

수중발파 현장에서의 진동추정식에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Ground Vibration Equations by Underwater Blasting at Construction Site

박연수* · 박선준† · 강성후** · 전양배*** · 공강주***

Yeon-Soo Park, Sun-Joon Park, Sung-Hoo Kang, Yang-Bae Jeon and Gang-Joo Gong

(2006년 5월 11일 접수 ; 2006년 6월 26일 심사완료)

Key Words : Underwater Blasting(수중발파), Ground Vibration(지반진동), Hydrospace Noise(수중소음), Aquafarm(양식어장)

ABSTRACT

In this study, quantitative ground vibration values and damping coefficient produced by underwater blasting were measured and analyzed. Also, hydrospace noise in aquafarm and noise in atmosphere as well as ground vibrations were measured, and maximum values of these results were 86.8 dB(A), 147.8 dB(A), 0.244 cm/s, respectively. With these results, vibration influence about snakehead (*channa argus*) and structures were examined, the damage of those was proved that is not. Equations of vibration ($V_{50\%}=1.507SD^{-0.536}$, $V_{95\%}=2.171SD^{-0.536}$) and hydrospace noise ($SL=293.2SD^{-0.164}$) were presented from quantitative experiment results, respectively. The results of the study may be applied for the evaluation of the influence on aquafarm as a basic data before having main underwater blasting at construction sites.

1. 서 론

건설공사의 규모가 점차 대형화되어 가면서 효율적으로 공사를 수행하기 위한 방법으로 발파공법이 널리 사용되고 있으며, 해양구조물을 비롯한 수중에서 이루어지는 구조물 기초공사에서 그 중요성이 커지고 있다. 특히 수중발파(underwater blasting)는 파쇄 대상암석의 일부 혹은 전부가 물로 덮여 있는 경우로써 천공이나 장약 및 배선작업 등이 모두 수중에서 이루어지고, 발파로 인한 진동 및 음압의 전달 메커니즘이 육상발파와는 다른 점이 많다. 수중

발파의 필요성에 의해 발파설계기술의 발전과 그 적용 빈도는 점차 증가되어가고 있지만 수중발파로 인한 진동 및 음압으로 인한 영향을 규명하는 연구는 상당부분 미진한 상태이다. 수중발파는 육상발파에 비해 보다 많은 발파변수를 포함하고 있으며, 이러한 변수들의 역할을 차원해석과 확률해석을 통해 정량화하는 데는 한계가 있다.

이 연구에서는 실제 시공 중인 OO대교 교각 기초공사의 수중발파로 인한 진동치의 크기와 감쇠정도를 계측 및 분석하고, 육상 양식어장 수중에서의 소음, 대기 중의 소음 등의 정량적인 계측자료를 기초로 하여 수중발파 현장 인근에 양식되고 있는 양식어(가물치)에 대한 진동영향을 검토하고자 한다.

† 책임저자; 정회원, 동신대학교 토목공학과

E-mail : parksj@dnu.ac.kr

Tel : (061) 330-3136, Fax : (061) 330-2830

* 정회원, 전남대학교 토목공학과

** 동신대학교 토목공학과

*** 전남대학교 대학원 토목공학과

2. 수중발파

2.1 수중발파의 특징

수중발파는 장약방법에 따라 수중에 폭약을 매어

단 형태로 발파하는 수중현수발파, 수중의 암석이나 구조물 표면에 부착한 상태로 발파하는 수중부착발파, 피파피물 내부에 천공해서 천공부에 폭약을 장약하는 수중천공발파가 있다. 이 연구에서 의미하는 수중발파는 수중천공발파를 의미하며 범위 또한 동일하게 제한된다.

수중발파를 하기위해 수중 천공 발파법을 행하는 경우에 화약류는 지반 내부에서 폭발시키게끔 되어 있기 때문에 폭발에 의해 발생하는 응력파는 먼저 지반 속을 전파해 간다. 이 응력파는 대부분 대상지반의 파쇄에 관여하지만, 일부는 파괴권을 넘어서 에너지는 폭발 지반 내부를 전파해 가고 그 방향에 따라서 지반과 물과의 경계면에 도달하는 것도 있다⁽¹⁾.

