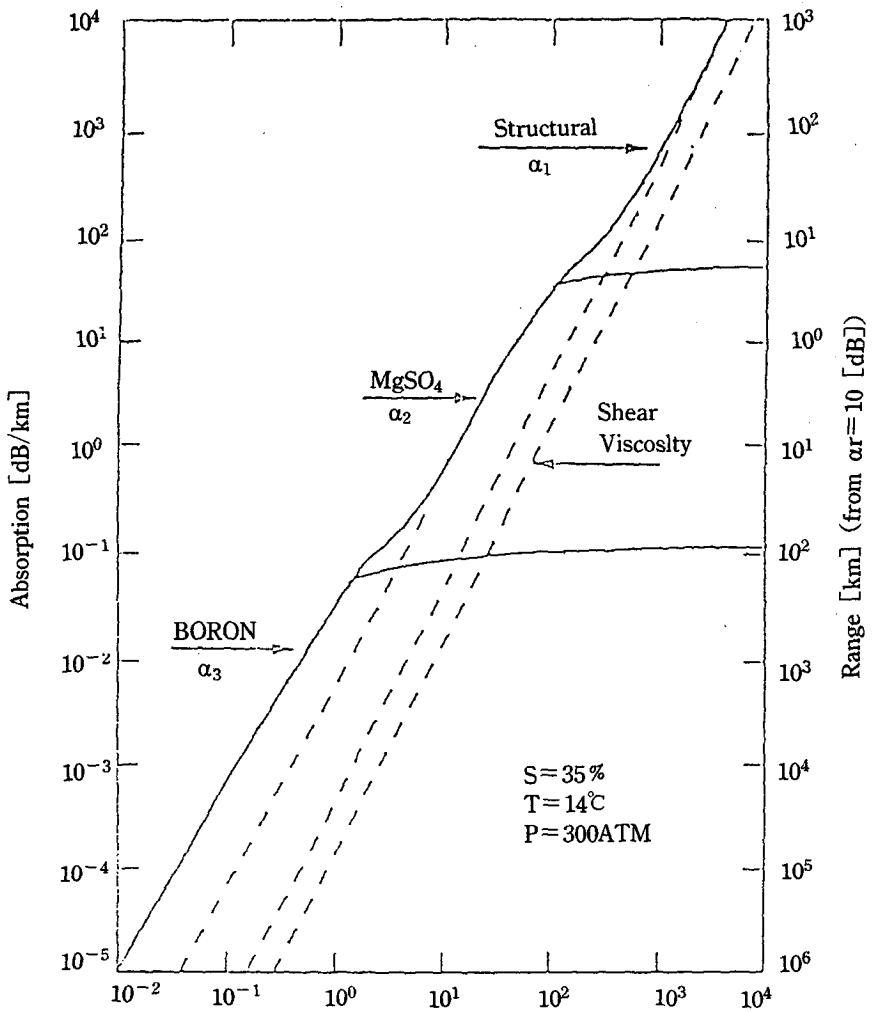


Fig. 2 - 5. Volumetric Absorption

3. 雑音

해양 관측장비에 영향을 미치는 소음은 해양 환경 소음(Ambient Noise ; Fig. 2 - 6), 자체소음(Self Noise), 반향 소음(Reverberant Noise)으로 구분할 수 있다.

해양 환경 소음은 소나시스템 사용자가 관심을 갖고 있는 목표물 이외의 각종 소음원에서 발생하는 소음을 말한다. 자체 소음은 소나시스템을 탑재하고 있는 선박에서 발생하는 소음을 말한다. 반향소음은 능동 소나시스템의 경우 소나 시스템 사용자가 관심을 갖고 있는 목표물 이외의 물체에서 반사되어 소나 시스템에 들어오는 소음을 말한다. 이러한 반향 현상의 발생에 대한 물리적이해도 중요하지만 능동소나 설계시 가장 중요시 고려 되어야 할 사항은 반향 현상이

음향에너지를 거리, Doppler 등의 함수로 어떻게 산란 시키는가를 분석하는 것이다.

일반적으로 잡음의 정의를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$N = N_{is} + 10 \log \Delta F \quad [\text{dB}] \quad \text{-----} \quad (23)$$

N : 전체 잡음, N_{is} : 잡음, ΔF : 주파수 변화폭

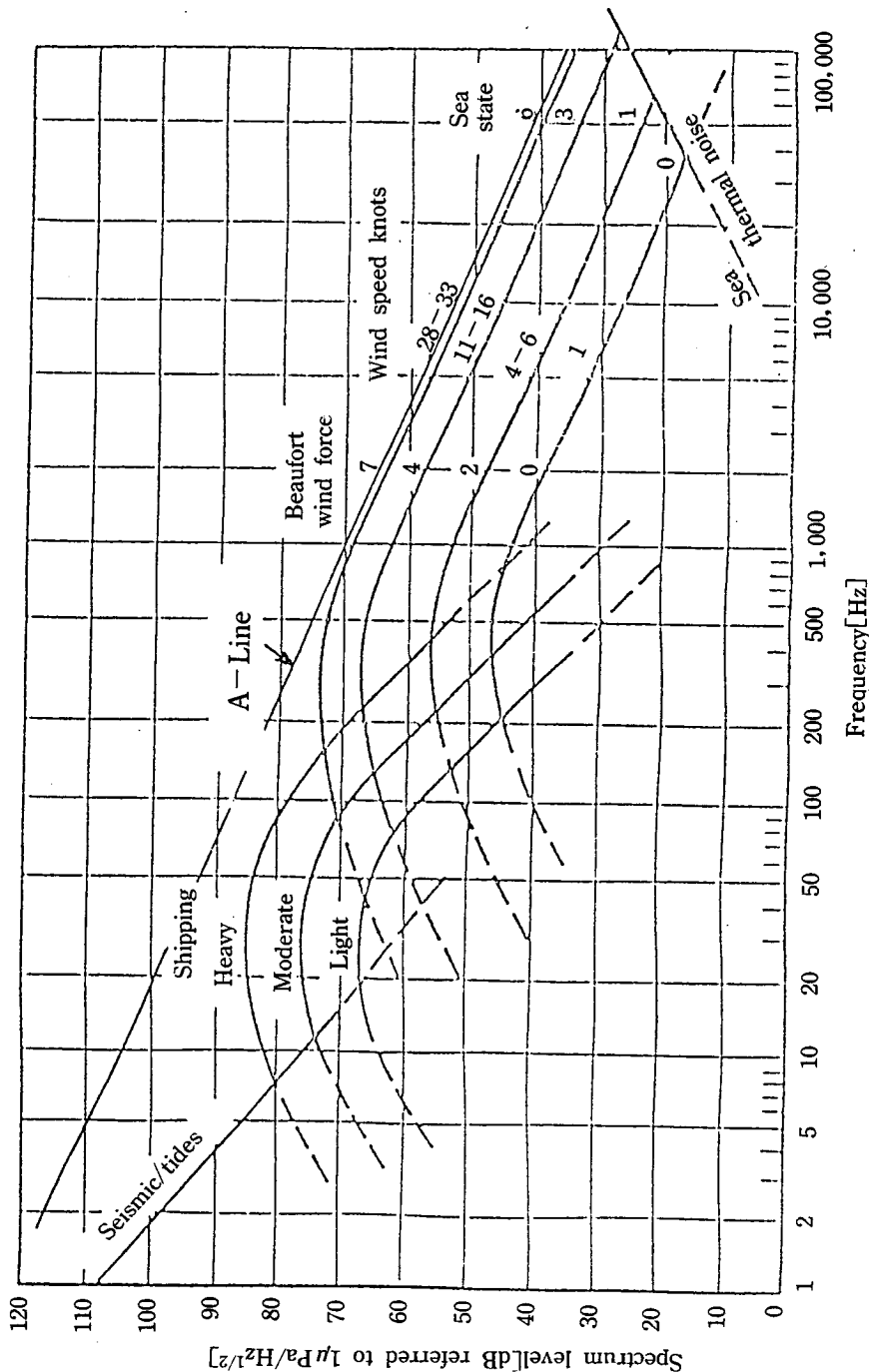


Fig. 2 - 6. Average deep-water ambient-noise spectra

4. 반사손실

1) 海水面

공기와 물의 큰 매질의 밀도 차이로 해수면은 음파를 반사시킬 뿐 만아니라 분산 시킴으로써 반사 손실을 유발하여 매우 높은 반사율을 갖는다. 해수면은 입사된 음향거리를 180° 위상차로 전부 반사시키는 반사계수가 -1 인 경계면이며, 해수표면의 Roughness는 Time dispersion을 일으키며, 파도 운동에 의한 Doppler spreading도 일어 날 수 있다.

반사 손실은 다음과 같이 정의 되는 Rayleith변수 R에 의해 계산 된다. 일반적으로 수면의 반사 손실은 다음식으로 표현 된다.

$$R = 2kH \sin \theta \quad \text{----- (24)}$$

R = 수면의 거칠기를 나타내는 상수, k = 파도의 Wave number

H = 파고의 rms 값, θ = 음파의 입사각

R ≫ 1 인 경우는 수면에서의 음파의 분산이 커져 반사 손실이 커지며

R ≪ 1 인 경우는 잔잔한 수면에 해당한다.

R이 일정할 경우 저주파 음 일수록 바다표면이 잔잔한 것과 같은 효과를 나타내므로 반사 손실이 작아 진다. 이와 같은 수면으로 부터의 반사 손실의 값은

$$TL = 8.7R \quad [\text{dB}] \quad \text{----- (25)}$$

으로 추정한다.

2) 海底面

해저면은 구성성분이 다양하여 음향 특성도 복합적으로 나타나며, 반사 특성은 음향에너지 반사율과 음향에너지의 시간에 따른 퍼짐 정도로 특징 지을 수 있다. 보통은 층을 이루고 있어 밀도와 음속이 매질 깊이에 따라 크게 달라 지므로 소리의 반사 현상이 수면에서 보다 훨씬 더 복잡하고 반사 손실 예측이 그만큼 어려워 진다. 해저면으로 부터의 반사 손실은 해저를 이루는 매질, 음속, 밀도와 주파수에 따라 달라지나 초기의 추정을 위해서는 실측치로 부터 추정된 Fig. 2 - 7의 값을 이용한다.

시간에 따른 퍼짐 현상은 주파수의 함수이다. 고주파수 음파의 경우 일반적으로 왕복 경과 시간 10 [msec]이하의 Time Dispersion이 발생한다.

입사된 음향에너지를 부분적으로 반사되는 반사계수가 0.01에서 0.3(- 40 [dB] ~ - 10 [dB])인 경계면으로 모델링된다. 많은 경우 이러한 모델링 방법이 충분하나, 경계면에서의 반사 현상은 이것보다 복잡하다.

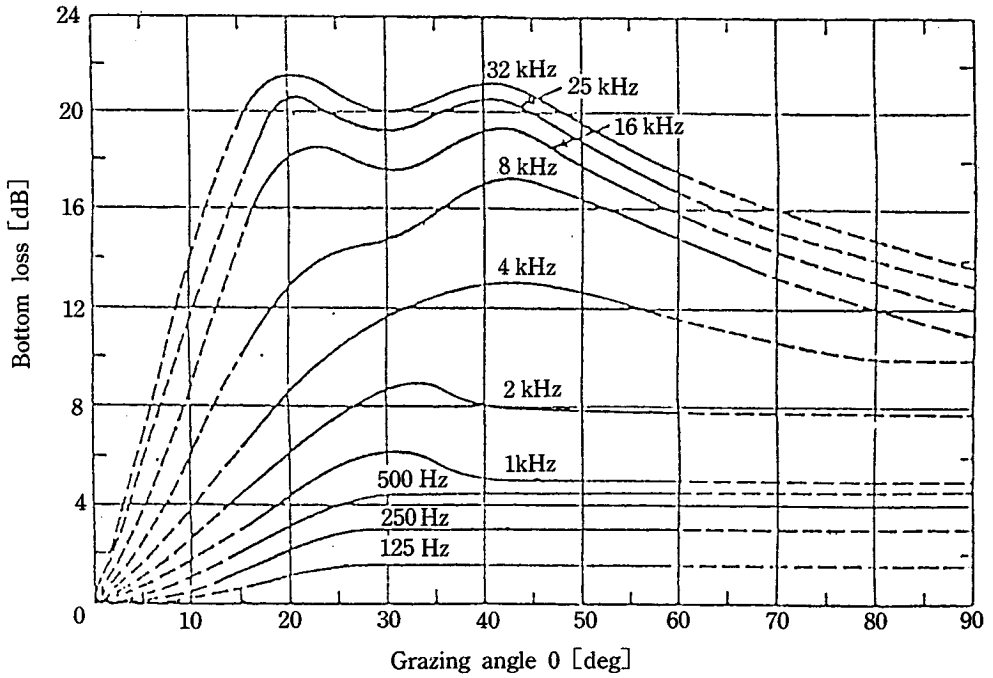


Fig. 2 - 7. Bottom loss versus grazing angle at various frequencies.

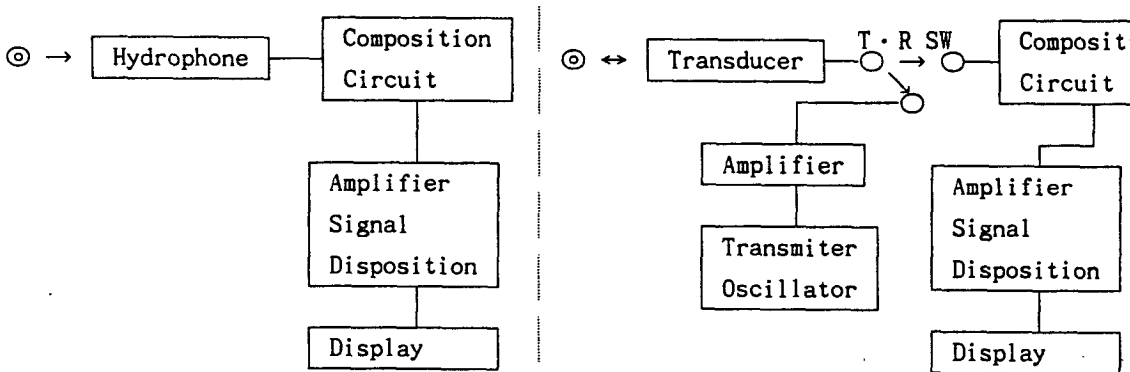
第 3 節 초음파의 응용

가청 주파수대 이상의 주파수를 가진 탄성파를 가지고 액체 혹은 탄성체 속을 전파하는 초음파의 이용은 초음파에 의해 어떤 정보를 얻고자하는 경우의 통신분야 응용과 물질 혹은 물체에 어떤 변화를 주게 하는 동력분야 응용 두가지로 분류할 수 있다. (Appendix A 참조)

1. 통신분야 응용

1) 수중 음향 탐지기 (SONAR)

Sound navigation and ranging의 약칭인 이는 불란서의 Langevin이 실용화의 계기를 만들었다고 보며 Fig. 2 - 8와 같이 두가지 방식으로 나눌 수 있다.



⊙ : Target , → : Sound wave , T · R SW : Transmitter and Receiver Switch

(a) Passive Type

(b) Active Type

Fig. 2 - 8. SONAR type

패시브 방식은 배가내는 원동기나 추진기, 그 외의 수중음을 수신기로 받아, 이에 의해 음원의 방향과 종류를 탐지하는 방법이고 액티브 방식에서는 연속파 또는 펄스파를 수중에 발사하여, 목적물에서 산란되어 돌아오는 음을 수신하고 이 때의 왕복 시간과 물의 음속으로 부터 거리를 그리고 수신 방향으로 부터 목표물의 방향을 각각 탐지하는 방법이다. (최중수, 1986)

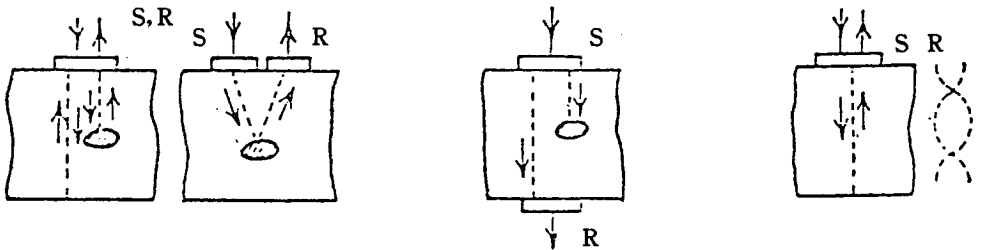
액티브 방식에는 서치라이트 방식과 스캐닝 방식이 있고, 전자는 한 방향

으로의 펄스 발사로써 그 방향만 탐지 할 수 밖에 없기 때문에 전영역을 탐지하기 위해서는 전파속도가 느려 시간이 걸리게 되어 이동 물체의 탐지에는 부적당하다. 후자는 서치라이트 방식의 결점을 메꾸기 위해 무지향성의 음원을 쓰거나 지향성이 있는 다수의 진동자를 원통형으로 배열시켜, 1 회의 발사로 넓은 범위를 탐지하고자 하는 방식이다. 대개의 주파수는 10 ~ 200 [kHz]의 범위이다.

2) 비파괴 검사

압연이나 주조시에 생긴 재료내의 흠이나 그 위치를 재료를 깨지 않고 발견해내거나 물체의 두께를 측정하는데 초음파가 이용되고 있다. 특히 금속 재료에 쓰이는 주파수는 감쇠가 적은 재료에 대해서는 약 0.5 ~ 10 [MHz](수침법에서는 25 [MHz]), 감쇠가 큰 재료에 대해서는 약 20 ~ 100 [kHz] 가 쓰인다.

Fig. 2 - 9와 같은 세가지 방법이 쓰인다.



(S : Projector, R : Receiver)

(a) Pulse reflection method (b) Transmission method (c) Resonance Method

Fig. 2 - 9. Ultrasonic nondestructive check method

펄스 반사법은 초음파 펄스가 재료의 타단 혹은 중간에 있는 흠으로 부터 반사되어 오는 상태를 브라운관으로 관찰하는 방법을 말하며, 투과법은 Fig. 2 - 9 (b)와 같이 피검사체의 한면에 연속 초음파(펄스파를 쓸때도 있음)를 입사시키고, 맞은편의 면끝에 도착하는 음파의 세기로 중간에 있는 흠의 유무를 추정한다. 공진법은 흔히 초음파 두께 계측기로 불리고 있으며, 판 두께나 금속판 접착 검사등에 쓰인다.

3) 액층 및 공기층의 두께 측정

액체 저장 탱크 밑에 송수신용의 진동자를 두고 초음파 펄스를 송신하여, 액체면에서의 반사파를 수신, 그 왕복 시간으로 부터 깊이를 측정한다. 또 송수신용의 진동자를 공중에 설치하는 방식에서는 프라스틱, 펄프용 목재, 시멘트 등 공기와 음향 임피던스의 차가 있는 분말체 재료의 두께 측정에 이용된다.

사용 주파수는 측정거리 0 ~ 50 [m] 까지의 수중용에는 100 [kHz] ~ 1 [MHz], 0 ~ 10 [m], 0 ~ 2 [m] 까지의 공중용에는 각각 20 [kHz], 40 [kHz] 등이 쓰인다.

4) 유속계

Fig. 2 - 10은 유속계의 설명도이다. 흐름의 상류와 하류에 거리 L 만큼 초음파 송수신기를 두고 한쪽에서 음파를 보내고 다른 쪽에서 받도록한다.

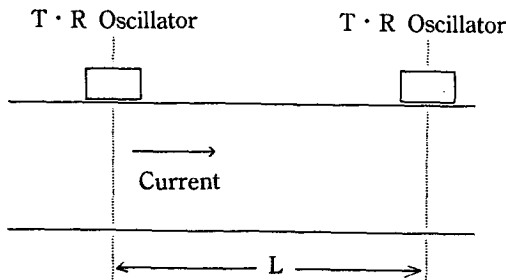
이 때 음의 통과 시간 t는 음속을 c, 유속을 v로 하면, 음의 방향에 따라

$$t = \frac{L}{c \pm v} \quad (c \text{와 } v \text{가 동일방향 일때 } +, \text{ 반대 일때 } -)$$

로 된다. 따라서 음의 방향에 따른 시간차 Δt 는

$$\Delta t = \frac{L}{c - v} - \frac{L}{c + v} = \frac{2Lv}{c^2 - v^2} \approx \frac{2Lv}{c^2} \quad (\text{단, } c \gg v)$$

로 되므로, Δt 를 측정하여 유속을 구할수 있다.



T · R Oscillator : Transmitter and Receiver Oscillator

Fig. 2 - 10. Explane of current meter

2. 동력분야 응용

1) 공동현상과 그 응용

공동 현상이란 액체중에 강력한 초음파를 발생시키게 되면 액체내의 압력이 음의 값이 되는 반주기간에 압력이 극도로 저하하게 되고, 그로인해 그 일부의 액체가 기화하거나, 액체중에 용해되어 있던 기포가 팽창하거나, 혹은 진공에 가까운 상태가 발생하는 등으로하여, 액체 중의 일부에 공동을 일으키는 수가 있는데 이런 현상을 말한다.

공동현상에 의해 발생된 기포가 방사압 및 직진류에 의해 이동되고, 집중성장하여 분리되는것을 이용하여 액체의 탈기(脫氣)를 할 수가 있으며, 유리 용융물(熔融物)로 부터의 기포(氣泡) 제거나 금속 용융물로 부터의 핀홀 제거등에 쓰인다.

2) 분산효과와 그 응용

분산효과란 기체 또는 액체 속에 초음파를 가하여 미립자를 분산 시켜서 유장액(乳狀液: emulsion), 연무질(煙霧質) 등을 만드는 작용을 말한다. 초음파로 분산 시켜서 생겨나는 액은 미립자의 직경이 $0.1 \sim 10 [\mu\text{m}]$ 정도이고, 진성의 콜로이드는 아니며, 방치해 두면 침전되는 부분이 많다. 유장액이 생겨나는 경우에는 기계적 작용외에 용존기체에 의한 산화작용도 중요한 기능을 한다. 금속의 미세한 콜로이드를 만들 경우, 전기 분해중에 음극에 초음파를 가하고 석출할 금속을 그대로 액체 중에 분산 시키는 방법이 쓰이고 있다. 또 용융중의 타의 금속을 분산 시킬 수도 있다.

액체의 표면에 액속으로부터 강한 초음파를 가하면, 액체는 기체 중에 분출되어 분수 상태로 되는데 그 주위에 안개 상태의 연무질을 형성된다. 이 현상은 점성이 높은 액체에서는 생기기 힘들고 안개 입자의 크기는 주파수가 높을수록 작아지며, $1 [\text{MHz}]$ 부근에서 $3 [\mu\text{m}]$ 정도, $5 [\text{MHz}]$ 부근에서 $0.5 [\mu\text{m}]$ 정도로 된다. 또 분산되는 양은 초음파의 출력과 함께 증가한다. 이 방법은 초음파 가습기, 초음파 흡입료법 등에 이용되고 있다.

3) 발열효과의 의학적 응용

묽은 용액 속에서는 공동현상에 의한 파괴작용과 산화작용이 주된 것이었으

나, 생체 조직이나 진한 용액속에서는 공동현상은 생기지 않고, 발열효과와 기계적 작용이 주된 것으로 된다.

생체 조직인 경우, $0 \sim 10^4$ [W/m^2]의 약한 초음파는 세포나 생체에 변화를 주지 않으나 세포간의 물질대사 등의 생리적 작용을 촉진시키고, $10^4 \sim 3 \times 10^4$ [W/m^2] 정도의 초음파는 일부에 병리적인 변화를 일으키게 하나 가역적이며, 이 범위가 의료용으로 널리 쓰이고 있다. $3 \times 10^4 \sim 10^7$ [W/m^2]의 강한 초음파를 가하면 세포나 조직에 불가역적 변화를 일으켜 사멸에 이른다. 초음파 수술 등에는 10^6 [W/m^2] 정도가 쓰이고 있다.

4) 초음파 가공

초음파 가공은 18 ~ 25 [kHz] 정도의 탄성진동에 의해 충격적으로 파쇄가공(破砕加工)을 하는 것으로 절단, 연마, 조각등이 가능하다. 게다가 공구는 회전운동 등을 하지않고 슷돌가루를 적당한 가공액에 섞은 혼합액 공구와 피 가공물과의 사이에 발라서 적당한 이동장치로 공구를 피가공물에 눌러 붙이고, 공구를 상하로 진동시켜 서서히 공구의 형태대로 피가공물내에 움푹패어 들어가서 가공되므로 복잡한 형태인 것도 가공 할 수가 있고, 또 가공 정밀도는 높고 가공 속도 역시 빠르다. 초음파 가공 장치는 자왜 진동자(磁歪振動子)의 송신면과 가공 공구와의 사이를 탄성체 혼(Horn)으로 연결시켜, 전체가 초음파의 주파수에 공진 되게끔 조정된다.

第 3 章 음향센서의 교정 및 측정

第 1 節 음향 센서

1. 音波의 발생 방법

음파의 발생방법에는 여러가지가 있지만 액체에서 사용되는 것만 논하기로 한다. 진동자로서는 Appendix B에 나와 있는 것과 같이 압전 진동자, 그리고 전왜 진동자와 자왜 진동자가 있다. 압전 현상과 전왜 현상은 물리적으로 다르지만 실제로 진동자를 취급하는 방법은 거의 같다. 일반적으로 압전 및 전왜진동자는 400 [kHz] 이상의 높은주파수에서 사용되며 자왜 진동자는 50 [kHz]이하의 낮은 주파수에서 사용하는데 어느것이냐 가격이 상당히 비싸다.

1) 수정 진동자

수정은 절연체로서 손실이 적고 결정이므로 재질의 안정도가 높으며 온도계수가 낮다는 특징을 지니고 있다. 또 파괴 강도가 크므로 이론적으로는 강한 초음파를 출력하지만, 전기적 임피던스가 높기 때문에 강한 초음파를 출력하려면 아주 강한 전압을 인가하여야 하고, 실제로는 연면 방전(수정 진동자의 측면을 통하여 양 전극간에 일어나는 방전)을 억제하기가 곤란하다. 그리고 또하나의 결점은 분극 방향이 일정하므로 원하는 형상되도록 만들 수 없다.

