

순환수취수펌프장 내의 흐름에 대한 수리 및 수치모형실험

Hydraulic and Numerical Model Experiments of Flows in Circulation-Water-Pump Chambers

이 용 곤* / 정 상 화** / 김 창 완***

Yi, Yong-Kon / Cheong, Sang Hwa / Kim, Chang Wan

Abstract

The objective of this study is to perform hydraulic and numerical model experiments of the flows in circulation-water-pump(CWP) chambers of combined cycle power plants (CCPP) to be built and to suggest improvement plans if the flows might cause a serious problem on the operation of CWPs. Hydraulic model was constructed in a scale of 1 to 20 using acrylic sheets and a two dimensional numerical model used was RMA2. To evaluate results of hydraulic and numerical model experiments, evaluation criteria of flow conditions in the intake canal and CWP chambers were determined. Vertical vorticities obtained from numerical simulations for the initial plan of CCPPs were qualitatively compared with results of hydraulic model experiments and the formation possibility of a large scale vortex, one of the flow evaluation criteria, was evaluated. The initial plan was found not to satisfy the flow evaluation. Nine improvement plans were devised and numerically simulated. Four alternative plans among nine improvement plans were selected and hydraulically experimented. On the ground of the results of hydraulic model experiments, a final improvement plan, one of four improvement plants, was suggested. When CWP chambers and intake canals were designed with spatial constraints, flow separating wall and guide walls were found to improve flow conditions in CWP chambers.

keywords : circulation water pump, hydraulic model, intake canal, RMA2, vorticities

요 지

신설될 복합화력발전소 취수펌프장 계획안에 대하여 수리 및 수치모형실험을 수행하고 순환수취수펌프운영에 문제를 발생시킬 가능성이 발견되면 개선안을 도출하는 것이 본 연구의 목적이다. 수리모형은 1:20의 크기로 아크릴을 이용하여 제작되었고 2차원 수치모형실험은 RMA2모형을 이용하였다. 수리 및 수치모형실험의 결과를 평가하기 위하여 취수로 및 취수펌프장내 흐름에 대한 평가기준을 설정하였다. 복합화력발전소 취수펌프장의 계획안에 대한 2차

* 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원 공학박사
Ph.D, Senior Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, 462-1 Jeonmin-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-730, Korea
(e-mail: yongkon@kowaco.or.kr)

** 한국건설기술연구원 연구원 공학석사
Master, Korea Institute of Construction and Technology, 2311, Daehwa-dong, Ilsan-gu, Goyang-si Gyeonggi-do 411-712, Korea
(e-mail: kikimorah@kict.re.kr)

*** 한국건설기술연구원 수석연구원 공학박사
Ph.D, Research Fellow, Korea Institute of Construction and Technology, 2311, Daehwa-dong, Ilsan-gu, Goyang-si Gyeonggi-do 411-712, Korea
(e-mail: cwkim@kict.re.kr)

원 수치모형실험을 통하여 얻어진 연직방향 와도를 수리모형실험결과와 비교하여 흐름평가기준의 하나인 와류발생 가능성을 평가하였다. 계획안은 취수펌프장내에서 큰 규모의 와류가 발생하여 순환수취수펌프운영에 문제를 발생시킬 수 있을 것으로 판단되었다. 이에 따라서 9개 개선안이 고안되어 수치모의되었다. 9개중 4개의 개선안에 대하여 수리모형실험이 수행되었다. 수리모형실험에 근거하여 4개의 개선안의 하나가 최종개선안으로 제시되었다. 공간적인 제약조건이 있는 순환수취수펌프장 및 취수로 설계의 경우 격벽과 도류벽을 이용하면 순환수취수펌프장의 흐름상황을 개선할 수 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 순환수 취수펌프, 취수로, 수리모형, RMA2, 와도

1. 서 론

화력발전소의 순환수계통은 외해의 해수를 취수하여 발전소내의 복수기까지 유입시켜 증기와 열교환을 한 후 다시 외해로 배출한다. 취수방식에 따라 1단 또는 2단 취수방식으로 나눌 수 있다. 본 연구의 대상인 I 화력발전소는 외해의 해수를 인공적으로 건설한 취수로로 양수한 후 취수하는 2단 취수방식을 이용한다.

본 연구의 대상인 I 화력발전소(Thermal Power Plant)는 발전용량 증설을 위하여 여유부지에 추가로 복합화력발전소를 신설할 계획이다. 기존 화력발전소(Thermal Power Plant, TPP) 및 신설될 복합화력발전소(Combined Cycle Power Plant, CCPP)의 배치도는 그림 1과 같다. 그림 1에서 검정실험범위는 현장조사 시 측정된 유속 및 수위자료를 통해 수리모형에서 원형의 수리특성을 재현하는지 여부를 판단하기 위해 설정된 실험범위이고, 수리모형실험범위는 본 연구의 관심대상이다. 화력발전소 순환수취수로의 전체길이는 242.6 m 이고 하상경사는 0.002이다. 화력발전소간 거리는 표 1에 나타나있다. 화력발전소(1, 2, 3과 4호기)는 각각 2대

의 펌프가 설치되어 운영되고 있고, 신설될 복합화력발전소(1과 2호기) 또한 각각 2대의 펌프가 설치될 예정이고, 순환수취수펌프 운영계획(case 1과 case 2)에 대한 각 순환수취수펌프의 용량은 표 2와 같다. case 1은 기존 화력발전소 4개호기와 복합화력발전소 1개호기가 동시에 가동이 되는 것이고, case 2는 기존 화력발전소는 운영하지 않고 복합화력발전소 2개호기만 가동되는 경우이다.

신설될 복합화력발전소에 필요한 순환수는 기존 취수로를 활용하여 공급될 계획이므로 기존 취수로는 냉각수 유입량이 증가하게 될 것이다. 신설될 복합화력발전소 순환수취수펌프장의 계획안은 취수로의 길이가 약 30 m로 상대적으로 짧고 또한 경사가 0.2로서 상당히 급하여 순환수펌프장내의 유속분포가 균일하지 않아서 와류발생 가능성이 많을 것으로 보인다. 그림 2는 복합화력발전소 계획안 도면이고 화살표는 순환수의 이동방향을 나타낸다.

