

## 발전소 배수로에서 발생하는 거품 저감 방법 Reduction of the Foam Generated in the Discharge Channel of a Power Plant

오영민\* · 오상호\* · 장세철\*  
Young Min Oh\*, Sang-Ho Oh\* and Se-Chul Jang\*

**요 지 :** 발전소 배수로에서 방류되는 냉각수에 의하여 발생하는 거품은 시각적인 공해를 유발하여 인근 주민들의 민원 소지가 되고 있다. 본 연구에서는 배수로에서 발생하는 거품발생량을 저감하기 위한 효과적인 방안을 제안하기 위하여 테트라포드(TTP)를 배수로 경사면에 배치하여 수리모형실험을 실시하였다. 수리모형실험의 주요 결과를 실제 발전소 배수로 현장에 적용하여 정성적인 거품발생량 저감 효과가 있음을 확인하였다.

**핵심용어 :** 배수로, 거품, 수리모형실험, 테트라포드, 현장적용

**Abstract :** The foam produced by the effluent cooling water which is released to the discharge channel provokes civil complaints due to the visual pollution to the neighboring residents. In this study, a physical model test was conducted by placing tetrapods on the bottom slope of the discharge channel in order to suggest an effective method of reducing the amount of generated foam. Field application of the main results of the model test showed qualitatively apparent reduction of the foam generation at the discharge channel.

**Keywords :** Discharge channel, Foam, Physical model test, Tetrapod, Field application

### 1. 서 론

화력발전소 및 원자력발전소는 전기를 만드는 과정에서 발생하는 발전기기의 열을 식히기 위하여 냉각수를 필요로 하기 때문에 해안가에 위치할 경우 다량의 냉각수 공급이 용이하다는 장점이 있다. 실제로 우리나라에 있는 원자력 발전소는 모두 바닷가에 있으며 대부분의 화력 발전소 역시 바닷가에 위치하고 있다. 발전기기를 식히고 나서 배출되는 냉각수는 원래의 바다 수온보다 7~8 °C 정도 높은데 일부 발전소에서는 이를 이용하여 난류성 어류 양식을 하거나 겨울철 난방수로 활용하기도 한다. 반면에, 갑자기 주변의 수온보다 높은 냉각수가 바다로 유입되면 해양 생태계에 충격을 주어 생태환경에 악영향을 끼치기도 한다.

이처럼 냉각수로 인한 환경적 영향은 주로 주변 해수와의 온도차로 인해 일어나지만, 그 외에 냉각수 방류 시 발생하는 거품도 환경 문제를 발생시킨다. 조위차가 큰 남서해안에 위치하고 있는 화력발전소에서는 해수 냉각수 방류시 배수로에서의 큰 낙차로 인해 수중 연행된 공기가 수표면으로 부상하면서 대량의 거품이 발생하게 되는데(Wood, 1991), 이렇게 발생된 거품에는 각종 동·식물 플랑크톤 등 유기물질이 다량

함유되어 있어 거품 지속시간이 길다. 이 거품에는 유해물질은 거의 함유되어 있지 않지만, 유기물이 햇빛과 반응하여 거품의 색깔이 갈색 또는 검정색으로 변하게 되어 시각적으로 혐오감을 준다(임과 배, 1995). 통상 거품의 외해 이동을 차단하기 위해 배수로 중단 수면 부근에 거품 방지막을 설치하여 거품을 일정 시간 저류시킨 후 자연 소멸을 유도하고, 소포체를 살포하여 거품을 소산시키고 있지만, 막대한 양의 냉각수를 사용하는 대규모 화력발전소 배수로에서는 워낙 거품 발생량이 많아서 발생된 거품의 완전한 제거가 어려운 실정이다. 특히, 소포체 살포 시 환경오염의 우려가 있으며, 거품 방지막은 파랑, 조류 등에 의해 자주 파손되어 유지관리 상 어려움이 있어 배수구조의 변경을 통한 근본적인 대책 마련이 지속적으로 요구되어 왔다.

