



최성룡 / 한국남동발전(주)  
sdragon@kosep.co.kr

## 화력발전소 해수 취수 펌프 흡입수조 모형시험

부산공업대학 기계설계학과 학사  
경상대학교 산업대학원 석사  
유체기계기술사  
(현) 한국남동발전(주) 과장

### 1. 서 론

#### 1.1 배경

발전소용 해수 취수 펌프를 구동시켜 수조에서 냉각수를 취수할 때 수조의 치수, 수조로 접근하는 유동의 불균일성 및 펌프의 잠김 깊이 등의 여러 요인에 의하여 수조에서보오텍스가 발생할 수 있으며 이 중에서 특정 보오텍스는 펌프 성능에 나쁜 영향을 미치게 된다. 따라서 이와 같이 펌프의 성능에 나쁜 영향을 주는 보오텍스의 발생을 실험적으로 확인하고 발생하는 경우 이를 억제하기 위하여 수조 모형시험이 수행된다.

#### 1.2 시험 범위

본 연구의 목적은 정격 회전수 223 rpm에서 73,000 m<sup>3</sup>/h, 23.0 m의 정격 유량과 양정을 가지는 화력 발전소 해수 취수 펌프의 흡입 수조의 성능을 조사하고 이 수조에 대한 모형시험을 통하여 펌프 효율의 감소, 진동 및 소음의 발생과 같이 펌프 성능에 나쁜 영향을 주는 보오텍스가 발생할 경우 이를 방지하기 위한 장치를 설계하는데 있다. 따라서, 수조 모형시험에 대한 본 연구의 범위는 아래와 같다.

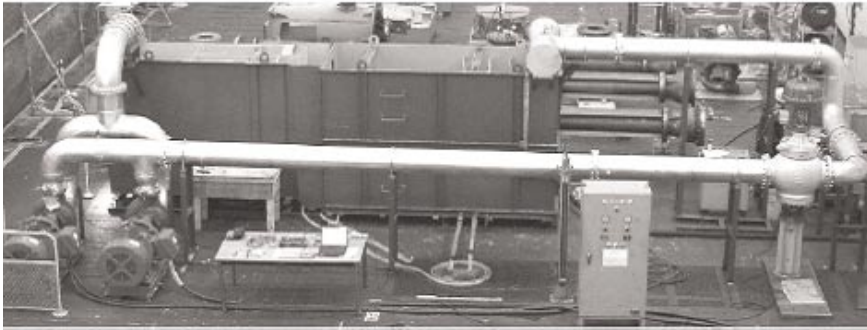
##### (1) 모형 제작

수조 모형시험을 수행하기 위해서는 기하학적으로 상사한 모형을 만들어야 하며 상사법칙을 만족하기 위하여 아울러 동력학적 상사가 만족되어

야 한다. 하지만, 모형시험의 경우 실물 수조에서와 같이 시험수로서 물을 사용하기 때문에 실물의 Reynolds 수(Re)와 Froude 수(Fr)를 동시에 만족시키기는 불가능하다. 수조 모형시험에서는 자유수면이 존재하므로 이 두 무차원 수 가운데 Fr가 더 중요한 비중을 차지하게 되며 따라서 모형에서 Re의 값을 감소시킨다. 하지만 일반적으로 Re가 높은 경우 유동은 서로 비슷하므로 모형에서 Re가 충분히 높은 값(파이프 유동의 경우 6104)을 갖도록 축척비가 결정되어야 한다. 아울러 자유 수면에서의 유동에 영향을 주는 표면장력의 영향을 고려하여 Weber 수가 240이상 되어야 한다. 이러한 사실에 입각하여 영흥 화력 발전소 해수취수 펌프 수조 모형의 축척비가 결정되었으며 그 값은 10.0이다. 축척비에 따라 축소된 수조 모형은 현대중공업 내에 설치되었으며 이 모형에 사진을 그림 1에 나타내었다. 사진에서와 같이 수조 모형 시스템의 대부분은 연철을 사용하여 제작되었으며 관측창 및 펌프 흡입구는 유동 상태의 관측을 위하여 그림 2와 같이 아크릴 플라스틱을 이용하여 제작되었다.

