

박사학위논문

수중 저주파음에 의한 능성어의  
행동 제어에 관한 기초적 연구



제주대학교 대학원  
제주대학교 중앙도서관  
어업학과  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

양 용 수

1999년 12월

# 수중 저주파음에 의한 능성어의 행동 제어에 관한 기초적 연구

지도교수 서 두 옥

양 용 수

이 논문을 수산학 박사학위 논문으로 제출함

1999년 12월

양용수의 수산학 박사학위 논문을 인준함



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

심사위원장

차正道



위 원

金鎮乾



위 원

安長榮



위 원

金碩金



위 원

徐斗玉



제주대학교 대학원

1999년 12월

A BASIC STUDY ON THE BEHAVIOUR CONTROL OF  
SEVENBAND GROUPER, *Epinephelus septemfasciatus*,  
BY UNDERWATER LOW FREQUENCY SOUND

YONG-SU YANG

(SUPERVISED BY PROFESSOR DOO-OK SEO)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF  
FISHERIES SCIENCE

DEPARTMENT OF FISHERY  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1999. 12

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	i
LIST OF TABLES .....	v
SUMMARY .....	1
<b>I. 서론</b> .....	<b>4</b>
<b>II. 능성어의 생리 생태적 특성과 청음기구</b> .....	<b>8</b>
1. 생리 생태적 특성 .....	8
2. 청음기구 .....	10
3. 어획량 .....	14
<b>III. 능성어의 청각문턱치</b> .....	<b>15</b>
1. 재료 및 방법 .....	15
1) 실험어 .....	15
2) 실험장치 및 학습음 방성방법 .....	17
3) 음향학습 방법 .....	17
4) 청각문턱치 측정방법 .....	24
5) 능성어의 심전도 .....	24
2. 결과 .....	26
1) 능성어 심전도 .....	26
2) 청각문턱치 .....	28
3. 고찰 .....	31



<b>IV. 능성어의 청각임계비</b> .....	35
1. 재료 및 방법 .....	35
1) 실험어 .....	35
2) 실험장치 및 학습음 방성방법 .....	35
3) 청각임계비 산출방법 .....	37
4) 청각능력지수 .....	37
2. 결과 .....	39
1) 청각임계비 .....	39
2) 청각능력지수 .....	43
3. 고찰 .....	45
<b>V. 해양목장화를 위한 응용실험</b> .....	47
1. 음향학습실험 .....	47
1) 재료 및 방법 .....	47
(1) 실험어 .....	47
(2) 실험장치 .....	48
(3) 학습음 .....	50
(4) 실험어의 행동 해석 .....	51
2) 결과 .....	53
(1) 실험수조 내의 실험어 행동 .....	53
(2) 음향 학습시 실험어 행동 .....	55
(3) 실험어의 학습음 기억능력 .....	63
3) 고찰 .....	67



2. 능성어의 음향사육 .....	69
1) 장치 및 방법 .....	69
2) 결과 .....	72
(1) 수조내 환경 .....	72
(2) 사육음 방성영향 .....	75
3) 고찰 .....	79
3. 학습음에 대한 스트레스 .....	81
1) 장치 및 방법 .....	81
(1) 실험어 .....	81
(2) 스트레스 측정법 .....	82
2) 결과 .....	84
3) 고찰 .....	88
<b>VI. 종합고찰</b> .....	<b>90</b>
<b>VII. 요약</b> .....	<b>96</b>
<b>참고문헌</b> .....	<b>99</b>
감사의 글	

# LIST OF FIGURES

Fig. 2-1. The bodily appearance of the sevenband grouper .....	9
Fig. 2-2. The structure of inner ear of sevenband grouper .....	11
Fig. 2-3. The inside view of sacculus .....	12
Fig. 2-4. Sagittas of sevenband grouper .....	13
Fig. 3-1. Block diagram of the apparatus for determining auditory thresholds of sevenband grouper at ambient noise .....	16
Fig. 3-2. Photo of sevenband grouper with electrodes inserted by precordial leads method( $V_1 \cdot V_2$ method) .....	18
Fig. 3-3. Time process for conditioning of sevenband grouper .....	22
Fig. 3-4. Electrocardiograms of sevenband grouper which were observed before and after conditioning by conditioning sound(350Hz pure tone) .....	23
Fig. 3-5. Electrocardiogram(ECG) by precordial leads from chest cavity ECG is composed of P, Q, R, S and T waves .....	25
Fig. 3-6. Auditory threshold level of sevenband grouper and spectrum level of ambient noise at frequency between 100 and 1,000Hz .....	30
Fig. 3-7. Comparison of the auditory threshold level of sevenband grouper (■) with that of masu salmon( $\Delta$ : T. Kojima et al, 1992), brown trout ( $\blacktriangle$ : Y. Hatakeyama, 1989), red seabream( $\circ$ : H. Ishioka et al. 1988) and walleye pollock( $\bullet$ : Park, 1995) .....	34

Fig. 4-1. Auditory threshold level of sevenband grouper and spectrum level of white noise at frequency between 100 and 800Hz ..... 40

Fig. 4-2. Critical ratios of sevenband grouper at frequency between 100 and 800Hz ..... 41

Fig. 5-1. Block diagram of the experimental devices and water tank used for conditioning sound emission ..... 49

Fig. 5-2. Appearance frequency of each fishes before conditioning sound emission in experimental water tank. Numbers in the blank mean distribution rate(%). The sevenband grouper were intensively aggregated in both edges of the experimental cage, they were hardly distributed toward the center of the cage ..... 54

Fig. 5-3. Spectral analysis ambient (solid line) and pure sound(dotted line) of which the frequency is 350Hz ..... 57

Fig. 5-4. Average appearance rate before conditioning sound emission in the A, B and C area of experimental cage ..... 58

Fig. 5-5. Average appearance rate while conditioning sound emission in A (●), B(○) and C(■) area of the experimental cage. During this observation only conditioning sound were emitted ..... 59

Fig. 5-6. Average appearance rate after conditioning sound emission in A (●), B(○) and C(■) area of the experimental cage ..... 60

Fig. 5-7. Average appearance rate of before(●), during(○) and after(■) conditioning sound emission in the A area of the experiment cage ..... 61



Fig. 5-8. Difference of appearance rate between before and during while conditioning sound emitted in A(●), B(○) and C(■) area of the experimental cage .....	62
Fig. 5-9. Average appearance rate before conditioning sound emission in the A, B and C area of the experimental cage in 20 days after finishing the conditioning experiment .....	64
Fig. 5-10. Average appearance rate while conditioning sound emitted in the A, B and C area of the experimental cage in 20 days after finishing the conditioning experiment .....	65
Fig. 5-11. Average appearance rate after conditioning sound emission in the A, B and C area of the experimental cage in 20 days after finishing the conditioning experiment .....	66
Fig. 5-12. Block diagram of measuring equipment for the effect of symphony and experimental water tank .....	71
Fig. 5-13. Profile of water temperature during the experiment .....	73
Fig. 5-14. Spectrum levels of ambient noise(dotted line) and mozart's symphonies (solid line) in the experimental water tank .....	74
Fig. 5-15. The variation of sevesband grouper's total length of symphony projection group(○) and comparison group(●) .....	76
Fig. 5-16. The variation of sevesband grouper's weight of symphony projection group(○) and comparison group(●) .....	77
Fig. 5-17. Block diagram of the experimental system used for measurement of stress level according to the conditioning sound emission for sevenband grouper .....	83

Fig 5-18. Conditioning sound spectrum and ambient noise spectrum by the  
emission of 350Hz pure tone ..... 85

Fig. 5-19. Changes in blood glucose level of sevenband grouper by emission of  
350Hz pure tone during the time of 240 minutes. .... 87



# LIST OF TABLES

Table 3-1. Specification of equipments used for ambient noise measurement and analysis .....	19
Table 3-2. Heart rate of sevenband grouper by electrocardiogram .....	27
Table 3-3. Auditory thresholds of sevenband grouper on the condition of ambient noise .....	29
Table 3-4. Heart rate and wave interval of each species by electrocardiogram .....	32
Table 4-1. Auditory thresholds and critical ratios of sevenband grouper on the condition of white noise .....	42
Table 4-2. The hearing index of sevenband grouper .....	44
Table 4-3. The hearing index of each species .....	46
Table 5-1. Variation of the total length and weight between comparison group and Mozart's symphony projection group .....	78
Table 5-2. Changes in blood glucose level of sevenband grouper by emission of 350Hz pure tone .....	86

# Summary

In this paper, the auditory threshold, critical ratio, hearing index, effect of symphony projection and stress levels of sevenband grouper(*Epinephelus septemfasciatus*) to the 350Hz pure tone were investigated to know the response of sevenband grouper to low frequency sound.

The auditory threshold level, critical ratio and hearing index of sevenband grouper were determined by conditioning method using a sound coupled with electric shock on the condition of ambient noise or white noise in an experimental water tank. The audio-signals of pure tone and electric shock in the experiment were from 100 to 1000Hz and DC 6V, respectively.

The response of fish to low frequency sound was observed by electrocardiogram(ECG) intervals extracted from precordial leads method( $V_1 \cdot V_2$  method).

The results obtained are as follows ;

- 1) The auditory thresholds of sevenband grouper for 100Hz, 200Hz, 250Hz, 300Hz, 350Hz, 400Hz, 500Hz, 600Hz, 700Hz, 800Hz, 900Hz and 1000Hz under ambient noise were 102.1dB, 97.5dB, 96.6dB, 95.5dB, 94.8dB, 97.2dB, 100.2dB, 102.1dB, 107.8 dB, 112.2dB, 114.4dB and 116.8dB(re  $1 \mu\text{Pa}$ ). The lowest point in auditory threshold was obtained at 350 Hz, 94.8dB on the range of 100~1000Hz, showing V-shaped curve.
- 2) The critical ratios of sevenband grouper for 100Hz, 200Hz, 250Hz, 300Hz, 350Hz, 400Hz, 500Hz, 600Hz, 700Hz and 800Hz under white noise were 15.6dB, 25.8dB, 28.0dB, 33.5dB, 34.2dB, 39.1dB, 47.2dB, 53.9dB, 60.7dB and 68.4dB, respectively.

- 3) The hearing indexes of sevenband grouper for ambient noise and white noise were 52.7 and 15.6, respectively, which are similar to 26 of masu salmon and 32 of brown trout.
- 4) While the sevenband grouper were intensively aggregated at both edges of the experimental cage, they were hardly stayed toward the center of the experimental cage. The sevenband grouper tended to stay motionless at the edge parts on the bottom of the experimental cage, and showed weak aggregation behaviour.
- 5) The sevenband grouper were usually located on the A, C area(opposite side of experimental cage which has a feeder and an underwater speaker). Appearance rate for the fish on the B area(middle part of experimental cage) was less than 20%.
- 6) The sevenband grouper showed the dodge behaviour to B, C area(far-off place from the underwater speaker), till 4 days after the conditioning sound emitted.
- 7) The conditioning was very effective from 5 days after with the beginning of conditioning experiment because 80% of the total fish were aggregated at A area while conditioning sound was emitting. Before and after conditioning sound emission, the appearance rate was stable around 50%.
- 8) The appearance rate of sevenband grouper in 20 days after finishing the conditioning experiment maintained at 60~70% in A area as soon as the conditioning sound emitted. It is believed that the sevenband grouper could remember the conditioning sound and the conditioning effect at least for 20 days, continually.

- 9) The centre frequency of Mozart symphony was estimated as 150~380Hz because it was 10~40dB higher than ambient noise at the range of 150~380 Hz. The Mozart symphony may be used as a strong stimulus to sevenband grouper whose auditory sensitivity lies in the range of 100~500Hz.
- 10) The comparison group of sevenband grouper was around 10mm longer for total length than the conditioning sound projection group at the beginning of conditioning sound emission experiment but it was reversed after 57 days.
- 11) The comparison group of sevenband grouper was around 20g heavier for weight than the conditioning sound projection group at the beginning of conditioning sound emission experiment but it was also reversed after 57 days.
- 12) The blood glucose level of sevenband grouper was  $20.33 \pm 0.557 \text{mg/dl}$  before the experiment started.
- 13) No significant changes were observed in the concentration of blood glucose in 45 minutes of conditioning sound emission.
- 14) Blood glucose level increased rapidly from  $26.33 \pm 1.528 \text{mg/dl}$  in 60 minutes to  $48.67 \pm 3.055 \text{mg/dl}$  in 120 minutes after the conditioning sound emission, and increased to  $59.67 \pm 5.033 \text{mg/dl}$  after 240 minutes.
- 15) It is believed that the conditioning sound emitted over an hour may be stressed to sevenband grouper, because presentation time was between 60 and 120 minutes.

# I. 서 론

어업자원이 풍부했던 과거에는 자연적으로 군집되어 있는 어군을 빨리 발견하여 많이 잡을 수 있도록 각종 어로장비의 연구 개발에 많은 투자를 해왔으며, 그 결과 획기적인 어획량 증대를 이룩하여 세계의 수산 단백질 공급에 많은 기여를 하여왔다.

그러나 근래에 이르러 연안 오염의 심화와 남획으로 인한 어업 자원의 감소로 국제적인 자원 공동관리 방안 마련이 필요하다는 공동인식이 확대됨에 따라 배타적 경제수역(EEZ), 총 허용 어획량(TAC) 등의 제도를 도입하고, 책임 있는 어업 행동지침의 제정과 각종 국제 규준을 마련하기에 이르렀다.

따라서 매년 늘어나고 있는 수산물 수요를 충족시키기 위해서는 현재의 생산량을 획기적으로 늘릴 수 있는 새로운 어업자원의 증대 방안이 시급히 요청되고 있으며, 그 대안으로서 어장조성, 종묘생산, 방류, 어자원 육성관리, 해양생산 관리, 환경제어 등 복합적인 기술요소가 유기적으로 결합된 해양 목장화 시스템이 제안되고 있다.

그러나 해양목장 시스템을 효율적으로 관리하기 위해서는 무엇보다 방류된 어류가 다른 해역으로 이동하지 않고, 일정한 해역 내에 머물 수 있게 하는 어군행동 제어 기술이 강구되어야 하며, 그 제어인자로서는 음향, 광, 전파, 레이저 스크린, 전기스크린 등 다양한 인자를 사용하여 연구가 수행되어 왔다.

해수와 같은 물이라는 매질을 가진 수중에서는 가시광선, 적외선을 크게 감쇄시키므로 광 및 레이저 스크린을 이용한 어류의 행동차단 및 행동제어는 그 실행이 매우 어려우며, 전기스크린을 이용한 어군행동 제어 방법은 고비용, 안전성 등의 해결책이 강구되지 않으면 그 경제성이 어려운 것으로 알려져 있다.

이들에 비해 음향신호는 수중에서 광이나 전파에 비해 감쇠가 적으므로, 비교적 먼 거리에 도달할 수 있고 안정성이 있으며, 비용이 저렴하기 때문에 어류의 행동을 제어하는 수단으로서 가장 유효한 것으로 알려져 있다.

이와 같이 수중의 정보전달 매개로서 가장 유용한 음향은 인간뿐만이 아니라 어류에게도 많은 영향을 미치고 있으며, 특히 어류는 내이와 부레 및 측선 등이 있어서 음향을 감지할 수 있는 것으로 알려져 있다. 즉, 어군의 행동은 낮은 주파수에 민감한 측선과 비교적 높은 주파수에 민감한 내이 등의 청각기관에 의해 강한 음과 천적이 발생하는 음에 대하여 도피행동을 취하고, 먹이생물의 발생음과 동종의 발생음에 대하여 음원방향으로 유집하는 반응을 보인다. 이러한 어군의 음향에 대한 행동을 알아내는 것은 어업에 있어서 중요한 일로, 많은 어종의 청각특성을 파악하는 것이 필요하며 많은 연구자들이 다양한 실험방법으로 측정하여 왔으며, 그 결과 어류도 어느 주파수대의 음을 감지하는 능력이 있다든가 음원 방향을 탐지하는 능력을 가진다는 것 등이 밝혀지고 있다. 이들 결과로 부터 어류의 가청 주파수 범위는 16~5,000Hz 범위이나 주파수 100~1,000Hz 범위에서 예민한 반응을 나타내고 있으나(古河, 1970), 이외에도 어류의 청각능력을 판단하는 기준으로 청각 문턱치, 청각 임계비, 청각 능력지수, 주파수 변별 능력, 음압 강도 변별능력, 음원 정위 능력 등이 있는 것이 밝혀지고 있다.

청각 문턱치에 관한 연구는 Ishioka(1988)등의 참돔, 藤枝(1995, 1996)등의 틸라피아·넙치, 안(1998)등의 방어, 박(1999)등의 조피볼락 및 이(1999)등의 쏨뱅이 등이 있고, 청각 임계비에 관한 연구는 Chapman and Hawkins(1973)와 Buerkle(1969)의 대구, Hatakeyama(1989)의 참돔, 山川(1997)의 무지개 송어, 本松(1997)의 조피볼락, 안(1998)등의 방어 및 이(1999)등의 쏨뱅이 등이 있으며, 주파수 변별능력에 관한 연구는 Fay(1989)의 금붕어 등이 있다. 그리고 음원 정위 능력에 관한 연구는 Allen(1976)등의 청어, Harris and Van Bergeijk(1962) 등의 송사리 등이 있다.



이러한 어류의 청각능력을 이용한 어류의 학습실험에 관한 연구는 참돔 보호 육성 방안으로 인공어장 조성을 위한 음향순치는 물론 채색의 변화 등 다양한 항목에 대하여 실험하였고(今泉, 1975), 또한 참돔을 대상으로 한 음향순치어장에 자극음으로서 피아노음(大分縣漁業公社, 1979), 큰 북소리 및 주파수 300Hz의 순음을 자극음으로 사용하게 되었다(大分縣水産試驗場, 1985). 岡木(1982, 1983) 등은 이러한 북소리를 사용한 참돔 순치어장에서 어류의 일주운동, 학습음 방음, 굵이 등에 대해 연구를 수행하였다.

자극음 기억기간에 관한 연구에는 藤谷(1973)등의 참돔, 井上(1975)의 참돔, 幡谷(1989) 등은 솜뿔이와 넙치를 대상으로 주파수 400Hz와 200Hz 순음을 사용하여 음향순치 실험을 실시하였으며, 어류의 심전도에 관한 연구는 難波(1973)등의 은어, 참돔, 박(1995)의 명태, 안(1998)의 방어등이 있다.

이처럼 어류의 청각능력을 어업생산에 응용하기 위한 하나의 시도로서 음과 사료에 의한 학습, 즉 수중음향을 이용하여 어군의 유집행동을 유발하고, 어군을 학습시켜 어군의 행동영역, 섭이행동 등을 제어하기 위해서는 어느 주파수의 음을 어느 정도의 음압으로 방성할 때 어류가 들을 수 있는지, 어떤 음이 학습음으로 가장 효과적인지, 어느 정도의 기간동안 학습을 시켜야 학습효과가 명확하게 나타나고 가장 오랜 동안 학습효과를 유지시킬 수 있는지 등을 구명하는 일은 매우 중요하나 이에 관해서는 참돔, 넙치, 연어, 송어 등 극히 일부의 어종에 대해서만 연구되고 있는 실정이다.

따라서 이 논문에서는 부산 연안에서 통발어구에 어획된 능성어를 측정주파수 12종의 학습음과 전기자극에 의한 심전도계를 이용하여 극한법에 의한 자극 투여 방법 중 상승 계열법에 의한 학습음 방성에 의해 능성어의 청각문턱치, 청각임계비, 청각능력지수를 구하여 음향순치 어장에 적용 시킬 때 음의 유효범위를 정량적으로 구명하고자 하였으며, 이와 함께 능성어를 실내수조에서 사육할 때 사육음을 방성한 경우의 체장 및 체중에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 고찰해 봄으로

써 능성어를 사육할 때 음향 방성과 급이를 함께 하는 방법을 이용할 수 있는지 여부, 해양목장 산업 등에 음향학습을 적용시킬 때 학습음의 적절한 주파수와 음압은 물론 방성시간 등에 대한 기초자료를 확보하기 위하여 본 연구를 수행하였다.



## II. 능성어의 생리생태적 특성과 청음기구

### 1. 생리생태적 특성

능성어(*Epinephelus septemfasciatus*)는 경골어류(Osteichthyes) 진구아강(Teleostomi) 농어목(Order Perciformes) 바리과(Family Serranidae)에 속하는 온대성 어종으로써, 방언은 아홉툰배기, 일곱툰바리(부산), 구문쟁이(제주)라고 불리우며, 영명은 Sea bass, sevenband grouper, 일명은 마하타(Mahata)라고 불린다.

이들 능성어류는 우리나라 남해안 특히 제주도 연안과 일본 중부이남, 동중국해, 인도양 등에 분포한다고 알려져 있고, 수심이 약간 깊은 곳을 좋아하는 저서성 어류로써 수심 5~60m 되는 해조류가 많은 암초바닥에 주로 서식하는 연안 정착성 어류로 큰 이동은 하지 않는다.

능성어의 형태적 특징은 Fig. 2-1과 같이 몸 빛깔이 자색을 띤 연한 회갈색으로 옆구리에는 7줄의 흑갈색 가로띠가 있으며, 이중 제 1~6띠는 등지느러미 기저에서 시작하여 가느다란 2띠로 분리되어 있고, 제 7번째 띠는 꼬리자루에 있으며, 폭이 넓지만 성어가 되면 이 띠들은 불분명해 진다. 또한 몸은 긴 타원형으로 측면되어 있다.

눈 앞에는 2개의 콧구멍이 있고, 그중 뒤쪽의 것이 앞쪽보다 훨씬 크며, 입은 크고, 아래턱이 윗턱보다 돌출되어 있고, 윗턱의 뒤끝은 아래까지 도달한다(국립수산진흥원, 1994).

산란기는 5월경으로 연안에서 산란하고, 부화된 새끼는 해조류가 무성한 곳이나

조수 웅덩이에 주로 서식하며 전장 90cm까지 성장하고, 육식성으로 새우류, 게류, 어류 등을 잡아먹는다.

일반적으로 능성어의 채색은 환경에 의해 변하고, 같은 색은 거의 없으며, 서식환경의 배경색 이외에 광선의 영향을 많이 받아 채색이 변한다. 체표에는 점막상의 많은 점액이 덮여있어 매우 미끄럽고, 암초나 바닥에 서식하므로 가두리나 수조바닥의 은신처에 숨어 정지해 있는 특성을 지닌다.

능성어는 이러한 형태적 특성 이외에 생리적으로 자동동체로서 성장에 따라 성별이 변한다. 먼저 암컷이 되고, 성장함에 따라 수컷으로 전환된다(문 ; 1994, 문 등 ; 1997).



Fig. 2-1. The bodily appearance of sevenband grouper.

## 2. 청음기구

어류의 청각기관인 내이의 소낭에서 음을 수용 하고, 이석 자체는 음파를 수용하지 않으나 진동에 의하여 소낭의 내압이 변동하면 그에 따라 이석이 움직여서 감각세포를 자극하고, 이들 세포로부터 신경자극은 뇌신경을 통하여 뇌에 전달된다. 이석을 움직이게 하는 데는 림프액을 매개로 하여 어느 정도 큰 에너지가 전해질 필요가 있으므로 내이가 받는 음은 비교적 진동이 큰소리 즉 고음이라고 알려져 있다(島山, 1992).

이 연구에서는 실험어의 음향 수용기관인 내이구조를 촬영하기 위하여, 실험어 안구 상단으로부터 등지느러미까지의 두부를 횡단면으로 조심스럽게 절개한 후, 절개된 면을 쌍안 현미경(NIKON, SNZ-10)을 이용하여, 20배~80배 배율로 피사체의 크기에 따라 적절하게 조절하면서 소낭을 중심으로 하여 카메라(NIKON, AFX)로 사진을 촬영하였다.

Fig. 2-2, Fig. 2-3, Fig. 2-4는 이 연구에 사용된 실험어를 해부하여 음의 수용기관인 소낭 및 이석을 쌍안 현미경으로 관찰한 것으로, Fig. 2-2는 두부를 절개하여 뇌의 구조, 소낭, 소낭 내에 삽입되어 있는 이석을 촬영한 그림이다. 실험어의 뇌의 구조는 외형적으로 전방에서부터 중뇌(Mesencephalon), 소뇌(Cerebellum), 연수(Medulla oblongata)로 구성되어 있다. 연수의 뒤쪽으로 좌우 1쌍의 소낭(Sacculus)이 있으며, 소낭 내에는 림프액과 이석으로 채워져 있다. Fig. 2-3은 소낭내 이석을 제거한 후의 소낭 내부 사진으로서 이석 제거후 소낭은 땅콩과 유사한 형상을 띄고 있다.