초음파 발생용으로 사용하는 방법은 Fig. 3 - 1과 같이 수정의 3축 가운데서 X축에 수직으로 2개의 평면으로 잘라 낸것을 사용하며 X-cut 또는 Curie-cut이라고 한다. 이 양 평면에 전극을 구워 붙이거나 또는 증착하여 양 전극간에 고주파 전압을 가하여 그 두께 방향으로 고주파 진동을 일으킨다.

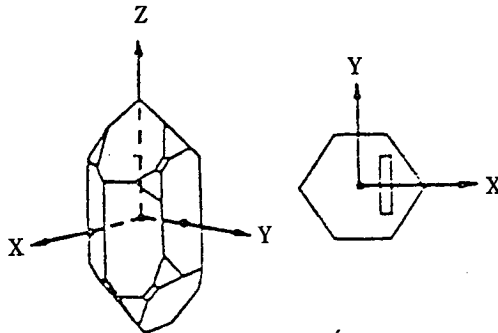


Fig. 3 - 1. X-cut from crystallization of crystal

이 경우, 수정 두께방향의 자유 진동 주파수에 공진 시켜야 진동을 한다. 그러므로 수정의 두께가 정해지면 따라서 발생하는 초음파가 정해지며 그 두께와 주파수 간의 적(積)을 항상 일정하게(2,870 [kHz · mm]) 유지한다.

15 [MHz], 즉 두께 0.191 [mm]보다 높은 주파수에서는 두께가 얇아 깨져 버리므로 그 때는 위의 주파수 상수로 계산되는 주파수의 홀수배 주파수 (45 [MHz], 75 [MHz]) 에서도 동작한다. 그러나 배수가 높아 짐에 따라 진동은 약해진다.

수정을 수파기(마이크로폰)로 사용하려면 송파기로 사용하는 것과 같은 형의 것을 초음파가 진행하는 방향으로 직각으로 두면 그 양 전극간에 고주파 전압이 발생된다. 이 경우도 물론 수파 할 수 있는 초음파의 주파수는 송신할 때에 발생하는 초음파의 주파수와 마찬가지로이다. 또 주파수가 높아지면 지향성이 예민해지므로 수정판의 수파면을 음파가 오는 방향으로 정확하게 직각으로 향하지 않으면 감도가 현저히 떨어지고 만다

X-cut 수정판을 이와같이 초음파의 송수파기로 사용 할 수 있는 것은 수정이 압전효과 또는 피에조 효과라고 하는 성질을 지니고 있기 때문이다. 압전 효과란 판의 양면에 압력을 가하면 그 양면에 각각 + 및 - 의 전하가 나타나고 양면에 장력을 가하면 앞서와 반대의 전하가 나타나는 현상으로 이것을 압전 효과라고 하는데 수정판을 수파기로 사용 할 때에 이용하는 효과이다. 유산 리튬, 니오브산납 전기석, ADP, 로셀염 등이 있다.

수정판을 송파기로 사용 할 때는 판의 양면에 직류 전압을 가하면 판이 압축 또는 팽창하는 현상을 이용한 압전 역효과를 이용한다.

2) 고분자 압전막

폴리불화 비닐리덴(PVDF 또는 PVF₂라고 한다)이 압전성을 가진 고분자 재료로서 주목되고 있는데, 초음파의 송수파기로 사용 할 수 있게 되었다.

이것의 두께는 수 마이크론 내지 수십 마이크론의 박막으로 그 양면에 전극을 용착하고 고주파 전압을 가하면 X-cut 수정 등도 마찬가지로 두께 방향으로 신축한다.

이것의 특징은 박막이 원하는 형으로 할 수 있다. 고유 음향 임피던스가 물에 가깝기 때문에 수중이나 생체중에 초음파를 방사 할 때에 경계면에서의 방사가 적고, PVDF속에서 발생한 초음파 에너지가 좋은 효율로 방사 된다. 그러므로 Q가 낮아져서 댐퍼 등을 붙이지 않아도 짧은 펄스가 출력 된다.

PVDF보다 특성이 우수한 3 불화 에틸렌(TrFE)등과의 공중 합체나 시안화

비닐리덴(VDCN)과 초산 비닐(VAc)과의 공중 합체 등도 만들어지고 있다. 또 PVDF나 고무의 시트에 PZT를 혼합한 압전성 고분자 복합재료라고 하는 것이 있다. 이것을 케이블 모양으로 한 것은 전자 악기의 센서나 수증음향 센서로 사용되고 있다.

3) 티탄산 바륨계 자기 진동자

티탄산 바륨은 산화 티탄(TiO_2)과 탄산바륨(BaO_3)의 분말을 적당한 형에 넣어 압축 성형하여 $1300[^\circ C]$ 이상의 산화 분위기에서 소성 한 것이다. 이것은 전극을 구워 붙여 양 전극간에 두께 1 [cm] 당 20 ~ 100 [kV]의 직류 전압을 서서히 가하여 분극하면 전압을 제거한 후에도 잔류 분극이 남아 왜 현상이 나타나게 된다. 분극을 형성한 후는 취급상 수정과 같은 압전 물질로 다룰 수 있지만, 성질은 오히려 자석에 가깝다고 할 수 있는 것이다.

티탄산 바륨은 강유전체로 유전율이 수정의 400배나 크므로 전기 용량이 대단히 커지고 전기적 임피던스가 대단히 작아진다. 그 때문에 양극간에 가하는 고주파 전압은 약간 낮아도 되므로 취급이 용이하다.

티탄산 바륨계 자기는 유전체 손실이 커서 강력한 초음파를 발생시키는 경우에는 열이 많이 발생하므로 냉각에 대해서는 충분히 주의 할 필요가 있다.

지르콘 디탄산염 (PZT)은 온도에 대한 변화가 없으며, 두께 종진동으로 사용할 경우 주파수 상수는 약 2,000 [kHz/mm]이므로 동일 주파수 진동자에서는 수정보다 30[%]정도 얇아진다.

티탄산 바륨계 자기 진동자로 직접 횡파를 발생시키는 경우에는 고주파 전압을 가하는 방향으로 수직 방향에 분극한 횡파용 진동자를 사용하면 Y-cut의 수정 진동자와 마찬가지로 사용할 수 있다.

4) 볼트 죄임 랑지방(Langevin) 진동자

수정 또는 티탄산 바륨계 자기로 수십 [kHz]의 낮은 공진 주파수를 가진 진동자를 만들려면 2 개의 금속 블록 사이에 압전 또는 전왜 진동자를 끼우고 전체적으로 수십 [kHz]의 공진 주파수가 되도록 한 진동자가 사용 된다. 처음에는 접착제를 사용하다가 최근에 볼트를 사용하여 죄임으로서 페라이트 진동자 이상의 성능을 가질 수 있게 되었다. 기계적인 Q (Quality factor)가 높고 고온에서 사용할 수 있는 이점이 있는 반면에 상당히 가격이 비싸고 임피던스가 높기 때문에 가하는 전압도 높아지는 것이 결점이다. Fig. 3 - 2는 대표적인 두 종류의

진동자 예이다.

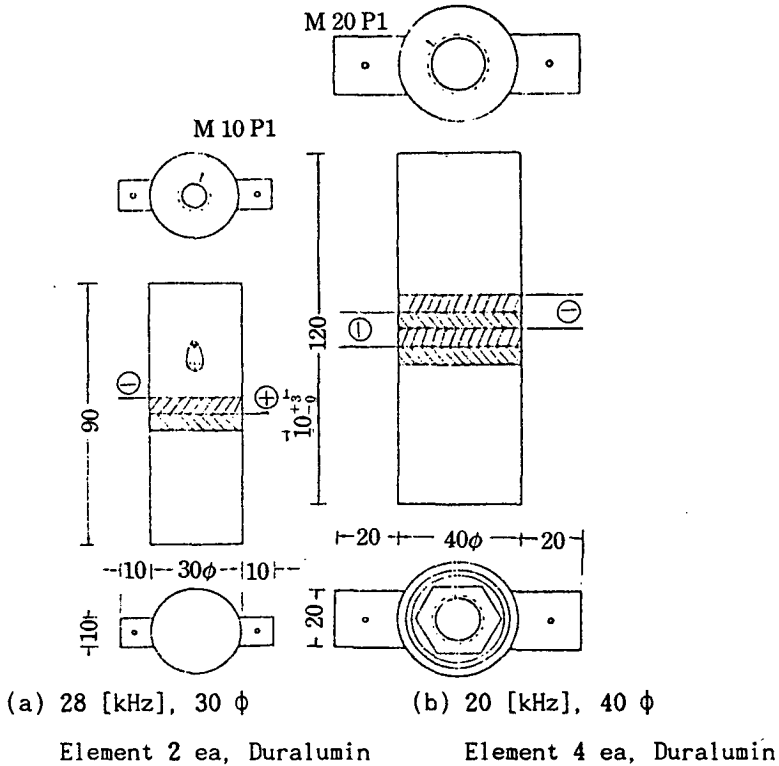
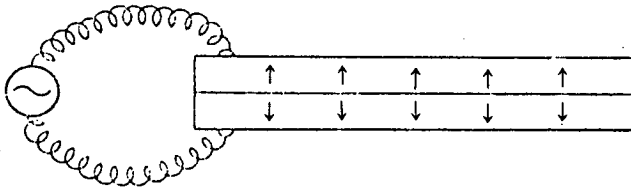


Fig. 3 - 2. Example of bolt fasten Langevin vibrator

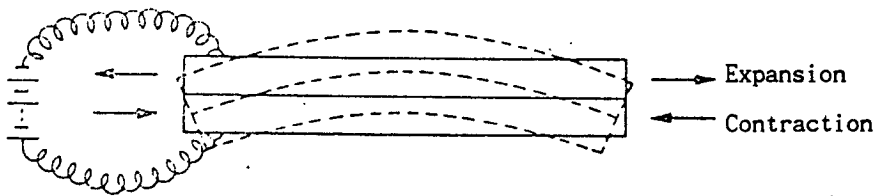
5) 바이모르프형 진동자

바이모르프형 진동자는 Fig. 3 - 3과 같이 2매의 PZT 진동자를 분극방향을 반대로 해서 접합 시킨 것으로 이 양면에 교류전압을 가하면 한쪽판은 횡방향으로 늘어나고 다른쪽 판은 횡방향으로 줄어들므로 전체적으로는 휘어서 진동하게 된다. 이 원리는 전기 난방기구의 온도 조절기에 사용되는 바이메탈과 비슷하다.

판이 장방형이면 그 지지 방법에 따라 부채형(일단고정) 또는 다리형(양단고정)의 진동을 하고, 판이 원판이면 왜곡 진동을 하게 된다. 이와같은 진동의 공진 주파수를 사용하면 수십 [kHz]이하의 송수파에 알맞는 구조로 된다. 단 이 경우에는 진동면이 같은 진동을 하지 않고 중심부가 크게 진동하므로 그 종방향(원판의 경우는 반경방향) 진동의 공진 주파수를 이용하는 방법도 있다. 이 방법으로도 수십 [kHz]의 공진 주파수가 얻어 지지만 (예를 들면 직경 5 [cm]의 PZT로 약 50 [kHz]) 진동은 바이모르프형보다 작고, 임피던스도 낮기 때문에 수중 방사용으로 사용된다.



(a) Structure ($\uparrow \downarrow$: Polarization direction)



(b) Form of transformation

(Line : Before transformation, Dotted line : After transformation)

Fig. 3 - 3. Bimorph diaphragm

6) 금속 자왜 진동자

자왜 진동자는 일반적으로 100[kHz] 이하, 특히 30 [kHz] 이하의 주파수로 사용되며 전기적 입력 임피던스가 낮고 계다가 코일의 권수에 따라 자유로이 임피던스를 바꿀수 있는 이점을 지니고 있다. 또 권수는 하나의 비닐선으로 감아 두면 전기적으로 외부와 절연할 수 있고 그대로 도전성의 액체 중에 불일수 있는 편리함도 있다. 자왜 진동자도 그 기계적 공진 주파수로 사용하는데 직류자장은 전기기계 결합계수가 최대로 되는점, 즉 전기적 파워가 가장 좋은 능률로 기계적 파워로 변환되는 점에 자장의 동작점 중심이 되도록 바이어스를 가하는 것인데, 이 직류 자장을 부여하지 않으면 진동을 하지 않으므로 주의가 필요하다.

금속 자왜진동자는 와전류 손실때문에 효율은 그다지 좋지 않으나(20 [kHz] 부근의 수중 진동자로 60~70 [%], 단단하여 거의 파괴될 염려가 없으며, 또 금속제 혼을 은이나 납으로 직접 접촉할 수 있으므로 공업적으로는 아직 일부에서 사용되고 있다.

7) 페라이트 진동자

여러가지가 있지만 그 중에서 자왜 진동자로 이용되고 있는 것은 M으로(Fe, Ni 등을 표시) 니켈 N, 동 Cu를 사용한 Ni-Cu계 페라이트라고 하는 것으로서 이외에 소량의 코발트 Co를 넣으면 특성이 좋아진다.

페라이트는 대단히 높은 절연저항을 가지고 있으므로 아주 높은 주파수에서 거의 와전류 손실이 없어 대단히 양호한 능률을 나타낸다. 수중 방사의 경우에 95 % 이상의 전기 음향 변환 능률을 쉽게 얻을 수 있다.

페라이트 진동자의 특징은 손실이 적으며 직류 여자용 자장(바이어스)을 영구 자석으로 부여 할 수 있다는 것이다. 영구자석으로 바름 페라이트를 사용하면 수 [mm]의 두께로 충분한 편이 자화가 주어져서 직류전원이 불필요하다.

결점으로는 견고하지 않아 떨어뜨리거나 사용을 잘 못하면 손상되어 사용 할 수 없게 된다. 그러나 최근에는 재질이 상당히 좋아졌기 때문에 수중 방사의 경우에 방사면 1 [cm²]당 초음파 출력으로 10 [W]는 충분히 취할 수 있고 다소의 위험을 무릅쓰는다면 20 [W]정도까지 얻을 수 있도록 되어 있다.

2. 용도의 결정

음파를 발생 시키는 방법에는 여러가지가 있지만 고려 해야할 매우 중요한 일 6 가지가 있는데 간단히 언급해 보면 다음과 같다.

A. 초음파를 신호로 이용할 것인가, 에너지로 이용 할 것인가

통신분야 응용에서는 신호를 기타 신호나 잡음을 구별하여 수파 할 수 있는 정도의 강도가 있으면 되고 캐비테이션은 이 응용에 따라서는 유해하므로 그것이 일어나지 않는 범위의 강도로 할 필요가 있다. 이 경우에는 일반적으로 정해진 방향으로 초음파를 내고, 정해진 방향으로 부터 오는 초음파만 유효하므로 지향성이 예민한 것으로 요구된다. 일반적으로 주파수가 높고 음의 강도가 작은 것이 사용된다. 그러나 주파수가 높아지면 초음파의 감쇄도 커지므로 원거리 까지 신호를 보내려는 경우에는 주파수를 낮추어야한다. 그러나 또 주파수를 낮추면 파장이 길어지고 지향성이 악화되므로 진동자의 방사면적을 크게 해야하며 음향 총 출력도 증가해야 한다.

동력분야 응용에서는 일반적으로 음의 강도가 액체속에서 캐비테이션을

일으키기 쉽도록 주파수가 낮은 초음파가 널리 이용된다. 사용되는 주파수는 15 ~ 40 [kHz] (특히 28 [kHz])와 300 ~ 500 [kHz]이다.

B. 펄스파로 내는가 연속파로 내는가

초음파를 신호로 사용하는 경우에는 정재파가 되는 것을 방지하거나 반사파를 분리하기 위하여 펄스파를 사용하는 경우가 많이 있다. 펄스폭은 짧은 편이 분리하기 쉽지만, 단펄스는 그 속에 넓은 범위의 주파수 성분을 포함하고 있으므로 진동자나 회로의 Q를 낮추지 않으면 안된다. 한편, Q를 낮추면 감도는 나빠지므로 그 조정이 어렵다.

강력 초음파의 경우에는 원칙적으로 연속파를 사용하지만, 초음파의 교반 작용을 이용할 때에는 정재파가 되는 것을 방지하거나 흐름이 정상적으로 되는 것을 피하기 위해, 단속파나 50 [Hz]의 변조파를 사용하는 방법이 좋다.

C. 주파수를 어느정도로 하느냐

우리는 앞에서 논의된 전달 손실, 잡음, 반사 등 해양 환경 요소와 주파수 관계를 알 수 있었다. 일반적으로 해중에서의 주파수 사용은 Fig. 3 - 4와 같이 나누어서 사용하고 있으며 고려할 사항으로는 장비 측면에서 보면 가격, 시스템의 크기, 정밀도, 통신거리 등이 있으며, 해수의 자연현상에 의한 전달에너지 손실은 감쇄와 흡수로 나누어지며 감쇄에는 해수의 여파기(Filter) 기능과 해수의 발산, 반사, 산란이 있고, 흡수에는 점성과 열전도, 이완 작용 등이 있다.

높은 주파수를 사용할 수록 장비의 정밀도 및 분해력은 좋아지나, 수중 통신 거리는 짧아지는 단점이 있다. 일반적으로 주파수가 높아지면 정밀도는 주파수에 비례하여 좋아지나 어느 주파수 이상되면 전달 손실이 커지며 이를 보상하기 위한 출력의 증가 및 또 다른 기술의 필요로 가격의 상승은 물론 여러가지 어려운점이 뒤 따르게 된다. 이에 따라 해양의 특성을 고려한 주파수 선택이 요구된다.

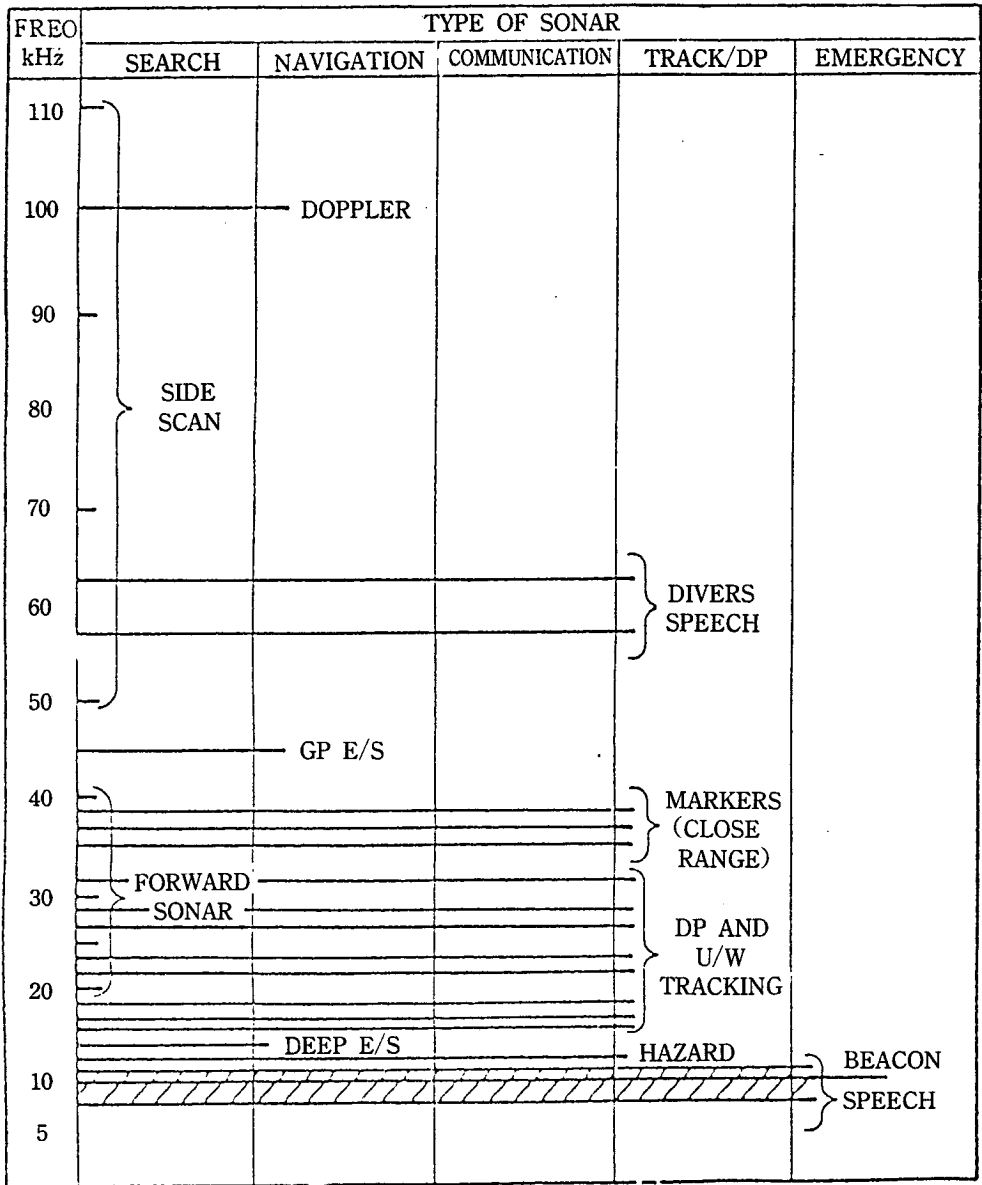


Fig. 3 - 4. Recommended frequency distribution

D. 진동자의 선택

주파수가 선택 되면 진동자는 음향의 발생 방법에서 논의 된 것과 Appendix B 초음파의 발생 방법중에서 용도에 맞는 진동자의 선택이 요구된다.

E. 자려 발진기 인가, 주 발진 전력 증폭기 인가

이것은 가장 중요한 문제로 자려 발진기(self oscillator)인가 아닌가 하는 것인데 자려 발진기란 출력관 또는 파워 트랜지스터로 발진 시켜 그대로 출력 변압기를 거쳐 진동자를 구동하는 것으로 진공관이나 석수도 적고 회로도 간단하며 저 가격인데, 진동자를 좋은 능률로 구동하기 위해 발진 주파수를 진동자의 공진 주파수 부근으로 하면 급히 발진 주파수 및 전력이 비약하여 안정한 발진을 할 수 없는 경우가 생긴다. 이것을 인입현상이라하며 부하가 되는 진동자가 공진특성을 갖고 있기 때문에 일어나는 현상이다.

주발진 전력 증폭기(master oscillator power amplifier)란 발진부와 출력부가 분리되어 있고, 발진기는 비교적 작은 진공관 또는 트랜지스터로 하지 않고 그 출력을 전압증폭 및 전력증폭하는 것이다. 이것은 부하의 상태가 발진부에까지 영향을 주지 않으므로 발진이 안정하여 인입 현상도 일어나지 않는다.

F. 출력을 어느정도로 하는가

대기속에서 장기간 둔 후 물속에서 수백 [kHz]이하의 주파수를 가진 음파를 낸 경우, 1 [m²] 당 3.5 [kW] 이상의 강도가 되면 캐비테이션은 발생한다. 또한 초음파의 설계적 응용 등에서 캐비테이션 발생에 의존 할 때에는 이 이하의 출력이 되어야 하지만 (단, 짧은 펄스나 탈기수를 사용한 경우는 제외) 반대로 캐비테이션을 이용하는 동력적 응용의 경우에는 이 이상의 출력으로 하여야 한다.

한편, PZT 또는 페라이트 진동자의 기계적 강도면에서 보면 수증에의 단면 방사로 충분한 초음파가 나오고 있는 경우, 진동자에의 고주파 전기 입력은 100 [kW/m²] 정도까지는 충분히 들어 간다. 니켈 진동자의 경우는 그 자기적 성질에서 보면 대체적으로 200 [kW/m²] 이 한도이다. 단, 니켈 진동자는 손실이 크므로 손실이 크므로 충분히 냉각해야 하며, 페라이트 진동자는 Q가 높으므로 경부하가 되도록 주의 해야 한다.

3. 트랜지스터에 의한 발진

발진기의 발진 방식은 그 사용 목적에 따라 크게 나누면 Table 3 - 1과 같이 생각 할 수 있다. 현재는 거의 전부가 진공관 발진기 또는 트랜지스터 발진기와 진동자의 조합으로 되어 있다.

Table 3 - 1. Typical of ultrasonic oscillation type

종 류	매체	대표적 응용예	발진 방식
동력적 응용	액체중	세정, 분산, 화학반응	자동식, MOPA식 (진동귀환방식)
	공기중	가공기 용접기	진동귀환방식 속도제어부 진동귀환방식
통신적 응용	액체중	어군탐지, 측심, 유속계	MOPA방식 (펄스, 연속파)
	공기중	속도계, 물체검출	진동귀환방식 속도제어부 진동귀환방식

통신적 응용의 발진기는 액체에서 부하시의 진동자 임피던스의 변화가 비교적 작지만, 그 특성상 음파의 전달 속도가 문제시되므로 발진 주파수의 안정성이 요구된다. 따라서 발진부에는 수정 진동자를 이용한 MOPA 방식의 발진회로가 널리 사용되고 있다. 또 어떤 범위에 지향성을 가지고 순간적으로 파워를 내는 용도가 많기 때문에 펄스 구동 동작에 의한 발진회로가 널리 사용되고 있다.

1) 자려 발진기

Fig. 3 - 5는 20 [kHz], 150 [W]의 자려식 발진회로이다. 발진 주파수는 C2, C3, C4, L1에 따라 변하므로 그 만큼 번거로워진다.