발전소 방수로에서의 거품저감 방안에 관련된 연구는 1980년대 이후부터 본격적으로 이루어져 왔다. 국내의 경우 서해안의 보령, 서천 화력발전소를 대상으로 온배수의 물리적 성질을 조사하고 거품 발생의 원인을 파악하려는 시도가 이루어졌으며, 이를 통해 해수 온도, 표면 장력, pH의 연별 변동성 등이 거품 발생에 미치는 영향이 연구된 바 있다(한국전력기술주식회사, 1994; 전력연구원, 2006). 또한, 삼천포 화

\*한국해양연구원 연안개발·에너지연구부(Corresponding author: Young Min Oh, Principal Researcher, Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Kyunggi 426-744, Korea, ymoh@kordi.re.kr)

력발전소 방류구에서의 거품저감 방안을 수립하기 위하여 실내 수리모형실험 연구가 수행되었으며(전력연구원, 2002), 그 이후로도 거품발생 저감을 위한 설비개선 노력이 진행되고 있다. 보다 최근에는 보령 화력발전소 배수로 주변에서 발생하는 거품을 저감하기 위한 수리모형실험 및 수치모델링 연구가 이루어졌다(김 등, 2008, 오 등, 2008, 전력연구원, 2007). 한편, 우리나라와 실정이 비슷한 일본에서도 일본 전력중앙연구소를 중심으로 거품 발생 원인을 파악하고 그에 대한 대책을 수립하는 연구가 수행된 바 있다(福原華一, 1990; 電力土木技術協會, 1995).

본 연구에서는 이처럼 배수로 주변에서 발생하는 거품으로 인해 최근 민원이 제기되고 있는 광양의 K-power 화력발전소를 대상으로 구조물 설치에 의한 거품저감 방법을 수리모형실험에 의하여 도출하고 이를 현장에 적용한 사례를 중심으로 효과적인 거품저감 방법에 대하여 논하고자 한다.

## 2. 현장 조건

K-power 화력발전소 배수로의 측면도 및 평면도를 Fig. 1 과 2에 나타내었다. Fig. 1에 보인 것처럼 배수로는 평탄부 이후 1:5의 급경사 구간 10 m를 지나서 암거(Box Culvert)를 통해 외해로 연결되어 있다. K-power 화력발전소 인근 광양항의 조위는 Fig. 3에 보인 것처럼 약최고고조위(Approx. HHW)가 DL.+3.822 m이며, 약최저저조위(Approx. LLW)는 기본수준면(DL.)으로서 이는 1:5 사면의 중간 높이 정도에 해당한다.

Fig. 4에 보인 것처럼 방류수가 경사면 하단에 이르게 되면 도수(hydraulic jump)가 발생하고 공기 혼입이 활발하게 일어나면서 거품이 다량으로 생성되게 된다. 현장에서 조위에 따른 거품발생 양상을 지속적으로 관찰한 결과, 외해 조위가 평균저조위(DL.+0.831 m)와 소조평균저조위(DL.+1.334 m)의 중간 정도 높이인 DL.+1.000 m 보다 높은 경우에는 거

