

## 유해 해양생물 해파리 피해 저감 방안 연구

박성욱 · 이경훈<sup>†</sup> · 윤원득 · 이동길 · 김성훈 · 양용수 · 이건호<sup>\*</sup>  
(국립수산과학원 · <sup>†</sup>전남대학교 · <sup>\*</sup>서해수산연구소)

### A Study on the Damage Reduction Strategy Against a Harmful Aquatic Organism, Jellyfish's Bloom

Seongwook PARK · Kyoungsoon LEE<sup>†</sup> · Won-Duk YOON · Dong-Gil LEE ·  
Seonghun KIM · Yong-Su YANG · Geon-Ho LEE<sup>\*</sup>

(National Fisheries Research & Development Institute · <sup>†</sup>Chonnam National University · <sup>\*</sup>West Sea Fisheries Research Institute)

#### Abstract

As methods reducing damages by jellyfish which enter the coastal areas of Korea, attaching cutting devices to towing nets of otter trawls or pair trawls and/or using a canvas type of cutting nets of small fishing boats have been widely utilized. In order to reduce shut-down damages of power plants in coastal areas due to the mass influx of marine organisms including jellyfish, a possible improvement of the traveling water screen system and various jellyfish influx blocking devices were suggested in this study. The results could be utilized as an important index for reducing damages by jellyfish bloom which cause on a massive scale in summer in Korea.

**Key words :** Harmful aquatic organism, Jellyfish, Damage reduction, Block device, Beach, Safety accident

#### I. 서론

최근 해파리의 대량출현과 함께 발생하는 수산 자원의 남획과 고갈 등 생태계 변동에 영향을 주고 있으며, 국외의 경우, 흑해는 1970년대부터 부영양화, 수산자원 남획 및 해파리에 의해 해양생태계의 변동과 베링해에서도 1990년대부터 최근 해파리가 급속히 증가되고 있다. 또한, 우리나라 연근해역에서도 수온상승, 수산자원고갈 및 해양오염이 복합적으로 작용하는 해양환경에서 독성을 가진 대형 노무라입깃해파리의 지속적인 출현에 의해 2004년 이후 다양한 연구가 진행되고 있

다 (MLTMA, 2009).

우리나라 연근해역에 대량으로 발생하는 노무라입깃해파리는 중국의 산둥반도와 양자강하구 연안해역에서 발생하는 것으로 추정되는 외래유입종인데, 과거 자산어보에도 기록될 정도로 우리나라 연근해역에 오래전부터 출현하였으나, 2003년 이후부터 우리나라 주변해역에 대량 출현하고 있다 (NFRDI, 2008).

최근 여름철 대량 우리나라 연안해역으로 유입되는 노무라입깃해파리, 봄철 대량 발생하는 보름달물해파리를 비롯한 크릴, 치게 등과 다양한 부유성 동물플랑크톤 및 자치어에 의한 국가기반

<sup>†</sup> Corresponding author : 061-659-7124, khlee71@jnu.ac.kr

\* 이 연구는 산업통상자원부 및 국립수산과학원 (RP-2015-FE-003)의 지원에 의해 수행되었습니다.

산업의 피해는 1996년 울진원자력발전소를 시작으로 크릴이나 해파리 등에 의한 취수구 막힘 현상이 대량 발생되어 감발 현상이 발생하였으며 (KORDI, 2005), 현재까지도 연안해역의 부영양화로 인해 대량 발생된 해양생물의 유입은 2012년도 을왕리 해수욕장 여아 사망사고 피해 사례 발생과 함께 해수욕장 해파리 쏘임사고 등으로 사회적인 문제가 되고 있다 (Hwang et al., 2006).

본 연구는 독성 해파리의 출현으로 인한 여름철 해수욕객 피해 발생을 증가와 연안해역에 설치된 산업기반시설의 피해를 저감하기 위한 목적으로, 지역사회 경제적 기반 활성화를 위하여 주요 피해 해파리에 대한 제거 방안을 소개하고 피해 예방을 위한 차단장치의 효율성을 평가하여 설치 및 유지 보수가 용이한 방안을 제시하고자 한다.

## II. 해파리 제거 방안 기술

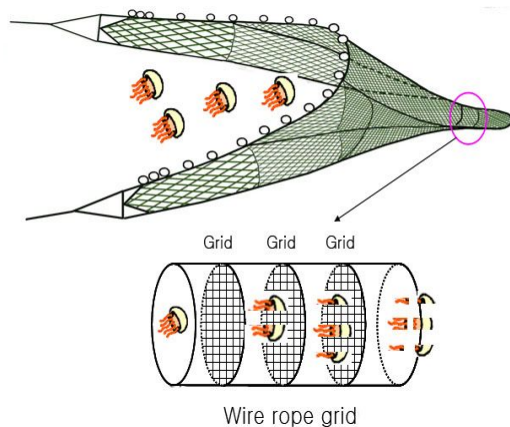
### 1. 예인형 3단 해파리절단망

해파리의 피해를 저감하는 방법으로 가장 보편적인 방법은 트롤이나 쌍끌이저인망 등의 예망용 조업선에 구비된 어구를 이용하는 방법으로서, 연안해역의 전 수층을 대상으로 해파리의 대량 발생 시기에 제거활동이 가능하다.

일반적으로 예인어구의 자루그물에 3단계로 구성되어 있는 와이어그물망을 제작하여 예망속도 및 대형해파리의 수중 저항을 고려하여 해파리를 절단하는 원리이며, 수중카메라를 부착하여 그 실효성을 평가한 바 있다. 우리나라를 비롯한 일본연안수역에 대형해파리가 대량으로 발생 시기에 노무라입깃해파리를 대상으로 제거활동을 수행한 바 있다.

예인형 3단 절단망 어구의 길이는 약 8 m, 힘줄 4가닥은 직경 24 mm PP 로프를 사용하며 망지는 PE Net 3 mm×60 mm, 제거망의 옆판 및 등(밑)판의 콧수는 기존 트롤 어구(각 46코 및 76

코)와 동일하게 제작한다. 대형해파리가 어구 속의 흐름에 의하여 절단되도록 스테인리스와이어 그리드 절단망을 3군데 장착하며, Bar 길이는 각각 20 cm, 15 cm, 10 cm, 절단망의 간격은 제거망 앞쪽 끝에서 각각 2 m, 2.5 m, 2.5 m 정도의 위치에 부착하여 사용한다. 이러한 3단 절단망은 자루그물 전 또는 후에 탈·부착이 가능하여 해파리가 대량 발생하는 시기에 효과적으로 사용할 수 있다.



[Fig. 1] Triple net cutting device for towing net.

