'2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

울진 5, 6 호기 취수펌프 안정성 확보를 위한 수리모형실험

Hydraulic Modeling Test of Intake Pump in Ulchin Nuclear Power Plant 5 and 6 Units

김진원, 이대수

한국전력공사 전력연구원

요 약

원자력발전소 취수조 대용량 펌프에서 발생하는 진동, 소음, 임펠러 손상 등은 펌프자체에 대한 문제외에 취수조내로 유입되는 불균일한 흐름 현상과 최소 잠김 깊이의 부족, 취수조내의 부적당한 기하학적 형상에 그 원인이 있다. 따라서 취수구조물 설계시 펌프의 안정성 및 수명확보를 위해서 취수구조물의 유속조건, 설비배치조건 및 기하학적 형상에 따른 수리특성에 대한 검토가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 Froude 상사법칙을 적용하여 건설중인 울진 5, 6 호기 취수펌프에 대한 수리모형실험을 수행하고, 최적 수류개선설비를 제시함으로서 대용량 취수펌프의 안정성을 확보할 수 있도록 하였다.

Abstract

In the intake structure of a nuclear power plant, undesirable pump operating characteristics such as vortices and non-uniform pump-approach flow around the pump bells take place frequently due to poorly-arranged intake geometry. Therefore, prior to the construction of intake structure or internal auxiliary facilities, hydraulic modeling test should be performed to predict the undesirable hydraulic phenomenon. In this study, a 1:10-scale, geometrically undistorted physical model was employed to investigate the hydraulic behavior and flow control devices were proposed to assure stable suction condition of pumps in the intake structure of Ulchin nuclear power plant 5, 6 Units.

1. 서 론

발전소에서 냉각수로 이용되는 해수는 취수조를 거쳐 취수펌프에서 흡입되어 계통에 이르게 된다. 해수에 포함된 부유물질, 해양생물은 취수조내 Trash Rack, Traveling Screen에서 제거되며, 이후 취수펌프에 이르게 되어 냉각수로 사용된다. 한편, 취수조내 흐름은 펌프 유량, 취수조의 기하학적 형태, 수위 등 여러 요소에 의해서 변화하게 되며, 대용량의 취수펌프는 취수조내에서 불균등한 흐름이 발생할 경우 펌프의 진동, 소음 및 국부적인 공동현상 등으로 인해 펌프의 성능 및 수명에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 이러한 문제점들을 사전

에 관찰하고, 최적 흐름을 도출하기 위하여 수리모형실험이 사전에 이루어져야 한다. 펌프로의 안정적 흐름은 펌프의 유량 및 취수구조물의 형태가 어느 정도 결정된 이후에는 일반적으로 부적절한 흐름을 저감하고, 안정적인 흐름을 유도할 수 있는 수류개선설비를 설치함으로서 확보가 가능하다. 본 실험에서는 울진원전 5, 6 호기 순환수계통 취수조를 대상으로 취수조내 최적 수류개선설비를 제시하기 위하여 수리모형실험을 수행하였다.

2. 상사법칙 적용

취수조 수리모형실험에서는 펌프내부만을 제외하고는 개수로 형식으로 중력이 흐름을 주로 지배한다고 생각할 수 있으므로 Froude의 상사법칙이 적용될 수 있다. 이때 수심이 너무 작아져서 모형에서의 흐름이 층류가 되지 않도록 하여야 한다. 본 연구에서는 1/10로 축소모형으로 제작하였으며, Froude 상사법칙에 의해 다음과 같은 수리량 비율을 적용하였다.

