큰돌고래의 휘슬음 특성*

신형일 · 서두옥** · 이대재 · 황두진*** · 배문기**** · 이유원

부경대학교, **제주대학교, ***여수대학교, ****한국해양수산연수원

(2002년 10월 21일 접수)

Characteristics of Bottlenose Dolphin(*Tursiops truncatus*) Whistle*

Hyeong-Il SHIN, Du-Ok SEO, Dae-Jae LEE, Doo-Jin HWANG***, Mun-Ki BAE**** and Yoo-Won LEE**

Pukyong National University, **Cheju National University, ***Yosu National University and ****Maritime and Fisheries Technology

(Received October 21, 2002)

Abstract

This paper was described on the characteristics of bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) whistle to develop a warning and attracting acoustic system which can be made friends woith environment and minimized to the fishing pollution from *Cetaceans*. The experiment for the acoustics of bottlenose dolphin whistle was carried out in dolphin performance hall at Seoul Grand Park during 18th~19th April, 2002. The frequency and the spectrum level of whistle at same pool were revealed 6~10*kHz* and 85*dB* but those revealed two harmonic waves as 6.7*kHz* and 21.3*kHz* for the frequency and 110*dB* and 94*dB* for the spectrum level, respectively, when a dolphin isolated from others. The range of frequency change of whistle was 3.86*kHz* and continuous time was 0.08 *sec*. The range of frequency change 10.20 *kHz* higher as 14.06 *kHz* and continuous time was 0.11*sec* longer as 0.19*sec* when a dolphin isolated from others. By the Mann-Whitney test for the result, there was a significant difference for the range of frequency change and continuous time between normal condition and when a dolphin was isolated from others. The pattern of whistle at the dolphin performance hall was five types and the frequency was getting increased slowly in the range of 5~10*kHz* at normal condition but there were pattern change of 5~20*kHz* at the isolated condition. Therefore it is thought that these experiments would be valuable for the development of acoustic system.

Key words : Bottlenose dolphin, whistle, Warning and attracting acoustic system.

* 본 논문은 국립수산과학원 연구개발용역 '고래류의 음향학적 연구' 의 일부임.

서 론

고래류의 자원은 국제포경위원회(IWC)의 국제포경규제협약(ICRW)에 의해 1986년부터 상업포경이 금지되어 15년이 경과된 현재 전 세계적으로 꾸준히 증가되어, 최근 우리 나라 연근해에서도 수 년 전까지만 해도 자취를 감추었던 여러 종의 고래류가 빈번히 출현하고 있다. 이로 인해, 상업포경의 재개에 대한 기대와 고래류를 관광자원으로 활용하는 방안의 계획 등 긍정적인 면이 많이 발생하고 있다. 그러나 연근해 어장에 설치한 어구의 파손이나 집어한 어군들에게 위협을 가해 어획률을 저하시키는 등 어업공해로서도 그 영향이 두드러지게 나타나고 있다.

이와 같이 고래류의 출현에 따른 부정적인 면을 최소화하고 긍정적인 면을 극대화하기 위해서는 그들의 생태를 연구하지 않으면 안 되고, 특히 고래류와 같이 수중에서 초음파를 이용하여 섭이 및 의사 소통을 하는 동물의 생태를 연구하기 위해서는 그들이 발생하는 수중명음을 연구하는 것이 필수적이다.

고래류의 명음에 관한 연구로서 Lang and Smith[1]와 Lilly and Miller[2] 는 떨어져 있는 2마리의 돌고래가 음향적으로 결합되면 휘슬을 주고받는 것으로부터 커뮤니케이션을 확신하는 등의 휘슬음에 관한 연구와 Whitlow *et al.*에 의한 대서양 큰돌고래의 음향정위의 전파, 목표물의 탐지, 송신비임 등에 관한 연구[3-5] 외에 Akamatu의 명음 발생 전략에 관한 연구와 Popov, Akamatu, Houser 등의 고래류의 에코로케이션 에너지, 주파수 분포에 관한 연구 등 1950년대 중반부터 시작하여 다수의 연구가 활발하게 행해지고 있다[6-10]. 그러나 국내연구로서는 신 등의 참돌고래의 반향정위 신호특성에 관한 연구가 있을 뿐 거의 이루어지지 않고 있다[11].