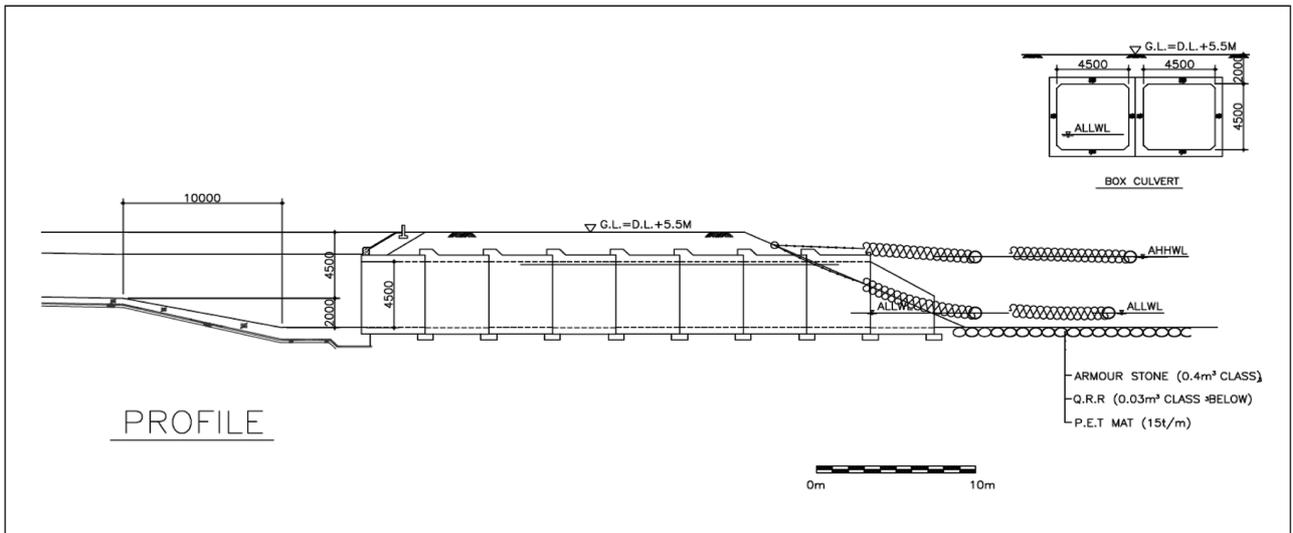


Fig. 1. Side view of the discharge channel.

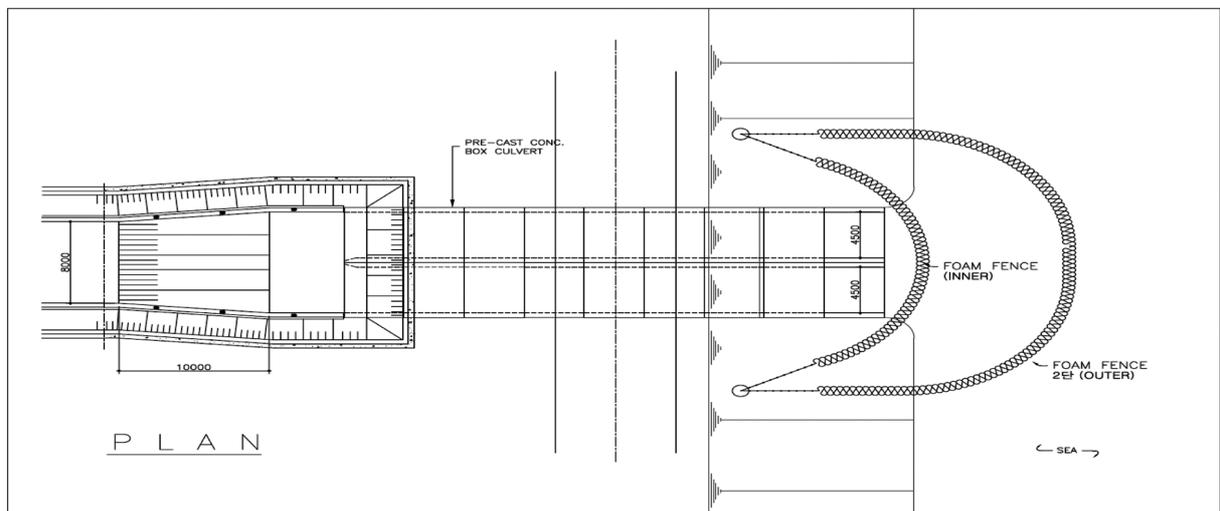


Fig. 2. Plan view of the discharge channel.