예인형 3단 해파리절단망은 투·양망과정이 일반 인망어구 조업선과 동일한 방법으로 운용하며, 일반 저인망(트롤)에 해파리 3단 절단망을 설치하고 예망시간은 해파리 대량 출현 정도에 따라 조절이 가능하도록 조절할 수 있으며 예망속도 약 4 kt로 제거 활동 작업이 가능하다. 국립수산물과학원에서는 개발된 예인형 3단 해파리 절단망의 제거 성능을 평가하기 위하여 2010년도 8월경 부산인근해역에서 시험조사선 탐구3호(R/V 383GT)에 자체 개발한 해파리 절단망을 부착하여 해파리 절단 효과를 확인한 결과, 자루그물 입구에 들어온 노무라입깃해파리는 전량 100 - 300g로 절단되어 사망되는 것을 확인하였다.



[Fig. 2] Some pieces of N. Jellyfish by the triple net cutting device.

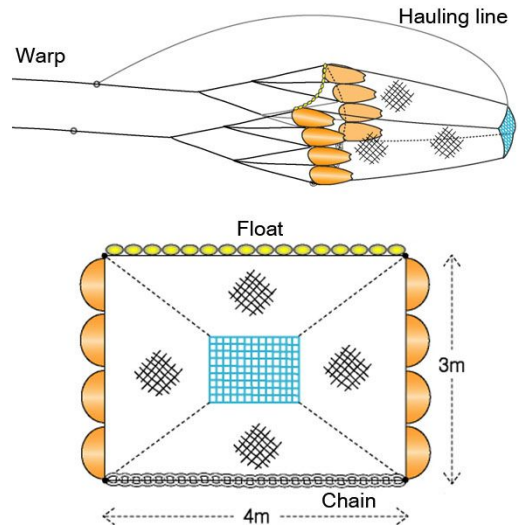
예인형 3단 해파리절단망은 기존 예망어구의 조업방법과 동일한 방법으로 제거작업이 가능하기 때문에 별도의 운용기술이 필요하지 않는 장점이 있으며, 예망어구의 특성을 가지고 있으므로 해파리 분포수층에 따라 운용이 가능하며 절단된 후 배출되기 때문에 해파리의 크기에 상관없이 지속적으로 절단작업이 가능하다. 따라서, 예망장치가 장착된 모든 선박에 적용 가능하므로 대규모로 해파리 제거 활동이 가능하다. 또한, 3단 절단망 제작비용은 약 200 - 300만원으로 저비용으로 제작이 가능하여 보급이 용이할 것으로 판단하며, 예망장치가 장착된 시험조사선, 관공선 뿐만 아니라 일반 민간 조업선에서도 사용이 가능하다.

## 2. 범포 전개형 해파리절단망

해파리의 피해를 제거하는 방안으로 가장 보편적인 방법인 대형트롤이나 쌍끌이저인망 등의 대형어선을 이용한 방법은 조업 보상 등 비용적인 측면과 연안해역에서의 활용이 극히 제한적으로 사용될 수 있다. 따라서, 해수욕장과 같은 수심이 얇은 연안해역에서는 대량 출현시기에 소형선박을 이용하는 방안을 검토할 수 있는데, 이를 위해 1척의 소형선박을 이용하여 소규모 제거활동이 가능하다.

범포 전개형 해파리절단망은 관공선 및 트롤장

비부재 선박이나 소형어선을 포함한 선박에서도 사용 가능하도록 설계하여 표·중층에 분포하고 있는 해파리를 효과적으로 제거가 가능하며, 어구의 소형화로 제거활동이 편리하고 선내 수납이 용이하다는 장점이 있다.

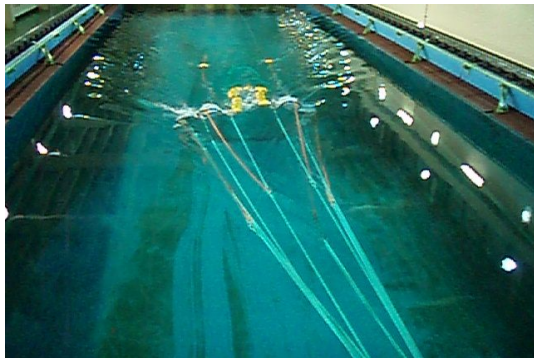


[Fig. 3] Canvas opening type cutting net.

범포 전개형 해파리절단망은 어구길이 4 m, 어구폭 4 m, 어구높이 3 m이며, 끌줄 길이는 두갈래줄 (10 m), 여섯갈래줄 (10 m), 끌줄 (100 m)로 구성되며, 양쪽 옆판에 부착되는 범포 (Kite)는 고밀도 섬유 재질로써 총 8개를 부착하여 사용한다. 자루그물의 망지는 PE Net 60 ply × 100 mm를 사용하고 길이 방향 및 폭 방향 성형율은 각각 95.4%, 30%로 하였으며, 완성된 제거망은 폭 4 m, 높이 3 m로 제작한다. 해파리가 어구 속의 흐름에 의하여 잘게 잘려지도록 스테인리스와이어 (Ø2.3 mm × 600 mm) 규격의 격자 구조 절단망 (한발길이 150 mm)을 자루그물 끝에 장착하여 사용하며, 해파리제거망을 예망하는데 필요한 끌줄은 2줄이며, 각 줄은 PP로프 (Ø20mm × 200m) 규격을 사용한다.

범포 전개형 해파리절단망은 예망 수심조절을

위하여 발줄 부분에 체인 또는 납추 무게 50-100 kg를 사용하여 조절하며, 추 무게 및 예인속도에 의해 어구수심 조절이 가능하다. 제거망의 예망은 선미 양쪽 끝단에 끌줄을 선박고정용 말뚝에 고정하여 일정시간동안 예망하며, 예망속도는 2.5 - 4.0 kt 내외로 가능한데, 해파리 주요 수층 범위를 고려하여 효율적인 절단을 위해 3.0 kt 내외 유지하면서 예인한다. 투망은 선미에서 끝자루부터 투망한 후 미속 전진하면서 범포, 갈래줄, 끌줄 순으로 투망하고 양망은 선미에 끌줄을 감아올리다가 양망줄이 올라오면, 이 줄을 잡아 올려 끝자루, 범포, 갈래줄 순으로 적은 힘으로 양망이 가능하다.



[Fig. 4] Net Opening test of Kite type cutting device in the towing tank.

한편, 범포의 전개성능은 국립수산과학원 3차원 예인수조를 이용하여 어구 전개 성능 실험을 실시한 결과, 범포의 전개성능은 설계 대비 약 70 - 75% 정도로 확인하였다. 해파리 제거활동을 위한 예망 시간이 일정하다고 가정하면, 그물의 입구를 고려할 경우 보편적인 트롤의 입구 전개 면적(약 3,000 m<sup>2</sup>)에 비해 예망 입구 전개 면적은 약 9 m<sup>2</sup>로서, 제거효율은 대형트롤어구에 비해 0.3% 정도로 극히 미비하지만, 수심이 얇은 연안 해역에서 해저생태계 피해를 최소화시킬 수 있고 출현하는 다양한 해파리를 제거할 수 있는 장점이 있다.

