

수변 공사에 의한 충격음의 특성과 어류에 미치는 영향

Characteristics of Impulsive Noise of Waterfront Construction Site and Its Effects on Fishes

배종우*. 박지현**. 윤종락†

Jong Woo Bae, Ji-Hyun Park and Jong Rak Yoon

(2009년 6월 9일 접수 ; 2009년 8월 11일 심사완료)

Key Words : Underwater Blasting Noise(수중 발파음), Piling Noise(항타소음), Stone Breaking Hammer(쇄암봉), Hearing of Fish(어류의 청감), Underwater Noise Pollution(수중소음공해)

ABSTRACT

Underwater impulsive sound such as underwater blasting noise, piling noise and stone breaking hammer affects marine animal hearing response and organs. This study describes the characteristics of various impulsive noise from waterfront construction site and their effect on fish. Time constant, peak pressure, energy and SEL(sound exposure level) of four different underwater impulsive sounds are quantified. Auditory and non-auditory tissue damage ranges are derived by comparing their quantities to the exposure criteria for fish. Damage ranges of auditory tissue and non-auditory tissue of underwater boring blast of 150 kg of charge, are about 100 m and 300 m, respectively. Other three impulsive sounds also gives damage effects but less than that of underwater boring blast.

1. 서론

인위적으로 발생하는 수중 소음은 해양포유류나 어류 등의 수서생물의 청각이나 조직에 피해를 준다는 사실이 부각되고 있다⁽¹⁾. 이러한 인위적인 수중 소음원에는 선박소음, 해저탐사장치용 air gun, 소나, 수중폭발음, 항타 소음 등이 있고 이들이 어류의 청각이나 어체 손상에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^(1~3).

국내에서도 인근 공사장의 수중소음에 의한 양어장 피해나 연안 어장 등의 어업피해 관련 연구가 수행되고 있다⁽⁴⁻⁶⁾. 수중소음준위가 어류의 최소 가청치 보다 큰 경우 어류는 소음을 인식하게 되며

소음크기가 최소 가청치 보다 90 dB 이상이 되는 경우 도피 등의 강한 행동반응이 일어난다는 연구가 있다⁽⁷⁾.

주파수에 따른 어류의 청감에 대한 연구는 금붕어, 역돔, 메기, 블루길 등을 대상으로 수중소음 노출후의 청감의 일시적 변화, 영구적 변화에 대한 연구가 있고, 해상 풍력발전기 건설공사중의 파일 항타 소음에 의한 연어의 행동반응, 섬모세포의 손상에 관한 연구가 있으며 수중폭발음에 의한 어류의 크기별 소음폭로레벨에 따른 손상도에 관한 연구도 있다^(1,8-11).

연속음과 달리 충격파가 어류에 미치는 효과는 어류의 청감보다는 부레파열과 같은 물리적 효과가 더 크다고 한다^(1,12). 참돔, 잉어, 볼락, 농어에 대한 수중 발파음에 대한 실험결과 충격파에 약한 어류는 부레가 발달한 어종이고, 강한 어류는 갑각류나 장어 등과 같이 부레가 발달하지 않은 종류이다.

미국의 국립해양수산물국(National Marine Fisheries

† 교신저자; 정희원, 부경대학교 음향진동공학과
E-mail : jryoon@pknu.ac.kr
Tel : (051)629-6233, Fax : (051)629-6210

* 부경대학교 대학원 음향진동공학과

** 부경대학교 음향진동공학연구소

Service : NMFS)은 충격파인 경우 유효치 음원준위가 190 dB/uPa 이상에서 물개류는 일시적인 청각손상을 입게 되고, 고래는 180 dB/uPa 이상인 경우 일시적 청각손상을 입는다고 보고하고 있다.

직경 90 cm 파일 향타 시의 충격파 최대치가 224 dB/uPa일때 chum, chinook(연어의 일종), 청어 등의 치사, 부레 파열이 발생하고 직경 50 cm 이상의 파일 향타는 어류에 영향을 주는 임계치 209 dB/uPa를 초과하는 충격파를 발생한다고 하며⁽¹⁾ 해저 탐사용 air gun 충격파에 의해 도미의 귀의 섬유세포가 손상을 입고 58일 이후에야 회복된다는 연구가 있다⁽²⁾. Air gun의 충격파 최대치는 약 222.6 dB/uPa이며 어류의 청각세포에 손상을 주는 충격파의 최대음압 준위의 임계치는 약 203 dB/uPa로 제시하고 있다.