수평축척 : $X_r = 1/10$

연직축척 : $Y_r = 1/10$

유속비 : $V_r = X_r/T_r = X_r/X_r^{1/2} = X_r^{1/2} = 0.316$

유량비 : $Q_r = X_r^2 \cdot Y_r/T_r = X_r^{5/2} = 0.00316$

수면경사비 : $I_r = Y_r/X_r = 1$

조도계수비 : $n_r = Y_r^{2/3} \cdot I_r^{1/2}/V_r = Y_r^{1/6} = 0.681$

시간 : $T_r = X_r/T_r = X_r/X_r^{1/2} = X_r^{1/2} = 0.316$

한편 취수조 수리모형실험에서 자연스럽게 발생하는 와류는 물의 점성 및 표면장력에 관련된 것으로 Froude 상사율에 의해 정확하게 맞지 않는다. 따라서 와류의 위치 및 강도의 상사를 맞추기 위한 많은 연구가 수행중이나, Froude 상사법칙에 물의 점성, 표면장력의 영향을 동시에 고려하기는 어렵다. 한편, Dagget(1974)의 연구에 의하면 모형취수조 유입시 Reynolds 수가 3×10^4 이상일 때($R_e=Vd/\nu$, 여기서 V: 유입유속, d: 유입부 동수반경, ν: 동점성계수) 표층에서 발생하는 와류에 대하여 물의 점성 및 표면장력의 영향은 무시할 만하다고 하였고, Padmanabhan(1984)는 모형취수조 유입시 Reynolds 수가 7×10^4 이상일 때 표층와류에 대하여 원형과 모형간의 다른점을 발견하지 못했다고 주장하였다. 심층에서 발생하는 와류에 대한 연구는 표층와류에 대한 연구보다도 그 성과가 아직 미약한 상태이나, Padmanabhan(1984)는 펌프실에서의 접근 Reynolds 수가 3×10^4 이상에서 ($R_e = V_a s_a/\nu$, 여기서 V_a : 펌프접근유속, s_a : 펌프접근시 수심, ν : 동점성계수) 물의 점성이 상사에 미치는 영향은 무시할 만 하다고 주장하였다.

본 실험에서의 모형취수조 유입시의 Reynolds 수는 약 2.4×10^5 이고, 취수펌프 접근시 Reynolds 수는 약 4.5×10^5 로, 표면장력과 물의 점성이 Froude 상사법칙에 미치는 영향은 무시할 만하다.

3. 실험장치의 구성

본 실험을 수행하기 위하여 한국전력공사 전력연구원 취수조 수리모형실험실내에 발전소 취수조 실험장치를 제작하였다. 모형취수조 내부에는 Trash Rack, Traveling Screen, Screen Wash Pump를 제작 설치하였다. Trash Rack의 Bar간격 등은 기하학적인 상사에 의해서 1/10으로 축소 제작하였고, Traveling Screen의 Mesh Size로 인한 공극율을 원형과

모형간 일치하도록 하여 원형과 모형간에 Screen 통과에 의한 수두차 계수가 일치하도록 하였다. 제작된 모형취수조는 수조에 부착하여 냉각수가 취수조로 유입되는 현상을 재현할 수 있도록 하였다. 모형취수펌프의 유량은 Butterfly Valve 및 Inverter로 조절할 수 있도록 하였고 취수조에서 펌프를 통해 흡입한 실험수는 다시 파이프를 통해 수조로 공급될 수 있도록 하였다. 각 파이프에는 전자유량계가 부착되어 있어 취수유량을 확인할 수 있도록 하였다. 파이프를 통해 수조내에 공급된 용수는 Weir를 거쳐 1차적으로 정류되고 다시 2개의 정류판을 거치게 하였고, 잔잔해진 용수는 수조를 거쳐 모형취수조로 재 유입될 수 있도록 하였다.

모형취수조 및 수조에는 Siphon을 이용한 수위계가 설치되어 Trash Rack 통과 전후 Traveling Screen 통과 전후의 수위를 측정할 수 있도록 하였고, 수위조절은 수조내에 부착된 수중펌프로 조절할 수 있게 하였다.