##### (2) 수조 모형시험 수행

수조 모형시험의 수행 방법에 대한 자세한 사항은 2장에 기술되어 있다. 모형 시험은 2 가지 유량 조건(rated flow-rate, run-out flow-rate)에 대하여 3가지 수위(LLWL, MSL, HHWL)에서 수행하였다.



[그림 1] Overview of the sump model



[그림 2] Observation windows and a vortimeter

(3) 보오텍스 방지 장치 설계 및 성능 확인  
 화력 발전소 수조에 대한 예비 시험 결과 만족할 만한 성능을 주지 못하였으므로 보오텍스 방지 장치를 설계하고 그 성능을 확인하였다.

## 2. 시험 방법

### 2.1 수조모형 시험방법

펌프 흡입수조 모형시험을 수행하는 방법으로는 크게 Froude 수 일치법, Reynolds 수일치법 그리고 속도 일치법의 3 가지 방법이 있다. 그러나 자유 표면을 포함하는 유동의 경우, 중력과 관성력에 의한 영향이 지배적이기 때문에 Froude 수 일치법이 일반적으로 사용되고 있으며 이 때 Froude 수 외에도 점성과 표면장력 등이 영향을 줄 수 있으므로 안전 여유를 확보하기 위하여 1.25, 1.5 또는 그 이상의 Froude 수 일치법을 사용하기도 한다. 따라서 자유 표면에서부터 발생하는 공기흡입와류에 대해서는 1.5 Froude 수 일치법을 사용하여 시험을 수행한다. 그러나 수조 바닥 또는 옆 벽면에서부터 발생하는 수증와의 경우 그 발생 현상이 수조 내부의 속도 분포에 의해 크게 달라지는 것으로 판단되므로 속도 일치법을 적용하여 그 발생 여부를 판단한다.

1.5 Froude 수 일치법 및 속도 일치법에 의해

원형에서의 유량에 상응하는 모형에서의 유량을 구하여 시험 조건을 정하며 이에 대한 자세한 내용은 2.4항에 나타내었다. 시험방법에 따라 결정된 펌프의 유량은 유량 조절 밸브로 조절되며 모형시험 설비의 폐회로 유량을 맞춤으로서 펌프 취수부 부근의 유동은 실물 펌프의 취수부 부근에서의 유동조건과 상사하게 된다.

### 2.2 계측 장비 및 시험 순서

모형시험에서 유량의 측정은 중량이나 부피를 측정하는 방법에서부터 벤츄리 미터나 오리피스 미터 (orifice meter) 또는 전자기 유량계 (electromagnetic flow meter)를 사용하는 방법에 이르기까지 다양한 방법이 있다. 본 수조 모형 시험에서는 모형 펌프의 유량을 계측하기 위하여 통상적으로 많이 사용되고 있는 오리피스 미터를 사용하였다. 오리피스미터는 유로의 단면적을 감소시키면 속도가 증가하면서 압력이 감소하게 되는 원리를 이용하여 압력 게이지의 수두 차이를 측정하여 유량을 결정하는 방법을 사용하고 있으며 이것은 시험 범위에서  $\pm 2\%$ 의 정확도를 갖는 것으로 알려져 있다. 시험에 사용된 오리피스는 목 단면의 지름이 180 mm이고 목 단면 지름과 배관 지름의 비율인  $\beta$ 가 0.5907이며 압력 탭은 D ; D/2 탭 형식을 사용하였다. 이에 대한 캘리브



레이션 결과는 **그림 3**에 나타내었다.