이상에서 보는바와 같이 대상 어류의 다양성, 충격음의 다양성과 충격음 발생 기작 및 전파환경의 다양성에 의해 충격음에 의한 피해 영향 평가는 이론적인 예측이 불가능한 어려운 주제이다.

이 연구에서는 최근 부각되고 있는 4대강 정비 공사나 해상풍력 발전기 건설공사 등의 수변 공사 시에 수반될 수 있는 공사현장의 발파, 파일 향타, 쇄암봉 향타 등에 의한 수중 충격음을 측정하여 어류에 미치는 영향을 평가하였다.

부산항 수중발파와 시화조력 발전소 연안육상발파, 낙동강 교량 파일향타 및 월성원자력 발전소 쇄암봉 향타에 의한 충격음의 지속시간, 최대치, 총에너지 및 소음폭로레벨을 측정하여 최근에 제안되고 있는 국외의 충격음의 규제 기준과 비교하여 평가하였다.

2. 수중 충격음의 평가량 및 규제 기준

2.1 충격음 평가량

수중 충격음의 특성은 연속음과 달리 지속시간이 짧고, 광대역 특성을 가지며 아주 큰 최대치 음압을 갖는 음으로 정의할 수 있으며 폭발이나 물체의 충격에 의해 발생한다. 따라서 충격파는 선형적인 음향 특성을 갖지 않으므로 평균음압으로 평가하는 연속음에 대한 평가방법과 다르다. 어류에 미치는 영향을 평가하기 위한 충격음의 특성은 최대치 음압, 유효치 음압 P_{eff} , 에너지 밀도 E , 소음폭로레벨

SEL(sound exposure level)로 평가된다^(1,13).

충격음의 유효치 음압 P_{eff} 는 식 (1)로 정의된다.

$$P_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2 dt} \quad (\text{Pa}) \quad (1)$$

여기서, T 는 에너지의 90%를 점유하는 시간으로 식 (2)로 정의된다.

$$\int_0^T p(t)^2 dt = 0.9 \int_0^\infty p(t)^2 dt \quad (2)$$

충격음의 에너지 밀도 E 는 식 (3)으로 정의되며, 에너지 밀도 준위 EL 은 식 (4), 에너지의 시간에 따른 소음폭로레벨 SEL 은 식 (5)로 정의된다.

$$E = \int_0^\infty \frac{p^2(t)}{\rho c} dt \quad (\text{J/m}^2) \quad (3)$$

$$EL = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^\infty p^2(t) dt}{P_{ref}^2 T_{ref}} \right) \quad (4)$$

$$SEL = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^t p^2(t) dt}{P_{ref}^2 T_{ref}} \right) \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

여기서, $P_{ref}^2 = (1 \mu\text{Pa})^2$, $T_{ref} = 1\text{s}$ 이다.

식 (3)과 (4)는 충격파의 총에너지를 평가하는데 적용되며 식 (5)의 SEL 은 1초간의 준위로 정규화되어 있으므로 충격음의 시정수, 최대음압 및 파형이 서로 다른 다양한 충격음의 영향도를 평가하는데 사용된다. 시간에 따라 변화하는 음에 대한 등가소음도 L_{eq} 가 인간에게 적용되는 것과 같은 의미이다.

2.2 규제 기준

미국 캘리포니아교통부는 미연방과 연어회유 하천이 발달한 오레곤주 및 워싱턴주 교통부와 함께 수변공사시의 철제 파일 향타 충격음이 어류에 미치는 영향을 연구하기 위해 어업수중음향연구회를 설립하여 수중소음이 어류에 미치는 영향에 대한 다양한 기준 연구 자료의 분석, 파일 향타음의 평가 및 관리와 미래의 연구방향을 제안중이다⁽¹³⁾. Table 1은 기존의 경험 자료를 기초로 2007년도에 제안한 부레가 발달한 경골어류에 대한 평가기준이다.

Table 1 Sound exposure criteria for impulse from piling noise on fish⁽¹³⁾

		Peak pressure (dB)	Accumulative SEL	Remarks
Non-auditory tissue damage	Mass of fish < 0.5 g	Not relevant	183	0.5<mass<200g $SEL = 186.47 + 11.53 * \log_{10}(g)$
	Mass of fish > 200 g	Not relevant	>213	
Auditory tissue damage (hair cell)		205>	185>	

표에서 보는 바와 같이 충격음의 최대치 및 누적 소음폭로레벨이 각각 205 dB 및 185 dB 이상이면 청각조직의 손상이 일어난다.