이와 같이 지반과 물과의 경계면에 이르는 응력파는 거기서 정해진 법칙에 따라 압력을 수반하면서 일부는 지반내에 반사하여 되돌아가고, 또 다른 일부는 수중에 투과하여 충격파(압력파)가 되어서 수중에 전파해 간다. 수중 천공 발파에 의해 수중에 생기는 충격파 안에 이 같은 경로를 거치면서 전파해가는 충격파를 일반적으로 지반-물 충격파라 한다⁽²⁾.

2.2 양식어류 및 가족에 대한 진동기준

진동 및 소음으로 인한 어류 및 가족의 피해 사례는 빈번히 발생하고 있지만 병리학적인 인과관계가 분명히 밝혀진 것이 없고, 문헌 보고에 따라 인과관계가 있었을 것으로 추정된 사례⁽³⁾가 대부분으로 어

Table 1 Vibration criteria

Class		I	II	III	IV	Reference
Vibration criteria (cm/s, kine)	10 ~ 35 Hz	0.2	0.5	1.0	1.0 ~ 4.0	Physical damage standard
	> 35 Hz	0.3	0.8	1.5	5.0	
Type of structures	<ul style="list-style-type: none"> · Class I : Cultural assert & computer equipment surrounding · Class II : House & Apartment (with small crack) · Class III : House & Apartment (no crack) · Class IV : SRC Building, RC Structure 					

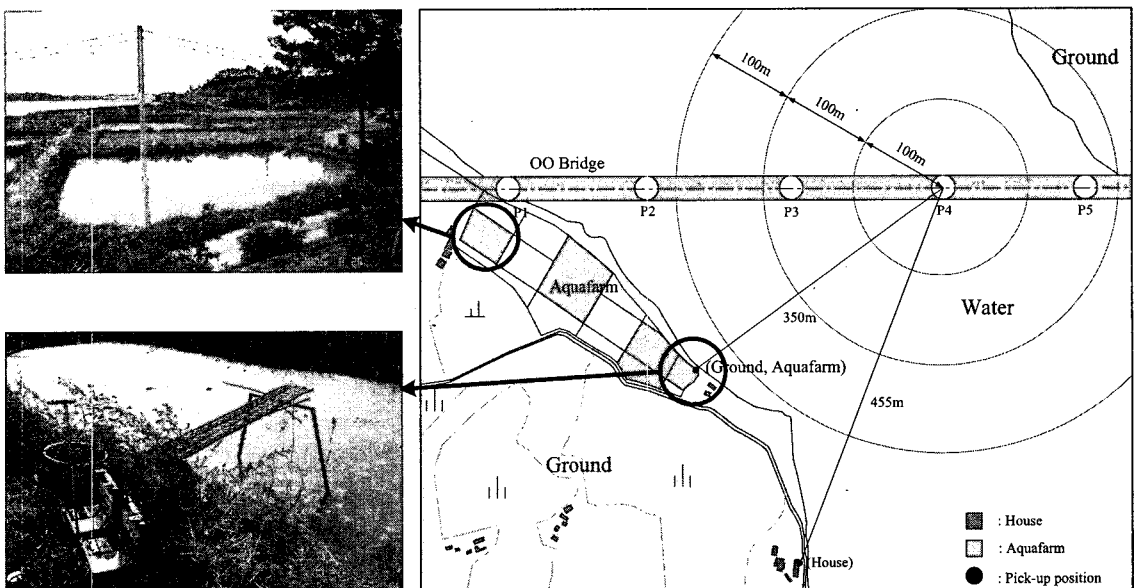


Fig. 1 Site map for underwater blasting construction

는 정도의 진동레벨에 대해 어떤 정도의 피해가 발생한다는 구체적인 사례가 없다. 특히 어류의 피해에 대한 진동·소음 관련연구 수준은 상대적으로 부족한 실정이다.

어류는 특성상 그 종류에 따라 동일한 진동수준에 대해서도 피해발생 정도가 크게 다르고 동일한 어류라 할지라도 계절, 크기, 양식방법 등에 따라 피해발생 정도가 다르게 나타난다. 중앙환경분쟁조정위원회 사례집에 소개된 건설진동·소음으로 인한 양식어류(가물치)의 피해 조정 신청 내용을 살펴보면 굴삭기 진동에 대해서는 인체감지수준인 60 dB미만, 파일항타에 대해서는 소음치 67 dB(A)이하, 진동치 51 dB(V)이하인 경우에도 모두 피해를 부분적으로 인정하도록 중재한 사례를 찾아볼 수 있다⁽⁴⁾. 그러나 이러한 중재내용은 진동·소음치만을 기준으로 본다면 민원인의 피해보상 요구를 너무 적극적으로 수용한 것으로 판단된다.