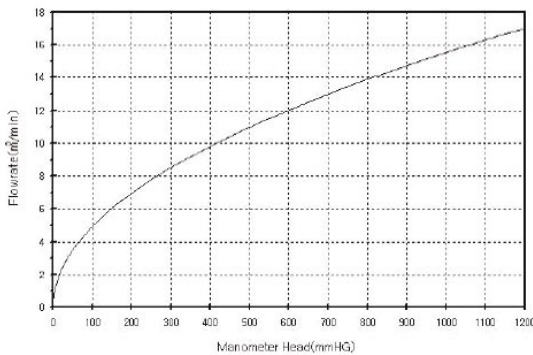
펌프 관에 유입되는 유동이 회전방향으로 큰 속도 성분을 갖는 경우 펌프의 효율을 감소시키는 역할을 하게 된다. 이와 같은 유동의 예 선회(pre-rotation)의 강도는 회전각(swirl angle)으로 표시된다. 따라서 펌프에 유입되는 유동의 회전각을 측정하기 위하여 와도계(vortimeter)를 펌프 흡입 배관에 설치한다. 이 와도계는 마찰이 적은 축에 지지되어 있는데 4 개의 직사각형 날개를 가지고 있으며 각 날개는 0의 피치를 갖는다.

최종 수조 형상에 대한 펌프 목에서의 속도 분포는 **그림 4**와 같은 pitot 관을 사용하여 측정하였다. Pitot 관을 펌프 관에 설치한 모습을 **그림 5**에 나타내었다. Pitot관은 차압 센서에 연결되며 총

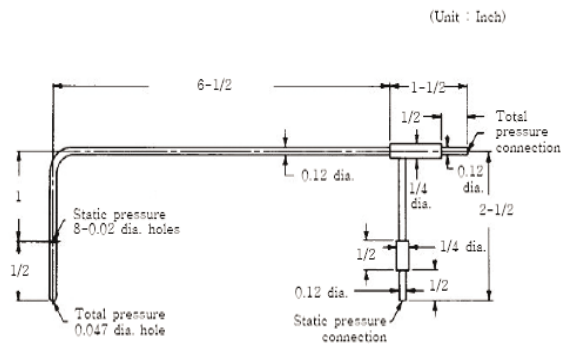
압력과 정압력의 차이값이 전류로 출력된다. 출력된 전류는 자료 취득 장치(data aquisition system)를 통해 속도로 변환되어 컴퓨터 모니터에 출력된다. 계측의 자동화를 위한 자료 취득 장치는 **그림 6**과 같이 구성되며 그림에 각 구성품의 사양을 같이 나타내었다.

수조 모형시험은 다음과 같은 순서에 따라 수행된다.

- 1) 깨끗한 물을 수조에 천천히 채우되 물 공급관에 있는 밸브를 조절하여 측정 수위보다 약간 높게 채운다.
- 2) 펌프 시동관(priming line)에 물을 공급한다.
- 3) 순환용 펌프를 구동시킨다.
- 4) 유량 조절 밸브를 이용하여 시험 유량을 맞춘다.



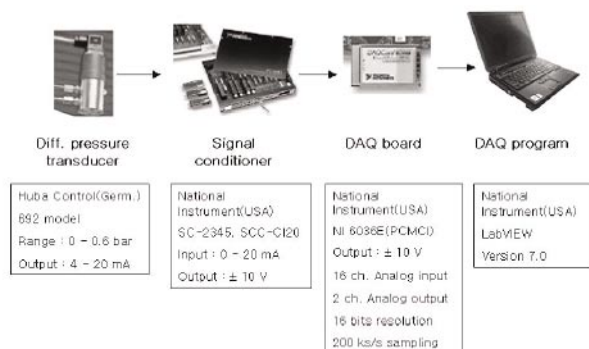
[그림 3] Calibration chart of the orifice meter