### 3. 해파리 제거 로봇 시스템

최근 로봇기술의 관심의 증가로 인해 밀집분포하는 해파리를 흡입하여 특수 프로펠러로 분쇄하는 해파리 제거 군집로봇 시스템(JEROS, KAIST)가 개발되었으나, 개발된 로봇은 소형규모(L1.5 m × W1.0 m × H1.0 m)이므로 파도가 높은 상황이나 넓은 해역을 대상으로 적용하기에는 다소 어려움이 있다. 또한, 제작비용이 1대당 약 5천만원에 해당하며, 관리 및 운영비용에 추가적인 비용이 발생될 것으로 사료되며, 다소 실용화단계에는 부정적인 측면을 가지고 있다.



[Fig. 5] JEROS (Jellyfish Elimination RObotic Swarm) developed by KAIST (2012).

또한, 표층에 분포하고 있는 해파리를 대상으로 하고 있고 중·저층에 분포하는 해파리는 제거하기 어려우며, 연안에 분포하는 보름달물해파리를 대상으로 적용이 가능하므로 시스템을 활용도는 낮다고 볼 수 있다. 제거 효율 측면에서 극히 해수면(최대 제거면적; W1.0 m × H1.0 m = 1m<sup>2</sup>)을 대상으로 하고 있으므로, 기존 예인형 해파리 제거망(소형; W4 m × H3 m = 12 m<sup>2</sup>, 대형; W80 m × H50 m = 4,800 m<sup>2</sup>)에 비해, 최소 12배에서 최대 4,800배정도로 상당히 낮은 제거 효율이며, 현실적으로 활용도는 매우 낮은 것으로 판단된다.

### Ⅲ. 해파리 차단 방안 기술

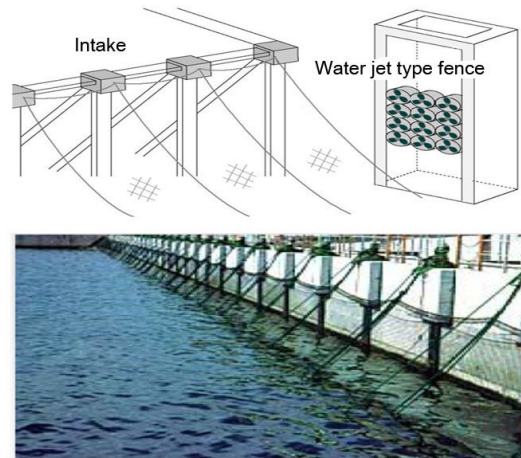
#### 1. 발전소 취수구 유입방지용 차단망

국내외 해양생물의 유입을 방지하기 위한 시설물은 연안해역에 설비되어 있는 화력, 원자력 등 전력공급원인 주요 발전소에서 시스템의 과부하로 인해 발생하는 열 방지를 위해 해수를 유입하여 시설물을 안정시키는 역할을 발전소 취수구 처리시스템을 대상으로 발전되어 왔다. 이러한 발전소 취수구에는 발전소의 해수 공급을 위한 펌프 혹은 수위에 따라 빠른 유속으로 해수가 공급되면서 다양한 해양생물들이 유입되는데, 유입되는 이물질이나 해파리를 포함한 해양생물들을 제거하는 일반적 방식으로 해외 선진국에서는 그물망을 이용한 시스템을 대부분 사용하고 있으며, 이러한 방식은 국내외 발전소에서 보편적으로 사용되고 있고 소량 발생하는 해파리 제거에도 효과가 있다(HOBMC, 2013).

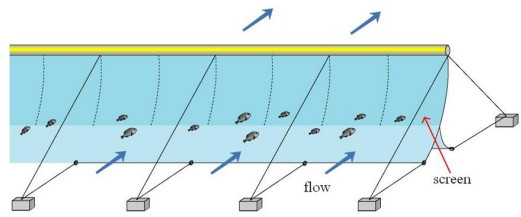
해양유입생물 차단 그물망은 다른 수중 구조물에 비해서, 다양한 취수구 형태에 따라 적절한 형태로 설치가 가능하며 비교적 저렴한 가격으로 차단망을 설치할 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 일반적으로 정치망과 같이 고정형 어구에 사용하는 그물감은 해양 부착생물의 영향으로 그물의 유체저항을 커지게 되고 어구의 손실을 방지하기 위해, 특히, 부착생물의 성장이 빠른 하절기의 경우 약 15일간 1회 정도의 교체주기를 가지고 있다. 그러나, 최근 부착생물을 방지하는 방오도로 그물감을 적용하여 일반 그물감에 비해서 교체주기가 약 2-3배가량 늘어나는 장점이 있으나, 여전히 그물감 매듭부분 부착 공간의 발생과 유입생물 차단망으로서의 상용화에 대한 많은 문제점을 가지고 있다.

일본에서는 취수구 앞쪽에 차단망을 설치하여 해양생물의 접근을 방지하고 있으며, 차단망과 취수구 사이에 초음파 탐지장치 혹은 water jet 방식을 적용하여 모니터링 감시체제를 운영하고

있으며 [Fig. 6], 미국에서도 일본과 유사한 방식으로 취수구 앞쪽에 차단망을 설치하여 해양생물의 접근을 방지하고 있는데, 특이한 점은 2중 차단망을 취수구 앞쪽에 설치하여 조류의 흐름에 따라 그물의 유체저항을 분산시켜 차단망의 안정성을 확보하고 있다 [Fig. 7].



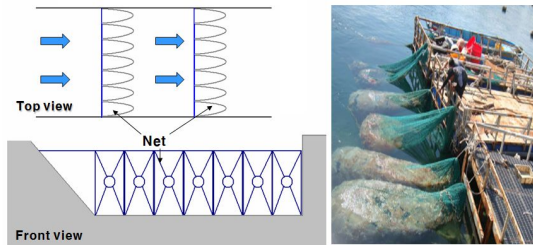
[Fig. 6] Net screen for plant intake in Japan.



[Fig. 7] Net screen for plant intake in USA.

우리나라 울진 원자력발전소의 경우, 취수로 입구에 자루형태의 그물을 1, 2단계의 중망의 구조로 다량 배치하여 유입생물을 차단하는 방법을 사용하고 있다 [Fig. 8]. 이러한 취수로에서 자루 그물을 이용하는 차단하는 방식은 비교적 적은 예산으로 해양생물의 포집 성능이 우수하나, 주기적으로 어획물을 수거해야 하는 불편함과 어망의 교체주기가 빈번하여 인력 소모가 많다는 단점이 있고, 해파리가 대량 발생하는 하절기에는 그물이 파손되어 발전소에 치명적일 수 있다는

우려가 있다.



[Fig. 8] Net screen for marine organism into Plant intake (Ulsan Nuclear Power Plant).

