

## Article

발전소 취수구에 대량으로 유입하는 해양생물에 대한  
스크린 설비의 성능분석이재학<sup>1\*</sup> · 최현우<sup>2</sup> · 채진호<sup>3</sup> · 김동성<sup>1</sup> · 이승백<sup>4</sup><sup>1</sup>한국해양연구원 해양환경연구본부<sup>2</sup>한국해양연구원 해양자료정보실

(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

<sup>3</sup>한국종합환경연구소

(426-857) 경기도 안산시 상록구 이동 634-1

<sup>4</sup>이레콘트롤스

(152-721) 서울시 구로구 구로본동 625-1번지 중앙유통단지 다동 2412

Performance Analysis of Intake Screens in Power Plants on  
Mass Impingement of Marine OrganismsJae-Hac Lee<sup>1\*</sup>, Hyun-Woo Choi<sup>2</sup>, Jinho Chae<sup>3</sup>, Dong Sung Kim<sup>1</sup>, and Seung-Baek Lee<sup>4</sup><sup>1</sup>Marine Environment Research Department, KORDI<sup>2</sup>Ocean Data & Information Division, KORDI

Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

<sup>3</sup>Korea Environmental Technology Consulting Hotline Co.

Ansan 426-857, Korea

<sup>4</sup>Jireh Controls

Seoul 152-721, Korea

**Abstract :** Screening performance of the existing intake screens (drum and travelling screen) on mass impingement of marine animals, a euphausiid, *Euphausia pacifica* and a scyphozoan medusae, *Aurelia aurita* that have often clogged intake screens of the Uljin Nuclear Power Plant, was tested. The maximum tolerable densities of marine animals in the inflowing seawater upon the screen were estimated with two different approaches. First, the maximum density of jellyfish was calculated from (1) passing amount of seawater per unit time through the screens and (2) the covered area of animals on the screens clogged. The maximum density of krill tolerable in the drum screen was cited from a simulated record of Uljin NPP, then those in the travelling screens were also calculated using the data of drum screen and ratio of seawater amount passing through the screens under the condition of 0.5 m water column (W.C.) of the differential pressure ( $\Delta P$ ) produced by screens, an established permissible limit of  $\Delta P$ . Secondly, the screening performances were also tested by hydrodynamic measurements with various screen models in a circulating water channel equipped with a speed-controlling pump and a differential pressure gauge. From the first approach, the maximum tolerable densities of drum and travelling screen were calculated as 2.0 and 1.5 ind/m<sup>3</sup> for the jellyfish and 900 and 680 ind/m<sup>3</sup> for the euphausiid, respectively. These densities estimated from the second approach were 2.1 and 0.8 ind/m<sup>3</sup> for the jellyfish and 1059 and 504 ind/m<sup>3</sup> for the euphausiid, respectively. These estimates were compared with the data from historic clogging events to evaluate the

\*Corresponding author. E-mail : jahlee@kordi.re.kr

practical performance of these intake screens. The comparisons suggest a newly improved intake-screen of which performance should be at least seven times (approximately) better than the existing ones for the krill and 3.2 times for the jellyfish, respectively, for preventing mass impingement, and for maintaining the condition of the differential pressure between the screens below 0.3 m W.C.

**Key words :** mass impingement of marine organism, *Euphausia pacifica*, *Aurelia aurita*, intake screens, screening performance, head loss, loss coefficient

## 1. 서 론

우리나라의 원자력발전소와 화력발전소에서는 대량의 해양 동물, 특히 해파리와 크릴(난바다곤쟁이)의 무리가 발전소 취수구 스크린을 막아, 발전용량을 줄여야 하거나 발전이 중단되는 사고가 빈번히 일어나고 있다. 현재로는 취수로에 그물망(어망)을 설치하고, drum screen 상류 측에 있는 racking screen을 thru flow 형식의 travelling screen으로 교체하여 대비하고 있으나, 종종 높은 밀도의 패치상 분포(patchiness)를 하는 경향이 있는 크릴과 해파리가(Terazaki 1980; 한국해양연구원 2005) 취수구에 유입하여 발생하는 취수설비 스크린의 폐쇄(clogging)에 의한 발전 사고는 여전히 계속되고 있다. 따라서 취수설비의 개선이 크게 요구되고 있고, 이를 위해서는 현 설비의 유입 해양생물에 대한 제거성을 파악하고, 개선해야 할 성능 규모를 가능하는 것이 선행되어야 한다(울진원자력발전소 제 1발전소 발전 3부 1998; 한국전력기술주식회사 1998).

발전소 냉각수로 사용하는 바닷물은 연속적으로 유입되며, 이 해수에 함께 함유된 해양생물은 취수설비의 스크린에서 걸러지면서 스크린 상, 하류 양단에 압력손실을 일으킨다. 압력손실이 설정한계보다 커지는 경우, 취수설비가 파손되거나 순환수 펌프의 흡입수두가 영향을 받아 운전할 수 없게 되므로 발전소의 감발 내지는 발전정지로 이어진다. 따라서 현 취수설비의 해양생물 제거 수용능력을 분석하기 위해서는, 유체역학적 요소로서 유입해양생물이 취수설비의 스크린에 걸러질 때 발생하는 압력손실의 특성을 파악하는 것이 필요하다. 이런 파악을 통해 유입 생물량을 간접적이거나 실시간으로 측정할 수 있어 발전소에서 이에 대비할 수 있고(Masilamoni et al. 2000), 새롭게 개선되는 스크린을 개발하는데 필요한 성능 사양 등의 기준을 설정할 수 있다.