따라서, 본 연구에서는 고래류의 어업공해를 최소화하고 환경친화적으로 이용할 수 있는 음향유인/경고시스템을 개발하기 위한 기초연구로서 우리 나라 연근해에 자주 출현하는 큰돌고래를 대상으로 고래류가 발하는 수중명음중 서로의 존재를 나타내는 식별신호로 사용되고 있는 것으로 알려져 있는 휘슬음의 특성에 대해 서울대공원 돌고래 쇼장에서 측정 실험한 결과를 검토, 분석하였다.

재료 및 방법

1. 측정장소 및 환경

큰돌고래(Bottlenose Dolphin, *Tursiops truncatus*)의 음향특성 실험은 2002년 4월 18~19일, 서울대공원 돌고래 쇼장에서 사육하며 쇼를 행하고 있는 숫컷 3마리를 대상으로 평상시와 3마리중 1마리를 시각이나 음향적으로는 서로의 존재를 확인할 수 있으나 다른 수조에 격리시켰을 경우로 나누어 행하였으며 그들의 주요 생태 특징은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of experimented bottlenose dolphin

Name	Sex	Body Length (*cm*)	Body Weight (*kg*)	Years	Berth place
Chadol	M	240	170	14~15	Cheju coast
Gundung	M	230	140~150	8~9	Cheju coast
Daepo	M	230	140~150	9~10	Cheju coast

2. 측정장치 및 분석방법

실험에 사용된 측정 및 분석장치는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 수중명음은 무지향성 하이드로폰(OKI, ST1001)을 수심 1*m* 지점에 설치하여, 수신된 수중명음을 음압계에서 증폭한 후 오실로스코프(Tektronix, THS720A)로 수신 파형을 관찰하면서 디지털 데이터레코더(SONY, PCHB 244)에 수록하였다.

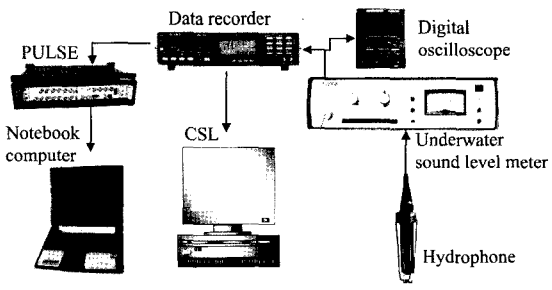

Fig. 1. Schematic diagram for data acquisition and analysis apparatus.

녹음된 테이프는 실험실에서 재생하여 PULSE 다분석 시스템(Type 2827-002, B&K)을 이용하여 휘슬음을 랜덤하게 샘플링하여 스펙트럼 분석을 행하였고, 또한 음향분석기 CSL(4300B, KAY)로써 Fig. 2와 같은 소너그램을 기록하여 음향특성 패턴 모델을 작성하여 주파수 특성을 분석하였다. 주파수 특성 분석에서 주파수 변동폭과 지속시간은 Fig. 2와 같이 정의하였다.

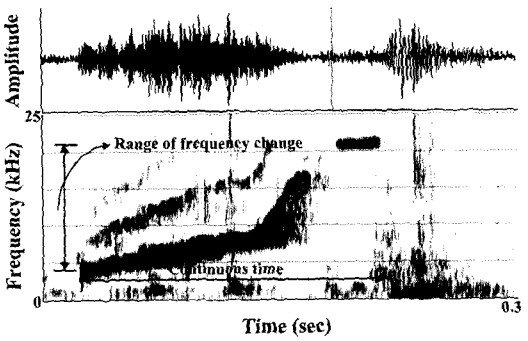

Fig. 2. An example of sonargram of dolphin whistle.