[그림 4] Shape and dimensions of the pitot-tube



[그림 5] Installed pitot-tubes



[그림 6] Composition of the data acquisition system

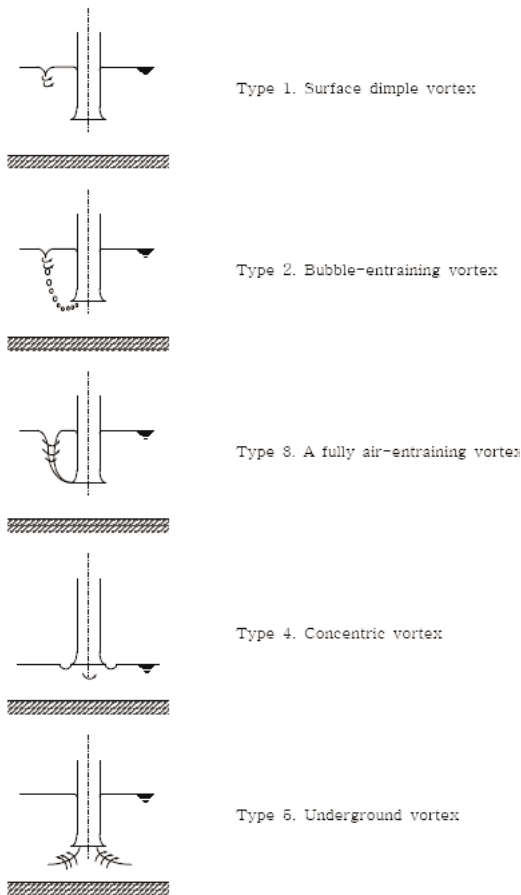


다. 이 때 배수관에 부착되어 있는 밸브를 조절하여 수위를 맞추게 된다.

- 5) 안정된 유동 상태가 될 때까지 기다린 후 모형시험을 수행한다.
- 6) 다른 시험 수위에 대하여 위의 2)에서 5)까지의 과정을 반복한다.

### 2.3 성능 판정 기준

이제까지 수행한 여러 수조 모형시험에 대한 경험으로부터 다음과 같은 성능 판정 기준을 갖고 있으며 이러한 기준은 기존의 많은 수조 형상에 적용되어 만족스러운 결과를 보여주고 있다. 따라



[그림 7] Classification of surface vortices

서 성능 판정 기준은 다음과 같다.

- 1) 공기흡입와의 경우 dimple vortex보다 강한 공기 흡입와는 발생되지 않아야 한다. 여기서 보오텍스 유형은 그림 7에서와 같이 분류된다. 특히, 발전소의 해수 취수 펌프와 공장의 냉각수 펌프의 경우 이러한 기준이 엄격히 적용된다. 따라서 dimple vortex의 깊이가 수면에서 벨마우스까지의 깊이에 대하여 0.2보다 크지 않아야 한다는 기준을 적용하고 있다.
- 2) 보오텍스 내부에 공동을 갖는 수중와는 펌프에 진동과 소음을 일으키는 원인이 된다. 그러므로 공동을 갖는 어떠한 수중와도 펌프에 유입되어서는 안 된다.
- 3) 유동의 회전각에 대하여 현대중공업에서는 통상적으로 성능 판정에 대한 기준 값으로 5도를 사용하고 있으며 이 때의 회전각  $\theta$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = \tan^{-1} (V_t / V_a) \quad (1)$$

- 여기서  $V_a$  = 축 방향 평균 속도 =  $4Q/\pi D^2$   
 $V_t$  = 날개 끝에서의 접선방향 평균속도  
 $= \pi dn/60$   
 $Q$  = 유량 ( $m^3/s$ )  
 $D$  = 관 직경 (m)  
 $d$  = vortimeter의 직경 (m)  
 $n$  = vortimeter의 회전수 (rpm)
- 4) 벨마우스 목 단면에서 Pitot 관을 사용하여 측정된 축 방향 속도성분의 크기는 단면평균값의 10% 이내에서 변화하여야 한다.

### 2.4 시험 조건

앞에서 언급한 바와 같이 모형시험에서 상사법칙은 모형펌프의 유량을 결정하여 적용된다. 수조 모형시험은 3 개의 서로 다른 수위(LLWL, MSL, HHWL)에서 정격 유량 및 최대 운전 유량의 2 가지 유량에 대하여 수행되었다.



공기흡입와류에 대해서는 1.5 Froude 수 일치법을 적용하며 이 경우의 원형과 모형에서의 Froude 수의 관계는 식 (2)와 같다.

$$V_M / \sqrt{gL_M} = 1.5 \times V_P / \sqrt{gL_P} \quad (2)$$

이 때 유속 및 유량 관계는 식 (3), (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$V_M = 1.5 \times V_P / \lambda^{0.5} \quad (3)$$

$$Q_M = 1.5 \times Q_P / \lambda^{2.5} \quad (4)$$

수중와류에 대해서는 유속 일치법을 적용하며 이 경우 원형과 모형에서의 유속 및 유량은 다음의 식 (5), (6)과 같은 관계가 있다.

$$V_M = V_P \quad (5)$$

$$Q_M = Q_P / \lambda^{2.0} \quad (6)$$

위의 식 (2) ~ (6)에서

L = 특성 길이

V = 유속

g = 중력 가속도

Q = 모형 펌프 유량

$\lambda$  = 축척비 (LP/LM = 10)

하첨자 P = 실물

하첨자 M = 모형

다음의 표 1은 식 (4) 및 (6)에 의해 계산된 유량 및 수위를 나타낸다.