Fig. 2-4는 Fig. 2-2의 소낭에 들어있다 추출된 이석으로서 중간 부분에 나이트와 같은 하나의 연륜을 가지고 있어 생후 1년이 넘지 않은 것으로 판단되었다.

Front



Rear

Fig 2-2. The structure of inner ear of sevenband grouper.

(a) Mesencephalon, (b) Cerebellum,

(c) Medulla oblongata, (d1, d2) : Sacculus

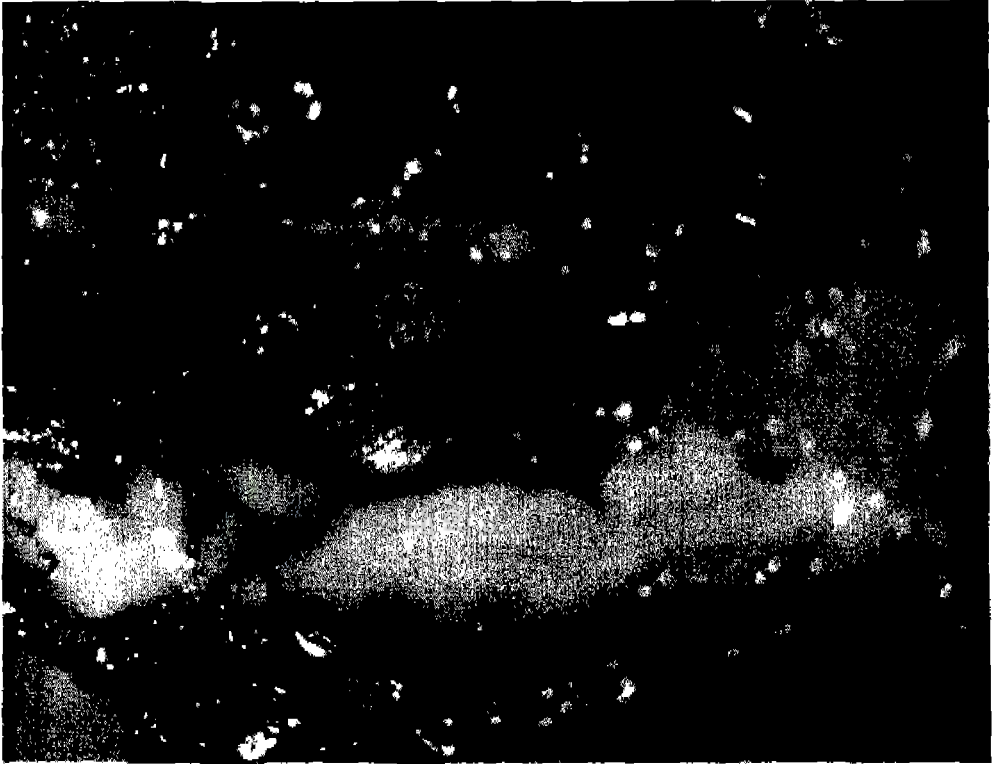


Fig 2-3. The inside view of sacculus.

(a) Sacculus

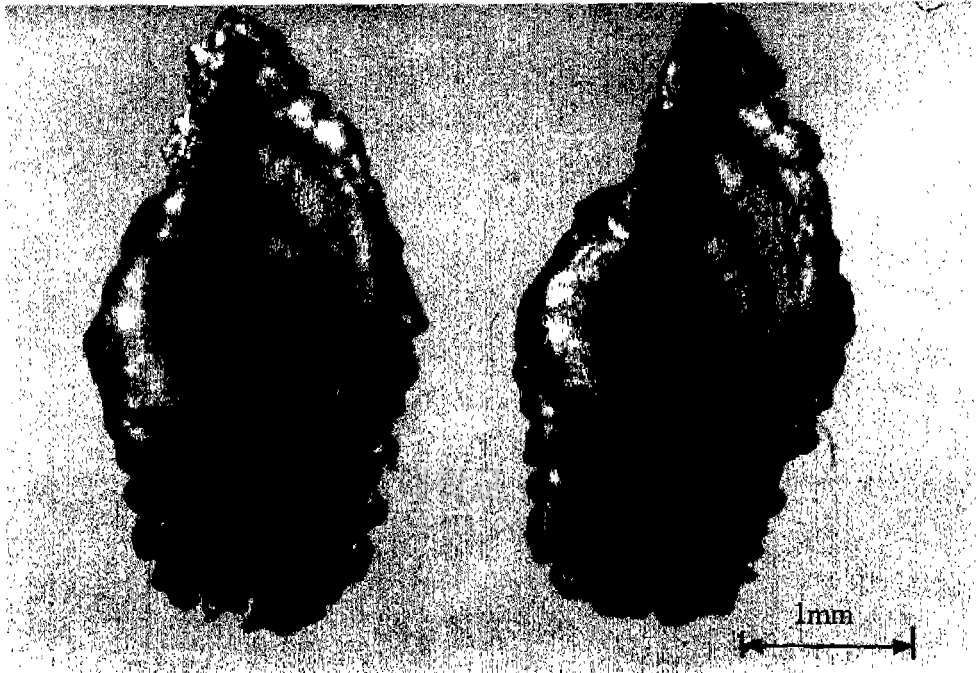


Fig. 2-4. Sagittas of sevenband grouper.



### 3. 어획량

우리나라의 능성어 어획량 변동을 파악하기 위하여 1975년부터 1996년까지 22년간의 농림수산통계연보 자료로부터 총 어획량 변동 특성을 분석한 결과, 능성어의 총어획량은 1,026M/T으로써 연간 평균 어획량은 46.6M/T이었으며, 연간 어획량은 40M/T을 기점으로 증가와 감소를 반복하는 경향을 나타냈다. 또한 22년간 제주도의 총어획량은 494M/T으로써 우리나라 총 어획량의 약 48%를 차지하였다.

한편, 월별 어획량 변동은 산란기인 5월을 시작으로 어획량이 점차 증가하다가 10월을 기점으로 점차 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 이것은 수온 상승에 따라 왕성한 섭이활동을 하는 것과 관련되어 나타나는 현상이라고 생각되었다.



### Ⅲ. 능성어의 청각문턱치

#### 1. 재료 및 방법

##### 1) 실험어

청각문턱치 실험에 사용된 실험어는 부산연안에서 통발어구에 어획된 능성어 200미를 국립수산진흥원 수산공학과 내에 있는 콘크리트제 사육수조(L6,000×B1,900×D1,830mm)로 이송한 후 약 1개월간 넙치용 2호 사료(천하사료)로서 사육순용 시킨 것 중, 20미를 무작위 추출하여 실험에 사용했는데, 전장 범위는 14.8~19.6cm로 평균 16.4cm, 표준편차 1.61cm, 체중 범위는 63~140g로 평균체중이 96.2g, 표준편차 20.09g 이었다.

실험어의 청각문턱치 측정은 Fig. 3-1에 나타난 것과 같이 아크릴제 실험수조(L850×B450×D450mm)를 사용하였고, 수조내의 해수는 하루에 한번씩 교환해 주었다.

실험 중 평온한 상태에서 음향학습이 되도록 하고 안정된 심전도를 얻기 위하여 실험수조 사방 벽면은 검정색 씰팅지로 가려 주위 물체의 움직임을 가능한 감지하지 못하도록 하였다.

실험기간 중 수조내의 수온은 18.3~25.4℃, 염분농도는 32.1~33.8‰ 였으며, 수조의 밑바닥에는 진동의 영향을 억제하기 위해 두께 2cm의 고무판을 설치하였다.

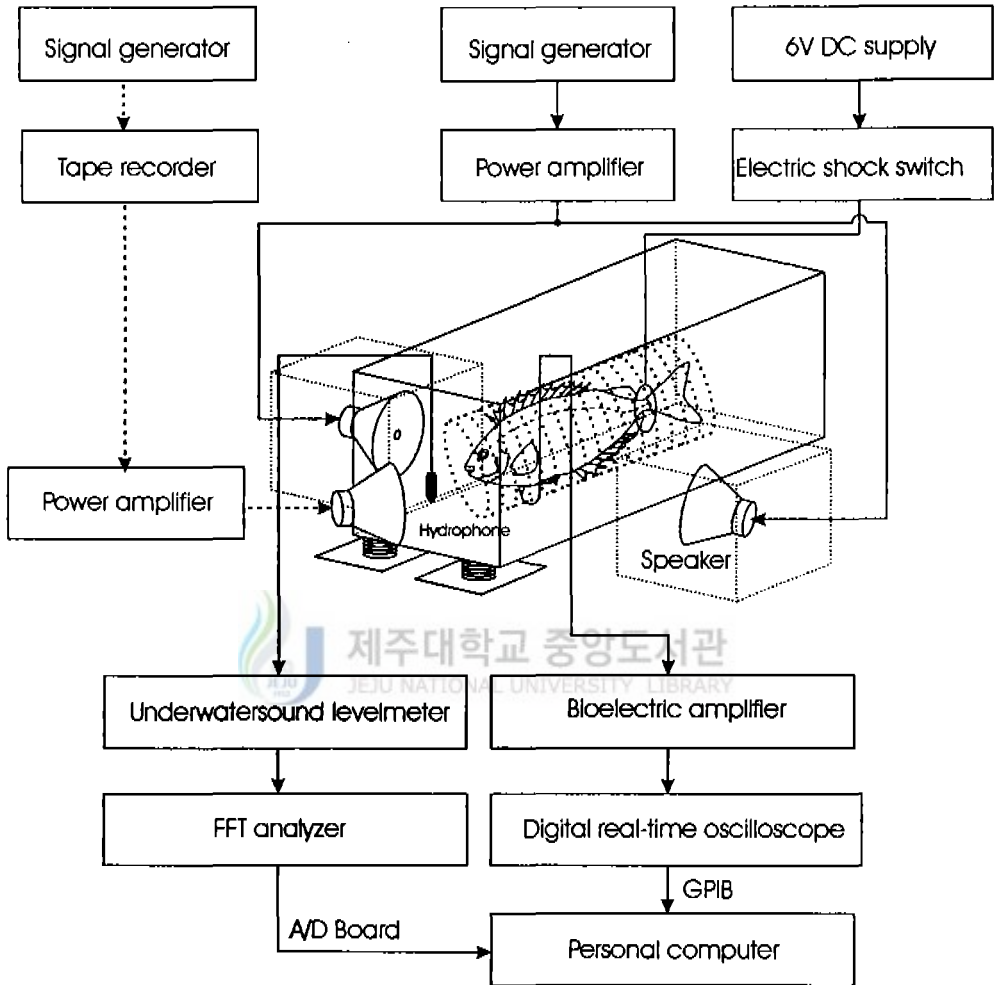


Fig. 3-1. Block diagram of the apparatus for determining auditory thresholds of sevenband grouper at ambient noise. The part designated by dotted line was used to determine critical ratio.

## 2) 실험장치 및 학습음 방성방법

학습음의 방성 및 청각 문턱치를 구하기 위한 장치의 블록 다이어그램과 측정기구의 개요는 Fig 3-1 및 Table 3-1에 나타내었다. 실험수조 내에서 실험어가 수중음을 수립자의 이동에 의하여 측선으로 감지하는 것을 억제하여 수중음의 음압변동 성분만을 감지하도록 하기 위하여 수조의 양면 등거리에 두 개의 스피커를 서로 마주보게 설치하여 놓고 방성하였다(Kojima et al., 1992).

학습음의 방성은 주파수 100~1,000Hz 사이의 100Hz 간격인 10종과 측정 중 최저 청각문턱치를 나타내는 300Hz를 중심으로 50Hz간격인 250Hz, 350Hz의 2종을 합하여 총 12종의 측정주파수의 정현파 순음을 신호발생기(B&K, 1027)로 발생시켜 증폭기(INKEL, PA-2500RD)에서 단계적으로 증폭하면서 공중스피커(UNIVERSITY, PAT2755)를 통하여 방성하였다.

이때 방성한 각 측정주파수의 음압과 주위 환경소음의 음압은 실험수조 내에 설치한 수중청음기(OKI, ST8004), 음압계(OKI, SW1020)와 주파수 분석기(B&K, 2032)로 측정하고 주파수 10~1,000Hz 범위에서 20회 측정된 값을 평균하여 구하였다.

## 3) 음향 학습방법

학습음인 순음을 방성하였을 때, 실험어의 심박간격으로부터 학습음의 감지여부를 판단하기 위하여 실험어를 실험개시 1일전에 사육수조에서 꺼내 마취제(SIGMA CHEMICAL, MS-222)로 일시적으로 마취시켜 심전도 측정에 필요한 두 개의 유도선 전극을 Fig. 3-2와 같이 사람의 흉부 유도법 중  $V_1$  ·  $V_2$  유도법으로 위심강 부위에 삽입하였다. 전극이 삽입된 실험어는 실험중 학습음 방성 및 전기 충격에 의한 심전도 변화를 제외한 실험목적 이외의 요인으로 인한 영향을 배제시키고, 어체내에 삽입

된 유도선 전극 이탈을 방지하기 위하여 실험어의 행동을 가능한 억제시켰다. 이를 위해서 실험수조 내에 실험어의 꼬리쪽이 개방된 그물코 모양으로 만들어진 합성수지 제품으로 제작한 원통형 실험어 고정장치(L260×B60×H90mm)를 설치하고, 이 고정장치 안에 실험어의 머리부분이 스피커의 음축선 상의 중심위치에 오도록 설치하였고, 그 속에 실험어를 고정시킨 후 마취로 부터의 회복과 수조내 순응을 위해 24시간 경과한 후 실험을 실시했다.

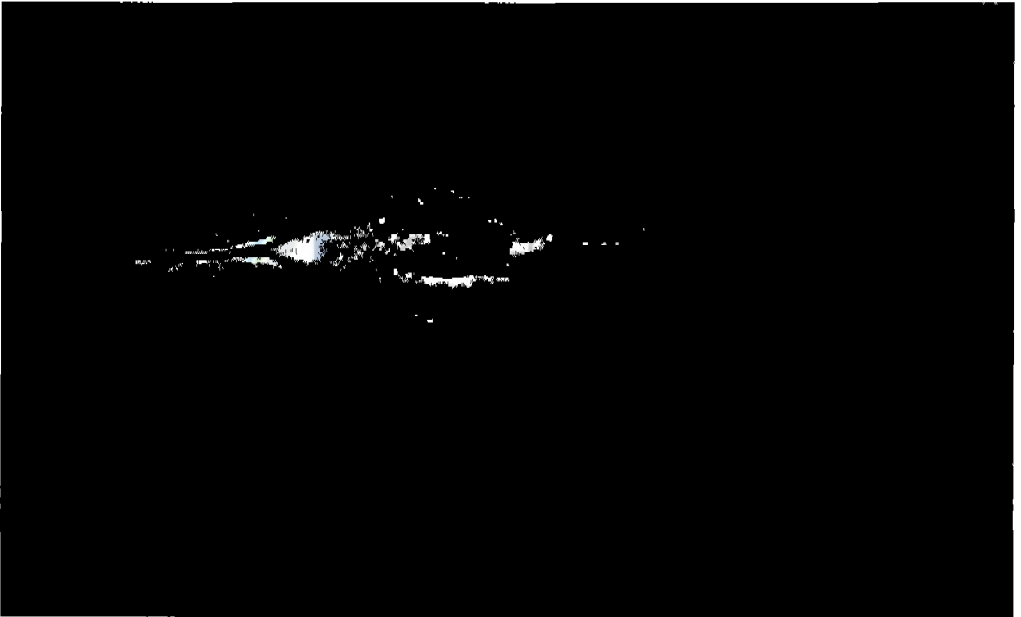


Fig. 3-2. Photo of sevenband grouper with electrodes inserted by precordial leads method( $V_1 \cdot V_2$  method).

Table 3-1. Specification of equipments used for ambient noise measurement and analysis

Equipment	Specification
Signal generator (B&K, 1027)	<p>Frequency range : 2Hz to 10kHz</p> <p>Noise bandwidth : Six noise bandwidth(3.16Hz to 1000Hz)</p> <p>White noise : Wide band random noise</p> <p>Pink noise : Wide band random noise</p> <p>Frequency counter</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Accuracy : <math>\pm 1</math> on last digital +20 ppm of turning frequency</li> <li>- Counting time : 0.1s and 1s, switch selectable</li> </ul>
Power amplifier (INKEL, PA2500RD)	<p>Out put : 100W</p> <p>Output terminal impedance : 4<math>\Omega</math>, 8<math>\Omega</math>, 16<math>\Omega</math></p>
Bioelectric amplifier (NK, VC-11)	<p>Sensitivity : AC 10<math>\mu</math>V to 20mV-DIV, DV 2mV to 5V-DIV</p> <p>Internal noise level : 5<math>\mu</math>Vpp or less</p>
Digital real-time oscilloscope (Tektronix, TDS-340)	<p>Resolution : 8bit</p> <p>Maximum sampling velocity : 500M samples/s</p> <p>Analog bandwidth : 100MHz</p>
Hydrophone (OKI, ST8004)	<p>Range : 5Hz~250kHz</p> <p>Receiving frequency sensitivity : more than -223dB</p> <p style="text-align: right;">(0dB =1V/<math>\mu</math>Pa, f=100kHz)</p> <p>Water proof pressure : more than 75kg/cm<sup>2</sup></p> <p>Usable temperature range : -10<math>^{\circ}</math>C~55<math>^{\circ}</math>C</p> <p>Variable gain range : 80dB</p>

Table 3-1. Continued

Equipment	Specification
Tape recorder (Eroica, PCR-231S)	Power source : DC 9V 2 way 4 speakers Frequency range : FM 88~108MHz, SW 2.3~7.5MHz SW <sub>2</sub> 7.6~22MHz, MW 525~1,605MHz
Underwater sound levelmeter (OKI, SW1020)	Measuring range of sound pressure level : 100~180dB (0dB re 1 $\mu$ Pa) Frequency range : 10Hz~50kHz Precision of measurement : $\pm 2$ dB(20Hz~1kHz) $\pm 3$ dB(10Hz~10kHz) Characteristics of filter : Highcut filter 10kHz Roll off filter 10Hz, 100Hz Noise flat filter 1kHz OCT/6dB Output terminal impedance : for headphone 8 $\Omega$ for tape recorder 10k $\Omega$ for recorder 10k $\Omega$ for oscilloscope 10k $\Omega$
FFT analyzer (B&K, 2032)	Input characteristics : Two identical channels Usable temperature range : 5 $^{\circ}$ C~40 $^{\circ}$ C Maximum peak input voltage : 28 ranges from 15mV to 100V in a 1.5, 2, 3, 4, 6, 8, 10 sequence. Normal or inverted

학습음 방성 및 전기충격에 대한 반복과정은 Fig. 3-3과 같은데, Fig. 3-3(a)는 25~20분마다 순음의 자극음을 학습음으로 하여 방성한 것이고, Fig. 3-3(b)는 학습음을 5초동안 공중스피커로 방성한 파형이다. Fig. 3-3(c)는 학습음 방성 5초 후에 직류전압 6V의 전기 충격을 약 0.5초간 준 것으로써 이는 학습음 방성 도중에 전기 충격이 있을 것이라는 것을 인식시키는 음향학습 과정이다.

Fig. 3-4는 음향학습 실시하기 전후의 실험어의 심전도로서, Fig 3-4의 (a)에서 음향학습을 실시하기 전에는 심박간격이 일정한데 비하여, Fig. 3-4(b)에서 음향학습이 완료된 후에는 학습음을 방성하기 전보다 방성한 후에 심박간격이 길어진 것을 알 수 있으며(Fig. 3-4(b) Sound response 참조), 이러한 심전도 간격의 변화가 전기자극 없이 학습음을 방성하였을 때 나타나면 실험어가 학습음을 인식하였다고 판단하였다. 이와같이 각 실험어의 음향학습 실험을 측정 주파수에서 25~30분 간격으로 반복하여, 명확하게 심박간격이 연속해서 5회이상 길어지면 음향학습이 완료된 것으로 간주하였다.





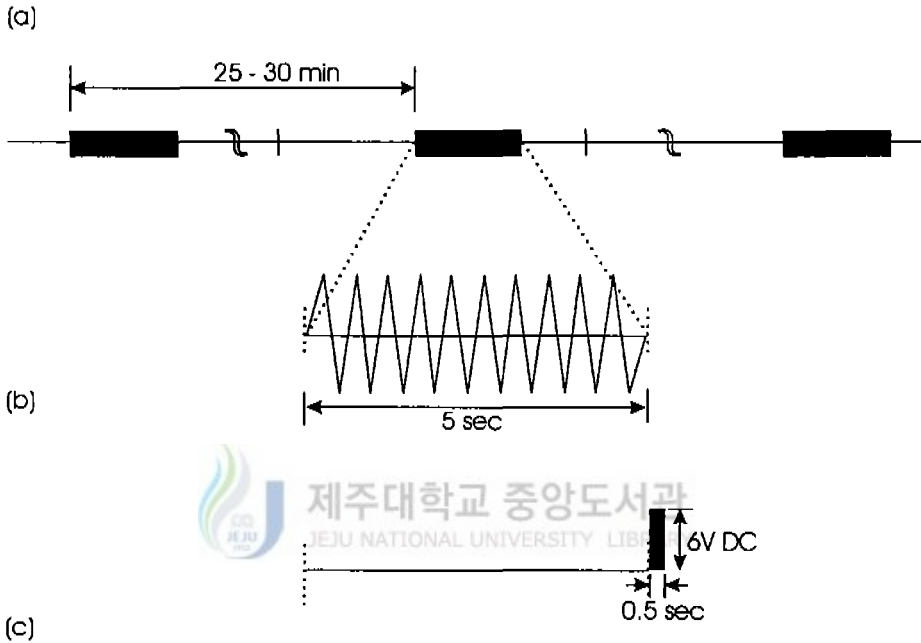


Fig. 3-3. Time process for conditioning of sevenband grouper.

- (a) Time sequence for the emission of pure sound stimulus.
- (b) Emission time of pure sound stimulus.
- (c) Pulse for electric shock stimulus.

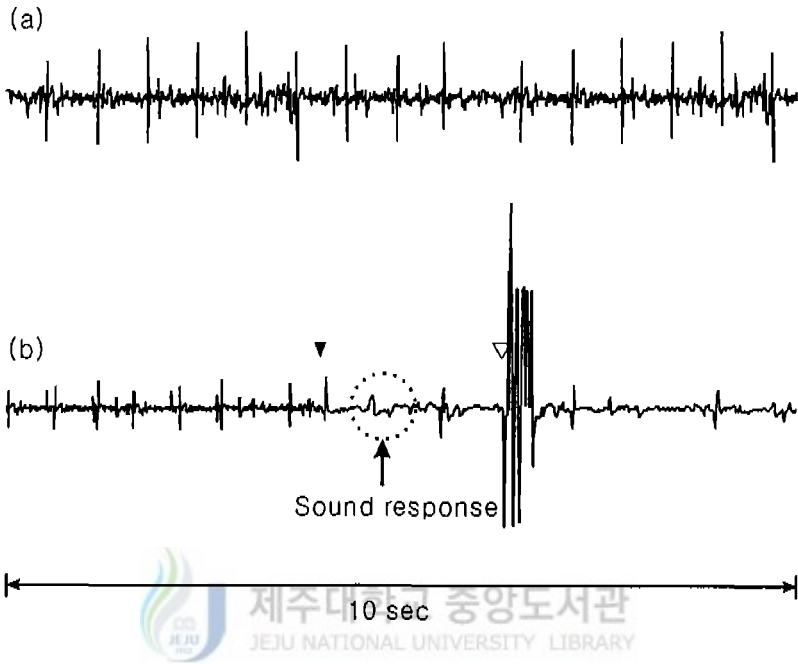


Fig. 3-4. Electrocardiograms of sevenband grouper which were observed before and after conditioning by conditioning sound(350Hz pure tone).

(a) ECG of sevenband grouper which observed before conditioning.

(b) ECG of sevenband grouper which observed after conditioning.

▼ : speaker on, ▽ : Speaker off

#### 4) 청각문턱치 측정방법

실험어가 음향학습이 완료되었다고 판단되는 실험어는 청각문턱치를 측정하기 위하여 측정 주파수별로 환경소음보다 2dB씩 높은 학습음부터 방성하기 시작하였으며, 방성 후 순음에 실험어가 반응하지 않으면 2dB씩 누적적으로 증가시켰다.

그때 방성된 학습음으로 인해 연속해서 5회 이상 실험어의 심박 간격이 Fig. 3-4(b)의 음향반응(Sound response)과 같이 길어져서 학습음을 인식하였을 때의 최저 음압을 구하여 해당 주파수에 대한 청각 문턱치로 결정하였다.