연구목적은 신설될 복합화력발전소 순환수취수펌프장 계획안에 대하여 수치 및 수리모형실험을 수행하여 수리특성을 분석·비교하고 순환수취수펌프운영에 심

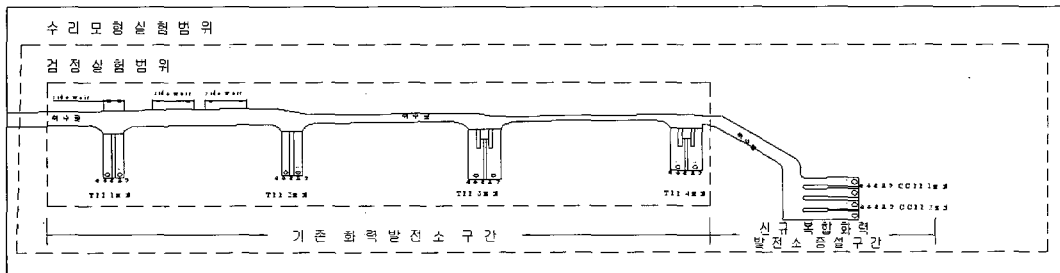


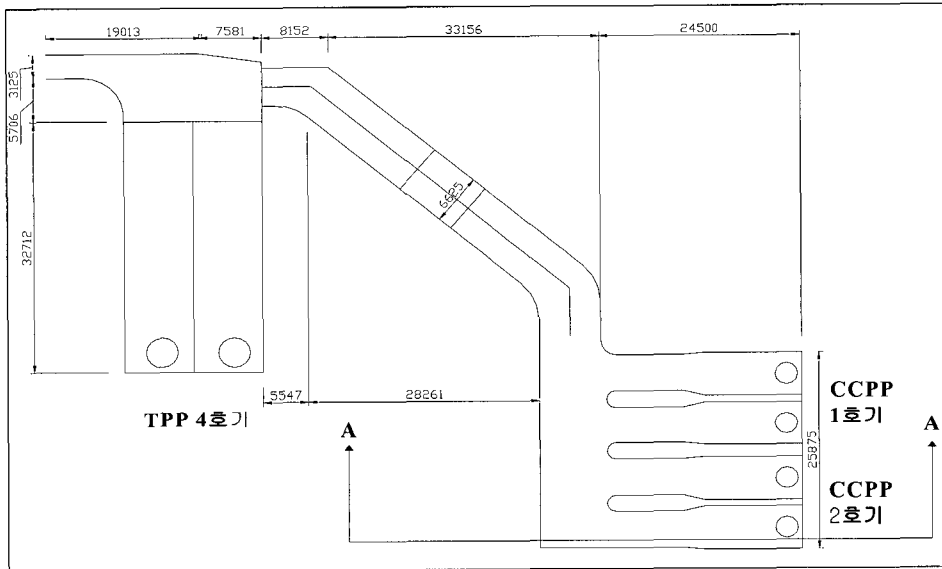
그림 1. 화력발전소 및 복합화력발전소 계획안 개요도

표 1. 화력발전소간 거리

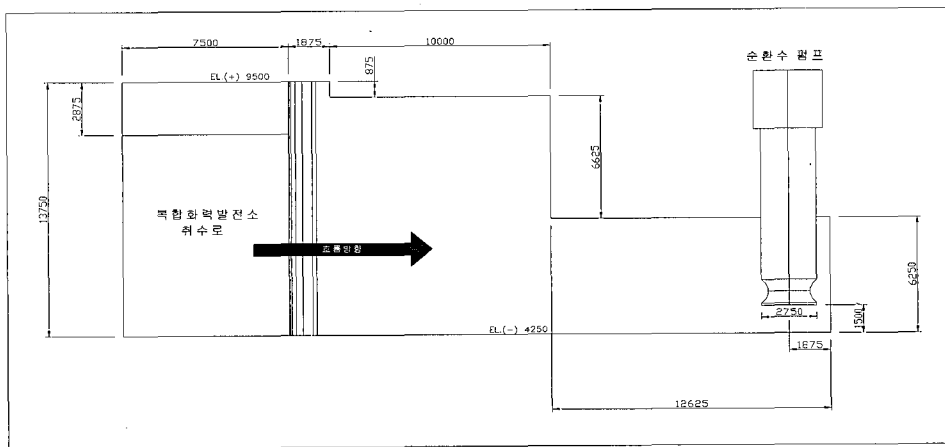
	화력발전소간 거리(m)	취수로 폭(m)
TPP #1 - #2	58.3	7.9
TPP #2 - #3	61.3	8.6
TPP #3 - #4	63.0	4.6

표 2. 순환수취수펌프의 취수량

발전소	발전소	순환수취수펌프		운영조건에 따른 취수량 (m ³ /h)		순환수취수펌프장 재원	
		번호	취수관직경(m)	Case 1	Case 2	길이 (m)	폭 (m)
화력발전소 (TPP)	1	I	1.70	13,500	-	23.5	7.6
		II	1.70	13,500	-		
	2	I	1.70	13,500	-	23.4	7.9
		II	1.70	13,500	-		
	3	I	1.75	19,500	-	22.9	11.9
		II	1.75	19,500	-		
	4	I	1.75	19,500	-	22.9	11.8
		II	1.75	19,500	-		
복합화력발전소 (CCPP)	1	I	2.20	21,400	21,400	23.1	9.3
		II	2.20	21,400	21,400		
	2	I	2.20	-	21,400	23.1	9.3
		II	2.20	-	21,400		



(a) 순환수 취수로 및 펌프장 평면도



(b) A-A'의 단면도

그림 2. 복합화력발전소 계획안

각한 문제를 발생시킬 가능성이 발견되면 개선안을 도출하는 것이며 또한 모형실험의 결과를 평가하기 위하여 순환수 취수로 및 취수펌프장내의 흐름에 대한 평가기준을 설정하는 것이다. 연구방향은 수리 및 수치모형을 구성하고, 현장에서 측정된 유속자료를 이용하여 수치 및 수리모형을 검증한 후, 계획안에 대하여 수치 및 수리모형실험을 수행하고, 다양한 개선안에 대하여 수치모의를 수행하고, 개선의 정도가 큰 경우에 대하여 수리모형실험을 수행하여 검증하는 것이다.

2. 문헌조사

2.1 순환수취수펌프장 (CWP chamber) 설계지침 검토

순환수취수펌프(CWP) sump의 크기와 형상에 대한 설계지침은 British Hydrodynamics Research Association, Hydraulic Institute Standards, US Army Corps of Engineers와 같은 외국 연구기관에 의하여 제시된 바 있다. 위의 연구기관에 의하여 제시된 설계지침들의 문제점들은 다음과 같다. (1) CWP sump에 대한 크기와 형상에 대해서만 적용가능하다. (2) CWP로 접근하는 흐름은 CWP에 악영향을 미칠 수 있는 와(eddy)나 와류(vortex)를 포함하고 있지 않다고 가정한다. 하지만 어느 설계지침도 그러한 흐름이 발생하지 않을 것을 보장하지는 못한다.

