

해양의 주위잡음에 미치는 강우의 영향에 관한 연구

A study on the effect of rain upon
oceanic ambient noise

1993. 6

한국해양연구소

제 출 문

한국해양연구소장 귀하

본 보고서를 “해양의 주위잡음에 미치는 강우의 영향에 관한 연구” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

1993년 6월

한국해양연구소

연구책임자 : 김봉채 (응용물리연구실)

연구 원 : 최복경

요 약 문

I. 제 목

해양의 주위잡음에 미치는 강우의 영향에 관한 연구

II. 연구개발의 목적

해양에서 비가 내릴 때, 이러한 현상이 해수중 주위잡음에 미치는 영향을 밝히기 위하여 강우강도와 주위잡음 레벨과의 관련에 대하여 조사하고, 해수중 주위잡음의 파형을 관측하여 비잡음 발생기구에 대하여 고찰한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 강우강도에 따른 해수중 주위잡음 스펙트럼 패턴을 조사한다.
2. 강우강도와 해수중 주위잡음 레벨과의 관련을 조사한다.
3. 해수중 주위잡음의 파형을 관측하여 강우강도에 따른 잡음 발생원에 대하여 고찰한다.

IV. 연구개발에 대한 건의

강우에 의한 해수중 비잡음의 발생기구를 구명하기 위하여

1. 비에 의한 수중잡음 발생에 관한 수치모델 연구가 필요함
2. 실험실의 다양한 조건하에서 자유낙하하는 빗방울에 의한 수중잡음 측정이 요망됨
3. 해수중 비잡음에 미치는 풍속, 빗방울 크기분포의 영향에 관한 연구가 필요함

SUMMARY

I. Title

A study on the effect of rain upon oceanic ambient noise

II. Objectives of the study

1. To investigate the relationship between ambient noise levels in the ocean and rainfall rates
2. To consider the generation mechanism of oceanic ambient noise by rain

III. Contents

1. Spectrum patterns of oceanic ambient noise caused by rain
2. Relationship between oceanic ambient noise levels and rainfall rates
3. Consideration on the generation mechanism of oceanic rain noise

IV. Suggestions

In order to understand the generation mechanism of oceanic ambient noise caused by rain, the followings are necessary :

1. To study numerical models on the underwater noise generation by rain
2. To measure the underwater noise in the water tank produced by artificial raindrops with various conditions
3. To study on the effects of wind speeds and distributions of drop size upon oceanic rain noise

목 차

요약문	iii
영문 요약문	v
그림목차	3
표목차	4
제 1 장 서론	5
제 2 장 측정 및 분석 방법	8
제 3 장 결과 및 고찰	12
제 4 장 결론	35
참고문헌	37

CONTENTS

Summary	v
List of Figures	3
List of Table	4
Chapter 1. Indroduction	5
Chapter 2. Methods of measurement and analysis	8
Chapter 3. Results and discussion	12
Chapter 4. Conclusions	35
References	37

List of Figures

Fig. 1. Hydrophone floating system	10
Fig. 2. Blockdiagrams of recording and spectrum analysis system	11
Fig. 3. Underwater ambient noise spectra for wind speeds of 7 knots	14
Fig. 4. Samples of noise spectrum levels for wind speeds of 7 knots against rainfall rates	19
Fig. 5. Time series of ambient noise waveform received by hydrophone at a 30 m depth	30

List of Table

Table 1. Coefficients A and B of straight lines $NL=A+B \cdot \log_{10} R$ derived from a least-squares fit to ambient noise levels against rainfall rates	18
--	----

제 1 장 서론

비가 내리면 해수중의 주위잡음 레벨이 증가하는 것은 이전부터 알려져 왔지만, 비에 의한 해수중의 주위잡음 발생기구에 관하여는 명확하게 밝혀지지 않았다. Franz (1959)는 실험실 수조에서 자유낙하하는 물방울에 의한 수중의 주위잡음을 측정하여 그 발생기구로서 물방울이 수면에 부딪치는 충돌(drop impact)과 물방울에 의해 수중에 들어간 기포의 진동(bubble pulsation)을 생각하였다. 그러나 물방울이 수면에 부딪치는 충돌에 의한 영향이 크고, 수중에 생긴 기포의 진동에 의한 영향은 작다고 가정하여 충돌의 영향만을 고려한 이론식을 유도하여 비에 의한 수중 주위잡음의 발생을 해석하였다. 한편, Scrimger 등 (1985, 1987, 1989)은 호수 및 해양에서 비, 눈, 우박 등 강우현상이 있는 경우에 있어서 수중의 주위잡음을 측정하여 그 결과를 보고하였다. 이에 의하면, 비, 눈 및 우박에 의한 수중 강우잡음의 스펙트럼 패턴(spectrum pattern)은 바람, 항행선박 및 수중동물에 의한 패턴과는 매우 달랐다. 특히 강우강도가 작은 경우였지만, 비가 내릴 때에는 주파수 13~15 kHz에서 스펙트럼 레벨(spectrum level)의 피크(peak)가 특이하게 관측되었다. 그러나 Scrimger 등은 비에 의한 수중 주위잡음의 발생기구 및 주파수 13~15 kHz에서 생기는 레벨 피크의 발생원인에 관하여는 고찰하지 않았다. 그리고 Nystuen (1986)은 비가 내릴 때 호수에서의 수중 주위잡음을 측정하여 주파수 15 kHz 부근에서 스펙트럼 레벨의 피크가 나타나는 현상을 관측하였고, 수중 주위잡음의 측정결과로부터 수면상의 강우량을 추정할 수 있는 가능성을 최초로 제안하였다. 그러나 Nystuen은 비에 의한 수중 주위잡음의 발생기구로서 빗방울이 수면에 부딪치는 충돌만을 고려하였고, 강우량을 추정하는 데 있어 수중 비잡음을 이용하기 위하여는 더 많은 실측자료가 있어야 함을 강조하였다.

Prosperetti 등 (1989)과 Pumphrey 등 (1989)은 실험실 수조에서 자유낙하하는 물방울에 의한 수중잡음의 발생과정을 연속 촬영 기법을 도입하여 실험하였다. 즉, 자유낙하하는 물방울이 수면에 부딪치는 일련의 과정과 이 때에 발생하는 수중잡음의 파형을 동시에 연속적으로 촬영하였다. 이에 의하면, 자유낙하하는 물방울의 직경이 0.8~1.1 mm이고, 수면에 부딪치는 물방울의 종속속도 (terminal velocity)가 3.5~4.5 m/s의 경우에는 물방울에 의하여 수중에 기포가 반드시 형성되었고, 이 때에 커다란 수중잡음이 발생하였다. 따라서 이들은 Scrimger 등 (1985, 1987, 1989)이 관측한 비잡음에서 주파수 13~15 kHz의 레벨 피크를 이러한 기포의 진동으로 설명하였다. 그리고 해표면에 비가 내릴 때, 빗방울에 의하여 해수중에 생긴 기포의 진동이 해수중 주위잡음의 발생에 있어 중요한 역할을 하고 있음을 주장하였다. 한편 Longuet-Higgins (1990), Oguz 등 (1990, 1991), Pumphrey 등 (1990)은 자유낙하하는 물방울에 의한 수중의 기포 형성과 비가 내릴 때의 수중잡음 발생을 수치 모델로 해석하려 시도하였다.

이와 같은 실험실 수조에서 자유낙하하는 물방울에 의한 수중 주위잡음의 측정, 호수에서 비에 의한 수중 주위잡음의 측정 및 수치해석 등의 결과에 의하여 비에 의한 수중 주위잡음의 발생기구에 대하여 많은 새로운 사실들이 밝혀지고 있다. 그러나 실제의 해양에서 비가 내릴 때, 이것이 해수중 주위잡음에 미치는 영향에 관한 조사결과는 매우 적으며, 특히 강우강도가 큰 경우에 있어서 해수중 주위잡음의 측정결과는 거의 발표되어 있지 않다.

강우현상에 의한 해수중 주위잡음의 측정결과는 해양에 있어서 주위잡음 발생기구를 밝히기 위한 기초자료로 활용될 뿐만 아니라 해양에서 소나 등 수중 음향기기를 사용할 때 최적주파수 및 목표물 탐지거리 등을 예측하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 그리고 Nystuen (1986)이 제안한 것과 같이 해수중 주위잡음

으로부터 해표면상의 강우량을 모니터링 (monitoring)하기 위한 기초자료로도 쓰일 수 있을 것이다. 따라서 여기에서는 비가 내릴 때 이러한 현상이 해수중 주위잡음에 미치는 영향을 밝히기 위하여 해수중의 주위잡음을 직접 측정하여, 강우강도와 주위잡음 레벨과의 관련에 대하여 조사하였다. 그리고 해수중 주위잡음의 파형을 관측하여 비잡음의 발생기구에 대하여도 고찰하였다.

제 2 장 측정 및 분석 방법

해수중 주위잡음의 측정 및 분석에는 크게 두 과정이 있다. 하나는 해상에서 해수중 주위잡음을 녹음하는 과정이고, 다른 하나는 녹음된 주위잡음을 스펙트럼 분석하여 처리하는 과정이다.

먼저, 해수중 주위잡음의 녹음은 다음과 같은 방법으로 실시하였다. 속초연안 (수심 : 200 m)에서 1992년 8월중에 24시간 동안 조사선상에서 해수중의 주위잡음을 녹음하였다. 이 때 그림 1과 같이 수중 마이크로폰 (hydrophone)을 각각 수심 30 m, 50 m, 100 m에 위치하도록 하여 세 수심에서 동시에 주위잡음을 수파하였으며, 그림 2의 녹음시스템을 사용하여 매 시간당 10분간 녹음하였다. 해수중 주위잡음을 녹음하는 동안 조사선에서 방사되는 잡음을 가능한 한 줄이기 위하여 조사선의 주기관, 보조기관 등 선내 잡음원의 가동을 중지하였다. 그리고 축전지에서 공급된 직류를 인버터 (inverter)에서 교류로 변환시켜 이것을 측정기의 전원으로 사용하였다. 수중 마이크로폰에서 포착된 해수중 주위잡음은 측정용 증폭기 (measuring amplifier)로 적절한 레벨이 되도록 증폭된 다음, 테이프 레코더 (tape recorder)에서 녹음하기에 적당한 레벨로 감쇠되어 녹음되었다. 여기에 사용된 수중 마이크로폰 (Bruel & Kjaer사, Model 8101)은 모든 방향에 대하여 수파감도가 거의 일정한 무지향성으로서 주파수 1 Hz~60 kHz의 대역에서 평탄한 주파수 특성 (± 2 dB 이내)을 갖고 있다. 그리고 측정용 증폭기 (Bruel & Kjaer사, Model 2636)는 주파수 2 Hz~200 kHz의 대역에서 그 특성 (± 0.5 dB 이내)이 평탄하고, 테이프 레코더 (Bruel & Kjaer사, Model 7006 Direct Unit)는 주파수 대역 40 Hz~60 kHz에서 평탄한 특성 (± 3 dB 이내)을 갖고 있다. 해수중 주위잡음을 녹음하는 동안의 주위환경으로서 강우강도를 우량계에 의하여 매 5분의 간격으로 관측하였다. 그리고 풍향풍속계에 의하여 풍속을 측정하였으

며, 레이더에 의하여 조사선 주위에서 항행하는 선박의 척수를 조사하였다.