무게 0.5 g 이하의 어류에 대한 비청각 조직손상을 야기하는 SEL은 183 dB이며 200 g 이상의 경우는 213 dB 이상이다. 0.5~200 g의 무게를 갖는 어류에 대해서는 Table 1의 비고란에 제시한 식과 같이 어류 무게의 로그 값에 비례하여 증가한다.

3. 수중 충격음 측정 및 평가

3.1 발파 충격음

발파는 수로의 확장과 증심 및 연안공사 등의 다양한 수변공사에서 이용된다. 수중발파는 고온, 고압의 가스구를 형성하고, 이 가스구는 음속에 가까운 속도로 팽창하여 강한 충격파가 발생한다. 이상적인 충격파는 Friedlander파로 모델링되며 지속시간 τ 는 수 msec 이하로 에너지 대역 스펙트럼은 1 kHz 까지 평탄한 특성이고 τ^{-1} 이상의 주파수에서는 6 dB/octave로 감소하는 것으로 알려져 있다^(14,15).

수중 현수 발파시의 폭약량에 대한 수중충격파의 최대 압력을 추정하는 계산식이 주어져 있고 전파 거리에 따른 충격파의 감쇠 및 시정수 변화특성이 알려져 있다. 그러나 이러한 수중발파에 의한 충격파는 지발 발파 등의 발파공법이나 사용하는 폭약의 양 및 충격파의 전파매질과 경계조건 등의 다양한 요인에 의해 결정되므로 이상적인 계산식을 적용하는 것은 제한점이 있다.

Fig. 1은 2006년 4월 18일과 4월 25일에 측정된 부산항 준설 공사 시의 수중 천공발파에 의한 충격

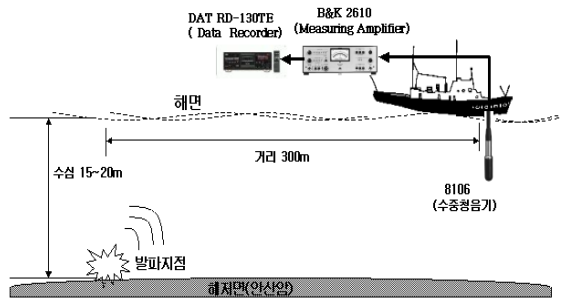


Fig. 1 Underwater blasting test configuration

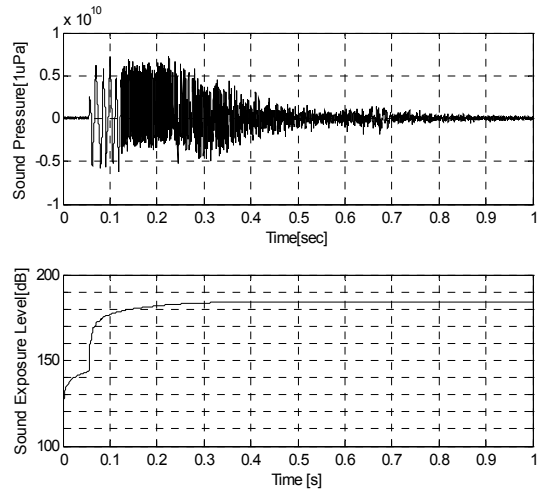


Fig. 2 Impulsive waveform and SEL of underwater blasting in Busan port

Table 2 Test conditions and results of underwater blasting in Busan port

Test conditions		Results	
Sea bottom	Andesite	Duration (ms)	~ 400
Charge amount (kg)	150(1st)	Peak pressure (dB/uPa)	197
	120(2nd)		197
No. of boring	20	Energy (J/m ²)	1.8
	boring depth: 3 m boring space: 3 m		1.3
Range(m)	~300	SEL (dB/uPa ² -s)	184.0
Water depth (m)	~15		183.9

파(이하 수중발파로 표현) 측정구성도이고 Fig. 2는 충격파 특성이다.

