

## 참돌고래의 反響正位 信號特性에 관한 研究\*

신형일 · 윤갑동 · 신현옥 · 최한규 · 박태건

부경대학교  
(2001년 8월 1일 접수)

### A Study on the Characteristics of Echolocation Signals of the Common Dolphin, *Delphinus Delphis*\*

Hyeong-Il SHIN, Gap-Dong YOON, Hyeon-Ok SHIN, Han-Gyu CHOI and Tae-Geon PARK

Pukyong National University  
(Received August, 1, 2001)

#### Abstract

The characteristics of echolocation signals of the Common Dolphin, *Delphinus Delphis* was observed by the hydrophone in order to detect exactly distribution and migration on whales and dolphins in Korean Coastal waters. It's observation was carried out at the position of 13mm off Gam-Po of Korean east-southern sea at 3rd~5th, April and 13th~15th, October, 1999. The results obtained are summarized as follows:

- (1) The frequency range of ship's noise and ambient noise in the observed station was 0.5~0.3kHz, that ones could be influenced to the behavior of common dolphins which carry out echolocation using low-frequency.
- (2) The common dolphin was radiated single click of 8.6ms and double click of 4.8ms pulse width during these observation
- (3) The high click frequencies of common dolphin were 5.10kHz, 7.22kHz, 10.60kHz with the click pulse width of 4.0ms, 2.6ms, 1.0ms, respectively. In case of low-frequency 1~2kHz, that is, 1.12kHz, 1.38kHz, 1.82kHz, pulse width were 22.4ms, 20.5ms, 11.9ms, respectively and they showed a tendency using triple click signal.
- (4) The pulse width, pulse recurrence interval and frequency range of the observed echolocation signals were 2.4~8.4ms, 9.0~40.0ms, 0.60~10.63kHz respectively, and frequency spectrum level was 100~125dB for single, double, triple click signals.

\* 이 논문은 1998년도 동원학술 연구재단의 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 緒 論

생물이 음파를 방사하여 표적으로부터 반사되어 되돌아오는 반향음을 청취하여 표적이 어떠한 속도로 움직이며, 어느 정도의 거리에 위치하고 있는지 또는 어떠한 형태를 하고 있는가 등에 대한 정보를 분석하는 기구를 생물소나계(biosonar system) 또는 反響定位(echolocation)라 한다.

이러한 반향정위를 하는 대표적인 포유동물로서는 박쥐, 돌고래 등을 들 수 있으며, 특히 돌고래는 광대역 주파수(10~150kHz)의 충격파를 사용하여 먹이의 포식 또는 군의 형성이나 회유시 통신수단으로 이용하고 있는 것으로 알려져 있다. 최근 반향정위에 대하여 여러 분야에서 연구가 진행 중에 있으며, 특히 돌고래가 먹이를 탐지 또는 식별함에 있어 탁월하다는 것에 착안하여 이에 관한 연구가 세계 도처에서 많이 진행되고 있다.

또한, 1986년 국제포경위원회(IWC)에서 포경규제협약으로 고래에 대한 상업포경을 금지한 후 고래자원은 세계적으로 차츰 증가하기 시작하였고, 우리나라 동해에서도 1999년 2월과 6월의 2차에 걸친 국립수산진흥원의 고래 자원조사 결과에 의하면 참돌고래와 긴부리 참돌고래, 짧은부리 참돌고래, 리소 돌고래, 멍크고래 등 8종 11만마리 이상의 고래가 서식하고 있다고 보고한 바 있다. 이와 때를 같이하여 전세계는 지금 IWC를 중심으로 고래자원 보호와 상업 포경 재개를 위해 많은 연구 활동과 그 준비에 바쁘게 움직이고 있는 실정이다.