## 2. 발전소 취수구 유입방지 스크린시스템

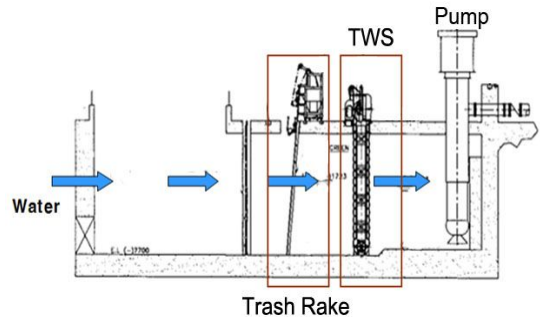
연안해역에 위치하고 있는 발전소에서 이용하는 Trash Rake(이하 TR)와 Travelling Water Screen(이하 TWS)은 발전소 취수구에 유입되는 각종 쓰레기나 이물질, 부유생물 등을 제거하는 시스템으로 1980년대부터 현재까지 국내외 발전소에서 보편적으로 사용되고 있으며, 소량의 해파리 제거에도 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 그러나, 최근 이상기후현상 및 연안해역의 수중 구조물 설치에 따라, 주변 해역에 보름달물해파리가 서식하게 되었고 대량으로 발생하는 시기에 발전소의 취수구로 유입되어 감발문제를 발생시키고 있다.

국내외 일반적으로 도입되어 있는 TR 및 TWS 장치는 1차적으로 여과장치인 Trash Rake가 쓰레기나 각종 부유성 이물질들을 걸러내는 bar 스크린과 걸러진 이물질을 긁어모으는 Rake basket으로 구성되며, 2차 여과 장치인 TWS는 컨베이어 벨트 타입의 스크린 벨트를 상하로 순환시키면서 스크린에 붙어 올라오는 이물질을 모아서 처리하는 시스템이다 [Fig. 9].

이러한 시스템은 평상시에는 처리할 수 있는 용량을 가지고 있으나, 수분 및 점액질로 구성된 해파리를 대상으로 설계된 시스템이 아니므로, 해파리가 대량 유입될 시기에는 과부하로 인해 시스템을 구성하는 프레임이 휘거나 부속품 파손

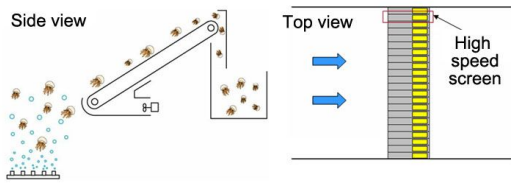
등으로 인한 처리 오작동의 문제를 발생시킨다. 이를 해결하기 위해 기존 시스템의 부품 및 프레임 보강을 비롯하여 유입된 이물질을 퍼 올리는 장비의 형상을 개조하거나 스크린시스템의 출력 용량을 확장하여 처리 성능을 높이고 있는 실정이다.

최근 국내에서 개발된 고속 스크린 시스템은 이러한 단점을 보완하기 위해 개발된 것으로, 공기방울을 이용해 유입생물을 부상시킨 후 컨베이어 타입의 스크린을 이용하여 가두리 그물로 이송하는 시스템이다 [Fig. 9].



[Fig. 9] Trash Rake and Travelling Water Screen system.

본 시스템은 처리속도가 빠르고, 시스템 자동화를 통해 인력소모를 많이 줄인 장점이 있으나, 시스템 설치 시 취수로 입구 또는 취수구의 폭에 맞게 여러 대를 설치해야하므로 시설에 많은 비용이 들며, 생물 유입 여부와 상관없이 전체 시스템을 고속으로 상시 가동해야하므로 에너지 낭비가 많다는 단점이 있다. 또한, 고속 스크린의 제거 분리 효율을 높이기 위해, 일정 경사를 확보해야 하므로, 깊은 수심까지 시스템을 설치하기에는 다소 공간적인 제약이 있는 경우에 적용되기 힘들기 때문에 공기방울을 이용하여 최대한 많은 양의 해파리를 포함한 유해생물을 부상시키는 방식을 사용하고 있다(KORDI, 2005; Lee et al., 2006).



[Fig. 10] High speed screen system for jellyfish (KORDI, 2005).

한편, 이미 적용된 울진원자력발전소에서는 해파리 및 크릴 제거 수집용 가두리에 수집된 유해생물의 이송을 위해 펌프 및 저장 시설 등을 갖춘 선박과 인력이 상시 필요하다는 등의 많은 문제점이 발생하여 이를 개선한 시스템이 도입되었으나, 최근 해파리의 대량 연간 발생 빈도가 계속 줄어들고 있으므로, 대량발생에 따른 시스템의 효율성 평가는 이루어지지 않고 있는 실정이다.

### 3. 유입방지용 차단장치 국외 사례

일본에서 해파리의 대량유입을 방지하는 방안으로 적용하는 방안은 레이크(Rake)가 부착된 바스크린(bar screen)을 적용하거나, 냉각용 해수 취수층을 표층으로 변경하는 등의 방안이 제안된 바 있다. 그러나, 일반적인 유입방지용 차단장치는 1차적으로 유입 그물방지막을 사용하고, 공기방울이나 수류발생장치 등을 단독 혹은 동시에 사용하거나, 유입 방지막 하나의 시스템으로 적용하는 방안이 대부분이다.

예를 들면, 취수로로 curtain wall의 형태로 만들어 해파리가 집적하는 공간을 마련하고, 압축공기를 이용하여 해파리를 부상시킨 후, 이를 물리적으로 제거하는 방법이 있다. 카시와자키 카리와원전의 경우, 취수구가 발전소 양편에 위치하며 취수구 수심이 8-13 m 정도인데, 네트를 일차적으로 설치하고, 공기압축기(compressor)를 이용하여 해저바닥의 해파리를 위로 부유하게 한 후 수거한다. 이 방법으로 2001년에 약 30,000톤,

2002년에 약 3,000톤의 해파리가 수거되었다. 이 방법은 현재 일본의 많은 원자력발전소 등에서 고려되는 방법으로 각 취수구의 형식 및 취수방식에 따라 적용하고 있다 (KORDI, 2005).

그러나, 일본에서 적용하고 있는 방안들의 효과는 극히 제한적이라고 할 수 있다. 따라서, 해파리의 생활사와 다른 생물과의 관계 조사를 통한 대량 발생의 원인과 예측을 강조하고 있다. 특히, 도쿄만 도쿄전력주식회사 소속의 히가시오기시마 화력발전소는 주로 봄철에 10-15 cm 정도의 해파리가 유입되는 것을 취수구 전면에 채집 네트를 설치하고, 고성능 비디오카메라와 이미지 분석장치를 이용하여 유입생물을 감시하여 일정량을 초과하면 경보가 울리도록 하였다 (KORDI, 2005).