Table 2는 측정조건 및 분석결과이다. 지발 발파 및 주위의 정박선발파 부두안벽에 의한 반사파가

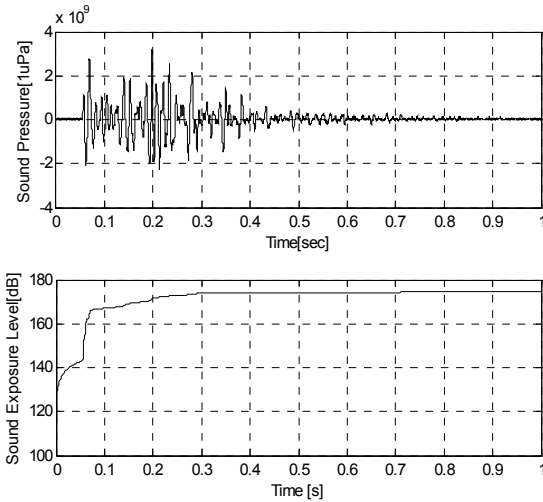


Fig. 3 Impulsive waveform and SEL of shore blasting in Shihwa tidal plant

Table 3 Test conditions and results of shore blasting in Shihwa tidal plant

Test conditions		Results	
Sea bottom	Sand	Duration (ms)	~ 400
Charge amount (kg)	410(1st)	Peak pressure (dB/uPa)	190
	820(2nd)		189.
	820(3rd)		188
	350(4th)		188
	950(5th)		186
	680(6th)		186
No. of boring	50	Energy (J/m ³)	0.20
	110		0.16
	110		0.15
	70		0.15
	140		0.14
	110 (boring depth: 4.5~7.5 m, boring space: 2 m)		0.13
Range (m)	300(blast center)	SEL (dB/uPa ² -s)	174.0
	200(shore)		174.0
Water depth (m)	18		173.5
			173.6
			173.3
			172.9

혼입되어 이상적인 현수 발파시의 지속시간에 비해 지속시간이 상대적으로 크게 나타난다. 1차 및 2차 발파시의 폭약량은 각각 150 kg 및 120 kg이지만 최대음압과 SEL은 거의 동일하다.

Fig. 3는 2006년 8월 22일~23일의 시화호 조력발전소 건설시 연안육상에서 수행된 천공 발파(이하

연안발파로 표현)에 의한 응력파가 지반 속을 전파하여 수중 충격파를 발생한 경우이다. 충격파의 측정 장치는 Fig. 3과 같고 측정조건 및 분석결과는 Table 3과 같다.

지발발파에 의해 이상적인 현수 발파시의 지속시간에 비해 지속시간이 상대적으로 크게 나타나며 지반으로 전파되므로 부산항의 수중천공발파에 비해 고주파성분이 상대적으로 크게 감소된 파형이다. 각 발파시의 폭약량은 최대 약 2배이나 폭약량에 최대음압이 비례하지 않는 특성을 보이며 SEL 또한 1 dB 이내로 유사한 값을 보인다.

3.2 파일 항타 충격파

부두, 해안 또는 강 유역의 수변공사에서는 항타 작업이 수반된다. 파일 항타와 같이 2개의 물체가 부딪히는 경우 에너지의 급격한 방출에 의해 충격음이 발생한다. 이러한 충격음의 물리적 특성은 일차적으로 충격물체의 기계적인 특성에 좌우된다. 파일항타기의 햄머가 파일을 타격하는 경우, 충격에너지의 일부는 공기 중으로 전파하고, 펄스형태의 과도적인 응력파는 파일의 길이 방향으로 아래쪽으로 전파해 간다. 아울러 햄머 타격의 충격은 파일의 벽면에서 굽힘(flexural) 응력파를 발생시키고 이는 주위의 수중과 공기 중으로 음을 전파시킨다. 파일의 길이 방향으로 전파된 펄스는 해저의 지반과 결합되어 지반으로 전파해 간다. 지반으로 전파해 가는 파는 수중으로 전파해 가는 파를 발생시키며 파일에서 직접 발생한 굽힘 응력파에 의한 수중음과 간섭을 일으키기도 한다. 항타기의 햄머, 파일의 크기 및 길이, 지반특성, 수심, 염분도, 온도 등은 햄머 항타기나 진동항타기(vibro-piling)에서 발생한 소음의 크기를 결정하는 요소들이다.

Fig. 4는 2007년 4월 11일과 4월 19일에 측정된 부산 낙동강 경전철 교각 공사중의 철재 원형 파일 항타 충격파이다.