또한, 소너그램은 Dreher and Evans[12]에 의한 패턴 모델을 근거로 Fig. 3과 같이 그 유형을 시간의 경과에 따라 주파수가 서서히 상승하는 형(Ⅰ형), 상승한 후 일정하게 유지되는 형(Ⅱ형), 서서히 하강하는 형(Ⅲ형), 상승하였다가 하강하는 형(Ⅳ형), 하강 후 서서히 상승하는 형(Ⅴ형) 그리고 상승하였다가 하강하여 다시 상승하는 형(Ⅵ형) 등 6가지로 구분하였다.

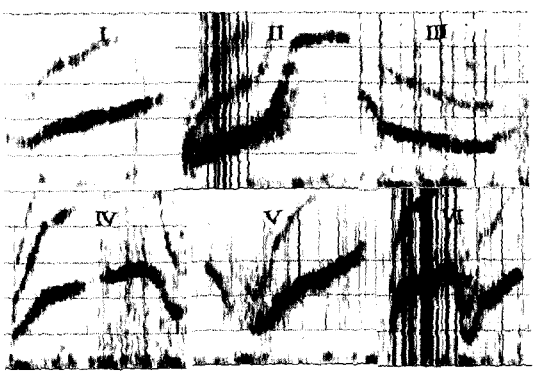

Fig. 3. Pattern model of whistle recorded by sonargram.

결과 및 고찰

1. 휘슬음의 주파수 특성

수족관 큰돌고래 휘슬음을 주파수 분석한 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 쇼 대기중의 평상시와 같은 상태에서의 휘슬음을 나타낸 것이며, Fig. 4(b)는 3마리중 1마리를 격리시켰을 때의 휘슬음의 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)에서 평상시 휘슬음의 지속시간은 80ms였고, 그 때의 중심주파수와 스펙트럼 레벨은 각각 6~10kHz, 85dB을 나타내었다. 그리고, Fig. 4(b)와 같이 1마리를 격리시켰을 때의 지속시간은 160ms로 평상시 휘슬음 지속 시간의 2배를 나타내었다. 또한, 그 때의 중심주파수는 각각 6.7kHz, 21.3kHz 두 개의 고조파를 나타내었고, 스펙트럼 레벨은 각각 110dB과 94dB을 나타내어 평상시와는 다른 형태를 나타내었으며, 스펙트럼 레벨도 평상시보다 10~25dB 높은 경향을 나타내었다.

2. 휘슬음의 지속시간과 주파수 변동폭

큰돌고래 휘슬음의 지속시간과 주파수 변동폭을 분석한 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 □는 평상시 3마리의 큰돌고래가 함께 수조 내에서 유영하고 있을 때의 휘슬음의 지속시간과 주파수 변동폭을 나타낸 것이며, ■는 그 중 1마리를 격리시켰을 때의 지속시간과 주파수 변동폭이다.

평상시의 상태에서 131개의 휘슬음을 분석한 결과, 주파수 변동폭은 평균 3.86kHz, 표준편차는 2.18kHz를 나타내었다. 그리고 지속시간은 평균 0.08sec를, 표준편차는 0.09sec를 나타내어 주파수 변동폭과 지속시간에서 각각의 휘슬음 사이에 변동이 크지 않고 안정되어 있다는 것을 알 수 있었다. 그러나, 1마리를 격리시킨 상태에서 147개의 휘슬음을 분석하여 주파수 변동폭은 평균 14.06kHz, 표준편차는 4.14kHz를 나타내었다. 또한 지속시간은 평균 0.19sec, 표준편차는 0.1sec를 나타내어 평상시와 비교하여 주파수 변동폭은 10.2 kHz 높았고, 지속시간은 0.11 sec 길어진다는 것을 알 수 있었다. 더욱이 이들 두 경우의 주파수 변동폭 및 지속시간에 대한 통계적 검증을 행하였는데 그 결과는 Table 2와 같다.