다음에, 해수중 주위잡음의 스펙트럼 분석은 실험실에서 그림 2의 분석 시스템을 사용하여 실시하였다. 녹음된 해수중 주위잡음을 테이프 레코더로 재생하여, 이것을 FFT 분석기 (FFT analyzer, AND사, Model AD-3525)로 주파수 0~50 kHz 대역에서 125 Hz의 간격으로 분석치를 구하였다. 이 때의 분석치들은 FFT 분석기에 내장된 Hanning window를 사용하여 overlapping 75 %로 256개를 선형평균함으로써 얻어졌다. 그 다음 수중 마이크론의 수파감도 (receiving sensitivity), 측정용 증폭기의 증폭도 (gain) 및 테이프 레코더의 감쇠도 (attenuation) 등을 보상하여 주파수 1 kHz로부터 50 kHz까지 125 Hz 간격의 각 주파수에서 스펙트럼 레벨을 계산하였다. 여기에서는 1 μ Pa을 0 dB로 하였고, 1 Hz의 밴드 (band)로 환산하여 나타내었다. 그리고 해수중 주위잡음의 자료로서 조사선을 중심으로 반경 9 마일 이내에 항행선박이 없을 때의 스펙트럼 레벨만을 사용하였다.

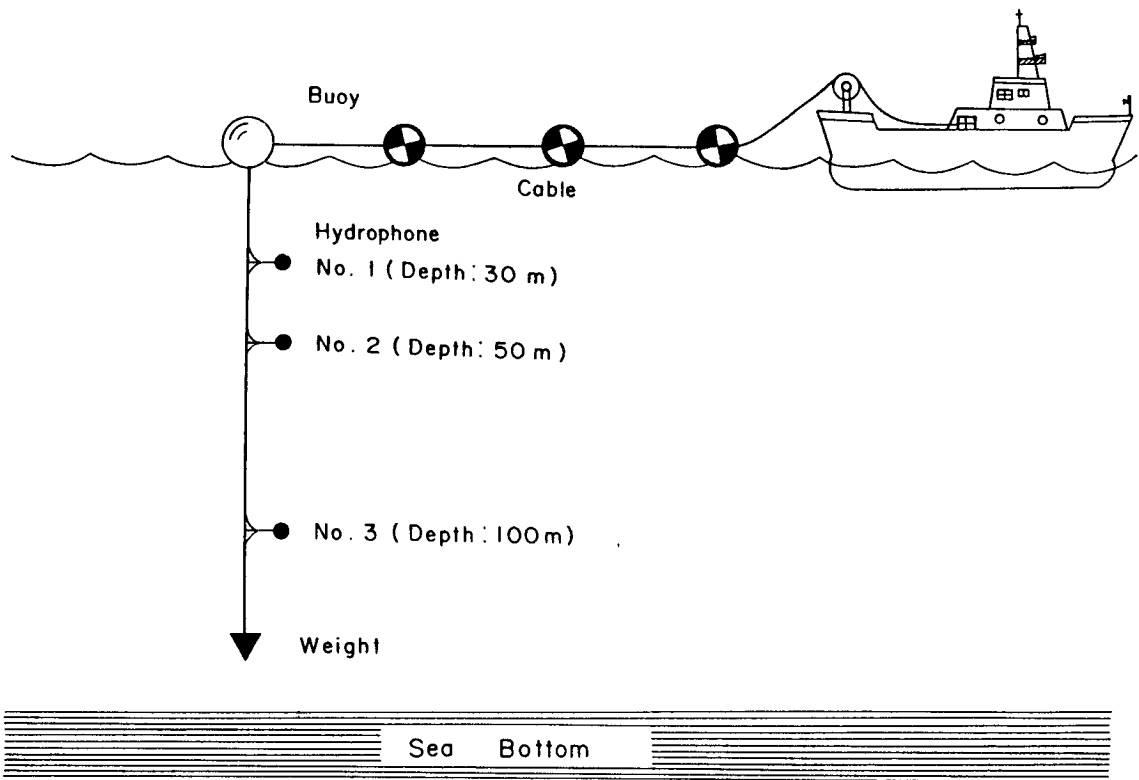
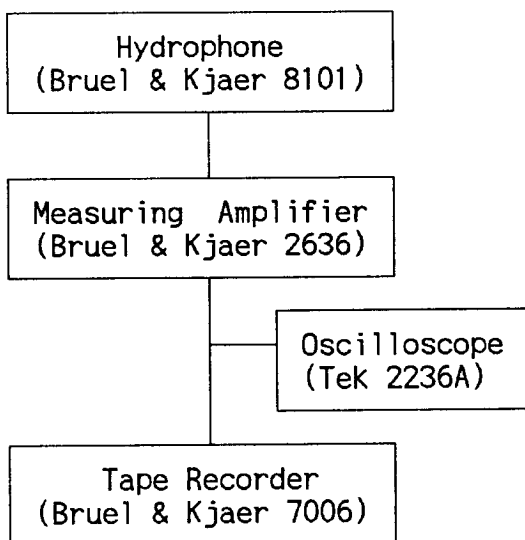


Fig. 1. Hydrophone floating system.

* RECORDING



* SPECTRUM ANALYSIS

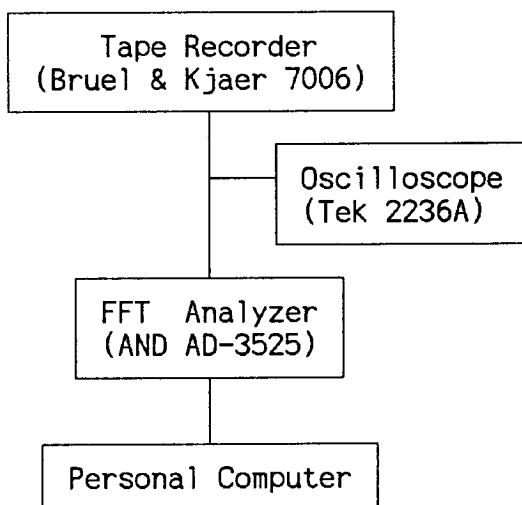


Fig. 2. Blockdiagrams of recording and spectrum analysis system.

제 3 장 결과 및 고찰

해표면에 비가 내릴 때 수심 30 m, 50 m 및 100 m에 있어서 해수중의 주위잡음 스펙트럼을 그림 3에 각각 나타내고 있다. 주위환경으로서 여기에서는 풍속이 7 노트 (knots)로 일정하고, 강우강도만이 각각 다른 경우이다 (0~23.4 mm/h).

강우강도가 1.5 mm/h의 경우와 같이 비가 내리기 시작하면, 해수중의 주위잡음 스펙트럼 레벨은 주파수 13~15 kHz에서 피크를 갖게 되었고, 이 주파수 대역에서 주위잡음 레벨은 비가 내리지 않을 때의 레벨보다 약 25 dB 만큼 높게 나타났다. 그러나 비가 약간 더 세게 내리면 (강우강도 4.2~7.8 mm/h), 주파수 13~15 kHz의 레벨은 증가하지 않았지만, 그 밖의 주파수 대역에서 레벨이 증가하여 13~15 kHz에서 나타나는 레벨 피크의 현상이 약하게 되었다. 한편, 강우강도가 23.4 mm/h의 경우와 같이 비가 매우 세게 내리면, 주파수 1~50 kHz의 모든 대역에서 주위잡음 레벨이 증가하여 주파수 13~15 kHz의 레벨 피크를 확인할 수가 없었다. 그리고 이 경우 주파수 1~50 kHz의 모든 대역에서 해수중 주위잡음 레벨은 비가 내리지 않을 경우의 레벨보다 20~30 dB 정도 높게 나타났다.

해표면에 비가 내릴 경우, 해수중 주위잡음 스펙트럼의 패턴을 몇 개의 주파수 대역으로 나누어 살펴볼 수 있다. 먼저, 이들 그림에 의하면, 강우강도가 1.5~7.8 mm/h인 경우의 해수중 주위잡음 스펙트럼 패턴은 강우강도가 23.4 mm/h인 경우의 패턴과는 서로 다름을 알 수 있다.

강우강도가 1.5~7.8 mm/h의 경우, 해수중 주위잡음 스펙트럼 패턴을 살펴보면, 주파수 1~5 kHz 대역에서는 $-4 \sim -5$ dB/oct의 기울기로 주파수의 증가와 함께 레벨이 감소하였다. 그러나 주파수 5~10 kHz의 대역에서는 동일한 강우강도의 조건하에서 레벨

이 거의 일정하였다. 즉, 강우강도가 1.5 mm/h의 경우에는 레벨이 48~50 dB, 강우강도가 4.2 mm/h의 경우에는 레벨이 50~52 dB, 강우강도가 7.8 mm/h의 경우에는 레벨이 53~57 dB였다. 그리고 주파수 10~12 kHz의 대역에서는 주파수가 증가함에 따라 레벨이 급격히 증가하였다. 그 기울기는 강우강도가 1.5 mm/h의 경우에는 +27~+28 dB/oct, 강우강도가 4.2 mm/h의 경우에는 +20~+22 dB/oct, 강우강도가 7.8 mm/h의 경우에는 +12~+14 dB/oct였다. 또한 주파수 12~17 kHz의 대역에서 레벨은 강우강도에 관계없이 58~62 dB로 변동이 거의 없었으며, 특히 13~15 kHz에서 레벨의 피크를 보이고 있었다. 그리고 주파수 17 kHz 이상의 대역에서는 -9~-11 dB/oct (수심 30 m, 수심 50 m의 경우) 또는 -12~-13 dB/oct (수심 100 m의 경우)의 기울기로 주파수의 증가와 함께 레벨이 점점 감소하였다.