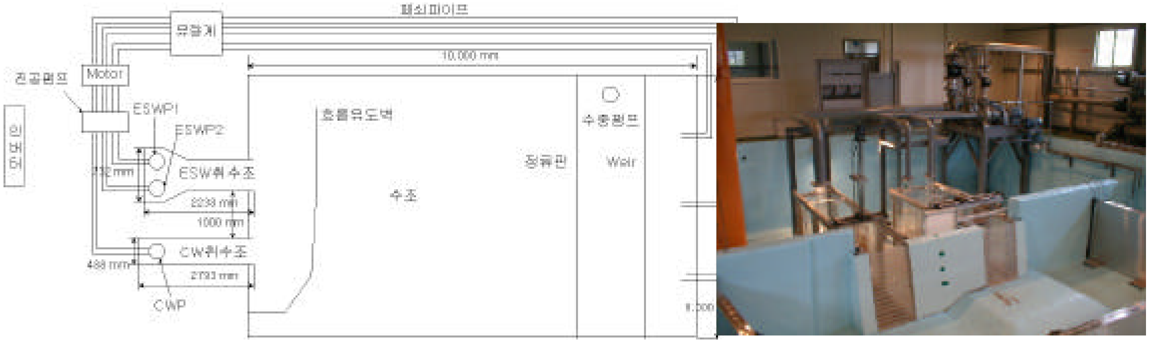


그림 1 수리모형실험장치 구성도

4. 실험관측 방법

본 수리모형실험에서는 취수조내에 발생하는 와류, 공기유입, 펌프내 유속분포, 펌프내 유체회전, 취수조내 유속분포, 취수조내 수위 측정이 있으며, 펌프 Bell 직상부의 수위에 따라 펌프의 진동 및 Impeller의 손상을 초래할 수 있고 펌프의 효율을 저하시킬 수 있으므로 취수조 및 펌프 내부에서의 수리학적 조건을 검토해야 한다. 취수 펌프의 안정 조건은 일반적으로 설계기준으로 정하여 적용되고 있으며 이는 주로 수리모형실험을 통하여 검토되고 있다. 수리모형실험을 통하여 검토해야 할 항목은 다음과 같다.

① 펌프 입구부 주변 및 표층에서의 와류 및 공기 발생여부

② 펌프내부 Impeller 직전에서의 유속분포

③ 펌프 내부에서의 유체 회전여부

또한 발전소 취수조에서의 흐름은 수위 및 펌프 유량 변화에 따라 다양하고, 스크린에서의 부유물 및 해양생물에 의한 막힘조건에 의해서도 변화될 수 있다. 따라서 본 실험에서는 이러한 조건들을 고려하여 실험을 수행하였다. 수위에 대해서는 Mean Sea Level(M.S.L.)과 Lowest Low Water Level(L.L.W.L.) 일 때의 흐름상황을 모의하였으며, 펌프의 유량은 정격유량(133,000 gpm)과 최대유량(180,000 gpm)일 때에 대해서 모의하였다.

4.1 와류 및 공기유입 관측

취수펌프 입구부 근처에서 와류 및 공기가 발생하면 공기는 펌프내로 흐르는 유체와 결합

하여 균등 유입을 방해하여 펌프의 진동, Impeller 손상 등을 유발시켜 펌프의 수명을 단축시킨다. 발전소 취수조내에서 발생하는 와류, 공기발생 현상은 다음 5가지 경우로 구분하여 나타낼 수 있고, 이를 취수조 가동시 적용시킬 수 있다.