이 연구에서는 발전소 취수설비의 해양생물 제거성능을 개선하는 방안을 도출하기 위하여 국내 원자력 발전소가운데 해양생물의 유입이 빈번하고 감발이나 발전정지의 사례가 가장 많은 울진원자력 발전소 1, 2호기의 취수설비를 대상으로 그 성능을 분석하였다. Travelling screen, drum screen 등 취수설비의 스크린 표본과 실제 해양생물을 유동시험장(circulating water channel)에 적용하여 해수유동 속도와 수두손실을 측정하고, 수치해석에 의해 각

스크린과 해양생물 유입량에 따른 상관계수를 구하여 취수설비의 최고 허용 압력강하에서 갖는 제거 성능을 분석하였다. 그리고 실험에서 얻어진 결과를, 스크린을 덮는 생물 면적, 또는 발전소 운전정지조건으로 설정한 스크린 전, 후방의 차압 50 cm water column(W.C.)에서 시뮬레이션한 동물개체수를 각 스크린 단위면적당 통과 유체량에 적용하여 구한 취수설비의 최대 허용유입생물량과 비교하여 검증하였다. 울진 원자력발전소에서 가장 빈번하고 많은 양으로 유입하여 스크린 폐쇄를 일으켜왔던 보름달물 해파리(*Aurelia aurita*, 이후 ‘해파리’ 등으로 표기)와 태평양난바다곤쟁이(*Euphausia pacifica*, 이후 ‘크릴’ 등으로 표기)를 취수설비의 해양생물제거성능 연구의 대상으로 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 취수설비 구성 및 스크린 차압에 따른 설비운전 기준

울진원자력발전소는 1988년에 1호기를 최초로 가동하기 시작했으며 1999년까지 1-4호기를 건설, 가동한 이후, 2004년과 2005년에는 각각 5호기와 6호기를 추가 가동하면서 대량의 해수를 냉각수로 사용해오고 있다. 이 연구에서 성능을 분석한 대상은 과거 해양생물유입으로 발전 장애를 빈번히 일으킨 1-4호기이다. 울진원자력발전소 냉각 취수설비는 해수를 취수하여 복수기(condenser)와 열교환기에 냉각수로 사용하기까지 스크린(bar, travelling and drum screen)과 debris filter의 여과 과정을 거치는 구조로 구성되어 있다. Fig. 1은 울진원자력발전소의 1, 2호기 중 1호기의 냉각수 흐름도(flow diagram)인데, 4개의 bar screen, 2개의 thru travelling screen(울진원자력 제 1발전소 2002a; 울진원자력 제 1발전소 2002b)과 1개의 drum screen(E. Beaudrey & Cie 1985)으로 구성되어 있다. 이와는 달리 3, 4호기의 경우는 하나의 center travelling screen으로 구성되어 있다(울진원자력 제2발전소 1994). Bar screen은 해수를 취수하는 첫 단계에서 비교적 큰 물질을 거르는 성긴 구조의 스크린이며, 나머지 세 가지 스크린은 촘촘한 망(mesh) 구조를 갖는다. 취수 설비의 주기능을 담당하는 이들 설비의 해수 유통 구조는 세 종류이며, 일반적으로 이 가운데 한 가지를 선택한 설비를 갖추고 있다(Fig. 2).

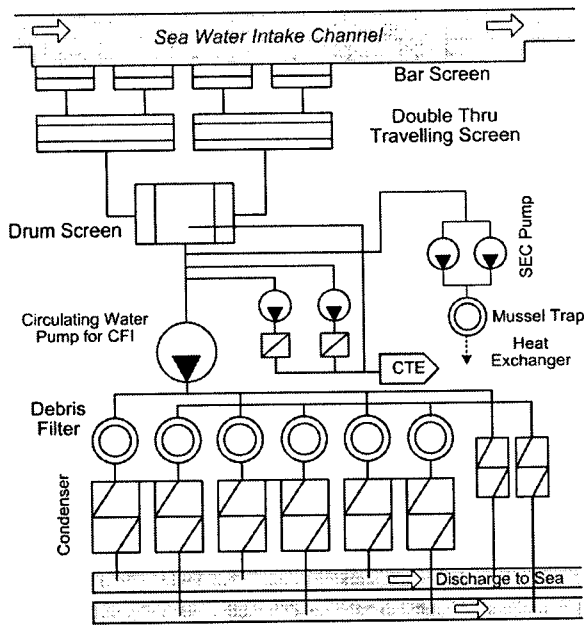


Fig. 1. Filtering and flowing system of cooling water circulation in the first plant of Uljin NPP.

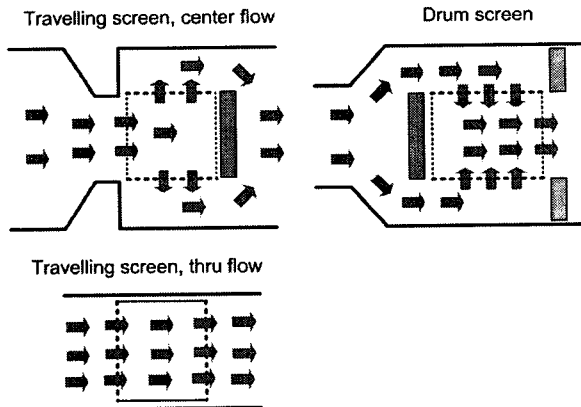


Fig. 2. Three types of screens, a travelling screen of thru flow, travelling screen of center flow and drum screen. Dashed lines indicate the screen mesh parts and arrows the water flow.