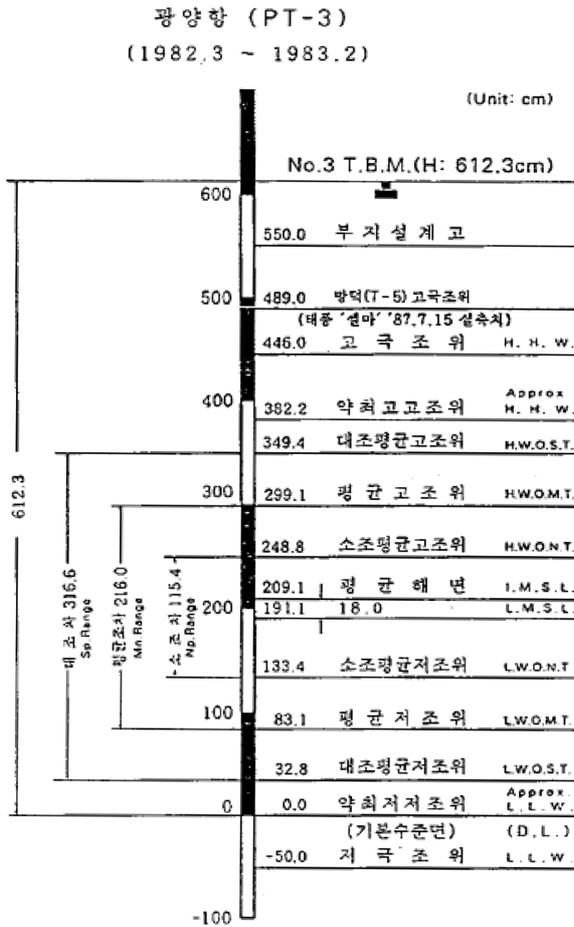


Fig. 3. Tide mark at Gwangyang port.



Fig. 4. Generation of foam at the discharge channel.

품 발생량이 현저하게 감소하는 것이 확인되었다.

즉, 배수로에서의 거품 발생량이 배수로 상류측과 외해 조위 사이의 낙차에 따라서 크게 변화하므로, 배수로 내 거품 발생량을 저감하기 위해서는 외해 조위가 낮은 경우에도 배수로의 1:5 경사면 하류측 수위를 높게 유지하는 방법이 효과적일 것으로 판단되었다. 이를 위해서 배수로 중단 외해측에 보를 설치하거나, 배수로 구조를 변경하여 수중방류를 시도하는 방법을 강구할 수 있지만, 현장의 여건상 많은 비용과 시간이 소요되며 2차적인 민원 제기의 우려가 있을 것으로 예상되었다. 그래서, 차선책으로서 경사면에 소파블록

(TTP)을 배열함으로써 유속을 저감하고 경사면 중단 하류측에서의 수위를 상승시키는 개념을 적용하기로 하였으며, 수리모형실험을 통하여 효과적인 TTP의 배치방법을 도출하고자 하였다.

### 3. 수리모형실험

수리모형실험은 한국해양연구원의 평면수조실 내에 모형실험을 위한 개수로를 제작하여 수행되었으며, Fig. 5에 배수로 모형의 제작 사진을 제시하였다. 모형 축척은 1/15이었으며, Froude 상사법칙을 적용하였다. 현장의 최대 방류량은 80,890 m<sup>3</sup>/hr 이므로 이를 모형 축척을 고려하여 실험실 규모로 환산하면 25.8 liter/s 가 된다. 또한, 현장에서 측정한 배수로에서의 수심(1:5 사면 상류측 평탄부)은 1.2 m였으며, 실험실 조건으로는 8 cm가 된다.