다음에, 강우강도가 23.4 mm/h의 경우, 해수중 주위잡음 스펙트럼 패턴을 살펴보면, 주파수 1~5 kHz의 대역에 있어서는 -3 dB/oct의 기울기로 주파수가 증가함에 따라 레벨이 저하하였다. 그러나 주파수 5 kHz로부터 17 kHz까지의 대역에서는 68 dB로부터 65 dB로 주파수의 증가와 함께 레벨이 매우 서서히 감소하였다. 한편, 주파수 17 kHz 이상의 대역에서는 -8~-9 dB/oct (수심 30 m, 50 m의 경우) 또는 -12 dB/oct (수심 100 m의 경우)의 기울기로 주파수가 증가함에 따라 레벨이 저하하였다.

HYDROPHONE DEPTH : 30 m

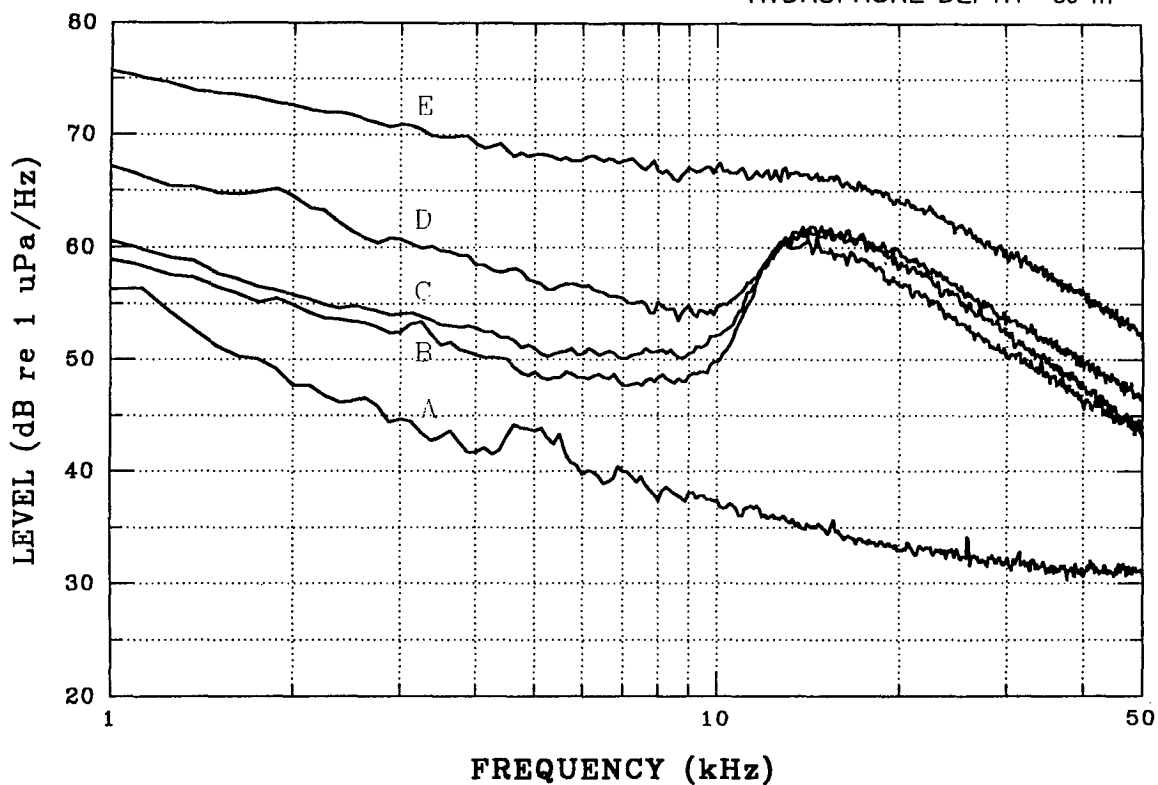


Fig. 3. Underwater ambient noise spectra for wind speeds of 7 knots. A : no rain, B : 1.5 mm/h, C : 4.2 mm/h, D : 7.8 mm/h and E : 23.4 mm/h.

HYDROPHONE DEPTH : 50 m

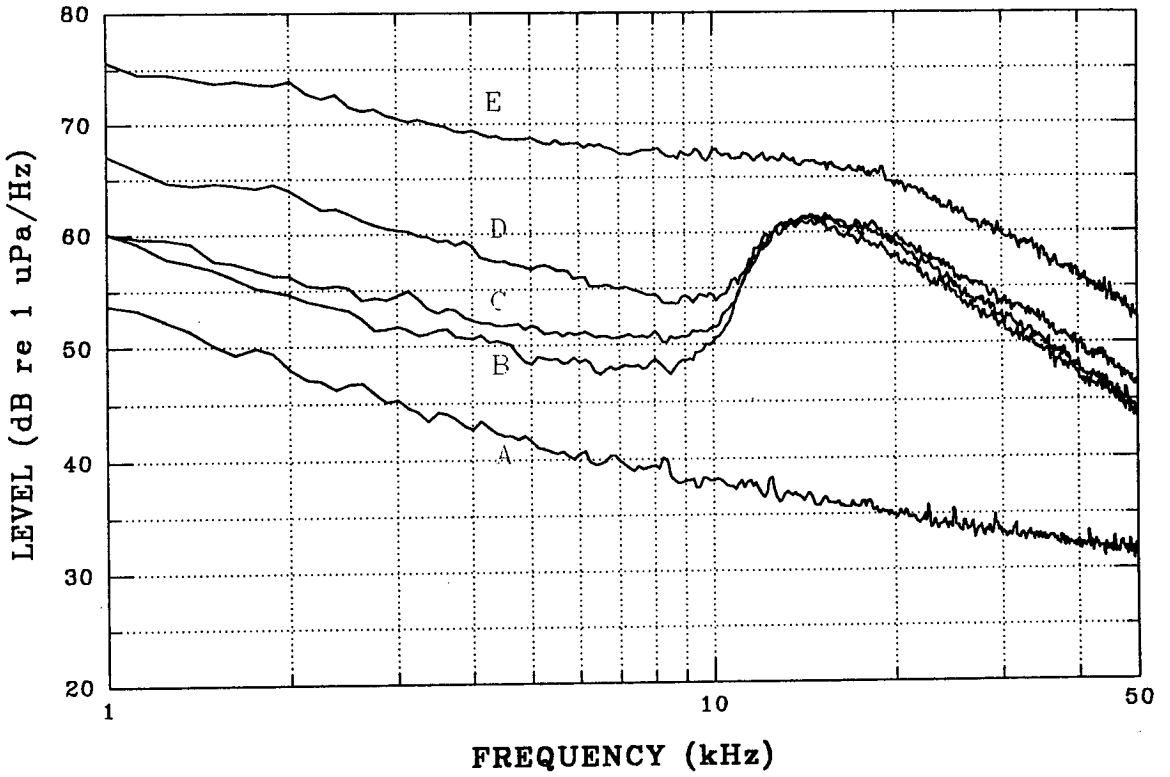


Fig. 3. (Continued)

HYDROPHONE DEPTH : 100 m

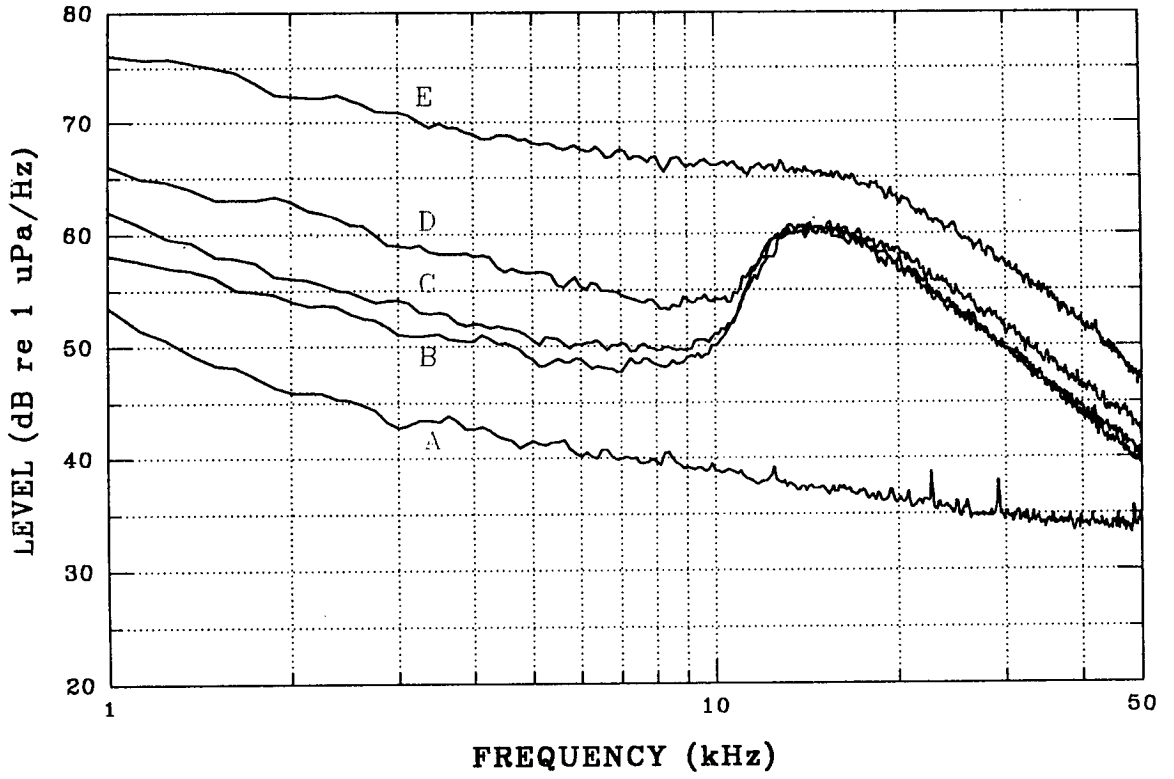


Fig. 3. (Continued)

특정 주파수에 있어서 해수중 주위잡음 레벨에 미치는 강우강도의 영향을 밝히기 위하여 5 kHz의 간격으로 5 kHz로부터 50 kHz까지의 각 주파수에서 강우강도와 주위잡음 레벨과의 관계를 조사하였다. 여기에서는 강우강도와 특정 주파수에 있어서 주위잡음 레벨과의 관계를 다음과 같은 1차식으로 근사하여 최소자승법으로부터 그 관계식의 계수를 구하였다. 이 경우에는 해수중 주위잡음의 레벨로서 풍속이 7 노트일 때, 수심 30 m에서의 레벨을 사용하였다.

$$NL = A + B \cdot \log_{10} R$$

여기서, NL은 특정 주파수에 있어서 해수중의 주위잡음 레벨 (dB), A는 상수, B는 1차항의 계수이고, R은 강우강도 (mm/h)이다. 이 계산결과는 표 1과 같다. 이 표에는 강우강도와 특정 주파수의 주위잡음 레벨과의 상관계수도 나타내었다. 또 이 결과를 그림 4에 나타내었다. 이들 그림에서 ●는 측정치를 나타내고, 실선은 최소자승법으로 구한 결과를 그린 것이다. 유효한 자료가 부족하므로 다양한 풍속에 대한 조사가 필요하다고 생각되지만, 풍속 7 노트일 때 특정 주파수에 있어서 해수중 주위잡음 레벨은 강우강도의 상용대수와 매우 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다. 그리고 1차항의 계수 B는 주파수 5 kHz에서 16.6으로 가장 컸으며, 15 kHz에서 5.0으로 가장 작았다. 따라서 해수중 주위잡음을 측정하여 해표면에 있어서의 강우강도를 추정하는 데에는 주파수 5 kHz의 주위잡음 레벨을 모니터링하는 것이 가장 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

Table 1. Coefficients A and B of straight lines $NL=A+B \cdot \log_{10} R$ derived from a least-squares fit to ambient noise levels against rainfall rates for various frequencies and wind speed of 7 knots where NL is the noise level in dB, R is the rainfall rate in $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$.