Table 1은 drum screen과 travelling screen에 대한 기기별, 단계별 설정 차압과 그에 따른 기기 운전에 대한 기준이다(울진원자력발전소 1989). Drum screen은 차압이 10, 30, 50 cm W.C. 등 3단계로 설정되어 있고, travelling screen은 40 cm W.C.가 경보 차압으로 설정되어 있다. 이러한 설정 차압조건에 따라, 기기 운전의 각 스크린 회전 속도를 저속과 고속으로 나눠 기준이 설정되어 있으며, 청정상태에서의 스크린 상에서 설계차압과 실제 운전차압의 기준 범위가 설정되어 있다. 설계 상 최고 차압은 drum screen이 2 m W.C.이고 travelling screen은 1 m W.C.이

며, drum screen의 차압이 50 cm W.C.에 도달하게 되면 순환수 펌프(circulating water pump: CWP)가 정지된다(울진원자력발전소 1989).

스크린의 통과 유량과 성능 산정

울진 원자력발전소에서 각 스크린이 제거할 수 있는 해양생물, 해파리와 크릴의 양을 계산에 의해 다음과 같이 구하였다. 먼저 스크린을 통과해 지나는 각 펌프의 해수 순환 용량으로부터 취수설비에 유입되어 순환되는 냉각해수가 스크린을 통과하는 유량을 계산하였다. 그리고 스크린 기기의 제작 사양과 도면에 있는 스크린의 망목 크기(mesh size), 유체 통과면적, 선속도, 잠수 길이 등의 관련 자료를 이용하여 해양생물 제거능력에 해당하는 스크린 단위면적 당 통과 유량을 얻었다. 해파리의 경우는, 해파리가 스크린을 덮는 면적을 우산(umbrella)의 크기로부터 구하고, 이와 함께 위에서 얻은 스크린 단위 면적 당 통과 유량으로부터 스크린이 100% 막혔을(clogging) 때의 단위 해수량 당 개체수로, 개체수밀도를 계산하였다. 크릴의 경우는 발전 정지 사고가 있었던 1997년 2월 1일과 4월 24일에 유입된 냉각해수의 크릴 개체수밀도를 시뮬레이션 분석으로 산출하고 제시한, 차압 50 cm W.C. 조건에서의 drum screen 최대유입 허용량을 인용하였다(한국전력기술 주식회사 1998). 이를 근거로, thru travelling screen과 center travelling screen의 크릴 유입허용 최대 밀도 역시 단위 면적당 통과 유체량으로부터 산출하였다.

유동장을 이용한 성능측정

현재 발전소의 취수설비에서 사용 중인 drum screen, travelling screen(thru flow, center flow screen)의 해파리와 크릴에 대한 제거 성능을 유동시험 장치를 이용하여 실험하였다. 유체역학적 유동장 시험은 모형에서 상사성(similarity)을 갖고 원형을 해석할 수 있으나, 이 실험에서는 스크린과 유입생물의 물리적 특성을 원형과 유사하게 유지한 채 축소하는 것이 매우 어려우므로 유동장이 큰 유동시험 장치를 제작하여 실제 크기의 스크린과 해파리로 실험하였다. 유동시험 장치는 폭 2 m, 깊이 2 m, 길이가 15 m인 개수로(open channel) 유동장과 배관 직경 600 mm의 관로 유동장에 최대유량 50 m<sup>3</sup>/min, 최대 수두 12 m를 갖는 사류펌프로 구성하였다. 펌프는 인버터에 의해서 속도를 가변하여 필요한 유량과 수두의 선택적 운전을 쉽게 하였으며, 유동장의 유량 측정을 위해 한국표준규격서(한국산업표준협회 2001)를 적용한 1.5 m 전폭 위어(wier)를 설치하였다. 또한 관로시험 차압측정 장치를 비롯하여 스크린 전·후의 개수로 수위측정 장치와 펌프 토출 밸브 및 정류장치 등 제반 부속장치들을 설치하였다(Fig. 3).

가로 1500 mm, 세로 920 mm 크기의 screen을 유동시

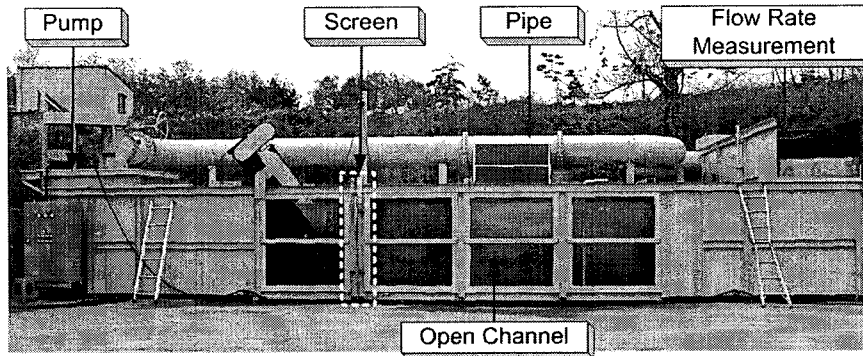


Fig. 3. A circulating water channel equipped with a speed-controlling pump and a differential pressure gauge for the hydrodynamic experiment on the screen performance.