고래에 관한 연구는 오래전부터 실시되어 왔으며, 외국의 경우, 고래자원에 관해서는 Best(1984), Frost(1990), Bannister(1994) 및 IWC(1999) 등의 연구가 있고, 고래 및 돌고래의 명음에 관해서는 Whitlow 등(1978, 1981, 1986)의 대서양 병코돌고래의 음향정위의 전파, 목표물의 탐지, 송신 비임 등에 관한 연구와 石井(1987) 등의 병코돌고래의 명음 등에 관한 연구, Whitlow(1993)의 돌고래 소나 등이 있고, 또한, 최근에는 赤松(1996)의 명음 발생 전략, Popov(1997), Akamatu(1998), Houser(1999)등의 돌고래와 고래의 에코로케이션 에너지, 주파수 분포 등에 관한 연구 등이 있다. 그러

나, 국내에서는 朴(1995)의 한반도 연해의 경류 자원에 대한 연구, 김 등(1994) 한국 동해 중부 연안의 흰줄무늬돌고래의 음향특성과 최 등(1997)의 청백돌고래와 상괭이 발생음의 스펙트럼 분석, 신 등(1998)의 사육수조내에서의 청백돌고래의 명음에 관한 연구 등이 있을 뿐 아직 이에 대한 연구가 많이 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 한국 연근해에 서식하고 있는 고래류의 분포와 회유 경로 등을 정확하게 탐지하기 위한 기초자료를 얻고자 1999년 4월 3일~5일과 10월 13일~15일 감포연안 13마일 해상에서 참돌고래 Common Dolphin, *Delphinus Delphis*의 명음을 수중청음기로써 측정하여 참돌고래의 반향정위 신호특성에 대해 분석 검토하였다.

## 裝置 및 方法

### 1. 측정해역

참돌고래의 명음은 1999년 4월 3일~5일과 10월 13일~15일 Fig.1과 같이 감포항으로부터 동쪽으로 약 13마일 떨어진 해상에서 측정하였다. 측정 당시의 해상은 쾌청하고 해면은 잔잔하였으며, 10월 측정에서는 명음의 감도가 너무 미약하여 자료분석에서 제외하였다.

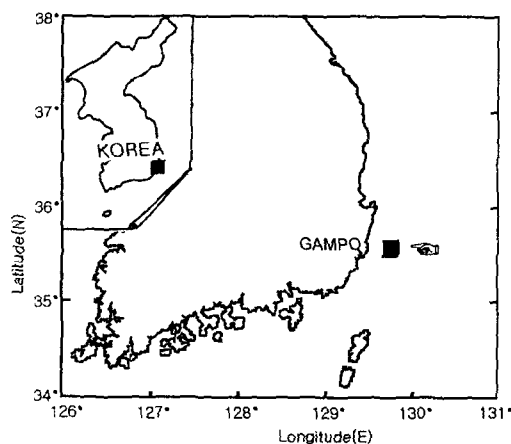


Fig. 1. The observed position of the echolocation signal on Common Dolphin, *Delphinus Delphis*.

### 2. 측정 및 분석방법

참돌고래 명음 측정은 Fig. 2와 같이 수중음압

계(OKI, SW-1007)를 수심 10m에 설치한 후 디지털 오실로스코프(THS720A)로 신호파형을 관찰하면서 데이터 레코더(SONY, TC-D5M)에 수록하였다.

해상에서 수록 저장한 자료는 후일 실험실에서 Fig. 2와 같이 데이터 레코더를 이용하여 재생한 후 디지털 오실로스코프와 FFT를 이용하여 참돌고래 명음의 반향정위 신호를 분석하였다. FFT는 single shot 방식으로 샘플링 하는 Lecroy 오실로스코프(935X series)와 time capture 방식으로 샘플링 하는 Pulse Order Analyzer(B & K, Type7702)를 반향정위 신호의 특성에 따라 선택적으로 사용하였다.

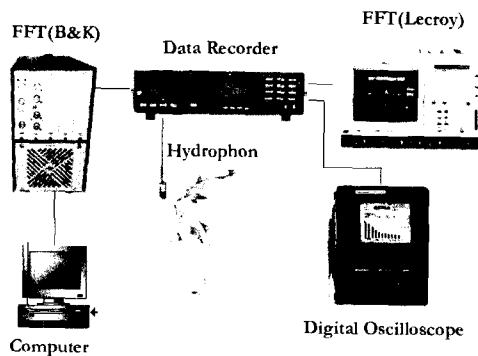


Fig. 2. Schematic measuring and analyzing instruments of echolocation signals.