#### 5) 능성어의 심전도

어류의 심전도 파형과 사람의 심전도는 그 파형이 유사한 형태를 가지므로, 사람의 심전도 파형의 명명법을 그대로 인용하여(김, 1993), Fig 3-5에서와 같이 실험어의 심전도 파형은 심방의 흥분파를 P, 심방의 흥분이 시작되고 이 흥분이 심실에 도달할 때까지의 전달시간, 즉 흥분이 방실까지 전도된 시간을 PQ, 심실에 흥분이 도착한 시간을 QRS, 심실의 탈분극과 재분극 두가지를 모두 포함한 시간을 QT, 심실에서 흥분이 안정될 때의 파를 T로 표시한다.

QRS의 R로부터 다음 QRS의 R까지의 간격을 R-R 간격이라하여 심장 박동주기를 나타낸다. 이 값으로 60초를 나누면 심박수를 구할 수 있다(有元·難波, 1996).

또한 실험어에 강한 순음 자극을 가하면 순간적으로 심박수가 감소하는 반사작용이 일어나는데, 이 실험에서의 청각문턱치 측정은 이 심장박동 주기를 지표로 하여 심실의 수축주기를 나타내는 R-R 간격을 심박간격으로 정하여 측정하였고(添田 등, 1998), 각 파 간격은 데이터 수신시간 간격을 2초로 설정하여 파형을 확대 수신한 후 디스켓에 저장하여 분석하였다.

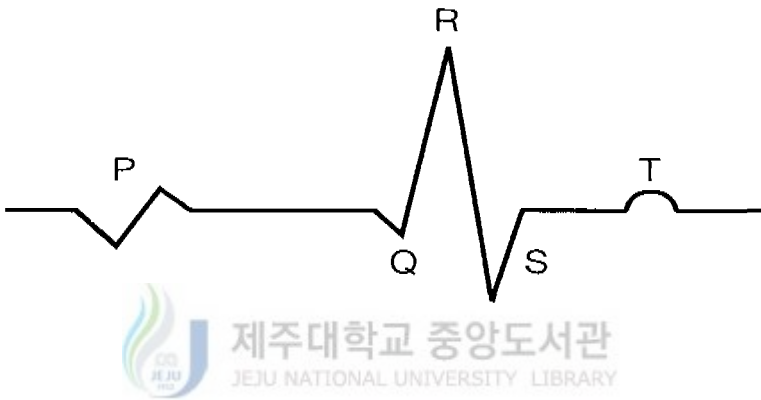


Fig. 3-5. Electrocardiogram(ECG) by precordial leads from chest cavity. ECG is composed of P, Q, R, S and T waves.

## 2. 결과

### 1) 능성어의 심전도

실험어의 평상시와 학습음 방성시의 심전도 파형을 분석한 결과를 Table 3-2에 나타내었다.

실험의 심전도 파형은 평상시에는 심박수가 분당 95회, RR간격은 0.63초, PQ, QRS, QT 간격도 각각 0.18초, 0.14초, 0.42초로 나타났다. 그러나 전기 자극 및 학습음으로 자극한 경우, 능성어의 심박수는 분당 51회로 급격하게 감소하고 있으며, RR 간격도 1.18초로 나타났다. 이와 동시에 PQ, QRS, QT의 값들도 0.32초, 0.16초, 0.78초를 각각 나타내었다.

또한 QRS 간격은 안정시와 자극시의 간격 차이가 거의 없었으나 PQ, QT 간격은 각각 0.18, 0.42초에서 0.32, 0.78초로 약 2배 가량 증가하는 것으로 나타났다.



Table 3-2. Heart rate of sevenband grouper by electrocardiogram

(Unit : sec)

Situation	Heart rate (times per min.)	RR	PQ	QRS	QT
Stability	95	0.63	0.18	0.14	0.42
Stimulus	51	1.18	0.32	0.16	0.78

RR : Interval between R wave and adjacent R wave

PQ : Interval between P wave and Q wave

QRS : Interval between Q wave and S wave

QT : Interval between Q wave and T wave

## 2) 청각문턱치

이 실험에서 사용한 각 측정주파수에서 환경소음 및 실험어의 청각문턱치를 Table. 3-3과 Fig. 3-6에 각각 나타내었다.

청각문턱치 실험에 사용된 실험수조 내의 환경소음은 측정주파수 100Hz 에서 음압 68dB을 기록한 후 점차로 감소하여 주파수 1,000Hz에서 39.7dB을 나타내고 있었으며, 실험어의 청각 문턱치는 측정 주파수 100Hz, 200Hz, 250Hz, 300Hz, 350Hz, 400Hz, 500Hz, 600Hz, 700Hz, 800Hz, 900Hz, 1000Hz에서 음압은 각각 102.1dB, 97.5dB, 96.6dB, 95.5dB, 94.8dB, 97.2dB, 100.2dB, 102.1dB, 107.8dB, 112.2dB, 114.4dB, 116.8dB(re 1  $\mu$ Pa)로 각각 나타났다.

따라서 이들 값으로 부터 알 수 있듯이 능성어의 측정주파수 변화에 따른 청각문턱치는 측정 주파수 200~400Hz의 범위에서 낮았고, 특히 측정주파수 350Hz에서 음압 94.8dB로 나타나 측정 주파수 중 청각문턱치가 가장 낮았으며, 측정 주파수 350Hz를 기준으로 주파수가 작아지거나 커질 때 청각 감도가 점점 나빠지는 V자형의 청각문턱치곡선을 나타내었다.

Table 3-3. Auditory thresholds of sevenband grouper on the condition of ambient noise

Frequency (Hz)	Thresholds (dB re 1 $\mu$ Pa)	
	Mean	SD*
100	102.1	1.7
200	97.5	1.9
250	96.6	1.9
300	95.5	1.4
350	94.8	0.8
400	97.2	1.8
500	100.2	1.3
600	102.1	1.4
700	107.8	1.3
800	112.2	1.8
900	114.4	1.4
1000	116.8	2.2

\* SD : Standard deviation



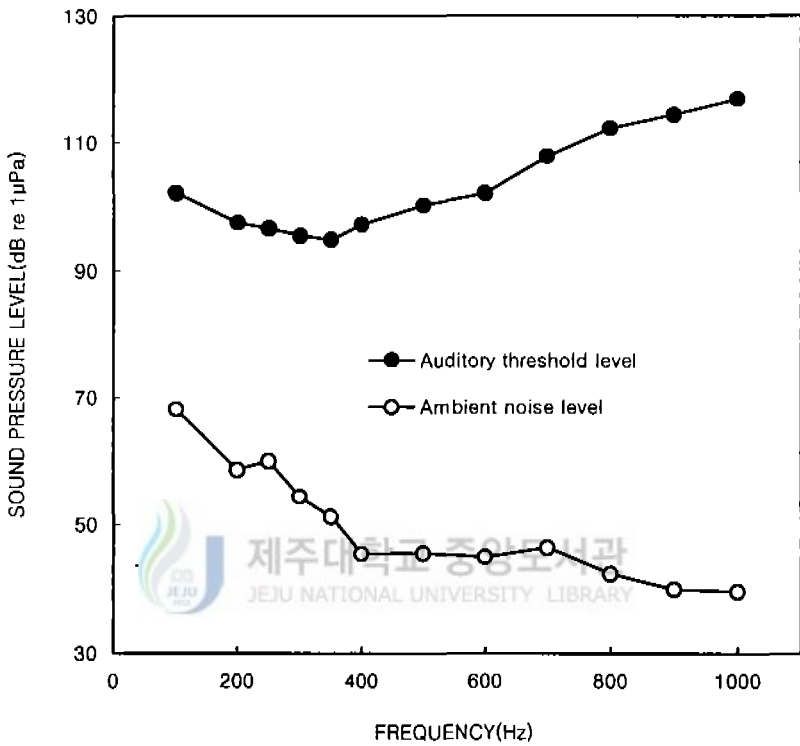


Fig. 3-6. Auditory threshold level of sevenband grouper and spectrum level of ambient noise at frequency between 100 and 1,000Hz.

### 3. 고찰

Table 3-4는 실험어의 심박수와 難波 등(1973)에 의해 조사된 은어 등 몇가지 어류의 심전도를 비교하여 나타낸 것이다. 실험어의 평상시 심전도 심박수는 은어의 심박수 94회와 비슷한 경향을 나타내고 있었으나, 참돔의 146회, 전갱이의 113회 보다는 낮은 수치를 나타내었고, PQ, QRS, QT 간격도 은어, 송어와 유사한 형태로 나타났다.

그러나 학습음을 방성한 경우 실험어의 심박수는 급격하게 감소되어, 틸라피아가 분당 55회 및 RR 간격이 1.09초인 것과 비슷한 값을 나타내었다. 이와 동시에 심전도 파형과 PQ, QRS, QT의 값들도 틸라피아와 유사한 진폭을 가지고 있는 것으로 나타났다.

또한 이 실험에 사용한 능성어는 비골표류이면서 부레를 갖고 있는데, 청각문턱치 실험결과에서 측정주파수 100~1,000Hz의 음을 모두 인식하였고, 측정주파수 200~400 Hz의 음에서 낮은 청각문턱치 값을 보였으며, 500Hz보다 높은 측정주파수에서는 청각문턱치가 급격히 높아졌다. 이 실험에서 얻어진 능성어의 청각문턱치는 Fig. 3-7에 나타낸 것과 같이 특정 주파수에서 극도로 차이가 큰 시마연어(Kojima 등, 1992)를 제외하고, 송어(Hatakeyama, 1992), 참돔(Ishioka 등, 1988) 등 대다수 어류의 청각문턱치 값과 비슷한 음압 80~120dB의 범위에 포함되고 있으며, 측정 주파수별 청각문턱치의 변동도 비슷한 형태로 변동하고 있음을 알 수 있다.

따라서 실험어의 측정 주파수별 청각능력은 일반적인 어류의 범주에 속한다고 판단되며, 시마연어의 청각문턱치가 측정주파수 200Hz와 700Hz에서 청각감도가 좋은 W자형의 청각문턱치를 나타내는 것에 비해, 실험어의 측정 주파수 변화에 따른 청각문턱치는 측정주파수 350Hz일 때 음압 94.8dB을 기준으로 하는 V자형의 청각문턱치 곡선을 나타내었다.

Table 3-4. Heart rate and wave interval of each species by electrocardiogram  
(Unit : sec)

Species	Weight (g)	Heart rate (times per min.)	PQ	QRS	QT
Sevenband grouper	95.5	95	0.18	0.14	0.42
Sweet fish*	75.1	94	0.06	0.06	0.42
Rainbow trout*	328	100	0.14	0.08	0.40
Tilapia*	212	55	0.25	0.10	0.79
Red seabream*	112	146	0.07	0.03	0.31
Horse mackerel*	359	113	0.12	0.05	0.38

\* Nanba et al(1973)

PQ : Interval between P wave and Q wave,

QRS : Interval between Q wave and S wave,

QT : Interval between Q wave and T wave,

이 실험에는 학습음 방성과 전기자극에 의한 음향학습 완료후 학습음의 방성을 극한법에 의한 자극법 중 상승계열법에 의해 방성하고, 그때의 심전도 변화에 따른 청각문턱치 만을 측정하였으나, 음향학습 후 학습음 방성은 상승계열법보다는 하강계열법에 의한 측정법이 청각문턱치가 낮고 표준편차가 적게 나타난다는 안 등(1999)의 방어에 대한 청각문턱치 측정결과를 참고로 하여, 금후 하강계열법에 의한 능성어의 청각문턱치의 산출도 필요한 것으로 사료된다.



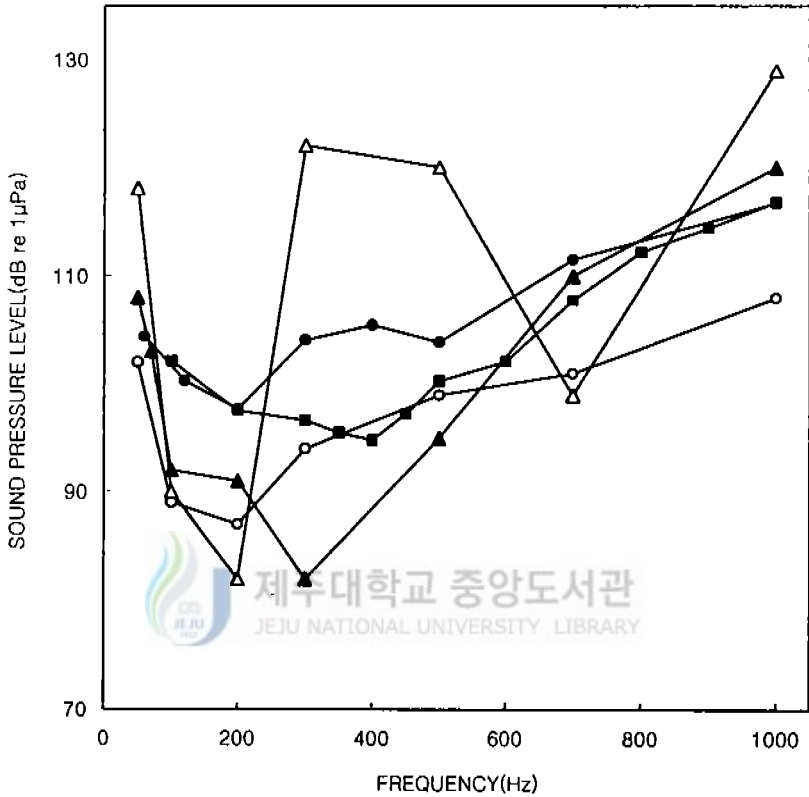


Fig. 3-7. Comparison of the auditory threshold level of sevenband grouper(■) with that of masu salmon(△ : T. Kojima et al, 1992), brown trout (▲ : Y. Hatakeyama, 1989), red seabream(○ : H. Ishioka et al. 1988) and walleye pollock(● : Park, 1995).

## IV. 능성어의 청각 임계비

### 1. 재료 및 방법

#### 1) 실험어

청각 임계비 실험에 사용된 실험어는 부산연안에서 통발어구에 어획된 능성어 200미를 국립수산진흥원 수산공학과 내에 있는 사육수조로 이송한 후 약 1개월간 넙치용 2호사료(천하사료)로서 사육순용 시킨 것 중, 20미를 무작위 추출하여 실험에 사용했는데, 전장 범위는 14.4~20.3cm로 평균 16.2cm, 표준편차 1.78cm, 체중 범위는 60~148g로 평균체중이 95.8g, 표준편차 22.8g 이었다.

실험기간 중 수조내의 수온은 18.3~25.4℃, 염분농도는 32.1~33.8‰였고, 실험어는 사육수조에서 실험수조로 옮긴 후 24시간 이상 경과한 후에 임계비 측정실험에 사용했다. 실험에 사용된 실험수조 및 실험어의 설치방법은 청각문턱치 측정방법과 동일하게 하였다.

#### 2) 실험장치 및 학습음 방정방법

청각임계비 실험에 사용한 실험장치는 Fig 3-1에 나타낸 장치를 이용하였으며, Fig 3-3, Fig 3-4에서와 같이 청각문턱치 실험과 동일한 방법으로 측정 주파수 100~800Hz 사이의 100Hz 간격인 8종과 250Hz, 350Hz의 2종 등 총 10종의 측정주파수 정현파 순음에 대해 실험하였고, 백색소음은 Fig. 3-1의 점선 부분과 같이 신호발생기

(B&K, PA-2500RD)에서 발생시킨 백색소음을 녹음기(EROICA, PCR-231S)에 녹음하고 재생하여 증폭기(INKEL, PA-2500RD)로 증폭하여 실험어의 머리부분 쪽 수조벽면에 설치된 1개의 공중스피커(UNIVERSITY, PAT2755)를 통해 방성하였다.

학습음 방성과 전기자극에 의한 음향 학습 방법도 청각문턱치 실험과 동일하게 조건에 따라 25~30분 간격으로 반복하고, 백색소음은 각 측정주파수의 학습음 방성 후에 2분씩 방성되었으며, 환경소음 스펙트럼 레벨보다 음압이 약 10dB 높게 방성하였다.

이때 방성한 각 측정 주파수의 음압과 환경소음 및 백색소음의 음압은 수조내에 설치한 수중청음기(OKI, ST8400)와 음압계(OKI, SW1020)를 통하여 주파수분석기(B&K, 2032)로 측정 확인하였다.

또한 각 측정 주파수의 학습음은 실험수조내에서 음압 128~130dB이 되도록 하였으며, 조건학습 방법과 조건학습 완료 판단도 청각문턱치 실험과 동일하게 학습음 방성후 전기자극을 주기 전의 심전도 변화가 5회 이상 생길 때까지 반복하였으며, 전기자극을 주지 않고 심전도 변화가 연속해서 5회이상 변화가 보일 때 음향학습이 완료된 것으로 하였다.

청각 임계비의 측정은 학습음에 대한 음향학습이 완료된 실험어를 대상으로 음향학습 완료된 후 30분이 경과하였을 때 시작했다. 음향학습에 사용된 학습음을 포함하여 측정주파수를 임의의 순서로 선택하여 백색소음보다 2dB 높은 음압에서부터 음압 2~3dB씩 증가시키면서 심박 간격에 명확한 반응이 나타나는지 여부를 파악하였다. 그때 방성된 학습음으로 인해 연속해서 5회 이상 실험어의 심박 간격이 학습음을 방성하기 전보다 길어졌을 때의 최소음압을 측정하여 실험어의 청각 임계비를 산출하였다.

### 3) 청각임계비 산출방법

어류는 파랑, 강우, 지각변동 등 자연 발생적인 수중 소음과 항공기, 선박 등의 인위적인 수중 소음 등이 혼재하는 해양 환경에서 서식한다. 어류는 이러한 환경소음의 영향을 받아서 작은 소리는 듣기 어렵게 되어, 청각 문턱치가 증가하는 마스킹(Masking) 현상이 나타나게 된다. 따라서 수중에 존재하는 각종 환경소음의 영향을 고려하여 학습음과 백색소음을 동시에 방성하여 실험어의 청각임계비를 구한다.

청각임계비의 산출은 실험어의 청각 문턱치가 되는 각 측정 주파수의 방성음압을  $T(\text{dB re } 1 \mu\text{Pa})$ , 백색소음의 스펙트럼레벨을  $S(\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}/\sqrt{H})$  라 할 때 청각임계비(CR)는 다음 식으로 산출하였다.

$$CR = T - S \text{ - - - - - (4. 1)}$$

### 4) 청각 능력지수



각종 어류들에 대한 청각능력의 정도를 파악하기 위하여 Schellart and Popper(1992)는 청각능력지수를 산출하여 비교하는 방법을 제안하였는데 이 방법으로 실험어에 대하여도 청각능력지수를 산출하였다.

청각능력지수의 산출은 이미 구해진 실험어의 환경소음 청각문턱치 값을 기준으로 하여 구하였다.

또한 청각문턱치 값에서 구할 수 없는 계수는 각 측정 주파수에서의 청각문턱치 값을 기준으로 최소자승법에 의해 청각문턱치의 곡선식을 구한 후, 그 식에 대입하여 각 계수 값을 추정하였으며, 이렇게 구해진 계수로 Schellart and Popper에 의해 제안된 다음 식에 대입하여 실험어의 청각능력지수를 구하였다.



$$HI = \left( \frac{f_b}{Q_{10dB}} \right)^{0.5} \times 10^{\left( \frac{-S_b}{20} \right)} \quad \text{----- (4-2)}$$

여기서  $f_b$  는 청각 문턱치가 가장 낮은 주파수,  $Q_{10dB} = \frac{f_b}{f_1 - f_2}$  으로  $f_1 - f_2$  은 가장 낮은 청각문턱치를 나타내는 주파수보다 10dB 더 높은 청각문턱치 값을 나타내는 전 ( $f_1$ ) · 후 ( $f_2$ ) 주파수의 차를 나타낸다.

또한  $S_b$  는 가장 낮은 청각문턱치 값을 갖는 주파수에서의 음압을 CGS 단위로 나타낸 청각문턱치 값을 나타낸다. 이상에서와 같이 (4-2) 식에서 전항  $\left( \frac{f_b}{Q_{10dB}} \right)^{0.5}$  은 해당어류의 가청 주파수 범위를, 뒤쪽 항  $10^{\left( \frac{-S_b}{20} \right)}$  은 청각 감도를 표현하는 무차원 함수이다.



## 2. 결과

### 1) 청각임계비

청각임계비를 구하기 위해 방성된 백색소음의 음압레벨과 청각문턱치는 Fig. 4-1과 Table 4-1에 나타내었다.

이들 각 측정주파수에서 백색소음을 방성한 경우 실험어의 청각문턱치는 측정주파수 100Hz, 200Hz, 250Hz, 300Hz, 350Hz, 400Hz, 500Hz, 600Hz, 700Hz, 800Hz에서 각각 음압 103.7dB, 102.4dB, 102.0dB, 101.8dB, 102.5dB, 109.6dB, 114.8dB, 120.9dB, 125.2dB, 129.8dB로 나타났으며, 측정주파수 300Hz에서 음압 101.8dB로 가장 민감한 청각 감도를 나타내었다.

또한 이들 측정주파수에서의 청각임계비 및 그 표준편차는 Fig 4-2에 나타낸 것과 같이 10종의 측정주파수에서 음압 15.6~68.4dB 범위였으며, 측정주파수 100Hz, 200Hz, 250Hz, 300Hz, 350Hz, 400Hz, 500Hz, 600Hz, 700Hz, 800Hz에서 각각 음압 15.6dB, 25.8dB, 28.0dB, 33.5dB, 34.2dB, 39.1dB, 47.2dB, 53.9dB, 60.7dB, 68.4dB로 나타나 측정주파수가 증가하면서 음압도 증가하는 것으로 나타났다.

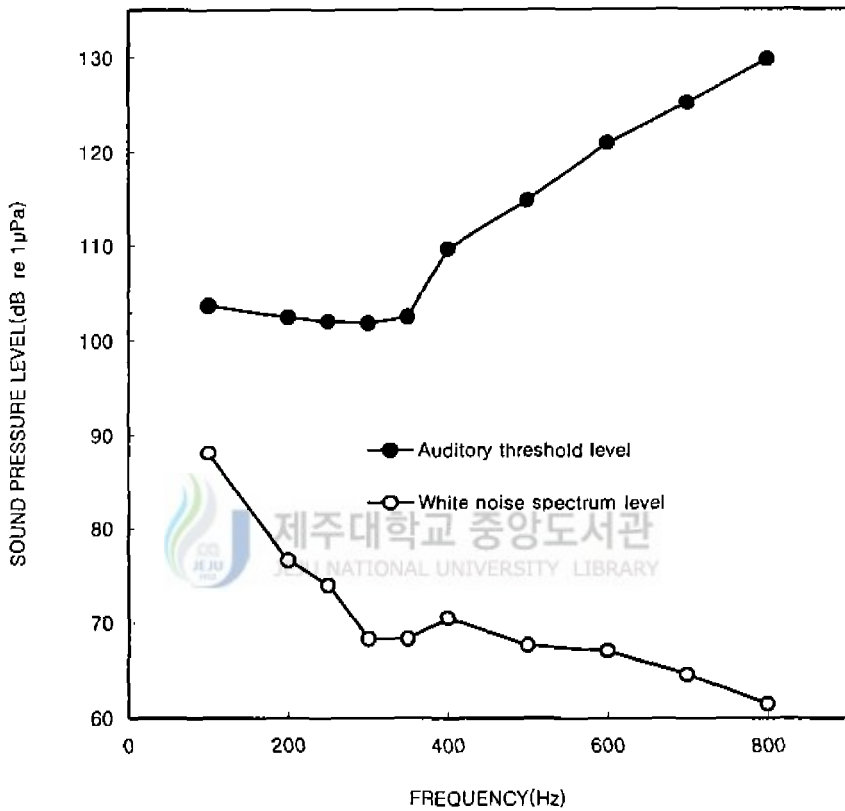


Fig. 4-1. Auditory threshold level of sevenband grouper and spectrum level of white noise at frequency between 100 and 800Hz.