한 개 파일의 항타는 1단계~ 3단계로 수행되며 1단계는 30 m 깊이까지, 2단계 항타는 1단계 작업이 끝난 후 파일에 15 m 파일을 용접하여 수행되며 3단계 항타는 2단계 항타가 종료된 후 15 m의 파일을 추가 용접한 후 하단부가 기반암에 도달하면 항타 작업이 종료된다.

초기 30 m를 항타하는 1단계 항타는 하저 표층

의 뿔층에 파일을 박는 경우이므로 간헐적으로 햄머를 타격하는 경우도 있으나 햄머를 포함한 25톤의 항타기 전체의 무게로 파일을 누르는 방식으로 파일을 박기 때문에 충격파의 특성을 보이지 않는다. 2단계 및 3단계는 경화된 뿔층과 기반암에 파일을 박는 상태로 충격파를 발생한다. 2단계 및 3단계는 약 2초 간격으로 각각 300회의 항타가 수행된다.

Table 4는 측정조건 및 분석결과이다. 2단계 및 3단계 항타의 최대음압과 SEL은 1.5 dB 이내에서 유사한 특성이다. 3단계의 경우가 2단계에 비해 시정수가 짧고, 충격파의 최대 음압이 크다. 그러나 SEL은 2단계에 비해 낮은 특성을 보였다.

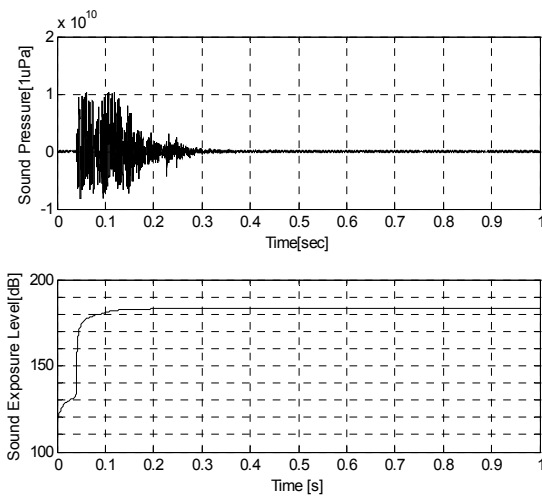


Fig. 4 Impulsive waveform and SEL of piling noise in Nakdong river subway

Table 4 Test conditions and results of piling noise in Nakdong river subway

Test conditions		Results	
River bottom	Sedimentary mud	Duration (ms)	~250
Pile diameter /length (m)	0.8/60	Peak pressure (dB/uPa)	200(2nd stage) 201(3rd stage)
Hammer (ton)	15	Energy (J/m ²)	1.36(2nd stage) 0.95(3rd stage)
Range (m)	10	SEL (dB/uPa ² -s)	183.1(2nd stage) 181.6(3rd stage)
Water depth (m)	8		

3.3 쇄암봉 충격파

쇄암봉 항타 소음은 수면 위 5~7m 높이에서 자유 낙하하는 약 45톤 크기의 쇄암봉이 해저 암반과 충돌할 때 발생하는 충격파이다. 쇄암봉의 크기, 형태, 암반, 수심 등이 소음의 크기를 결정하는 요소들이다. 항타 1회 소요시간은 약 1분30초이다.

Fig. 5는 월성 원자력 발전소 인근 해역에서 측정된 쇄암봉 충격파로 시정수가 여타의 충격파에 비해 가장 짧다. 햄머와 암반의 직접적인 충돌에 의해 충격파가 발생하는 이유로 해석된다.

Table 5는 측정조건 및 분석결과이다. 100 m와 250 m 거리에서 측정한 최대음압은 약 5 dB 차이를 보이고 SEL은 약 8 dB 차이를 보인다.