## 結果 및 考察

### 1. 측정 해역의 음향학적 특성

측정 지점에서의 수중환경소음이 참돌고래의 명음에 미치는 영향을 파악하기 위하여 참돌고래의 명음을 측정하기 전에 본선의 어군탐지기의 반향신호, 약 7,000톤급 주변 항행 선박의 소음 및 측정지점의 수중환경소음을 측정하여 스펙트럼 분석한 결과는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3(a)는 본선에서 발사된 어군탐지기의 반향신호의 파형과 주파수 특성을 나타낸 것으로서 반향신호의 수신펄스주기는 약 30ms를 나타내었고, 중심주파수는 0.50kHz, 스펙트럼 레벨은 115dB을 나타내었다. 이와 같은 주파수의 특성은

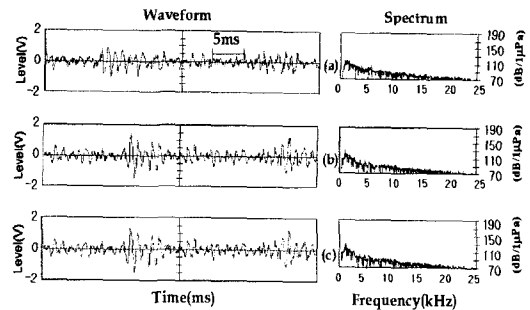


Fig. 3. Waveform and power spectra of underwater sound at the observed position.  
(a) Echo signal of fishfinder  
(b) Noise of seagoing vessel(GT 7,000)  
(c) Ambient noise

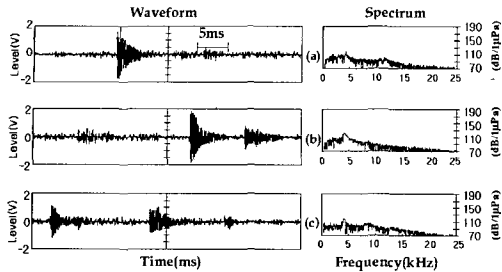
수신시 수중음압계에 10kHz 필터를 사용했기 때문에 고주파 성분은 소거되고 저주파 성분만이 수록된 때문이다.

Fig. 3(b)는 본선의 기관을 끄고 본선으로부터 약 2마일 떨어져 항행하는 약 7,000톤급 상선의 선박소음을 나타낸 것으로서 약 27ms 진동 주기로 진동하며 중심주파수 0.78kHz 스펙트럼 레벨은 125dB이었다.

Fig. 3(c)은 본선의 기관을 끄고 수중환경소음을 측정하여 분석한 것으로서 주파수의 특성이 없으며, 3kHz 주변에서 스펙트럼 레벨은 105dB이었다. 따라서, 측정지점에서는 그 음원의 특성에 따라 각기 다른 음향특성을 나타내고 있음을 알 수 있었으며, 저주파 영역에서는 강한 잡음으로 혼입될 수 있을 것으로 예상된다.

### 2. 단일 클릭음과 이중 클릭음의 특성

측정지점에서 참돌고래의 명음을 연속 관측하여 스펙트럼 분석을 행한 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)는 단일 펄스 클릭음을 나타낸 것으로서 펄스폭 8.6ms, 중심주파수 3.94kHz이었으며, 그때의 스펙트럼 레벨은 118dB이었다. Fig. 4(b)는 이중 펄스의 클릭음을 나타낸 것으로서 10.5ms의 펄스폭을 갖는 펄스 2개가 연속하여 나타났으며, 앞쪽의 펄스의 음압레벨이 뒤쪽 펄스보다 높게 나타났다. 또한, 이때의 중심주파수는 3.72kHz이었고, 스펙트럼 레벨은 120dB이었다.