① 표면에서 거품발생 없이 와류의 중심이 약간 저하되는 현상

② 와류중심에서 약간의 거품과 꼬리가 형성되지만 펌프 입구까지는 어떠한 영향도 미치지 않는 현상

③ 와류중심에서 약간의 거품과 함께 꼬리가 펌프입구까지 불규칙하게 연결되는 현상

④ 와류중심으로부터 거품과 꼬리가 길게 형성되어 펌프입구까지 이어져 25 30초 정도 머무르다가 없어지는 현상

⑤ 와류 중심이 크게 벌어져 펌프 입구에 공기가 유입되어 심한 소음을 발생시키는 현상

여기에서 ①, ②와 같은 현상 발생시 펌프의 운전에는 크게 영향을 미치지는 않으나 주의해야 하고, ③은 측정시에는 펌프의 운전에 크게 영향을 미치지 않을것 같으나 유입된 공기가 펌프를 지나서 파이프에 도달하면 큰 공기방울을 형성하여 큰 손실을 발생시킬 수 있으며 모형에 비례하여 실제로는 더 큰 양의 공기가 유입될 것이므로 운전이 불가능하다. 또한 ④, ⑤와 같은 현상이 발생하게 되면 펌프 Impeller에 심한 손상을 일으키게 되고 진동을 발생시켜 펌프의 수명을 단축시킴으로 운전은 불가능하다. 이에 대한 검토는 수리모형실험을 통하여 반드시 검토되어야 한다. 그림 2의 Type 1, 2 적용 가능하여 설계기준에 속하고, Type 3, 4, 5, 6는 적용 불가능하다.

또한 심층에서 발생하는 와류에 대해서는 그 꼬리가 펌프 입구부까지 이어지지 않아야 한다. 펌프안정성에 영향을 줄 수 있는 심층와류는 주로 취수조 벽면 및 바닥에서 발생하며 심한 경우에는 물속에서 공기방울을 발생시켜 펌프 유입부에 연결된다. 미세한 심층와류의 경우 육안으로 관찰하기 어려움으로, 수리모형실험 수행시 실험용 색소의 움직임을 면밀히 관찰하여 심층와류 발생여부를 판단하였다(그림 3)

.

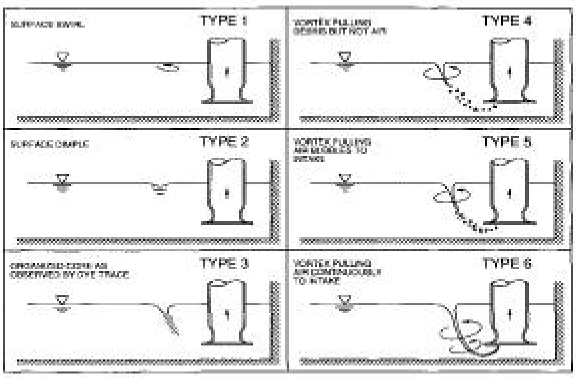


그림 2 자유수면에서 발생하는 와류형태

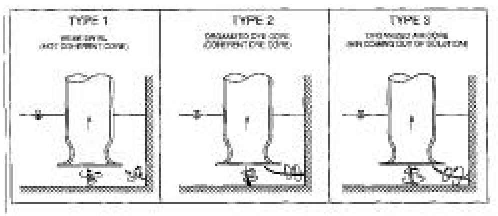


그림 3 심층에서 발생하는 와류형태

4.2 펌프내부의 유속분포

펌프 내부에서 불균등한 힘이 임펠러에 작용하면 진동 및 공동현상이 발생할 수 있으므로 임펠러 직전에서 유속분포가 균등한지 검토하여야 한다. 유속분포는 펌프 임펠러 직전 단면에서 유입방향에 대한 특정지점 유속 V_n과 단면평균 유속값 V_{mean}의 차가 단면평균 유속값 V_{mean}에 대하여 10% 이하로 차이날 것을 제안하고 있으며, 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$V_n - V_{mean} \leq 10\% \cdot V_{mean}$

펌프내 유속은 펌프관에 Pitot Tube를 삽입하여 펌프 목(Throat)에서 펌프내 유속을 구하였다. 펌프관 회전, Pitot Tube 삽입깊이 조정으로 25지점에서의 유속을 구하였고, 이를 전체 유속값에 대하여 평균한 후 각 지점과의 편차를 구하였다

4.3 펌프내부의 유체회전

펌프내에서 유체회전에 의해 공동현상이 발생할 수 있다. 펌프내부의 특정 단면중 일반적으로 5°이하의 회전각도에서 만족할 만한 회전속도($NPSH_{available}$, $NPSH_{required}$)를 구할 수 있으며 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$\theta = \tan^{-1}(V_\theta / V_Z)$

θ : 펌프내 유체의 회전각도

V_Z : 펌프 축방향 평균유속

V_θ : 펌프내 평균 회전유속

여기서, $V_\theta = 2\pi r\Omega / 60$

r : 펌프내 측정 단면의 반지름

Ω : 회전속도 (rpm)

이를 측정하기 위해서 펌프내에 0°의 날개를 설치하여 유체회전에 의해서만 회전할 수 있도록 하였다(그림 4). 측정은 2분 동안 5회 측정하여 평균값을 적용하였다.