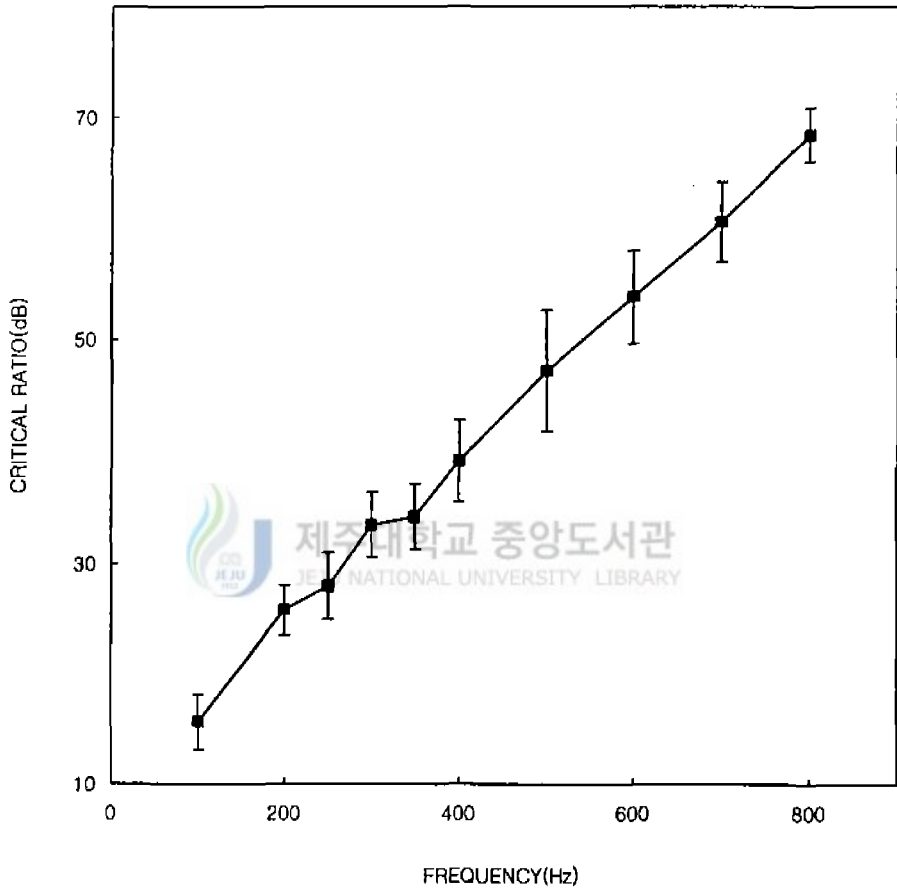


Fig. 4-2. Critical ratios of sevenband grouper at frequency between 100 and 800Hz

Table 4-1. Auditory thresholds and critical ratios of sevenband grouper on the condition of white noise

Frequency(Hz)	Thresholds (dB re 1 $\mu$ Pa)		Spectrum level (dB re 1 $\mu$ Pa/ $\sqrt{Hz}$ )		Critical ratio (CR)	
	Mean	SD*	Mean	SD*	Mean	SD*
100	103.7	1.6	88.1	0.9	15.6	2.5
200	102.4	1.8	76.6	0.5	25.8	2.3
250	102.0	2.5	74.0	0.5	28.0	3.0
300	101.8	2.5	68.3	0.4	33.5	2.9
350	102.5	2.1	68.3	0.8	34.2	2.9
400	109.6	3.1	70.5	0.5	39.1	3.6
500	114.8	4.7	67.6	0.8	47.2	5.5
600	120.9	3.7	67.0	0.5	53.9	4.2
700	125.2	3.1	64.5	0.5	60.7	3.6
800	129.8	1.7	61.4	0.7	68.4	2.4

\* SD : Standard deviation

## 2) 능성어의 청각 능력지수

능성어의 청각능력지수를 산출하기 위한 각 계수는 Table 4-2에서와 같이 환경소음 시에  $f_1$ 은 900Hz,  $f_2$ 는 60Hz로 나타나므로 가청범위를 나타내는  $(\frac{f_b}{Q_{10dB}})$ 은 840Hz가 된다. 또한 능성어는 환경소음 발생시  $f_b$ 는 350Hz에서 94.8dB일 때 가장 낮은 청각문턱치를 나타내므로, 앞에서 구한 것과 같이  $S_{fb}$ 는 -5.2dB(re  $1\mu$  bar)가 된다. 따라서 환경소음 발생시 능성어의 청각능력지수(HI)는 52.7로 나타났다.

이와함께 동일한 방식으로 백색소음 발생시에는  $f_1$ 이 390Hz,  $f_2$ 는 20Hz로 나타나 가청범위를 나타내는  $(\frac{f_b}{Q_{10dB}})$ 는 370Hz가 되며,  $S_{fb}$ 는 1.82dB(re  $1\mu$  bar)가 되어 청각능력지수가 15.6으로 나타났다.



Table 4-2. The hearing index of sevenband grouper

Condition	$f_b$	$f_1$	$f_2$	$\frac{f_b}{Q_{10dB}}$	$S_{fb}$	$Q_{db}$	HI
Ambient noise	350	900	60	840	-5.2	0.42	52.7
White noise	300	390	20	370	1.82	0.81	15.6

$f_b$  : Frequency correspond to the most sensitive auditory threshold(Hz)

$f_1$  : Higher frequency correspond to the point of higher 10dB than most sensitive auditory threshold(Hz)

$f_2$  : Lower frequency correspond to the point of higher 10dB than most sensitive auditory threshold(Hz)

$\frac{f_b}{Q_{10dB}}$  : Frequency range on hearing

$S_{fb}$  : Sound pressure level at most sensitive auditory threshold(dB re  $1 \mu$  bar)

$Q_{10db} = f_1 - f_2$

HI : Hearing index

### 3. 고찰

청각문턱치 실험에 사용된 것과 동일한 수조 내에서 백색소음을 방성하여 청각 임계비를 구해본 결과 음압 15.6~68.4dB 범위였으며, 이 결과는 박(1995)에 의한 명태의 청각 임계비 값과 비슷한 값을 나타내고 있었다.

또한 畠山(1992)는 청각능력지수에 관해 다음의 5가지 이론을 제기했다. 즉, 부레를 가지고 있는 어류의 최대 청각감도와 그 주파수의 관계에 관해서 1)  $f_b$ 가 높으면  $S_{nb}$ 가 적고, 2) 당연히 청각문턱치가 특출한 것은 청각문턱치가 특출하지 않은 것보다  $f_b$ 가 높고  $S_{nb}$ 가 적으며, 3) 부레가 없는 어류는 청각 감도가 나쁘고, 4) 데이터가 적기는 하지만 해산어 중 청각문턱치가 특출하지 않은 어류가 담수어 중 청각문턱치가 특출하지 않은 어류 보다 높은  $f_b$ 와 낮은  $S_{nb}$ 를 나타내는 경우가 많고, 5) 저층어는 표층어에 비해  $f_b$ 가 낮은 경향이 있다고 정의했다.

실험어의 청각능력지수를 구해본 결과 Table 4-3에서와 같이 환경소음에 대한 실험어의 청각능력지수(HI)는 52.7로 나타나 대서양 연어보다는 조금 높고, 장어보다는 조금 낮은 수치를 나타내고 있음을 알 수 있다.

이것은 무지개 송어의 32, 대서양 연어의 청각능력 지수 26과 비슷하게 나타나 청각문턱치 실험과 거의 동일한 결과를 나타내고 있어, 청각능력이 이들 어류와 비슷한 것으로 판단된다.

안 등(1999)에 의하면 체장과 청각문턱치의 상관관계는 나타나지 않는다고 보고하고 있으나, 체장의 변화에 따라 내이의 크기 및 부레의 크기가 달라져, 그 진동폭이 달라짐으로써 청각능력이 달라질 수 있으므로, 실험어의 체장별, 내이의 크기별 청각문턱치를 산출하여 비교해 봄으로써 내이의 크기와 각 주파수별 청각문턱치와의 상관관계를 추후 구명하여 보는 것도 필요할 것으로 판단된다.



Table 4-3. The hearing index of each species

Species	Condition	$f_b$	$S_{fb}$	$Q_{10db}$	HI
Sevenband grouper	Ambient noise	350	-5.2	0.42	52.7
	White noise	300	1.82	0.81	15.6
European eel <sup>1)</sup>	Ambient noise	40	-19	0.4	89
Carp <sup>2)</sup>	"	500	-42	0.43	4,300
Cat fish <sup>3)</sup>	"	600	-34	0.35	2,600
Atlantic salmon <sup>4)</sup>	"	160	-5	0.77	26
<i>Euthynnus affinus</i> <sup>5)</sup>	"	150	-23	0.81	11
<i>Pleuronectus platessa</i> <sup>6)</sup>	"	110	-3	0.79	17
<i>Carcharhinus leucas</i> <sup>7)</sup>	"	450	0	0.96	22

1) JerkØ, et al.(1989), 2) Popper(1972), 3) Weiss(1969), 4) Hawkins and Jhonstone (1978), 5) Tabolga and Wodinsky(1963), 6) Chapman and Sand(1974), 7) Klizer and Wood(1961)

$f_b$  : Frequency correspond to the most sensitive auditory threshold(Hz)

$S_{fb}$  : Sound pressure level at most sensitive auditory threshold(dB re  $1 \mu$  bar)

$$Q_{10db} = f_1 - f_2 \text{ (Hz)}$$

$f_1$  : Higher frequency correspond to the point of higher 10dB than most sensitive auditory threshold(Hz)

$f_2$  : Lower frequency correspond to the point of higher 10dB than most sensitive auditory threshold(Hz)

HI : Hearing index

## V. 해양목장화를 위한 응용실험

### 1. 음향 학습실험

#### 1) 재료 및 방법

##### (1) 실험어

음향학습 실험에 사용된 실험어는 부산연안에서 통발어구에 어획된 능성어 200미를 국립수산진흥원 수산공학과 내에 있는 사육수조(L6,000×B1,900×D1,830mm)로 이송한 후 약 3개월간 넙치용 2호 사료(천하사료)로서 사육순용 시킨 것 중, 30미를 무작위 추출하여 실험에 사용했는데, 전장 범위는 14.3~21.6cm로 평균 17.1cm, 표준편차 1.72cm, 체중 범위는 60~200g로 평균체중이 106.8g, 표준편차 19.7g이었고 실험기간 중 수조내의 수온은 20.2~25.6℃, 염분농도는 32.1~33.8‰였다.

이 실험에 사용된 실험수조는 Fig. 5-1에 나타낸 것과 같이 사육수조 내에 PE 그물감(망목 30mm)으로 실험용가두리(L3,000×B1,800×D1,200mm)를 제작하여 실험어를 사육하면서 음향학습 실험을 실시하였다. 수조내의 해수는 자연해수를 사용하였고, 수조의 상부 표면으로부터 급수를, 수조의 밑바닥으로 배수를 하였다.

또한 외부의 빛을 차단하기 위하여 모든 출입구 및 창문에 차광막을 설치하였으며, 실험용 가두리내의 조도를 가급적 일정하게 하기 위해서 주간에는 형광등을 점등하였는데, 이때 실험용가두리 중간부분 수심 50cm의 조도는 25~30lux 었다.

이와함께 실험어의 행동 해석을 용이하게 하기 위해서 실험용 가두리를 길이방향으

로 1,000mm 간격으로 3등분하여 하얀색 나일론 줄로 표시한 후, Fig. 5-1에서와 같이 수중 스피커와 가장 가까운 곳에 위치한 좌측 가장자리로부터 A 구역, B 구역, C 구역으로 구분하여 정하였다.

## (2) 실험장치

학습음 방성을 위한 장치의 구성은 Fig. 5-1에 나타내었다. 이 실험에 사용한 학습음은 신호발생기(B&K, 1027)에서 발생된 학습음을 증폭기(INKEL, PA-2500RD)에서 증폭하여 수중스피커(SPC Electronic, FC-701)로 방성하였고, 방성시간은 타이머로 조종하여 60초간 방성된 후 중단되도록 하였다. 이때 수중 스피커는 실험용가두리에서 1.5m 인 곳, 수심 50cm에 설치되었다.

이때 학습음이 방성되는 동안 실험어의 행동관찰은 실험용가두리의 중앙 상부 3.6m 에 설치된 비디오카메라(삼성, SV-H815)로 녹화하였고, 녹화된 자료는 실험실에서 Mpeg board(KASAN, Winx perfect II)를 이용하여 컴퓨터에서 재생시키면서 실험어의 행동을 관찰하였다.

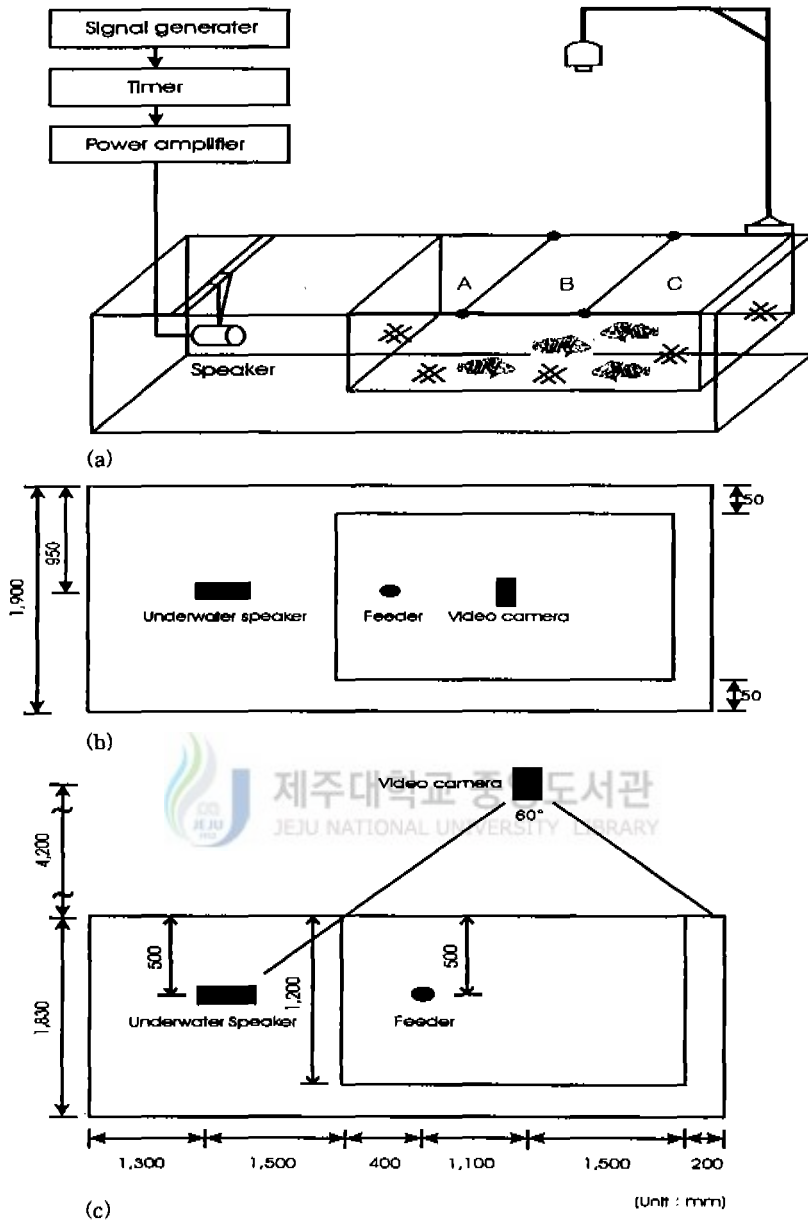


Fig. 5-1. Block diagram of the experimental devices and water tank used for conditioning sound emission.

- (a) Perspective drawing of the experimental water tank.
- (b) Top view of the experimental water tank.
- (c) Side view of the experimental water tank.

### (3) 학습음

실험어의 음향학습에 사용되는 학습음은 청각문턱치 실험과 청각 임계비 실험에서 얻어진 결과를 기초로 측정주파수 350Hz의 학습음에 대해 청각문턱치가 가장 낮았으므로 이 측정 주파수의 음을 학습음으로 선정하였다.

또한, 이 실험에서 사용한 학습음의 음압 강도는 환경소음의 영향을 받을 때 94.8 dB, 백색소음 방성시 102.5dB, 청각임계비 34.2dB인 점을 고려하여 실험수조 중앙부에서 약 130dB이 되도록 학습음을 방성하였다.

급이장치는 실험어에 영향을 주지 않도록 하기 위하여 PVC관( $\phi$ : 100mm, 4m)을 A구역 스피커 쪽 끝단에서 40cm 떨어진 지점과 실험수조 횡단면상 1/2되는 지점의 교차지점에 수심 20cm 까지 잠기도록 하여 급이하였다. 급이할 때 실험자는 실험수조 옆에 설치된 별도의 실험실에 급이장치의 끝단을 연결하여 급이하였고, 실험자의 영향을 최소화하기 위하여 급이 30분전에 미리 입실하여 급이를 준비하였다. 또한 학습음의 방성과 급이는 10시부터 11시 사이와 16시부터 17시 사이에 하였고, 1회 급이시 20g씩 약 60초간 하였다. 이와 동시에 학습에 사용된 학습음의 수조내 음압분포는 수중청음기(OKI, ST8004)와 음압계(OKI, SW1020)로 확인하였다.

실험어의 행동해석은 비디오 카메라(삼성, SV-H815)로 녹화된 비디오 영상을 재생 시켜서 실험어의 2차원적 분포위치를 관찰하는 것으로 하였다.

#### (4) 실험어의 행동해석

이 실험에서 사용한 전 개체수를 N마리, A구역에 출현하는 마리수를  $N_A$ , B구역에 출현하는 마리수를  $N_B$ , C구역에 출현하는 마리수를  $N_C$ 라 하면 A구역에 출현하는 출현율(Appearance rate in A area)  $A_a$ 는

$$A_a (\%) = \frac{N_A}{N} \times 100 \quad \text{--- (5. 1),}$$

B구역의 출현율  $A_b$ 는

$$A_b (\%) = \frac{N_B}{N} \times 100 \quad \text{--- (5. 2),}$$

C구역의 출현율  $A_c$ 는

$$A_c (\%) = \frac{N_C}{N} \times 100 \quad \text{--- (5. 3)}$$

으로 구하였다.

이 행동해석에서는 학습음을 방성한 때 A구역에 70% 이상의 실험어가 유집행동을 보인 경우 학습이 완료된 것으로 보았다. 그러나 학습음에 대한 실험어의 반응을 보다 확실하게 정량적으로 판단하기 위해서는 전술한 출현율을 구해 검토할 필요가 있다. 여기서는 학습음 방성전, 방성중, 방성후 실험어의 행동을 비디오 카메라로 촬영하여 테이프에 기록한 후 해석을 행하였다.

실험어의 구역별 출현율은 실험어의 머리 부분의 위치를 기준으로 해석하였으며, 또한 실험어는 저서 정착성 어종으로서 이 실험에서 섭이할 때와 학습음을방성할 때 이외에는 특별한 유영행동을 보이지 않았고, 그 유영속도도 매우 느리기 때문에 학습음 방성전 60초, 학습음 방성과 굵이중 60초, 학습음 방성 및 굵이 완료 후 60초를 5초씩 나누어 각 구역별로 실험어의 분포 마리수를 확인한 후, 평균값을 취하여 해석하였다.

또한, 20일간 실험어의 음향학습이 완료된 후 실험어의 학습음 기억능력을 살펴보기 위해 음향학습을 종료하여 20일이 지난 후 음향 학습실험과 동일한 방법으로 5일간 재차 반복 실험을 행하였다.



## 2) 결과

### (1) 실험수조 내의 실험어 행동

Fig. 5-2에 음향학습을 시작하기 하루 전, 평상시 실험어의 행동을 관찰하기 위하여 실험수조 사육 순응기간 중에 24시간 동안 5초 간격으로, 실험용 가두리를 가로와 세로 방향으로 각각 30cm 간격으로 구획하여 실험어의 구역별 출현율을 나타내었다.

실험용 가두리내의 실험어 출현율은 실험용가두리의 네 모서리 구역에서 30%, 스피커가 설치된 좌측 가장자리에서 30%, 끝단의 가장자리에서 23%를 나타내었다. 또한, 실험용가두리 길이방향 2개의 모서리에 54%를 나타내었고 네모서리 외측가장자리 구역은 67%의 높은 출현율을 나타내고 있었다. 이에 반해 실험용가두리 중앙부에서는 실험어의 출현율이 매우 낮은 것을 알 수 있다.

이와 같이 농성어의 평상시 행동은 실험용 가두리의 네모서리에 높은 출현율을 보였으며, 특히 실험용 가두리의 사방 꼭지점 구역에 30%에 달하는 실험어가 집중적으로 출현하고 있었다. 이러한 결과는 실험어가 저서성, 암초 서식성 어종으로 조도가 낮은 곳에 체류한다는 생태 및 습성과 밀접한 관련이 있다고 판단된다.



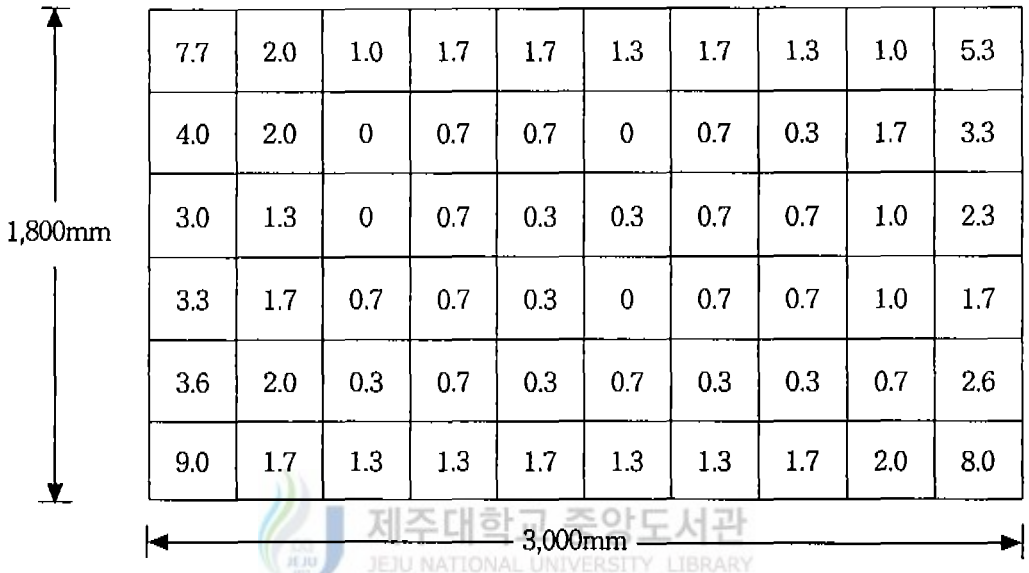


Fig. 5-2. Appearance rate of each fishes before conditioning sound emission in experimental cage. Numbers in the blank mean appearance rate(%). The sevenband grouper were intensively aggregated in both edges of the experimental cage, they were hardly distributed toward the center of the cage.

## (2) 음향학습시 실험어 행동

Fig. 5-3과 같이 환경소음보다 약 70dB 높은 학습음을 이용하여 실시한 음향학습 실험결과는 Fig. 5-4~Fig. 5-8에 나타내었다.

Fig. 5-4는 학습음 방성전 60초 동안의 실험용가두리내 구역별 실험어의 마리수를 측정하여 출현율을 나타낸 것으로서 실험어는 A구역에는 33.0~56.7%로 평균 47.0%, B 구역은 6.7~30.0%로 평균 15.6%, C 구역은 30.0~46.7%로 평균 31.4%의 출현율을 나타내었다.

Fig. 5-5는 학습음 방성과 급이중, 실험수조내 구역별 실험어의 출현율을 측정하여 나타낸 것으로서 실험어는 A 구역에는 13.3~93.3%로 평균 75.6%, B구역은 3.3~53.3%로 평균 15.0%, C 구역은 0~60.0%로 평균 9.4%로 A 구역에 밀집되어 출현하고 있었다.

Fig. 5-6은 학습음 방성과 급이 완료 후 실험수조 내 구역별 실험어의 출현율을 측정하여 나타낸 것으로서 A 구역에는 33.3~76.7%로 평균 50.3%, B 구역은 10.0~40.0%로 평균 20.7%, C 구역은 0~50.0%로 평균 29.0%였다.

Fig. 5-7은 음향학습의 효과를 알아보기 위하여 실험용 가두리내 수중스피커가 설치되어 있는 방향인 A구역내에서 학습음 방성전, 방성중, 방성후로 나누어 실험어의 출현율을 측정하여 나타낸 것으로서 실험어는 학습음 방성 전에는 33.3~56.7%로 평균 47.0%, 방성중에는 13.3~86.7%로 평균 70.3%, 방성후에는 33.3~76.7%로 평균 48.7%를 나타내어, 학습음 방성중이 학습음 방성전·후에 비해 20% 이상의 출현율 증가를 나타내었다.

또한, 학습음의 순치실험을 시작한지 5일이 경과된 후부터 학습음을 방성할 때까지의 A 구역의 평균 출현율은 87.5%를 나타내어, 음향순치실험에 의한 실험어의 음향 학습은 충분히 달성되었다고 판단된다.

Fig. 5-8은 학습읍 방성전과 방성중의 각 구역별 실험어의 출현을 차를 나타내고 있다. A 구역에서 실험어 출현율차 범위는 -30~46.7%로 평균 23.8%의 차를, B구역에서는 -13.3~46.7%로 1.0%의 차를, C 구역에서는 -46.7~16.7%로 평균 -24.8%의 차를 보였다.