**Fig. 4. Click waveform and power spectra of Common Dolphin, *Delphinus Delphis* measured at the observed position.**  
 (a) Single click  
 (b) Double click  
 (c) A train of 2 double clicks

Fig. 4(c)는 이중 클릭음 2개를 한 개의 시간렬에 나타낸 것으로서 펄스폭이 4.8ms인 이중 클릭음이 앞렬에 나타났고, 그 뒤쪽에 9.5ms 간격을 두고 같은 폭의 클릭음이 이중으로 나타났다. 이 때 앞쪽의 중심주파수는 3.86kHz, 뒤쪽은 8.25kHz를 나타내었으며, 스펙트럼 레벨은 각각 120dB, 110dB로서 앞쪽이 10dB 높았다.

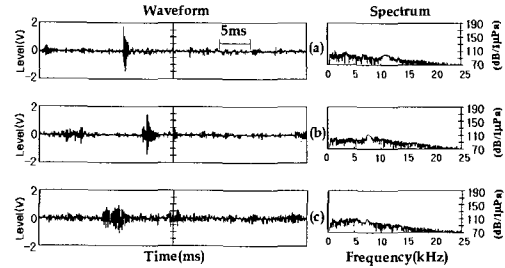
따라서, 측정지점에서의 참돌고래는 단일 클릭음과 이중 클릭음을 발하며, 때로는 1열 이중 클릭음을 2개 발하고 있는 것으로 나타났다.

### 3. 주파수 변화에 따른 클릭음의 파형 특성

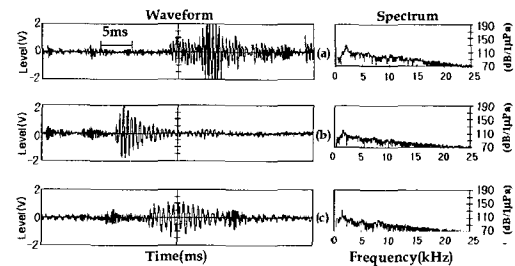
참돌고래의 고주파역(5~10kHz)에서의 이중 클릭음의 파형 변화를 주파수별로 분석한 결과는 Fig. 5와 같다. Fig.5의 (a), (b), (c)에서 이중 클릭음의 중심주파수는 각각 10.60kHz, 7.22kHz, 5.10kHz를 나타내었고, 펄스폭은 각각 1.4ms, 2.3ms, 5.1ms를 나타내었으며, 스펙트럼 레벨은 각각 101dB, 113dB, 111dB를 나타내었다. 따라서, 고주파역에서는 주파수가 낮을수록 펄스폭은 커지며, 스펙트럼 레벨도 높아지는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

또한, 저주파수역(1~2kHz)에서의 클릭음의 파형 변화를 주파수별로 분석한 결과는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6의 (a), (b), (c)에서 1.12kHz, 1.38kHz, 1.82kHz인 저주파역에서는 모두 3중 클릭음을 나



**Fig. 5. Various waveform and power spectra of double clicks in high frequency (5~10kHz).**  
 (a) 10.60kHz double clicks  
 (b) 7.22kHz double clicks  
 (c) 5.10kHz double clicks



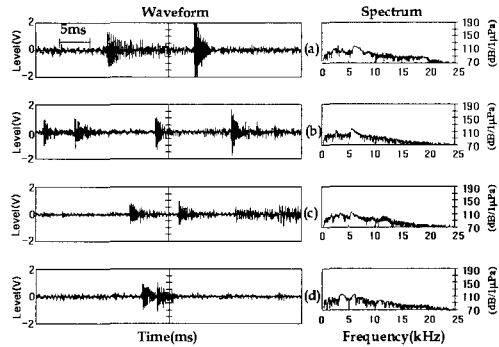
**Fig. 6. Various waveform and power spectra of clicks in low frequency (1~2kHz).**  
 (a) 1.12kHz triple clicks  
 (b) 1.38kHz triple clicks  
 (c) 1.82kHz triple clicks

타내고 있으며, 그 때의 펄스폭은 각각 22.4ms, 20.5ms, 11.9ms를 나타내어 주파수가 높아질수록 펄스폭이 좁아지는 경향을 나타내었다. 또한, 그때의 중심주파수의 스펙트럼 레벨은 각각, 115dB, 120 dB, 130 dB를 나타내어 주파수가 높아 질수록 높은 경향을 나타내었다. 따라서, 저주파수역인 주파수에서는 참돌고래는 3중의 클릭음을 발하여 목표물의 식별을 용이하게 하고 있음이 예상되었다.