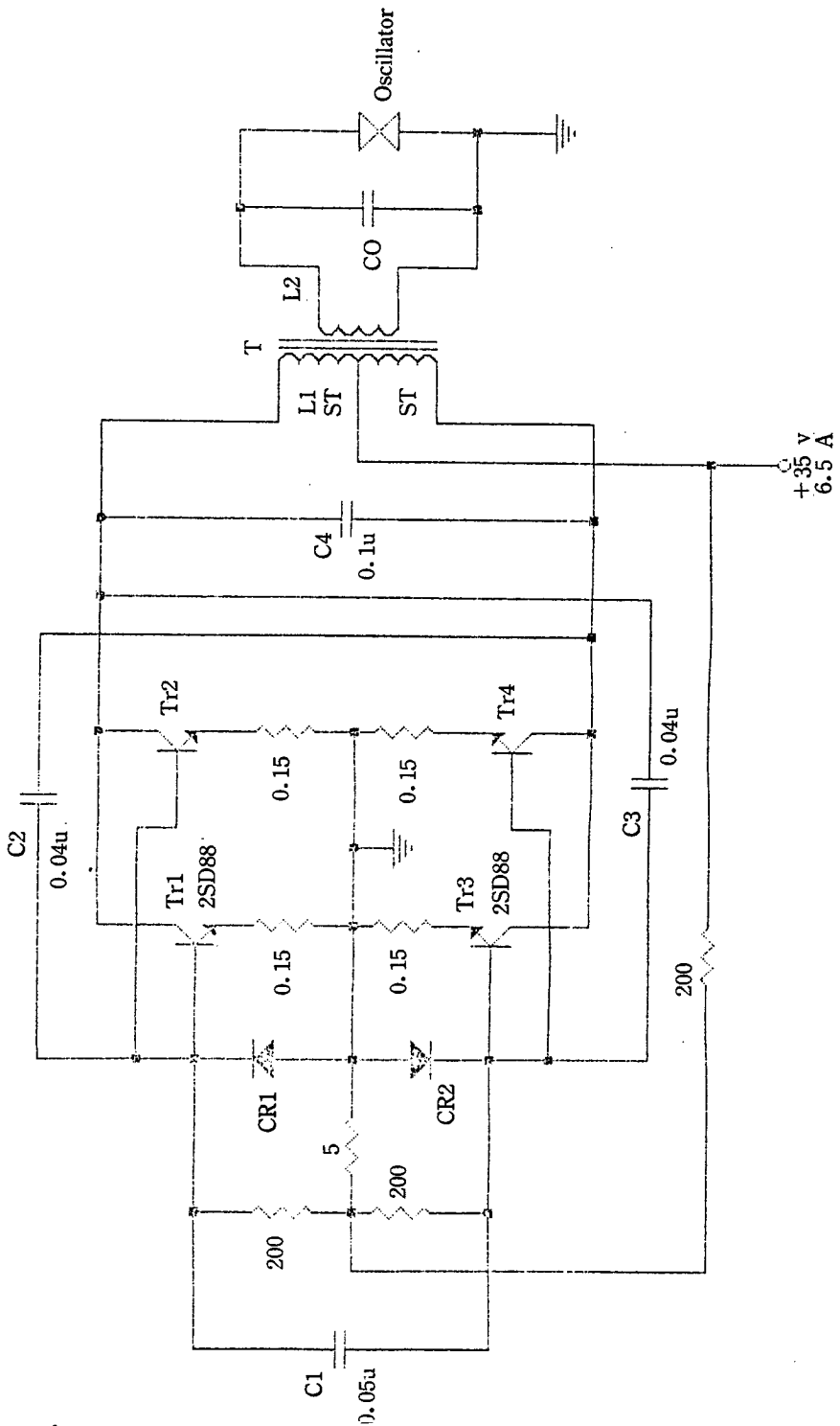


Fig. 3 - 5. 20 [kHz] 150 [W] Ultrasonic oscillation circuit

다이오드의 CR1, CR2는 트랜지스터의 베이스 이미터간 역내압 V_{BE0} 가 작으므로 (6 ~ 8 [V] 정도), 이 사이에 가해지는 역전압 흡수용으로 넣고 있다. C0는 진동자의 리액턴스분을 상쇄하기 위한 역률 개선용 콘덴서이다(전왜 진동자의 경우는 불필요). 출력 트랜스 T는 페라이트 코어 EI형 120에 리츠선 50/0.18 2중명 주권선을 1 차측에 5T - 0 - 5T, 2차측은 진동자 임피던스에 맞추어 권선을 정하지만, 페라이트 II형 진동자(양각에 25T씩 권선)이면 수중 부하에서 20 ~ 30T 정도의 권수가 된다. 그리고 2 차측 코일에 미리 탭을 넣어 두고 탭을 바꾸어 진동자에 파워가 가장 많이 들어가는 탭위치로 조정한다.

진동자 입력 파워의 측정은 고주파 전력계를 갖고 있으면 직접 측정 할 수 있고 아니면 고주파 전력계와 진공관 전압계로 진동자에 흐르는 전류와 진동자 단자 전압을 측정하여 오실로스코프 전압, 전류의 위상(리서주를 그려서)을 측정하여 이들의 적으로부터 진동자 파워를 알 수 있다.

2) MOPA형 발진기

MOPA형 발진회로에는 마스터 오실레이터가 필요하다. Fig. 3 - 6는 MOPA방식에 의한 8 [kHz], 300 [W]의 B급 초음파 발진회로이다. 발진단은 2SC756에 의한 콜피츠 발진회로로, 발진 주파수는 발진코일(페라이트, 봉입 보핀 8 ϕ X 30 [mm]에 0.3 ϕ DSC선 250T 권수) 속의 코어의 위치를 변화시켜 L을 가변하여 조정한다.

구동단은 2SD88을 A급 동작시켜 트랜스 결합에 의해 전력단에 임피던스 정합을 하고 있다. 결합코일 T1은 20 ϕ 베이크보빈에 1차 80T (0.4 ϕ DSC), 2차 10T - 0 - 10T (0.6 ϕ DSC)권선한 것이다.

전력단의 베이스, 어스간의 다이오드 SD1, SD2는 베이스 이미터간의 역전압 흡수용으로 넣고 있다. 컬렉터간에 들어 있는 1[μ F]의 콘덴서는 서지 흡수용, 진동자에 병렬로 들어있는 콘덴서 C0는 자왜 진동자의 경우로 리액턴스분을 상쇄하여 진동자의 역률 계산을 위해 넣고 있다.전왜 진동자의 경우는 제동 리액턴스분이 작으므로 진동자의 역률 개선은 거의 생각할 필요가 없다

출력트랜스 T2는 페라이트 코어(EI-120) 2개의 1 차 4T - 0 - 4T(50/0.18 리츠선)로 감고 있다. 진동자 입력 파워의 조정은 발진단과 구동단 간에 넣고 있는 1 [k Ω]의 가변 저항을 조정하고 구동단의 베이스 입력을 가감하여 행한다.

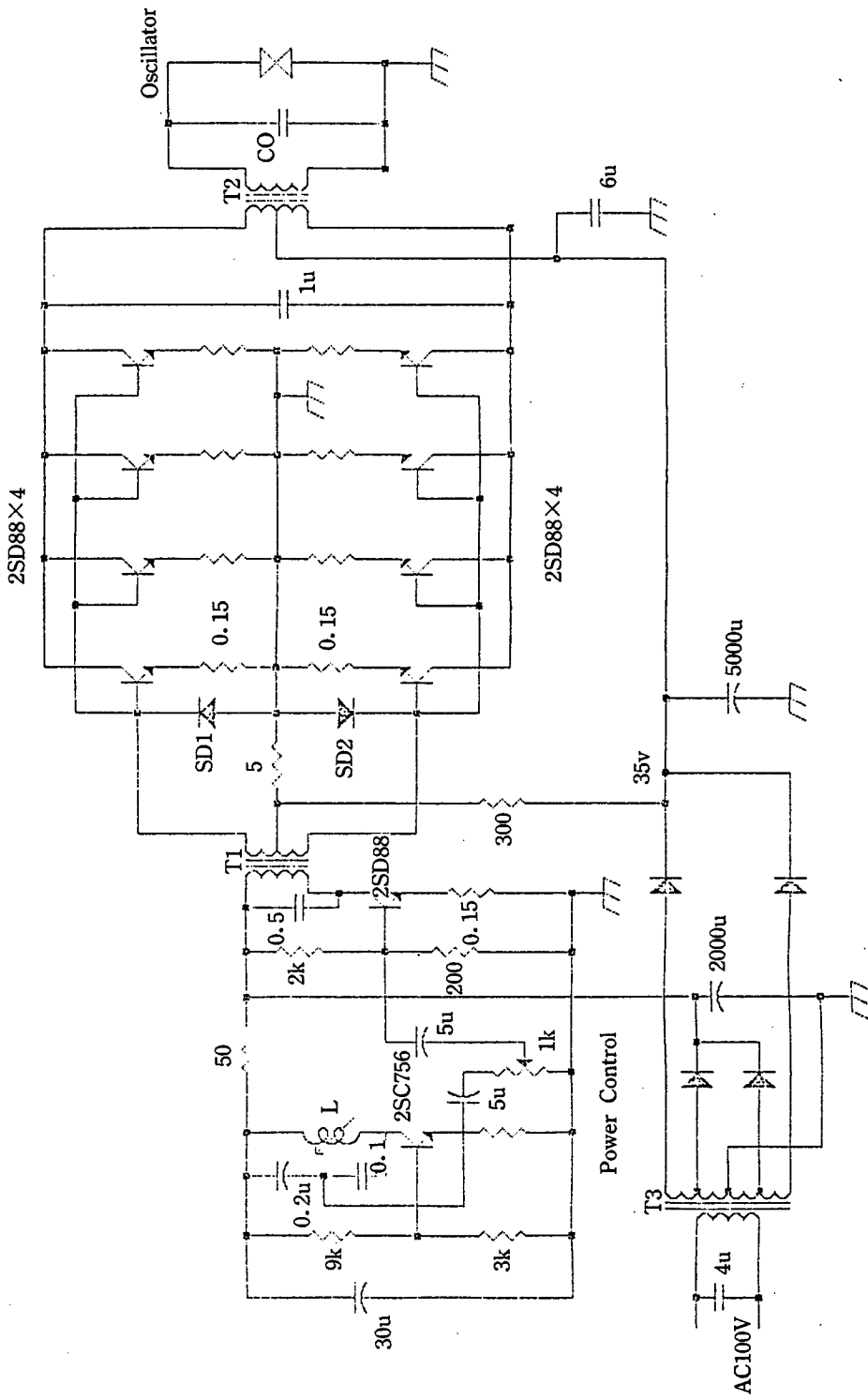


Fig. 3 - 6. 28 [kHz] 300 [W] MOPA Type oscillation circuit

3) 진동 귀환형 발진기

진동 귀환 방식은 진동자의 기계적 공진 강도에 비례한 전압을 꺼내어 증폭기 입력단에 귀환해 주면 진동자의 기계적 공진 주파수에 추종하여 발진시킬 수 있다. 이 진동자의 기계진동을 전기적으로 검출하는 방법으로 전왜소자 접촉법, 검출 코일에 의한 방법, 브리지 회로법, 차동 트랜스법 등이 있다.

Fig. 3 - 7은 20[kHz], 170[W]의 진동 귀환형 발진회로이다. 귀환 입력은 PZT 사각판 소자로 검출하여 증폭기 입력에 가하고 있다. 귀환 전압은 진동자에 가하는 부하의 변동에 따라 항상 증감하여 변동하고 있으므로 그대로 입력단에 가한 것에서는 진동자의 입력 파워도 항상 변동하게 된다. 이 변동을 억제하기 위해 입력단에 들어있는 PD5A의 제너 다이오드에 의해 귀환 입력 전압의 상한을 억제하고 또 TR3의 트랜지스터 다음에 있는 제너 다이오드에 의해 TR4의 입력이 귀환 입력 변동에 관계없이 일정하게 되도록 리미터로서의 역할을 하고 있다.

TR4의 출력회로는 진동자의 기계 진동수에 동조하는 LC동조회로로 되어 있으므로 리미터에 걸린 구형파에 가까운 전압은 이 단에서 사인파의 일정폭으로 증폭된다. 그리고 다음단의 구동단에서 다시 증폭되고, 최종단에서 전력 증폭, 출력 트랜지스터 T3를 통하여 진동자에 가해진다.

가변저항 VR1은 위상 조정용이다. 진동자의 공진 주파수에 있어서는 여진 전압과 귀환 검출 전압간의 위상차는 0으로 된다. 그러나 증폭계는 위상차를 가지고 있으므로 이 위상차를 증폭계의 어느곳에서 보정하지 않으면 정상으로 동작 할 수 없게 된다. VR1과 콘덴서 C의 조합으로 이 위상차를 보상하고 있다. 따라서 VR1을 조정하여 진동자가 가장 잘 진동하도록한다.

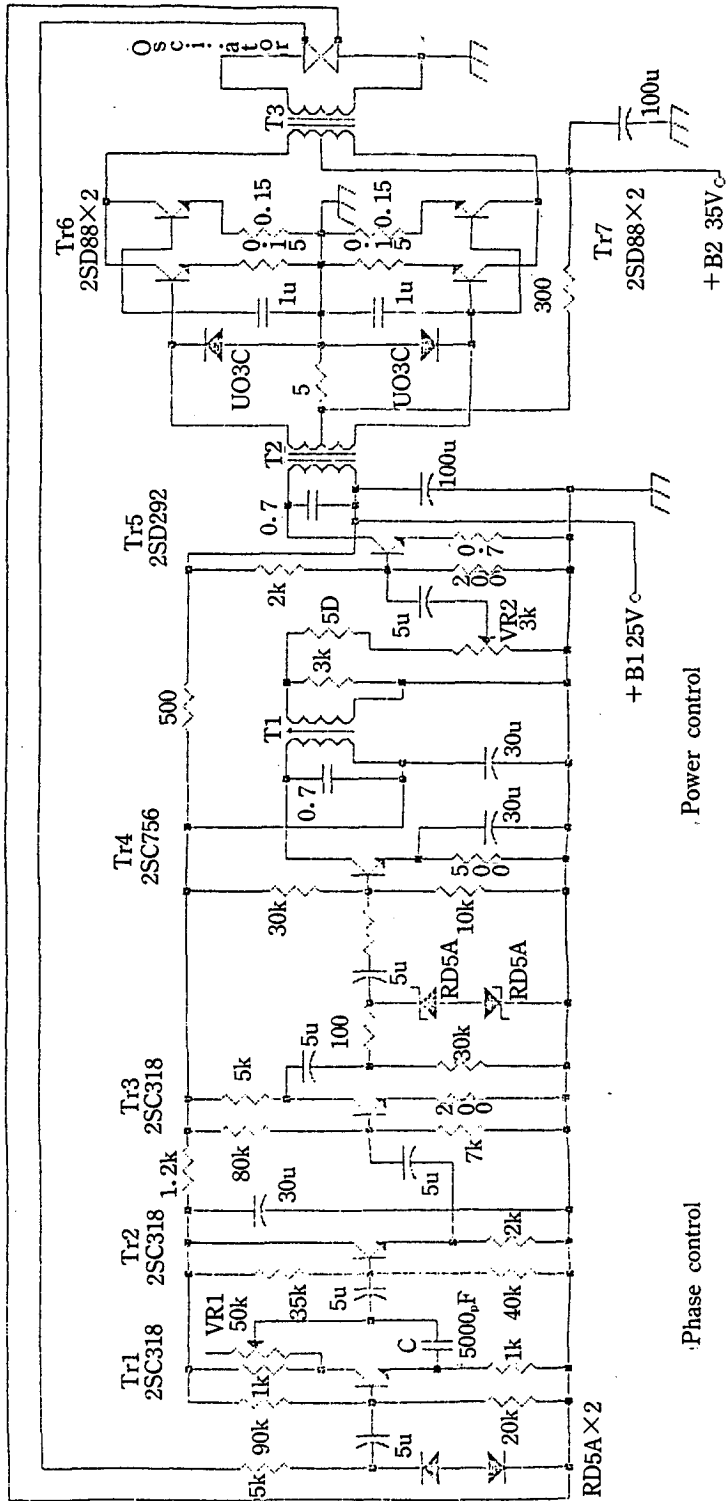


Fig. 3 - 7. 20[kHz] 170 [W] vibration feedback oscillation circuit

4. 광대역 변환기

일반적인 가청음파와 마찬가지로 정전형(Electrostatic), 동전형(Electro-dynamic), 자기형(Magnetic)등이 쓰여질 수 있으나, 보통 자왜형(Magnetostrictive)과 압전형(Piezoelectric)이 주로 쓰여 왔으나 경제성과 효율성의 이유로 압전형 변환기가 사용되고 있다.

압전형 변환기에 사용되는 압전물질은 수정과 같은 천연결정, PZT와 같은 압전 세라믹, PVDF와 같은 압전 폴리머의 3가지로 분류 할 수 있으며 세라믹과 폴리머의 기계적 성질을 상호 보완하기 위해 복합 물질도 출현하였다.

가장 간단한 광대역 변환기의 구조는 Fig. 3 - 8이며 크게 4 부분으로 구성되어 있다. 즉 압전물질의 후면을 적당한 음향 임피던스와 손실을 갖는 물질과 결합 시켜서("Backing") 압전 물질에서 발생된 초음파중 후면 방향으로 방사된 성분은 적당히 흡수 시키고, 전면 방향으로 방사된 초음파는 Matching layer를 통해 매질에 전달되도록 한다.

매질의 조건을 포함한 초음파 변환기의 전기-음향학적인 등가회로는 여러가지가 있으나, Pulse-excitation의 경우 Fig. 3 - 9에 보이는 바와 같은 소위 "KLM-model"이라고 부르는 등가회로가 널리 쓰이고 있다.

광대역 변환기를 실현하려면 Fig. 3 - 9에서 "Back acoustic port"로 표시된 후면의 물질, 즉 "Backing"의 음향 임피던스가 압전물질의 음향 임피던스와 같아서 그 경계면에서 반사가 일어나지 않아야 하고, 일단 후면으로 방사된 초음파가 다시 전면 방향으로 돌아오지 않도록 "Backing" 내에서의 초음파 손실이 충분히 커야 한다.

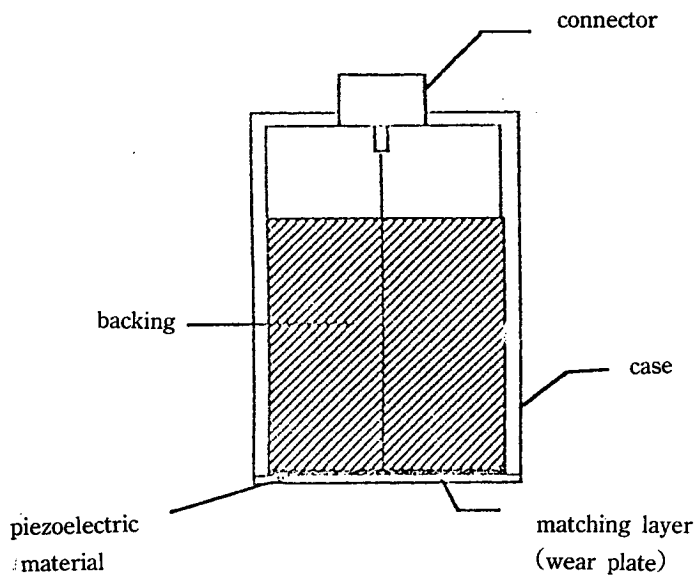


Fig. 3 - 8. Basic structure of piezoelectric broad-band ultrasonic transducer

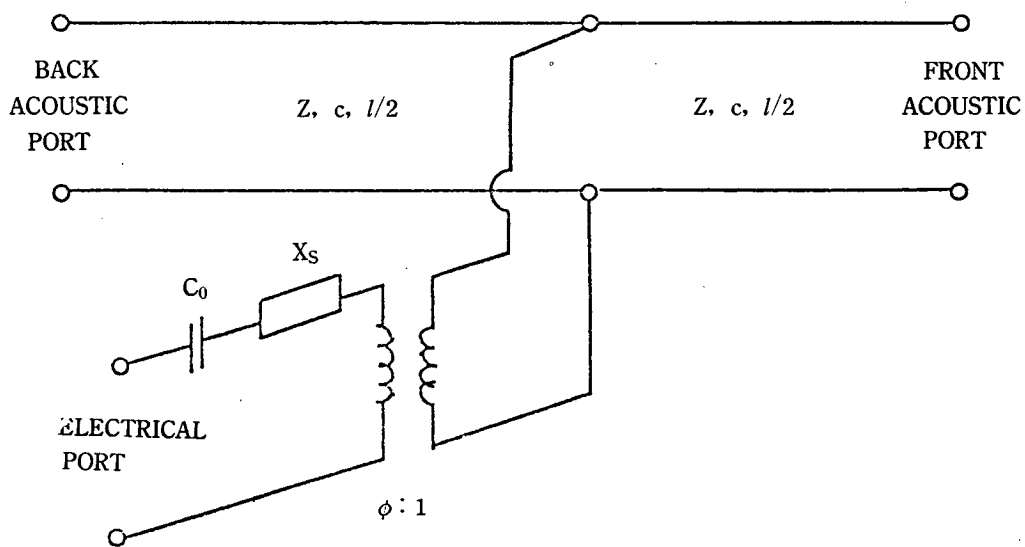


Fig. 3 - 9. Equivalent circuit of ultrasonic transducer use KLM-model

5. 광섬유 수중 음향 센서

광섬유를 음파측정에 이용한 연구 결과가 1977년 처음 발표된 이래 각종 물리량 측정을 위한 검출 소자로 이용하려는 시도가 상당히 많이 이루어지고 있다.

광섬유 센서는 광섬유 자체가 절연체 이기 때문에 전자기파에 의한 영향이 배제될 뿐만 아니라 굽힘성이 좋아 센서의 모양을 임의의 형태로 만들 수 있으며 기존 센서에 비하여 측정 감도가 우수하다는 점 등 여러가지 장점이 있다.

Fig. 3 - 10은 광섬유 센서의 여러 형태를 보여 준다. 고지향성 센서중 가장 간단한 형태는 광섬유를 길게 늘어뜨려 놓는 것인데, 음파와 광파의 상호작용 거리가 짧아 측정 감도가 떨어진다. 이러한 점은 광섬유를 나선형으로 감아 센서 광섬유의 길이를 늘어줌으로서 개선 될 수 있다. 한편 기존 광섬유를 센서 광섬유에 인접시켜 놓은 구배(gradient) 센서도 지향 특성을 갖는다. 이와 같은 지향성 센서는 음파의 진행 방향을 알려주기 때문에 음원의 방향을 식별하는데 유용하게 사용된다.

광섬유를 통과하는 광파의 위상이 음파에 의해 변조되는 현상은 크게 세가지 주파수 영역에서 고려되어야 한다.(Fig. 3 - 11) 일반적으로 광섬유 센서가 원형으로 제작되기 때문에 센서의 직경 D 와 음파의 파장 λ 를 비교함으로써 주파수 영역을 구분한다. 저주파 영역은 음파의 파장 λ 가 센서의 직경 D 보다 훨씬 큰 영역으로서, 음파는 센서 광섬유 전체에 걸쳐 시간에 따라 변하는 균일한 압력을 가한다. 중간 주파수 영역은 음파의 파장 λ 가 센서의 직경 D 와 비슷한 크기를 갖는 영역으로서 이 경우 음파가 진행되는 방향에 따른 압력 변화가 중요한 요소가 된다. 마지막으로 초음파 영역은 음파의 파장 λ 가 광섬유의 직경 d 와 비슷하거나 작은 영역으로 광섬유 단면에서의 탄성 변형도의 분포가 불균일하게 되며 광모드의 분포를 고려하여야 한다.

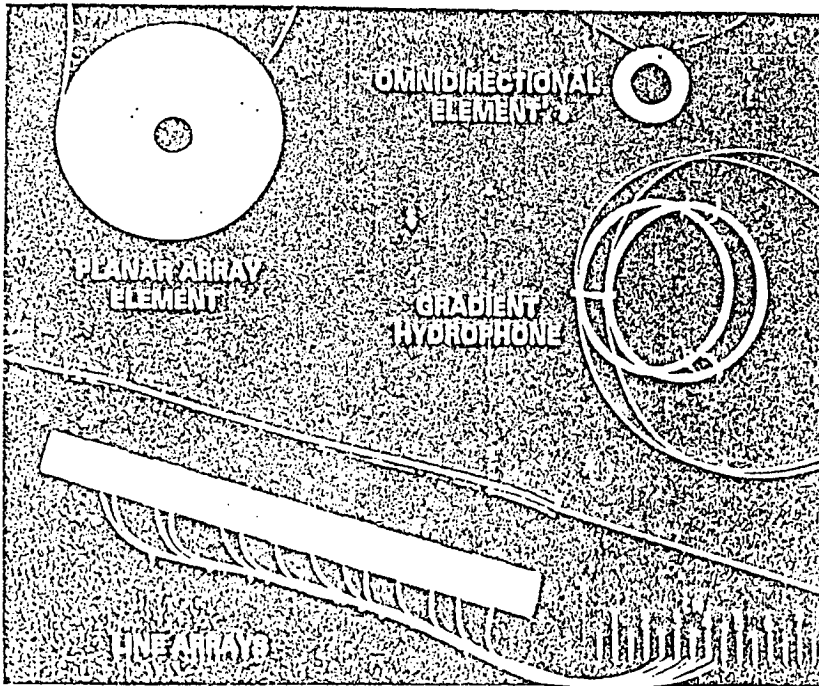


Fig. 3 - 10. Various configuration of optical fiber sensor.