이러한 조건을 만족시키면서 사면부를 중심으로 TTP를 다수 배치하여 경사면 하류측의 수위 상승 효과를 관찰하였다. 특별히, 경사면에서 도수(hydraulic jump)가 발생하지 않도록 효과적으로 유속을 저감시키면서 동시에 경사면 상류측 평탄부의 수위가 TTP 적재로 인해서 높아지지 않도록 하였다. 만약, TTP를 지나치게 높이 쌓아서 경사면 상류측 평탄부의 수위가 높아지게 되면, 결과적으로 구조물 상·하류측에서의 낙차가 커지게 되어 거품 발생량이 저감되지 않기 때문이다. 또한, 구조물 하류측으로부터 암거 유입부까지의 구간에서도 거품이 발생하지 않도록 TTP 구조물의 높이를 적절히 조절하여 수위가 완만하게 변화되도록 하였다. 이러한 점을 고려하여 TTP의 적재 방법을 여러 가지로 다르게 적용하면서 실험을 수행하였다.

실험을 위한 외해 조위는 거품 발생량이 가장 많은 경우에 해당하는 약최저저조위(Approx L.L.W)와 대조평균저조위(L.W.O.S.T)의 두 가지 조건을 고려하였으나, 주로 대조평균저조위 조건에서 실험이 수행되었다. 약최저저조위에서 거품이 발생하지 않는다면 모든 조위에서 거품이 발생하지 않는다고 할 수 있으므로 가장 바람직하나, 연중 발생빈도가 극히 낮은 조위이므로 이보다는 발생빈도가 높은 대조평균



Fig. 5. Model of the discharge channel.

저조위(한 달에 1~2번 정도의 빈도)에서 거품 발생량 저감 실험을 수행하는 것이 보다 현실적으로 유용하다고 할 수 있다.

한편, 수리모형실험에서는 담수를 사용하며, 배수되는 발전소 냉각수처럼 유기물질이 함유되어 있지 않기 때문에 현장에서와 같이 거품 재현이 어렵다는 것이 가장 큰 문제점이다. 사면에서 낙차에 의한 도수(hydraulic jump)로 인해 거품이 발생하더라도 금새 없어지므로 현장에서와 같이 거품이 수면에 누적되는 현상은 관찰할 수 없다. 따라서, 거품 발생량 저감 효과를 정량적으로 평가할 수는 없으므로 TTP가 설치된 경사면 하류측에서 순간적으로 발생하는 거품량 및 와류(vortical flow) 발생 정도가 가장 적은 경우를 정성적으로 평가하여 그때의 TTP 배치 형태를 최적으로 선정하였다.

TTP 구조물이 사면에 설치될 경우 빠른 유속에 대하여 자중에 의해서 지지되어야 하므로, 가용한 TTP 모형 중 중량 및 크기가 서로 다른 몇 가지를 단독으로 사면에 설치하여 흐름에 따라 떠내려가는지 아니면 지지되는지 여부를 점검하였다. 그 결과, 현장 환산중량으로 4톤급 TTP부터는 유속에 저항하여 움직이지 않고 초기 설치된 위치를 유지하는 것을 확인하였다. 따라서, 실험은 4톤급 TTP를 이용하여 진행하였으며, 비교를 위하여 1.8톤급 TTP를 동시에 사용하여 경사면 하류측 평탄부에 함께 설치하는 방안도 실험하였다.

### 3.1 4톤급 TTP만 사용한 경우

최적의 적재 방법을 찾기 위하여 TTP를 여러 형태로 변화시키면서 실험한 결과 Fig. 6에 보인 것처럼 암거로부터 상류측 방향으로 10.5 m까지, 그리고 암거 안쪽으로 2.7 m까지 TTP를 설치한 경우에 거품 발생량 및 와류가 가장 적은 것으로 나타났다. 적재 방법은 암거 입구까지의 구간은 1층 정적으로 36개, 2층 난적으로 30개를 배치하였으며, 암거 안쪽에는 11개를 배치하여 총 77개의 TTP를 사용하였다.