Frequency (kHz)	A	B	Correlation coefficient
5	43.6	16.6	0.989
10	44.9	14.4	1.000
15	58.2	5.0	0.977
20	55.0	6.1	0.992
25	51.3	7.1	0.988
30	48.1	7.5	0.992
35	46.4	7.1	0.998
40	43.2	8.6	0.997
45	42.0	8.0	0.992
50	40.3	8.0	0.988

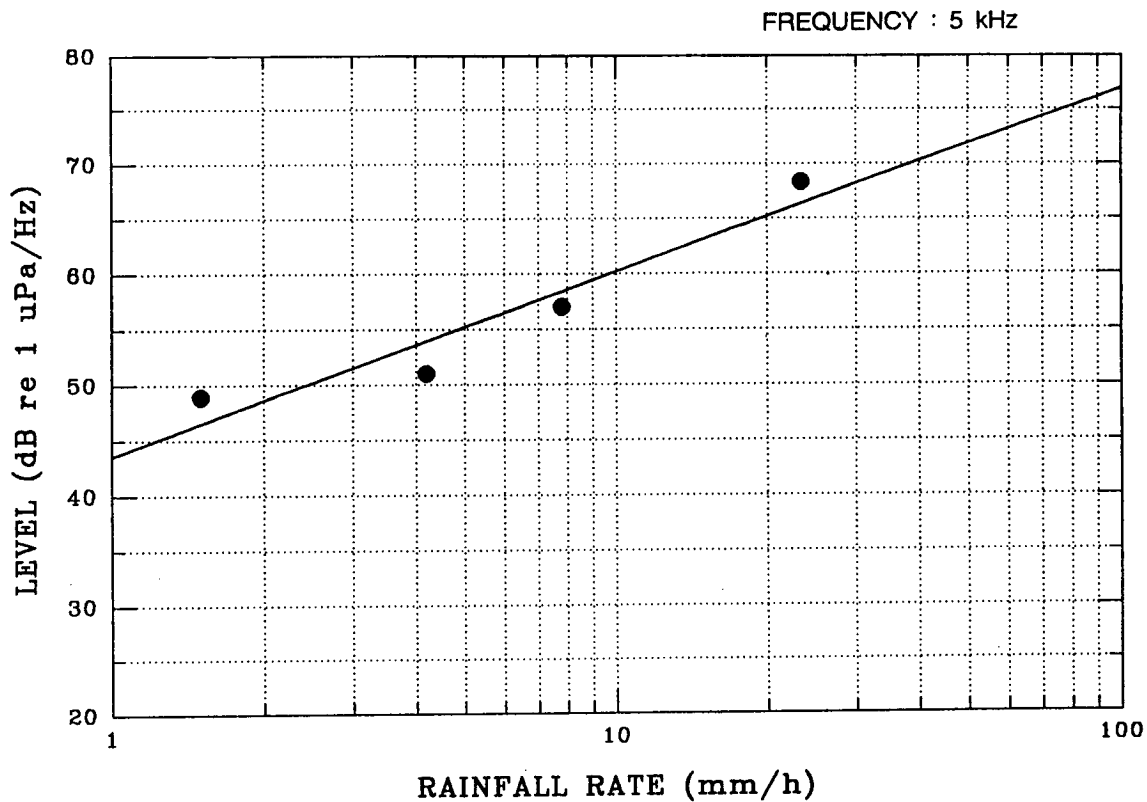


Fig. 4. Samples of noise spectrum levels for wind speeds of 7 knots against rainfall rates.

FREQUENCY : 10 kHz

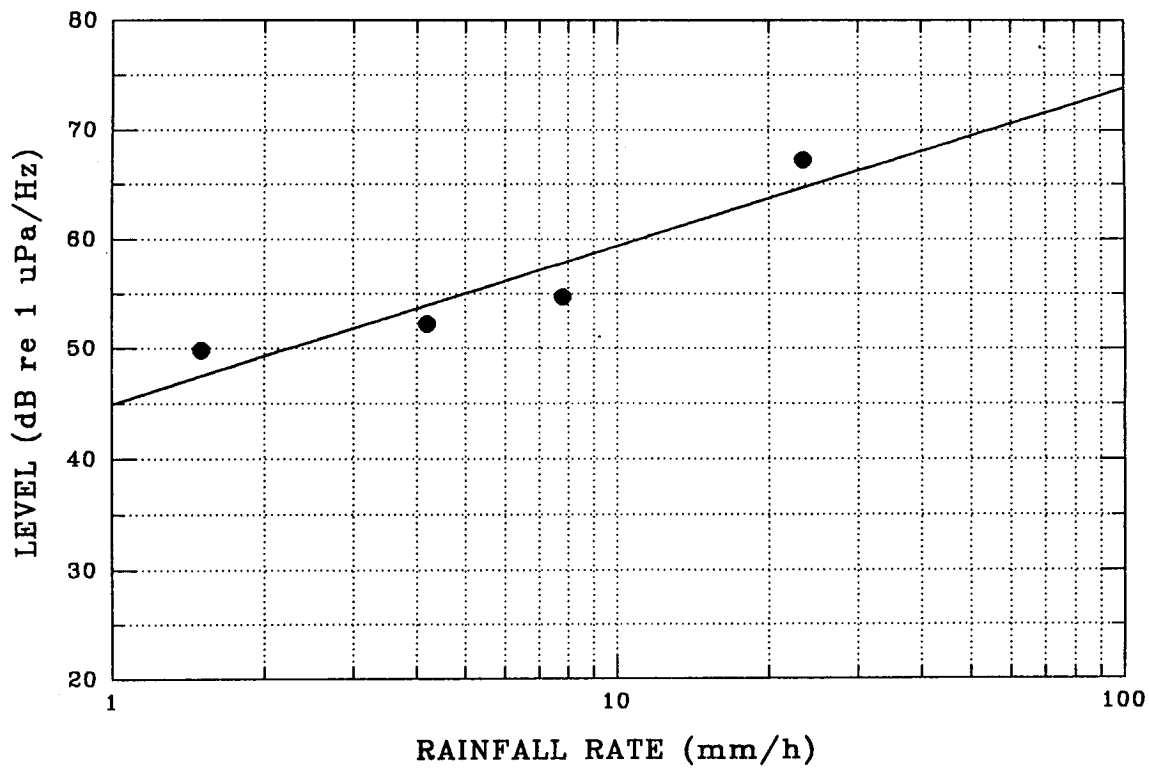


Fig. 4. (Continued)

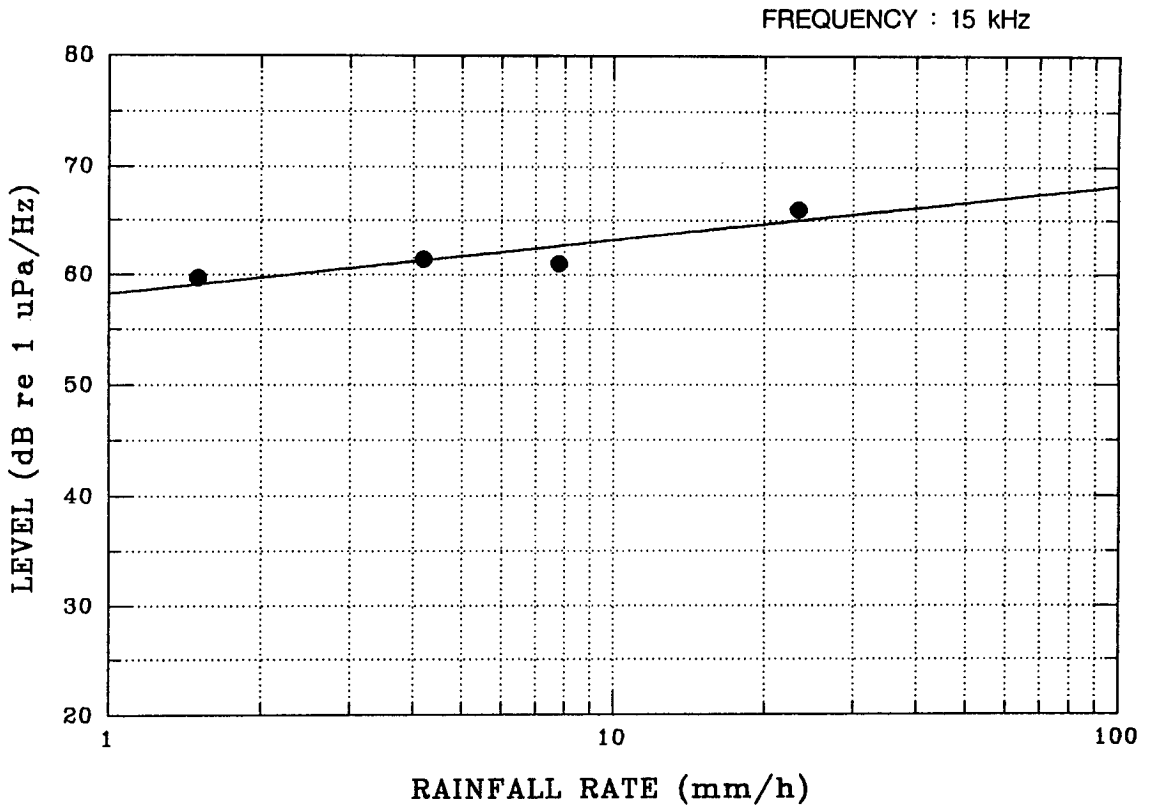


Fig. 4. (Continued)