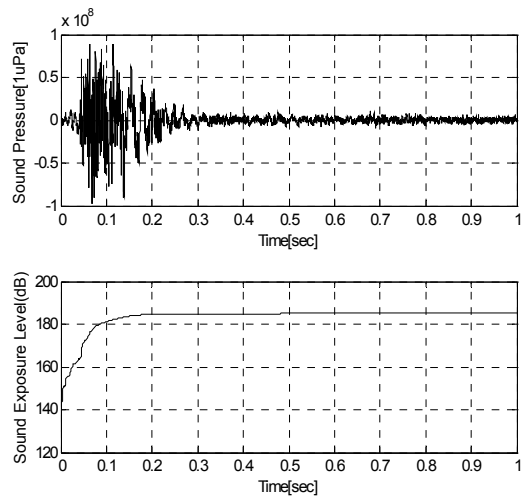


Fig. 5 Impulsive waveform and SEL of breaking hammer in Wolsung nuclear plant

Table 5 Test conditions and results of breaking hammer in Wolsung nuclear plant

Test conditions		Results	
Sea bottom	sand	Duration (ms)	~200
Hammer (ton)	45	Peak pressure (dB/uPa)	159(100 m) 154(250 m)
		Energy (J/m ²)	1.0*10 ⁻⁴ (100 m) 1.3*10 ⁻⁵ (250 m)
Range(m)	100 250	SEL (dB/uPa ² -s)	142.0(100 m) 133.9(250 m)
Water depth (m)	20		

4. 규제기준과의 비교 평가에 의한 영향범위

충격파가 어류에 미치는 거리를 추정하기 위해서는 거리별 최대음압과 SEL이 요구된다.

충격파는 거리 증가에 따라 파형이 왜곡되며 전파손실 및 흡수손실에 의해 감쇠된다. 수중현수 발파에 의한 충격파의 전파손실과 지속시간에 대한

Table 6 Auditory tissue damage range of peak pressure of each impulsive sound source

		1 m	100 m	500 m	1000 m	Damage range
Peak pressure (dB/uPa)	Underwater blasting	245	205	191	185	100
	Shore blasting	238	198	184	178	45
	Piling noise	221	181	167	161	6
	Breaking hammer	199	159	145	139	-

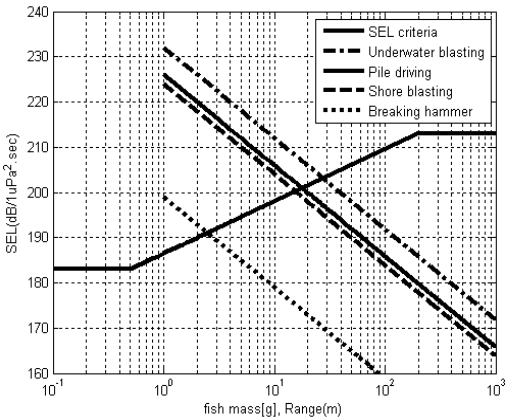


Fig. 6 Comparison of SEL criteria and each impulsive source SEL with respect to range

Table 7 Non-auditory tissue damage range of each impulsive source SEL with respect to mass of fish

	0.5 g	1 g	10 g	100 g
Underwater blasting (SEL: 232 dB at 1 m)	300 m	200 m	50 m	15 m
Shore blasting (SEL: 224 dB at 1 m)	120 m	80 m	20 m	6 m
Piling noise (SEL: 226 dB at 1 m)	150 m	100 m	25 m	7 m
Breaking hammer (SEL: 199 dB at 1 m)	7 m	5 m	1 m	-

추정식이 알려져 있으나 충격파의 발생기구나 전파 환경에 대응하지 못한다. 거리증가에 따른 감쇠를 구면 전파손실로 가정하여 거리에 따른 최대음압과 SEL을 추정하였다. 아울러 파일 및 쇄암봉 향타의 경우는 1회의 향타에 대한 SEL에 10log(향타횟수)를 보정하였다.

Table 6은 구면전파 손실을 보정한 각 충격파 음원별 최대음압 평균을 Table 1의 청각조직 손상이나 일시적 청각조직 손상을 일으키는 최대음압 기준치인 205 dB와 비교하여 평가한 결과이다. 부산항 수중천공 발파의 경우 약 100 m, 시화의 경우 45 m, 낙동강의 경우 6 m까지가 영향범위이다.

Fig. 6은 구면전파 손실을 보정한 각 충격파의 거리별 SEL과 Table 1의 비교란에 주어진 비청각기관에 대한 기준치와 비교한 결과이다. 파일향타와 쇄암봉 향타의 경우는 향타 횟수를 각각 300회 및 50회로 하여 SEL을 보정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 0.5 g이하의 치어의 영향범위는 최대 300 m, 100 g이상의 성어의 경우는 최대 15 m 범위이며 쇄암봉은 100 g 이상의 어류에는 영향이 없는 것으로 판단된다. Table 6은 각 충격파 음원별, 어류의 무게에 대한 피해 영향거리이다. 충격파의 최대치를 기준으로 한 청각조직 손상의 피해거리보다 크게 평가된다.