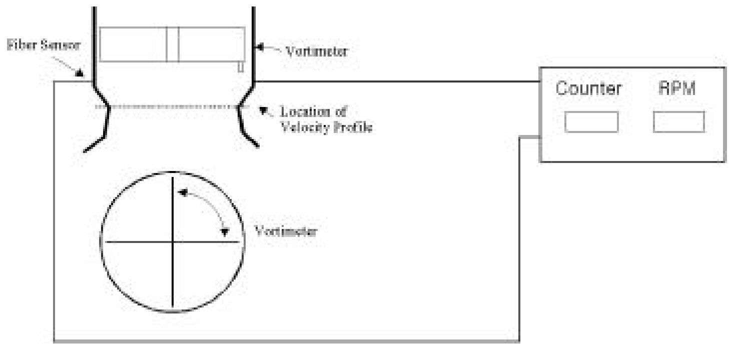
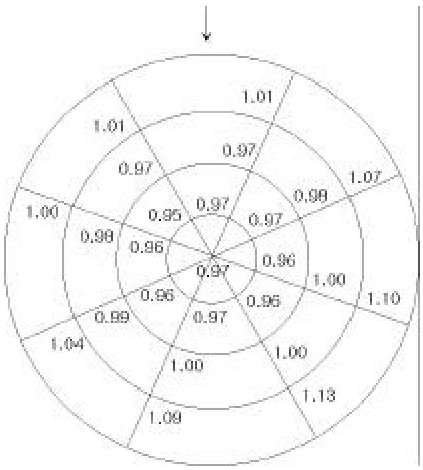


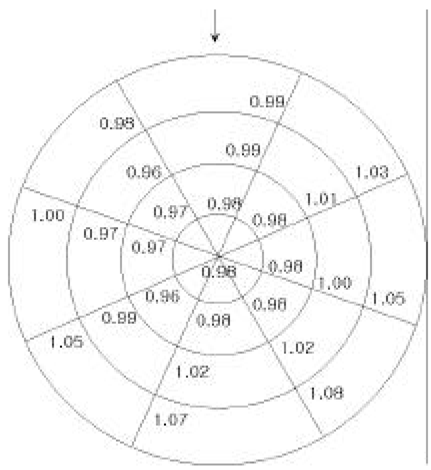
그림 4 펌프내 유체회전 측정

5. 실험결과

5.1 수류개선설비 설치전 실험결과

수류개선설비를 설치하기 이전에 취수조내의 흐름상태와 펌프의 안정성을 관측하기 위하여 수위 L.L.W.L.이고, 펌프는 정격유량으로 가동할 때 취수조내 흐름상태를 관측하였다. 펌프 Throat에서의 안정적인 유속 편차는 ±10%이나, 흐름방향에 대하여 펌프 Throat 후단부의 유속이 빠르게 나타나 설계기준을 초과하였다. 전체적인 유속분포는 흐름방향에 대하여 펌프 후단부와 펌프 Throat 관 근처의 유속이 빠르고 중심부 유속이 느린 결과를 나타내었다. 이는 펌프 유량에 비하여 펌프 Bell Mouth에서 펌프 Throat를 통과시 통수면적이 급격히 감소하면서 펌프 중심부에서는 정체지역이 존재하고, 펌프 Throat의 관 근처에서 빠른 유속을 나타내는 것이라고 판단된다(그림 5).