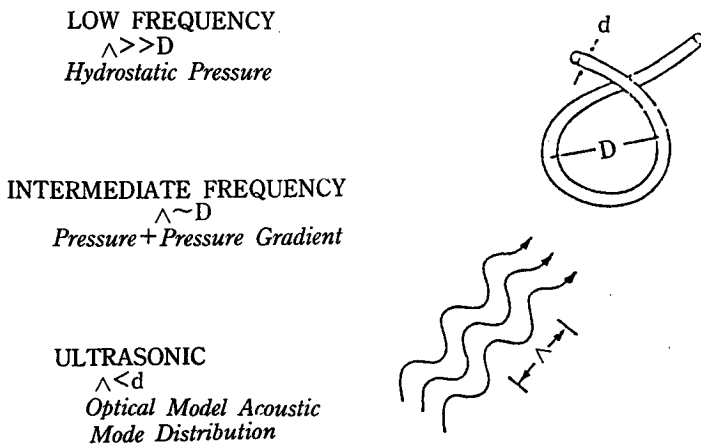


Fig. 3 - 11. Various frequency regimes for the interaction of a typical fiber configuration with an acoustic wave

第 2 節 음향센서의 교정방법

음향의 단위는 길이, 질량, 전류, 시간 등과 같은 SI 기본 단위가 아닌 유도 단위이다. 음향은 가역교정에 의하여 이루어 진다. 전기, 길이, 주파수 혹은 시간의 표준기를 가지고 하나의 음향 표준기를 만든다. (Fig. 3 - 12)

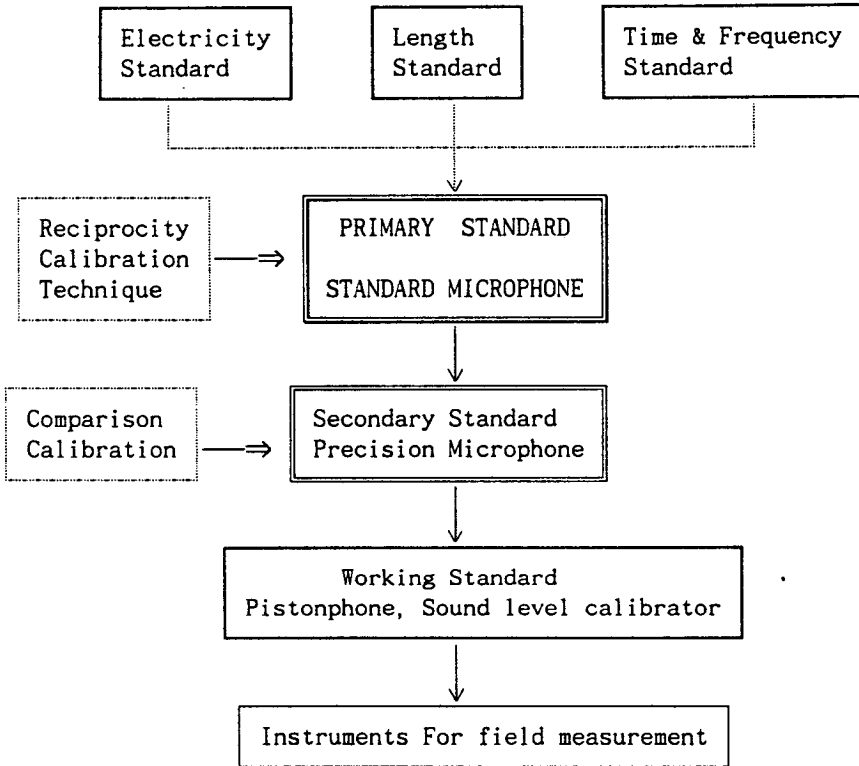


Fig. 3 - 12. National standard system in acoustic measurements

1. 마이크로폰

Microphone의 교정은 Sensitivity에 의해 결정된다. 즉, Sensitivity는

$$\text{Sensitivity} = \frac{\text{Output Electric Voltage}}{\text{Input Acoustic Pressure}}$$

이며, Microphone의 절대교정은 전기음향의 가역교정을 기초로하고 있다. 이방법

을 사용 함으로서 얻어지는 이익은 전압과 길이의 측정없이 음압을 측정할 수 있다는데 있다.

마이크로폰의 주파수에 따른 반응감도를 결정하는 것을 교정이라고 한다. 마이크로폰의 교정에는 비교교정과 절대교정 방법이 있다. 비교교정은 크기를 알고 있는 기준 음장속에 대상 마이크로폰을 설치하고 그 출력 전압을 측정하는 방법으로 일반용도의 마이크로폰 감도 측정에 많이 쓰인다. 절대 교정은 마이크로폰의 음감지와 음발생 기능의 가역성(reciprocity)에 바탕을 둔 방법으로 가역교정이라고도 부른다. 가역교정의 중요성에 비추어 이에 대해서 아래에 간단히 설명하고자 한다. 마이크로폰은 아래 그림과 같이 전기적 등가회로에 의해서 나타낼 수 있다.

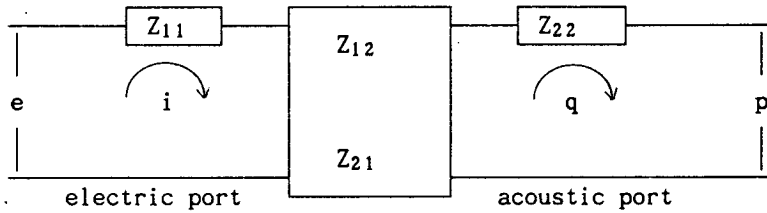


Fig. 3 - 13. Equivalent circuit of reciprocal microphone

여기서

- p = 진동막에 작용하는 음압
- e = 마이크로폰 출력단에서의 개방회로 전압
- q = 진동막의 부피속도
- i = 마이크로폰의 출력단의 전기적 임피던스
- Z_{i1} = 마이크로폰의 전기 임피던스
- Z_{22} = 마이크로폰의 음향 임피던스
- Z_{12}, Z_{21} = 전달 임피던스

위의 등가회로로부터 다음의 관계식을 유도 할 수 있다.

$$\begin{cases} e = Z_{11} \cdot i + Z_{12} \cdot q \\ p = Z_{21} \cdot i + Z_{22} \cdot q \end{cases} \quad (1)$$

마이크로폰의 가역성에 의해서 $Z_{12} = \pm Z_{21}$ 의 관계가 존재한다. 가역교정은 이 같은 특성을 갖는 세개의 가역성 마이크로폰을 Fig. 3 - 14과 같이 두개씩 도

합하여 결합기로 연결하여 수행한다. 이 그림의 각각의 결합에서 한 마이크로폰을 음원의 역할을 하고 다른하나의 감지기의 역할을 한다. 이들 세개의 결합조건에 대해서 식(19)로 주어지는 관계식을 적용하고 결합기의 음향 임피던스 Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ac} 등을 가정하여 세 마이크로폰의 감도 M_a , M_b , M_c 에 대한 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} M_a M_b &= \frac{1}{Z_{ab}} \frac{e_b}{i_a} \\ M_b M_c &= \frac{1}{Z_{bc}} \frac{e_c}{i_b} \\ M_a M_c &= \frac{1}{Z_{ac}} \frac{e_c}{i_a} \end{aligned} \right\} \text{--- (2)}$$

여기서 음향 전달 임피던스는 결합조건과 결합기의 기하학적 구조등에 의해서 별도로 결정 된다. 따라서 식 (2)는 세개의 미지수 M_a , M_b 및 M_c 를 마이크로폰 출력단에서 측정된 전압과 전류 값에 의해서 결정되는 세개의 방정식으로 나타나고 있으며 이로부터 세 마이크로폰의 감도를 결정 할 수 있다. 모든 조건이 적절하게 유지 될때 이 방법에 의해서 ± 0.01 [dB]까지의 정밀도를 기대 할 수 있다.

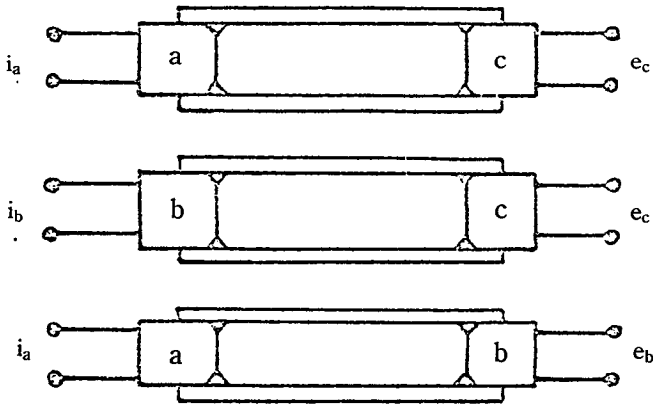


Fig. 3 - 14. Combination method of three microphones

2. Hydrophone

Hydrophone이 갖는 음압을 측정시 중요한 것은 얼마만큼 신뢰할 수 있고 그 결과가 반복되느냐에 있다. 현장과 동일한 조건에서의 측정이 가능하다면 문제가 없지만 온도와 압력 그리고 장비의 감도에 따라 변화하기 때문에 Hydrophone의

교정은 매우 중요하다. 교정없이 다른 시간에 비교한것 또는 다른 장소에서 나타난 값은 실제로 믿을 수 없다.

Hydrophone이 해수의 음장에 있을때 Incident Pressure Waves의 주파수에서의 진동 Sensitivity는 발생하는 전압 $e[V]$ 는 압력 $p[in \mu Pa]$ 에 비례 하며 Hydrophone Sensitivity (M_t)는

$$M_t = \frac{e}{p} \quad \text{----- (3)}$$

이고 다시 dB로 나타내면

$$M_t [dB] = 20 \log \frac{e}{p} \quad (re 1 [V/\mu Pa])$$

이다.

1). 실험실에서의 교정

실험실에서의 교정은 세 부분으로 나누어서 행하는데 주파수를 0.1 [Hz] ~ 1 [Hz], 50 [Hz] ~ 4 [kHz], 3 [kHz] ~ 200 [kHz]로 나누어서 하는 것이다.

A) 0.1 [Hz] ~ 1 [Hz]

물속에 Hydrophone을 넣고 천천히 상하로 단순하게 조화 진동을 하면서 측정 하는 것으로 Hydrophone에서의 압력의 변화는

$$\Delta p = \Delta h \cdot \rho \cdot g \quad \text{----- (4)}$$

Δh : the variation of Hydrophone depth
 ρ : the density of water
 g : the gravitational acceleration

이고 Fig. 3 - 15와 같이 설치하면 Charge Amplifier는 0.0003 [Hz]까지 사용할 수 있고 오실로스코프(Oscilloscope)는 전압(Δe)의 최대 최소를 측정 할 수 있어 Hydrophone sensitivity를 측정 할 수 있다. 즉 식 (3)에 식 (4)를 대입하면 Hydrophone Sensitivity 는

$$M_t = \frac{\Delta e}{\Delta h \rho g} \quad \text{----- (5)}$$

으로 계산 할 수 있다.

이 방법은 관성의 효과를 최소화 시킬 수 있어 최저 주파수의 제한이 없으며 1 [Hz]까지 정확하게 교정 할 수 있다. 1 [Hz]이상의 주파수는 소음과 움직임이 증가하여 정확도가 떨어진다.

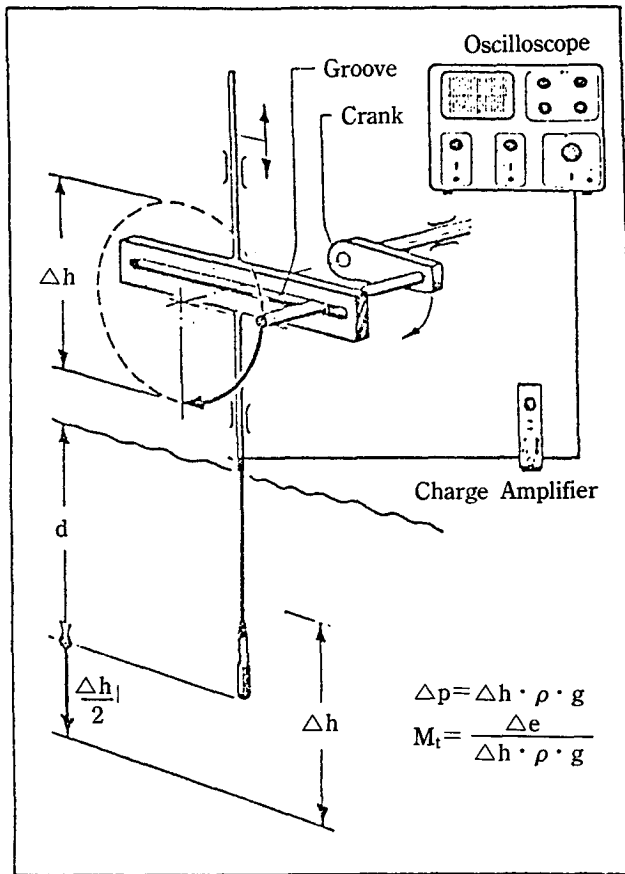


Fig. 3 - 15. Measurement arrangement for calibration in
the 0.1 [Hz] ~ 1 [Hz] range

B) 50 [Hz] ~ 4 [kHz]

만약에 Hydrophone의 음향 임피던스가 매우 크다면 방사 임피던스는 무시할 수 있다. 그리고 회절 효과도 무시한다면 무향실내에서의 Hydrophone의 교정은 가능하다.

Fig. 3 - 16과 같이 설치하고 임의의 신호를 증폭하여 무향실내에서 발생시킨다면 Hydrophone이 수신한 신호는 측정기의 상태에 맞춰 증폭한후 기록계로 보내지고, Microphone에서 수신한 신호는 일정한 신호를 발생시킬 수 있게 귀환하여 보정 함으로써 동시에 같은 신호를 받아 플로터에 그리게 되면 수신응답의 분포를 알 수 있다.

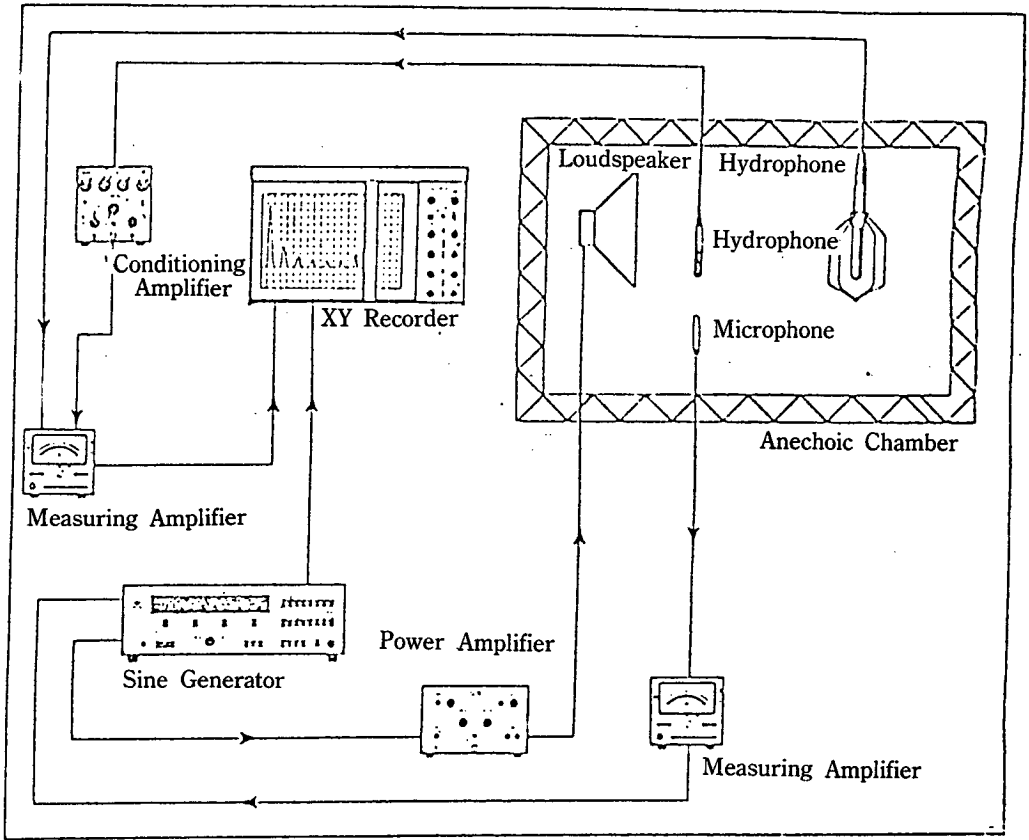


Fig. 3 - 16. A calibration measurement set-up for the 50 [Hz] ~ 4 [kHz] range

C) 3 [kHz] ~ 200 [kHz]

Projector로서 사용되는 잘 알려진 Transmitting sensitivity의 기준 Hydrophone과 임의의 Hydrophone을 이 주파수대에서 Projector를 사용하여 교정하는 방법이다. 이 방법은 Fig. 3 - 17와 같이 설치하여 할 수 있다. 이 때 수조는 음의 반사, 벽 또는 바닥, 물의 표면으로 부터 반사 되지 않아야 하므로 수조 내에서의 정확한 위치를 선정하여 연속적인 신호를 보내야 한다.

Gating System은 신호의 반사를 줄이는데 쓰이는데 신호 발생기의 신호를 펄스로 보내준다. 증폭된 신호는 Projector를 통하여 전달되면 Hydrophone은 신호를 받아 증폭한후 고역 필터를 통한후 신호를 펄스폭과 일치 시켜 신호를 보내게 되면 Fig. 3 - 17와 같은 신호를 얻게 된다.

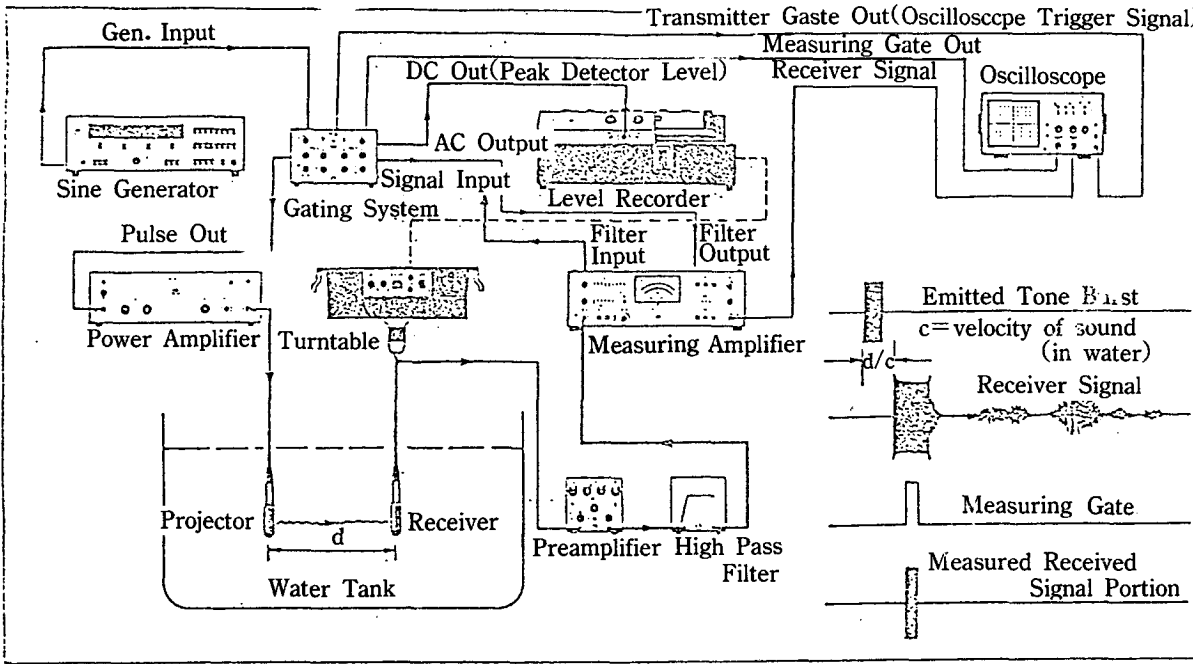


Fig. 3 - 17. Set-up for calibration in the 3 [kHz] ~ 200 [kHz] range by the calibrated projector method

Hydrophone sensitivity를 계산하면 다음과 같이 얻을 수 있다. Projector가 1 [m] 거리에 S_v [$\mu\text{Pa}/\text{V}$]이라면 임의의 Hydrophone에 직접 가해지는 음압은

$$p^2 = \frac{E^2 S_v^2}{d^2} \quad \text{----- (6)}$$

E : the sensitivity of the projector, the voltage applied
d : the hydrophone separation

이고 Hydrophone의 sensitivity는 식 (3), (6)로부터

$$M_t = \frac{ed}{ES_v}$$

이고 다시 dB로 표현하면

$$M_t, [\text{dB}] = 20 (\log_{10} d + \log_{10} e - \log_{10} E - \log_{10} S_v) \text{ 이다.}$$

D) 대치 교정 (Substitution Calibration)

기준 Hydrophone을 사용하여 전압 증폭기, 기록계, 주파수 범위 등을 측정 한 후 동일 조건하에서 교정하고자 하는 Hydrophone을 측정하여 식 (3)로 부터 우리는 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다. 즉 음압이 같으므로

$$M_{tu} = \frac{V_u}{V_s} M_{ts} \quad \text{----- (7)}$$

M_t : the hydrophone sensitivity, V : the output voltage

Subscripts u and s : u : unknown hydrophone

 s : standard hydrophone

이 되므로 전압비에 의해 측정 할 수 있으며 전압 증폭기와 기록계를 교정하지 않아도 된다.

2) 현장에서의 교정

현장에서의 교정은 Coupler 교정과 내부 전압 교정으로 생각해 볼 수 있다.

A) Coupler Calibration

일반 배터리에 의하여 작동되는 Calibrator를 Coupler내에 장착하여 여러가지의 기준음압을 가해주게 만들어 Fig. 3 - 18와 같이 Hydrophone을 끼워 측정함으로써 매우 편리하게 교정 할 수 있는 것이다.

B) Insert Voltage Calibration

Hydrophone내에 정밀 저항 50 [Ω]을 갖고 증폭기가 있는 것이라면 전압이 2 [V] RMS 이내로 가하여 교정을 행할 수 있다. 즉 Cable의 전원 단자에 전원을 공급하면 저항에서 신호가 생성되어 이 신호는 Hydrophone의 Piezoelectric으로부터 나오는 것같이 나타나는 것을 사용하여 교정을 할 수 있다.

Hydrophone의 내부를 0 [dB]로 본다면 거기에는 표유 용량이 존재 하며 긴 케이블에도 같은 효과가 나타나며 외부 용량의 감소는 기본 입력 신호에 비해 2 ~ 2.5 [dB] 낮아진다. 그러므로 이 방법은 Hydrophone이 고정적으로 설치 되있는 곳에서 주기적으로 점검 할 때 필요한 방법이다.

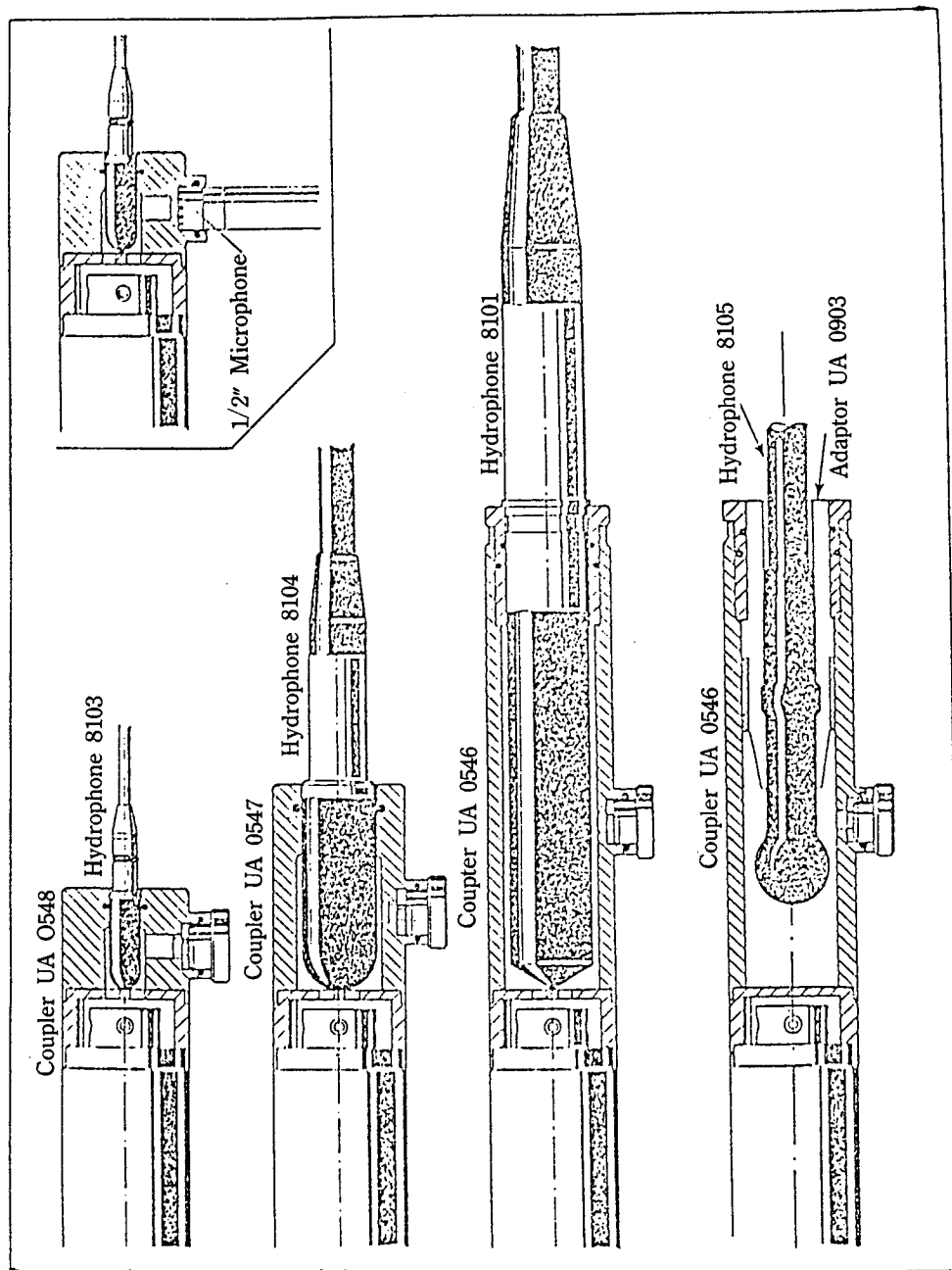


Fig. 3 - 18. Mounting of Brüel & Kjær hydrophones and their respective couplers onto the calibrator. The insert shows a 1/2" microphone mounted to monitor the sound pressure level inside the coupler

3. 광섬유 센서

광신호 검출 장치는 Mach-Zehnder 광섬유 간섭계 센서의 광출력을 측정하고자 하는 물리량의 크기에 비례하는 전기적인 신호로 변환시키기 위한 것이므로, 우선 기준광과 신호광의 전기장을 고려하여야 한다. Fig. 3 - 19는 광신호 검출 장치를 갖춘 일반적인 광섬유 간섭계를 보여준다. 여기서 물리적인 신호는 센서 광섬유에만 작용하고 광신호 검출장치는 기준 광섬유에만 작용한다고 가정한다.