따라서, 이 결과는 A 구역에서의 실험어는 방성전에 비해 방성중에 23.8%의 실험어가 다른 구역에서 이동되어 왔음을 나타내고 있고, B 구역에서도 1%의 출현율차만큼 다른 구역에서 B 구역으로 이동되어 왔으며, C 구역에서는 24.8%의 실험어가 다른 구역으로 이동하였음을 나타내고 있다.



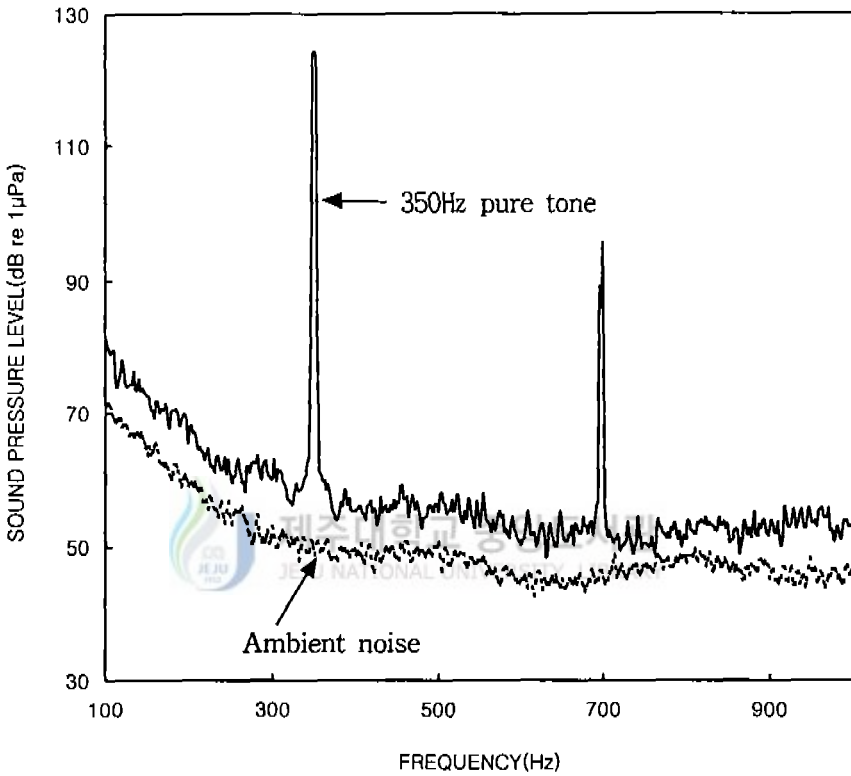


Fig. 5-3. Spectral analysis ambient (solid line) and pure sound (dotted line) of which the frequency is 350Hz.

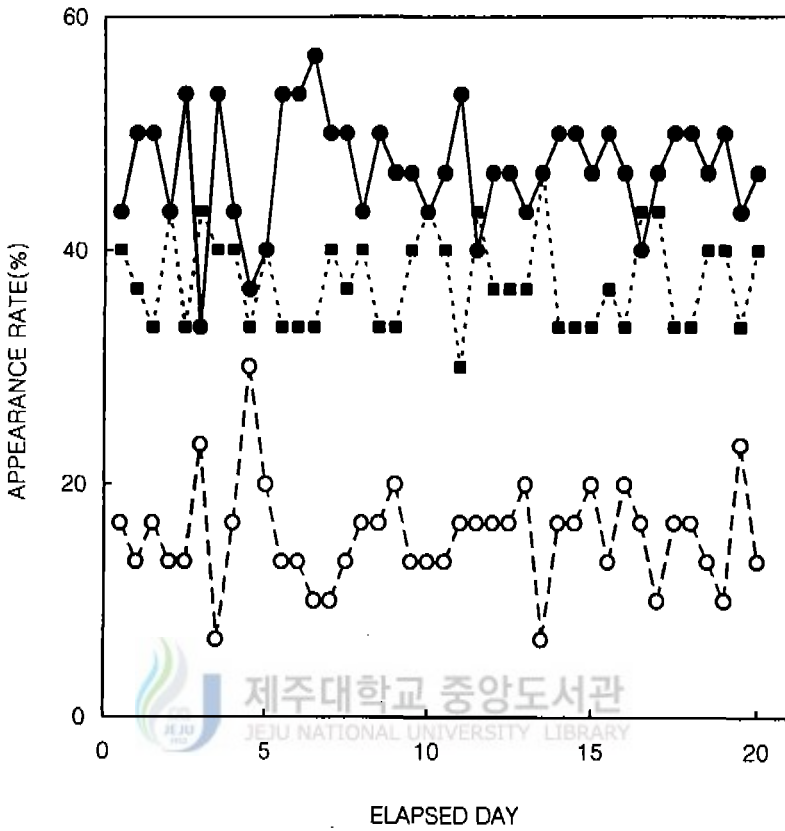


Fig. 5-4. Average appearance rate before conditioning sound emission in the A, B and C area of experimental cage.

- (A area) : Forward area in the experimental water tank.
- (B area) : Middle area between A and C area in the experimental water tank.
- (C area) : Backward area in the experimental water tank.

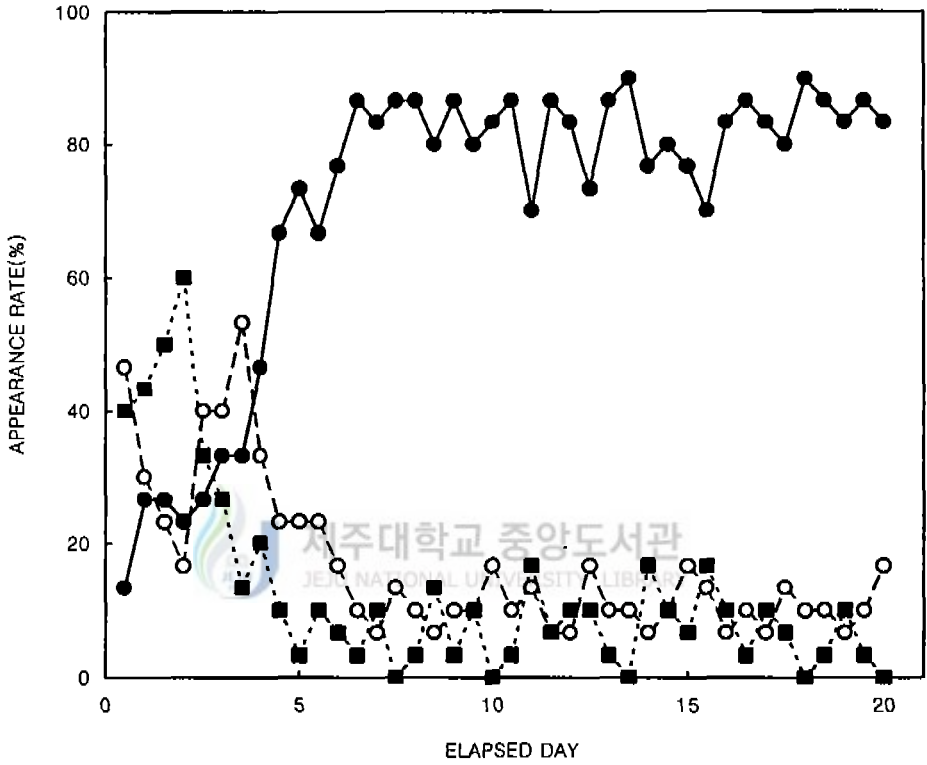


Fig. 5-5. Average appearance rate while conditioning sound emission in A(●), B (○) and C(■) area of the experimental cage. During this observation only conditioning sound were emitted.

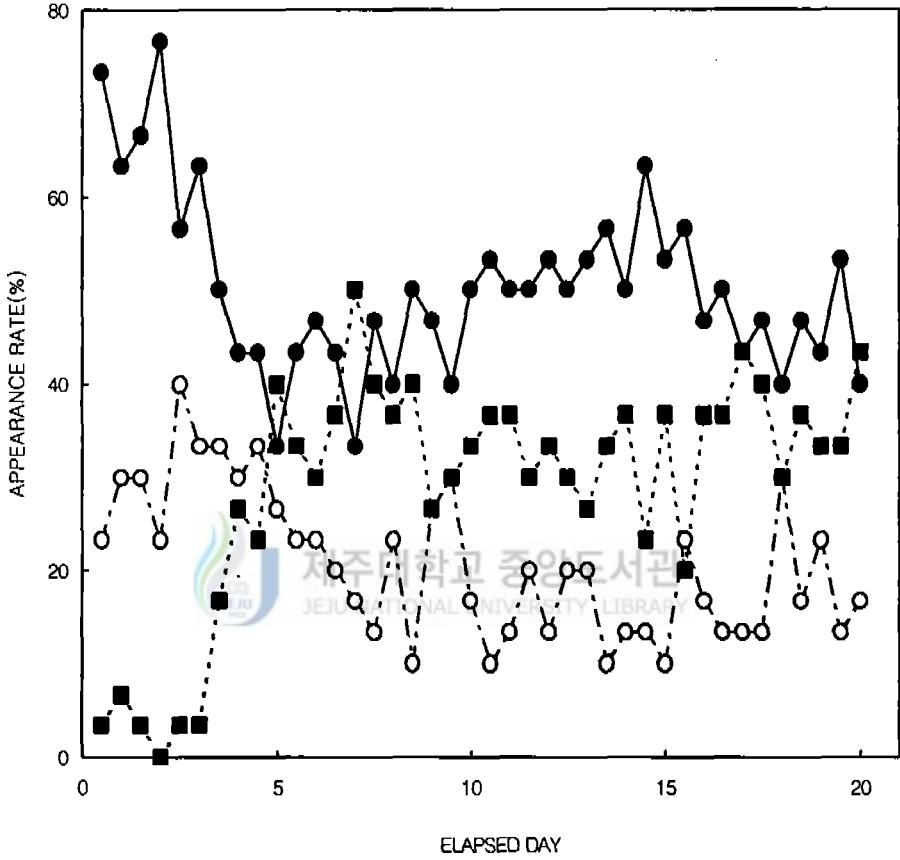


Fig. 5-6. Average appearance rate after conditioning sound emission in A(●), B(O) and C(■) area of the experimental cage.

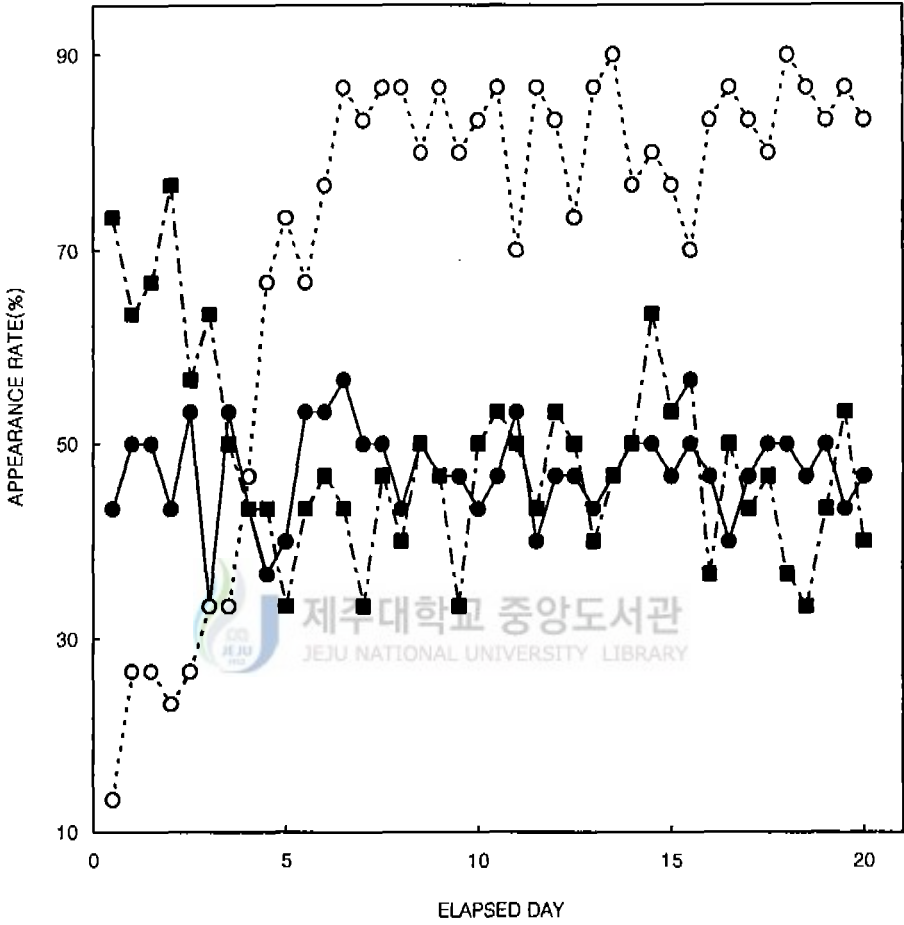


Fig. 5-7. Average appearance rate of before(●), during(○) and after(■) conditioning sound emission in the A area of the experiment cage.



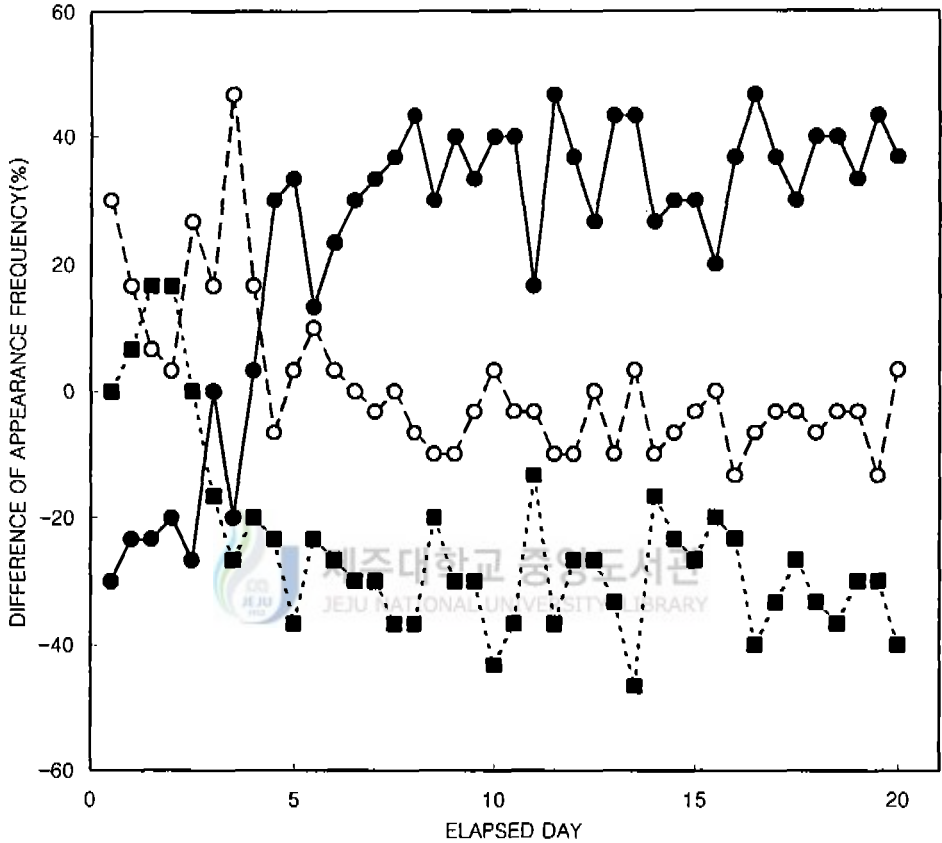


Fig. 5-8. Difference of appearance rate between before and during while conditioning sound emitted in A(●), B(○) and C(■) area of the experimental cage.

### (3) 실험어의 학습음 기억능력

실험어의 학습음 기억능력을 측정하기 위해 음향학습 재시험을 실시하여 실험어의 학습음 기억여부를 확인해 보았다.

Fig. 5-9 학습음 종료 20일 후 방성전 60초 동안의 실험용가두리내 구역별 실험어의 마리수를 측정하여 출현율을 나타낸 것으로서 실험어는 A구역에서는 26.2~46.7%로 평균 35.3%의 출현율을 나타내었다.

Fig. 5-10은 학습음 방성과 급이중, 실험수조내 구역별 실험어의 출현율을 측정하여 나타낸 것으로서 실험어는 A 구역에서 53.3~86.7%로 평균 69.7%의 출현율을, B 구역에서는 6.7~33.3%로 평균 19.7%의 출현율을, C 구역에서는 3.3~20%로 평균 10.6%의 출현율을 나타내었다.

Fig. 5-11은 학습음 방성과 급이 완료 후 실험수조 내 구역별 실험어의 출현율을 측정하여 나타낸 것으로서 실험어는 A 구역에는 40.0~53.3%로 평균 47.7%, B 구역은 20.0~36.7%로 평균 30%, C 구역은 13.3~30%로 평균 22.3%를 각각 나타내었다.

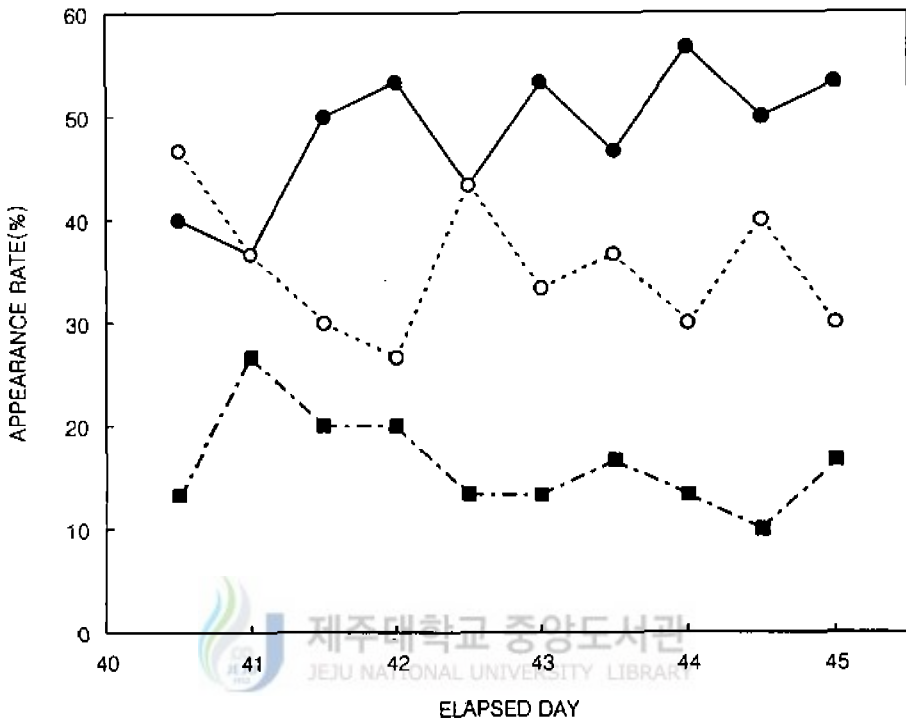


Fig. 5-9. Average appearance rate before conditioning sound emission in the A, B and C area of the experimental cage in 20 days after finishing the conditioning experiment.

- (A area) : Forward area in the experimental water tank.
- (B area) : Middle area between A and C area in the experimental water tank.
- (C area) : Backward area in the experimental water tank.

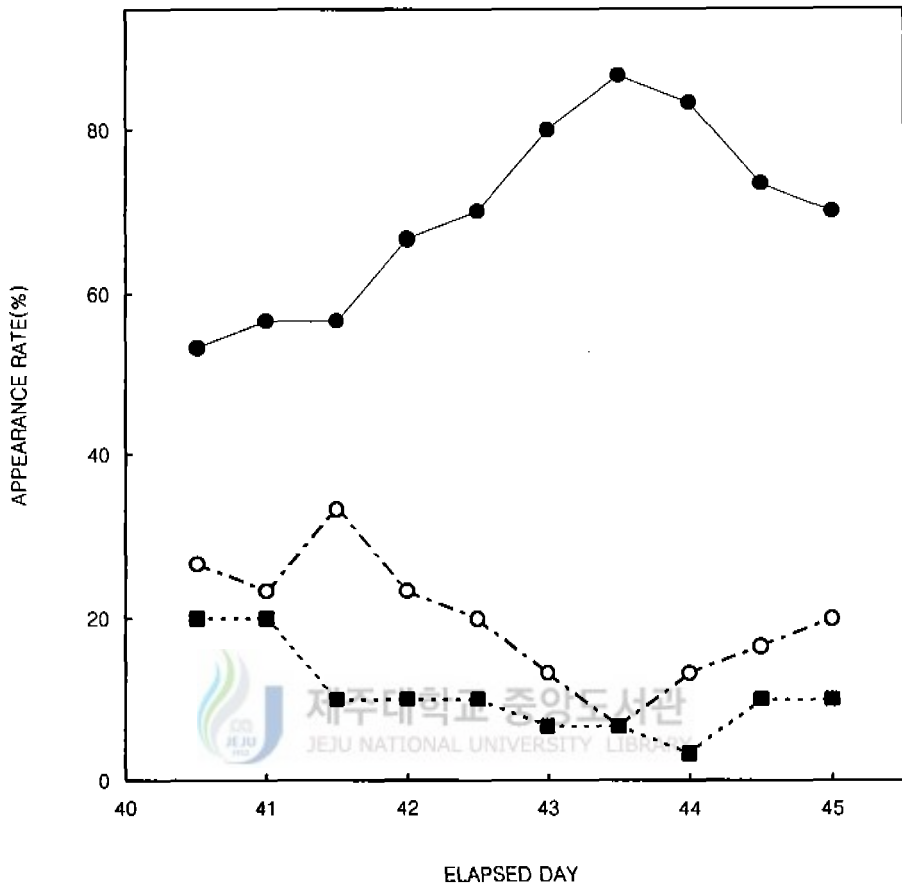


Fig. 5-10. Average appearance rate while conditioning sound emitted in the A, B and C area of the experimental cage in 20 days after finishing the conditioning experiment.

- (A area) : Forward area in the experimental water tank.
- (B area) : Middle area between A and C area in the experimental water tank.
- (C area) : Backward area in the experimental water tank.

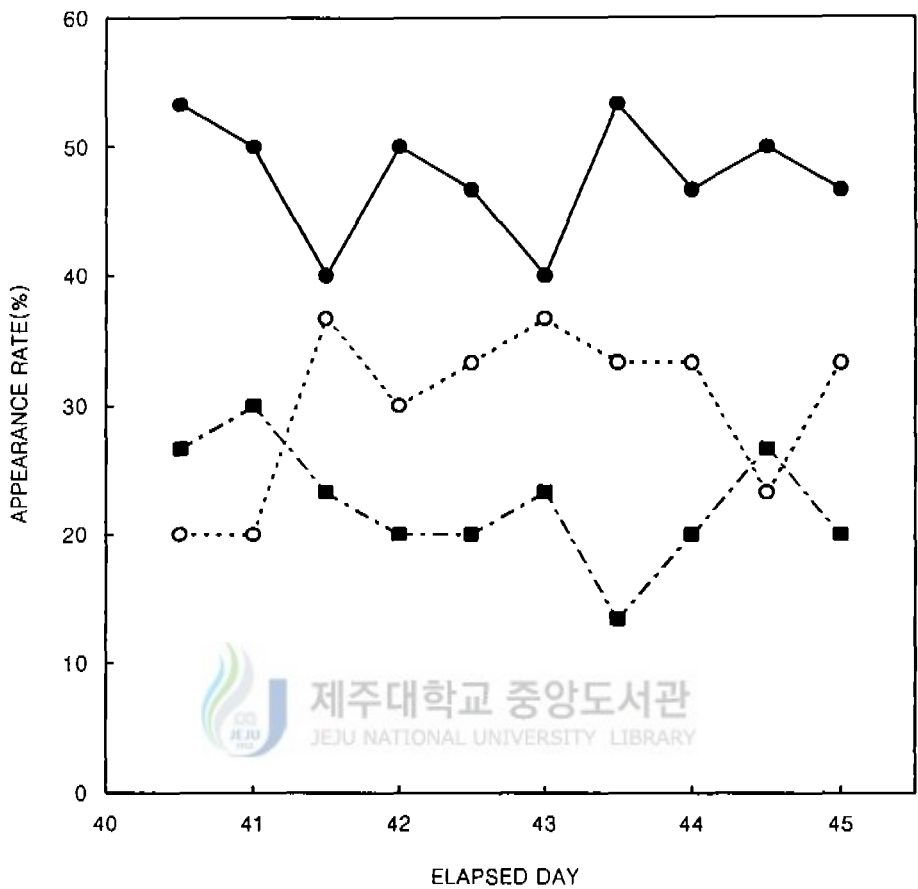


Fig. 5-11. Average appearance rate after conditioning sound emission in the A, B and C area of the experimental cage in 20 days after finishing the conditioning experiment.