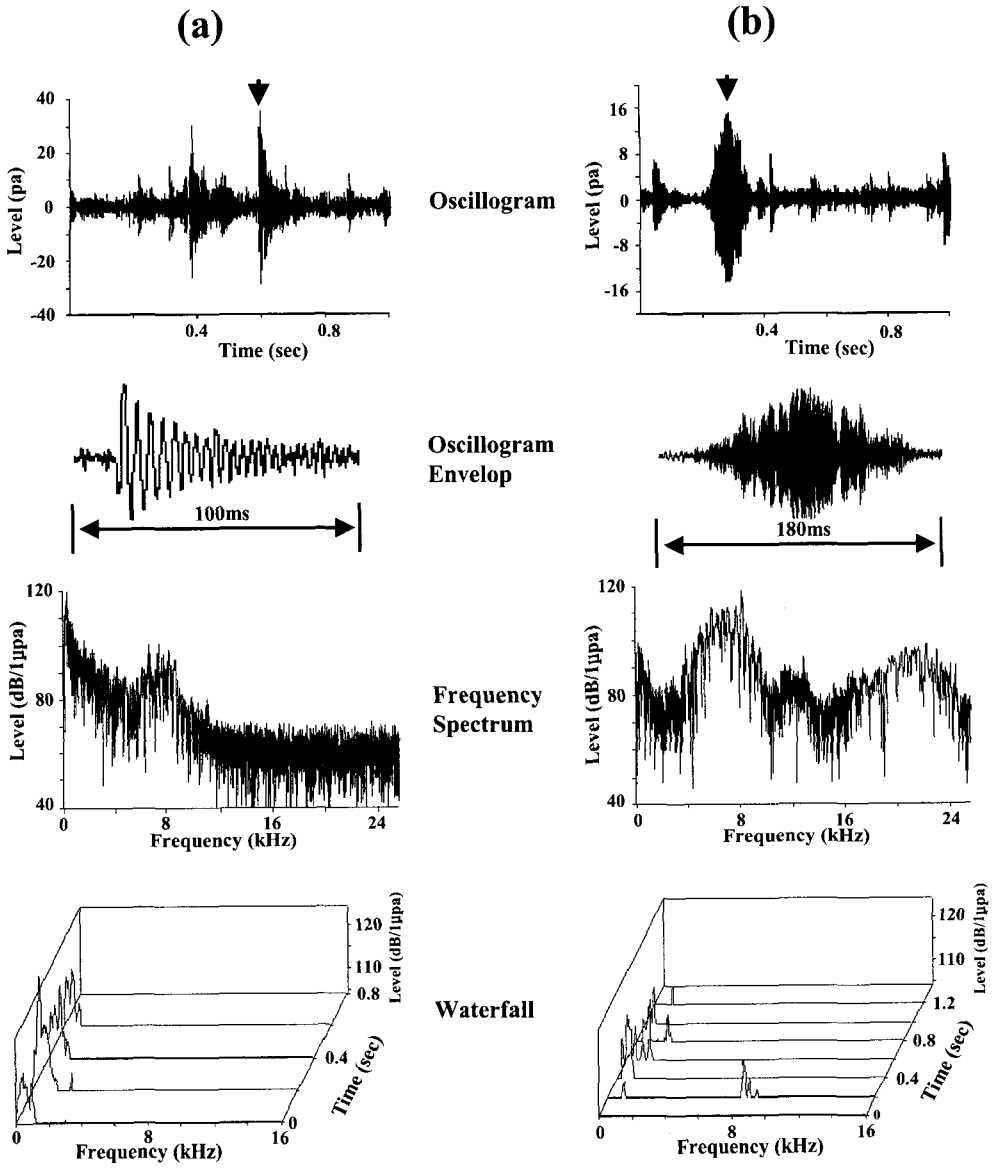

Fig. 4. Oscillogram, frequency spectrum and waterfall of the whistle in normal condition (a) and when a dolphin was isolated from others (b).