<표 1> 시험 조건

수위 (m)		실물 펌프 유량 (m <sup>3</sup> /h)		모형 펌프 유량 (m <sup>3</sup> /h)			
		Rated flow	Run-out flow	Air-entraining vortex		Underground vortex	
				Rated flow	Run-out flow	Rated flow	Run-out flow
LLWL	7.49	73,000	84,000	5.77	6.64	12.17	14.00
MSL	12.6	73,000	91,000	5.77	7.19	12.17	15.17
HHWL	17.8	73,000	96,000	5.77	7.59	12.17	16.00

### 3. 시험 결과

#### 3.1 예비 시험

보오텍스 발생에 대한 관측은 각 경우에 대하여 약 5분간에 걸쳐 이루어 졌으며 예비시험 결과를 표 2에 나타내었다. 표에서 보듯이 모든 시험 유량 및 수위에서 수중와류가 수조의 바닥 및 뒷 벽면에서 발생되었다.

공기흡입와류의 경우, LLWL 수위의 정격 유량 및 최대운전 유량에서 연속적으로 공기가 흡입되는 와류가 펌프와 뒷벽 면 사이의 자유표면에서 발생하였으며 이를 그림 8 및 그림 9에 나타내었다.

#### 3.2 수정 시험

보오텍스의 발생을 방지하기 위한 구조물은 보오텍스의 발생 상태 및 유동 조건에 따라 설계되며 일반적으로 수면에서의 유동 상태를 개선하기 위해서는 수면에 격자(grating), 보(bar) 등을 설치하며 수중에서의 상태 개선을 위해서는 수조 바닥 또는 벽면에 보를 설치한다.

예비 시험 결과로부터 수조 바닥 및 옆 벽면에서 강한 수중와류가 발생하는 것이 확인되었으므로 바닥 면과 옆 벽면에 유동의 회전 성분을 감소시킬 수 있는 보들을 설치하였으며 기본적인 형상으로부터 조금씩 형상을 변경하며 반복적인 시험을 수행하여 최종적으로 수중와류의 발생을 방지할 수 있는 구조물의 형상을 결정하였다. 또한 공기흡입와류의 경우도 자유 표면에서의 유동의 회전 성분을 감소시킬 수 있도록 보를 설치하였으며 반



<표 2> Test result of the preliminary test

Test Case	Water Level	Flow rates		Vortex type <sup>1)</sup>	Phenomena	RPM of Vortimeter	Swirl Angle <sup>2)</sup>	Judgement <sup>3)</sup>
		Prototype (m <sup>3</sup> /h)	Model (m <sup>3</sup> /min)					
Preliminary Test	LLWL (749m)	73,000	5.77	AEV	Fully AEV near the back wall	9.6	1.1	×
			12.17	UGV	Often UGV from the bottom and back walls	74.0	3.9	×
		84,000	6.64	AEV	Fully AEV near the back wall	14.0	1.4	×
			14.00	UGV	Often UGV from the bottom and back walls	72.0	3.3	×
	MSL (1260m)	73,000	6.77	AEV	None	9.0	1.0	○
			12.17	UGV	Often UGV from the bottom and back walls	37.0	2.0	×
		91,000	7.19	AEV	None	13.0	1.2	○
			15.17	UGV	Strong UGV from the bottom and back walls	79.0	3.4	×
	HHWL (1780m)	73,000	6.77	AEV	None	11.5	1.3	○
			12.17	UGV	Often UGV from the bottom and back walls	43.0	2.3	×
		96,000	7.59	AEV	None	10.5	0.9	○
			16.00	UGV	Strong UGV from the bottom and back walls	59.0	2.4	×