2.2 순환수취수펌프장과 관련된 흐름조건 검토

Tullis(1979)에 의하면 펌프운영에 문제를 발생시킬 수 있거나 효율을 떨어뜨릴 수 있는 흐름조건은 (1) 수면에서 발생하는 와류(subsurface vorticity), (2) CWP 구조물 바닥이나 벽으로부터 발생하는 와류(subsurface vorticity), (3) 회전하면서 펌프로 들어가는 흐름, (4) 펌프목(pump throat)에서의 불균등한 흐름, (5) 펌프목(pump throat)에서의 유속이 시간에 대하여 변동이 심한 흐름, (6) 펌프입구(bell mouth)에서 분리되는 흐름 등이다. 위와 같이 문제를 발생시킬 수 있는 흐름조건은 밝혀져 있지만 그에 대한 해결책은 없는 것으로 알려져 있다. 위의 6가지 흐름조건 중에서 본 수리모형실험과 관련이 있는 흐름조건은 수면에서 발생하는 와류(surface vorticity)와 바닥이나 벽으로부터 발생하는 와류(subsurface vorticity) 등이다. Sweeny 등(1982)과 Hecker(1984)에 의하면 펌프에 좋지 못한 영향을 미칠 수 있는 와류(vortex)를 (1) surface dimpling 또는 subsurface rotation, 또는 2가지 모두, (2) 색소(dye)를

이용하여 관측되는 확산 와류(diffuse swirling core), (3) 색소(dye)를 주입하여 관측되는 와류(swirling core), (4) 공기방울을 포함한 와류(swirling core), (5) 공기기둥(solid air or vapor)을 포함한 와류(swirling core)로 구분하였다. Sweeny 등(1982)은 상기한 5종류의 와류 중에서 펌프에 악영향을 미칠 수 있는 와류는 (4)와 (5)의 와류라고 지적한 바 있다.

2.3 순환수취수펌프장(CWP chamber)내 흐름평가 기준

설계지침과 펌프에 문제를 발생시키거나 효율을 떨어뜨릴 수 있는 수리학적 흐름조건을 검토한 결과 본 수리모형실험에서는 펌프에 문제를 발생시키지 않을 수 있는 흐름조건으로 (1) CWP chamber 유입부에서 유속이 1.2 m/s 이하일 것(단 취수로의 방향이 CWP chamber와 평행인 경우에 한함), (2) 펌프로부터 5D (D = 취수펌프입구의 직경)에서 단면평균유속이 0.3 m/s 이하일 것, (3) 색소(dye) 주입 후 유안으로 관측 가능한 와류가 발생하지 않을 것의 평가기준을 설정하였다.

3. 모형실험

3.1 수리모형

수리모형의 축척은 실험실의 유량공급능력, 실험모형 제작공간, 원형의 재현성 등을 종합적으로 검토하여 결정된다. 기존 화력발전소의 취수로는 콘크리트로 건설되어있고 단면은 직사각형이고, 흐름은 자유수면을 갖는 개수로 흐름이다. 수리모형실험은 기존 화력발전소의 취수로 및 취수펌프장에 Froude 상사법칙을 적용하였다. 수리모형에서 취수로의 하폭이 0.1 m 이하가 되면 벽면의 영향으로 인하여 흐름을 원형과 다르게 왜곡시킬 가능성이 있으므로 냉각수 취수로의 최소폭이 0.1 m가 넘도록 1:20의 비왜곡 모형을 제작하였다. 이에 따라 계산된 수리량 환산비는 표 3과 같다(ASCE, 2000). 수리모형은 그림 1에서 보이는 바와 같이 TPP 1~4호기, CCPP 1~2호기를 포함하도록 제작하였다. CWP는 사이펀(siphon)을 설치하여 재현하였다(그림 3).

수리모형의 재질은 Froude 상사법칙에 의하여 수리모형의 조도계수를 구한 다음 이러한 조도계수를 갖는 것으로 선택하여야 한다. 취수로 Manning 조도계수는 재질이 콘크리트이므로 0.013에서 0.016의 값을 적용할 수 있고 취수로 벽면상태를 고려하면 0.016이 적정할 것으로 판단되고 이에 대응하는 모형의 Manning 조도는 약 0.01이고 이와 유사한 조도를 갖는 재질은 아크릴이다. 따라서 모형은 아크릴을 사용하여 제작되었다.

표 3. 수리량 환산비

수리량	equation	수리량 환산비
수평방향 축척비, Xr	Xr	20
연직방향 축척비, Yr	Yr	20
면적비, Ar	XrYr	400
유속비, Ur	Yr1/2	4.5
유량비, Qr	XrYr3/2	1,789
경사비, Sr	XrYr-1	1.0
조도계수비, nr	Xr-1/2Yr2/3	1.65

표 4. 계측기기

	관수로 유량계	2차원 전자기 유속계	수위계
모델명	DP490	ACM250-D	KENEC PH-235
측정범위	0.9 ~ 22,680 m ³ /h	0 ~ ±250 cm/s	0 ~ 37 cm
측정오차	± 1.5 %	±2%	0.01 mm

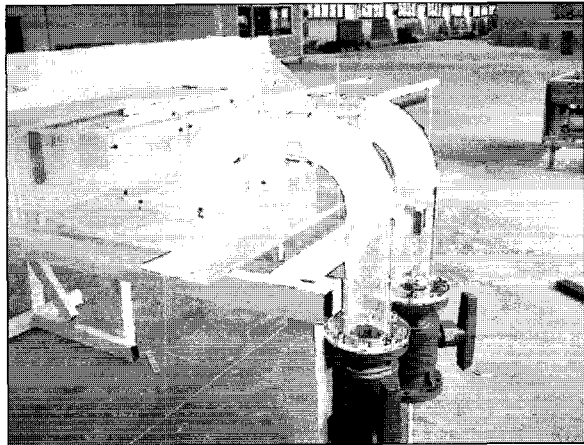


그림 3. 사이펀(siphon)

최대 0.15 m³/s(540 m³/h)의 유량을 공급할 수 있는 유량공급장치를 제작하였다. 540 m³/h의 유량은 원형으로 환산하면 966,000 m³/h로서 원형에서의 최대유량(217,600 m³/h)의 약 5배이므로 충분한 유량임을 알 수 있다. 공급유량의 신뢰성을 보장하기 위해 웨어(weir) 방식을 채택하여 유량을 공급하였다. 본 수리실험에서 사용한 웨어는 한국공업규격(KS B 6302)에 의거하여 제작하였다. 또한 이에 제시되어 있는 유량관계식에 따라 유량을 계산하였다.