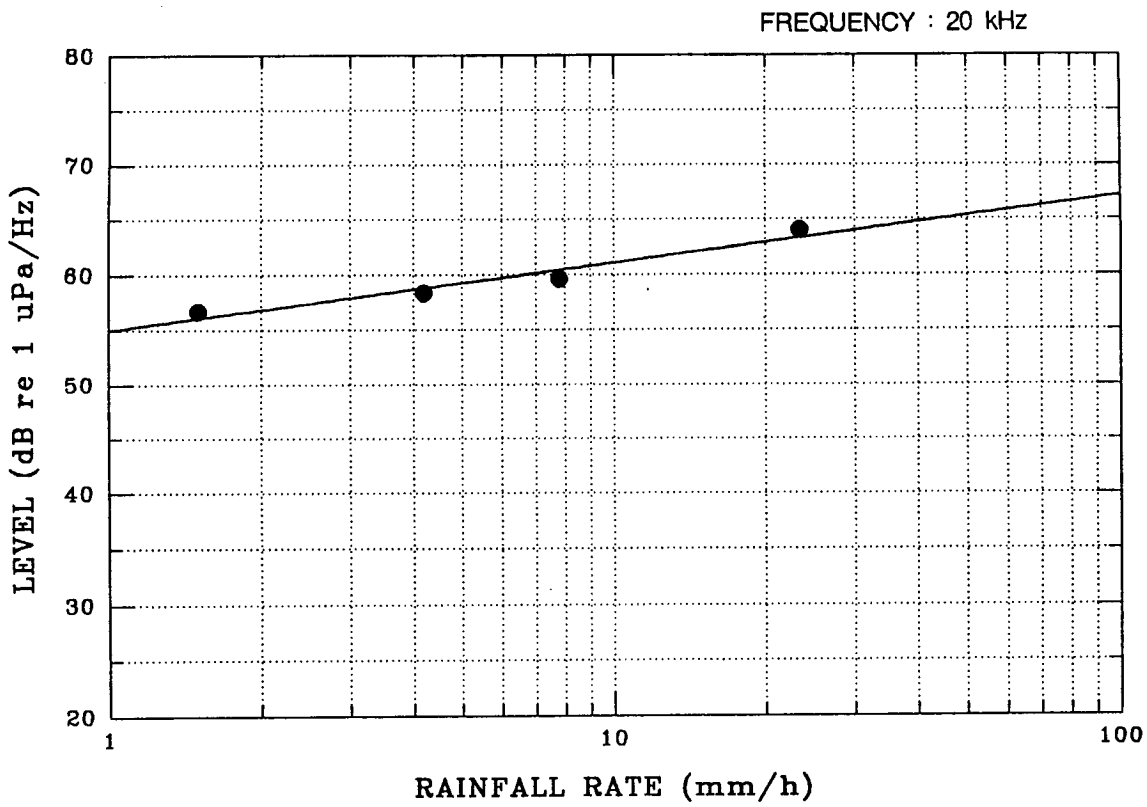


Fig. 4. (Continued)

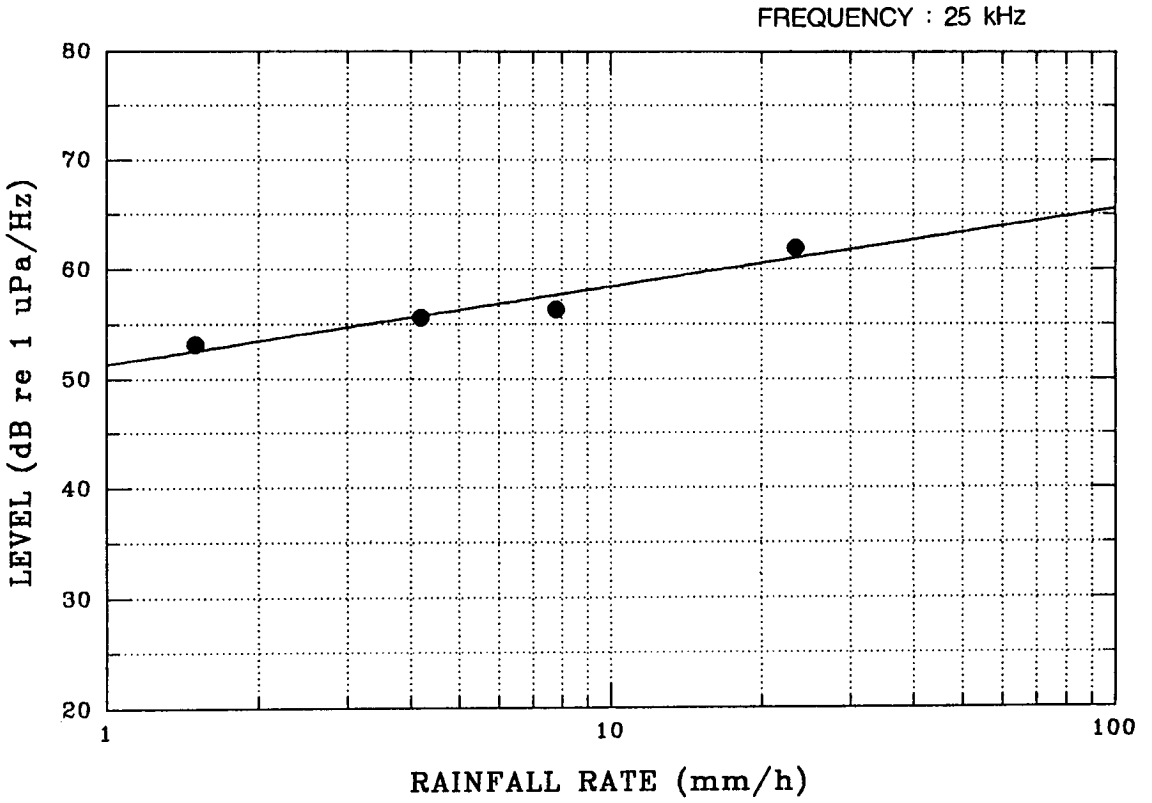


Fig. 4. (Continued)

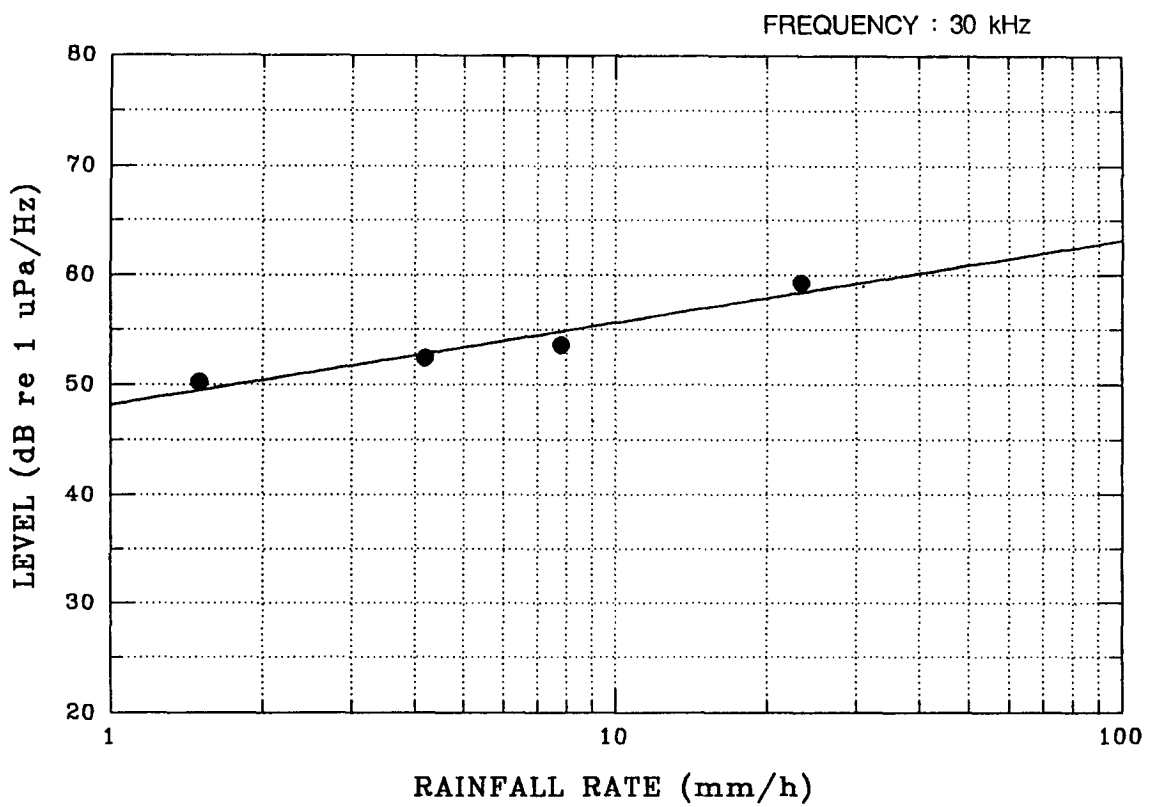


Fig. 4. (Continued)