광 결합기(Combiner) 전단에서 센서 광섬유를 거쳐나온 신호광의 전기장은 다음과 같이 표현되며

$$\vec{E}_s = \vec{E}_s \exp j \{ \omega t + S(t) + \Phi_s \}$$

기준 광섬유를 거쳐 나온 기준광의 전기장은 다음과 같다.

$$\vec{E}_r = \vec{E}_r \exp j \{ \omega' t + A(t) + B(t) + \Phi_r \}$$

여기서 $S(t)$ 는 측정하고자 하는 물리량에 비례하여 발생된 위상항으로 일반적으로 $S(t) \ll \pi$ 이다. Φ_s 와 Φ_r 은 각각 신호광과 기준광의 임의의 위상항으로 이상적인 경우 Φ_s 와 Φ_r 이 일정하게 유지되어야 하나 광섬유 간섭계에서 이들의 외부 영향에 의하여 불규칙하게 변하며, 수초 동안에 쉽게 2π 또는 그 이상으로 변할 수 있다.

기준광에는 두개의 위상변조기(phase modulator or phase shifter)에 의해 발생하는 위상항 A와 B가 포함 될 수 있는데, Fig. 3 - 19는 일반적인 광간섭 시스템으로 A는 광섬유 간섭계를 직각조건에서(quadrature condition)에서 동작하도록 하기 위해 궤환회로에 의해 발생하는 위상항이며 B는 발진기에 의해 항상 $\Phi_m \sin(\omega_m t)$ 로 주어지는 위상항이다.

이들 위상 변조기의 사용여부와 신호광과 기준광의 주파수에 따라 광신호 검출 장치를 Table 3 - 2와 같이 다섯가지로 구분한다.

Table 3 - 2. Configuration of interferometer for use with various detection system

Detection system	Frequency	A	B
HOM(passive homodyne)	$\omega = \omega'$	no	no
PTDC(homodyne with DC phase tracking)	$\omega = \omega'$	Yes	no
PTAC(homodyne with AC phase tracking)	$\omega = \omega'$	Yes	Yes
HET(True heterodyne)	$\omega \neq \omega'$	no	no
SHET(Synthetic heterodyne)	$\omega = \omega'$	no	Yes

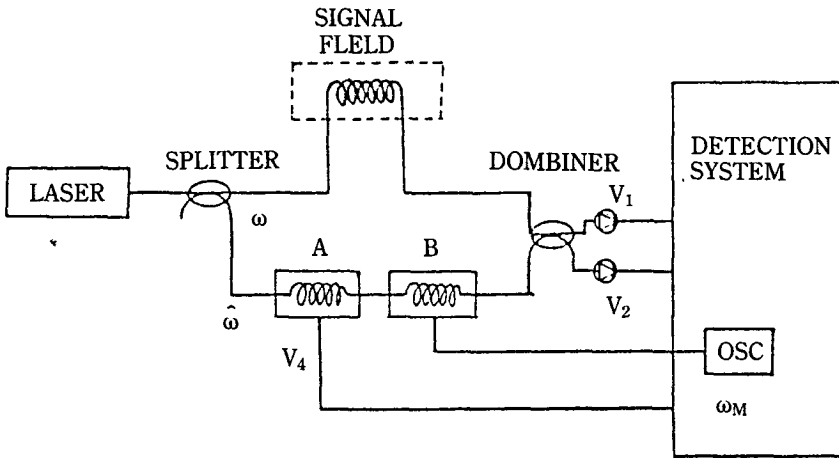


Fig. 3 - 19. Generalized fiber interferometer system

第 3 節 음향센서의 특성 측정 기술

전기음향은 음의 입력에서부터 녹음, 증폭 및 재생에 이르기까지의 모든 단계의 전기, 전자 장치들을 다루는 전자공학의 한 중요한 분야이다. 전기 음향 기술의 궁극적인 목적은 좋은 재생을 얻는 것으로서 이를 위해서 재생음에 영향을 줄 수 있는 모든 요소들을 추적 분석하며 전자 장치의 기능을 개선하는 것으로 요약 할 수 있다. 각 단계에 의한 주요 장치들을 살펴보면 다음과 같다.

음의 입력 장치 : 마이크로폰

녹음장치 : 테이프 녹음기, Turntable, Compact disk

증폭 및 조정장치 : 증폭기, Turner, Equalizer

재생 장치 : 스피커

위에 언급된 음의 입력 장치는 수중에서는 Hydrophone으로 대체 될 수 있고 재생장치인 스피커는 Projector로 대체하여 설명 할 수 있으므로 여기서는 음의 입출력 장치인 스피커의 성능과 마이크로폰 측정 기술에 대해서만 설명한다.

1. 스피커의 성능

스피커의 성능 측정과 특성을 나타내는 주요 데이터로서는 전기적 임피던스,

주파수 반응, 비선형 왜곡(Distortion), 지향성 효율 등을 들 수 있다. 우선 이들 각각의 측정 방법에 대해서 살펴 보고자 한다.

(1) 전기 임피던스

스피커의 측정시 전기 임피던스, 정격 임피던스, 스피커 측정 전원 임피던스와 증폭기 출력 임피던스는 매우 중요한 요소이다. 이들은 스피커 자체에 관련된 문제 일 뿐만아니라 신호를 공급하는 전원과의 관계에서도 중요한 역할을 한다. 또한 파워전달, 주파수 반응, 비선형왜곡(Distortion), 특성 등과 같은 양을 적절한 조건하에서 측정하기 위해서라도 이들 값의 결정은 매우 중요하다.

가) 스피커의 전기 임피던스

스피커의 전기 임피던스는 스피커의 입력 단자에서 측정한 주파수별 복소 전기 임피던스이다. 이는 스피커 입력 단자에 가해진 전압과 전류의 위상관계 및 크기를 측정하여 결정한다. 이 때 전압과 전류는 정현파이어야 한다. 이의 표현은 복소 형태로 주어 지는데 크기와 위상을 주파수의 함수로 나타내거나, 저항과 리액턴스 성분을 주파수의 함수로 나타낸다.

나) 스피커의 정격 임피던스(Z_R)

스피커의 정격 임피던스는 순수한 저항값으로 이는 전원으로부터 스피커에 공급되는 전력을 측정하기 위해 대치된다. 예를 들어 스피커의 정격 임피던스가 R [ohm] 일 경우 증폭기의 출력을 측정하기 위해서는 저항 R [ohm]을 증폭기의 출력 단자에 연결하여 측정한다.

다) 스피커 측정 전원 임피던스(Z_G)와 증폭기 출력 임피던스(Z_G)

스피커 측정 전원 임피던스는 스피커의 성능을 시험하기 위해 스피커 및 일정 전원과 직렬로 연결되는 순수한 저항의 값이다. 증폭기 출력 임피던스는 스피커에 전력을 공급하는 증폭기의 출력 단자에서 측정된 내부 임피던스를 말한다.

(2) 주파수 반응

스피커의 기준 음압 반응은 정규 음압 반응으로서 스피커의 주축상 1 [m] 떨어진 자유음장에서 측정된 음압과 스피커의 정격 임피던스에 공급된 전력과의 비로 주어지며 단위는 dB이다. 이 기준 음압 반응을 주파수 반응이라고 하는데 측정 하기 위해서는 Fig. 3 - 20과 같이 무향실에 스피커를 설치 한 후 제조회사에서 명시한 주축이 있는 경우에는 스피커 중심에서 스피커 면에 수직인 축상에 마이크로폰을 설치한다. 이 때 스피커와 마이크로폰 사이의 거리는 자유음장을 얻

기위해 적어도 스피커 직경의 3배는 되어야 하는데 일반적으로 1 [m]로 한다. 스피커의 주파수 반응을 표시하기 위해서는 스피커와 마이크로폰과의 거리, 스피커의 정격 임피던스, 이에 가해진 전력, 스피커 측정에 사용된 전원의 임피던스를 명시하여야 한다.

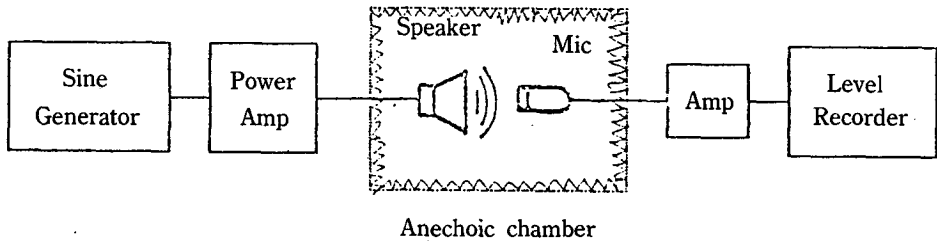


Fig. 3 - 20. Frequency response of speaker measurement system

(3) 정격효율

스피커의 정격효율 η 는 주파수에 따라 그 값을 달리하며, 전력을 음향파워로 변환시키는 능력 뿐만아니라 전원으로부터 전력을 받아 들이는 능력에도 의존한다. 이는 음향파워 출력 W 와 스피커의 정격 임피던스에 공급해 준 전력 P_E 와의 비에 의해서 다음과 같이 주어진다.

$$\eta = 10 \text{ Log}_{10} (W / P_E) \quad \text{----- (8)}$$

(4) 지향 특성

스피커의 지향계수는 스피커 주축상 자유 음장에서의 음향 Intensity와 스피커 중심을 원점으로하는 구면상의 평균 음향 Intensity와의 비로서 주어진다. 이를 나타내기 위해서는 주파수를 명시하여야 하며 측정위치는 스피커로부터 충분히 떨어져서 측정위치에서는 구면파를 형성하여야 한다. 지향 지수는 지향계수에 상용대수를 취해 dB로 나타내면

$$K_L = 10 \text{ Log} \left[\frac{I_r}{I_a} \right]$$

I_r : 주축상 거리 r 에서의 자유음장 Intensity
 I_a : 음향파워/ $4\pi r^2$ 로 평균 음향 Intensity

이다.

(5) 비선형 왜곡

스피커의 비선형 왜곡은 음향 출력과 전기 입력사이의 비선형에 의한 불필요한 파형의 변화이다. 이러한 왜곡은 스피커 출력의 유효크기를 제한하는 하나의 요소가 된다. 스피커의 중요한 비선형원인으로서 ① 스피커의 역학적 진동 시스템에 있어서 가해진 힘과 변위 사이의 비선형, ② 역학적 진동 시스템을 가동시키기 위한 자장의 불균형 및 ③ 특히 호은 스피커에 있어서는 대기 자체의 불균일성 등을 들 수 있다. 처음의 두 원인은 주로 변위가 큰 저주파에서 왜곡을 발생 시키고 세번째 원인은 고주파에서 심한 왜곡을 심한 왜곡을 유발 시킨다.

- 고조파 왜곡 (Harmonic distortion)

비선형의 결과로 전기신호 입력에는 없는 주파수 성분이 음향출력에 나타 난다. 단일 주파수 입력에 대해 이러한 비선형 왜곡은 입력 주파수의 정수배로 주어지는 고조파 및 입력 주파수를 정수로 나눈 저조파 왜곡을 발생 시킨다. 총 고조파의 율을 측정하기 위해서는 고조파 통과여파기를 사용하여 입력 주파수 성분 및 그 이하의 주파수 성분을 제외한 나머지 고조파 성분을 감쇄없이 통과시킨다. 이를 측정하기 위한 시스템은 Fig. 3 - 21과 같다. 마찬가지로 총저주파의 율을 측정하기 위해서는 저주파 통과 여파기를 사용하여 동일한 방법으로 측정한다.

스피커 설계를 위해서는 총 고조파의 율보다 좀더 세밀한 분석을 위해 개별 고조파 왜곡도를 측정한다. 이를 측정하기 위해서는 대역 통과 여파기를 사용하여 필요한 주파수 성분만을 통과 시킨다.

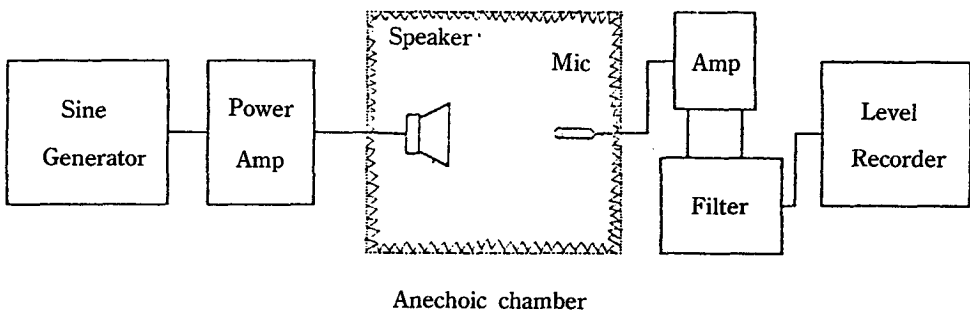


Fig. 3 - 21. Harmonic distortion measurement system

2. 마이크로폰

음향 측정에서 정밀도와 안정도가 높아서 가장 많이 쓰이는 마이크로폰은 콘덴서 마이크로폰이다. 콘덴서 마이크로폰은 높은 내부 임피던스를 갖고 있기 때문에 마이크로폰 출력 단계에서 전치 증폭기를 필요로 하며, 전치 증폭기의 높은 임피던스는 회로내에 잡음을 야기 시킬 수 있다. 또한 이 마이크로폰은 전지나 또는 아주 잘 정류된 출력을 가진 정류기로 부터 200 ~ 400 볼트의 분극 전압을 필요로 한다. 이러한 단점 때문에 콘덴서 마이크로폰은 크리스탈 마이크로폰이나 가동코일 마이크로폰 등에 비해서 일반 용도로도 많이 쓰이지는 않으나 정밀 음향측정과 고감도 녹음등에 널리 사용되고 있다. 콘덴서 마이크로폰은 Fig 3 - 22 (a) 와 같이 고정된 백플레이트와 얇은 평행 금속 진동판으로 구성되어 있다.

백플레이트는 마이크로폰의 나머지 부분과 절연되어 있고 Fig 3 - 22에서 보는바와 같이 분극전압 E_0 가 백플레이트와 진동판에 작용한다. 음파가 진동판에 입사 되었을때 생기는 진동판의 변위는 마이크로폰의 용량 C 를 변화 시키며, 이에 의해서 부하저항 R_L 에 신호 전압 e_L 이 발생된다.

마이크로폰의 특성은 일차적으로 주파수에 따른 반응감도와 동적 범위에 의해서 결정된다. 반응감도 M 은 마이크로폰의 진동막에 균일하게 가해진 음압 p 에 대한 출력단자의 개방회로 전압(open-circuit voltage) e 의 비로서 주어진다.

$$M = \frac{e}{p}$$

대개의 변환기가 그렇듯이 일정한 입력에 대해 출력치가 큰것이 이상적이다. 마이크로폰의 경우도 우선 반응 감도가 높은 것이 바람직하다. 그러나 특히 정밀 측정용 마이크로폰에서는 이와 함께 따른 반응감도가 일정한 값을 가져야 한다.

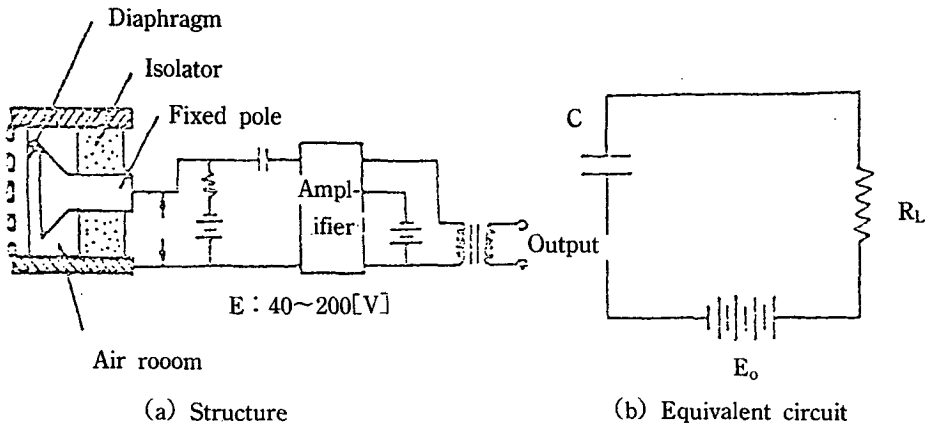


Fig. 3 - 22. Condenser Microphone

第 4 章 해양 관측 장비 응용원리 및 특징

수중음향 기술의 발전은 빙산 탐지의 목적을 위한 SONAR 개발을 시작으로 2차 세계대전 당시 잠수함을 탐지하기 위한 SONAR 개발이 그 절정을 이루었다고 볼 수 있다. 2차 세계대전이 종료된 후 수중 음향을 평화적으로 응용하기 시작하여, 음파를 이용한 해양장비가 많이 출현하기 시작하였으며, 대표적인 음향장비는 Fig. 4 - 1과 같으며 Table 4 - 1에 기능과 용도를 열거하였다.

SONAR의 능력을 제한하는 가장 큰 요인은 음향전달 매체인 해양이며 이는 해수면의 운동, 즉 파고, 해류, 조류에 의한 영향과 해수의 수온과 염분도 변화에 따른 음속의 변화, 그리고 불규칙하고 비균질한 해저 퇴적물의 분포등이 음파의 진행에 막대한 영향을 준다는 사실이 결국은 음파를 이용한 매질의 탐사 방법으로 역이용되고 있으며, 소위 Inverse Method(역방법)을 이용한 해양탐사는 Direct Method 즉 음원과 수신기 사이의 음파 전달 과정을 증시하는 방법을 역이용 함으로써 매질의 특성에 따른 음파신호 특성 파악에 역점을 두게 되었다.

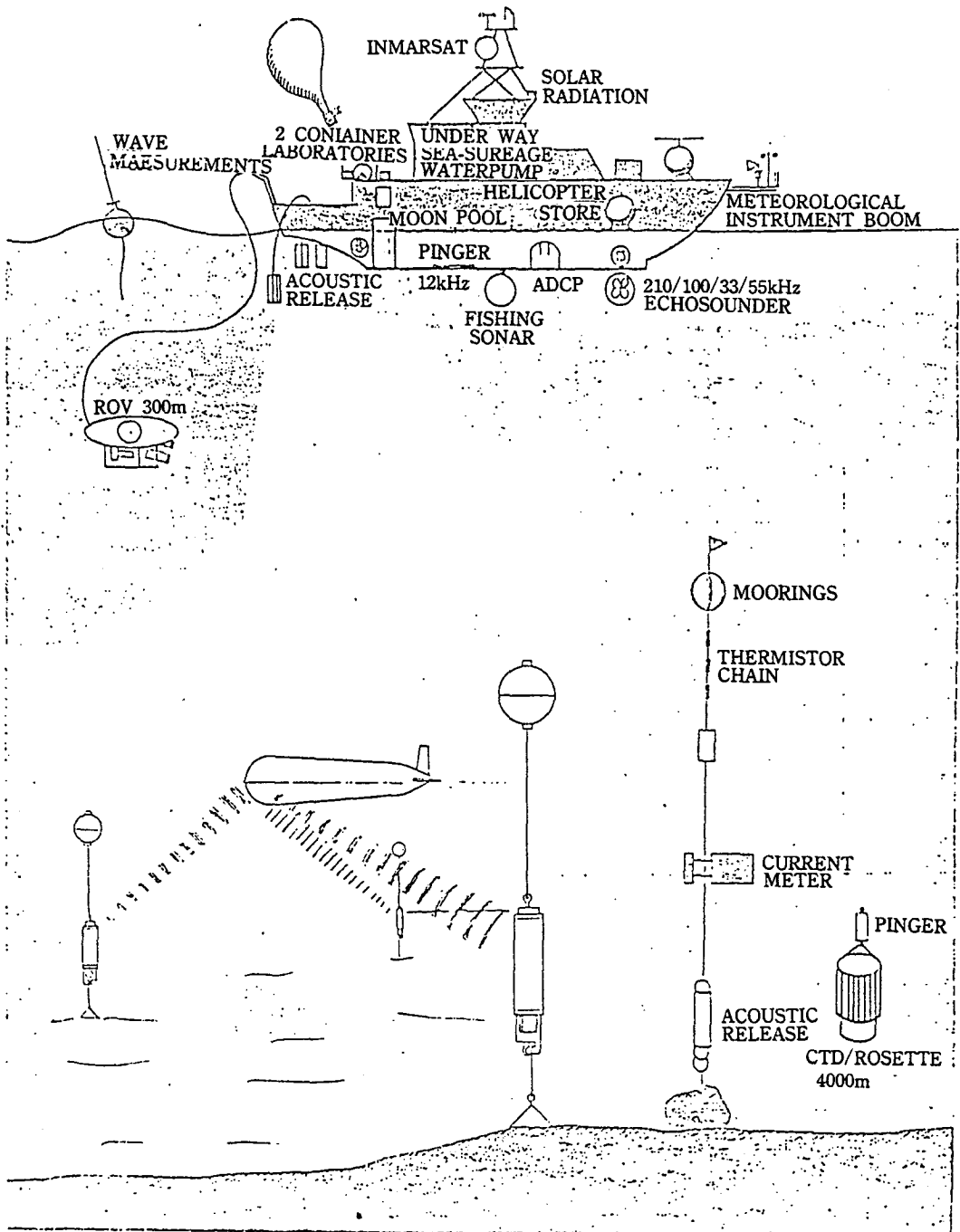


Fig. 4 - 1. Application of sound wave

Table 4 - 1. Underwater acoustic instruments

기 능	용 도
1. Depth Sounding - Depth Sounders - Subbottom Profilers - Side-scan Sonars	- 짧은 펄스를 해저면으로 보내서 되돌아 오는 음파를 감지해서 수심을 측정 - 해저면을 관통시키는 저주파수와 고압의 임펄스 원을 사용해서 해저면을 도시 - 해저면에 직각 방향으로 배를 끌어서 비스듬히 음파를 보내서 그 반사파를 이용, 해저면을 도시
2. Doppler Navigation	- 한 조의 Transducer를 사용하여 도플러 효과를 이용, 해저면으로 부터 되돌아 오는 반사파를 감지하여 해저 상태를 분석할 수 있도록 한 장비
3. Fish Finding	- 어군의 위치 및 군집 상태를 탐지
4. Fisheries Aids	- 물고기의 집어, 유인 및 추적
5. Diver's Aids	- 소형 Sonar 장비를 이용하여 다이버의 현위치를 파악
6. Position Marking - Beacons - Transponders	- 수중에서 계속적인 신호를 발생, 그 송신 신호를 분석해서 위치를 파악 - 상호간 약속된 신호를 보냈을 때만 Transponder가 동작, 그 신호를 분석해서 위치를 파악
7. Communication and Telemetry	- Wire를 사용하지 않고 대신 자료를 실어 나르는 매체를 음파를 사용, 사람과 사람 또는 수중 장비대 사람 간의 통신
8. Underwater Control Equipment	- 수중에 설치된 기계들을 수중 음향을 이용해서 제어
9. 기 타	- 음향 유속계, 음향 파고계

을 새로 추정 하여야 하며 따라서 SONAR 시스템의 성능도 바뀌게 된다. 이 성능이란 최대 탐지거리를 꼽을 수 있다.

SONAR 시스템의 탐지거리를 결정 짓는 가장 중요한 변수는 TL로서 이 중에서도 특히 흡음 손실의 주파수 특성에 의해 다음과 같이 최대 탐지 거리가 초기 예측 된다.

흡음손실이란 앞서 언급 했듯이 음파가 수중으로 전파 될 때 기하학 적인 원인에 의해 발생 하는 확산 손실과 함께, 음파가 해수에 흡수되어 나타나는 현상으로서 주파수에 따라 결정 된다.

SONAR 주파수와 탐지거리의 설계 기준은 식(4)에 의해 추정 된다.

$$\alpha r = 10 \text{ [dB]} \quad \text{----- (4)}$$

(4)식은 오늘날 SONAR 시스템 설계의 기술 수준에 의해 사용되고 있는 경험 식으로 사용 SONAR 주파수로 부터 흡음손실 α 가 결정 되면 탐지거리 r 을 추정 할수 있으며 반대로 r 이 주어 졌다면 이때 사용 주파수를 결정 할 수 있다.

심해에서 이용되는 음향 측심기의 경우 주파수는 보편적으로 12 [kHz]를 사용 한다. (4)의 기준에서 보면 이 때 흡음계수 $\alpha = 1.5 \text{ [dB/km]}$ 로서 $r = 6.7 \text{ [km]}$ 를 얻는다. 이 거리는 대략 가장 깊은 해양의 수심과 일치함을 보이고 있다. 또한 연안에서 쓰이는 음향 측심기는 주로 200 [kHz]가 있는데 이때에는 (4)식으로 부터 150 [m]를 얻으며, 이 값은 제조자의 주장과 일치 한다.

따라서 (4)식은 일반적인 SONAR 시스템에서 작동 주파수와 탐지거리와의 관계를 비교적 잘 만족하고 있으므로 초기 SONAR 시스템 설계시 매우 유용한 설계 자료가 된다.

3. 능동 SONAR 시스템의 설계

시스템을 設計하려면 信號處理가 중요하다. 크게는 受信部設計 (Receiver Design)와 信號設計 (Signal Design)로 나눌 수 있다. 수신부 설계는 측정된 신호로부터 어떻게 하면 사용자가 원하는 정보를 정확하게 얻어낼 수 있는가를 연구하는 분야이며, 신호설계는 수신부의 성능을 최적화 시키기 위해 필요한 송신파를 설계하는 분야이다.

능동소나 시스템에서의 신호처리는 다음과 같은 3 단계로 구분 할 수 있다. Front-end Processing은 수신된 파에 Matched filtering을 수행하는 단계이며, Enviromental Processing은 front-end에서 자료를 전달 받아 다경로 전달 및 Doppler Spreading 등 해양 음향 환경의 영향을 고려하는 단계이고, Target analysis는 목표물의 운동 및 특성을 분석하는 단계이다. (이 종식, 1990)

1) 능동 Sonar의 信號

가장 많이 사용되고 있는 능동 Sonar 信號의 형태를 식으로 살펴 보면 Gated continuous wave(CW) tone(5), Pseudo-random noise(PRN), 주파수 변조(FM)(6), Frequency diversity coded(7)의 형태가 있다.

$$S_t(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E_t}{T}} \cos(2\pi f_c t) & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad \text{----- (5)}$$

E_t : 송신파 펄스 에너지, T : 펄스폭, f_c : 중심 주파수

$$S_t(t) = \sqrt{\frac{2E_t}{T}} a(t) \cos(2\pi f_c t + \phi(t)) \quad \text{----- (6)}$$

$\phi(t) = 2\pi \mu \frac{t^2}{2}$, $a(t)$: Pulse envelope, μ : 주파수 변조율

$$S_t(t) = a(t) \sum_{n=-N}^N a_n \cos[2\pi(f_c + n\Delta f)t] \quad \text{----- (7)}$$

PRN이라 불리는 신호는 주어진 규칙에 따라 위상이 변조된 Gated tone의 연결로 구성되었고, FM은 신호의 생성이 비교적 쉽고 거리 해상도가 뛰어나다. 이 주파수 변조의 순간 주파수, 즉 위상의 시간에 대한 미분은 시간에 따라 선형적으로 변화한다. 여기서 중요한 변수는 주파수 변조율과 주파수 대역이다. 마지막으로 수중통신에 많이 사용되는 Frequency diversity coded 신호는 전송하고자 하는 정보를 각기 다른 주파수를 갖는 Tone에 실어 동시에 전송하는 방법으로 시간영역에서는 매우 복잡해 보이나 주파수 영역에서는 각 해당 주파수에 존재하는 선의 집합으로 간단하게 표현된다.