가. 수류개선설비 설치전 **나. 수류개선설비 설치후**

그림 5 **순환수펌프** Throat**에서의 유속분포**(L.L.W.L. **정격유량**)

펌프내 유체회전은 접근흐름의 균일성에 의해 크게 영향을 받는데 취수조의 경우 펌프를 중심으로 Traveling Screen**으로부터 유입되는 좌측**, **우측의 흐름이 중앙부보다 강하지만**, **좌우의 균형이 대칭이 되어 펌프내 유체회전은 크게 발생하지 않았고**, **유체회전 각도는 반시계 방향으로** 1.94° **로 나타나** 5° **이하인 설계기준을 만족하였다**.

한편, Traveling Screen **통과후 표층에서 파동이 많이 발생하였으나**, **주목할 만한 표층와류는 발생하지 않았다**. **한편 펌프 뒤쪽 취수조 모서리 지점에서 정체지역이 발생하였다가**, **유량증가**, **수위저하에 따라 일부 표층와류가 발생하였다**. **심층와류의 경우는 실험색소를 펌프 근처 상하좌우에서 주입했는데 주목할 만한 와류는 발생하지 않고**, **색소가 펌프로 흔들림 없이 유입되었다**. **따라서**, **수류개선설비 설치에 관계없이 심층와류가 펌프에 미치는 영향은 없어 보였다**.

5.2 **수류개선설비의 설치**

수류개선설비 설치전 계측 결과를 토대로 펌프로의 유입을 효과적으로 유도하기 위한 수류개선설비를 고안 및 설치 할 수 있다. **본 실험에서는 수류개선설비 설치전 주로 펌프내 후단부 관 근처 유속분포가 주로 빠른 흐름을 나타내어 이를 저감하기 위해서 취수조 후단부 모서리에** Backwall Floor Fillet**을 설치하고 바닥에는** Floor Splitter **및** Sidewall Floor Corner Fillet**를 경사를 주어 설치하여 펌프내 후단부 관 근처의 유속이 저감되도록 하였다**. **또한**, **펌프 뒷부분과 취수조벽 사이로 발생하는 후류로 인하여 나타나는 유체회전을 저감하기 위해서** Backwall Splitter**를 설치하였으며**, **취수조 모서리 표면에서 일부 발생하였던 표층와류를 저감하기 위해서** Backwall Corner Fillet**을 설치하였다**.

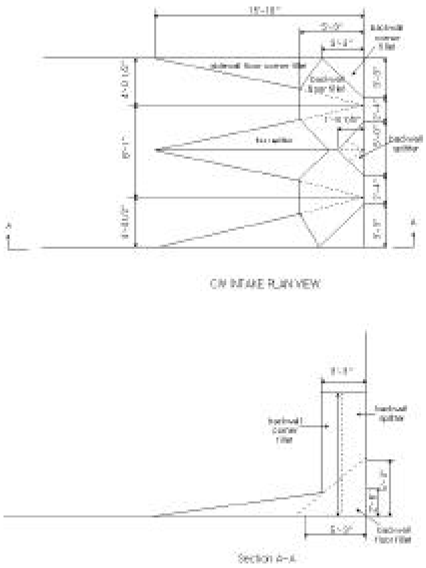


그림 6 수류개선설비 배치도(원형)

그림 7 수류개선설비 배치 사진(모형)

5.3 수류개선설비 설치후 실험결과

수류개선설비 설치후 수리모형실험은 수위변화별(L.L.W.L, M.W.L.), 유량변화별(정격유량, 최대유량), 50% Traveling Screen 막힘현상 발생시에 대해서 수행되었다. 원형에서는 각 상황에 따라 펌프의 안정성 및 취수조내 흐름도 변화될 수 있으므로 실험에서도 이를 고려하여 펌프내 유속분포, 유체회전, 와류발생여부, Screen 통과시 수두차, 펌프 접근유속 분포를 관측하였다.