이에 비해 위와 동일한 기관인 환경부의 중앙환경분쟁조정위원회에서 한국자원연구소에 용역 의뢰하여 “진동으로 인한 피해 인과관계 검토 기준과 피해액 산정방법에 관한 연구”에 의한 보고서에 의하면 가축별(소, 돼지, 개)로 특별한 문제가 없는 면책기준은 진동 70 dB(V), 0.09 cm/s 이하, 소음 70 dB(A)이하로 제시하였다⁽⁵⁾. 진동규준 0.09 cm/s는 한국토지공사 시방기준에서 소, 닭, 돼지 등을 기준으로 제시한 진동규준과 일치하는 값이다⁽⁵⁾. 이외에도 황우석⁽⁶⁾은 진동치 0.05 cm/s ~ 0.1 cm/s를 기준으로 10%의 피해발생 예상이 가능하며, 소음 70 dB(A)를 기준으로 10%의 피해발생 예상이 가능하

다고 제시하고 있다.

2.3 주택 및 구조물에 대한 진동기준

근접구조물(주택 및 시설물)의 물적 피해기준은 발파진동 속도를 기준으로 하며, 농촌지역의 주택 및 시설물은 Class II로 분류할 수 있다. Class II의 경우 탁월진동수(dominant frequency) 성분에 따라 진동규준을 0.5 cm/s 혹은 0.8 cm/s로 규정하고 있다(Table 1 참고)⁽⁵⁾.

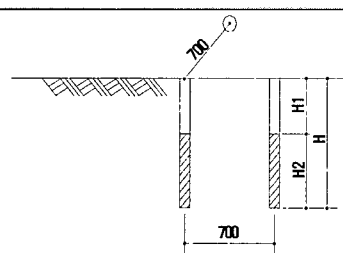
3. 수중발파 현장실험

3.1 수중발파 주변상황 및 발파설계

OO대교의 5개 교각 중 수중발파가 필요한 4개 교각 공사예정 위치 주변에는 양식어류(가물치)와 주택이 위치하고 있다. 조성된 양식어장과 수중발파 위치(교각 2번)와의 최단거리는 142 m, 주택과 최단거리는 200 m 내외이며 수중발파는 5개월 동안 비연속적으로 진행되었다. 교각의 기초 암반 정지를 위한 수중발파 위치와 양식어장, 주택 등과의 이격 및 분포상황은 Fig. 1과 같다.

교각 2, 교각 4, 교각 5번의 기초암반 암중은 유문암질암으로 지표하 심도 0.5 ~ 3.0 m 하부로부터 분포하고 색조는 암회색, 청회색으로 암 상태는 보통강함, 보통풍화의 상태로 조사되었으며, 코아회수율(T.C.R)은 30 ~ 70 %, 암질지수(R.Q.D)는 0 ~ 22 %로 분석되었다. 또한 교각 3번의 기초암반 암중은 응회암질암, 유문암질암으로 지표하 심도 1.5 ~ 6.5 m 하부로부터 분포하고 색조는 황갈색, 회색,

Table 2 General contents for blasting design

Classifications	Descriptions	Blasting section
Powder	Mega-mite (Ø50)	 <p>H1: 1.5 m(Area A)/1.8 m(Area B) H2: 0.8 m(Area A)/1.2 m(Area B) Hole diameter 75 mm</p>
Detonator	Hideto-plus	
Number of Holes	110(Area A) / 140(Area B)	
Charge per delay	3 kgf	
Hole / delay	1	
Delay time(ms)	MS 20 ms, LP 100 ms, 200 ms, 500 ms	

암회색으로 암 상태는 강함~보통강함, 약간풍화~보통풍화 상태를 보였으며 코야회수율(T.C.R)은 80~97%, 암질지수(R.Q.D)는 37~70%로 나타났다.

수중발파로 인해 가장 큰 피해 발생이 우려되었던 가물치 양식을 위한 어장은 눈을 개조하여 만든 것으로 양어장 독은 흙으로 만들어져 있었으며, 양어장 내의 물은 상당히 탁한 상태로 가물치의 유영상태를 직접 확인 할 수는 없었다.