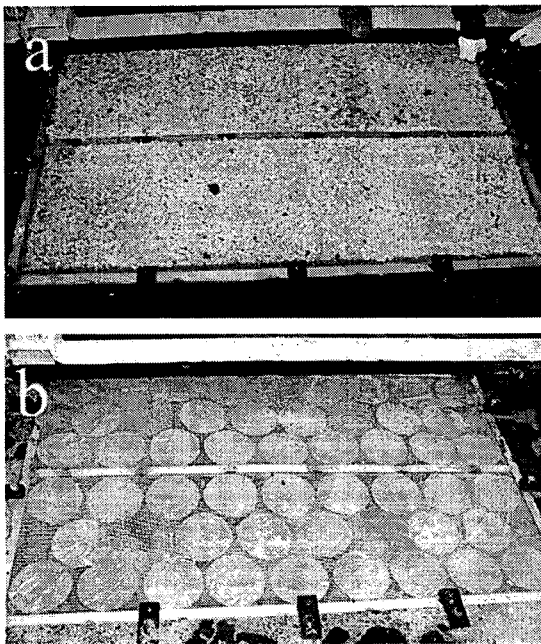


Fig. 4. Krill (a) and jellyfish (b) clogged with experimented screens in the circulating water channel after head loss experiments.

험 장치의 시험판으로 제작하여 개수로 시험부에 설치하였다. 해파리의 스크린에 대한 실험을 위해 직경 160 mm의 원형 비닐막을 제작하여 청정 상태의 screen에 4개체 단위로 추가 부착하는 방식으로 최고 52개체(75%의 screen clogging 상태)까지 측정하였다(Fig. 4). 크릴에 대한 실험은, 울진 원자력발전소 취수구에 유입한 태평양난 바다곤쟁이와 크기가 유사하며(체장 25 mm 전후) 실험에 사용하는 양에 제한을 받지 않는 젓새우로 대신하여 청정 상태(clean water state)의 스크린으로부터 200 g 단위로 추가 투입하여 최고 3 kg(유동시험장 개수로 시험부 최고 측정한계)까지 시험 측정하였다. 이때 사용한 젓새우는 단

위 중량 200 g 당 평균 2500개체로 측정되었다.

유동시험 장치의 스크린 설치대에 모형 스크린을 설치한 후 유동시험 장치를 가동하여 해수를 순환시키면서 해양생물을 투입하지 않은 청정상태, 그리고 젓새우 투입량과 모조해파리 부착을 증가시키면서 스크린의 전, 후방에서 발생하는 수두차와 유동장의 유량을 각각 측정하였다. 수두차 즉, 수두손실(head loss)은 해양생물을 투입하여 발생한 수두차에서, 청정상태에서 측정된 수두차를 뺀 값으로 계산하였고, 스크린을 통과하는 유속은 유동장 실험중에 1.5 m 전폭 위어의 양정(lift)을 측정하여 유량을 구한 후 유량 값을 스크린 면적으로 나누어 계산하였다.

해양생물 투입량을 증가시키면 해양생물이 스크린을 막으면서 발생하는 해수유동에 대한 저항이 증가하게 되어 수두손실이 증가하게 된다. 따라서 수두손실과 스크린 통과 해수유동 속도 및 해수유동에 대한 스크린의 저항과의 관계를 식 (1)과 같이 Darcy-Weisbach 공식으로 나타낼 수 있다.

$$h_L = f \left( \frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

여기서  $h_L$ 은 지름이  $D$ , 길이가  $L$ 인 직관(直管)에 유체가 흐를 때 생기는 마찰 손실 수두이며  $f$ 는 마찰계수,  $g$ 는 중력가속도,  $V$ 는 유체의 평균속도이다.

식 (1)은 직관에 적용되는 식이지만 이 실험에서와 같이 스크린을 통과하는 유체의 환경에서는  $f(L/D)$ 를 손실 계수(loss coefficient)  $K$ 로 대체하여, 식 (1)을 다음과 같은 식 (2)로 쓸 수 있다(손 1981).

$$h_L = K \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

따라서 유동장 실험에서 해양생물의 투입량 증가에 따라 측정된 수두손실과 유속에 대하여 식 (2)를 이용하여 손실계수를 각각 계산하였다. 해파리와 크릴의 투입

량과 손실계수에 대한 예측모형을 구하기 위해 XLSTAT-Pro7.5(Addinsoft™)를 이용하여 비선형 회귀분석을 수행

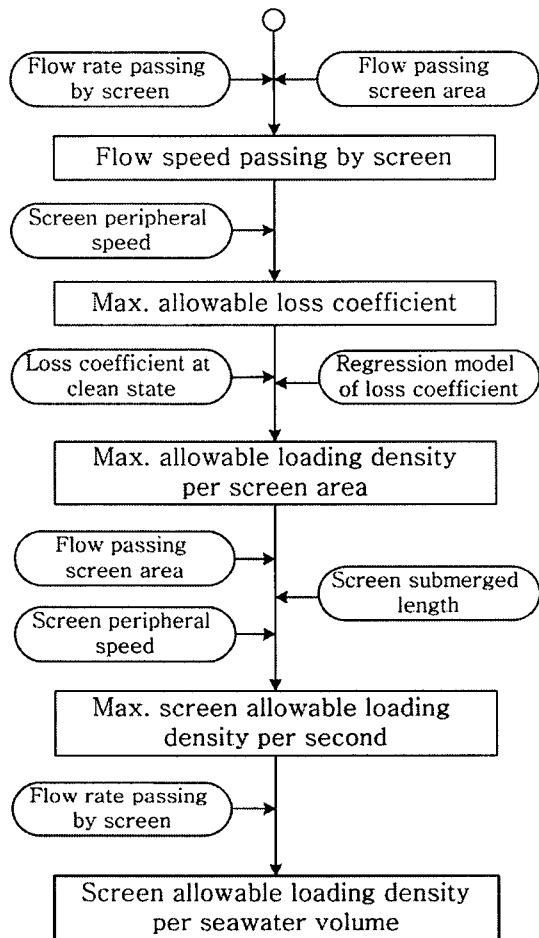


Fig. 5. Process of calculating the maximum permissible density of marine animals in seawater to be removed by the intake screens.