FREQUENCY : 35 kHz

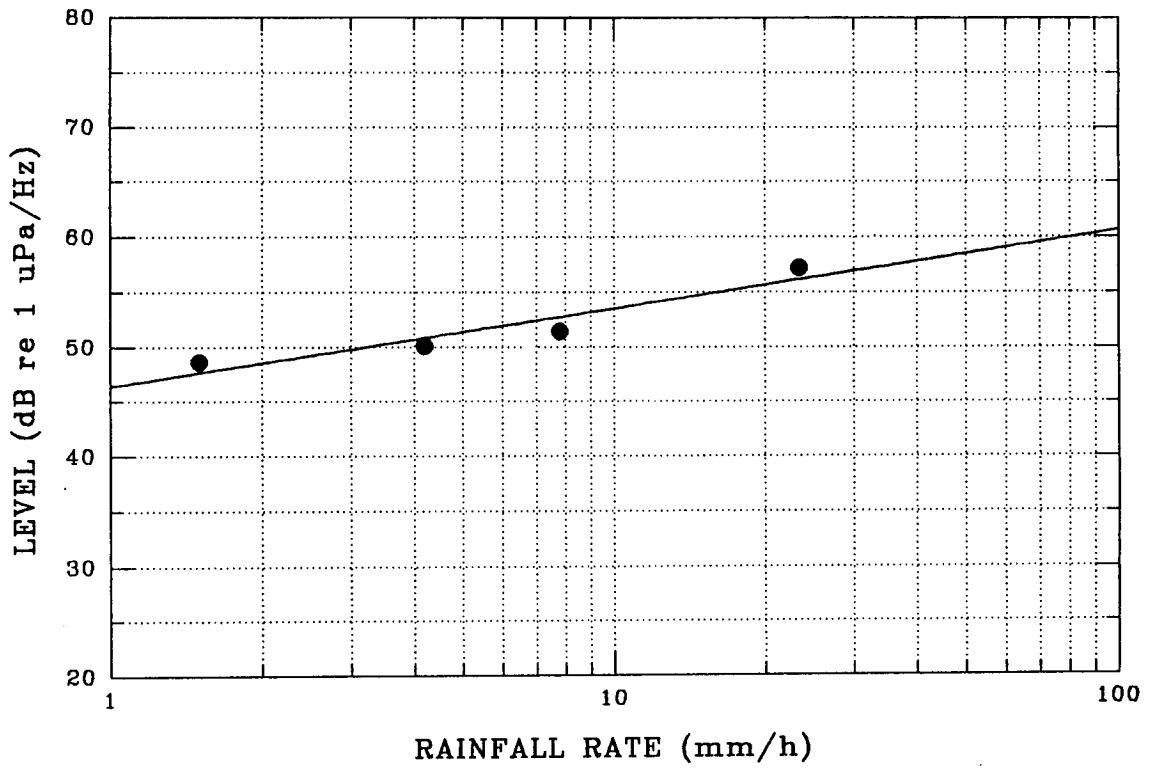


Fig. 4. (Continued)

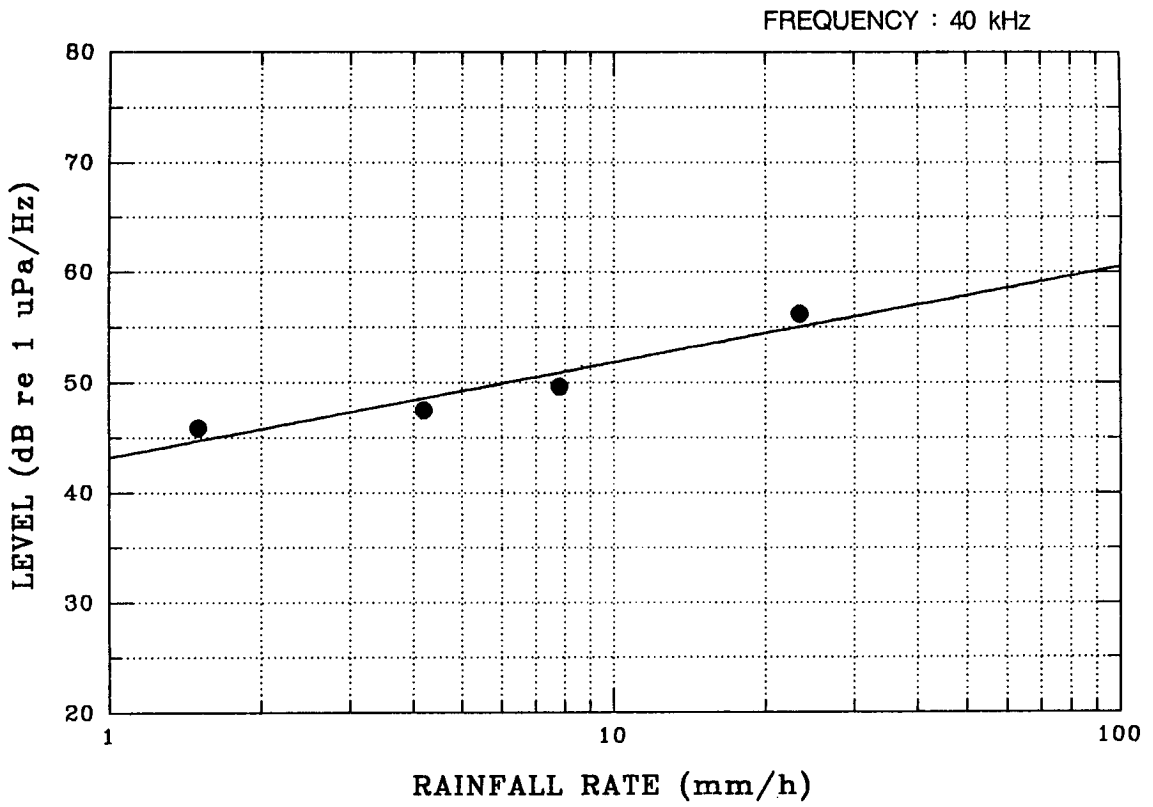


Fig. 4. (Continued)

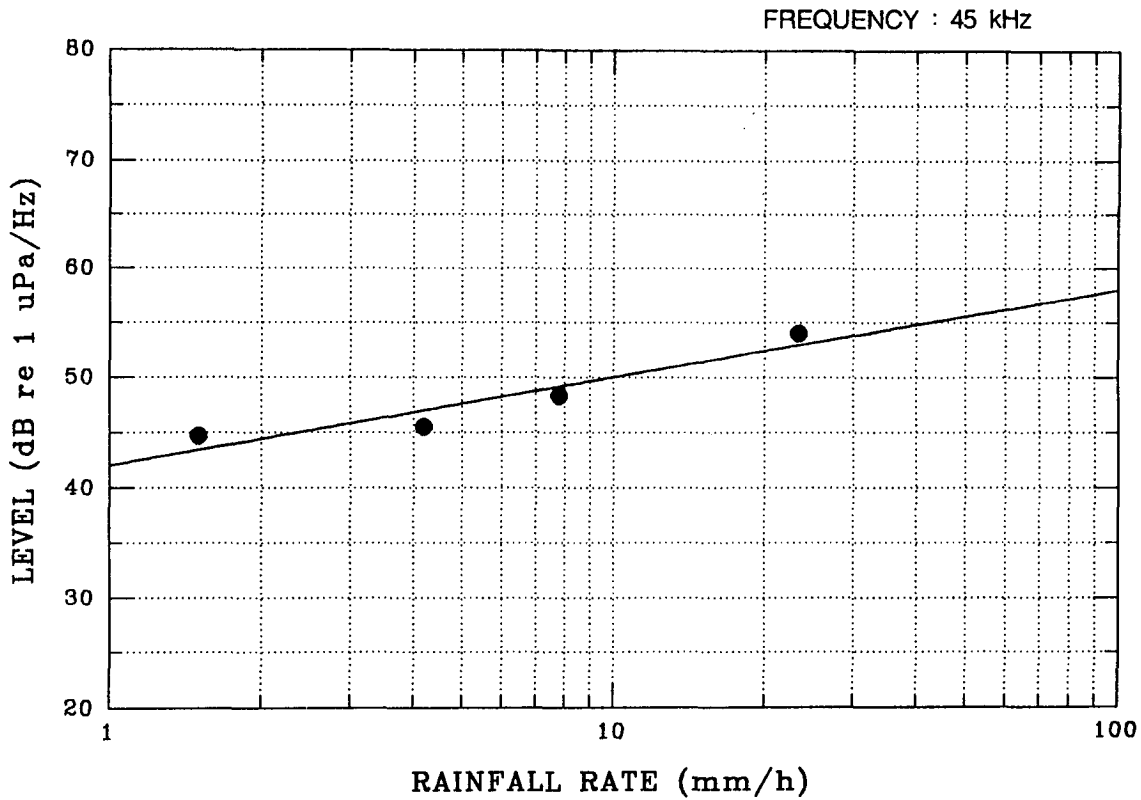


Fig. 4. (Continued)

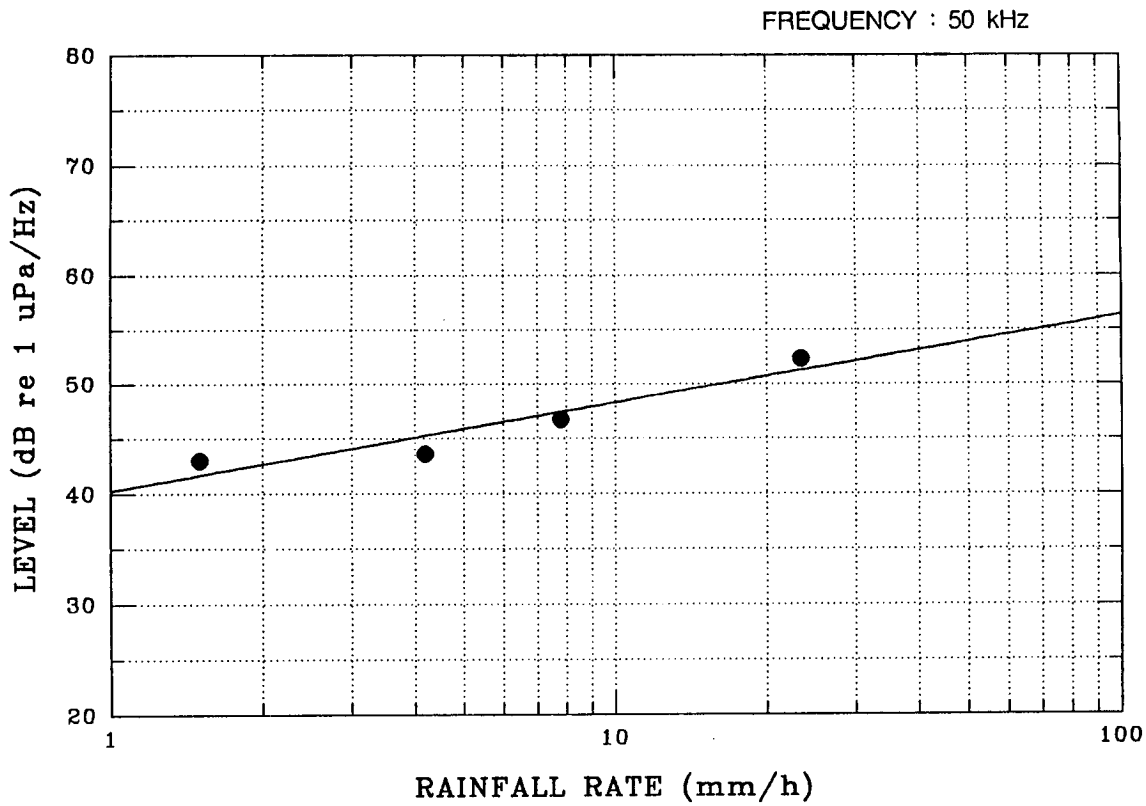


Fig. 4. (Continued)