Fig. 2는 발파설계 평면도의 한 예로써 교각 3번의 최초 1회 발파설계 평면도이다. 1자유면을 갖는 A구역과 A구역 발파 후 2자유면을 갖는 B구역으로 구분하여 설계하였다. Table 2에는 사용화약과 뇌관 등 발파설계 일반사항을 정리하였으며 바지선을 이용한 수상천공이 사용되었다(Fig. 3). 수심은 교각 2번부터 5번 까지 각각 14.2m, 17.8m, 24.1m, 23.2m로 계측되었다.

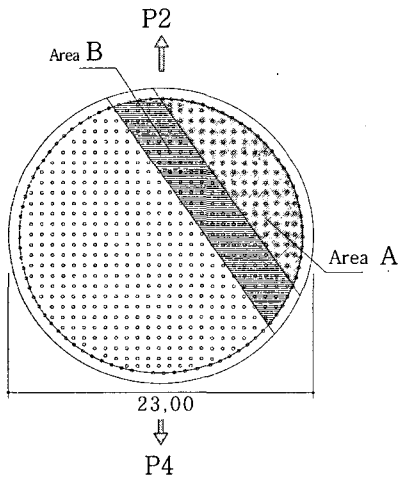


Fig. 2 Plan view for blasting design (pier 3)



Fig. 3 Drilling work using a barge

3.2 진동, 소음, 수중소음 계측

수중발파가 진행되는 동안 발생하는 지반의 진동, 소음, 양식어장내 수중소음을 측정하기 위하여 발파현장에서 널리 사용되는 Blastmate III 혹은 II(InstanTel Co. CANADA)를 최대 5대까지 사용하였다. 계측기 중 1대에는 현가식 Hydro-Phone 센서를 연결하여 수심 1~1.5m인 가물치 양식어장의 수중에 설치해 발파로 인한 수중 소음을 직접 측정할 수 있도록 하였으며, 나머지 계측기에는 geo-phone과 micro-phone을 연결하였다(Fig. 1).

계측은 발파원의 위치에 따라 양식어장 주변과 주택 구조물 위치에서 실시되었다. 발파원 직상부 수면에서부터 계측지점까지의 수평거리는 발파원의 위치에 따라 86m에서부터 최고 455m에 이른다. 계측지점은 양식어장과 가옥의 위치, 진동 pick-up이 원활한 최적의 위치를 선정하였다. 소음은 최소 62.1 dB(A)에서부터 최대 86.8 dB(A)까지 계측되었는데 지반 진동치에 비해 환산거리에 따른 상관성이 부족한 것으로 분석되었다. 특히 수중발파의 경우 소음을 전달시키는 매질로써 수심이 큰 변수로 작용하고 있는 것이 육상발파와 가장 큰 차이점이지만 수심을 발파변수로 고려하지 않은 상태에서 소음치를 분석한데서 오는 편차라 판단된다. 발파원 별로 구분한 계측결과를 Table 3에 정리하였으며 진동치는 3방향 진동성분의 벡터합을 의미하는 PPV(peak vector

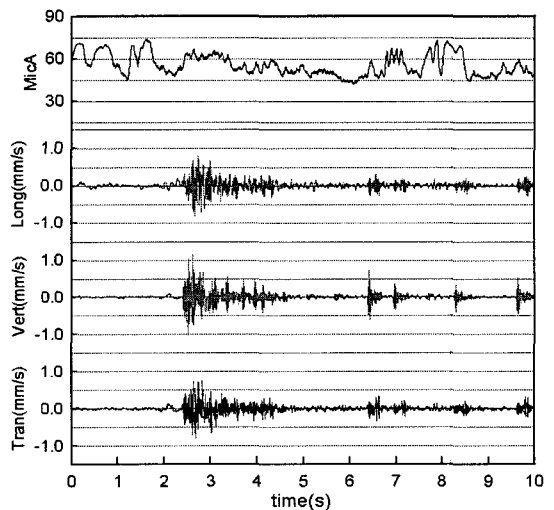


Fig. 4 Time histories for ground vibrations and noise (blasting source : pier 2, distance : 180 m)