하였다.

크릴과 해파리에 대한 drum screen과 travelling screen의 제거 성능을 산정하기 위해, 1) 단위면적당 통과 유량과, 2) 스크린 차압설정 기준, 원주 속도 등 기기 운전 기준, 그리고 3) 유동시험 장치에서 실험한 해양생물 투입량과 손실계수와와의 관계를 추정한 회귀모형식을 이용하여 스크린 단위 면적 당 최대 허용 유입량과 시간 당 스크린 최대허용 유입량을 구한 후, 스크린 통과 유량을 적용하여 해수량(체적) 당 스크린의 해양생물 허용 유입량을 산출하였다(Fig. 5).

### 3. 결 과

#### 스크린의 통과 유량에 의한 성능 분석

각 펌프의 해수 순환 용량에 따르면 1, 2호기의 경우 CWP(circulating water pump)에서 30.9 m<sup>3</sup>/s, SEC(essential service water system) 펌프에서 1.4 m<sup>3</sup>/s의 유량이 통과하며, CWP는 2대가 운용되고 SEC 펌프는 4대가 설치된 것 중 2대가 운전되므로, 결국 1, 2호기의 스크린을 통과하는 유량은 총 64.5 m<sup>3</sup>/s이다. 3, 4호기의 경우 center flow screen과 CWP 6대가 각각 직렬 연결되어 있고 각 CWP에서 8.3 m<sup>3</sup>/s의 유량이 통과하므로, 3, 4호기의 스크린을 통과하는 유량은 총 49.8 m<sup>3</sup>/s가 된다. 따라서 울진원자력 발전소 1-4호기의 각 스크린을 통과하는 유량을 정리하면 thru flow screen, drum screen, center flow screen에서 각각 16.1 m<sup>3</sup>/sec, 32.3 m<sup>3</sup>/sec, 8.3 m<sup>3</sup>/sec이었다(Table 2). 스크린의 망목 크기, 유체 통과면적, 선속도, 잠수 길이 등 스크린 기기의 제작 사양과 도면으로부터 얻어진 자료에서 해양생물 제거능력에 해당하는 스크린 단위면적 당 통과 유량을 계산하여, 위 세 스크린에서 각각 38.1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, 28.8 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, 7.7 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>의 값을 얻을 수 있었다.

울진원자력발전소에 유입하는 해파리(보름달물해파리,

Table 1. Established levels of differential pressure and operation standard of the drum screens and travelling screens (Uljin NPP 1989).

Operating standard	Drum screen	Travelling screen
Differential pressure at setting level	1st level: 10 cm W.C. 2nd level: 30 cm W.C. 3rd level: 50 cm W.C.	alarming level : 40 cm W.C.
Operating speed	low speed rotation: 2.5 m/min. at 1st level high speed rotation: 10 m/min. at 2nd level trip: at 3rd level	low speed rotation: 3 m/min. high speed rotation: 6 m/min.
Differential pressure at clean state screen	actual level : 0~4 cm W.C.	designed level : Max. 8 cm W.C. actual level : 13~20 cm W.C.
Max. allowable differential pressure at designed level	breaking calipered rod: 2 m W.C. breaking tie rod: 1.5 m W.C.	Max. : 1 m W.C.
Trip levels of circulating pump	at 50 cm W.C.	N/A

Table 2. Passing flow rate of seawater through three types of intake screens.

Screen specification	Thru flow screen	Drum screen	Center flow screen
Unit No. / No. of Equipments	1, 2 / 4	1, 2 / 2	3, 4 / 6
Flow rate passing by screen (m <sup>3</sup> /sec)	16.125	32.250	8.295
Screen mesh size (mm)	3 × 3 × 1.0	3 × 3 × 0.7	2.5 × 2.5 × 0.7
Water passing screen area (m <sup>2</sup> )	31.5(*)	133.5	52.0
Screen peripheral speed (m/min.)	3 / 6	2.5 / 10	5 / 10 / 20
Screen submerged length (m)	7.5(*)	20	16
Screen submerged time (sec)	75	120	48
Submerged screen passing area per sec. (m <sup>2</sup> /sec)	0.42	1.11	1.08
Volume of fluid passing by unit screen area (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	38.10	28.80	7.68
Differential pressure at setting level (cm W.C.)	-	20/30/50	25/75/250

\*Including opening screen area with lower part approx. 1 m.

*Aurelia aurita*)는 비교적 큰 해양 동물로서 travelling(thru 및 center) screen과 drum screen의 wire mesh(3×3 mm)에 걸리면 소량으로도 스크린이 막힐 수 있다. 평균 우산의 직경, 약 150 mm로 계산하면 해파리 한 개체가 스크린에 덮이는 면적은  $1.766 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 이며, 1 m<sup>2</sup>를 완전히 덮어 스크린을 100% 폐쇄시킬(clogging) 경우의 해파리 수는 56.6개체로 계산될 수 있다. 따라서 각 스크린의 단위면적 당 통과 유량(m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)을 계산한 Table 2의 자료를 근거로 하면, 해파리에 의해 각 스크린이 100% 폐쇄될 경우 1 m<sup>3</sup>의 해수에 포함되어 있는 해파리 개체수는 thru flow screen에서 1.5개체, drum screen에서 2개체, center flow screen에서 7개체로 추정된다(Table 3).