2) 송출 파형

송출파로서 Range 추적 성능이 좋고, 송출 Transducer 및 Power-amp의 최대 출력 변화 없이도 높은 에너지를 갖는 신호를 송출할 수 있는 LFM(Linear Frequency Modulated) 펄스 신호가 좋다.

또한 연속적인 측정을 가능케하고 측정치의 정확도를 높일 수 있도록 개개의

LFM 펄스를 연속적으로 송출 할 수 있도록 설계 해야 한다.

LFM 펄스 신호는 식 (8)와 같이 표현 된다.

$$s(t) = p(t) \cos(f(t)) \quad \text{----- (8)}$$

여기서,

$$p(t) = \begin{cases} 1 & \text{for } 0 \leq t \leq T_p \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

$$f(t) = \pi \frac{Wt(t-T_p)}{T_p} + 2\pi f_c t$$

W = Sweep bandwidth, T_p = 펄스폭, f_c = Carrier 주파수

식 (8)로 주어진 LFM 신호의 순간 주파수는(Instantaneous Frequency)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} f(t) = f_c - \frac{W}{2} + \frac{W}{2} t \quad \text{----- (9)}$$

즉 순간 주파수는 펄스폭 $f_i(0) = f_c - \frac{W}{2}$ [Hz]에서부터 $f_i(T_p) = f_c + \frac{W}{2}$ [Hz]

까지 선형적으로 변화한다.

식 (8)에 주어진 LFM신호는 Rectangular window를 갖는다. 그러나 실제 송파용 트랜스듀서의 효율적 작동 주파수 대역이 한정되어 있고, Power-amp가 급격한 에너지의 변화에 따라 갈 수 없으므로 식 (8)에 주어진 송출파형은 송파용 트랜스듀서에 보내도 동일한 파형의 음파가 생성되지 못한다. 그러므로 현재 개발된 능동소나 시스템은 송출 펄스의 시작과 끝 부분의 에너지 변화율을 줄이기 위하여 식 (8)에서 사용된 Rectangular envelope $p(t)$ 대신 식 (10)에 주어진 Gaussian envelope를 사용 하면 다음과 같다.

$$g(t) = \begin{cases} \exp[- (t - T_p/2)^2 / (2T_g)] & 0 \leq t \leq T_p \\ 0 & \text{Elsewhere} \end{cases} \quad \text{--- (10)}$$

T_g : Gaussian envelop 시작점에서의 크기를 조정하는 변수

3) Pulse sequency

능동 소나 시스템에서 한개의 펄스만을 송신하는 경우는 거의 없으며 여러개의 펄스를 계속적으로 송신하여 Target을 탐지하거나 Target의 특성을 추정한다.

Fig. 4 - 2은 Pulse sequence 설계시 결정해야 할 각종 변수들을 보여 주고 있다. 펄스폭 T_p 는 요구되는 최소 탐지거리 R_{min} 에 의하여 결정되며, 최소 탐지거리 요구에 맞추어 T_p 를 줄일 경우 송출파 Energy의 감소로 인한 수신파의 SNR가 떨어져 거리의 측정치의 정확도가 감소하므로 거리의 측정치 정확도와 최소 탐지거리 사양 사이의 역비례 관계를 설계시 고려 하여야 한다. 실제 시스템에서 송파기와 수파기로 동일한 소자를 사용하는 것이 일반적이고, 별도의 송파기와 수파기의 소자를 사용할 경우에도 송파기로 부터 수파기에 직접 전달 되는 파를 측정하지 않기 위해서 송파가 진행되는 동안 수파기를 작동하지 않는 것이 상례이다. 그러므로 실제 수파 가능시간 (Range window : τ)은 Pulse 송파 시작시점을 기준으로 다음과 같이 결정 된다.

$$T_p \ll \tau \ll \Delta \quad \text{----- (11)}$$

그러므로 수파를 시작 하는 시점(τ_{min})은 Pulse 폭 T_p 보다 커야하며 R_{min} 은 다음과 같이 결정 된다.

$$R_{min} = \frac{C \tau_{min}}{2} \gg \frac{C T_p}{2} \quad \text{----- (12)}$$

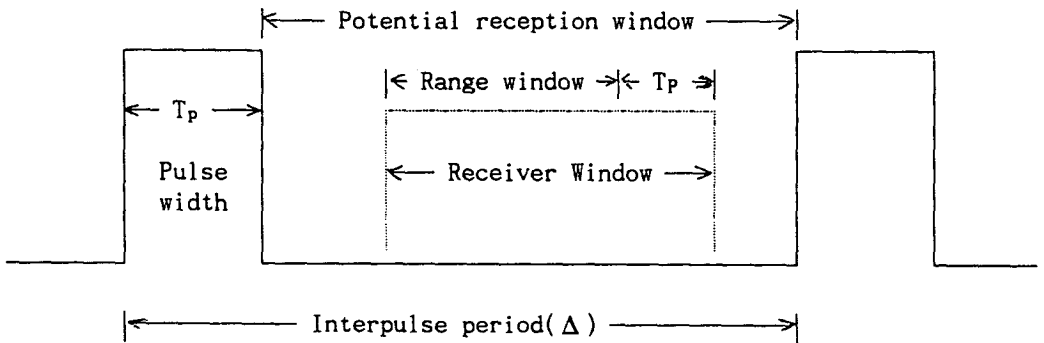


Fig. 4 - 2. Timing of events in a pulsed sonar

4) 수파기에서의 신호

능동소나에서 송신된 신호는 수중으로 전파되고 Target에서 반사되는 과정에서 변형되고 해양에 존재하는 소음과 함께 능동소나 수신부에 돌아 올 것이다. 이러한 수신파는 능동소나 수신부 종류 중 가장 중요한 Correlation receiver 구조를 갖게 된다.

능동 소나에 수신되는 신호가 Target의 거리 및 속도에 따라 지연되고

Doppler-shift된 신호와 해양 소음으로 구성되어 있다고 가정하는 방법으로 수신된 신호 $r(t)$ 를 표현하면

$$r(t) = \sqrt{2E_t} \operatorname{Re} [a e^{j\theta} S_t(t-\tau) e^{j2\pi f_d t} e^{j2\pi f_c t}] + W(t) \quad \text{--- (13)}$$

τ : delay , f_d : doppler shift

이다. 이 Correlation Receiver의 기본 작동 l 은

$$l = \left| \int_0^T R(t) S_t(t;a) dt \right|^2 \quad \text{--- (14)}$$

$R(t)$: 수신파의 complex envelope

$S_t(t;a)$: 미지 변수 a 가 포함된 송신파의 복사

식 (14)로 표현 된다.

Target 의 탐지가 목적일 경우 a 는 소나 사용자가 관심을 갖고 있는 Target 의 거리와 속도에 따라 결정되어, 식(14)에 따라 l 을 구한 후 값을 주어진 기준치 (Detection threshold)와 비교하여 Target의 존재 여부를 결정 한다.

Target의 거리 및 속도를 추정하는 것이 목적일 경우 능동 소나 시스템은 식 (14)로 표현되는 l 값을 Delay 및 Doppler-shift 를 포함하는 a 의 함수로 구하여 l 의 값이 최대가 되는 a 를 이용하여 Target의 거리 및 속도를 추정한다.

第 2 節 위치 측정

1. 거리 측정의 원리

해양에서 해저에 위치한 장비의 거리를 측정하는 방법에는 전기 신호의 매질에 대한 전달 시간을 계산하고 전기신호의 Turn-around Time을 측정하여 이 측정된 신호와 매질의 전달 시간을 합성하여 장비의 거리를 측정한다.

Fig. 4 - 3 에서 선체에서 음파를 보내면 장비 B에서 받는 즉시 응답신호를 보내며 이 때 매질에 대한 거리의 수식은 아래와 같다.(1986, 전)

$$R = \frac{1}{2} \{ (c_A \times t_A) + (c_B \times t_B) \} \quad [m] \quad \text{--- (15)}$$

식(15)에서 R 은 계산거리 이고 $c_A = c_B$ 는 음의 진행속도이며 $t_A = t_B$ 는 도달시간이다. 이는 매질과 거리가 동일한 조건에서 발생하는 시간에서의 식이다.

$$R = \frac{1}{2} C \cdot \tau \quad [m] \quad \text{----- (16)}$$

$$\tau = t_A + t_B, \quad C = c_A + c_B$$

음파의 속도 C는 앞서 논의 되었던 식을 따르며 보통 1500 [m/sec]로 가정하여 사용한다.

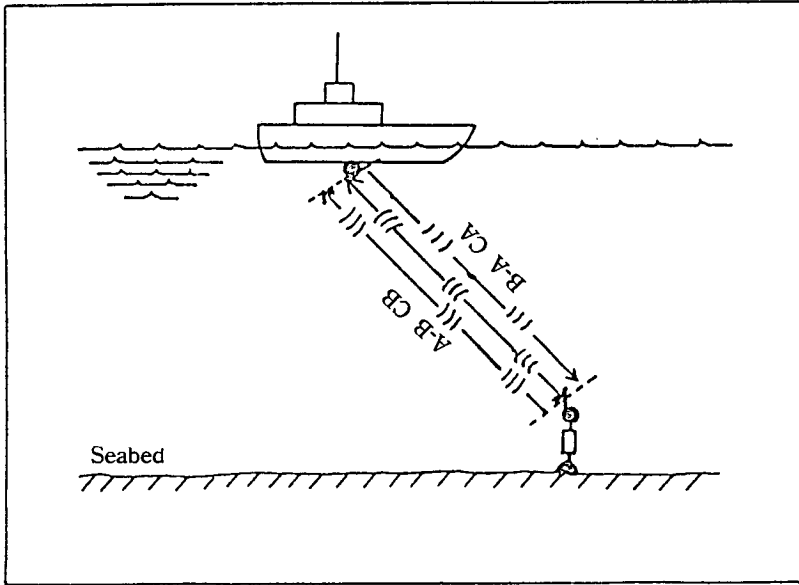


Fig. 4 - 3. Propagation of acoustic from under water equipments

2. 위치측정의 방법

해저에 있는 장비 또는 기기의 위치를 정밀하게 측정하는 방법에는 Long Baseline, Short Baseline, Super-short baseline, Pinger 에 의한 방법들이 있으며 Table 4 - 2와 같은 장점 및 단점이 있어 사용하고자 하는 분야에 맞는 선택이 중요하다.

먼저 Long baseline 시스템(Fig. 4 - 4 (a))을 보면 비교적 넓은 지역에서 사용되며 용도가 다양하게 쓰인다. 이 방법은 선체에 하나의 Acoustic Module 을 설치하고 Transponder 를 3대 정도 넓게 해저에 설치후 잠수정에 Acoustic Module을 설치하여 배와 잠수정의 위치를 앞으로서 다양한 조사 활동과 이에 필요한 자료를 수집후에 이 지역에서의 해저 작업, 파이프 공사에 있어서의 다양한 조사를 정밀히 할 수 있다.

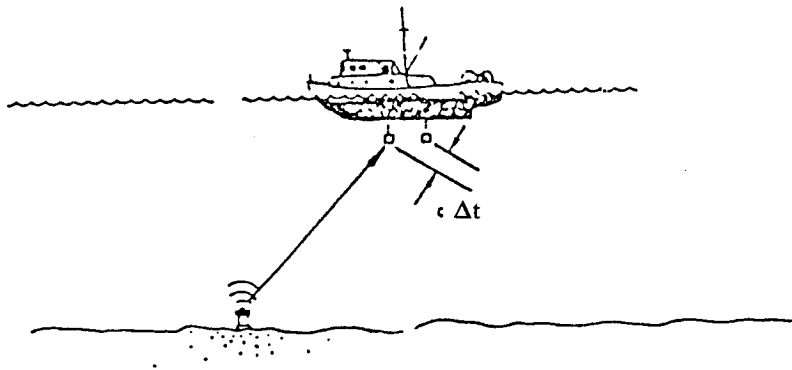
Short baseline 시스템(Fig. 4 - 4 (b))은 먼저 선체에 Acoustic Module을 3 ~ 4 대를 정확히 측정한 위치에 수직으로 세우고 잠수정에 Transponder 를 설

치하여 위치를 알아 내는 방법이며 Super-Short baseline(Fig. 4 - 4 (c))은 선체에 Transducer들이 하나의 센서로 만들어진 것을 설치하고 해저에 Transponder를 설치한 것으로 쉽게 위치를 측정 할 수 있는 시스템이다.

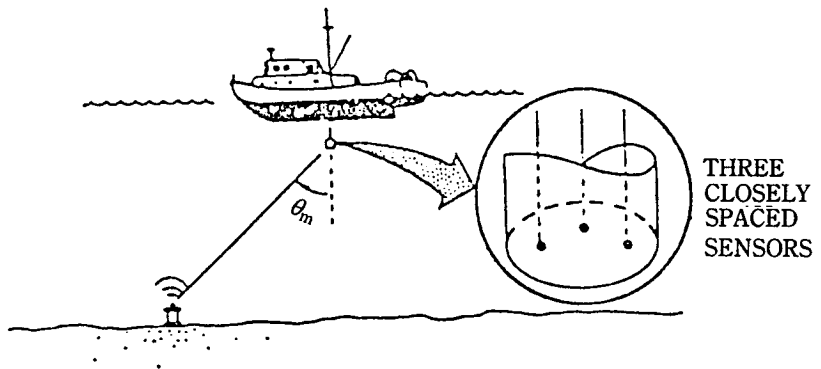
Table 4 - 2. Acoustic position reference system advantages and disadvantages

Operating mode	Advantages	Disadvantages
Long-baseline System	<ul style="list-style-type: none"> - Highest potential accuracy - Relatively unaffected by vessel motion - Accuracy preserved over wider operating area - Relatively unaffected by acoustic ray bending 	<ul style="list-style-type: none"> - Requires multiple subsea transponders on the bottom - Must have two-way acoustics
Short-baseline System	<ul style="list-style-type: none"> - Good accuracy potential - Requires only single subsea pinger 	<ul style="list-style-type: none"> - Requires multiple vessel-mounted hydrophones - Requires vertical reference stabilization
Ultrashort-baseline System	<ul style="list-style-type: none"> - Requires only a single subsea pinger - Requires only a single vessel-mounted hydrophone 	<ul style="list-style-type: none"> - Highest noise susceptibility - Requires vertical reference stabilization - Requires hydrophone alignment corrections

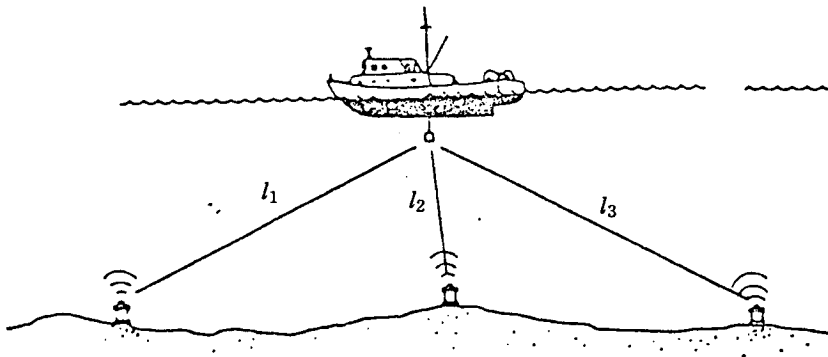
(Oceano Instrument)



(a) Conventional short baseline



(b) Ultra short baseline



(c) Long baseline

Fig. 4 - 4. Acoustic position referencing methods

3. 관측 장비

1) Medium Frequency Acoustic Short Baseline System

이것은 Short baseline에서 언급한대로 2 또는 3 개의 AM(Acoustic Module)로 잠수정의 위치를 알아내는 시스템으로 RM(Range meter)와 Computer에 의하여 Transmitter/Receiver Acoustic array(4 개), 잠수정에 하나의 Transponder로 매 4초간 신호를 주고 받아 배의 Pitch, Roll과 Heading을 계산하여 잠수정의 위치를 알아내는 것으로 시스템의 구성도는 Fig. 4 - 5 이다.

그 회로를 분석해 보면 전원은 입력 110 - 220 [V]과 20 - 29 [V] DC의 전원이 공급 된다. Junction Box는 AM 로 부터 들어 오는 신호를 RM에 순서적으로 입력 시켜 각 채널 별로 거리를 측정 한다. RM은 JB(Junction box)를 통하여 들어오는 신호를 판별하여 각 채널별로 거리를 계산하고 컴퓨터로 GP-IB 또는 RS422를 통하여 보낸다. Filter Board는 신호를 분석하여 잡음을 줄이기 위한 방법으로 원래의 주파수에 가감을 한후 노이즈를 제거하는 방법으로 구성 되었다.

AM의 특징은

- 주파수 범위가 20 ~ 40 [kHz] 로 송신 ,수신
- 작고 가볍다.

(Length:496 [mm], Diameter:80 [mm], Weigh 2.5 [kg] in air)

- Range meter 와 AM의 거리가 100 [m] 까지 가능
- AGC System

이고 이것의 규격은

- Transducer Beam pattern:Hemispherical at +/- 3[dB]
- Supply Voltage 24 [V]DC (19 - 30 [V])

- Consumption : 70 [mA] continous, up to 1.2 A during 50ms at each acoustic transmission

ET는 잠수정에 설치하여 신호를 받은후 그에 대한 응답으로 신호를 보내주는 장치이다. VRU(Vertical reference unit)는 배의 Pitch and Roll 에 대한 보상을 하여 줌으로써 잠수정의 위치를 정확히 알려주는 방법이다.

AM의 설치의 문제중 제일 중요한 것이 수평과 수직의 문제가 대두된다. 왜냐하면 이 문제는 첫째 잡음을 줄이는 방법으로 배의 바닥으로 부터 최소한 1 [m] 이상을 띄우고 둘째는 AM 각각의 거리는 20 - 50 [m] 정도를 유지하여 수직으로

내려 정확하게 AM간의 간격을 유지하여 그 자료로서 위치를 파악 할 수 있기 때
문이다.

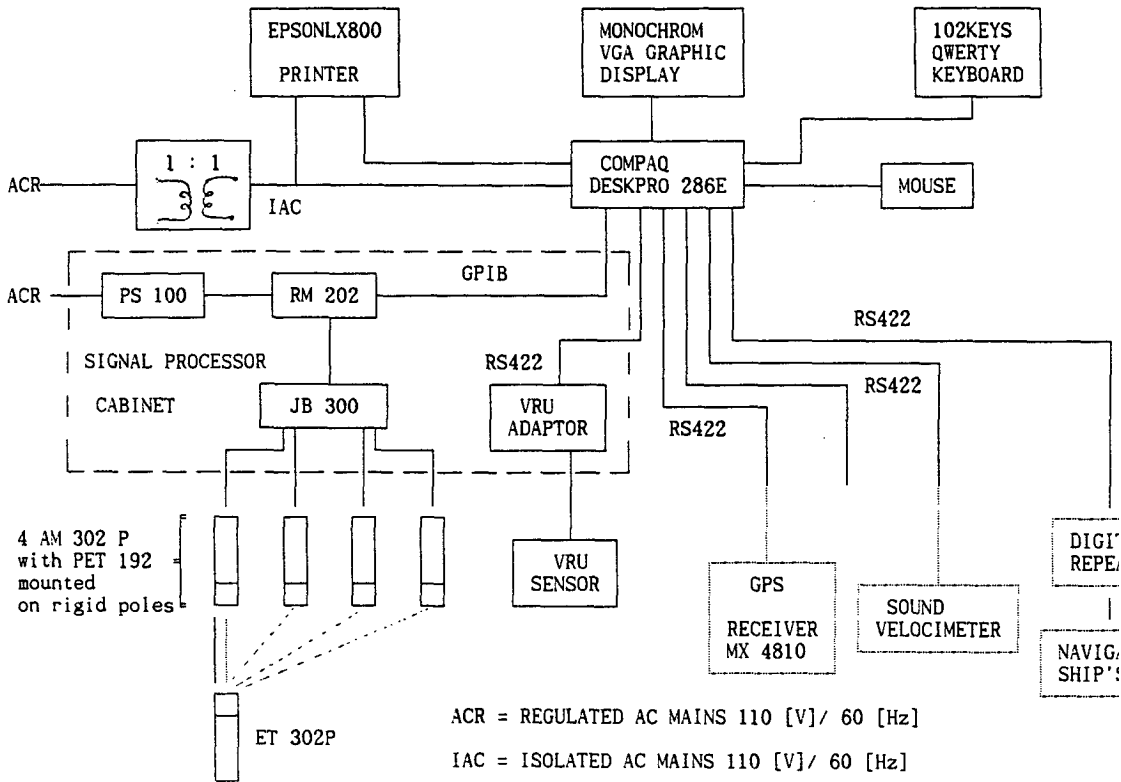


Fig. 4 - 5. MF acoustic short baseline system

2) 수중 제어 장치

해양의 변화를 관찰하기 위해서는 해양 관측 장비를 海中에 장기간 계류시켜야 한다. 계류된 장비의 회수시 제기되는 문제는 자료의 질저하와 장비의 분실로 인한 자료의 손실과 경제적인 부담감을 없애기 위해 Fig. 4 - 6과 같은 시스템을 구성하여 선상기기가 수중기기를 제어하면서 거리 및 방향을 알아야 하고 수중에 계류된 기기는 船上에서 보내는 신호를 감지하여 기기의 상태를 알려 주어야 한다.

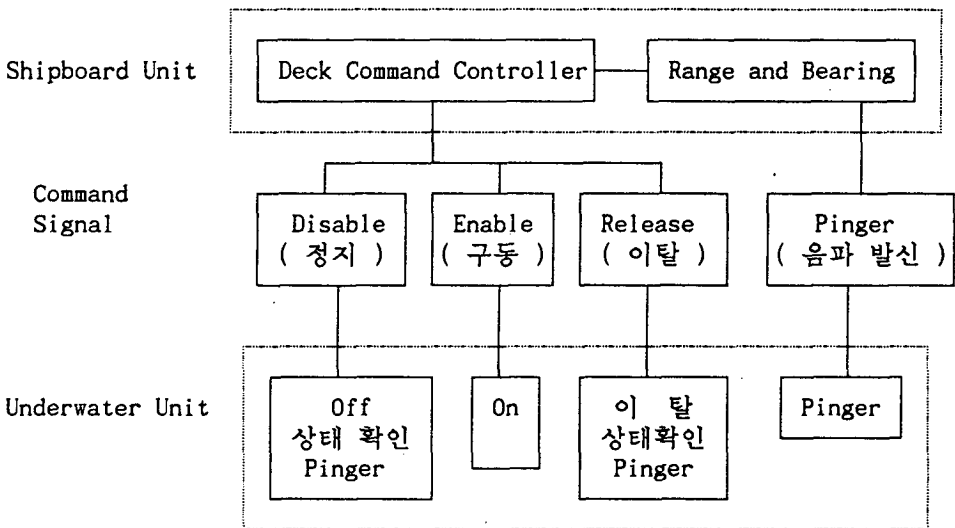


Fig. 4 - 6. Block diagram of acoustic release system

Fig. 4 - 7, Fig. 4 - 8은 전자 Board의 구성도로 이것들은 상호 송수신시 효율적으로 사용하기 위하여 명령어를 8개의 주파수에서 각각 4개의 주파수를 선택해 하나의 명령어로 만들어 디지털화를 시켰다. 각 명령어에 따라 분리된 8개의 주파수군은 9.146 [KHz] ~ 10.526 [KHz] 이며, 그 간격을 대략 200 [Hz]로 사용되었다.

입력되는 모든 숫자를 주파수의 조합으로 만들어 하나의 Word로 구성하여 전달하는 방법으로 각 명령어의 신호를 한 장비에 대해 3개의 조합으로 구성한 것이다.

신호를 코드화하기 위해 입력단에서 들어오는 신호를 Encoder를 통하여 입력되는 값에 대한 하나의 명령어 주파수를 Timing control로 조정하여 하나의 명

령어 Word로 구성하였다. 즉, 각각의 주파수를 합성하여 입력값에 대한 주파수를 할당하여 FSK(Frequency Shift Keying)와 같은 형식으로 만들어서 명령을 수행하며, 수중에서의 신호가 정재파가 되는 것을 막기 위하여 연속적으로 수회 정도 반복하여 신호가 정확히 전달될 수 있다.