유속측정은 2차원 전자기유속계를 이용하였다. 수위측정은 포인트게이지를 이용하였다. 사용된 기기의 모델명, 측정범위 및 측정오차는 표 4와 같다. 흐름양상과 와류의 발생을 파악하기 위하여 식용색소를 주입한 후 사진촬영을 하거나 비디오 촬영을 하였다. 평균유속은 한 지점에서 연직방향상으로 2지점(0.2h, 0.8h, h

= 수심)에서 측정하였고 측정시간은 평균유속의 수렴성을 고려하여 50초 동안 50개의 유속자료를 평균하여 얻었다.

3.2 수치모형

시간과 경제적인 이유로 다양한 수리모형실험을 수행하기 어려운 단점을 극복하기 위하여 수치모형실험이 계획되었다. 평면 2차원 흐름특성 예측을 위하여 본 연구에서 선정한 수치모형은 2차원 수심적분 자유수면 유한요소 프로그램 RMA-2 모형이다. 이 모형은 정류와 부정류에 대해서 대상수역의 수위와 유속을 제공한다. RMA-2의 지배방정식은 3차원 Navier-Stokes방정식을 수심 적분한 2차원 천수방정식(2-Dimensional Shallow Water Equation)이다. 2차원 천수방정식은 연속방정식과 x와 y방향의 운동량 방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a_o}{\partial x} \right)$$

$$+ \frac{gu}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{\epsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\epsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a_o}{\partial y} \right)$$

$$+ \frac{gv}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{\epsilon_{yx}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\epsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$$

여기서 t 는 시간(second), x 와 y 는 각각 흐름방향, 흐름에 직교한 방향의 좌표(또는 거리), u 와 v 는 x 와 y 방향 유속(m/s), h 는 수심(m), a_0 는 하상표고, ϵ 은 와점성계수(eddy viscosity, $N \cdot \text{sec}/\text{m}^2$), C 는 Chezy계수이고, ρ 는 물의 밀도($1000 \text{ kg}/\text{m}^3$)이다.

모형실험구간은 대부분 개수로지만 냉각수 펌프가 위치한 흡수정(sump) 영역은 관수로로 평면 2차원 수치모형에서 관수로를 구현하기 어려워 개수로로 모의하였다. 벽면부근에서는 요소를 작게 구성하여 벽면의 마찰영향이 고려될 수 있도록 하였다. 수치모형실험의 경계조건은 취수로 유입부에서 수위경계조건을 부여했고, 냉각수 펌프가 위치한 지점에서는 유량경계조건을 적용하였다. 취수로 하상의 Manning 조도계수는 0.016, 취수로의 연직측벽 부분에는 RMA2 모형의 지침서 US (Army Corps of Engineers, 1997)에서 제시한 대로 조도를 과다하게 설정하여 벽면의 마찰을 최대한 고려하였다. 와점성계수(eddy viscosity)는 $120 \text{ N} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$ 을 적용하였다.

3.3 수치 및 수리 모형의 검증

수리 및 수치모형실험을 검증하기 위하여 기존 화력발전소가 가동될 때(TPP 2호기만 가동)에 취수로 내에서 수위 및 유속을 측정하였다. 유속은 RD Instrument의 ADCP 600 kHz를 이용하여 4개 횡단면(S1, S2, S3, S4)에서 측정되었고 수위는 2 지점(H1, H2)에서 측정되었고 자세한 지점은 그림 4에 보이는 바와 같다. 수리모형에서 원형에 대응하는 지점에서 유속을 수심의 0.2와 0.8 지점에서 측정하여 평균하였다. 현장 측정과 수리모형실험에 의한 유속의 비교는 표 5에 나타난 바와 같다. 현장 측정과 수리모형실험에 의한 유속이 서로 비슷한 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 단면평균 유속의 최대 오차는 S3에서 0.05 m/s 로 나타났다. 수위는 거의 동일한 것으로 나타났다. 따라서 수리 및 수치모형이 원형을 재현하고 있음을 알 수 있었다.

S4)에서 측정되었고 수위는 2 지점(H1, H2)에서 측정되었고 자세한 지점은 그림 4에 보이는 바와 같다. 수리모형에서 원형에 대응하는 지점에서 유속을 수심의 0.2와 0.8 지점에서 측정하여 평균하였다. 현장 측정과 수리모형실험에 의한 유속의 비교는 표 5에 나타난 바와 같다. 현장 측정과 수리모형실험에 의한 유속이 서로 비슷한 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 단면평균 유속의 최대 오차는 S3에서 0.05 m/s 로 나타났다. 수위는 거의 동일한 것으로 나타났다. 따라서 수리 및 수치모형이 원형을 재현하고 있음을 알 수 있었다.

4. 복합화력발전소 순환수취수펌프장(CWP chamber) 계획안 수치 및 수리 모형실험

계획안 모형실험은 화력발전소(TPP) CWP 1~4호기와 증설될 복합화력발전소(CCPP) CWP 1~2호기가 가동될 경우에 대한 실험이다. 계획안은 그림 2에 보인 바와 같다. 계획안 실험은 case 1과 case 2의 가동 조건에 대하여 각각 수행되었다.

수리모형실험시 유속과 수위가 측정되었고 식용염료를 흐름에 유입시켜 전반적인 유황을 촬영하였으며 또한 와류발생여부를 확인하였다. 유속측정지역은 크게 수로부, 유입부, 흡수정(sump) 지역으로 나눌 수 있고 유속은 2차원 전자기 유속계를 이용하여 측정되었다.