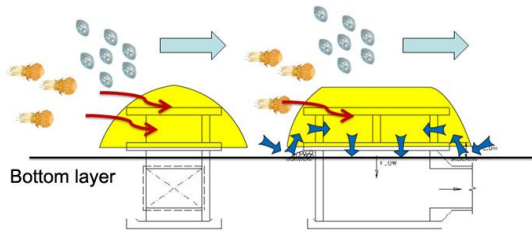
미국은 생물의 대량유입에 의한 발전소 취수구의 막힘 뿐 아니라, 유입생물의 피해를 최소화하기 위해 냉각수처리장치(cooling water intake regulation)에 의해 생물의 유입을 사전에 차단한다 (EPA, 2001; EPA, 2004). 주로 그물방지막을 이용하고 있으며, 부착물을 떨어내기 위해 고압의 해수를 이용하여 그물방지막의 유지한다.

### 4. 해파리대상 발전소취수구 유입방지대책

최근 연안해역에 설치하는 발전소의 냉각수 유입과 부유수중생물들의 유입을 사전에 방지하기 위하여 해저수층의 냉각수를 이용하기 위한 수중취수로 형태를 설비한다. 그러나, 해파리차단망이 설치되어 있는 일반적인 채널형태의 취수로 구조보다 수중취수로에 유입되는 해양생물을 1차적으로 차단할 수 있는 방식이 장점이 될 수 있으나, 저층부유생물들이 유입될 가능성은 항상 존재한다.

수중취수구는 어패류나 기타 유해물질이 수중취수로 입구쪽으로 유입이 되지 않도록 접근유속을 최소화하여 설계하며, 취수구의 정면과 양 측면이 수중에 열려있는 상태이므로, 차단막 구조의 보강이 필요하다. 또한, 이러한 차단막 구조는

수중에서 유입되는 해양생물이 비교적 유영행동이 거의 없거나 적은 생물을 대상으로 하기 때문에, 대상생물이 유입될 때 조류의 영향을 고려하고 접근유속에서 차단막에 끼이지 않는 구조가 용이하다.



[Fig. 11] Blocking effect by the underwater intake of power plant.

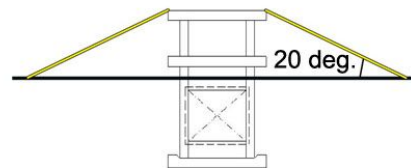
수중에서 유입되는 해파리는 저층에서 유입되기 보다는 표·중층에서 유입될 가능성이 높으므로, 취수구가 직접적으로 노출되어 있는 조건보다 아래와 같이 취수구 윗부분에 돔형태로 차단막을 설치하여 직접적인 조류의 영향을 받지 않는 조건을 생각할 수 있다. 이러한 방식은 취수구가 해저면과 2.0m 정도의 높이로 인해, 해저에 침전된 물질들의 유입이 최소화될 수 있는 방법을 고려하여 설치할 필요가 있다 [Fig. 11]. 또한, 수중취수구에 해파리의 유입을 방지하기 위한 방법으로 취수구입구에 20 mm 정도의 메쉬망(철제 혹은 그물망)을 외부에 부착하여 해파리의 유입을 차단하는 방법도 고려해 볼 수 있다. 이러한 방식은 해파리의 처리단계가 없는 장점이 있으나, 주기적으로 그물을 교체해야 한다는 불편함이 있다. 또한, 해파리의 대량출현 시기나 하절기에 일시적으로 운용할 수 있으며 미운용 시 그물망만 철거할 수 있다는 특징이 있다.

연근해어업에서 사용하는 끌어구류의 어획물 손실을 저감하기 위한 해파리의 분리배출장치는 해파리의 작은 유영능력과 선속에 의해 해파리를 분리시키는 분리망과 배출망의 설치각도에 따라 배출효율이 결정된다 (Kim et al., 2008). 따라서,

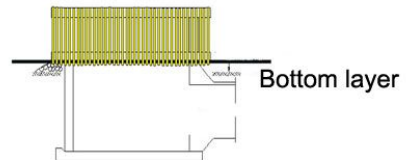
취수구에서의 그물망으로 설치할 경우, 해파리 배출률이 가장 높게 나타나는 설치 경사각을 20°로 결정할 필요가 있으나, 고품체로 된 차단망 구조는 주변 구조물을 고려하여 배출 경사각을 30 - 55°까지 가능하다고 판단된다 [Fig. 12].

취수단계에서 해파리의 유입을 근원적으로 차단하는 방안은 기술적인 측면과 경제적인 측면에서도 효율성이 높은 방법으로 볼 수 있으나, 기존의 설계안은 조류의 흐름 방향에 따라 그물망에 해파리가 부착되는 사례 혹은 해저에 침전될 가능성이 높으므로, 차단그물망의 유체저항을 적은 구조 형태를 고려할 경우 차단효과는 더욱 높을 것으로 사료된다. 추가적으로, 해파리가 주변 유속장에 의해 취수구 쪽으로 유입되지 않으면서 차단망을 따라 흘러 지나갈 수 있는 원형구조로 설치하고, 그물망은 스크린형태로 주기적으로 교체할 수 있는 시스템으로 구조를 고려할 수도 있다.

Front view



Side view

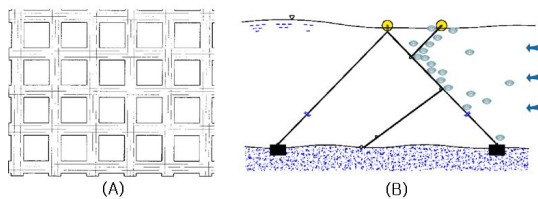


[Fig. 12] Blocking construction for jellyfish by the underwater intake of power plant.

그물망 구조의 차단막은 부착생물 부착을 방지하는 기능과 최대 유속의 저항에 견딜 수 있는 방식으로 설계가 요구된다. 해파리 차단·유도장치는 부착생물이나 유속저항에 견딜 수 있는 설계방법이 고안되어야 하므로, 기존 다이아몬드형식의 그물 구조는 가격은 저렴하나, 저항에 따른



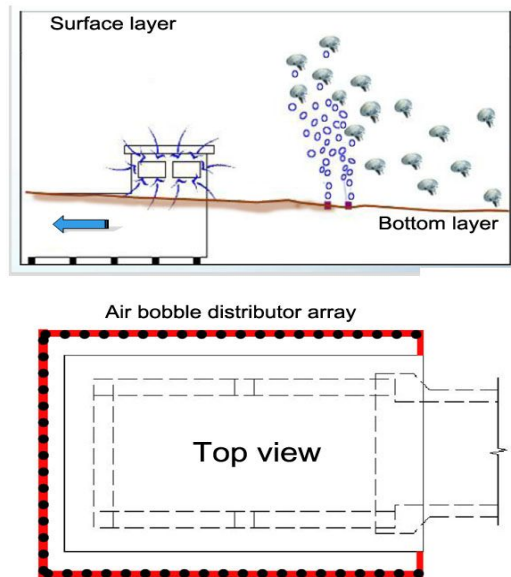
변형이 있으며 부착생물에 의한 부하가 크다는 단점이 있다. 이에 따라 차단-유도장치는 변형이 적고, 해파리의 낚힘 현상을 방지하여 미끄러져 포획부로 유도될 수 있는 사각형구조로 설치되어야 하며, 이끼나 부유생물이 가능한 부착하지 않는 재질로 처리되어야 한다. 또한, 최대 유속저항에서도 견딜 수 있는 구조로 설치되어야 하며, 파랑에 의해 1차 차단망으로 부터 유입되는 것을 방지하기 위하여 2차 차단망 구조로 설계되어야 하고, 취수구 주변에 설치되는 해파리 차단-유도장치는 해저지형 및 유속장을 고려하여 해파리나 유입생물이 차단망에 의해 주변 유속장에 의해 취수구 쪽으로 유입이 되지 않고 흘러갈 수 있도록 최적의 경사각으로 설치되어 있는 구조가 필요하다 [Fig. 13].