한국전력기술주식회사(1998)가 산출한 결과에 의하면, 발전이 정지되었던 1997년 2월 1일과 같은 해 4월 24일에 취수구에 유입한 크릴(*Euphausia pacifica*)의 양은 각각 5500-6500개체/m<sup>3</sup>과 1450-1550개체/m<sup>3</sup>인 반면, 현재 운용 중인 drum screen(3×3 mm mesh)의 최대유입 허용량은 차압 50 cm W.C. 조건에서 900개체/m<sup>3</sup>이었다. Drum screen의 900개체/m<sup>3</sup>을 기준으로 하고, 각 스크린의 크릴 유입허용 최대 밀도를 단위 면적당 통과 유체량으로부터

Table 3. Densities of krill and jellyfish in seawater under the condition that intake screens are clogged, which were calculated from passing amount of seawater through the screens.

Screen type	Screen passing flow rate (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	Individual No. of jellyfish (ind/m <sup>3</sup> )*	Individual No. of krill (ind/m <sup>3</sup> )**
Thru travelling screen	38.10	1.5	680
Drum screen	28.80	2.0	900
Center travelling screen	7.68	7.0	3375

\*At 100% clogging of screen.

\*\*At differential pressure 50 cm W.C.

산출하면, thru travelling screen은 680개체/m<sup>3</sup>(900\*(28.8/38.1)), center travelling screen은 3375개체/m<sup>3</sup>(900\*(28.8/7.7))이었다(Table 3).

#### 유동시험장치의 실험에 의한 성능분석

유동시험 장치에 해수를 순환시키고, 해양생물을 투입하지 않은 청정상태에서 측정된 수두차는 14 mm이었으며, 이 값을 젓새우와 모조 해파리 적용 이후 측정된 수두 손실 값에서 제하고 손실계수를 산출하였다. 생물투입량(x)과 손실계수(y)에 대한 예측모형은 지수함수식인  $y = ae^{bx}$ 을 사용하였으며, 크릴과 해파리에 대한 회귀계수 a, b 값과 결정계수(coefficient of determination) R<sup>2</sup>는 각각 다음과 같았다:

- 크릴과 스크린에서  $a = 1.510$ ,  $b = 0.142$ ,  $R^2 = 0.995$

- 해파리와 스크린에서  $a = 0.735$ ,  $b = 0.088$ ,  $R^2 = 0.977$

회귀모형식의 결정계수는 0.977이상으로 적합도가 매우 높아 생물투입량(x)에 따른 손실계수(y) 추정함수로서의 사용이 가능하였다(Fig. 6). 그러므로 회귀모형식으로부터 스크린의 손실계수(y)의 증가에 따른 해양생물 투입량(x)의 증가를 역으로 추정하기 위해 모형식을 다시 정리하면  $x = b^{-1} \log_e(a^{-1}y)$ 가 되며, 이를 이용하여 스크린의 단위면적(m<sup>2</sup>)당 해양생물의 최대 허용 유입량(A<sub>1</sub>)을 크릴은 무게로, 해파리는 개체수로 계산할 수 있다. 유동장 실험 결과로 얻은 회귀모형식에서 스크린 손실계수(y)는 Table 1에서 제시한 현 취수설비 성능인 스크린 최대허용 손실계수에서 청정상태의 손실계수를 뺀 값을 사용하였다. 스크린 최대허용 손실계수는 Table 2에서 제시한 스크린 통과유량과 스크린 유체 통과면적으로부터 스크린을 통과하는 해수유속을 구한 후 Table 1의 스크린 차압설정 기준치를 이용하여 손실계수를 구하는 식 (2)를 사용하여 계산

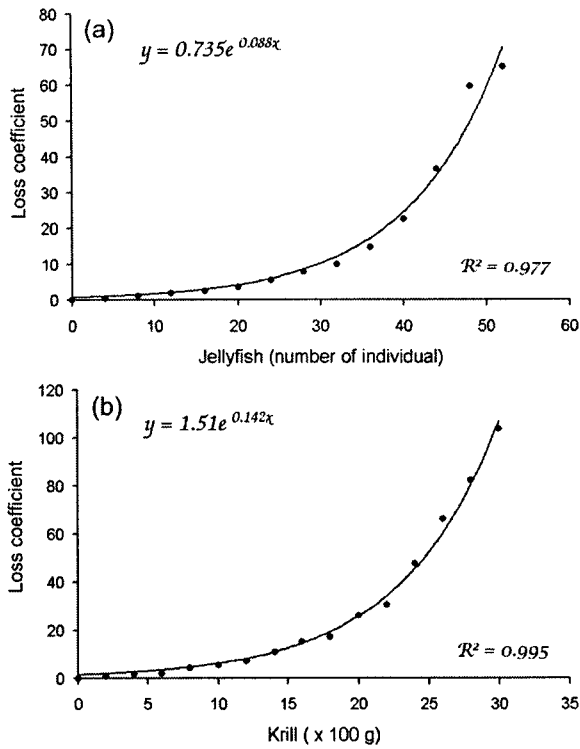


Fig. 6. Relationship of krill(a) and jellyfish(b) amounts clogged on the screens with screen loss coefficient.

하였다.