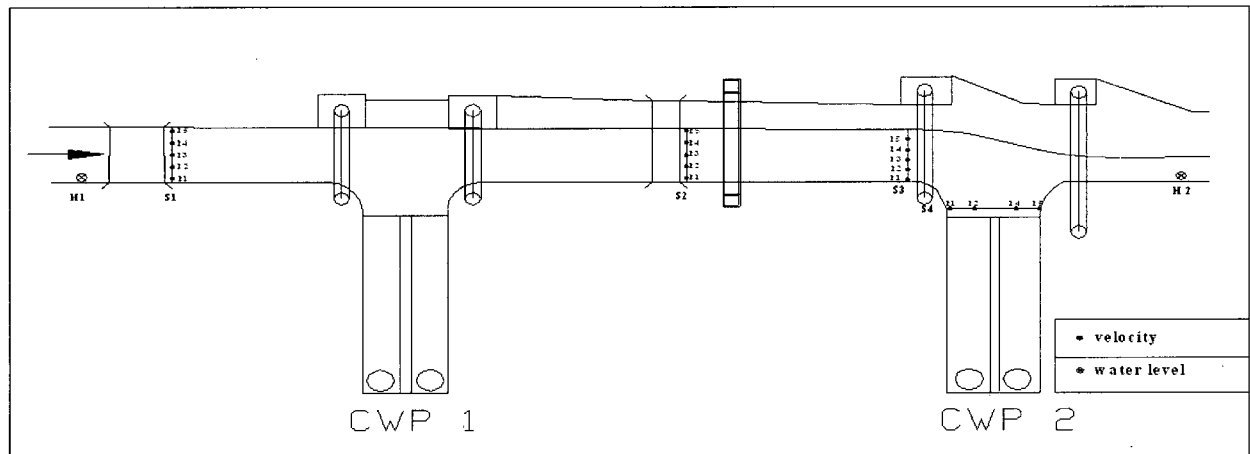


그림 4. 현장조사지점

표 5. 유속비교

단면	현장측정 유속 (m/s)		모형 유속 (m/s)	
	u	v	u	v
S1	0.25	-0.02	0.25	-0.01
S2	0.28	-0.01	0.23	0.01
S3	0.24	-0.06	0.19	-0.07
S4	0.12	-0.18	0.10	-0.20

4.1 계획안 수치모형실험

수치모형실험은 2차원 수치모형인 RMA-2 모형을 이용하여 수행하였다. 복합화력 취수펌프장 계획안은 화력발전소(TPP)와 복합화력발전소(CCPP)가 압력을 받는 암거(box structure)로 연결되어 있다. RMA-2 모형에서는 관수로흐름(pressurized flow)을 모의할 수 없기 때문에 이 구간을 개수로라고 가정하고 수치모형실험을 실시하였다. 따라서 본 수치모형실험의 결과는 다소 정성적이라고 말할 수 있다.

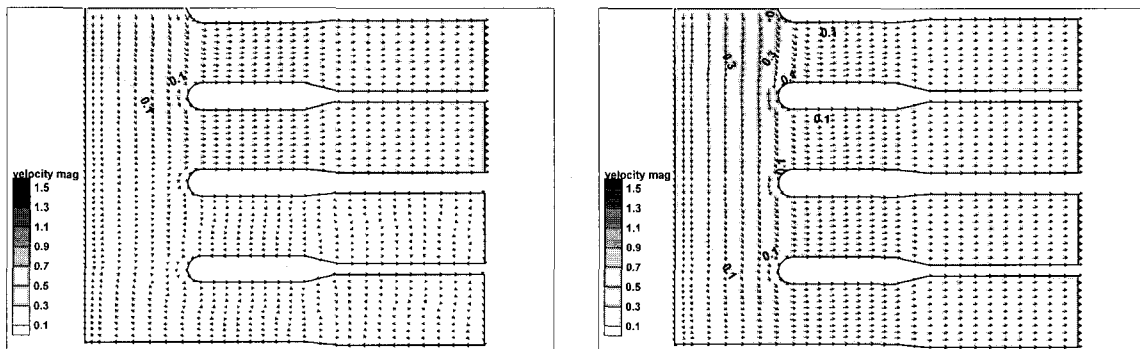
복합화력 취수펌프장 계획안 수치모형실험에 의한 복합화력발전소(CCPP)의 유속분포는 그림 5와 같다. 이로부터 각 CWP의 chamber의 유입부에서 와류가 발생하지 않음을 알 수 있다. 복합화력발전소(CCPP)에 대한 복합화력 취수펌프장 개선안 수치모형실험의 결과는 표 6과 같다. 복합화력 취수펌프장 계획안의 2가지 취수펌프 운영에 대한 수치모형실험결과는 취수펌프장의 흐름평가 기준을 만족시키는 것으로 나타났다. 즉 취수펌프장 유입부의 유속이 모두 1.2 m/s 이하이고 취수펌프장내 유속이 모두 0.3 m/s 이하이고 유속의 방향은 모두 CWP chamber 안쪽을 향하고 역류하는 흐름은 볼 수 없다.

4.2 계획안 수리모형실험

복합화력 취수펌프장 개선안 수리모형실험에서 복합화력발전소(CCPP)의 유속측정 지점은 그림 6에 보인 바와 같다. case 1(TPP 1~4호기와 CCPP 1호기 가동 조건)의 계획안 수리모형실험에 의한 CCPP의 유속 벡터는 그림 7 (a)과 같다. 흐름상태는 취수로와 CWP 입구부에서 안정한 상태를 보이고 있었다. CCPP 1호기의 CWP chamber I에서는 급경사 만곡 취수로 때문에 유량이 편중된다. 그러나 CWP chamber II에서는 이러한 현상이 크게 완화된다. 수면에서 소규모 와류가 발생하나 무시할 수 있을 것으로 판단된다. 각 순환수취수펌프장 및 흡수정(sump) 내의 흐름은 판단기준을 만족시키고 있다.

case 2(CCPP 1, 2호기 가동 조건)의 수리모형실험에 의한 CCPP의 유속 벡터는 그림 7 (b)에 보인 바와 같다. 그림 7 (b)로부터 급경사 만곡 취수로가 유속분포를 편향시키는 것을 알 수 있다. 불균일한(nonuniform) 유속분포는 전단응력이 발생시켜 와류가 발생할 확률이 증가하게 된다.

유속 분포에 따르면 CCPP 전반에 걸쳐 흐름이 판단 기준을 만족하고 있다. 그러나 색소 추적을 실시한 결과에 의하면 CCPP 1호기 CWP chamber I~II에서 큰



(a) TPP 1~4호기와 CCPP 1호기 운영시

(b) CCPP 1~2호기 운영시

그림 5. 복합화력 취수펌프장 계획안의 CWP chamber 내 유속벡터

표 6. 복합화력 취수펌프장 계획안에 대한 CWP chamber 내 호기별 흐름평가

운영조건	호기	흡수정(sump)내 유속조건 (<0.3 m/s)	chamber내 유속조건 (<1.2 m/s)	소용돌이 미발생	5D* 지점		취수펌프장 유속 (m/s)	chamber내 유속 (m/s)	비고
					유속 (m/s)	와도 (sec-1)			
case 1	1	○	○	○	0.17	0.010	0.23	0.26 0.23	
case 2	1	○	○	○	0.19	0.024	0.45	0.25 0.23	
	2	○	○	○	0.17	0.011	0.23	0.32 0.34	