[Fig. 13] Square net (A) and Construction (B) of Jellyfish fence.

취수구 주변에 일정 지점에서 기포 발생장치를 설치하여 해파리 대량발생시기에 가동하는 방식으로서, 어패류나 기타 이물질이 유입되지 않는 범위(거리)를 고려하여 수중취수구 주변에 배열하여 설치하여 해파리를 가능한 빠른 속도로 수중 부양시킬 수 있는 공기방울 크기의 노즐에서 발생 공기방울을 이용하는 방식이다 [Fig. 14]. 해양생물의 해수면으로의 부상이나 특히 어류와 같은 유영생물의 차단을 위해 일반적으로 적용하는 공기방울을 이용한 방법은 유속장이 빠르지 않는 해역에서 적용 가능한 방법으로 사료되나, 육상 혹은 주변시설로부터의 공기압을 고려한 산소발생 시스템을 구축하여야 하고 전원공급이 필요하며, 수중취수구가 설치되어 있는 해역의 입구 유

속장이 다소 빠르기 때문에, 효과적인 적용 방법으로는 수중취수구 주변으로부터 근거리에서 공기방울 발생장치를 배열하여 고압의 공기방울 배출이 가능한 구조로 설치하여 취수구로 유입을 차단할 수 있다.



[Fig. 14] Construction and application of air bubble fence at the underwater intake at a power plant.

## 5. 해수욕장 해파리피해 저감 방안

발전소를 포함한 산업기반시설은 해수의 유통이 원활한 연안해역에 위치하고 있으며, 대량의 해수 유입을 위하여 취수구는 항상 가동되므로 부유성 해파리의 집적 현상이 나타나기 용이하므로 취수구 주변에 다양한 방식의 제거장치 설치 및 가동을 통하여 유입된 해파리를 제거하기 좋은 조건을 가지고 있다. 그러나, 주변 연안해역에 위치하고 있는 해수욕장과 같은 자연발생유원지는 지속적인 해파리 모니터링과 조석에 따른 유속장, 주변 시설물과 구조물의 연계, 해안선의 길이 및 수심 등을 고려하여 규모가 다소 크거나 긴 해파리 차단망을 고려해야만 한다 [Table 1].

<Table 1> Consideration of jellyfish blocking methods in beaches and plants

Item	Contents
Monitoring jellyfish distribution near to the beach and the power plant	- Monitoring the distribution of jellyfish blooms near to coastal and offshore areas - Monitoring marine environmental conditions in jellyfish blooms
Analyzing inflows of jellyfish by tidal currents	- Measuring a current field of survey area
Investigation bottom surfaces and surrounding facilities	- Understanding bottom surface informations on the beach using an echo sounder or Multi Beam System - Planning effective blocking systems in the beach and plant using the surrounding facilities in coastal areas
Applying jellyfish blocking safety systems	- Applying safety monitoring techniques - Operating remote monitoring systems for effective management and maintenance - Developing technology for antifouling of jellyfish fence and non-catching for fish
Applying removal systems to flowing jellyfish	- Testing the effectiveness of jellyfish removal systems and suggesting improvements

특히, 연안해역의 해안가에서는 수평의 파동보다 상하의 파동이 크기 때문에 고정체의 상하이동에 대한 안정성과 밀물·썰물 등의 유속장과 파도 및 바람 등에 의한 외력에 견딜 수 있는 구조로 설치되어야 한다.

또한, 대량 유입된 해파리의 해수욕장 유입에 대한 차단 및 유도시스템과 포집된 해파리의 이송 및 탈수 및 제거시스템의 운영과 독성 노무라입깃해파리의 대량 발생에 따른 해수욕장 피서객 재난 대비책 보완 방안 마련이 필요하다. 특히, 제트스키 및 바나나보트 등 해양레저기구 운영방안에 따른 해파리 피해예방 차단장치 설치 협조와 해양경찰청 상호 협력 체계 구축이 필요하며, 추가적인 관리비용을 최소화하기 위한 제시된 독성 해파리의 탐지 및 영상 전송 시스템과 차단·유도시스템의 효과 평가 및 관내 의견 수렴에 따른 개선방향의 제시가 반드시 필요하다고 판단된다.

#### IV. 해파리 탐지 및 출현 정보 제공 기술

발전소 주변의 해양생물 유입을 대비하기 위하

여 차단·유도장치를 설치하고 음향탐지 혹은 카메라 영상에 의해서 유입생물의 양에 의해 빠르고 효과적인 방법으로 펌프나 컨베이어 수송기구를 통해 해수와 유해생물을 분리시켜 최종적으로 탈수를 하여 처리하는 방식을 고려할 수 있다. 이러한 시스템은 다양한 최신 장비들의 개발로 인해서 보다 효과적으로 대응하고 있으나, 사전에 대량발생 정보를 파악하는 정보시스템의 구축이 필요하다.

KORDI(2005)에서는 해파리나 크릴류 등과 같은 해양생물의 대량유입에 대한 사전 정보, 또는 경보체계를 위한 감시 방안도 제시하였다. 발전소 취수설비로부터 인근 해양까지의 공간적 범위를 여러 구간으로 나누어서 취수구 및 취수로 내 감시모니터링장치, 환경요인 등에 의해 해양생물 유입에 의한 발전소 사고 가능성에 대한 감시가 단계적으로 가능하다고 제시하였다.

발전소의 취수구에 유입된 해파리는 수중취수로를 따라 순환수펌프구조물로 유입된다. 따라서, 취수구에서 1차적으로 차단을 하면서 주변에 해양생물의 유입상황을 사전에 모니터링을 실시하여 해파리의 유입이 탐지되는 시점에 조기에 대량의 시스템을 가동시킬 수 있는 적극적인 대안

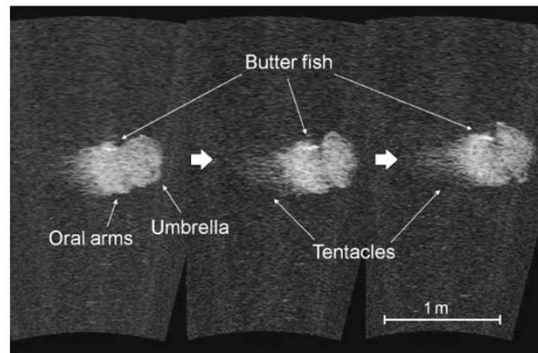
이 필요하다. 수영능력이 있는 어류를 포함하여 해파리를 포함한 수중 해양생물의 확인방법으로, 음향장치와 광학장치를 주로 많이 적용하고 있다. 광학장치의 좁은 탐지범위의 한계를 극복하기 위해 낮은 해상도에도 넓은 범위영역을 탐지할 수 있는 음향장치를 상호 보완한 시스템이 적용될 수 있다.