- (A area) : Forward area in the experimental water tank.
- (B area) : Middle area between A and C area in the experimental water tank.
- (C area) : Backward area in the experimental water tank.

### 3) 고찰

실험어를 어획하여 사육수조로 이송한 후 환경에 적응시키기 위해 3개월간을 사육 순응 시켰는데, 수조 내에서 실험어의 행동특성은 실험어 각 개체의 머리 방향이 각 양각색으로 어군 전체의 움직임에 지향성이 전혀 나타나지 않아, 성군성은 없는 것으로 판단되었으며, Breder(1965)가 언급한 고독한 물고기(Solitary)에 속하는 행동특성을 보였다(이, 1981). 또한, 대부분의 실험어가 실험수조의 벽면 근처 혹은 밑바닥 등 조도가 낮은 곳에 체류하고 있었고 섭이시에는 부상하여 표층에서만 섭이하는 행동특성을 보였으며 이러한 행동은 문 등(1997)에 의한 실험과 같은 결과를 나타내고 있다.

학습음 방성 전 실험수조 내 위치별 실험어의 출현은 A 구역(급이기가 설치된 스피커 쪽)과 C 구역(반대편 실험수조 끝단)에 많이 출현하고 있었으며, B 구역(중간부분)에는 20% 내외의 소수 어류만이 출현하고 있었다. 이러한 현상은 실험기간 내내 변함없이 유지되었으며, 실험어가 저층·암초지대에 서식하고 서로 공식한다는 생태적 특성 때문인 것으로 판단된다.

또한 실험어는 실험을 시작한 후 4일 경과할 때까지는 학습음 방성 후 학습음 자극을 피하여 B와 C 구역으로 이동하는 현상이 뚜렷하게 관찰되었다. 그러나, 학습음 순치실험을 개시한지 5일이 경과된 후부터 학습음 방성 후 사료가 주어진다的事实을 실험어가 충분히 인식하여 학습효과가 나타나는 것으로 판단되었다.

Fig. 5-5에서 관찰된 것과 같이 실험어는 학습음이 방성된 후 A 구역에 위치하여, 사료의 투여를 기다리고 있는 상태였다. B 구역에 위치한 실험어도 A와 B 구역 사이만을 유영하고있어 이들 군도 A 구역에 포함시켜 분석하여도 무방하다고 판단되지만, A 구역에 포함시킬 경우 학습능력이 과대 해석될 우려가 있어 이 연구에서는 B 구역에 포함시켜 분석하였다.

축정주파수 350Hz의 순음을 이용하여 실험어 음향학습 실험을 실시한 이 실험의 결과 음향학습 5일 후부터 음향학습효과가 명백히 나타나는 것으로 판단되지만, 학습

음의 주파수 변화 및 음압 변화에 따른 학습 소요 기간 변동에 대해서는 실험하지 못하였다. 이 부분은 추후 보완실험이 필요한 것으로 판단된다.

藤谷 등(1973), 井上 (1975), 幡谷 등(1989)은 해양목장의 중요한 대상종의 하나인 참돔, 도미, 썸뱅이 및 넙치에 관해 음향학습 실험을 실시하였고, 학습음의 기억 지속 기간을 4개월 내외라고 밝힌 바 있다.

이 실험에서도 실험어는 20일후에도 60% 이상의 실험어가 출현하여 학습음을 기억하고 있다고 판단되었다. 그러나 실험기간이 충분하지 못하여 4개월 이상의 학습음 기억여부에 대하여는 확인하지 못하였다.

따라서, 금후 보완실험을 통하여 4개월 이상 학습음을 기억하는지 여부와 최대 어느 정도의 기간동안 학습음을 기억하는지에 대한 검증은 실시할 필요가 있으며, 또한, 심전도를 이용하여 학습음 기억여부를 판별할 수 있는 방법의 개발도 필요하다고 판단된다.



## 2. 능성어의 음향사육

### 1) 장치 및 방법

음향사육 실험에 사용된 실험어는 부산연안에서 통발어구에 어획된 능성어 200미를 국립수산진흥원 수산공학과 내에 있는 실험사육수조로 이송한 후 약 4개월간 넙치용 2호 사료(천하사료)로서 사육순용 시킨 것 중, 20미를 무작위 추출하여 실험에 사용하였다. 음향사육 효과를 조사하기 위하여 사육기간 중 음향을 방성한 군을 음향 사육군, 음향을 방성하지 않은 사육군을 비교 사육군으로 하였는데, 음향 사육군은 전장 15.9~23.7cm, 평균전장 18.6cm 표준편차 2.4cm, 체중 80~268g, 평균체중 135.6g, 표준편차 59.2g인 10미, 비교사육군은 전장 17.2~22.1cm, 평균전장 19.7cm, 표준편차 1.9cm, 체중 100~205g, 평균체중 155.8g, 표준편차 43.2g인 10미였다.

또한, 실험에 사용된 수조는 Fig. 5-12에 나타낸 것과 같이 합성수지로 제작된 실험 사육수조(L1,000×B700×H330mm)를 사용하여 음향 사육군과 비교 사육군으로 나누어 실험을 실시하였고, 실험사육수조 내의 해수는 자연해수를 수조 윗면에 고무호스를 부착하여 공급하였고, 해수의 배출은 수조면 상부에 여러 개의 구멍을 뚫어 그 구멍을 통해 배출되도록 하였다.

실험기간은 1999. 3. 2~1999. 5. 29(89일간)이고, 실험중 급이는 매일 오후 1시에 10분에 걸쳐 음향 사육군과 비교 사육군에 넙치용 2호 사료(천하사료)를 20g씩 급이하였다.

음향사육에 사용한 사육음은 모차르트의 교향곡 40번 제 1악장~제 4악장과 사육음 41번 제 1악장~제 4악장 및 오페라 피가로의 결혼 서곡이었으며, 이 곡들은 컴퓨터에서 재생하여 증폭기(INKEL, PA-2500RD)에서 증폭하여, 음향 사육군을 수용한 수조에만 수조의 윗면 중앙에 설치된 공중 스피커(UNIVERSITY, PAT2755)로 오전 9시, 오후 1시 및 5시에 각 1시간씩 1일 3회 총 3시간동안 방성했다.



실험사육 수조내의 음향사육에 사용한 사육음 방성시 주파수별 음압 레벨은 그림 5-12와 같이 실험사육 수조내에 설치한 수중청음기(OKI, ST8004), 음압계(OKI, SW1020), 주파수분석기(B&K 1023)로 측정 확인하였으며, A/D Board를 통해 컴퓨터에 입력하였다.

음향사육에 사용한 사육음의 영향에 대한 분석은 주 1회씩 음향사육군과 비교사육군의 체장 및 체중 변화를 측정하여, 사육음 방성에 따른 변화를 분석하였으며, 체장, 체중 측정시에는 어류마취제(SIGMA CHEMICAL, MS-222)로 마취하여 측정하였다. 이와 함께 음향 사육군과 비교사육군의 사료효율(Feed efficiency)을 구했는데 사료효율은

$$F.E(\%) = \frac{W.G}{F.I} \times 100 \text{ - - - - - (5-6)}$$

로 구했다.

여기서 F.I는 먹이 섭취량, W.G는 체중 증가치를 나타낸다(수산청, 1994).



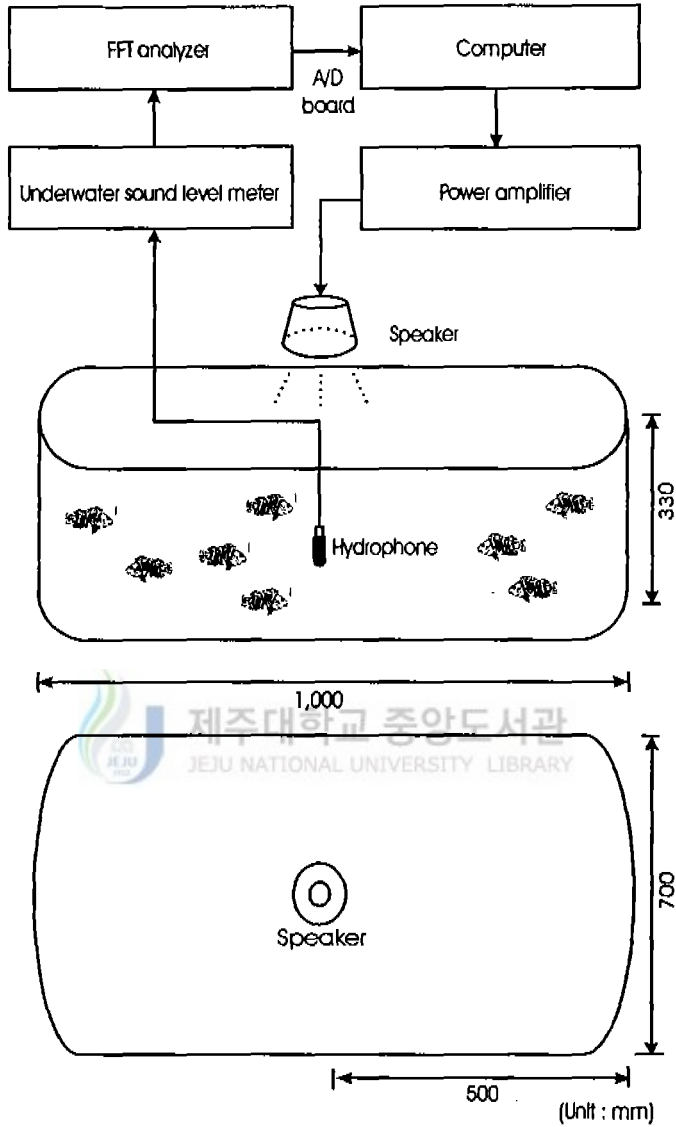


Fig. 5-12. Block diagram of measuring equipment for the effect of symphony and experimental water tank.

## 2) 결과

### (1) 수조내 환경

실험 기간 중 수조내의 수온은 Fig. 5-13에 나타낸 것과 같이 수온범위 12℃~17℃ 사이에서 서서히 상승과 하강을 반복하고 있었으며, 실험 개시 후 70일째 되는 시기부터 능성어 사육에 호조건인 수온 15℃ 이상을 유지하고 있었다.

사육 수조내의 환경소음과 사육음의 음압 스펙트럼 레벨은 Fig. 5-14에 나타낸 것과 같이 100Hz~400Hz의 측정주파수대에서는 환경소음보다 약 10~40dB 정도 높게 나타났다으며, 이 값은 측정주파수 100~400Hz 범위에서 실험어의 청각문턱치와 청각임계비 값을 능가하는 값으로서 실험어가 충분히 감지할 수 있다고 판단된다.



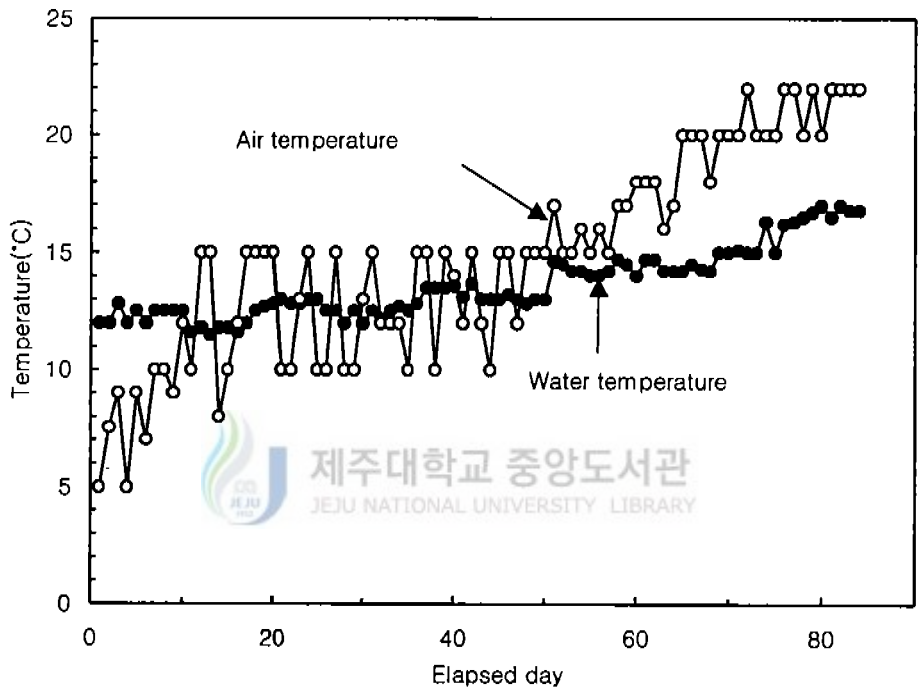


Fig. 5-13. Profile of water temperature during the experiment.

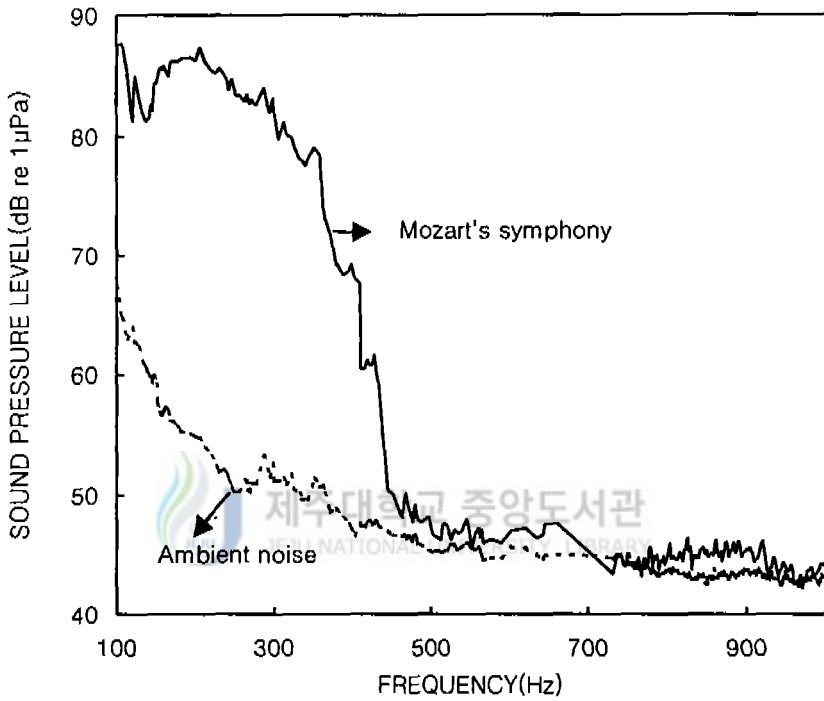


Fig. 5-14. Spectrum levels of ambient noise(dotted line) and mozart's symphonies(solid line) in the experimental water tank.

## (2) 사육음 방성 영향

사육음의 방성이 실험어 사육에 미치는 영향을 알아보기 위해 이 실험에서는 음향 사육군과 비교 사육군의 체장 및 체중변화를 1주 간격으로 조사하여 그 결과를 Fig. 5-15와 Fig. 5-16 및 Table 5-1에 나타내었다.

Fig. 5-15와 Table 5-1에 나타낸 것과 같이 실험어의 평균 체장은 실험을 시작 할 때 비교 사육군이 음향 사육군보다 약 10mm 정도 더 큰 것으로 나타났다. 그러나 실험 개시 후 시일이 경과함에 따라 음향 사육군의 체장 변화는 비교 사육군 보다 더 급격하게 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이 결과는 체중에도 그대로 영향을 미치고 있었다.

실험 시작 후 57일째부터 음향 사육군과 비교 사육군의 체장은 서로 역전되어 음향 사육군의 개체 크기가 비교 사육군보다 더 크게 되었으며, 이러한 현상은 실험을 종료한 84일까지도 계속되는 것으로 나타났다.

Fig. 5-16은 음향 사육군과 비교 사육군의 체중변화를 나타낸 것이다. 실험어의 체중 변화는 실험을 시작할 때 음향 사육군 보다 비교 사육군이 약 20g 정도 더 큰 것으로 나타났으나, 실험일수 경과에 따라 음향 사육군의 체중이 비교 사육군의 체중 증가보다 더 급격히 증가하는 경향을 나타내었다.

실험을 시작한 후 57일째부터 음향 사육군과 비교 사육군의 체중은 서로 역전되어 음향 사육군의 체중이 비교 사육군 보다 더 크게 되었으며, 이러한 현상은 실험을 종료한 84일 까지 계속되는 것으로 나타났다.

이와 함께 전 실험기간 동안의 사료효율을 살펴보면, 음향 사육군의 경우는 사료 투입량이 1,680g, 성장은 76g으로 나타나 45.2%의 사료효율을, 비교 사육군은 성장이 35.6g으로 나타나 21.2%의 사료효율을 나타내어 음향 사육군이 2배 이상의 사료 효율을 나타내고 있었다.

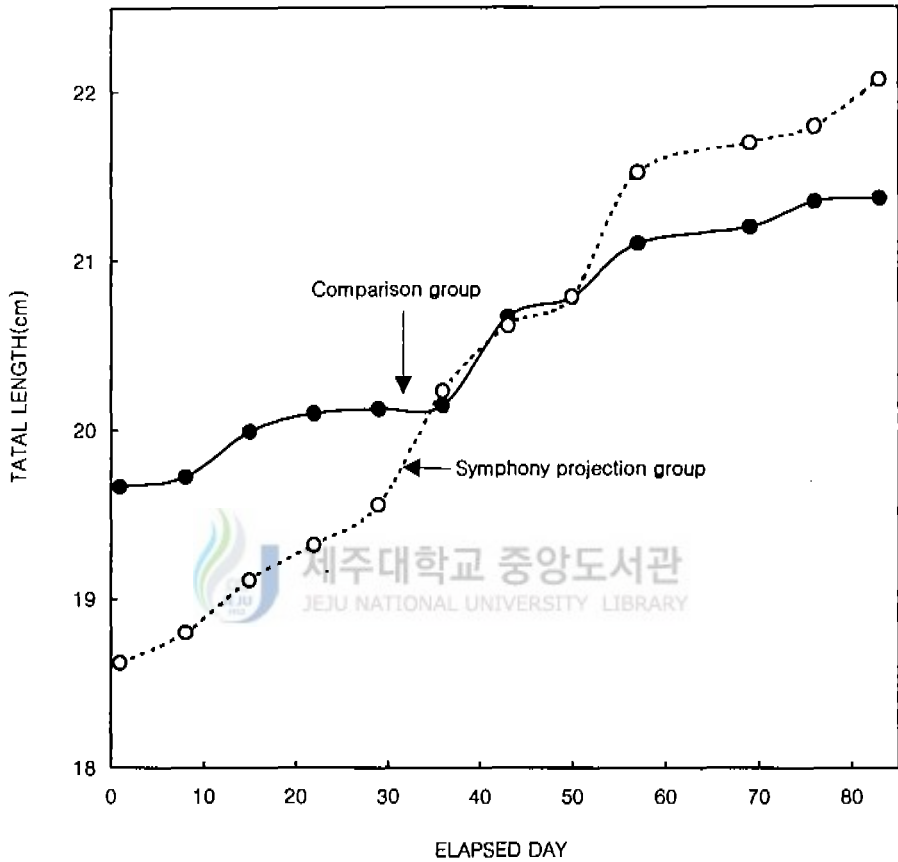


Fig. 5-15. The variation of sevesband grouper's total length of symphony projection group(○) and comparison group(●).

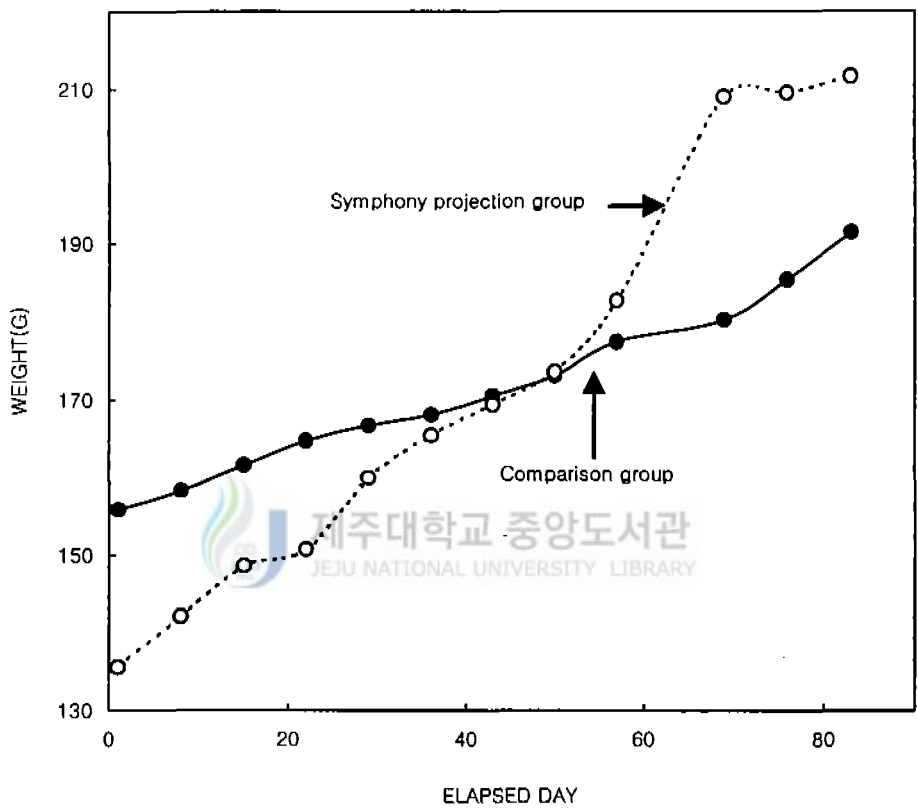


Fig. 5-16. The variation of sevesband grouper's weight of symphony projection group(○) and comparison group(●).



Table 5-1. Variation of the total length and weight between comparison group and Mozart symphony projection group

Elapsed day	Comparison group		Symphony projection group	
	Total length (cm)	Weight(g)	Total length (cm)	Weight(g)
1	19.67	155.8	18.62	135.6
8	19.78	158.2	18.92	142.1
15	19.99	161.6	19.22	148.6
22	20.10	164.7	19.51	150.7
29	20.22	166.7	19.83	159.9
36	20.55	168.1	20.12	165.5
43	20.67	170.5	20.46	169.4
50	20.79	173.4	20.75	173.6
57	21.01	177.5	21.23	182.7
69	21.20	180.2	21.60	209.0
76	21.35	185.5	21.80	209.5
83	21.37	191.4	22.08	211.6

### 3) 고찰

음향을 이용하는 방안에 대한 연구는 여러 분야에서 다양하게 시도되고 있다. 지금까지 음향을 가축의 사육이나 식물의 사육에 이용하는 예는 언론매체를 통하여 많이 보도되어 왔으나, 어류를 대상으로 실험한 예는 없다. 가축이나 식물의 경우 명곡을 방성했을 때 성장이 빠르고, 건강상태가 양호한 것으로 보고되고 있다. 그 예로 젖소 사육시 음악을 이용할 경우 우유의 양과 질이 향상된다는 보고는 물론, 음악을 질병 치료와 태교 등에 이용하려는 시도도 행해지고 있는 실정이다. 또한 심리학에서도 음악이 정신에 미치는 힘을 다양하게 풀어내어, 음악이 좌우 뇌의 연결고리인 뇌량의 발달을 촉진시켜 각종 정보의 처리와 인식에 도움을 줌으로써, 음악이 인간의 행복과 창조성을 북돋워 주는 것은 물론 신체의 이상을 치료하고, 학습능력까지 키워주는 효과를 가지고 있으며, 이러한 현상을 모차르트 이펙트라고 주장하고 있다(Don Campbell, 1994).

또한, 3~5세의 어린이를 대상으로 음악과 수학 능력과의 관계를 구명하기 위하여, 모차르트 음악 청취군, 대중음악 청취군, 침묵 그룹의 세 군으로 구분하고, 종이를 접고 가위로 자른 후 폼을 때의 모양을 고르는 실험을 수행하였으며, 각 그룹별 평균점수를 공간에 대한 IQ(Stanford-Vinne 방식 IQ 점수)로 환산해 본 결과, 모차르트 청취군이 119, 대중음악 청취군이 111, 침묵군이 110으로 나타나 모차르트 음악의 청취가 추상적, 공간적 논리에 관한 사고능력을 향상시켜 준다는 보고에 기초하고 있으며, 이러한 결과는 현재까지 찬반 양론으로 나누어져 있는 실정이다.

이 실험에서 학습용으로 사용한 모차르트 사육음의 중심주파수대는 앞에서 구한 청각문턱치와 청각임계비 실험 결과와 비교하여 실험어가 가장 잘 인지할 수 있는 주파수 범위의 음악이라 판단된다.