Table 3 Measurement results

Source (TCR/RQD)	Dis. (m)	Weight (N) /delay	SD(m/N ^{1/2})	SD(m/N ^{1/3})	Vibration (cm/s)	Noise, dB(A)	Hydrospace noise dB(A)
P2 Soft rock (92/22)	86	10	27.196	39.918	0.244	-	-
	130	10	41.110	60.341	0.201	-	-
	109	10	34.469	50.593	0.187	-	-
	188	10	59.451	87.262	0.175	62.1	-
	142	10	44.904	65.911	0.123	73.8	134
	180	10	56.921	83.549	0.153	72.8	145
	160	10	50.596	74.265	0.170	-	-
	180	10	56.921	83.549	0.146	-	-
	170	10	53.759	78.907	0.130	-	-
P3 Hard rock (80/37)	249	30	45.461	80.136	0.106	75.1	144
	218	30	39.801	70.159	0.154	79.6	-
	282	30	51.486	90.756	0.095	73.0	-
	353	30	64.449	113.606	0.139	70.1	-
	254	30	46.374	81.745	0.095	69.1	-
	287	30	52.399	92.365	0.129	-	-
	358	30	65.362	115.215	0.109	70.6	-
P4 Soft rock (73/3)	350	20	78.262	128.941	0.075	67.4	129
	350	30	63.901	112.640	0.146	65.2	131
	455	30	83.071	146.433	0.137	69.4	-
	350	30	63.901	112.640	0.102	68.0	136
	455	30	83.071	146.433	0.076	78.1	-
	455	30	83.071	146.433	0.105	69.9	129
	455	30	83.071	146.433	0.097	76.2	-
	350	30	63.901	112.640	0.152	72.8	132
	455	30	83.071	146.433	0.142	79.6	-
P5 Soft rock (30/0)	350	30	63.901	112.640	0.080	71.4	130
	455	30	83.071	146.433	0.159	81.3	-
	327	40	51.703	95.615	0.145	78.7	148
	327	30	59.702	105.238	0.132	70.6	143
	413	30	75.403	132.916	0.129	79.8	-
	413	30	75.403	132.916	0.131	-	-
	327	30	75.403	132.916	-	-	144
	413	10	130.602	191.698	0.070	-	-
	413	30	75.403	132.916	0.131	79.6	126
	413	10	130.602	191.698	0.083	-	-
	413	10	130.602	191.698	0.079	-	-
	413	40	65.301	120.762	0.124	86.8	130
413	40	65.301	120.762	0.133	-	-	

sum) 값을 나타 낸 것이다. Fig. 4에는 교각 2번에서 수중발파 될 때 180m 떨어진 위치에서 계측된 지반진동 시간이력과 소음 시간이력을 나타내었다.

4. 결과분석 및 발파영향성 검토

4.1 진동추정식과 수중소음추정식

Table 3의 결과 중 지반진동치를 분석하여 Fig. 5와 같은 진동추정식을 얻을 수 있었다. 분석결과 상승근 식보다는 삼승근 식을 사용하는 것이 근거리와 원거리 모두에서 보다 엄격한 진동치의 추정을 가능하게 하며, 상관계수 또한 높게 나타났다(Table 4). 감쇠계수는 -0.536으로써 일반적인 육상발파에서 나타나는 진동의 감쇠정도 보다 작게 얻어짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 수중발파의 진동전달 메커니즘과 매질의 특성이 일반적인 육상발파 조건과는 다른 점이 한가지 원인일 것으로 판단된다. Fig. 5와 Table 4에서 $V_{50\%}$ 와 $V_{95\%}$ 는 기초확률 50%와 95%의 진동추정치를 각각 의미한다.

또한 제시된 발파진동추정식을 근거로 진동기준을 만족할 수 있는 허용장약량 산출치를 Table 4에 나타내었다. 허용장약량 산출치는 발파현장에 따라 주어 진 진동기준과 발파원과 보안물건 사이의 이격거리가 주어지면 진동기준을 만족하는 지발당 허용장약량을 간단히 산정할 수 있도록 한 것이다.