A<sub>1</sub>에 Table 2의 스크린 유체 통과면적과 스크린 원주 속도를 곱한 후 스크린의 잠수 길이로 나누면 스크린을 통과하는 시간당 최대 허용 유입량(A<sub>2</sub>)이 산출된다(크릴은 g/s, 해파리는 개체/s). A<sub>2</sub>를 Table 2의 스크린 통과유량(m<sup>3</sup>/s)으로 나누면, 크릴은 스크린 유입허용 무게 밀도

(A<sub>3a</sub>: g/m<sup>3</sup>)가, 해파리는 스크린 유입허용 개체수 밀도 (A<sub>3b</sub>: ind/m<sup>3</sup>)가 산출된다. A<sub>3a</sub>를 크릴 단위무게 당 개체수 (12.5개체/g)로 곱하면 스크린 유입허용 크릴 개체수 밀도 (개체/m<sup>3</sup>)가 산출되고, A<sub>3b</sub>를 해파리 한 개체 당 무게 (200 g)로 곱하면 스크린 유입허용 해파리 무게 밀도(g/m<sup>3</sup>)가 산출된다. Drum screen과 travelling screen에 대해, 그리고 각 수두손실 값과 원주 속도에 대해 위와 같은 계산과정을 적용한 결과는 Table 4와 같다.

순환수 펌프를 정지시키는 조건인 drum screen의 차압, 50 cm W.C.에서 크릴과 해파리의 유입허용량은 각각 1059개체/m<sup>3</sup>, 2.1개체/m<sup>3</sup>이었으며, travelling screen에서는 각각 504개체/m<sup>3</sup>, 0.8개체/m<sup>3</sup>이었다. 이 조건에서 drum screen과 travelling screen의 해양생물 유입허용량을 개체수 밀도 측면에서 비교하면 drum screen의 성능이 travelling screen에 비해 2배 정도 높았으며, 중량 측면에서는 크릴이 해파리보다 적은 중량에서 수두손실이 많았다.

#### 4. 결 론

Table 5는 스크린 통과 유량으로부터 산술적으로 구한 현 취수설비의 성능과 유동시험 장치를 이용한 실험분석 결과를 취합, 비교한 것이며 요약하면 다음과 같다.

- drum screen : 크릴과 해파리 모두 실험적 결과 값이 산술적 결과 값보다 약간 높았으나, 전반적으로 두 방법에 의한 결과가 유사함(크릴은 17%, 해파리는 5% 높음).
  - travelling screen : 크릴과 해파리 모두 산술적 결과 값이 실험적 결과 값보다 높았음(크릴은 35%, 해파리는 87% 높음).
- 위의 두 가지 분석 방법에 의한 취수설비의 성능 분석

Table 4. Relationship of krill and jellyfish density and head loss on drum screens and travelling screens.

Screen	Organism	Loading density	Head loss (cm W.C.)								
			10	20	30 <sup>*L</sup>	30 <sup>*H</sup>	40	50	100	150	200
Drum screen	Krill	Peripheral speed (m/min)	2.5	2.5	2.5	10	10	10	10	10	10
		Weight density (g/m <sup>3</sup> )	11.9	16.3	18.6	74.2	80.2	84.7	98.1	105.8	111.2
		Individual density (ind/m <sup>3</sup> )	148	204	232	928	1002	1059	1227	1323	1390
	Jellyfish	Weight density (g/m <sup>3</sup> )	49.0	65.8	80.8	323.0	372.1	414.9	580.1	705.5	810.8
		Individual density (ind/m <sup>3</sup> )	0.3	0.3	0.4	1.6	1.9	2.1	2.9	3.5	4.1
		Peripheral speed (m/min)	3	3	3	6	6	6	6	6	6
Travelling screen	Krill	Weight density (g/m <sup>3</sup> )	-0.1	11.9	15.9	31.8	36.7	40.3	50.8	56.5	60.5
		Individual density (ind/m <sup>3</sup> )	-1	148	198	397	459	504	635	707	757
		Weight density (g/m <sup>3</sup> )	15.3	53.8	66.8	133.7	149.8	161.5	195.2	213.8	226.8
	Jellyfish	Individual density (ind/m <sup>3</sup> )	0.1	0.3	0.3	0.7	0.8	0.8	0.1	1.1	1.1
		Weight density (g/m <sup>3</sup> )	15.3	53.8	66.8	133.7	149.8	161.5	195.2	213.8	226.8
		Individual density (ind/m <sup>3</sup> )	0.1	0.3	0.3	0.7	0.8	0.8	0.1	1.1	1.1

\*L: at low peripheral speed, \*H: at high peripheral speed.

**Table 5. Summary on screening performance of intake screens examined on krill and jellyfish by calculation from passing amount of seawater through the screens and hydrodynamic measurement with historic clogging events.**

Screen	Organism	Analysed method	Allowable load (ind/m <sup>3</sup> )		Max. load
			30 cm W.C. (*)	50 cm W.C. (**)	
Drum screen	Krill	Arithmetic	-	900	krill: 6500 ind/m <sup>3</sup> -97.02.01 1550 ind/m <sup>3</sup> -97.04.24
		Experiment	928	1059	
	Jellyfish	Arithmetic	-	2	
		Experiment	1.6	2.1	
Travelling screen	Krill	Arithmetic	-	680	jellyfish: 2.24 ind/m <sup>3</sup> -01.08.10
		Experiment	397	504	
	Jellyfish	Arithmetic	-	1.5	
		Experiment	0.7	0.8	

\*at high peripheral speed.