수심 30 m의 수중 마이크로폰에서 수파한 해수중 주위잡음의 상대적인 음압파형을 그림 5에 나타내고 있다. 여기에서는 풍속이 7 노트로 일정하고 강우강도가 다른 경우이다. 이들 그림에 의하면, 강우강도가 작을 때 (강우강도가 1.5~4.2 mm/h의 경우)에는 진폭이 감소하고 있는 정현파가 우세하게 관측되고 있고, 이 정현파의 주파수가 약 13~15 kHz 근방임을 알 수 있다. 이것은 해표면에 비가 내릴 때, 이 빗방울에 의하여 해수중에 기포가 생기고, 이 기포가 진동함에 따라 발생하는 것으로 생각된다. 그러나 강우강도가 커지면 (강우강도가 23.4 mm/h의 경우), 충격파의 파형이 우세하게 관측되고 있다. 이것은 빗방울이 해표면에 부딪칠 때의 충돌에 의한 것으로 생각된다. 따라서 풍속이 7 노트일 때 해표면에 비가 내리면, 약한 비의 경우에는 빗방울에 의하여 해수중에 형성된 기포의 진동이 주요한 잡음원의 역할을 하고 있고, 특히 주파수 13~15 kHz에서의 레벨 피크는 이 기포의 진동에 의하여 생기는 것으로 사료된다. 한편 강한 비의 경우에는 빗방울이 해표면에 부딪치는 충돌이 해수중에 형성된 기포의 진동보다 더 우세한 잡음원의 역할을 하고 있으며, 이 경우에는 주파수 1~50 kHz의 모든 대역에서 해수중 주위잡음 레벨이 증가하는 것으로 생각된다.

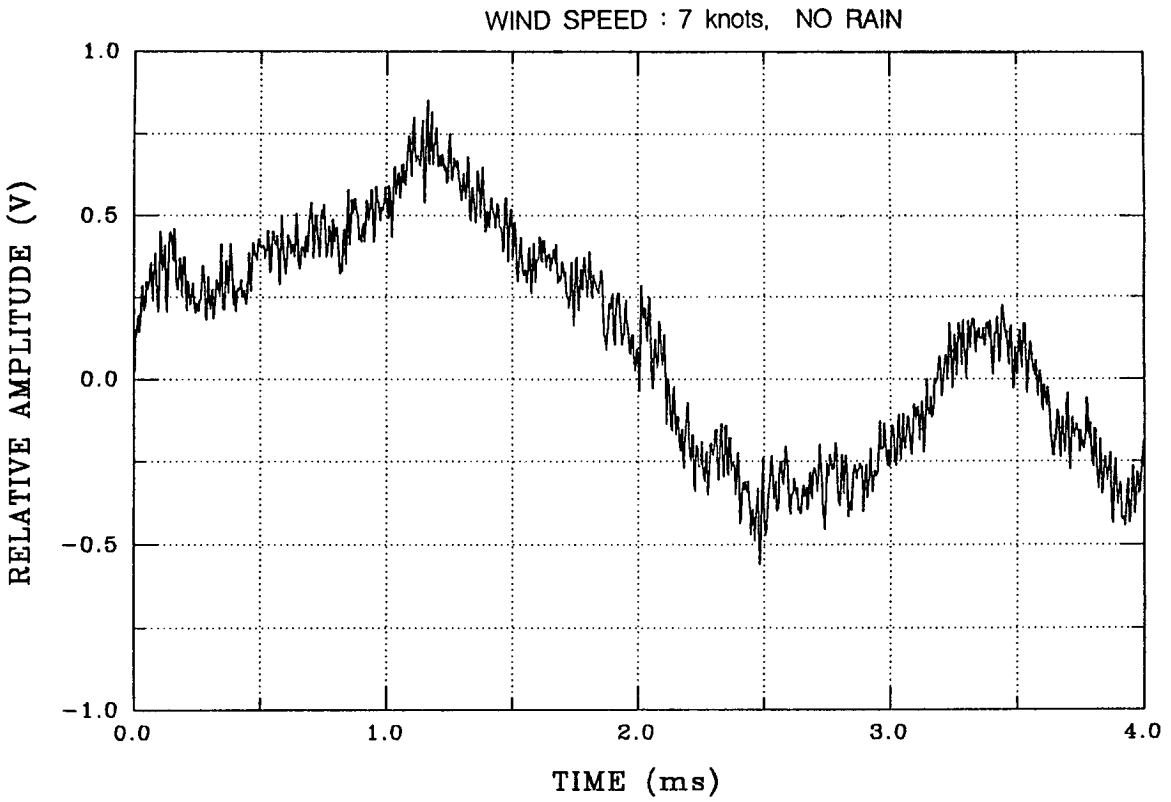


Fig. 5. Time series of ambient noise waveform received by hydrophone at a 30 m depth.

WIND SPEED : 7 knots, RAINFALL RATE : 1.5 mm/h

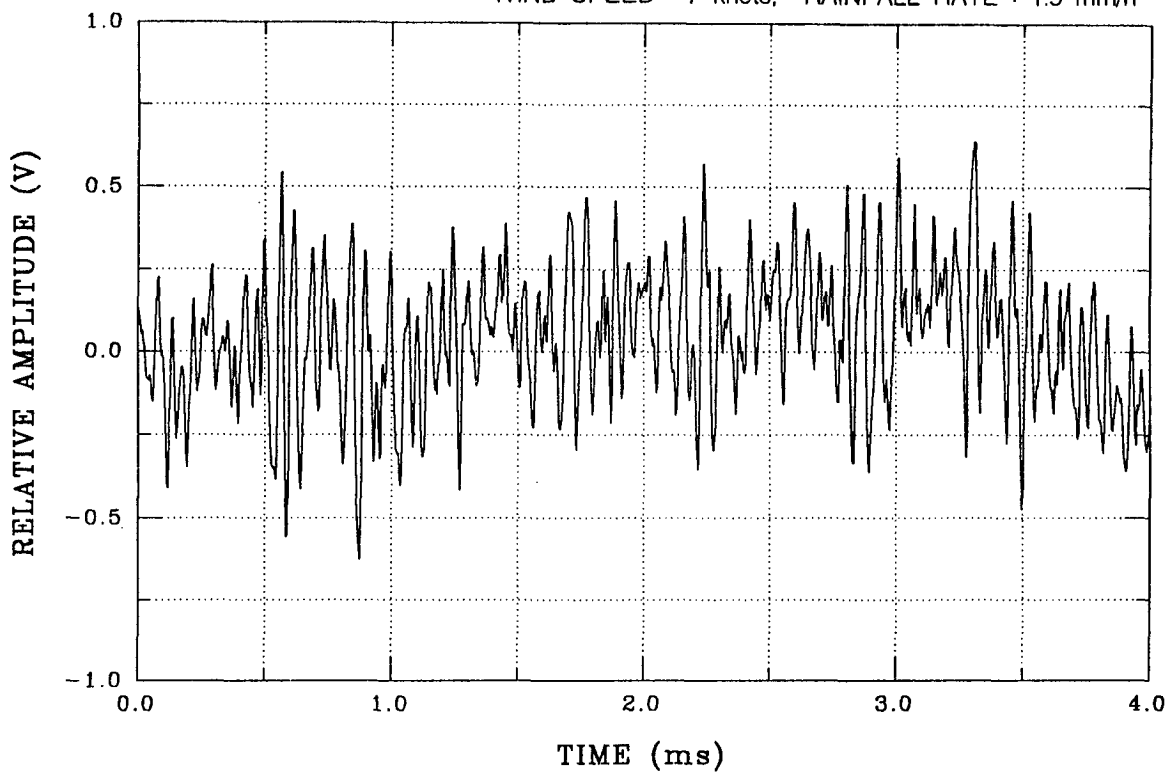


Fig. 5. (Continued)

WIND SPEED : 7 knots, RAINFALL RATE : 4.2 mm/h

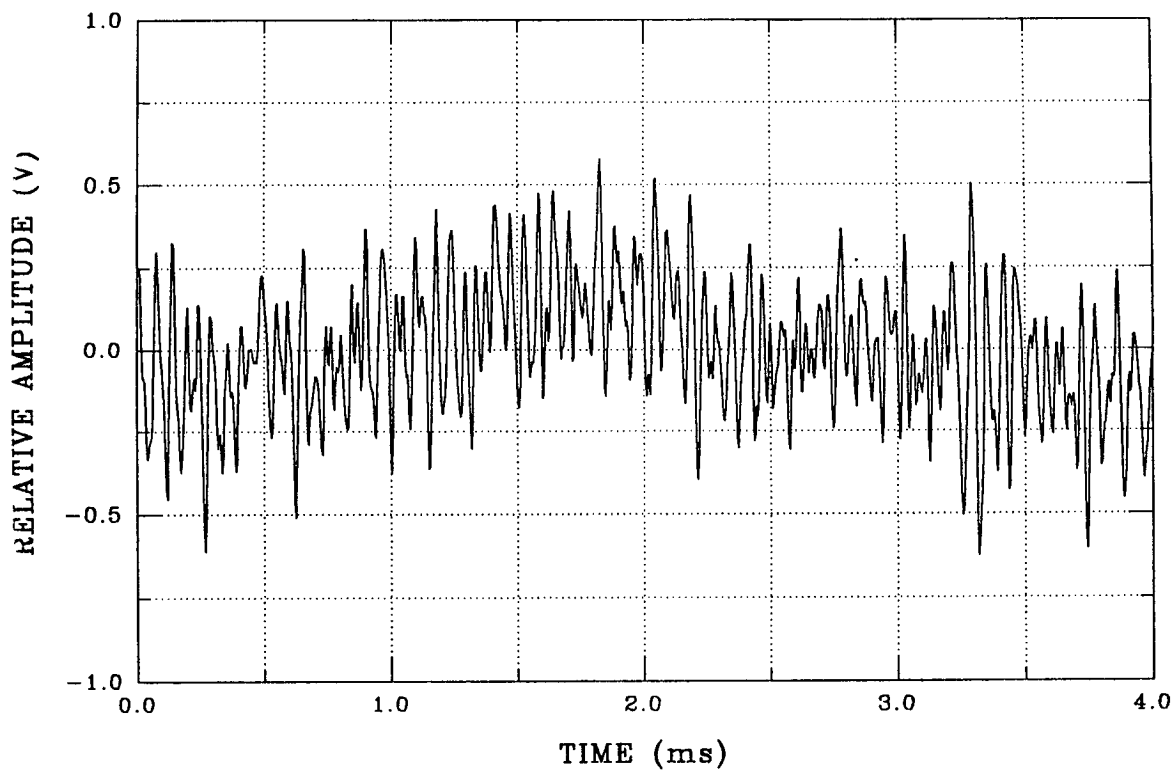


Fig. 5. (Continued)