* D : 펌프의 bell mouth

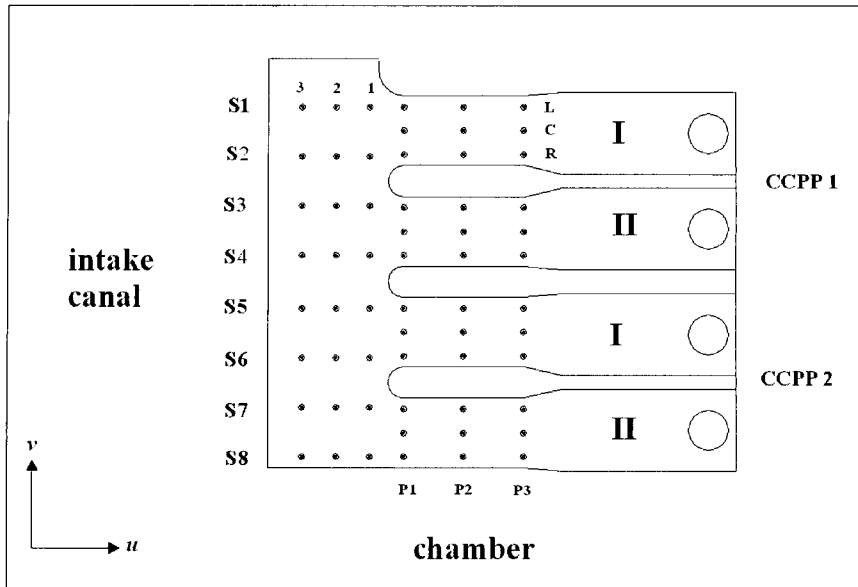
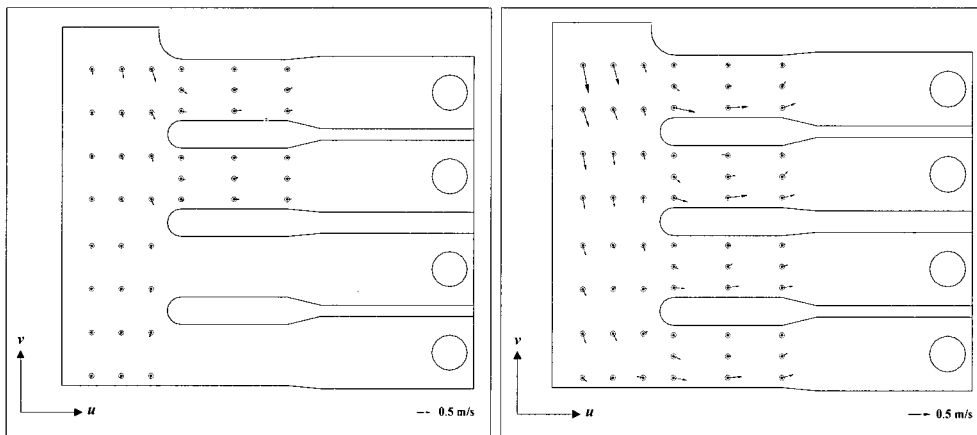


그림 6. 복합화력 취수로 및 CWP chamber의 유속측정지점



(a) CCPP 1호기 운영

(b) CCPP 1, 2호기 운영

그림 7. 복합화력 취수펌프장 계획안에 대한 CCPP 유속벡터

규모의 와류가 발생하여 역류 현상이 나타났다. 따라서 CCPP 1호기에서의 역류 또는 와류 현상을 없애기 위해서는 유속 또는 유량의 편향을 해소시킬 수 있는 적절한 개선안이 필요하다.

4.3 계획안 수치 및 수리실험결과비교

복합화력발전소 취수펌프장내 흐름에 대한 2차원 수치모형실험결과에서는 역류현상이 나타나지 않았으나 수리모형실험에서는 큰 규모의 와류가 발생하여 역류현상이 나타났다. 수치모형실험결과의 활용도를 높이기 위하여 수치모형실험에서 얻어진 유속자료를 이용하여 연직방향와도(vertical vorticity, ω_z)를 산정하여 수리모형실험결과와 정성적으로 비교하여 와류발생가능성을

평가하였다. 연직방향와도는 다음과 같이 정의된다.

$$\omega_z = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

여기서 u 와 v 는 x 와 y 방향 유속이다. 와도(vorticity)는 물질의 회전빈도를 나타내는 것으로 정의된다. 따라서 와도가 증가하면 물질이 빠르게 회전한다는 것을 의미하는 것이므로 와류발생가능성이 높아진다고 볼 수 있다. 와도는 중앙차분법을 이용하여 얻어졌다. 표 6에 나타나있는 것처럼 case 1의 경우 펌프로부터 5D 떨어진 지점에서의 최대와도가 0.01 sec^{-1} 이고, case 2의 경우 최대와도는 0.024 sec^{-1} 이다. 즉 2.4배 증가된 것을 알 수 있다. 즉 역류가능성이 2배 이상 증가한 것을 알

수 있다. case 1에 대한 수리와 수치모형실험결과를 비교해보면 0.01 sec^{-1} 정도의 와도에서는 역류가 발생하지 않는 것으로 볼 수 있다.

5. 복합화력 개선안 수치모형실험 및 수리모형실험

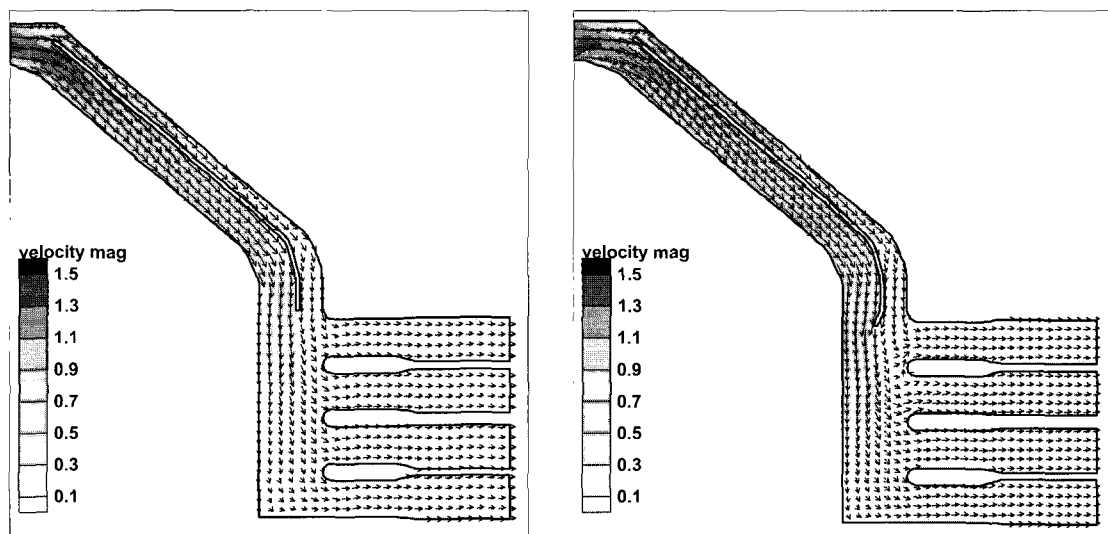
수리모형실험결과에 의하면 case 1의 경우 즉 복합화력발전소 1개 호기와 기존 화력발전소 4개호기를 동시에 가동할 경우에는 흐름평가기준을 만족시키는 것으로 나타났고 case 2의 경우 복합화력발전소 1과 2호기의 모든 순환수 취수펌프를 운영이 되는 경우에는 흐름평가기준을 만족시키지 못한 것으로 나타났다. 따라서 복합화력발전소 개선안은 case 2의 경우에 대하여 수행하였다.