1) AEV : air-enstraining vortex, UGV : underground vortex

2) Acceptable swirl angle : less than 5 degrees

3) ○ : acceptable, × : unacceptable



[그림 8] Observation of the vortex formation in the preliminary test. (LLWL, Run-out, AEV)



[그림 9] Observation of the vortex formation in the preliminary test. (LLWL, Rated, AEV)



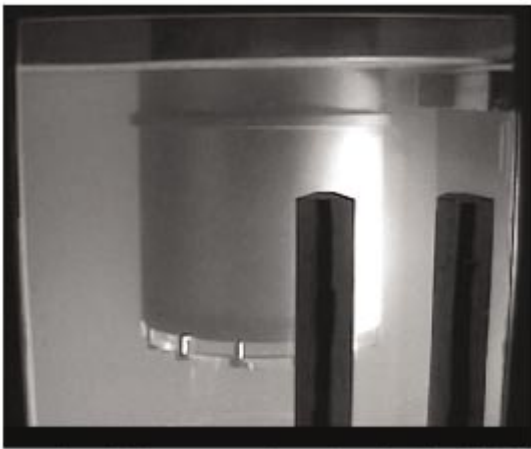
복 시험을 수행하여 최종 형상을 결정하였다. 최종 형상에 대한 시험 결과는 표 3에 나타내었으며 LLWL에서의 공기흡입와류에 대한 사진을 그림 10 및 그림 11에 나타내었다. 표와 그림에서와 같이 모든 시험 조건에서 수중와류 및 공기흡입와류는 발생하지 않았으며 유동의 예선회에 대한 회전

각도는 0.7° 판정 기준을 만족하였다.

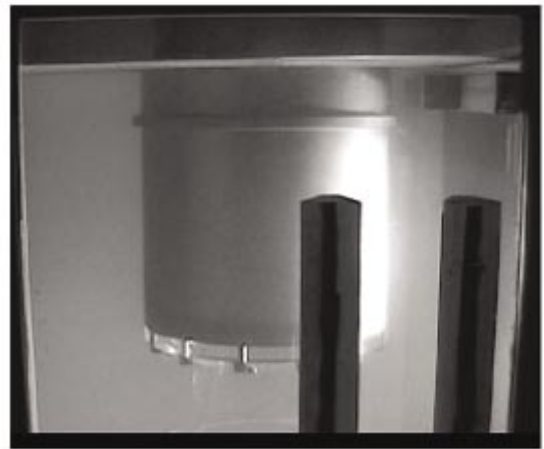
벨마우스 목 단면에서의 유속 분포는 MSL 수위에서의 최대운전 유량에 대해 1.5 Froude 수 일치 조건(공기흡입와류 상사 조건) 및 유속 일치 조건(수중와류 상사 조건)에 대하여 측정하였으며 측정 위치는 목 지름의 50%, 70%인 위치에서

〈표 3〉 Test result of the final modification test

Test Case	Water Level	Flow rates		Vortex type	Phenomena	RPM of Vortimeter	Swirl Angle	Judgement
		Prototype (m <sup>3</sup> /h)	Model (m <sup>3</sup> /min)					
Preliminary Test	LLWL (749m)	73,000	5.77	AEV	None	5.0	0.6	○
			12.17	UGV	None	9.5	0.5	○
		84,000	6.64	AEV	None	4.3	0.6	○
			14.00	UGV	None	8.5	0.4	○
	MSL (1260m)	73,000	6.77	AEV	None	4.5	0.5	○
			12.17	UGV	None	11.0	0.6	○
		91,000	7.19	AEV	None	7.5	0.7	○
			15.17	UGV	None	15.0	0.6	○
	HHWL (1780m)	73,000	6.77	AEV	None	4.0	0.4	○
			12.17	UGV	None	10.0	0.5	○
		96,000	7.59	AEV	None	6.0	0.5	○
			16.00	UGV	None	13.8	0.4	○



[그림 10] Observation of the vortex formation in the final modification test. (LLWL, Run-out, AEV)



[그림 11] Observation of the vortex formation in the final modification test. (LLWL, Rated, AEV)