해양생물 동물플랑크톤을 대상으로 한 광학연구는 silhouette photography (Ortner et al., 1979)과 Critter Cam system (Stickler et al., 1977)을 도입되었으며 실제 현장에서의 적용은 불가능하였으나, 최근 수중모니터링 기술의 발달로 인하여 비디오 플랑크톤 기록 장치를 이용하여 현장에서 적용되고 있다 (Price, 1989; Davis et al., 1992).

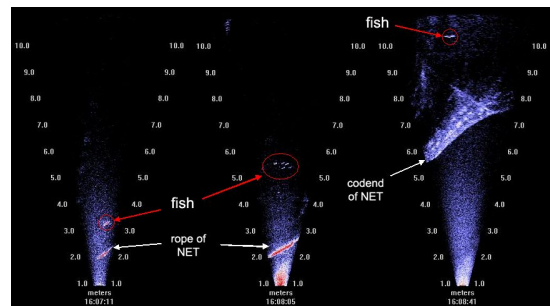
한편, 광학장치에 의한 방법은 빛의 투과율과 부유입자에 의해 제약될 수 있으며 이러한 요인은 현장에서 생물체간의 상호 작용과 자연상태에서의 행동 특성 분석에 왜곡될 수 있으므로, 2주파수로 구성된 고해상도 수중음향카메라 (Dual frequency IDentification SONar; DIDSON, Ocean Marine Industries Inc., USA)에서 개발되어 전 세계적으로 해양생물학 및 구조해석 분야에서 크게 호응을 얻고 있으며, 이 시스템을 이용하여 해파리와 공생생물에 대한 규명 (Honda and Watanabe, 2007)과 수중해양생물의 행동특성에 대한 규명 등의 활용도는 높은 실정이다 [Fig. 15]. 우리나라에서도 수중음향카메라를 도입하여 낙동강하구언 하천 흐름의 단절로 인해 회유성 어류의 이동을 원활히 하고자 설치된 어도와 지역주민이 운행하는 소형선박의 통행을 위하여 설치된 관문을 대상으로, 회유성 어류의 시간대별 유입량을 조사하여 수위에 따른 어류의 이동량과 패턴을 관측 (Yang et al., 2010)하고 시간대별 채집어구에 의한 종 조성을 확인한 바 있다 [Fig. 16].

취수구에 유입되는 생물을 탐지하기 위한 모니터링시스템은 해파리 등 유입생물의 종류와 양을 측정할 수 있는 음향신호의 식별을 위한 기초적인 알고리즘을 적용하여 어류와 같은 수영능력이

높은 해양생물로 인해 관독어류를 최소화할 수 있는 시스템을 고려해야 하며, 해파리 혹은 해양생물이 대량으로 유입될 경우, 조기경보를 하여 이송-제거시스템의 순차적인 자동제어기술로 인해 관리비용을 최소화할 수 있는 시스템을 구축하기 위한 원격 정보를 제공할 수 있어야 한다.



[Fig. 15] Tracking of *N. jellyfish* by acoustic camera system (Honda and Watanabe, 2007).



[Fig. 16] An example of fish road monitoring at an estuary gate (Yang et al., 2010).

또한, 취수구에 유입될 수 있는 어류와 같은 유영생물의 접근을 방지하기 위하여 입구 주변에 위협이 될 수 있는 적색 LED 등을 설치하여 어류의 도피행동을 통해 유입을 제어할 수 있으며, 수중 감시카메라를 설치하여 사무실에서 해양생물의 유입정도를 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

대량 유입된 유해 해양생물을 차단하여 처리하

는 방식은 펌프에 의해서 흡입하는 방식이 사용되고 있지만, 해파리나 난바다곤쟁이류가 대량으로 유입되면 펌프 성능은 제대로 발휘하지 못하는 단점이 있다. 따라서, 유도된 유입생물은 포획부에서 육상시설로 이송하기 위한 방식으로 스크류 컨베어시스템이나 펌프의 성능을 발휘하기 위하여 절단장치를 추가한 방식으로 고려할 수 있다. 스크류 컨베어시스템은 최대 유입량을 고려하여 충분한 크기로 제작되어야 하며, 절단펌프 방식에 비해 제거 시 해파리의 수분이 1차적으로 제거되는 것과 관리비용이 약 1/2정도로 저렴하다는 장점이 있다.

유입생물을 처리하는 방식으로 해파리의 수분을 제거가 필수적이므로, 압축이나 탈수에 의해 제거하는 방식을 고려할 수 있다. 일반적으로 종류별로 롤러방식, 압축방식, 회전방식과 스크류방식 등을 고려할 수 있다. 롤러방식은 취급이 간편하며 보름달물해파리와 같은 소형해파리에 적용이 가능하나 대량 처리가 불가능하다는 단점이 있으며, 대량으로 유입이 되는 경우에는 스크류방식 및 유압식이나 회전에 의한 압축시스템을 고려할 수 있다. 또한, 수분이 제거된 후, 발전소 내부에서 처리되는 물질에 대해서는 산업폐기물로 처리되기 때문에 규격화된 형태로 처리하는 방식을 고려해야 할 필요가 있다.

## V. 결론

해파리의 피해를 저감하는 방법으로 가장 보편적인 방법은 트롤이나 쌍끌이저인망 등의 예망용 조업선에 구비된 어구를 이용하는 방안으로서, 연안해역의 전 수층을 대상으로 해파리의 대량발생 시기에 제거활동이 가능하다. 예인형 3단 해파리절단망은 기존 예망어구의 조업방법과 동일한 방법으로 제거작업이 가능하기 때문에 별도의 운용기술이 필요하지 않는 장점이 있으며, 예망어구의 특성을 가지고 있으므로 해파리 분포수층

에 따라 운용이 가능하며 절단된 후 배출되기 때문에 해파리의 크기에 상관없이 지속적으로 절단작업이 가능하다. 따라서, 예망장치가 장착된 모든 선박에 적용 가능하므로 대규모로 해파리 제거 활동이 가능하다. 범포 전개형 해파리절단망은 관공선 및 트롤장비부재 선박이나 소형어선을 포함한 선박에서도 사용 가능하도록 설계하여 표·중층에 분포하고 있는 해파리를 효과적으로 제거가 가능하며, 어구의 소형화로 제거활동이 편리하고 선내 수납이 용이하다는 장점이 있다.