### 4. 이중 클릭음의 펄스반복주기의 변화

측정지점에서 측정된 이중 클릭음의 동일 주파수대 내에서의 펄스반복주기를 분석 검토한 결과는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7의 (a), (b), (c), (d)에서 이중 클릭음의 펄스반복주기는 각각 13.3ms, 11.4ms, 7.1ms,



**Fig. 7. Various gap duration of double clicks in similar frequency band.**  
 (a) Pulse recurrence interval 13.3ms  
 (b) Pulse recurrence interval 11.4ms  
 (c) Pulse recurrence interval 7.1ms  
 (d) Pulse recurrence interval 2.4ms

2.4ms를 나타내었으며, 중심주파수의 스펙트럼 레벨 110dB로 거의 동일하였다. 따라서, 참돌고래는 목표물의 원근에 따라 펄스반복주기를 조절할 수 있는 기능도 보유하고 있는 것이 예상되었다.

5. 압축시간열상의 음향정위 파형 특성

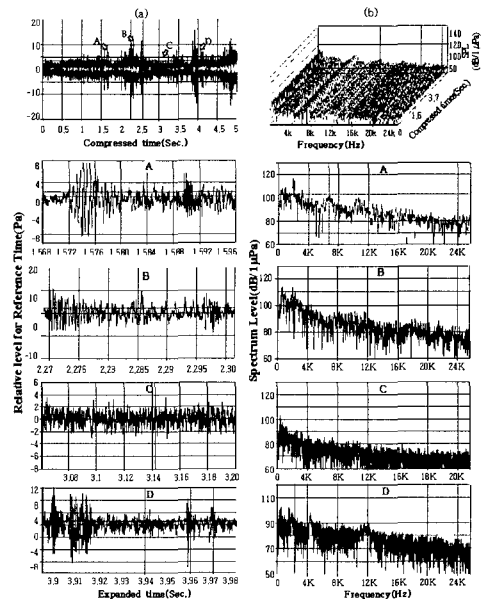
참돌고래의 전 측정시간 중 음향정위 파형을 대표할 수 있는 부분을 샘플링하여 5초간의 압축 시간열상에 나타난 파형과 워터폴(water fall)은 Fig.8과 같다.

Fig.8(b)에서 최대 스펙트럼 레벨은 29번 워터 폴에 나타났으며, 그 때의 주파수, 스펙트럼 레벨은 각각 320Hz, 110dB이었다.

Fig.8(a)에서 각 타임 캡춰 포인트(time capture point)에서의 확장시간(expanded time) 축의 표준시간에 대한 상대레벨 변화와 주파수 스펙트럼의 특성은 다음과 같다.

A 포인트인 경우, 샘플링 시간 1.568~1.596 초 사이에 앞쪽에 펄스폭이 6.50ms인 펄스파를 발하고, 9ms시간 간격을 두고 뒤쪽에 2.72ms와 3.00ms인 2중 클릭음을 발하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 이때 앞쪽의 최대 스펙트럼 레벨은 1.86kHz에서 118dB로 나타났고, 뒤쪽의 전반은 6.72kHz에서 103dB, 후반은 10.63kHz에서 100dB로 나타났다.

B 포인트인 경우, 샘플링 시간 2.270~2.300 초



**Fig. 8. The charateristic of echolocation wave on the compressed time series during 5 seconds.**  
 (a) Fluxuation of relative level for reference time on the compressed time series  
 A, B, C, D : relative level for reference time and spectrum level echo time capture point  
 (b) Autospectrum for 30 waterfall

사이에 앞쪽에 펄스폭이 8.40ms인 펄스파를 발하고, 25ms 시간 간격을 두고 뒤쪽에 4.90ms인 펄스파를 발하여 이중 클릭음을 발하고 있음을 알 수 있었다. 또한, 앞쪽의 스펙트럼 레벨은 600Hz에서 120dB을, 뒤쪽은 2.00kHz에서 120dB을 나타내었다.