5.1 복합화력발전소 개선안 수치모형실험

순환수취수펌프장의 흐름상황을 개선할 수 있는 방안 중의 하나는 취수로의 폭과 길이를 연장하는 것이다. 그러나 여유부지에 복합화력발전소를 신설한다는 공간적인 제약조건 때문에 취수로의 폭과 길이를 연장하는 방안은 개선안이 될 수 없었다. 따라서 CCPP 개선안 실험은 계획안에서 수리학적으로 불리한 조건으로 작용하는 구조물을 개선 또는 수정하는 방향으로 진행되었다. 최적의 개선안을 도출하기 위하여 9개의 개선안에 대하여 수치모형실험을 수행하였다(표 7). CCPP 개선안에 대한 2차원 수치모형실험의 결과는 표 8에 나타나있다. CCPP 개선 7과 8안에 대한 2차원 수치모형 실험으로부터 구한 유속 벡터는 그림 8에 나타나있다.

표 7. 복합화력 개선안

개선안	방 법	목 적
1	암거 중앙에서 외측으로 치우쳐 격벽 설치	암거 말단부에서 2차류 발생 억제
2	암거 중앙에 격벽 설치	암거 말단부에서 2차류 발생 억제
3	CWP chamber 폭의 부분적인 축소	사수역 또는 와류 발생 억제
4	암거 만곡부 외측벽에 블록 설치	암거 만곡부 외측 유속 감소
5	CWP chamber내 격벽 길이 감소	CWP chamber 유입부 유속 감소
6	CWP chamber 유입부 모따기	유입흐름 개선
7	개선 1안에서 격벽을 상류방향으로 연장 설치 및 TPP 취수로 합류부에서 모따기	암거 말단부에서 2차류 발생 억제
8	개선 7안 + 암거 말단부에 도류벽 설치	암거 말단부에서 2차류 발생 억제
9	개선 8안 + 암거내에만 격벽 설치	암거 말단부에서 2차류 발생억제



(a) CCPP 개선 7안

(b) CCPP 개선 8안

그림 8. 복합화력 개선 7, 8안에 대한 CCPP 유속벡터

표 8. 복합화력 개선안들에 대한 CCPP 호기별 흐름 평가

복합화력 개선안	호기	흡수정(sump) 내 유속조건 (<0.3 m/s)	chamber내 유속조건 (<1.2 m/s)	소용돌이 미발생	5D* 지점			취수로 유속 (m/s)	chamber내 유속 (m/s)	비고
					유속 (m/s)	와도 (sec-1)	계획안대비 와도** (%)			
1***	1	○	○	○	0.18	0.015	62	0.46	0.19	
	2	○	○	○	0.17	0.009	85	0.20	0.17	
2	1	○	○	○	0.19	0.022	91	0.52	0.21	
	2	○	○	○	0.17	0.010	94	0.20	0.20	
3	1	○	○	○	0.19	0.021	89	0.48	0.18	
	2	○	○	○	0.17	0.012	110	0.22	0.17	
4	1	○	○	○	0.20	0.023	96	0.52	0.24	
	2	○	○	○	0.17	0.015	138	0.22	0.20	
5	1	○	○	○	0.19	0.026	107	0.51	0.18	
	2	○	○	○	0.18	0.017	159	0.22	0.19	
6	1	○	○	○	0.19	0.023	96	0.33	0.21	
	2	○	○	○	0.17	0.011	100	0.22	0.19	
7***	1	○	○	○	0.161	0.014	59	0.53	0.17	
	2	○	○	○	0.159	0.009	85	0.20	0.16	
8***	1	○	○	○	0.166	0.011	45	0.66	0.20	
	2	○	○	○	0.163	0.008	80	0.30	0.27	
9***	1	○	○	○	0.166	0.011	46	0.54	0.17	
	2	○	○	○	0.163	0.008	73	0.27	0.17	

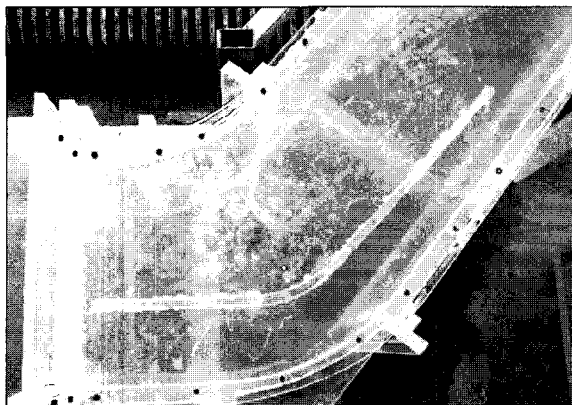
* D : 펌프의 bell mouth 직경. ** 계획안대비 와도=(개선안 와도+ 계획안최대와도) × 100. *** 흐름조건을 만족하는 개선안임.

모든 개선안이 흐름평가기준을 통과한 것으로 나타났다. 개선효율을 판단하기 위하여 와도(vorticity)의 개선 정도를 살펴보았다. 표 8에 의하면 개선 1, 7, 8, 9안은 CCPP 1~2호기의 와도를 크게 줄인 것으로 나타났다. 따라서 이들 4개 개선안에 대해서는 수리모형실험을 통

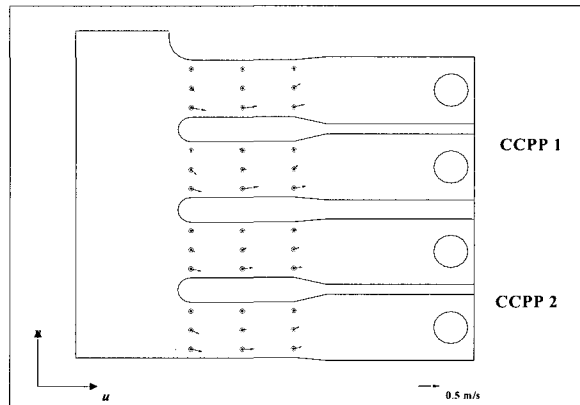
해서 그 개선 정도를 검정하였다.