해양에서 집적하여 분포하는 경향이 강한 해파리가 발전소의 취수구에 유입될 때, 전체적인 출현량보다 단위 시간 당 유입밀도의 크고 작음이 스크린 폐쇄 사고를 유발하는 데 더 결정적일 수 있다. 이를 위해서는 현장에서 유입될 수 있는 해파리의 최대 밀도에 대하여, 개선된 스크린의 성능이 시험되어야 한다. 1) 일반적으로 도입된 traveling screen에서의 대량으로 포집된 해파리의 인양을 위한 각도와 바스켓의 구조에 대한 검토가 필요하며, 2) 유도망 혹은 에어버블을 이용한 해파리 집적 후, 제거과정에서 수위 차에 따른 운영방안을 개선하고, 3) 국립수산과학원의 해파리 출현 정보, 발전소 인근의 해파리 분포에 관한 정보, 취수설비 주변의 해파리 감시 장비, 취수구 스크린의 차압 기록에 의한 감시 등이 필요하다.

기존 해파리를 포함한 해양생물의 대량 유입시 국내외 처리방안에 관한 검토를 거쳐 해파리의 대량 유입에 의한 발전소 수중 취수구 스크린의 막힘 사고에 대응하기 위해, 1) 일정한 각도와 형태를 갖는 그물차단망, 돔 형태의 차단망, 고정형 파일형 차단구조 등의 설치, 2) 그물망구조는 생물의 부착이나 유속에 저항할 수 있는 설계방법의 고안과 사각형 메쉬구조의 선택, 3) 기포발생장치에 의한 해파리의 유입제어, 4) 대량 출현 경보시스템의 구축 등이 필요한 것으로 판단된다.

일반적으로 발전소 취수구에 유입되는 해양쓰레기나 해파리를 포함한 해양생물들을 제거하는

방식으로는 취수구주변에 그물망을 이용한 시스템을 대부분 사용하고 있으며, 국내외 발전소에서도 보편적으로 적용되고 있다. 그러나 그물망은 부착생물을 방지하기 위해 주기적으로 차단망을 교체해야 하는 불편함이 있고 유입되는 해양생물을 제거하기 위한 자루그물형태도 활용되고 있으나, 인력 소모가 많고 대량 발생하는 하절기에는 그물이 파손되어 발전소에 치명적일 수 있다는 우려가 있다.

발전소 순환수계통 수중취수구는 유입되는 해양생물을 1차적으로 차단할 수 있는 방안으로서, 그물 차단망, 돔 형태 차단망, 고정 파일형 차단구조 등을 고려할 수 있다. 이러한 방안은 취수구에 유입되는 해양생물이 유영능력이 적다는 것과 해류에 따라 흘러가는 성질을 이용하여, 어업에서 주로 사용하는 해파리분리효율이 그물분리망 경사각이 약 20°정도가 최적이라고 판단되며, 유연체인 그물망과 달리 고정체 구조는 주변해역과 설치 범위를 고려하여 30-55°가 최적으로 제안될 수 있다.

고정형 차단망보다 그물망구조를 이용할 경우, 해파리의 차단 및 유도장치는 부착생물이나 유속저항에 견딜 수 있는 설계방법이 고안되어야 하고, 변형이 적고 유영생물의 낚임 현상을 방지할 수 있는 사각형 메쉬 구조를 적용하는 것이 타당하다고 판단된다. 한편, 취수구 주변에 일정 지점에서 기포 발생장치를 설치하여 해파리 대량 발생 시기에 가동하는 방식으로서, 수중 취수구가 설치되어 있는 해역의 입구 유속장이 다소 빠르기 때문에, 효과적인 적용을 위하여 수중 취수구 주변으로부터 근거리에서 공기방울 발생장치를 배열하여 고압의 공기방울 배출이 가능한 구조로 설치하여 취수구로 유입을 차단할 수 있다. 마지막으로, 발전소 주변의 해양생물 유입을 대비하기 위하여 음향탐지 혹은 카메라 영상에 의해 유입생물의 양을 빠르고 효과적으로 대응할 수 있는 대량발생 정보시스템의 구축이 필요하다고 판단된다.

## References

- Davis, C. S. · S. M. Gallager and A. R. Solow (1992). Microaggregations of oceanic plankton observed by towed video microscopy, *Science*, 257, 230~232.
- EPA(2001). National pollutant discharge elimination system: regulations addressing cooling water intake structures for new facilities, final rule, 1~89.
- EPA(2004). National pollutant discharge elimination system: regulations addressing cooling water intake structures at phase II existing facilities, final rule, 1~117.
- HOBMC(Haeundae-gu Office of Busan Metropolitan City)(2013). A Scientific report of the Public Damage reduction strategy of jellyfish's bloom in Haeundae Beach, Haeundae-gu, Busan, 1~165.
- Honda, N. and T. Watanabe(2007). Observation of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* using an underwater acoustic camera, *Nippon Suisan Gakkaishi*, 73(5), 919~921.
- Hwang, S. W. · K. J. Cho · D. J. Oh · D. Lee · J. W. Kim and S. W. Park(2006). A Case of delayed cutaneous reaction to a jellyfish sting from the Korean coastline, *Korean Journal of Dermatology*, 44(12), 1451~1453.
- Kim, I. O. · H. C. An · J. K. Shin and B. J. Cha(2008). The development of basic structure of jellyfish separator system for a trawl net, *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology*, 44(2), 99~111.
- KORDI(Korea Ocean Research & Development Institute)(2005). Prevention of bio-impingement against power plant intake, KORDI, Ansan, 1~702.
- Lee, J.H., H.W. Choi, J. Chae, D.S. Kim and S.B. Lee(2006). Performance Analysis of Intake Screens in Power Plants on Mass Impingement of Marine Organisms, *Ocean and Polar Research*, 28(4), 385~393.
- MLTMA(Ministry of Land, Transportation, and Maritime Affairs)(2009). A scientific report on the damage prevention against jellyfish of the harmful marine organisms, MLTMA, Seoul, 1~225.
- NFRDI(National Fisheries Research and Development

- Institute)(2008). Scientific report on the mass occurrence of jellyfish, and prevention and utilization, NFRDI, Busan, 1~222.
- Ortner, P. B. · S. R. Cummings · R. P. Aftiring and H. E. Edgerton(1979). Silhouette photography of oceanic zooplankton, *Nature*, 277, 50~51.
- Price, H. J.(1989). Swimming behaviour of krill in response to algal patches: a mesocom study, *Limnology and Oceanography*, 34, 649~659.
- Strickler, R.(1977). Observations of swimming performances of planktonic copepods, *Limnology and Oceanography*, 22, 165~170.
- Yang, Y. S. · J. H. Bae · K. Lee · J. S. Park and B. K. Sohn(2010). Fish monitoring through a fish run on the Nakdong River using an acoustic camera system, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 43(6), 735~739.
- 
- 논문접수일 : 2014년 09월 30일
  - 심사완료일 : 1차 - 2014년 10월 22일
  - 게재확정일 : 2014년 10월 29일