Table 2에서 휘슬음의 주파수 변동폭과 지속시간 모두 평상시와 1마리를 격리시켰을 때는 상이함에 유의성을 확인할 수 있었다. 따라서, 큰돌고래는 동료와 함께 생활 도중에 그 중 1마리가 다른 장소로 격리되었을 때는 동료를 찾기 위해 불안정한 주파수를 발하는 것으로 추측되었다.

한편, 본 실험조건과 비슷한 장기 사육된 큰돌고래의 수조실험에서 휘슬음 분석에 대한 竹村의 보고에 의하면 평상시 큰돌고래 휘슬음의 주파수 변동폭 및 지속시간은 각각 1.65~3.21kHz, 0.60~0.35sec를 중심으로 집중되었다고 보고하였다[13].

본 실험의 주파수 변동폭 및 지속시간의 범위는 각각 1.70~5.05kHz, 0.03~1.25sec를 중심으로 집중되어 竹村의 결과와 비교하여 본 실험의 결

과는 주파수 변동폭 및 지속시간의 일치하는 부분도 있었으나 주파수 변동폭의 최대치는 1.85 *kHz* 높았고, 지속시간의 최대치는 2.20*sec* 짧게 나타났다.

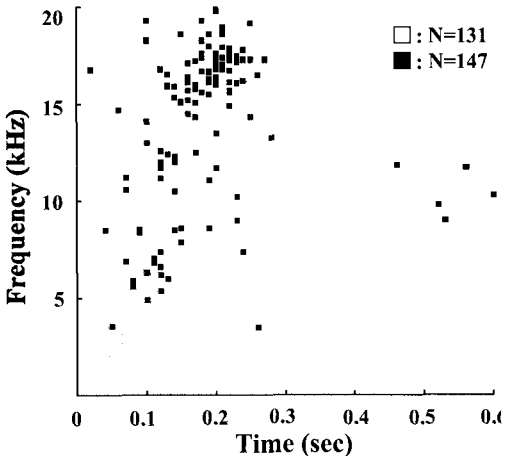

Fig. 5. The comparison of the range of frequency change and continuous time of whistle sonargram by normal condition (□) and when a dolphin was isolated from others (■).

Table 2. The Average and standard deviation (S.D.) of the range of frequency change and continuous time of whistle sonargram by normal condition and when a dolphin was isolated from others

Item	Normal condition		Isolated from others		Mann Whitney test(p)
	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	
Range of frequency change	3.86	2.18	14.06	4.14	p<0.01
Continuous time	0.08	0.09	0.19	0.10	p<0.01
Number of measured whistle	131		147		

3. 휘슬음의 패턴 모델별 출현빈도

휘슬음의 패턴 모델을 Fig. 3에서와 같이 Ⅰ~Ⅵ까지 6가지로 분류한 후 평상시 휘슬음의 유형과 3마리중 1마리를 격리시킨 상태에서 휘슬음의 유형을 비교한 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 평상시의 상태에서는 Ⅰ형이 96.4%를 나타내었고, Ⅱ형이 3.6%을 나타내었을 뿐 다른 형태의 휘슬음은 관찰되지 않았다. 그러나 격리된 상태에서는 Ⅰ형이 36.6%를, Ⅱ형이 57.3%를, Ⅲ형이 1.5%를, Ⅴ형이 1.5%를, Ⅵ형이 3.1%를 나타내어 Ⅱ> Ⅰ> Ⅵ> Ⅲ·Ⅴ의 순으로 나타났으며, Ⅳ형은 관찰되지 않았다.