### 3.2 4톤급 및 1.8톤급 TTP를 혼용한 경우

한편, 4톤급 TTP 외에 1.8톤급 TTP를 사면 하류측에 2열로 적재한 경우도 실험을 수행하였다. 이러한 배치 방법을 사



Fig. 6. Placement of 4ton TTPs only.



Fig. 7. Placement of 4ton & 1.8ton TTPs together.

용할 경우 미세하기는 하지만, 구조물 하류측 수위가 보다 점진적으로 감소하는 경향이 나타났다. 1.8톤급 TTP를 암거 입구까지만 설치한 경우와 암거 안쪽까지 설치한 경우를 실험하였는데, 후자의 경우가 거품 저감효과가 다소 나은 것으로 확인되었으며, 이 때의 적재 방법은 Fig. 7에 보인 것처럼 암거 입구로부터 상류측 9.75 m 구간에는 4톤급 TTP 3열 및 1.8톤급 TTP 2열을 배치하고, 암거 안쪽으로 2.7 m까지의 구간에는 1.8톤급 TTP를 1층 2열로 배치한 것이다. 암거 안쪽에 1.8톤급 TTP를 1층으로만 배치한 것은 수위를 점진적으로 낮춤으로써 거품 발생량을 저감시키기 위한 것인데, 실험을 수행해 본 결과 어느 정도 효과가 있는 것으로 나타났지만, 현장에 적용할 경우 시공상의 어려움이 있을 것으로 판단되었다. TTP 개수는 4톤급이 1층 24개, 2층 18개로 총 42개, 1.8톤급이 1층 16개, 2층 18개, 암거 안쪽에 12개로 총 46개를 사용하였다.

## 4. 현장 적용

수리모형실험에서 도출된 TTP 재하 방법을 K-power 화력 발전소 현장에 적용하기 위하여 2일간 발전소 가동을 중지하고 잠수부를 동원하였다. 수리모형실험에서 제시된 방법을 현장에 그대로 적용하는 것은 매우 어려우며, 특히 암거 안쪽으로 TTP를 설치하는 방법은 시공상의 어려움이 많아서, 사면에 4톤급 TTP, 사면 하류측 평탄부에 1.8톤급 TTP를 설치하는 방안이 최종안으로 채택되었다. 한편, 실험에서는 1.8톤급 TTP의 거푸집을 구하지 못하여 그보다 중량이 약간 무거운 2톤급 TTP로 대체하였다. 수리모형실험에서 결정된 최종안을 현장에 적용하기 위하여 Fig. 8에 보인 것처럼 크레인으로 TTP를 들어 올리고 잠수부가 위치를 조정하는 방식으로 진행하였는데 계획대로 100% 똑같이 설치하지는 못하였다. 이는 모형실험에서 재현된 배수로와 현장의 배수로가 정확히 일치하지 않고 TTP의 크기도 다소 차이가 있을 뿐만 아니라 무엇보다도 현장에서는 실험실에서처럼 TTP의 위치를 자유롭게 조정하는 데 한계가 있었기 때문이었다. 이러한 이



Fig. 8. Installation of TTP at the discharge channel.



Fig. 9. Surface flow field after installation of TTPs.

유로 Fig. 9에 보인 것처럼 TTP 구조물 하류측에서는 실험실 환경에서보다 훨씬 다량의 거품이 경사면에서 발생하였다. 그러나 Fig. 10에 보인 것처럼 조위가 같은 조건에서 TTP 구조물 설치 전후에 배수로 종단에서의 거품 발생량을 비교해보면 상당한 저감 효과가 있음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 발전소 배수로에서 발생하는 거품 발생량을 저감하기 위한 방안을 수립하기 위하여 수리모형실험을 수행하여 현장에 적용한 사례를 소개하였다. 근본적으로 거품은

저조위 시에 방류수가 경사면을 통과하면서 도수 또는 강한 와류에 동반하는 기포 혼입 과정에서 발생하므로 외해 조위가 일정한 수위 이상으로 높아지면 거품 발생량이 급격하게 감소한다는 현장 특성을 고려하여 저조위 시 배수로 경사면 하류측 수위를 높게 유지시킬 수 있는 방안을 수립하는데 연구의 초점을 맞추었다. 본 연구를 통해서 얻어진 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 발전소 방류수 종단측 수위를 상승시켜 거품을 저감하기 위하여 사면에 구조물을 적재하는 방안을 수립하였으며, 구조적으로 안정하고 흐름 에너지 감쇠 효과가 우수한 TTP를 이용하였다.