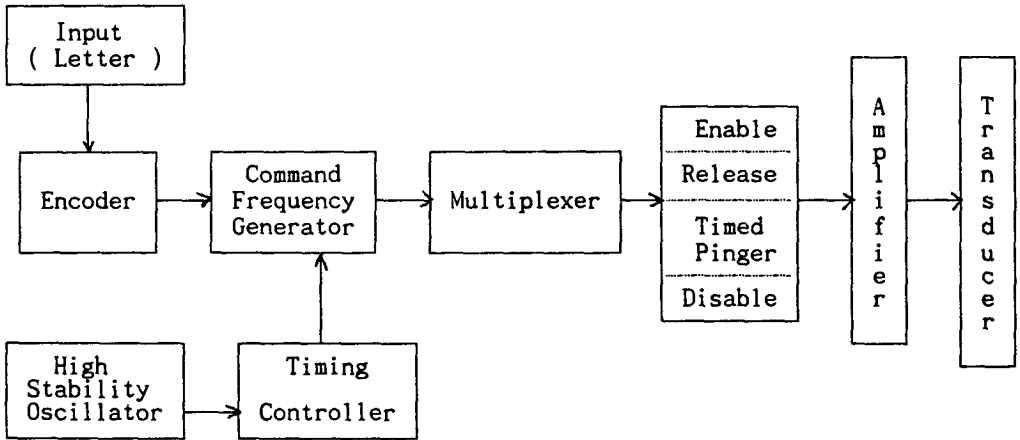


Fig. 4 - 7. Block diagram of deck command controller

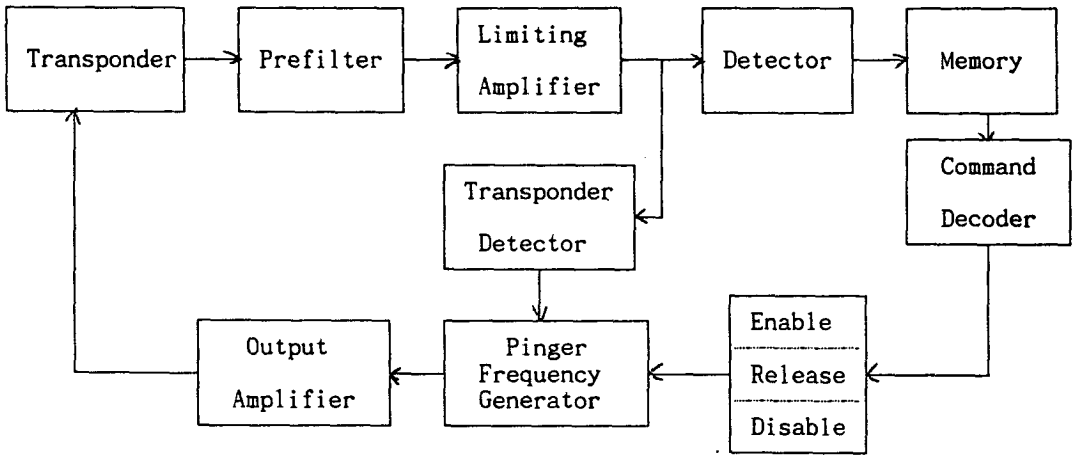


Fig. 4 - 8. Block Diagram of Underwater Unit

第 3 節 수중통신

해양에 관한 각종 정보를 실시간으로 수집하여 데이터를 풍부하게 얻어 이것을 유익하게 이용하려는 노력으로 Table 4 - 3과 같이 해역에서의 통신은 해상과 해중에서 차이가 있음을 알 수 있다. 수중 관측기기로부터 육상수신국까지는 물과 공기라는 매질이 존재하는데 매질이 바뀔 때 마다 자료의 전송방법이 다르게 되며 공기중에서는 주로 전파를 이용하여 육상수신국까지 전송하며 수중에서 주로 음파를 이용하게 된다.

Table 4 - 3. A outline of ocean communication

구분	분 류	내 용
해 상	1. 전파	중 파 통신 : 근거리 통신 단 파 통신 : 원거리 통신 초단파 통신 : 근거리 통신(주로 전화), 위성 통신 Micro 통신 : 근거리 통신, 항만내 통신(전화), 위성통신
	2. 빛	적외·자의 통신 : 전파 방해 등 하기 어려운 비밀 통신에 이용 가시·적외 TV : 해상 및 기상의 측정에 이용 그 외의 광통신
해 중	1. 음파 2. 전파 3. 빛	음파 통신, 음파 전화, 음파 TV 장파 통신 : 수중과 해상과의 접합 통신에 이용 수중 TV, 레이저 통신, 레이저 레이다(RADAR)

수중에서의 통신은 어려움을 주기 때문에 이에 대한 연구의 방향이 두가지로 나누어지는데 첫째는 수중에서 효과적으로 정보를 전송 할 수 있는 송수신기의 개발과, 둘째는 수중 채널의 복잡한 특성 및 잡음으로부터 신호에 포함된 정보를 보호하기 위한 신호처리에 대한 연구이다.

1. 음파의 전달 경로 및 통신

음파의 음원에는 기계식(예, 사이렌), 전기 기계식 및 방전을 이용 한 것이 있는데 수중통신 관계에서 대개 티탄산 바륨 자기계 등의 압전식인 것이 많고, 저주파 음파의 경우는 자왜식이 이용된다. 일반적으로 전파의 전반 속도(傳搬速

度)는 매질의 밀도와 탄성율에 관계되어 밀도가 낮을 수록, 또 탄성율이 클수록 빨라진다.

해수에서의 음파의 전달경로는 Fig. 4 - 9와 같이 나타나며, 전달됨으로서 통신에 생기는 문제는 첫째는 음파가 닿지 않는 부분(Shadow zone)이 있고, 잡음, 다중경로의 세가지가 있다.

천해의 경우 물 표면에서의 반사는 아주 정적인 반사체로 부터 아주 Random한 양상으로 음파를 분산시키는 격렬한 상태까지 다양하며 바닥에서의 반사손실 또한, 바닥이 서로 다른 여러가지 재질들이 다층 구조를 이루고 있음으로써 음파의 반사도 반사 계수의 크기 및 위상편이가 주파수와 입사각의 복합 함수로 복잡한 양상을 띤다. 끝으로 매질에 의한 흡음 손실은 근거리 통신의 경우 기하학적인 전송 손실에 비하여 훨씬 작다.

특히 천해의 통신은 물표면과 바닥이 하나의 도파관 구실을 함으로써 다중 반사(multipath reflection)로 인한 echo 현상이 신호를 심하게 왜곡 시키는 점이 큰 문제가 된다.

음파에 의한 통신 방식으로서 진폭변조, 펄스 통신 등은 특히 문제없이 가능하고, 주파수 변조, 위상차이의 검출 등에 의해 정보를 얻는 경우가 많다. 음성 통신(음파 통신)에는 가청음파 그대로 사용하는 것과 초음파를 반송파로하여 음성을 전송하는 방식이 연구되고 있는데, 잡음이나 도달 거리 따위의 점에서 일반적으로 후자가 우수하다. 이 때의 반송파의 주파수는 감쇠 문제까지 생각하여 50 [kHz] 정도가 적당하다고 한다. 다만 음속이 1500 [m/sec]이기 때문에 장거리 통화는 좋지 못하며, 대개 1.5 [km] 정도를 한계라고 본다.

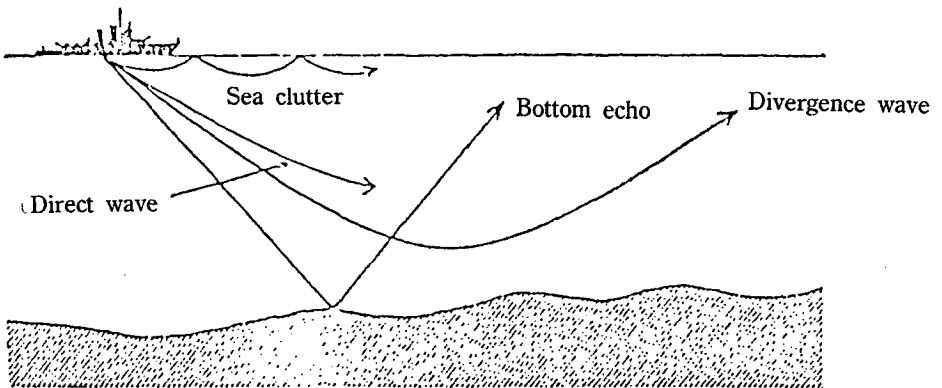


Fig. 4 - 9. Sound wave path in the ocean

2. 수중 자료 전송

수중에 설치된 장비로부터 육상의 사용자까지의 수중자료전송 경로는 Fig. 4 - 10과 같으며, 실시간으로 보내오는 자료를 받아봄으로써 자료의 이용 가치와 효율성을 높일 수 있다. 이 시스템은 수중의 음파를 이용한 전송방식과 육상의 전자파를 사용한 전송방식의 복합 시스템으로 구성된 것이다.

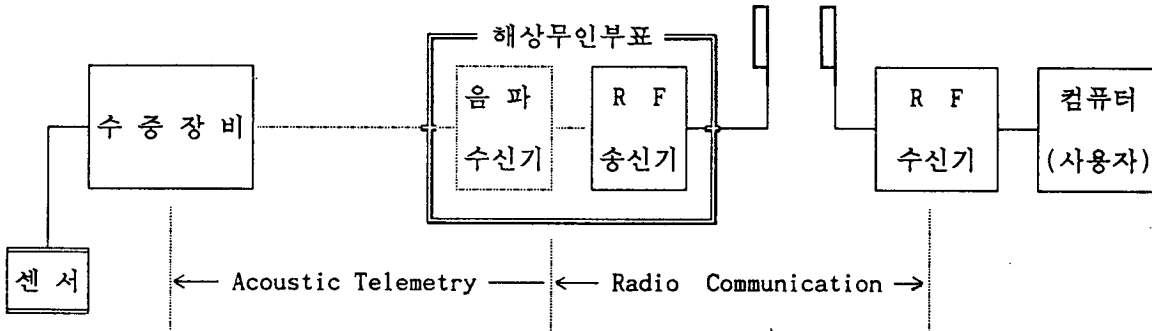


Fig. 4 - 10. Data telemetry from underwater sensors to onland computer

수중에서 음향을 사용한 변조는 주파수 편이 키잉(FSK:Frequency Shift Keying)과 위상편이 키잉(PSK:Phase Shift Keying)의 두 가지를 사용하는 데, 자료의 오차 발생면에서는 PSK전송방식이 FSK 전송방식 보다 우수하지만, 전송 속도가 빠르고 수신기 및 전자회로의 구성이 경제적인 FSK 전송방식을 주로 사용하고 있다.

Fig. 4 - 11은 Word를 구성한 예인데 FSK 변조시에는 각 Bit의 값 "0"과 "1"에 대응하는 주파수가 출력된다.

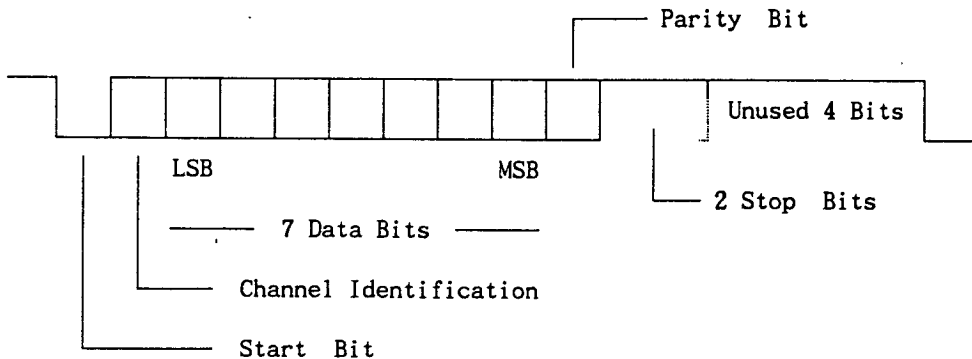


Fig. 4 - 11. Word Structure

음파를 이용한 수중자료 전송 해상부표의 송신 전자 Board의 블록도는 Fig. 4 - 12와 같으며 해상부표에서의 수신 전자 Board 블록도는 Fig. 4 - 13과 같다.

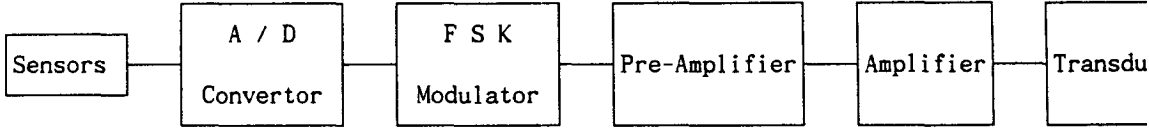


Fig. 4 - 12. Block diagram of a acoustic transmission

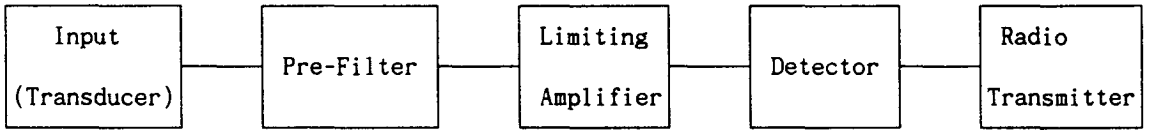


Fig. 4 - 13. Block diagram of acoustic receiver and transmitter

第 4 節 해저면 관측 장비

해저의 굴곡이나 저질상태를 알기 위한 음향탐사 방법은 해저면에 수직하게 입사되는 Pulse의 후방 산란 신호에 의한 해저면의 굴곡상태 및 저질의 종류 파악 방법과 장거리 음파 전달의 경우 해저와의 상호 작용에 의한 수신신호의 변화량을 역으로 분석하여 해저의 음속분포 및 감쇠효과를 계산하는 방법으로 크게 나뉠 수 있다. 전자는 주로 고주파 Transducer를 사용하나 후자의 경우는 저주파, 특히 Air Gun, Spark Array, TNT 등을 음원으로 사용하여 해저 구조를 파악한다. 따라서 Side Scan Sonar, Echo Sounder 등이 고주파를 이용한 장비이며 저주파는 지구물리 탐사시에 주로 사용되는 것으로 이때는 Explosive Source의 Energy Spectrum을 미리 알고 있어야 한다.

한편 해저 상태의 파악과 더불어 더욱 중요하게 부각되는 것이 해저 퇴적물의 이동 파악인 바 이를 위해서는 해저에 근접한 해수의 운동 즉 해류의 수직 구조를 알아야하며 이를 위해서 ADCP의 활용이 기대되고 있다. 또한 해저에 근접한 층에서의 퇴적물 이동시 발생하는 소음을 측정하여 이동량을 추측하기도 한다.

심해저 광물자원 탐사가 선진국의 기술 개발로 가능해지자 근래에는 단시간에 넓은 해역을 탐사하기 위한 방법으로 Multiple Beam을 사용한 Echosounder 혹은 Swath Coverage용 Sonar가 등장 하였다. 특히 일본의 경우 심해 잠수정(Shinkai 2000)을 이용 영상 신호를 음파에 실어 전송하는 실험에 성공 하였다. 이 때 20 ~ 30 [kHz] 음파를 사용 하였으며 이러한 기술은 심해 (4000 ~ 5000 [m]의 수심)에서 해수면 까지의 자료 전송이 Cable에 의해 이루어지던 기존의 방법에서 생기는 자료손실 및 운용의 어려움을 극복할 수 있는 획기적인 기술임에 틀림 없을 것이다.

따라서 해저 상태 파악은 이제 영상화한 자료로 얻을 수 있게 되어 해저의 모양을 상세히 관측기 위한 고주파의 사용이 더욱 각광을 받을 수 있게 되었다.(나정렬, 1990)

1. 응용 원리

1) 散亂을 이용한 방법

해저면의 형태를 항공 촬영한 사진처럼 영상으로 얻기 위해서 개발된 장비가 Side Scan Sonar라는 장비로서 이의 원리는 음파의 후방 산란 강도가 해저면의 구성 물질에 따라 각각 독특하게 기록되어 나타나는 현상을 이용하여 해저면의

영상을 얻을 수 있도록 한 것이다.

해저면 탐사용의 Side Scan Sonar를 이용할 경우, 재래적인 측심조사를 이용할 때보다 더욱 우수한 해저면의 형태를 파악할 수 있다. 왜냐하면 Side Scan Sonar를 이용하는 탐사는 면개념의 탐사이므로 調査測線 下部의 해저지형 단면을 결정하는 線概念의 측심 조사로서는 불가능한 測線 사이의 해저면 상황을 상세히 결정 할 수 있기 때문이다.

Side Scan Sonar는 각각의 작은 지역 ΔA 로 부터 후방 산란 된 음파의 양을 측정하는 것으로 극히 짧은 음파를 발생시켜 해저면의 일정한 조사범위를 탐사한다 (Fig. 4 - 14 (a)). 이 때 산란된 음파와 조사 범위는 走時(Travel Time)의 함수이다. 거친 해저면 표면에 대해 감지된 신호는 Fig. 4 - 14 (b)와 같이 감쇠하며(0.3초 부근의) 작은 丘陵은 음파를 좀더 강하게 산란 시키고 뒷쪽으로 일정 면적에 대해 陰影(Shadow, 수신파가 감지되지 않음)를 갖는다. 이 경우 전체적인 신호는 약 80 [dB] 정도로 변하며 이것은 감지기내에 TVG(Time Varied Gain)를 포함 시켜 상쇄 된다. 따라서 출력의 질은 TVG의 조정에 매우 민감해진다.

해저면에서 산란되는 음파의 양은 해저면의 구성 물질과 국부적인 거칠도 (Roughness)에 의해 좌우된다. 일반적으로 거칠도 만으로는 해저면의 구성 물질을 결정할 수 없으므로 해저면 퇴적물의 채취 시료 등에서 얻는 더 많은 정보를 이용하여 후방산란된 기록과 비교함으로써 해저면에 대한 더욱 정밀한 정의를 내릴 수 있다.

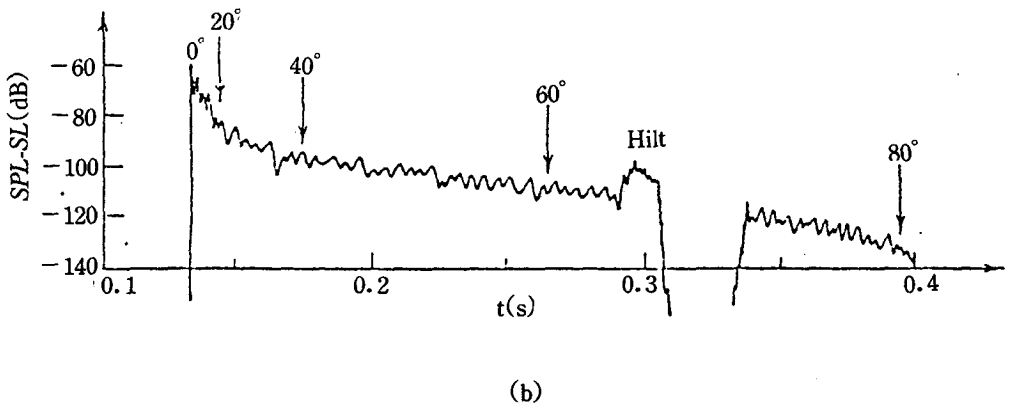
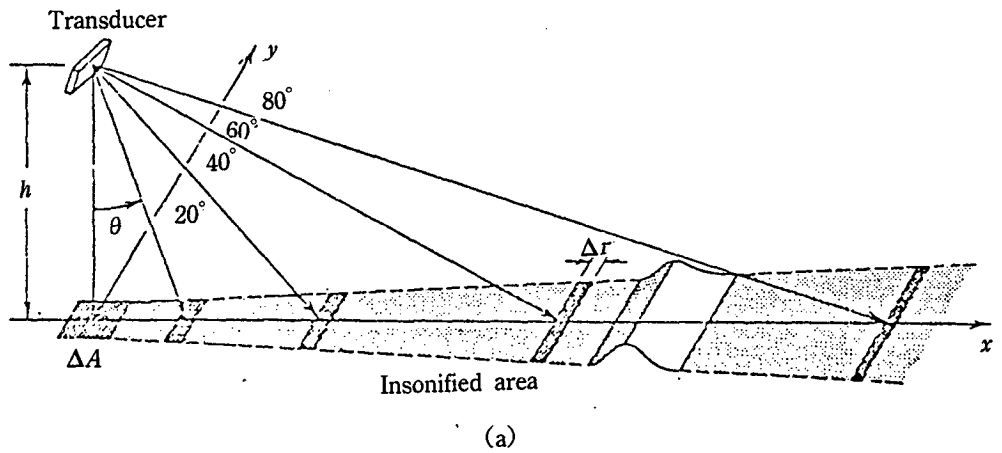


Fig. 4 - 14. Geometry for bottom-scanning and backscattered sound.
 (a) Bottom-scanning sonar, (b) Relative backscattered sound level. Sketch is made for a transducer 100 [m] above the bottom

2) 반사를 이용한 해저면의 조사

해저면을 구성하는 물질에 따라 음파의 반사 강도(Reflection intensity)가 달라진다. 역으로 이러한 현상을 이용하여 해저면의 음향학적 반사 특성에 따라 해저면 표층 퇴적물의 분포를 유추 할 수가 있다. 즉, 해저면으로 부터 반사되는 음파의 에너지는 해저면의 음향 임피던스와 관련된다. 또한 음향 임피던스는 해저면 퇴적물의 밀도와 음파 전달 속도의 곱이므로 해저면에 대한 반사특성을 정량적으로 결정 함으로써 해저면 퇴적물의 종류와 분포 상태의 특성을 유추 할 수 있다.

해수중에서 발생하는 음파는 탄성적으로 분리 할 때 P파 (primary wave)로 분류된다. 이러한 P파가 입사각(ϵ)로 해저면에 입사한 후 다시 반사 할때 Fig. 4 - 15 입사파의 진폭에 대한 반사파의 진폭비(A_1/A_2)로서 정의되는 반사계수 (reflection coefficient)는 수직입사($\epsilon=0^\circ$)의 경우

$$R_0 = \frac{A_2}{A_1} = \frac{\rho' V_p - \rho V_0}{\rho' V_p + \rho V_0}$$

가 되며 비수직입사($\epsilon \neq 0^\circ$)에 대해서는

$$R(\epsilon) = \frac{A_2}{A_1} = \frac{f(\epsilon, \rho, \rho', V_0, V_p, V_s)}{g(\epsilon, \rho, \rho', V_0, V_p, V_s)}$$

ρ : density of sea water ρ' : density of seabed sediments

V_0 : p-wave velocity in sea water

V_p & V_s : p- and s-wave velocity in sediments

θ : angle of incidence

로 쓸수 있다(Ewing and Jardetzky, 1957).

퇴적물의 종류와 특성에 따른 반사계수의 거동을 고찰 함으로써 반사계수와 퇴적물 특성과의 관계를 인지 할 수 있으며, 반사 특성에 따른 해저면의 분류는 지질공학, 해양 구조물 설치, 그리고 해상 방위력 증강을 위한 국방과학 자료로서 매우 중요한 가치를 갖고 있다.

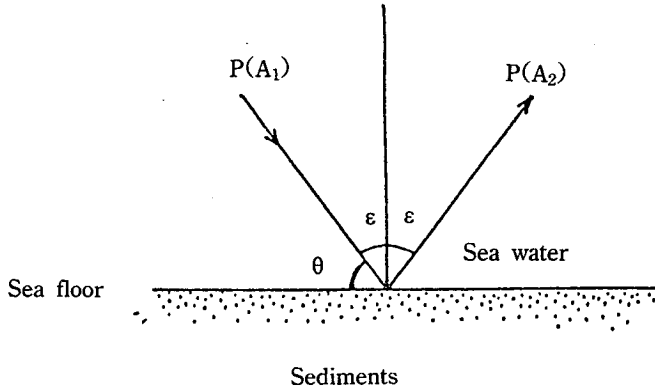


Fig. 4 - 15. Reflection of p-wave at the seafloor acting as a liquid-solid interface

3) 해저 퇴적물의 음향감쇠

일반적으로 음파가 均質한 해저 퇴적물내를 傳播할 때 발생하는 에너지 손실은 전파거리에 따른 기하학적 발산 손실(geometric spreading loss) 및 퇴적물의 흡음손실(absorption loss)로 나뉘어진다. 기하학적인 확산손실은 퇴적물의 특성과 관계없이 음파의 전달과정중 파면이 넓어지면서 단위 면적당 음파에너지가 감소하는 현상이며, 전달손실은 음향임피던스가 다른 경계면에서 발생하는 음파의 반사 및 mode의 변환등과 같은 에너지의 분배에 의해서 발생하는 손실이다. 그러므로 퇴적물의 음향특성을 지시하는 것은 흡음 손실로서 통상 감쇠(attenuation)라고 정의 된다.

음파의 전파속도는 매질의 탄성특성(elastic properties)에 따르지만 감쇠는 비탄성특성(anelastic properties)으로서 표현 된다. 減衰特性은 매질의 물리적 상태, 포화도 등의 정보를 지시하므로 퇴적물의 음향변수로서 중요한 의미를 갖는다.

감쇠의 주요원인은 퇴적물의 결합구조와 관계되는 입자간의 접촉면에서 마찰 손실과 결합구조상에 존재하는 해수의 점성에 의한 점성손실로 크게 나누어지며, Sand 및 Sandy silt와 같이 큰 입자의 퇴적물에서는 마찰 손실에 의한 것이며, Clay와 같이 세립 퇴적물에서는 입자 상호간의 전기화학적 결합에 기인된 것으로 추정하고 있다.

퇴적물의 유형에 따라 음향변수값이 특징적인 값을 보이므로 신뢰 할 수 있는 범위내의 퇴적물의 물성을 이용하여 음향 반사계수를 추정 할 수 있다.

2. 관측 장비

1) Side Scan Sonar

해저면에 있는 작은 물체에서 반사파는 신호를 수신할 수 있는 능력은 송신 신호 주파수에 의해 결정된다. 높은 주파수의 음파를 사용하면 작은 물체를 탐지할 수 있다. 그러나 고주파수 음파는 수중전파시 흡수율이 높아 탐지거리가 감소한다. 그러므로 수심이 깊은 경우 이러한 고주파 탐지장비는 해저면 근처에서 사용되어야 한다.

Short range sonar라고 불리기도 하는 Side Scan Sonar는 고주파수 음파를 사용한다. Resolution을 높이기 위하여 음향센서 Array가 해저면을 좁은 Beam으로 Scanning할 수 있게 구성되어 있다. Side scan sonar의 운동궤적에 따라 연속적으로 Echo를 탐지하여 강한 반사파가 탐지 될 경우 검은점으로 반사파가 없는 경우 흰점으로 표시한다. 그러므로 방해물은 검은점의 집단으로 보여지고 빈공간은 흰점으로 나타나므로 해저면의 Negative photography와 비슷한 화상을 제공한다. 이 화상을 Sonar imagery라 부르며 이 화상은 해저 지형의 비교적 미세한 특성 탐사에 이용된다.