지발당장약량과 이격거리에 따른 환산거리를 기준으로 수중소음 계측결과를 분석한 결과는 Fig. 6과 같다. 상관계수 r 은 -0.66으로 얻어져 진동추정식과 비슷한 수준의 상관도를 보이는 것으로 나타났다. 식 (1)에 제시된 수중소음 추정식은 본 수중발파 현장과 유사한 환경에서 시험발파를 위한 장약량 산정이나 소음치를 추정하여 양식어류의 피해발생 정도를 사전에 검토할 수 있는 식으로써 사용될 수 있을 것이다.

$$SL = 293.2SD^{-0.164} \quad (1)$$

여기서 SL : 수중소음 dB(A),
SD : 환산거리(D/W^{1/3})
D : 거리, m
W : 장약량, N

4.2 수중발파로 인한 양식어류의 영향검토

평상 시 양식어장 주변은 진동 및 소음을 유발할 만한 진동원은 거의 없는 상태로 수중발파공사가 있기 이전에 양식어류(가물치)들은 진동, 소음 등에 심각하게 노출된 이력은 없는 것으로 조사되었다. 양식어장의 위치에 따라 수중소음, 진동 등에 대해 가물치가 받는 스트레스의 정도는 달라지겠으나 수중발파공사가 지속되는 5개월 동안 가물치는 수차례에 걸쳐 126.3 dB(A) ~ 147.8 dB(A)의 수중소음, 최대 86.8 dB(A)의 소음, 0.07cm/s ~ 0.244cm/s의 진동에 노출되었으나 피해는 발생하지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 공사현장에서 발생하는 소음 및 진동과 양식어류(가물치)의 상관관계와 관련하여 신현옥⁽⁷⁾이 “수중소음이 149 ~ 176 dB일때 가물치의 생태에 영향을 미칠 수 있다” 라고 제시한 결과와도 잘 부합한다 할 수 있다.

5. 결 론

수중발파로 인해 발생하는 지반진동과 소음, 양식어장 내의 수중소음을 측정된 결과 진동치의 경우 최대 0.244 cm/s, 소음 86.8 dB(A), 수중소음은 126.3 dB(A)에서 최대 147.8 dB(A)까지 측정되었다. 이러한 결과는 수중발파 공사가 진행되는 동안 발파원과 최단거리에 위치하는 양식어장을 기준으로 측정된 값이므로 실제 대부분의 양식어류(가물치)들은 제시된 진동 및 소음치보다 작은 값에 노출되었다고 할 수 있으며, 이로 인한 양식어류의 피해는 발생하지 않은 것으로 조사되었다. 특히, 수중발파로 인한 대기 중의 소음치를 추정하기 위해서는 수심을 발파변수로 포함하는 소음추정식이 필요할 것으로 판단된다. 이 연구로부터 얻어진 정량적인 계측 결과를 이용하여 진동추정식($V_{50\%} = 1.507SD^{-0.536}$, $V_{95\%} = 2.171SD^{-0.536}$)과 수중소음 추정식 $SL = 293.2SD^{-0.164}$ 을 각각 제시하였다. 이 연구의 결과가 직접 적용될 수 있는 수중발파 환경은 제한적일 것이나 본격적인 수중발파 이전에 인근 양식어장의 진동영향을 검토하는 기초적인 자료로서는 사용될 수 있을 것으로 판단되며, 체계적인 자료축적을 통한 지속적인 보완이 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Dowding, C. H., 1996, "Construction Vibrations", Prentice Hall.
- (2) Research Institute of Safety Engineering, 1985, Under Water Blast, Sanhaedang(in Japanese)
- (3) Ahn, M. S., Kim, J. D. and Hwang, S. J., 2001, "A Case Study to Minimize Effect of Blasting Vibration and Noise on Animal Casualties", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 104 ~ 110.
- (4) Ministry of Environment, 1997, "Influence on the Animal and Structure by Noise and Vibration", Central Committee for Environment Trouble Mediation.
- (5) Ministry of Construction and Transportation, 2002, "Allowable Standard Examination for Noise and Vibration by Basting(Suggestion)", Audit and Inspection Office.
- (6) Hwang, W. S. et. al., 1997, "A Study on Animal Damage and Relief Methods by Construction Works", Research Institute of Animal Husbandry Technology, pp. 6 ~ 11.
- (7) Shin, H. O., 1995, "Effect of the Piling Work Noise on the Behavior of Snakehead (Channa Argus) in the Aquafarm", Journal of the Korean Fisheries Society, Vol. 28, No. 4, pp. 492 ~ 502.