또한, 사육음 방성에 따라 비교사육군 보다 체장과 체중이 더 급속도로 증가하는

원인은 심리적 안정감에 따라 건강상태가 양호하기 때문에 나타나는 결과인 것으로 생각된다.

이상과 같이 이 실험은 사육음 방성에 따라 어류의 성장에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 알아보는 실험만을 수행하였다. 사고력은 전혀 염두에 두지 않고 실험을 수행하였으며, 음향 사육군과 비교 사육군의 건강 상태 및 육질 등의 비교 분석은 실험 여건상 여러 가지 어려움으로 인하여 행하지 못하였다.

따라서 추후 보완실험을 통하여 육질비교, 건강상태의 비교 등 보완실험은 물론 장기간에 걸친 연구 및 관찰이 필요하다고 판단된다.



### 3. 학습음에 대한 스트레스

#### 1) 장치 및 방법

##### (1) 실험어

실험에 사용된 어류는 부산연안에서 통발어구에 어획된 능성어를 국립수산진흥원 수산공학과 내에 있는 사육수조로 이송한 후 약 6개월간 넙치용 2호 사료(천하사료)로서 사육순응 시킨 것 중 45미를 무작위로 추출하여 실험에 사용했는데 실험어의 전장은 14.6~19.0cm, 평균전장 16.4cm, 표준편차 1.4cm, 체중 63~140g, 평균체중 97.0g, 표준편차 23.6g였다.

실험에 사용된 수조는 Fig. 5-1에 나타낸 것과 같은 사육수조 내에 PE 그물감(망목 30mm)을 씌워 제작한 Fig. 5-17과 같은 실험수조(L 1,200×B 600×D 600 mm)를 제작하여 실험어를 사육하면서 음향학습 실험을 실시하였다.

수조내의 해수는 자연해수를 사용했고, 실험기간 중 수조내의 수온은 약 20.5℃, 염분농도 약 32.5‰ 였다.

실험어는 자연환경에서 측정주파수 350Hz, 백색소음 방성시 측정주파수 300Hz에서 가장 낮은 청각문턱치를 가지고 있었으므로, 이 결과를 이용하여 주파수 350Hz의 순음을 학습음으로 하여 실험을 실시하였다.

학습음은 신호발생기(B&K, 1027)에서 350Hz의 순음을 발생시킨후 증폭기(INKEL, PA-2500RD)에서 증폭하여 실험수조 상면에 설치된 공중 스피커(UNIVERSITY, PAT2755)에 의해 240분간 연속 방성하였으며, 이때 실험수조내의 음압은 수조 중앙에서 130dB이 되도록 방성하였고, 음압 스펙트럼 분석은 주파수 분석기(B&K, 2032)로써 측정, 확인하였다.

## (2) 스트레스 측정법

스트레스의 측정에는 아드레날린 분석법, 혈당 측정법 등 여러 가지 측정법이 있으나(有元·難波, 1996), 이 실험에서는 학습음 방성 후 5분, 10분, 20분, 30분, 45분, 60분, 120분, 240분 별로 5마리씩 혈액을 채취하여 혈당의 변화를 살펴봄으로써 학습음 방성에 따른 스트레스 자극 여부를 측정하였다. 이때 혈당은 공복 여부에 따라 그 값은 많은 차이를 보였으며, 사람의 경우 20~60mg/dl 정도의 오차가 생길 수 있다는 검증에 따라 실험시작 24시간 이전부터 굶이지 않았다.

혈액의 채취는 바늘 굵기가 1.1mm인 23G 바늘과 5ml 용량의 실린더로 구성된 1회용 주사기의 주사바늘을 실험어의 꼬리지느러미 앞부분에 위치해 있는 미병부를 통하여 1회 5미씩 각 어류마다 1cc의 혈액을 채취하였고, 혈액 채취시 마취제의 사용에 의해 어류에 스트레스 및 독 작용을 일으킨다고 (Ball and Cowan, 1959 ; Schoettger et al. 1967 ; Smit et al. 1979 ; 정 등, 1994) 많은 연구자들이 보고하고 있으므로 이 실험에서는 마취제를 사용하지 않았다.

또한 어류의 혈액은 포유동물보다 응고시간이 극히 짧아 항응고제의 사용이 불가결하다. 따라서 이 실험에서는 혈액 형태학적 검사에 응용하고 있는 헤파린 처리법을 사용하였다.

먼저 750 unit/ml인 헤파린 용액으로 주사기를 분주한 후, 꼬리혈관을 통해 채혈하며 채취된 혈액을 EDTA-2K 병에 담아 응고되지 않도록 적당히 흔들어서 채취병 내에 담겨있는 혈액 응고 방지제와 잘 섞이도록 한 후 분석에 이용하였다.

혈당의 분석에는 현재 시판되고 있는 간이식 혈당분석용 키트(호일양행, Precision QI-D)를 사용하여 분석하였고, 혈당 분석용 키트 본체 전면에 혈당 테스트 스트립(Blood glucose sensor electrode)이 완전히 투입될 때까지 삽입한 후 혈액을 스트립에 떨어뜨려 지시기에 나타나는 혈당농도를 읽었다.

이때 새로운 박스의 스트립을 사용할 때마다 교정용 스트립을 이용하여 분석 키트 본체를 교정한 후 측정하였다.

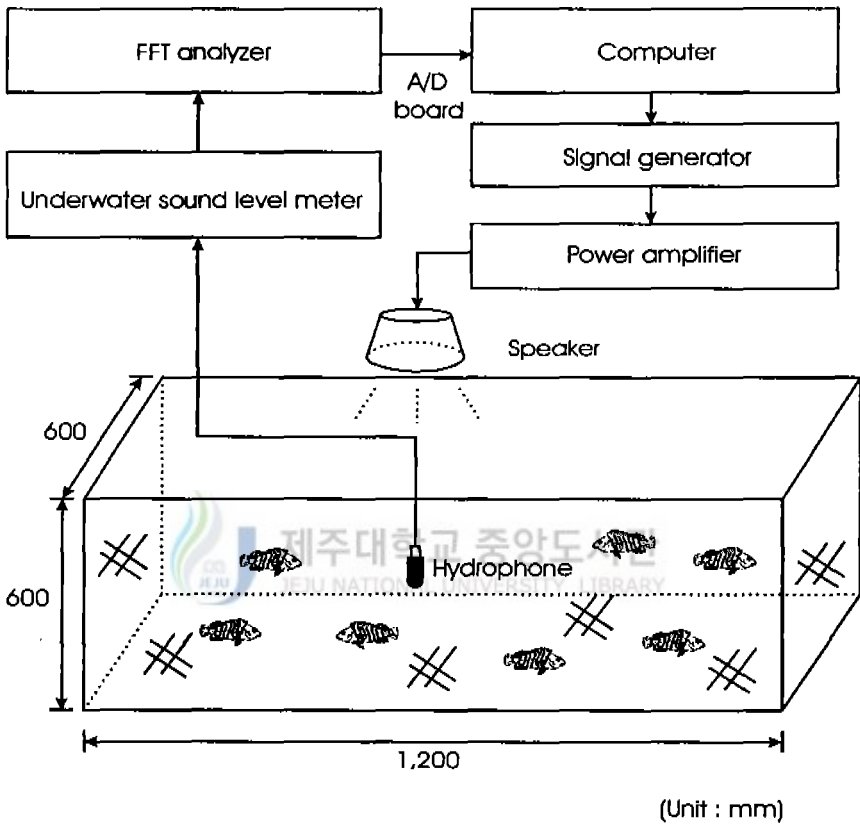


Fig. 5-17. Block diagram of the experimental system used for measurement of stress level according to the conditioning sound emission for sevenband grouper.

## 2) 결과

Fig. 5-18은 수조내 환경소음과 350Hz의 학습음을 방성할 때의 음압 레벨을 나타낸 것으로, 수조내에 350Hz 순음을 방성한 경우 350Hz의 주파수에서는 환경소음과의 음압레벨 차가 약 60dB이었다.

이때 학습음 방성 시간 경과에 따른 농성어 혈액중 혈당 농도의 변화를 Table 5-2와 Fig. 5-19에 나타내었다.

자극음을 방성하기 전에 측정된 비교군의 혈당량은  $20.33 \pm 0.557 \text{mg/dl}$ 였으며, 이 값은 45분이 경과 할 때까지 별 차이가 없이 20~24mg/dl의 혈당치를 나타내었으나, 60분을 경과할 때 혈당량이  $26.33 \pm 1.528 \text{mg/dl}$ , 120분 경과 시까지  $48.67 \pm 3.055 \text{mg/dl}$ 로 급속히 증가하고, 이후 240분 경과 후에는  $59.67 \pm 5.033 \text{mg/dl}$ 을 각각 나타내고 있어, 120분 이후 240분 경과시까지는 약간 둔감한 증가세를 나타내었다.



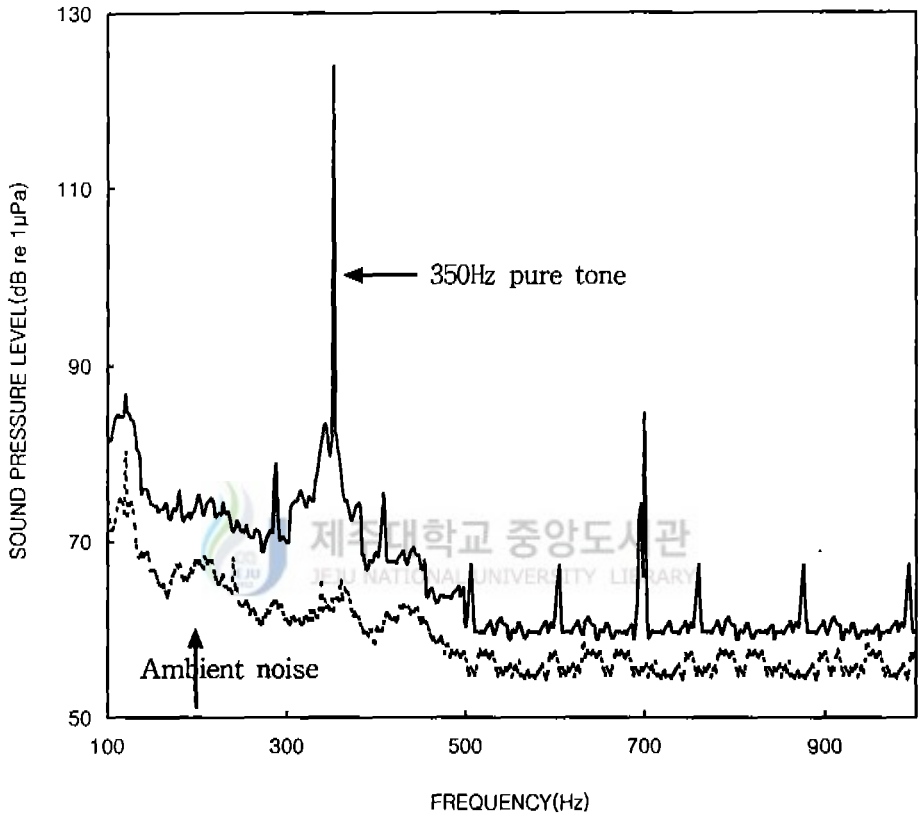


Fig. 5-18. Conditioning sound spectrum and ambient noise spectrum by the emission of 350Hz pure tone.



Table 5-2. Changes in blood glucose level of sevenband grouper by emission of 350Hz pure tone

Time(min.)	Glucose(mg/dl)					Mean	SD*
	1	2	3	4	5		
0	23	20	20	21	20	20.33	0.577
5	22	20	22	20	20	20.67	1.154
10	20	22	23	25	23	23.67	1.154
20	20	20	22	25	20	22.33	2.517
30	22	25	22	22	24	22.67	1.155
45	20	22	22	20	21	21.00	1.000
60	21	26	25	26	28	26.33	1.528
120	54	49	48	52	46	48.67	3.055
240	84	56	55	65	59	59.67	5.033

\* SD : Standard deviation.

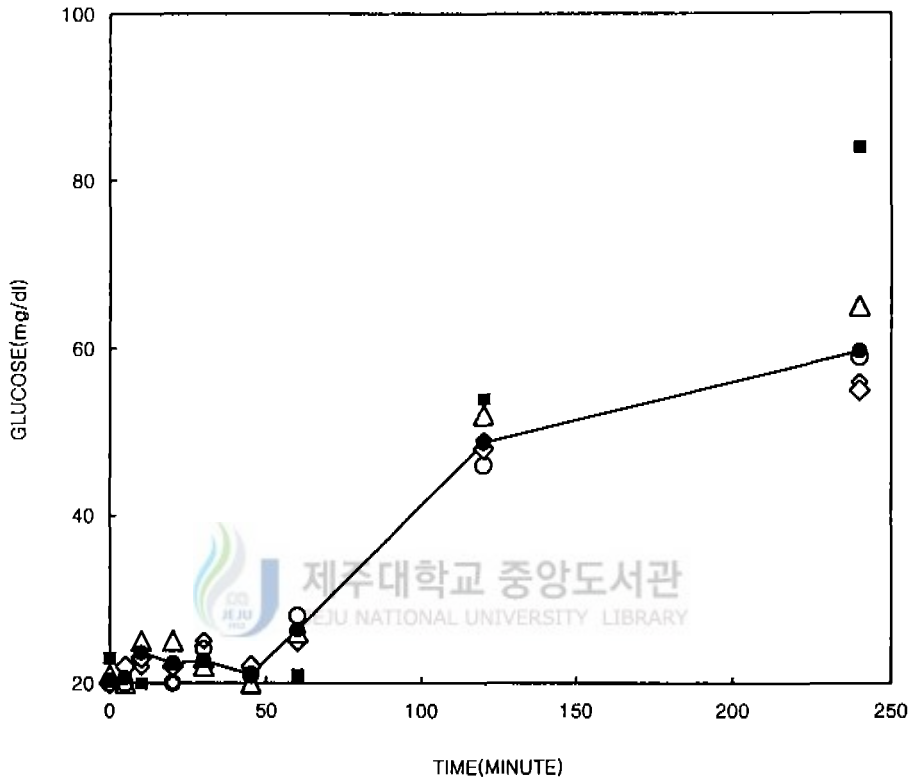


Fig. 5-19. Changes in blood glucose level of sevenband grouper by emission of 350Hz pure tone during the time of 240 minutes. 5 fishes checked per each time.

### 3) 고찰

스트레스 반응시 대사반응을 일으키는 직접적인 원인에 대해 石岡(1984)은 (1) Stressor에 의한 생체조직의 직접적 장애, (2) 자율신경계나 내분비계의 반응에 따른 중계된 비특이적 공동반응, (3) (1)이나 (2)의 결과 일어나는 혈류 정체에 의한 이차적 기능저하가 일어나고, 스트레스를 받을 때의 대사변화는 이들 직접적 원인이 복잡하게 얽혀 있으며, 스트레스는 원인의 종류에 관계없이 특이적이지 않으며, 그 이유는 모든 원인이 시상하부의 흥분을 일으키고, 교감신경을 자극해서 부신피질로부터 아드레날린을 분비시키며(교감신경계-부신피질계), 동시에 부신피질 자극호르몬(ACTH) 방출인자의 분비를 촉진시켜 ACTH의 분비를 촉진시키고, 그 결과 부신피질 호르몬(코르티솔 등)의 분비를 증가시키기 때문이라고 보고하고 있다.

또한 혈당의 상승은 아드레날린의 해당 촉진작용에 의한 것이기 때문에 빠른 상승을 특징으로 하고 있으며, 어류는 스트레스 인자들에 의하여 자극을 받아 혈장 화학성분에도 많은 변화가 일어나게 되는데, 그 중에서 가장 현저한 변화는 혈당 농도의 증가이고 이 현상은 적어도 6~24시간 지속된다고 알려져 있다(Wedemeyer, 1972 ; Larsen, 1976 ; Perrier et al, 1978 ; Robertson et al., 1987 ; Morales et al., 1990).

이 실험결과에서도 순음 방성 전에 측정된 비교군의 혈당량은  $20.33 \pm 0.557 \text{mg/dL}$ 을 나타내었으며, 45분 경과 할 때까지는 별 차이가 없었으나, 60분, 120분으로 경과시간이 길어질수록 혈당량은 급속히 증가하고, 이후 그 증가 속도가 둔감해지는 경향을 보였다.

따라서 측정주파수 350Hz의 순음을 음향순치 어장에 학습음으로 적용시키고자 할 때 스트레스 자극으로서의 역할을 하기 위한 최소한의 시각인 자극역시(Presentation time)는 혈당농도가 급상승하는 60분~120분 사이로 추정된다.

이와 같은 혈당 농도의 급격한 증가는 스트레스 반응시 나타나는 전형적인 2차적인 생리반응으로서(Hatting, 1976), 혈액 중에 혈당의 주 공급원인 간에서의 Glycogen 고

갈과 밀접한 관련이 있다.

초기 120분까지, 혈당의 신속한 증가는 스트레스 반응에 의해 증가된 혈중 Catecholamine 에 의해 간에 저장된 Glycogen 이 Glucose 로 분해되는 과정 때문이고(Brown et al., 1975 ; Mazeaud et al., 1977), 그 이후 지속되는 것은 Glucocorticoid 에 의한 Gluconeogenesis 때문이라고 알려져 있다(Robertson et al., 1987).

이러한 결과를 종합하면 측정주파수 350Hz의 학습음을 능성어 음향순치 어장에 적용할 때 1시간 이상 연속해서 자극음을 방성할 경우 어류에게는 스트레스 자극원이 될 수 있음을 알 수 있다.

이 연구에서는 혈당 분석과 함께 아드레날린의 분석도 수행하고자 하였으나 실험에 사용된 능성어의 어체가 작아 아드레날린 분석에 필요한 4ml 이상의 혈액이 채혈되지 않아 본 실험에서는 분석하지 못하였다.

많은 연구자들의 연구결과에 따르면 아드레날린과 혈당은 모두 내분비 계통의 효소이며, 아드레날린이 당의 물질교대에도 관여하여 혈액중의 당량을 증가시키는 물질이므로 혈당량과 비슷한 결과를 나타낸다고 보고하고 있으나 추후 보완 실험이 필요하며, 이와 함께 학습음의 세기를 달리하는 실험을 실시하여 자극의 세기와 작용시간 사이의 관계, 즉 자극량의 법칙을 구명할 필요가 있는 것으로 판단된다.

## VI. 종합고찰

능성어는 경골어류(Osteichthyes) 진구아강(Teleostomi) 농어목(Perciformes) 바리과(Serranidae)에 속하는 온대성 어종으로써 우리나라 남해안 특히 제주도 연안과 일본 중부이남, 동중국해, 인도양 등에 분포하며, 수심이 약간 깊은 곳을 좋아하는 저서성 어류로, 수심 5~60m 되는 해조류가 많은 암초바닥에 주로 서식하고, 연안 정착성 어류로서 큰 이동은 하지 않으며, 형태적으로 몸 빛깔이 자색을 띤 연한 회갈색으로 옆구리에는 7줄의 흑갈색 가로띠가 있다.

능성어는 연근해 어업에서 어획량 및 어획 금액 측면에서 그다지 중요한 어종은 아니지만, 횡감으로 선호도가 높고, 어가가 고가여서 경제성이 충분히 있는 어종이며, 월별 어획량은 5월을 기점으로 10월까지 어획량이 증가하는 현상을 나타내고 있다. 이러한 결과는 문 등(1997)에 의한 능성어류의 사육실험에서도 5월 이전의 월동기간 내에는 섭이량이 감소하고 체중이 감소하고 5월 이후 왕성한 섭이 증가 현상을 나타내었다는 보고와 같이 수온이 상승하는 시기인 5월을 기점으로 능성어의 왕성한 식욕에 따른 색이 행동량의 증가가 어획량의 증가와 일치하여 나타나는 현상이라고 판단된다.

이러한 능성어를 해양목장에 활용하기 위해서는 미리 생리 생태와 관련된 각종 환경인자에 대해 검토해보는 것이 필요하다. 따라서 능성어를 해양목장에 적용시킬 때 필요한 환경 인자별 중요도를 검토한 결과, 능성어는 수온이 약 5℃ 일 때 빈사 상태에 접어들고, 약 10℃의 수온에서는 먹이를 거의 먹지 않으며, 약 15℃가 되면 성장이 둔화되는 경향을 보인다고 보고하고 있다(문 1997). 그러나 제주도 주변 수역의 30년 평균 수온을 살펴보면 수온이 10℃ 이하로 내려가는 경우가 거의 없기 때문에 능성어는 월동도 가능하여 해양목장 산업 대상어류로 선택될 수 있다고 판단된다.

또한, 능성어는 광의 양이 적으면 채색이 검게 변화되지만, 다시 광을 주면 원래의 채색으로 돌아온다. 이것은 저층 암반대에 생활하는 능성어의 서식층과 관련하여 광은 능성어의 생활사에 그다지 영향을 주지 못하며, 이와함께 저질 및 해저지형은 능성어 생태 습성과 관련이 있어서 하여 매우 중요한 요인으로 작용되며 이들 결과로부터 능성어는 음향순치 어장의 대상어류로 적절하다고 판단된다.

어류는 육상 고등동물과 같이 외이나 중이는 없고 내이(inner ear)만 있고, 내이는 크게 나누어 상부의 반규관과 하부의 이석기관으로 나눌 수 있으며(落合, 1996), 이 실험에 사용된 능성어의 이석을 채취하여 현미경으로 촬영 분석한 결과 이석의 중간 부분에 나이테와 같은 하나의 연륜을 가지고 있어 생후 1년이 넘지 않은 것으로 판단된다.

또한, 이 연구에서는 청각문턱치를 구하기 위해 심전도계를 사용하여 실험하였으며 그 결과 능성어의 평상시 심전도 파형은 심박수가 분당 95회, RR간격은 0.63초로 難波 등(1973)에 의해 조사된 연어, 송어의 심박수 및 RR 간격과 비슷한 경향을 나타내고 있었으나, 참돔이나 전갱이보다는 낮은 수치를 나타내고 있었다. 또한 PQ, QRS, QT 값도 연어, 송어와 유사한 형태로 나타났다. 그러나 전기 자극 및 음향자극을 한 경우 능성어의 심박수는 급격하게 감소되어, 티라피아의 심박수 분당 55회 및 RR 간격 1.09초와 비슷한 값을 나타내었다. 이와 동시에 심전도 파형과 PQ, QRS, QT의 값들도 티라피아와 유사한 진폭을 가지고 있는 것으로 나타났다.

이와 함께 자연상태에서 능성어의 청각문턱치는 각 측정 주파수에서 송어류, 방어, 참돔과 흑송뱅이 등 대다수 어류와 거의 비슷하게 음압 80~120dB(re 1 $\mu$ Pa)의 범위에 있었다.

또한, 능성어의 주파수별 청각문턱치 값의 변동 추이도 대부분의 어류와 유사한 형태로 변동하고 있었으며, 시마연어의 청각문턱치가 측정주파수 200Hz와 700Hz에서 청각감도가 좋은 W자형의 청각문턱치를 나타내는 것과는 달리 능성어의 주파수 변화에 따른 청각문턱치는 측정주파수 350Hz일 때 음압 94.8dB을 기준으로 하

여 그 보다 주파수가 작아지거나 커질 때 청각 감도가 나빠지는 V자형의 청각문턱 차곡선을 나타내었고, 백색소음 방성시 능성어의 청각문턱치는 음압 101.8~129.8dB의 범위였으며, 측정주파수 300Hz에서 음압 101.8dB로 가장 민감한 청각 감도를 보여주고 있고, 측정주파수 800Hz에서 음압 129.8dB을 각각 나타내었다. 이 결과는 능성어의 주파수별 청각문턱치가 일반적인 어류의 범주에 속한다고 판단되는 증거라 할 수 있다.

이와 동시에 편차가 큰 여러 어종 사이의 청각능력을 비교하기 위해 Schellart and Popper(1992)에 의해 제안된 청각능력지수를 구해본 결과도 마찬가지로 대부분의 어류와 비슷한 값을 나타내고 있었다. 따라서 능성어의 청각능력은 일반 어류와 비슷한 것으로 판단된다.

능성어의 음향학습 실험을 실시하기 전 관찰된 생활 습성은 실험수조 내의 양쪽 가장자리 저층 부분에 집중적으로 출현하는 경향을 나타내었으며, 이러한 행동은 문 등(1997)에 의한 실험과 같은 결과를 나타내고 있다. 따라서 능성어의 평상시 어군행동은 Breder(1965)가 언급한 고독한 어류(Solitary)에 속하는 것으로 판단되며, 또한 어군 각 개체의 머리 방향도 각양각색으로 어군 전체의 움직임에 지향성이 전혀 나타나지 않았다. 이것은 능성어가 암초 주변에서 서식함으로써 영역성을 가지고 있으며, 성질이 난폭하며, 서로 공격하는 행동을 보이는 것으로 알려져 있어 이러한 생태 습성과 관련이 있는 것으로 판단된다.