5. 결 론

수변공사 중에 수반되는 수중발파 및 연안육상발파, 파일 향타 및 쇄암봉 향타에 의해 발생하는 충격음을 정량적으로 해석하고 미국 캘리포니아 교통국의 어업수중음향연구회에서 제안한 기준치와 비교하여 어류에 미치는 피해 영향 범위를 추정하였다.

SEL을 기준으로 한 수중천공발파 충격음의 직접적인 피해범위는 0.5 g 이하의 치어에 미치는 영향범위는 약 300 m까지 이고 100 g의 성어의 영향범위는 약 15 m이다. 연안 육상 천공발파의 경우 최대피해거리는 약 120 m, 파일 향타의 최대피해거리는 약 150 m, 쇄암봉의 최대피해거리는 약 7 m이다.

충격파의 최대음압준위를 기준으로 한 피해거리는 SEL을 기준으로 한 피해범위의 약 1/3로 해석된다.

수중소음에 대한 국내의 피해영향거리 추정은 각

연구자의 독립적 연구결과에 따라 결정되고 있다. 친환경 정책을 기조로 하고 있는 현재의 국가발전 목표에 부응하기 위해서는 이 연구에서 인용한 국외의 충격과 영향범위 기준의 타당성, 다양한 충격과 음원의 발생기구, 전파특성 및 평가척도에 대한 연구가 수행되어 국내의 평가기준 수립이 필요하다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2008학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (PK-2008-024)

참 고 문 헌

- (1) Hastings, M. C. and Popper, A. N., 2005, Effects of Sound on Fish, California DOT Contract No. 43A0139.
- (2) McCauley, R. D., Fewtrell, J. and Popper, A. N., 2003, "High Intensity Anthropogenic Sound Damages Fish Ears," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 113, No. 1, pp. 638~642.
- (3) Popper, A. N., Smith, M. E., Cott, P. A., Hanna, B. W., MacGillivray, A. O., Austin, M. E. and Mann, D. A., 2005, "Effects of Exposure to Seismic Airgun use on Hearing of Three Fish Species," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 117, No. 6, pp. 3958~3971.
- (4) Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, 2001, "Fisheries Loss due to Ahn Jung National Industrial Complex Development," 2001, pp. 435~486, pp. 502~514.
- (5) Korea Inter-University Institute of Ocean Science, Pukyong National University, 2006, "Fisheries Loss due to Seosan Storage Base Shipping Port Construction," pp. 63~74, pp. 533~555.
- (6) Korea Inter-University Institute of Ocean Science, Pukyong National University, 2005, "Fisheries Loss due to Dredging(Reef removal) for Emergency Passage Construction of Busan New Port," pp. 193~213.
- (7) Nedwell, J. R., Turnpenny, A. W. H., Lovell, J. M. and Edward, B., 2006, "An Investigation Into the Effects of Underwater Piling Noise on Salmonids," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 120, No. 5, pp. 2550~2553.
- (8) Smith, M. E., Coffin, A. B., Miller, D. L. and Popper, A. N., 2006, "Anatomical and Functional Recovery of Goldfish(Carassius auratus) Ear Following Noise Exposure," J. Experimental Biology, Vol. 209, pp. 4193~4202.
- (9) Hastings, M. C., Popper, A. N., Finneran, J. J. and Lanford, P. J., 2006, "Effects of Low-frequency Underwater Sound on Hair Cells of the Inner Ear and Lateral Line of the Teleost Fish *Astronotus Ocellatus*," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 99, No. 3, pp. 1759~1766.
- (10) Wahlberg, M. and Westerberg, H., 2005, "Hearing in Fish and Their Reactions to Sounds from Offshore Wind Farms," Marine Ecology Progress Series, Vol. 288, pp. 295~309.
- (11) Vagle, S., 2003, On the Impact of Underwater Pile-driving Noise on Marine Life, Institute of Ocean Sciences DFO/Pacific.
- (12) Kang, D. W., 1998, Blasting Engineering, Goomibook, Seoul, Chap. 13.
- (13) Popper, A. N., et al., 2006, "Interim Criteria for Injury of Fish Exposed to Pile Driving Operation: A White Paper," California DOT.
- (14) Urick, R. J., 1983, "Principle of Underwater Sound," Peninsula Publishing.
- (15) Hamernik, R. P. and Hsueh, K. D., 1991, "Impulse Noise: Some Definitions, Physical Acoustics and Other Considerations," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 90, No. 1, pp. 189~196.