WIND SPEED : 7 knots, RAINFALL RATE : 7.8 mm/h

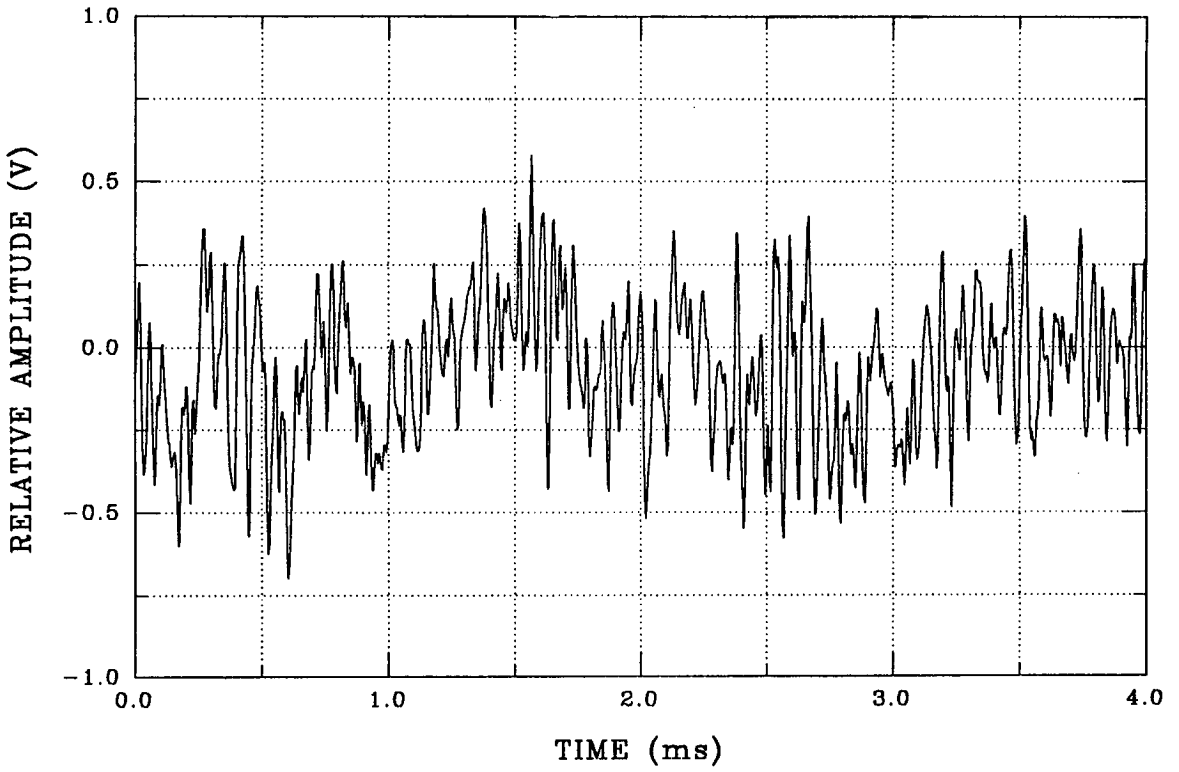


Fig. 5. (Continued)

WIND SPEED : 7 knots, RAINFALL RATE : 23.4 mm/h

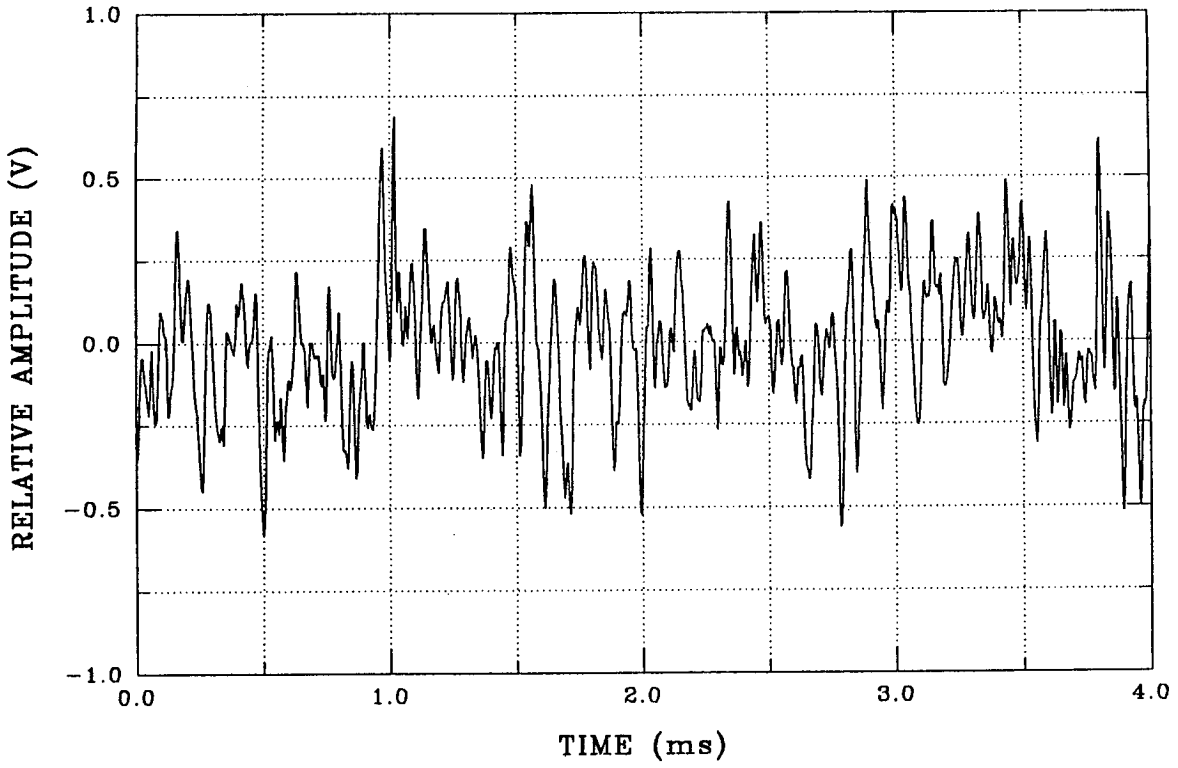


Fig. 5. (Continued)

제 4 장 결론

동해 속초연안에서 비가 내릴 때 해수중 주위잡음을 측정하여, 강우가 주위잡음에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 강우강도가 1.5~7.8 mm/h의 경우, 해수중 주위잡음의 스펙트럼 레벨은 주파수 13~15 kHz에서 피크를 보였으며, 이 대역에서 레벨은 비가 내리지 않을 때의 레벨보다 약 25 dB 증가하였다. 한편 강우강도가 23.4 mm/h의 경우, 스펙트럼 레벨은 13~15 kHz에서 피크를 보이지 않았으며, 주파수 1~50 kHz의 모든 대역에서 레벨이 증가하였고, 이 때의 레벨은 비가 내리지 않을 때의 레벨보다 약 20~30 dB 정도 높게 나타났다.
2. 풍속 7 노트의 경우 해표면에 비가 내리면, 해수중 주위잡음의 스펙트럼 레벨은 강우강도의 상용대수에 관한 1차식으로 나타낼 수 있었고, 1차항의 계수는 주파수 5 kHz에서 가장 컸으며, 주파수 15 kHz에서 가장 작았다.
3. 해수중 주위잡음은, 강우강도가 작은 경우 (강우강도가 1.5~4.2 mm/h)에는 비에 의해 해수중에 생긴 기포의 진동에 의하여 주로 발생하였지만, 강우강도가 큰 경우 (강우강도가 23.4 mm/h)에는 빗방울이 해표면에 부딪치는 충돌에 의하여 주로 발생하였다.

강우에 의한 수중잡음의 발생기구는 매우 복잡할 뿐만 아니라

여러 환경조건의 영향을 복합적으로 받고 있으므로, 강우에 의한 해수중 주위잡음 발생에 관한 현상을 구명하기 위하여는 강우강도, 풍속, 빗방울의 크기 분포 등에 관한 세밀한 관측과 함께 더욱 많은 해양에서의 주위잡음 측정이 필요하리라고 생각된다. 아울러 정성적인 해석을 위하여 실험실의 다양한 조건하에서 자유낙하하는 빗방울에 의한 수중음 발생에 관한 실험 및 비잡음 발생에 관한 수치모델 연구도 병행하여 추진되어야 하리라고 생각된다.

참고문헌

- Franz, G. J., "Splashes as sources of sound in liquids," *J. Acoust. Soc. Am.* 31, 1080-1096 (1959).
- Longuet-Higgins, M. S., "An analytic model of sound production by raindrops," *J. Fluid Mech.* 214, 395-410 (1990).
- Nystuen, J. A., "Rainfall measurements using underwater ambient noise," *J. Acoust. Soc. Am.* 79, 972-982 (1986).
- Oguz, H. N. and A. Prosperetti, "Bubble entrainment by the impact of drops on liquid surfaces," *J. Fluid Mech.* 219, 143-179 (1990).
- Oguz, H. N. and A. Prosperetti, "Numerical calculation of the underwater noise of rain," *J. Fluid Mech.* 228, 417-442 (1991).
- Prosperetti, A., L. A. Crum and H. C. Pumphrey, "The underwater noise of rain," *J. Geophys. Res.* 94, 3255-3259 (1989).
- Pumphrey, H. C., L. A. Crum and L. Bjørnø, "Underwater sound produced by individual drop impacts and rainfall," *J. Acoust. Soc. Am.* 85, 1518-1526 (1989).
- Pumphrey, H. C. and P. A. Elmore, "The entrainment of bubbles by drop impacts," *J. Fluid Mech.* 220, 539-567 (1990).
- Scrimger, J. A., "Underwater noise caused by precipitation," *Nature* 318, 647-649 (1985).
- Scrimger, J. A., D. J. Evans, G. A. McBean, D. M. Farmer and B. R. Kerman, "Underwater noise due to rain, hail and snow," *J. Acoust. Soc. Am.* 81, 79-86 (1987).

Scrimger, J. A., D. J. Evans and W. Yee, "Underwater noise due to rain—Open ocean measurements," *J. Acoust. Soc. Am.* 85, 726-731 (1989).