C 포인트인 경우, 샘플링 시간 3.060~3.200초 사이에 참돌고래음이 잡음에 섞여 있는 현상을 나타내었고, 이 때의 최대 스펙트럼 레벨은 292Hz에서 103dB을, 최저값은 21.06kHz에서 33.3dB을 나타내었다.

D 포인트인 경우, 샘플링 시간 3.900~3.980 초 사이에 앞쪽에는 4.99ms, 4.53ms, 5.65ms의 폭을 가진 3중 클릭음을 발하였고, 그 뒤 40ms후에 펄스폭이 2.40ms, 5.00ms인 2중 클릭음을 발하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 최대 스펙트럼은 앞쪽은 1.66kHz에서 125dB을 나타

내었고, 뒤쪽은 2.00kHz에서 121dB을 나타내었다.

이상에서 볼 수 있는 바와 같이 불과 5초의 압축시간열상에 펄스폭은 2.40~8.40ms, 펄스반복시간은 9~40ms, 주파수 범위는 0.60~10.63kHz를 나타내었으며, 스펙트럼 레벨도 100~125dB 범위를 나타내었다. 또한, 이들은 단일 클릭음, 이중 클릭음, 삼중 클릭음 등 다양한 음을 사용하고 있음을 알 수 있었다.

이러한 다양한 음을 이용하는 것이 참돌고래이나 어떠한 상태에서 어떠한 음을 어떻게 이용하고 있을지에 대해서는 아직 많은 연구가 계속되어야 규명할 수 있을 것이라 생각된다.

### 要約

한국 연근해에 서식하고 있는 고래류의 분포와 회유경로 등을 정확하게 파악하기 위한 기초자료를 얻고자 1999년 4월 3일~5일과 10월 13일~15일 한국 동남해 감포연안 13마일 해상에서 참돌고래 Common Dolphin, *Delphinus delphis*의 음을 수중청음기로서 측정하여 참돌고래의 반향정위 신호특성을 분석 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 측정지점에서의 선박소음, 환경소음 등의 소음원은 0.5kHz~3kHz의 저주파수 범위가 주된 주파수이므로 저주파수로써 반향정위를 행하는 고래류에는 그 행동에 영향을 미칠 수 있음이 예상되었다.
- (2) 참돌고래는 펄스폭이 8.6ms인 단일 클릭음과 펄스폭이 4.8ms인 이중 클릭음을 발하고 있는 것으로 나타났다.
- (3) 참돌고래는 고주파수역(5~10kHz)에서 주파수가 10.60kHz, 7.22kHz, 5.10kHz로 높아짐에 따라 클릭음의 펄스폭이 각각 1.41ms, 2.3ms, 5.1ms로 커지는 경향을 나타내었다. 그리고 저주파수역(1~2kHz)에서는 주파수가 1.12kHz, 1.38kHz, 1.82kHz로 높아짐에 따라 펄스폭이 22.4ms, 20.5ms, 11.9ms를 나타내어 주파수가 높아질수록 펄스폭이 좁아지는 경향을 나타내었으며, 또한 3중의 클릭음을 발하여 목표물의 식별을 용이 하게 하고 있음이 예상되었다.
- (4) 동일 주파수대내에서 이중 클릭음의 펄스 반

- 복주기를 분석한 결과 각각 13.3ms, 11.4ms, 7.1ms, 2.4ms를 나타내어 참돌고래는 목표물의 원근에 따라 펄스반복주기를 조절할 수 있는 기능을 보유하고 있음을 확인할 수 있었다.
- (5) 5초간의 압축시간열상에서 타임캡처를 이용하여 클릭음을 분석한 결과 단일 클릭음, 이중 클릭음, 삼중 클릭음 등 다양한 신호를 사용하였으며, 그때의 펄스폭은 2.40~8.40ms, 펄스반복시간은 9~40ms, 주파수범위는 0.60~10.63kHz를 이용하고 있음을 확인할 수 있었다.