현존하는 수상선 견인식 Side Scan Sonar는 해저면 약 100 [m]위에서 폭 1.5 [km]의 해저면을 약 2 [km/hour]로 측정 할 수 있다. (홍도천, 1990)

2) Inverted Echo-Sounder

선박에서 일반적으로 사용되는 측심기는 Beam 폭이 좁고 고주파의 Transducer를 이용하는바 이 측심기를 거꾸로 수면을 향하여 세우게 할 시에는 (해저에 고정 설치 혹은 입사각을 염두에 둔 선박에서 수면하에 설치) 수면 혹은 수면 부근의 산란강도를 측정 할 수 있게 되며 역시 해면의 상태를 파악하는 방법이 된다. 이 방법은 널리 사용되어 파고측정 및 수면 변위 측정에 이용되고 있다.

3) 지층 탐사기

O.R.E.사의 Transducer 132-B형을 사용하여 해저 지층탐사를 하는 장비로 해수면에서 발사한 비교적 강력한 저주파의 음파가 해저면하의 음향학적 임피던스 (Acoustic impedance)가 다른 층들의 경계면에서 반사되어 돌아올때 이 신호들을 기록, 분석함으로써 해저의 지층구조를 알아내는 장비이다. 해상조사시에는 기록

기와 에너지원(Energy Source)은 조사선위에 설치되고 송수신기는 파도에 의한 영향을 피하고 반사 기록을 향상 시키기 위하여 수면아래 0.5 ~ 1 [m] 깊이로 조사선 옆에 부착한다.

기록기에서 얻은 반사기록은 해저면하의 물리적 성질이 서로다른 지층의 경계면(즉 이 경계면들은 음향학적 임피던스가 다른 매질의 경계면으로 작용함)에서 반사된 파의 역학적 에너지를 수신기에서 전기에너지로 변환시켜 기록지 상에 나타내는 것이므로 펄이나 사질, 모래층 그리고 固結퇴적층(consolidated sediment layer) 등과 같이 층들의 물성대비(constant of physical properties)가 클수록 더욱 진하게 나타난다.

第 5 節 해수면 관측 장비

해수면은 공기와 접해 있는 면으로 수중음향의 반사면이나 수면에 항상 존재하는 파랑과 해수의 유동에 의해 산란 효과도 야기 시킨다. 한편 파랑의 존재는 이들이 깨어질 때 발생하는 공기 방울이 수면 근처에 집중되어 있어 또 다른 산란효과를 나타내고 있다. 이러한 경계면 혹은 경계층의 시공간적인 변화를 파악하기 위해서는 고주파의 음파를 사용하는바 이 때 해양이 천해인 경우는 Transducer를 해저에 고정 시켜 그 Beam이 해수면을 향하게 하며 동시에 해면의 파랑 특성(파랑 주기)에 따라 Beam 폭을 조정하여 해수면의 특성을 파악하게 된다. 그러나 심해인 경우는 계류부이에 Transducer를 장착하여 사용한다.

1. Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)

두 개 이상의 좁은 Beam 들에 의해 해수중의 산란체 (동물성 프랑크톤이 주를 이룸)로 부터의 후방산란 및 산란체 이동에 의한 Doppler effect를 이용하여 해류의 수직 구조를 측정하는 장비이다. 이 장비는 단시간에 넓은 해역의 해류 구조를 파악 할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 특히 해수중의 생물체가 주요 산란체 이므로 산란 강도를 해석하여 생물체의 수직분포 및 나아가 생물체의 종류까지 알아내고 있는 실정이다. Fig. 4 - 16은 ADCP의 Transducer를 거쳐 나간 음파가 Scatterer를 감지하여 하드웨어에서 신호를 잡아 측정하는 간단한 예를 보인 것이다.

이 장비의 응용성은 매우 다양해서 해양오염 물질의 확산경로 파악, 생물체의 수직변이 파악 등이 가능하며 고주파 (1200 [kHz])일 경우는 강물의 유속을 수직적으로 파악 할 수 있기 때문에 하천수의 유동파악에도 이용 가능하다.

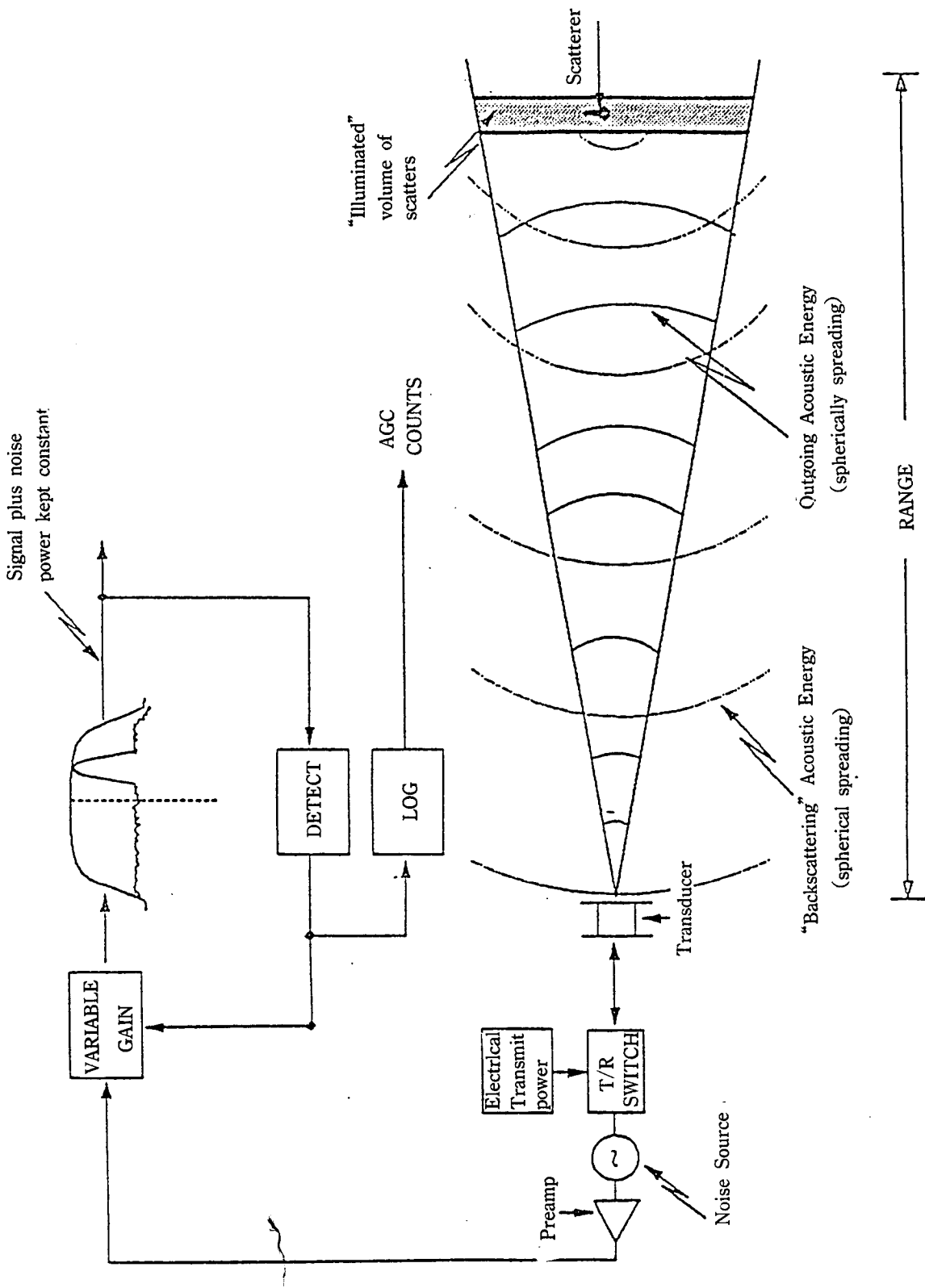


Fig. 4 - 16. Measurement method of ADCP

2. Hydrophone을 이용한 수중소음 측정

Hydrophone의 지향성을 수면을 향하게하여 바람에 의하여 발생하는 수중 소음의 크기를 측정함과 동시에 바람의 세기를 관측한 것과 상관관계를 설정시 소음 측정을 통한 해상풍을 측정 할 수 있게 된다. 이미 WATAN(Weather Observation Through Ambient Noise)이라 하여 실험적으로 사용되고 있다. 이러한 시도는 해상에서 바람관측이 주로 선박 혹은 부표에서 이루어지기 때문에 비용이 많은 들 뿐만 아니라 태풍과 같이 강한 바람하에서의 관측이 거의 불가능한 반면 Sonobuoy를 이용하여 소음 Data를 육지로 전송 시키는 방법을 채택한다면 환경 변화에 대한 위험성이 없을 뿐만 아니라 매우 경제적이기도 하기 때문이다.

3. 해수중 음파의 전파특성 관측 및 응용

해수중에서 음원과 수신기 사이의 음파의 도달시간을 연속관측하여 전달매체의 특성을 파악하는 소위 “해양의 내부를 원격탐사(Acoustic Tomography)”하는 방법이 근래에 관심을 받게 되었다. 이는 관측하고자 하는 해역에 몇개의 송신기와 수신기를 배열해 놓고 특정한 송 수신기간의 음파의 도달시간의 변위를 수중 음속의 변위로 역산 함으로서 매질의 변화를 탐사하는 방법을 기초로 하는 것으로 북대서양의 바하마 군도 부근에서 실험한바 있다. 더구나 해수중 음파의 감쇄요인은 염류($MgSO_4$, $B(OH)_3$ 등에 의한 흡수손실인바 이중에 해수의 수소이온 농도지수(pH)에 영향을 받는것은 $B(OH)_3$: Boric Acid이며 특히 1 [kHz]미만에서의 흡수손실의 주요인이다. 따라서 음파의 전달 경로를 미리 알고 있을 경우 음파세기의 변화와 해수의 pH를 연계 시킬 수 있는 가능성이 밝혀져 해수의 화학적 성질 규명에 음파의 사용이 널리 활용 될 수 있음을 증명하고 있다.

천해에서의 음파의 전파는 수면과 해저를 경계로 한 Duct내에서 전파 특성을 갖기 때문에 수심과 해저 구조에 따라 최적의 전파 주파수가 존재하게 된다.

이 주파수는 대개 200 ~ 300 [Hz]에 존재하는데 이러한 특성은 수중통신 및 수산업에 응용되고 있다. 즉 200 ~ 300 [Hz] 주파수에 신호를 얹혀 송신 할 수 있으며 해저 Cable을 대신 할 수 있을 것이다. 단 이를 위해서는 200 ~ 300 [Hz]대의 수중소음원을 밝혀야 하는바 불행하게도 천해에서 이 주파수 대역은 선박통행에 의한 소음이 주를 이루고 있다는 사실이다 허나 신호분석 기술의 발달은 새로운 수중통신 분야의 출현이 곧 있을 것임을 낙관한다.

근래에 어족 자원의 고갈은 양식 기술의 개발을 필요로하게 되었다. 대량의 양식은 자연조건을 그대로 활용하는 것이 최적이나 물고기를 가두어 들 수 있는 차단벽의 설치 문제가 양식장의 규모를 제한하고 있다.

그러나 일본에서 시험 성공한 도미의 양식방법은 자연그대로의 만을 양식장으로 사용하면서 먹이를 줄때 도미들에게 이미 훈련된 소리를 보내어 도미가 물려 들게 하는 소위 “조건반사” 방법을 사용하는데 이때의 주파수가 200 ~ 300 [Hz] 대가 아닌가 사료된다. (나정렬, 1990)

第 5 章 結論 및 建議

음파의 이용은 날로 증가하고 있는 실정으로 센서 개발의 중요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 해양에서 쓰이고 있는 관측장비 중 음파를 이용하고 있는 장비를 효율적으로 활용하고 국산화의 기초로서 음파의 교정 및 측정방법을 언급하였다.

음파에 대한 기본적인 이론과 응용분야에서의 간단한 원리를 언급하여 활용성의 방안을 제시하였고, 수중에서 음파의 특성을 이용하여 사용되고 있는 해양관측 장비의 원리와 간단한 전자회로 Block diagram을 통해 측정방법을 알아 보았다.

특히 해양관측 범위의 확대와 더불어 전자회로와 음향센서와의 연결과정에서의 문제가 많은 어려움을 수반하기 때문에 이분야에 대한 구체적인 연구가 지속되어야 하겠다.

교정 방법에 있어서 음파는 가역교정을 기초로 하기 때문에 음원에 대한 교정과 수신부에 대한 교정에 차이가 있고 수중에서 쓰이는 Hydrophone의 경우는 주파수에 따라 방법이 틀리기 때문에 실험실에서의 교정은 많은 반복 실험이 요구되며, 현장에서의 교정은 간단히 할 수 있다. 우리의 여건에서는 장비의 효율적인 이용을 위해 보수유지와 함께 정밀도 향상을 위해 음향센서의 특성을 측정하기 위한 기초 단계로는 무향실과 수조의 설치가 필요하리라고 본다.

앞으로 많은 음향 장비를 사용할 우리의 입장에서는 체계적인 음파의 연구를 위해 측정 기술의 연구와 교정 할 수 있는 시스템을 갖추는 것이 필요하리라고 본다.

參考文獻

- 나정렬 1990 “해양자원개발을 위한 수중음향의 응용”
한국음향학회지 9권 3호
- 김성렬 1991 “한반도 주변해역 해저퇴적물의 음향학적
특성연구(Ⅲ)” 한국해양연구소 BSPG 00123-378-5
- 김재승 1985 “수중음향의 특성분석 및 탐지법 연구”
해사 기술연구소 UCE 240-646.D
- 박경수 1991 “국가종합 해양 관측망 구축 기술 개발(Ⅰ)”
한국해양연구소 BSPG 00119-383-2
- 성경모 1990 “초음파의 응용 기술”
한국과학재단 KOSEF 87-0108
- 윤병우의 2명 1989 “등화기를 이용한 천해에서의 수중 통신 ”
한국음향학회지 8권 4호
- 은희준 1986 “음향 측정 기술”
전자공학회지 Vol. 13 No. 6
- 은희준 1990 “광섬유 수중음향센서 개발”
한국표준연구소 KSRI-90-93-IR
- 이종식 1990 “다중 음향파를 이용한 정밀 측심기 개발연구”
해사 기술연구소 UCE 454-1384.D
- 이충웅 1987 “통신방식의 기초” 집문사
- 日本 海域工學硏究會 1987 “해양 공학에의 이해 ” 韓國機械硏究所
- 전자기술연구회 편 1991 “초음파응용” 기문사
- 전호경 1986 “음파를 이용한 수중통신 및 제어시스템에
관한 연구” 한국해양연구소 BSPE 00076-108-7
- 차일환 1976 “음향공학개론” 한신 문화사
- 崔宗秀 1986 “초음파의 응용”
전자공학회지 Vol. 13 No. 6
- 한상준 1989 “한반도 주변해역 해저퇴적물의 음향학적
특성연구(Ⅰ)” 한국해양연구소 BSPG 00075-229-5
- 한상준 1990 “한반도 주변해역 해저퇴적물의 음향학적
특성연구(Ⅱ)” 한국해양연구소 BSPG 00107-297-5
- 홍도천 1990 “해양 작업 시스템 개발”
해사 기술연구소 UCN 207-1353.D

Clarence S. Clay and Herman Medwin	1987 "Acoustic Oceanography : Principles and Applications "
P.H.Milne	1983 " Underwater Acoustic Positioning Systems "
Robert J. Urick	1975 " Principles of Underwater Sound "
RD Instrument	1991 "Vessel-mounted acoustic doppler current profiler (VM-ADCP) Technical manual"
Rodney F.W.Coates	1988 "A Deep-Ocean Penetrator Telemetry System " IEEE J. OCEANIC ENG.April 1988 Vol.13 No.2
Torben Licht	1991 "Lecture on underwater acoustics" Bruel & Kjaer :

Appendix A 초음파의 응용 분류

종류	응 용 예	방 법
통	수중소너, 측심기, 어군탐지기	수중(해수중)에 초음파 펄스를 발사, 그 반사파를 수신하여 그 반사체의 거리, 방향, 크기 등을 안다.
	탐상기	금속재료 등의 고체에 초음파를 발사, 그 반사파로 상처의 위치, 성질을 안다.
	두께 측정기	금소판 등의 단면에서 주파수가 주기적으로 변화하는 초음파를 발생, 그 공진주파수로 판의 두께를 측정한다.
신	간섭계	송파기와 반사판간의 거리를 변화시킨 때의 진동자 임피던스의 변화로 매질중의 음속·감쇠를 측정한다.
	유속·유량계	흐르는 상류에서 하류로 및 하류에서 상류로 향해 초음파를 보내 그 도달시간의 차에서 유속을 구한다.
분	액면계	원리적으로 측심기와 같으며, 공기중에서 측정하는 것과 액체내에서 측정하는 것이 있다. 발전소의 서지탱크, 연료, 약품 등의 탱크의 액면측정, 기록, 경보 등에 이용된다.
	액면 경보기	진동자가 액체속에 들어간 때와 공기중에 나온때의 임피던스 차이로 어느 수위 이상인가, 이하인가를 판정하여 경보를 발생한다.
야	점도계	시료 액체속에 진동체를 넣고 그면에 평행한 진동을 가하여 유체에서 받은 저항을 검출해서 점도를 측정한다. 전왜진동형, 자왜진동형, 비틀림 수정형 등이 있다.
	응력 분포의 측정	응력이 존재하고 있는곳에서는 횡파의 음속 진동자 방향에 의하여 차이가 나는것을 이용하여 광탄성과 비슷한 방법으로 투명체속에서도 응력 분포를 측정할 수 있다
응	수중통화	초음파를 반송파로 해서 이것을 음성주파수로 변조하여 플로그맨 등의 수중통화에 사용한다
	경도계	가는 니켈봉의 끝에 다이어몬드 칩을 붙여 이것을 피측정 재료에 가볍게 누르면서 종진동 시킨때의 공진 주파수의 편차로 부터 재료의 경도를 측정한다

종류	응 용 예	방 법
통 신 분 야 응 용	지연선	초음파가 매질 속을 통과하는 데 요하는 시간만큼 신호를 지연시킨다. 음속이 전파속도에 비해 느린 것을 이용하고 있다. 특히 초고주파 탄성 표면파가 실용에 적합하다.
	여파기	고체재료의 기계적 진동을 이용한 것과 고주파 탄성표면 파를 이용한 것이 실용화 되어 있다. TV의 중간주파 증폭 단에 사용된다.
	펄스에 의한 진단	원리적으로 탐상기와 같은 것으로, 인체내 각부의 구조나 작용, 조직의 상태(예를 들면 간)를 수시로 찍어 낼 수 있다.
	도플러법에 의한 진단	연속파가 심장, 혈관 등과 같이 운동하는 기관에 닿아 도플러 효과로 주파수가 변화하는 것을 이용하여 그 기관의 운동 상태를 조사한다.
	물성연구	각종 매질의 음속, 흡수, 분포 등을 측정하여 그 매질의 물성과 화학적 반응속도 기타 해명이 가능하다.
	광학적 응용	초음파에 의한 빛의 굴절, 회절 등을 이용하여 음속 기타 측정을하거나 고주파에서 동작하는 스트로브스코프를 만든다. 또 레이저 발전기용의 루비에 초음파 진동을 가하면 레이저 광의 변조가 가능하다.
동 력 분 야 응 용	세척기	시계부품, 베어링 기타 기계부품의 세정, 녹세척, 도금의 전처리 피(血)세척 기타
	유화	구두약, 초코렛, 사진유제 등의 유화
	액체의 무화 (에어로졸의 제조)	액체 속에서 액면으로 향해 초음파를 조사하면 액체가 무화된다. 가습, 소독 등에 이용된다. 주파수가 높을수록 입자가 미세한 안개가 된다
	도금	초음파는 교반, 분산작용에 의해 전기 화학적 작용 - 특히 분극에 대하여 큰 영향을 미치며 도금의 개량에 이용된다. 단, 때로는 나쁜 작용도 일으킬 수 있다.
	알루미늄의 납땀	알루미늄 표면의 산화피막을 제거하고 납땀을 한다. 납을 녹인 壺를 진동시키는 방법과 납을 진동시키는 방법이 있다

종류	응 용 예	방 법
동	용접	용접하는 2장의 판을 겹쳐 그 한쪽에서 정압을 가하면서 초음파의 횡진동(금속의 경우) 또는 종진동(플라스틱의 경우)을 부여하여 그 접촉면에 마찰열을 발생시켜 용접을 한다.
	구멍뚫기 가공	공구를 피가공물에 밀착해 붙이고 砥粒과 물의 혼합물을 공급하면서 공구를 진동 시키면 공구와 같은 모양의 구멍이 뚫린다. 유리, 보석, 자기 등의 구멍뚫기, 절삭 등에 이용된다.
	절삭 가공	선반에 의한 절삭가공시 공구에 절삭방향의 진동을 부여하면 작은 부하로 절명한 가공이 가능하다
분	소성 가공	압연, 선빼기, 파이프의 인발, 드로밍 등의 금속의 소성가공시, 공구 등을 통하여 피가공재에 초음파 진동을 가하면 그 진동응력에 의해 가공을 쉽게하고 마무리를 잘 할수 있다.
	분체의 압축·압출 성형	분체를 압축성형 하거나 압출성형 할 때에 분체에 초음파를 조사하면 작은 압력으로 스무스하게 누르게 된다.
	주조	금속용탕중에 또는 그 응고중에 초음파를 조사하여 탈기, 조직의 미세화, 분산등의 작용을 부여하여 기계적 여러 성질을 개선한다.
야	피로시험	흔 끝에 반파장 공진의 시험편을 붙이고 20[kHz] 부근에서 진동 시키면 단시간에 피로 시험을 할 수가 있다
	미분탄의 회수	미분탄을 기름과 함께 흘려 이것에 초음파를 조사하고 응집이 되어 크게된 알갱이를 회수한다
용	연료기름의 개질	C중유에 초음파를 조사하여 탈분을 분산시켜 연소시키면 A중유와 동등하게 사용할수 있다. 선박의 기관에 초음파장치를 부가하여 사용하고 있다.
	집진	굴뚝에서 나오는 연기도 사이렌 등으로 강력한 초음파 진동을 부여하면 미립자가 응집하여 침강함으로 깨끗한 연기가 된다.

종류	응 용 예	방 법
동 력 분 야 응 용	숙성	술, 향료, 사진유체등의 숙성을 촉진한다.
	세균, 바이러스, 혈구의 파괴	캐비테이션에 의한 기계적 파괴, 또는 산화 작용에 의한 세균, 바이러스, 혈구의 파괴, 또는 사멸, 약친 BCG 제조, 독소, 항체성물질, 효소의 추출등에 이용된다.
	치료(수술)	중상등의 유해조직에 집속 초음파를 쏘이게 하여 그 조직만 국부적으로 파괴 치료한다.
	치료	염좌, 신경통 등에 대하여 초음파 목욕탕 등에 넣어 뼈부분을 따뜻하게 하거나 마이크로 마사지를 하여 치료한다.
	선택적 가열	매질이나 주파수에 의한 흡수계수의 차이를 이용하여 희망부분을 선택적으로 가열한다.
	건조	피건조물체의 분위기속에 강력 초음파를 발생시켜 건조를 촉진한다
특 수 응 용	엑스틱 에미션 (AE)	금속, 광물, 콘크리트 등을 소성변형 시킬때, 물체내에서 발생하는 불규칙한 펄스적 초음파를 수파하여 그 물체가 받은 응력의 이력과 과대응력이 발생하고 있는 위치를 알아 압력용기 등에 사고의 발생을 예방한다.
	집어	고기가 먹는 음식을 녹음해두고 그 음식을 재생하여 수중에 흘려넣어 고기를 모은다.

Appendix B 초음파의 발생 방법

진 동 자 를 이 용 한 방 법	압전 진동자	수정, 주석산 에틸렌디아민(EDT), 로셀염(RS), 제1인산 칼륨(KDP), 유산 리튬(LH) 등의 단결정에 고주파 전압을 가한다.	주 로 액 체 및 고 체 중
	고분자 압전막	폴리불화 비닐리덴(PVDF 또는 PVF ₂)의 박막에 고주파 전압을 가한다. 얇은 금속판에 부착하여 초고주파 또는 MHz의 초음파 발생에 사용한다.	
	전왜 진동자	티탄산 바륨계(BT), 지루콘티탄 산연계(RZT), 니오븀 산계 등의 자기를 분극하고 초음파를 가한다.	
	랑지방형 진동자	압전 또는 전왜 진동자의 양면에 금속 블록을 접착 또는 볼트로 죄고 전체의 공진 주파수로 진동 시키도록 한것	
	자왜 진동자	니켈, 알페로 등의 금속 진동자 또는 페라이트 자왜 진동자에 직류자계와 고주파 자계를 중첩하여 가한다.	
방 법	초고주파 초음파 발생장치	물성연구, 여파기 등에 사용하기 위한 GHz(1000 [MHz]) 대의 초음파를 발생시키기 위해서는 확산층, 증착막 기타 여러 종류의 방법이있다. 특히 고주파 탄성표면파의 발생은 공업적으로 널리 사용 되고 있다.	고 체 중
	동전형 변환기	가청 주파수의 다이내믹 스피커와 같은 형의 것(낮은 주파수만) 공진봉의 한쪽 끝을 동전적으로 구동하는것	기 체 중
	콘덴서형 변환기	가청 주파수용의 콘덴서 스피커 또는 콘덴서 마이크로 폰을 음원으로 사용한다.	기 체 중
	전자유도형 변환기	코일의 전면에 동판 등의 금속판을 대치시켜, 코일에서 발생한 고주파 자장에 의하여 금소판 중에 과전류를 일으켜 구동한다.	액 체 중
	방전식 송파기	수중에서 고압 방전을 일으켜, 그 폭발에 의한 위성을 적당한 방법으로 파편화 하여 펄스를 낸다.	액 체 중

유체역학적 음원	사이렌	주변에 미세한 구멍을 뚫는 원판을 회전시켜 압착공기를 단속적으로 분출 시킨다.	기체 중
	할트만 분기 발음기	초음파의 분기구. 전면에 공조기를 붙여 발음시킨다.	기체 중
	자노스키 풀만	수중에서 슬릿으로부터 분출한 수류를 예민한 칼에 닿게하여 소용돌이를 만들어서 발음시킨다.	액체 중
	노이즈로 부터의 분류	압축한 액체를 작은 노이즈로부터 다른 액체중에 분사시키면 캐비테이션을 발생, 그에 따라 유화된다	액체 중