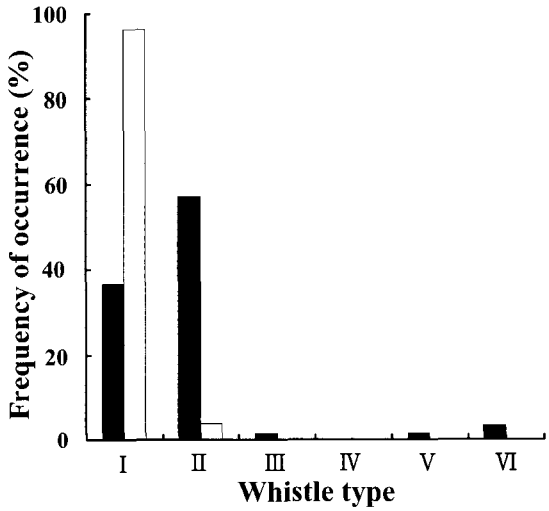

Fig. 6. The comparison of whistle shape .by normal condition (□) and when a dolphin was isolated from others (■).

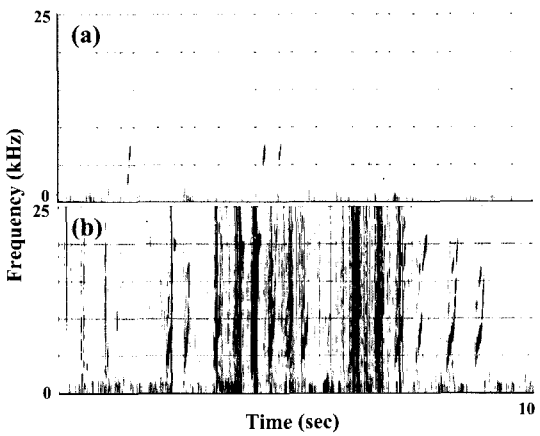

Fig. 7. The comparison of whistle sonargram by normal condition (a) and when a dolphin was isolated from others (b).

평상시와 격리된 상태를 비교하여 보면, 격리된 상태에서는 평상시의 Ⅰ형의 휘슬음보다는 Ⅱ형의 휘슬음이 가장 많았고, 그 외에도 다양하고 복잡한 형태의 휘슬음들이 관찰되었다. 수족관에서 평상시와 격리된 상태의 대표적인 소너그램을 나타내면 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 평상시에는 5~10*kHz* 전후의 Ⅰ형의 휘슬음만 반복 관찰되는데 비하여 격리된 상태에서는 5~20*kHz*의 폭넓은 주파수대에 걸쳐 주로 Ⅰ형과 Ⅱ형이 혼합되어 관찰됨을 알 수 있었다.

요 약

고래류의 어업공해를 최소화하고 환경친화적으로 이용할 수 있는 음향 유인/경고시스템을 개발하기 위한 기초연구의 일환으로 우리 나라 연근해에 자주 출현하는 큰돌고래의 휘슬음을 서울대공원 돌고래 쇼장에서 측정, 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 수족관 내에서 생활하고 있는 큰돌고래의 평상시 휘슬음의 중심 주파수대와 스팩트럼 레벨은 각각 6~10*kHz*와 85*dB*을 나타내었고, 이들을 서로 격리시킨 경우, 중심 주파수는 6.7*kHz*대와 21.3*kHz*대 두 개의 고조파를 나타내었으며, 스팩트럼 레벨은 각각 110*dB*와 94*dB*를 나타내어 평상시보다는 불안정한 휘슬음의 주파수대와 다른 형태를 나타내었다.
2. 평상시의 휘슬음 주파수 변동폭은 평균 3.86*kHz*이었고, 지속시간은 평균 0.08*sec*를 나타내었다. 그러나 격리시킨 경우는 평상시와는 달리 그 변동폭은 평균 14.06*kHz*이었고, 지속시간은 평균 0.19*sec*를 나타내어 평상시와 비교하여 주파수 변동폭이 10.20*kHz* 높아지고 지속시간은 0.11*sec* 길어짐을 알 수 있었다. 더욱이 Mann-Whitney 검정을 통하여 휘슬음의 주파수 변동폭과 지속시간 모두 평상시와 1마리를 격리시켰을 때는 상이함에 유의성을 확인할 수 있었다.
3. 돌고래 쇼장에서의 휘슬음의 패턴 모델을 6가지 형태로 분류할 수 있었고, 평상시에는 5~10*kHz* 범위의 주파수로 서서히 상승하는 형이 거의 대부분이었으나, 격리시킨 경우에는 5~20*kHz*의 폭 넓은 주파수대에 걸쳐 여러 가지 패턴을 관찰할 수 있었으며, 특히 주파수가 상승한 후 일정하게 유지되는 형태의 패턴이 많이 관찰되었다.