해양목장에 음향순치 어장을 적용시키기 위해서는 어류가 어느 기간동안 학습음을 기억하고 있는지에 대해 검토해야 한다. 이 실험에 사용한 능성어는 음향학습 실험 종료후 20일이 경과한 후에도 학습음을 잘 기억하고 있는 것으로 판단되었다. 그러나 여러 연구자에 의해 해양목장의 주요 대상 어종의 하나인 참돔, 도미, 썸뱅이 및 넙치의 학습음의 기억 지속기간은 4개월 내외라고 밝혀지고 있어, 추후 보완 실험을 통해 최대 기억기간을 산출해볼 필요가 있다.

인간의 보다 나은 생활을 영위하기 위하여 음악을 감상하는 것뿐만이 아니라 지능개발을 위하여 음악을 이용한다던가, 질병 치료에까지 이용하는 등 여러 분야에 음향을 이용하려는 다양한 시도가 이루어지고 있다.

따라서, 이 논문에서는 능성어를 사육할 때 학습음의 방성에 따른 어류에 미치는 영향을 알아보기 위해 비교사육군과 음향사육군으로 나누어 일별 체장 및 체중변화를 조사해 보았으며, 그 결과 음향사육군의 생육이 우수하다고 판단되었다. 이러한 결과는 어류 사육시 음향 방성으로 인한 심리적 안정감을 가지며, 다른 환경요인을 음향이 Masking하는 효과가 나타나기 때문이라고 여겨진다. 그러나 이 실험에서는 실험 개체수가 적고, 단기간의 실험이었으며, 비교 사육군과 음향 사육군을 각 1개의 그룹을 대상으로 실험하였기 때문에 확정적인 결론을 내리기에는 성급하다고 판단된다.

음향학습을 이용한 해양목장은 어류를 다른 곳으로 이동하지 못하게 하는 자극 원으로서 음향을 사용하지만 역으로 자극음이 스트레스의 원인이 될 수도 있을 것이라 판단된다. 따라서 학습음에 대한 스트레스 여부를 판단하기 위하여, 스트레스 판별 인자 중 스트레스 자극을 받아 가장 현저하게 변화하고, 쉽게 판독할 수 있는 혈당 농도를 측정하여 보았다.

이 실험결과에서도 학습음 방성에 따라 혈당농도가 60분 이후에 급속히 증가하는 현상을 나타내었으며, 이와 같은 혈당 농도의 증가는 스트레스 반응시 나타나는 전형적인 2차적인 생리반응으로서(Hatting, 1976), 혈액 중에 혈당의 주 공급원인 간에서의 Glycogen 고갈과 밀접한 관련이 있다.

따라서 이 연구와 같이 주파수 350Hz 순음을 학습음으로 사용하여 음향순치 어장을 조성할 때 연속해서 1시간 이상 자극음을 방성할 경우 어류에게는 스트레스 자극원이 될 수 있음을 알 수 있었다.

이상에서 살펴본 바와 같이 능성어를 해양목장에 적용시키기 위해서는 이 실험에서 밝혀낸 환경인자 이외에 경제성, 회유, 능성어가 갖는 영역성 등의 인자에 대



한 정밀 검토가 필요하며, 청각문턱치 실험에서도 상승계열법을 택하여 실험하였으나, 하강계열법에 의한 청각문턱치의 산출이 표준편차가 적으며, 체장과 청각문턱치의 상관관계는 나타나지 않는다고 안 등(1998)이 보고하고 있으나, 체장의 변화에 따라 내이의 크기 및 부레의 크기가 달라져, 그 진동 폭이 달라짐으로써 청각능력이 충분히 달라질 수 있다고 판단되므로 능성어의 체장별, 내이의 크기별 청각문턱치를 산출하여 비교해 봄으로써 내이의 크기와 각 주파수별 청각문턱치와의 상관관계를 산출해 보는 실험을 추후 실시해볼 필요가 있다.

측정 주파수 350Hz의 순음을 이용하여 능성어 음향학습 실험을 실시한 이 실험의 결과, 학습실험 5일 후부터 음향 학습 효과가 명백히 나타났지만 사용 학습음의 주파수 변화 및 음압 변화에 따른 순치 소요 기간 변동 등에 대한 자료도 금후 얻어져야 할 것으로 생각한다.

또한 금후 보완실험을 통하여 4개월 이상 학습음을 기억하는지 여부와 최대한 정도의 기간동안 학습음을 기억하는지에 대한 검증은 실시할 필요가 있으며, 또한 심전도를 이용하는 방법에 의해 학습음 기억여부에 대한 실험도 병행해 보는 것이 바람직 하다고 판단된다.

이 연구에서는 음향 사육군과 비교 사육군의 건강 상태 및 육질 등의 비교 분석은 실험 여건상 실시하지 못하였으나, 스트레스에 의한 육질의 변화에 대해 언급한 여러 보고가 있으므로 추후 보완실험을 통하여 육질비교, 건강상태의 비교 등 보다 정밀한 보완실험을 실시하는 것도 필요하다. 이와 동시에 이 실험 결과 나타난 혈당 변동과 함께 아드레날린의 분석도 수행하고자 하였으나 실험에 사용된 능성어의 어체가 작아 아드레날린 분석에 필요한 4ml 이상의 혈액이 채혈되지 않아, 본 실험에서는 분석하지 못하였다.

많은 연구자들의 연구결과에 따르면 아드레날린과 혈당은 모두 내분비 계통의 효소이며, 아드레날린이 당의 물질교대에도 관여하여 혈액중의 당량을 증가시키는 물질이므로 혈당량과 비슷한 결과를 나타낸다고 보고되고 있으나, 추후 보완 실험

이 필요하다고 생각되며, 보다 정밀한 분석을 위해서는 아드레날린 뿐만 아니라 호르몬 계통의 분석도 필요하다고 생각된다.

이와 함께 능성어에 부여하는 학습음의 세기를 달리하는 실험을 실시하여 음향 자극의 세기와 작용 시간 사이의 관계, 즉 자극량의 법칙도 구명할 필요가 있는 것으로 판단된다.



## VII. 요 약

이 논문에서는 능성어의 음향 순치어장 적용은 물론 일반 어선어업에 능성어의 청각능력을 적용시킬 수 있는 기초자료를 얻기 위하여 극한법에 의한 자극 투여방법 중 상승계열법에 의해 측정주파수 100Hz에서 1000Hz 사이의 학습음과 6V 직류전압의 전기자극을 주고, 능성어의 학습음에 대한 반응은 쌍극 유도법에 의해 도출된 ECG(심전도) 간격에 의해 실험어의 반응을 관찰하면서 청각문턱치, 청각임계비 및 청각능력 지수를 조사하였다.

또한 어류의 조건반사를 어업에 응용하기 위한 하나의 시도로서 음향과 사료에 의한 음향 학습실험과 함께 능성어를 실내수조에서 사육할 때 음향을 이용할 경우 어류의 체장 및 체중에 미치는 영향과 능성어를 음향 학습어장에 적용시킬 때 학습음 투여시간에 따른 스트레스 반응 여부 및 적정 음 방성시간 등에 대해 조사하였다.

그 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 측정 주파수 12종의 순음 사용시 능성어의 청각문턱치는 측정 주파수 100Hz, 200Hz, 250Hz, 300Hz, 350Hz, 400Hz, 500Hz, 600Hz, 700Hz, 800Hz, 900Hz, 1000Hz에서 음압은 각각 102.1dB, 97.5dB, 96.6dB, 95.5dB, 94.8dB, 97.2dB, 100.2dB, 102.1dB, 107.8dB, 112.2dB, 114.4dB, 116.8dB(re 1  $\mu$ Pa)로 각각 나타나 대부분의 어류와 유사한 변동추이를 나타내었으며, 측정주파수 350Hz에서 음압 94.8dB로 가장 낮은 청각 문턱치 값을 나타내는 V자형의 청각문턱치 곡선을 보였다.
- 2) 백색소음과 청각문턱치로써 산출하는 청각임계비는 100Hz, 200Hz, 250Hz, 300Hz, 350Hz, 400Hz, 500Hz, 600Hz, 700Hz, 800Hz에서 각각 음압 15.6dB, 25.8dB, 28.0dB, 33.5dB, 34.2dB, 39.1dB, 47.2dB, 53.9dB, 60.7dB, 68.4dB로 나타나 측정주파수가 증가하면서 음압도 증가하는 것으로 나타났다.

- 3) 어류의 청각능력을 나타내는 청각능력지수는 자연상태에서 52.7, 백색소음 방성시 15.6으로 각각 나타나, 능성어는 무지개 송어의 32와 대서양 연어의 26과 비슷한 것으로 나타났다.
- 4) 평상시 능성어의 가두리내 위치별 출현율은 실험 가두리의 중간지점으로 갈수록 낮게 나타났으며, 양쪽 가장자리 부근에 집중적으로 출현하는 경향을 나타내었고, 유행 행동은 거의 보이지 않고, 군집성도 약한 것으로 나타났다.
- 5) 평상시 능성어의 출현율은 A 구역(급이기가 설치된 스피커쪽)과 C 구역(반대편 가두리 끝단)에서 높았으며, B 구역(중간부분)에는 20% 내외 였다.
- 6) 음향 방성 직후 능성어는 음향학습 실험을 시작한 후 4일까지는 학습음 방성 후 B, C 구역(스피커에서 떨어지는 지점)으로 자극을 피하여 이동하는 현상을 나타내었다.
- 7) 음향학습 실험을 시작하여 5일 경과 후부터 학습음 방성시 A 구역에 군집율은 80%대를, 방성 전과 방성 후에는 50%대를 꾸준히 유지하고 있어 학습음 방성에 의한 능성어 학습은 충분히 달성되었다고 판단된다.
- 8) 능성어는 음향학습 종료후 20일이 경과한 후에도 학습음 방성과 동시에 A구역에 60~70% 내외의 월등히 많은 실험어가 출현여 음향학습 효과가 충분히 유지되고 있다고 판단된다.
- 9) 학습음 방성시 150Hz~380Hz의 주파수대에서는 주위잡음보다 음압이 10~40dB 정도 높게 나타나 모차르트 학습음의 중심주파수는 150~380Hz 임을 알 수 있었으며, 능성어의 청각감도가 좋은 주파수 대역인 100~500Hz의 범위 내에 포함되어 자극원로서의 역할이 충분하다고 판단된다.

- 10) 능성어의 체장은 학습음을 방성하지 않은 비교 사육군과 음향 사육군이 실험 시작 시점에서 비교 사육군이 약 10mm 정도 더 큰 것으로 나타났으나, 실험 개시 후 57 일째 되는 시점부터 음향 사육군과 비교 사육군의 체장은 서로 역전되어 음향 사육군의 개체 크기가 비교 사육군 보다 더 크게 나타났다.
- 11) 능성어의 체중 변화는 음향사육군과 비교사육군이 실험 시작 시점에서 비교 사육군이 약 20g 정도 더 큰 것으로 나타났으나 실험 개시 후, 57일째부터 음향 사육군의 개체 크기가 비교 사육군 보다 더 크게 나타났다.
- 12) 스트레스 측정을 위해 학습음 방성전 측정된 비교군의 혈당량은  $20.33 \pm 0.557 \text{mg/dl}$ 로 나타났다.
- 13) 학습음 방성에 따른 혈당량의 변화는 45분이 경과할 때까지 20~24mg/dl로 거의 변화가 없었다.
- 14) 학습음 방성후 60분부터 120분까지 혈당량은  $26.33 \pm 1.528 \text{mg/dl}$ 에서  $48.67 \pm 3.055 \text{mg/dl}$ 으로 급속히 증가하고, 240분 경과후에는  $59.67 \pm 5.033 \text{mg/dl}$ 을 나타내었다.
- 15) 측정주파수 350Hz의 학습음을 음향학습 어장에 학습음으로 적용시키고자 할 때 자극역시(Presentation time)는 60분~120분 사이로 나타나 연속해서 1시간 이상 학습음을 방성하면 어류에게는 스트레스 자극원이 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- Allen J. M., J. H. S. Blaxter and E. J. Denton, 1976. The functional anatomy and development of the swimbladder-inner ear-lateral line system in herring and sprat. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, 56, 471~486.
- 안장영 · 이창현 · 김용주 · 박용석, 1998. 연안 정치망 주요 대상어종의 유집방음에 대한 행동반응(I) - 방어의 청각역치-, *어업기술학회지*, 34(4). 386~392.
- 有元貴文, 難波憲二, 1996. 魚の行動心理學と漁法, 恒星社厚生閣, 74~106.
- Ball, J. N. and Cowan, P. N, 1959. Urethane as a carcinogen and as a anaesthetic for fishes. *Nature(London)* 184(Suppleent 6). 370
- Breder, C. M. Jr, 1965. Studies on social groupings in fishes. *Bull. Amer. Mus. Nat. Hist.* 117(6), 397~481.
- Brown, D., Fleming, N. and Ball, M, 1975. Hormonal control of gulcose production by Amphiuma means liver in organ culture. *Gen. Comp. Endocrinol.* 27, 380~388.
- Buerkle U., 1969. Auditory masking and the critical band in atlantic cod, *J. Fish. Res. Bd. Canada*, 26, 1113~1119.
- Chapman C. J. and O. Sand, 1974. Field studies of hearing in two species of flatfish, *Pleuronectes platessa (L.)* and *Limanda limanda(L.)*
- Chapman C. J. and A. D. Hawkins, 1973. A Field studies of hearing in the cod. *J. Como. Physiol.*, 85, 147~167.
- Campbell Don G.. 1994. The effect of Mozart -Tapping the power of music to heal the body, mind, and unlock the creative spirit, New York, Avon books Ltd.

- Fay. R. R., 1989, Intensity discrimination of pulsed tones by the gold fish, J. Acoustic. Soc. Am, 85, 500~502.
- 古野鎮夫, 1964. 魚類の聴覺と音環境に関する研究 I -水中騒音の周波數分析-,
- Harris G. G. and W. A. van Bergeijk, 1962. Evidence that the lateral-line organ responds to near-field displacements of sound sources in water. J. Acoust. Soc. Am., 34, 1831~1841.
- Hasimoto T., Y. Maniwa, 1963. Frequency analysis of marine sound. Modern fishing gear of the world II, Fishing News Ltd., 410~412.
- Hatakeyama Y. 1989. Masking effect on the hearing of red seabream, *Pagrus major*, by ambient noise, J. Aq. Fish. Technol., 1, 271~277.
- 島山良己, 1992. 水中音に對する魚の聴覺能力, Fisheries engineering. Vol 28(2), 111~119.
- 幡谷雅之・大西慶一・大須賀穂作, 1989. カサゴおよびヒラメの音響馴致について. 静岡水産試験場研究報告. 24.
- Hatting, J., 1976. Blood sugar as an indicator of stress in the freshwater fish. *Lab. capensis*(Smith). J. Fish Biol. 10 : 19~195.
- Hawkins A.D. and A. D. F. Johnstone, 1978. The hearing of atlantic salmon, *Salmo salar*. J. Fish. Biol., 13, 655~673.
- 藤谷 超・坂口清次・福原 修, 1973. マダイ種苗の音響馴致のための研究. 淺海域における増養殖の開発に関する綜合研究報告, 3, 251~265. 1973.
- 本松敬一郎, 1997. クロソイの聴覺閾値とマスキング. 日水誌, 64, 110~111.
- 이창헌, 박용석, 문종욱, 김석중, 안장영, 서두욱, 1999. 수중 가청음에 의한 쏜뱅이의 청각능력- I. 청각문턱치, 어업기술학회지, 35(2), 156~160.
- 井上喜洋, 1975. 音によるタイの學習實驗. 相模灣支所報告. 7. 17~19.
- 石岡宏子, 1984. マダイのストレス反應に関する生理化學的研究. 南西水研報. 17, 1~133.

- Ishioka, H. , H. Yoshimi, and S. Sakaguchi, 1988. The hearing ability of the red sea bream, *Pagrus major*, Nippon suisan Gakkaishi, 54, 947~951.
- 伊藤 博・本田和民, 1973. 音響器機による魚群誘導試験. 水中音響應用研究會, 2. 10~20.
- 今泉圭之輔. 1975. 灣・入江を利用したマダイ放流種苗の保護育成に関する研究. 栽培漁業. 4(2), 37~55.
- JerkØ, H., I. Turunen, P. S. Enger and O. Sand, 1989, Hearing in the eel(*Anguilla anguilla*). J. Comp. Physiol. A., 165, 455~459.
- 정준기・정순윤・이태웅・최동립, 1994. Lidocaine이 잉어(*Cyprinus carpio*)의 혈액 성상에 미치는 영향, J. Fish Pathol. 7(1), 53~62.
- 金炯默, 1993. 심전도 판독법, 고려의학, 1~42.
- 김상한, 1978. 몇가지 어류 및 갑각류의 발음과 주음성에 관한 연구, 어업기술, 18(2), 71~75.
- Krizler H. and L. Wood, 1961. Provisional audiogram for the shark. *Carcharhinus leucas*. Science, 133, 1480~1482.
- Kojima, T., T. Shimamura, K. Yoza, N. Okumoto, Y. Hatakeyama and H. Soeda, 1992. W-shaped auditory threshold curves of masu salmon, *Oncorhynchus masou*. Nippon suisan gakkaishi, 58(8), 1447~1452.
- 국립수산진흥원, 1994. 한국 연근해 유용 어류도감. 135.
- Lasen, L. O., 1976. Blood glucose level in intact and hypophy sectomized river lampreys(*Lampetra fluviatilis* L.) treated with insulin. "stress" or glucose, before and during the period of sexual maturation. Gen. Comp. Endocrinol. 29 : 1~13.
- 이병기, 1981. 어법학원론, 태화출판사. 134~152.



- Mazeaud, M. M., Mazeaud, F. and Donaldson, E. M., 1977. Stress resulting from handling in fish : primary and secondary effects. *Trans. Am. Fish. Soc.* 106 : 210~212.
- 문태석, 1994. 능성어류 종묘생산과 양식기술. 월간 수산양식, 90~96.
- 문태석·최혜승·박승렬, 1997. 능성어류 양식기술 개발에 관한 연구. 수진연보 53. 6 5~71.
- 難波憲二·村地四郎·河本眞二·中野義久, 1973. 魚類の心電圖に關する研究 - I. 心電圖導出方法の檢討. *J. Fac. Fish. Anim. Husb. Hiroshima Univ.*, 12. 147~154.
- 농림수산부, 1974~1996. 농수산통계연보. 어업생산량 통계.
- 落合 明, 1996. 魚類解剖學. 綠書房, 297~299.
- 大分縣漁業公社, 1979. 淺海域における増養殖漁場の開發に關する綜合研究. 研究成果集, 116, 119~127.
- 大分縣水産試驗場, 1985. 大分縣における海洋牧場の造成について. 大分縣水試調年報, 53(6), 967~973.
- Olsen K. 1976. Evidence for localization of sound by fish in schools. in "sound reception in fish"(E. Shuijf and A. D. Hawkins, eds.) Elsevier, Oxford, New York, 267~270.
- 岡本峰雄, 1982. マダイ音響馴致漁場における中心とした數種の魚群行動について. 日本水産學會誌, 48(8), 713~1119.
- 岡本峰雄, 1983. マダイ音響馴致漁場における魚群の行動について. 日本水産學會, 50(2), 211~217.
- 朴容石, 1995. 音響によるスケトウダラの行動制御に關する基礎的研究, 博士學位論文, 55~90.
- Popper A. N., 1972. Pure-tone auditory threshold for the carp. *J. Acoust. Soc. Am.*, 52, 1714~1717.

- Robertson, L., Thomas, P., Arnold, C. R. and Traut, J. M., 1987. Plasma cortisol and secondary stress response of red drum to handling, transport, rearing density and a disease outbreak. *Prog. Fish-cult.* 49 , 1~12.
- Roser F. H. & Goden L. shaw. 1994. America Psychological Society.
- Schellart N.A.M and A. N. Popper, 1992. Functional aspects of the evolution of auditory system of actinopterygian fish, In the evolutionary biology of hearing (d. B. webster, R. R. Fay and A. N. Popper eds.). Springer-verlag, Tokyo, New York, 295~322
- Schoettger, R. A., Walker, C. R. Marking, L. L. and Julin, A. M., 1967. MS 222 as an anaesthetic for channek catfish : it's toxicity efficacy and muscle residues. United states Fish and Wildlife Service Investigations in Fish control 17. 1967.
- 서두옥 · 川野兼治, 1989. 수중음에 대한 고등어 어군의 반응. *어업기술*, 25(1). 12~17.
- 수산청, 1994. 조피볼락 배합사료 개발. 수산청 특정연구과제사업보고서, 56~61.
- 添田秀男, 畠山良己, 川村軍藏, 1998. 魚類の聽覺生理. 恒星社 厚生閣, 119~121.
- Smit, G. L., Hattingh, J. and Burger, A. P., 1979. Hematological assessment of the effects of the anaesthetic MS 222 in natural and neutralized form in three freshwater species : intraspecies differences. *Journal of Fish Biology* 15 : 645~653.
- Tavoga W. N. and J. Wodinsky, 1963. Auditory capacities in fishes. Pure tone thresholds in nine species of marine teleosts. *Bull. Am. Mus. Nat. Hist.*, 126, 177~240.
- Wedemmer, G. A., 1972. Some physiological consequences of handling stree in juvenile Coho(*Salmo gaird neri*). *J. Fish Res. Bd. Can.* 29 : 1780~1783.

Weiss B. A., W. F. Strother and G. M. Harting, 1969. Auditory sensitivity in the bullhead catfish. Proc. Natl. Acad. Sci. USA., 64, 552~556.

山川正巳, 1997. ニジマス聴覚特性, ミニシンポジウム 魚類聴覚特性-内耳と側線- 日本水産学会誌, 63, 108~109.

山下金義, 1982. マダイ前期仔魚の体表に見出された感覚突起 Cupula. 魚學誌. 29, 279~284.



## 감사의 글

기나긴 기다림 끝에 영글은 결실이기에 더욱 감사하는 마음을 가지게 됩니다. 이 조그마한 결실은 결코 저 혼자만의 힘으로는 불가능하였으며 도와주신 모든 분들 덕택이라는 것을 잘 알고 있기에 이 글로 감사의 마음을 전합니다.

이 논문은 부족함이 많은 저를 따뜻한 조언과 아낌없는 충고로 이끌어주신 서두옥 교수님의 큰 가르침의 결과였기에 이 자리를 빌어 머리 숙여 깊은 감사를 드립니다.

논리적이지 못한 문장들을 마다 읽고 세세히 읽으시고 정성스럽게 다듬어주신 박정식 교수님, 먼길을 마다 않고 달려오셔서 격려해주시고 심사해주신 김진건 교수님, 자상함과 세심한 배려로 체계적으로 다듬어 주신 안장영 교수님, 바쁘신 가운데서도 열성을 다해 도와주신 김석종 교수님께 깊은 감사를 드리며, 학위과정 중 끊임없는 지도와 격려를 아끼지 않으신 정공훈 교수님, 노홍길 교수님, 안영화 교수님께도 감사를 드립니다.

이 논문이 완성되기까지 파중한 업무속에서도 아낌없는 배려를 해주시고 물심양면으로 도와주신 정의철 과장님, 안희춘 연구관님, 김재오 연구관님, 김창길 연구관님, 교정을 위해 애써 주신 문대연 연구관님과 조삼광 연구사, 그리고 바쁜 가운데서도 업무를 덜어주기 위해 애써주신 박성욱 연구사, 김호상 연구사, 김태호 연구사, 박창두 박사, 배봉성 연구사, 김성태 연구사 등 여러 선·후배님들의 도움이 있어, 오늘의 이 결실이 있기에 깊은 감사를 드립니다.

본 연구과정에서 큰 격려를 아끼지 않으신 이장욱 원장님, 박차수 부장님께도 감사를 드립니다. 또한 힘든 일을 마다 않고 자기 일처럼 밤을 세워가며 실험과정과 자료 정리를 성심껏 도와준 어구공학 실험실의 이창현, 문종욱, 김고환, 안태협, 양준원 후배님께도 감사를 드립니다.

끝으로 오늘이 있기까지 항상 당신들의 정성과 헌신으로 자신의 길을 가게 해주신 부모님과 형제들, 온갖 허물을 덮어주시고 격려해주신 처가의 모든 가족, 그리고 어려움 속에서도 학문에 정진할 수 있도록 보이지 않는 힘이 되었던 아내와 건강하게 잘 자라고 있는 성미, 성지, 성련이에게 이 작은 결실을 드립니다.