\*\*Arithmetic calculation performed at 100% clogging of screen for jellyfish.

결과는, 울진원자력발전소에서 실제 drum screen이 폐쇄되었을 때인 1997년 크릴 유입량(1550개체/m<sup>3</sup>, 6500개체/m<sup>3</sup>)과 2001년 해파리 유입량(2.24개체/m<sup>3</sup>)에 비해 훨씬 낮은 값을 보이므로, 현 취수설비가 대량으로 유입하는 해양생물을 제거하는 데는 부족하다는 것을 말해주고 있다. 울진원전의 취수설비 가운데 double thru travelling screen은, bar screen과 drum screen 사이에 당초 존재했던 racking screen(bar screen + trash screen) 설비를 철거, 교체 개선한 설비이나, 2002년에 설치된 이후로 1997년이나 2001년과 같은 해양생물의 대량유입에 의한 사고가 기록되지는 않았다. 현재 drum screen과 travelling screen은 3×3 mm의 같은 망목 크기(Table 2)를 갖고 직렬로 배열되어 있다(Fig. 1). 이 연구 결과에 의하면, travelling screen의 성능은 drum screen의 성능에 많이 못 미치므로, 취수설비의 성능을 개선하는 방안 가운데, 직렬 운전에서의 성능을 상호 보완하기 위해 유입된 해양생물 일부를 travelling screen에서 통과시켜 drum screen과 분담하는 방법으로서 travelling screen 밑에 개구부를 약 1 m 확장하는 방식을 제안할 수도 있다(한국해양연구원 2005). 아울러 travelling screen의 망목을 10×10 mm로 변경 개선하여, travelling screen보다 성능이 나은 drum screen에서 크릴을 거르게 하는 방법도 제안할 수 있으나 크릴의 경우라면, 높은 유입량에 대한 부하를 단지 drum screen에 거는 정도에 불과하다. 해파리의 경우는 travelling screen의 망목 크기를 위와 같이 변경해도 개체 크기 때문에 성능

이 낮은 travelling screen에 우선적으로 부하가 걸릴 수밖에 없게 된다.

차압 설정 값 50 cm W.C.은 순환수 펌프가 정지되고 감발 및 발전 정지를 해야 하는 시점의 값이므로, 대량의 해양생물 유입에 대비하기 위해서는 20-30 cm의 수두손실에서 제거성을 충분히 갖추도록 개선할 필요가 있다. 실험적 방법에 의해서 얻어진 수두손실 30 cm의 조건에서, 현 스크린이 유입을 허용할 수 있는 크릴 및 해파리의 양과 실제의 최대 유입량을 비교하면, travelling screen의 망목을 큰 것으로 교체하여 유입되는 크릴에 대한 부하가 drum screen에 걸리게 한다고 해도 크릴에 대해서는 약 7 배(현 drum screen에 대하여 6500/928)의 성능 개선이 요구된다. 해파리의 경우에는 현 travelling screen에 대하여 약 3배(2.24/0.7)의 제거 성능 개선이 요구된다. 즉, 크릴과 해파리의 대량 유입에 의한 스크린 폐쇄 사고를 막기 위해서는 현 취수설비보다 적어도 7배 이상의 성능을 갖춘 고속처리 스크린이 필요하다는 결론을 얻을 수 있다.

## 사 사

본 논문을 세심하게 검토해 주신 심사위원님께 깊은 감사를 드립니다. 본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업인 “해양생물에 의한 취수구 폐쇄현상 방지기술(PN52700)”과 한국해양연구원의 기본연구사업인 “하구역의 관리 및 기능회복기술개발(PE97101)” 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 손병진. 1981. 유체역학. 답출판사, 서울. 919 p.
- 울진원자력 제 1발전소 발전 3부. 1998. 취수구 해수 여과설비 검토 보고서. 9 p.
- 울진원자력발전소. 1989. 울진 1, 2호기 순환수 여과 계통 설명서, 제 4장. 순환수 여과 계통(CFI). p. 241-263.
- 울진원자력 제 1발전소. 2002a. System functional description, travelling screen. Hyorim Industries Inc. 7 p.
- 울진원자력 제 1발전소. 2002b. Technical data, travelling screen. Hyorim Industries Inc. 3 p.
- 울진원자력 제 2발전소. 1994. Instruction manual, travelling band screen. Hanjung. 107 p.
- 한국전력기술주식회사. 1998. 울진 1, 2호기 해양생물 다량 유입 대비 설비 개선 타당성 검토 용역. 47 p.
- 한국산업표준협회. 2001. 펌프 토출량 측정 방법, 한국산업규격 KS B 6302:2001. 27 p.
- 한국해양연구원. 2005. 해양생물에 의한 취수구 폐쇄현상 방지 기술. 과학기술부. BSPN 52700-1716-3. 702 p.
- E. BEAUDREY and Cie. 1985. Operation and maintenance



- 
- manual, seawater screening equipments, drum screen. 1 p.
- Masilamoni, J.G., K.S. Jesudoss, K. Nandakumar, K.K. Satpathy, K.V.K. Nair, and J. Azariah. 2000. Jellyfish ingress: A treat to the smooth operation of coastal power plants. *Current Sci.*, 79(5), 567-569.
- Terazaki, M. 1980. Surface swarms of a euphausiid *Euphausia pacifica* in Otsuchi Bay, northern Japan. *Bull. Plankton Soc. Jpn.*, 27, 19-25.
- 

*Received Aug. 31, 2006*

*Accepted Oct. 4, 2006*