한편, 휘슬음은 종간 및 생활환경에 따라 사용되는 주파수 대역폭이 서로 다른 것을 예상할 수 있으므로 우리 나라 연안에는 큰돌고래, 참돌고래, 낫돌고래, 상괭이 등 비교적 많은 돌고래류가 자주 출현하고 있어 이들 종들에 대한 위협음 및 유인음에 대한 대역을 파악하기 위해서는 각 종들에 대한 수중음향은 물론 행동도 함께 분석할 필요가 있으며 더욱이 폭 넓은 현장실험과 데이터 축적을 병행하여야 할 것이다.

사 사

본 실험을 행함에 있어 실험이 성공적으로 끝날 수 있도록 물심양면으로 협조하여 주신 서울대공원 돌고래 쇼장의 전돈수 주임과 퍼시픽 랜드 김경종 차장 이하 임직원들께 감사를 드립니다.

참고문헌

1) Lang, T. G. and Smith, H. A. P. (1965) : Communication between dolphins in separate tanks by way of an electronic acoustic link, Science 150, 1839-1844.
2) Lilly, J. C. and Miller, A. M. (1961) : Vocal exchanges between dolphins, Science 134, 1873-1876.
3) Whitlow, W. L. Au., Robert Floyd, W. and Haun, J. E. (1978) : Propagation of atlantic bottlenose dolphin echolocation signals, J. Acoust. Soc. Am. 64(2), 411-422.
4) Whitlow, W. L. Au. and Penner, R. H. (1981) : Target detection in noise by echolocating Atlantic bottlenose dolphins, J. Acoust. Soc. Am. 70(3), 687-693.
5) Whitlow, W. L. Au., Moore, P. W. B. and Pawloski, D. (1986) : Echolocation transmitting beam of the atlantic bottlenose dolphin, J. Acoust. Soc. Am. 80(2), 688-691.
6) Whitlow, W. L. Au. (1993) : The sonar of dolphins, Springer-Verlag, 277.
7) 赤松友成(1996) : イルカのエコーロケーションと鳴音發生戰略, 日本音聲學會誌 52(7), 523-528.
8) Popov, V. V., Supin, A. Y. and Klishin, V. O. (1997) : Frequency tuning of the dolphin's

hearing as revealed by auditory brain-stem response with notch-noise masking, J. Acoust. Soc. Am. 102(6), 3795-3801.

9) Akamatsu, T., Wang, D., Nakamura, K. and Wang, K. (1998) : Echolocation range of captive and free-ranging baiji (Lipotes vexillifer), finless porpoise (Neophocaena phocaenoides), and bottlenose dolphin (Tursiops truncatus), J. Acoust. Soc. Am. 104(4), 2511-2516.

10) Houser, D. S., Helweg, D. A. and Moore, P. W. (1999) : Classification of dolphin echolocation clicks by energy and frequency distributions, J. Acoust. Soc. Am. 106(3), 1579-1585.

11) 신형일 · 윤갑동 · 신형옥 · 최한규 · 박태건 (2001) : 참돌고래의 반향정위 신호특성에 관한 연구, 한국어업기술학회지 37(3), 189-195.

12) Dreher, J. J. and Evans, W. E. (1964) : Cetacean communication. In Marine Bio-Acoustics, Tavolga W. N. ed., Academic Press, 373-393.

13) 竹村 暘 (1981) : イルカ鳴音の分析-昭和54 · 55年度漁業公害(有害生物等)對策事業調査報告書, 水産廳, 13-15, 67-86.