- TTP 구조물의 적재 방법은 구조물로 인하여 사면에서 와류가 발생하지 않으면서 사면 상류측 평탄부 수위가 상승하지 않도록 하는 것을 원칙으로 하였다. 그 이유는 와류 발생 시 공기 혼입이 쉽게 발생하며, 사면 상류측 평탄부의 수위가 올라가면 구조물 상·하류측간 낙차가 커지게 되어 거품 발생 가능성이 높아지기 때문이다.

- TTP의 크기 및 중량은 사면에 설치하였을 때에 흐름에 떠내려가지 않고 자중으로 활동에 지지할 수 있으면서, 유속 저감 및 하류측 수위 상승 효과를 극대화할 수 있을 것으로 판단되는 4톤급 TTP를 사용하였다. 사면 하류측 평탄부의 경우에는 사면에 설치한 4톤급 TTP 구조물을 통과하면서 유속이 감소되므로 1.8톤급 TTP로도 충분히 지지되므로 이를 고려하여 최적의 TTP 배치안을 도출하였다.

- 실험 결과 4톤급 TTP만을 사용한 경우와 1.8톤급을 혼용한 경우 모두 암거 내부로 2열 정도 TTP를 적재하는 방안이 가장 거품 발생량 저감 효과가 좋은 것으로 나타났으나, 현장 시공 시에는 암거 내부에 TTP를 적재하는 시공상의 어려움으로 인해서 암거 입구부 직전까지만 TTP를 설치하게 되었다.

- 4톤급 및 2톤급(1.8톤급 대응) TTP를 혼용하여 배수로 사면에 구조물을 설치한 결과 배수로 종단에서 거품 발생량이 현저하게 감소함을 확인할 수 있었다.



Fig. 10. Gathered foam at the outlet of the discharge channel before(left) and after(right) the installation of TTPs.

## 참고문헌

- 김지영, 강금석, 오영민, 오상호 (2008). 공기연행 수치모형을 이용한 발전소 거품저감 수증방류구조 설계. 한국해안·해양공학회논문집, 20(5), 452-460.
- 오상호, 오영민, 강금석, 김지영 (2008). 발전소 수증방류구조 내 수평유공관 설치에 따른 거품발생 저감효과에 관한 실험적 연구. 한국해안·해양공학회논문집, 20(5), 472-481.
- 임영환, 배복규 (1995). 발전소 가동시 발생하는 해수 거품의 성질과 거품저감 대책, 전력기술, 여름, 6-17.
- 전력연구원 (2002). 발전소 방류구의 수리학적 거품저감방안 연구.
- 전력연구원 (2006). 보령화력발전소 취배수구 해수 및 거품의 성질.
- 전력연구원 (2007). 보령화력발전소 배수로 거품저감구조설계.
- 한국전력기술주식회사 (1994). 발전소 가동시 배수구 주위에서 발생하는 거품저감 대책.
- Wood, I. R. (1991). An entrainment in free surface flows. IAHR Hydraulic Structures Design manual.
- 福原華一 (1990). 復水器冷却水路系の發泡防止對策設計. 財團法人 電力中央研究所 研究報告 U90021.
- 電力土木技術協會 (1995). 火力原子力發電所 土木構造物の設計.

---

원고접수일: 2010년 6월 7일

수정본채택: 2010년 7월 26일

게재확정일: 2010년 8월 10일