펌프내 유속분포, 유체회전, 취수조내 와류발생 여부 등 여러 항목에서 수류개선설비 설치후에서의 흐름상태가 수류개선설비 설치전의 흐름상태보다 안정적으로 나타났다. 특히 고수위, 저유량에서 안정적인 결과를 나타내었다. 펌프 안정성에 영향을 미칠 수 있는 펌프내 유속분포는 수류개선설비 설치후 후단부 유속이 저감되어, 안정적인 결과를 나타내었으며, Backwall Splitter 등의 설치로 선회류가 더욱 저감됨에 따라 펌프내 유체회전도 감소하였다. 수류개선설비 설치전 일부 취수조 모서리에서 발생하던 표층와류는 Backwall Corner Fillet의 설치로 거의 발생하지 않았으며, 색소를 투입하여 흐름을 관찰한 결과 심층에서는 수류개선설비 설치전과 마찬가지로 어떠한 와류도 발생하지 않았다(그림 8). 표 1은 수류개선설비 설치후 각 조건에 대하여 계측한 결과를 정리한 것이다.

표 1 수류개선설비 설치후 펌프 안정성 평가 실험 결과

구분	펌프내 유속분포	펌프내 유체회전	표층와류	심층와류	비고
L.L.W.L. 정격유량	Max. 1.08 Min. 0.96	0.65 ° (시계방향)	Type1 이하	Type1 이하	만족
L.L.W.L. 정격유량, Screen 50% 막힘시	Max. 1.06 Min. 0.97	1.94 ° (반시계방향)	Type1	Type1 이하	만족
M.W.L. 정격유량	Max. 1.08 Min. 0.97	0.32 ° (시계방향)	Type1 이하	Type1 이하	만족
L.L.W.L. 최대유량	Max. 1.10 Min. 0.95	0.32 ° (시계방향)	Type 1, 2	Type1 이하	만족

가. 표층 나. 심층

그림 8 취수조내 와류발생 여부 관측

6. 결론

본 연구는 건설중인 울진원전 5, 6 호기 취수조내에 수리특성을 예측하고 최적 기하학적 형상을 제시하여 펌프의 수명확보 및 취수계통의 안정적 운영을 도모하고자 수리모형실험을 수행한 것이다. 이를 위해서 1/10 규모의 Froude 상사법칙을 적용하여 펌프 안정성 실험을 실시한 결과, 전체적인 수류상태는 안정적이어서 표층 및 심층와류는 발생하지 않았고, 펌프 내의 유체회전각도는 설계기준인 5° 미만으로 나타났으나 펌프 Throat 단면에서의 특정 지점 유속은 평균 유속의 10% 이상으로 나타나, 설계기준을 만족하지 못하였다. 따라서, 펌프 주위에 Floor Splitter, Sidewall Floor Corner Fillet, Backwall Floor Fillet, Backwall Corner Fillet, Backwall Splitter와 같은 수류개선설비를 설치함으로 보다 안정적인 수류상태를 유도한 결과 펌프 Throat 후단부에서 빠르게 나타났던 유속은, Backwall Floor Fillet, Floor Splitter, Sidewall Floor Corner Fillet의 흐름유도로 인하여 펌프 Throat 후단부의 유속을 저감되어 설계기준을 만족하였다. 또한 Backwall Corner Fillet, Backwall Splitter를 취수조 벽에 설치함으로 선회류 및 모서리에서의 와류 발생 가능성을 저감시켰다. 이에 따라 수류개선설비 설치전 설계기준을 초과하였던 Pump Throat내 유속분포를 포함하여 모든 계측항목이 보다 안정적으로 나타났다.

7. 참고문헌

1. Charles E. Sweeney, "Pump Sump Design Experience: Summary." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 108, No. HY3. (1982. 3)
2. Daggett, L.L., and Keulegan, G.H., Similitude in Free-Surface Vortex Formations. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, Vol 100, No. HY11. (1974. 1)
3. Padmanabhan, M., and Hecker, G.E., Scale Effects in Pump Sump Models. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, Vol 110, No. 11. (1984. 11)
4. Tatsuaki Nakato, Pump Station Intake-Shoaling Control with Submerged Vanes. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, Vol 116, No. 1. (1990. 1)