### 參考文獻

1. Whitlow, W., Au, L., Robert Floyd, W. and Haun, J. E.(1978): Propagation of Atlantic bottlenose dolphin echolocation signals. J. Acoust. Soc. Am. 64(2), 411~422.
2. Whitlow, W., Au, L. and Penner, R. H.(1981): Target detection in noise by echolocating Atlantic bottlenose dolphins. J. Acoust. Soc. Am. 70(3), 687~693.
3. Poche, L. B., Luker, L. D. and Rogers, P. H. (1982): Some observations of echolocation clicks from free-swimming dolphins in a tank. J. Acoust. Soc. Am. 71, 1036~1038.
4. Urick, R. J.(1983): Principles of Underwater Sound, McGraw-Hill, New York.
5. Best, P. B.(1984): Accuracy of shipboard estimates of the length of Antarctic minke whales. Rep. int. whale. commn 34, 323~325.
6. Nystuen, J. A.(1986): Rainfall measurements using underwater ambient noise. J. Acoust. Soc. Am. 79, 972~982.
7. Whitlow, W., Au, L., Moore, P. W. B. and Pawloski, D.(1986): Echolocation transmitting beam of the atlantic bottlenose dolphin. J. Acoust. Soc. Am. 80(2), 688~691.
8. Frost, K. L. and Lowary, L. F.(1990): Distribution, abundance and movements of beluga whale, *Dolphin apterus leucas*, in coastal waters of western Alaska. Can. Bull. Fish. Anat. Sci. 224, 39~57.
9. Thorpe, C. W. and Dawson, S. M. (1991): Automatic measurements of descriptive

참돌고래의 反響正位 信號特性에 관한 研究

- features of Hector's dolphin vocalizations, J. Acoust. Soc. Am. 89, 435~443.
10. Aroyan, J. L., Cranford, T. W., Kent, J. and Norris, K. S. (1992) : Computer modeling of acoustic beam formation in *Delphinus delphis*, J. Acoust. Soc. Am. 92, 2539~2545.
  11. Whitlow, W. and Au, L. (1993) : The Sonar of dolphins, Kailu ra, USA, 115~1390.
  12. Smolker, R. A., Mann, J. and Smuts, B. B. (1993) : Use of signature whistles during separation and reunions by wild bottlenose dolphin mothers and infants, Behav. Ecol. Sociobiol. 33, 393~402.
  13. Akamatsu, T., Hatakeyama, Y., Kojima, T. and Soeda, H. (1994) : Echolocation rates of two harbor porpoises(*phocoena phocoena*), Mar. Mammal Sci. 10, 401~411.
  14. Bannister, J. L.(1994) : Continued increase in Group IV humpbacks off western Australia, Rep. int. whale. commn, 44, 309~310.
  15. Kato, H., Miyashita, T. and Shimada, H. (1995) : Segregation of the two subspecies of the blue whale in the Southern Hemisphere, Rep. int. Whale. Common. 45, 273~283.
  16. Whitlow, W., Au, L., Nachtigall, P. E. and Pawloski, J. L.(1997) : Acoustic effects of the ATOC signal(75Hz, 195dB) on dolphins and whales, J. Acoust. Soc. Am. 101(5), 2973~2977.
  17. International whaling Commission(1999) : Report of the Scientific Committee, 51ST Meeting, 188.
  18. 김봉채·최복경(1994) : 동해 중부연안에서 관측된 흰줄무늬 돌고래 발생음악 음향 특성, 한국해양연구소 해양물리연구부 보고서.
  19. 신형일·황두진·박태건·최한규(1998) : 사육수조 내에서의 청백돌고래의 행동과 명음의 스펙트럼 분석, 1998년도 춘계 수산관련학회 공동학술대회 발표요지집, 77~78.
  20. 신형일·황두진·최한규·박태건(1999) : 청백돌고래와 참고래에 에코로케이션 신호의 중간비교, 1999년도 춘계 수산관련학회 공동학술대회 발표요지집, 77~78.
  21. 朴九秉(1995) : 韓半島沿海의 鯨類資源에 대한 史的研究, 水産業史研究所, 水産業史研究第2卷, 217~285.
  22. 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, 日本音響學會誌 52(7), 523~528.
  23. 赤松友成(1996) : イルカはなぜ鳴くのか, 東京, 日本, 1~207.