5.2 복합화력발전소 개선안 수리모형실험

CCPP 개선 1안의 수리모형은 그림 9 (a)와 같다. case 2의 경우 CCPP 개선 1안 수리모형실험을 통하여



(a) 개선 1안



(b) 개선 1안 유속벡터도

그림 9. 복합화력 개선 1안

언어진 유속 벡터는 그림 9 (b)와 같고 복합화력 취수 펌프장 계획안에 비해 유속의 편향이 어느 정도 완화되고 역류 발생 지점도 감소되었다. 그러나 여전히 CCPP 1호기의 순환수취수펌프장 II에서는 큰 규모의 와류가 발생하였다.

CCPP 개선 7안은 CCPP 개선 1안의 격벽을 기존 취수로쪽으로 더 연장하고 시설될 취수로와 기존 취수로의 연결부를 완만하게 연결시켰다. CCPP 개선 1안의 수리모형실험에서 발생하던 CCPP 1호기 순환수취수펌프장 II의 S3-L 측점의 역류는 제거되었지만 S1-L 측점에서 새로운 역류가 발생하는 것으로 나타났다(그림 10). 이는 암거(box structure) 말단에서의 순환수취수 펌프장쪽 유속이 매우 크기 때문에 CCPP 1호기 순환수 취수펌프장 격벽에 충돌하면 미쳐 순환수취수펌프장 II로 유입되지 못한 물이 순환수취수펌프장 I로 역류하기 때문이다.

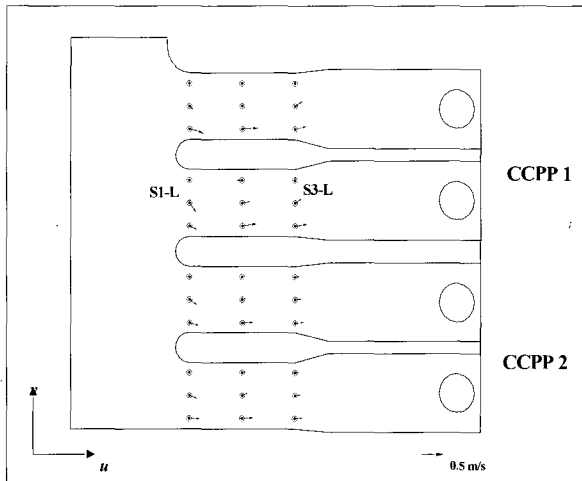
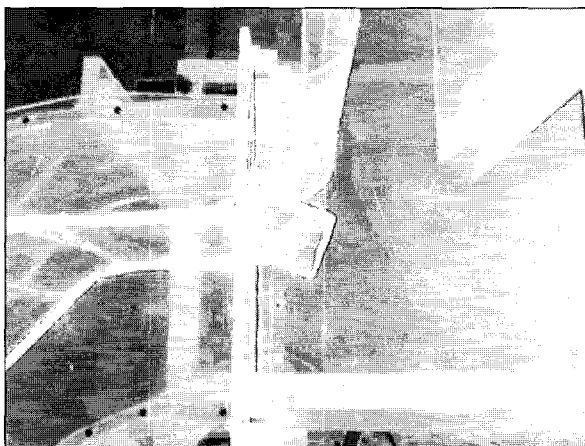


그림 10. 복합화력 개선 7안에 대한 CCPP 유속벡터

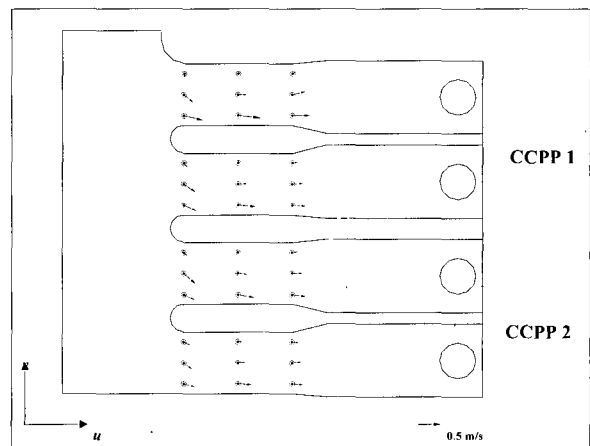
CCPP 개선 8안의 수리모형은 그림 11 (a)에 나타나 있다. CCPP 개선 8안은 CCPP 개선 7안에 암거(box structure) 말단부에 도류벽(guide wall)을 추가 설치하는 것이다. 이는 CCPP 1호기 CWP chamber II로 유입되는 유량을 감소시켜 S1-L 측점의 역류를 방지하기 위한 것이다. CCPP 개선 8안 수리모형실험에 의한 CCPP의 유속 벡터는 그림 11 (b)에 나타나있고 CCPP 큰 규모의 와류가 발생하지 않으므로 흐름 판단기준을 만족하고 있는 것으로 나타났다.

5.3 복합화력발전소 최종 개선안 수리모형실험

CCPP 개선 8안에서 암거(box structure) 상류 측 취수로에 설치되는 격벽(flow separating wall)은 시공이 용이하지 않고 미관상으로도 좋지 못하다. 또한 현재 복합화력 2호기를 추가 건설시 신규 취수로의 계획안이 확정되지 않은 상황에서 CCPP 개선 8안을 최종 개선안으로 선정하는 것은 타당성이 낮다. 따라서 암거 이전의 취수로에 설치된 격벽을 제거하여 수리모형실험(CCPP 개선 9안)을 수행하였다. 그 결과 CCPP 1~2호기 가동 조건에서 기존의 CCPP 개선 1안 및 CCPP 개선 7안과 비슷한 지점에서 역류가 발생하여 와류가 형성되고, CCPP 1호기 CWP chamber I의 S1-L지점에서는 매우 강한 역류가 발생하였다. 격벽의 설치 위치에 따라 급경사 만곡 취수로(steep bend)의 흐름 형태가 크게 바뀔 수 있다는 것을 알 수 있다. CCPP 개선 8안에서는 격벽이 TPP 취수로와 CCPP 취수로 접합부에서 시작하여 유량을 균등하게 배분시키기 때문에 2차류의 발생이 억제된다. 하지만 CCPP 개선 9안에서는 격벽이 암거(box structure) 선단에서 시작하기 때문에 균등한 유량 배분이 어려웠다. 이에 따라 2차류가 발생하여 CCPP의 순환수취수펌프장까지 전달되는 것이다. 따



(a) 개선 8안



(b) 개선 8안 유속벡터도

그림 11. 복합화력발전소 개선 8안 수리모형과 유속벡터도

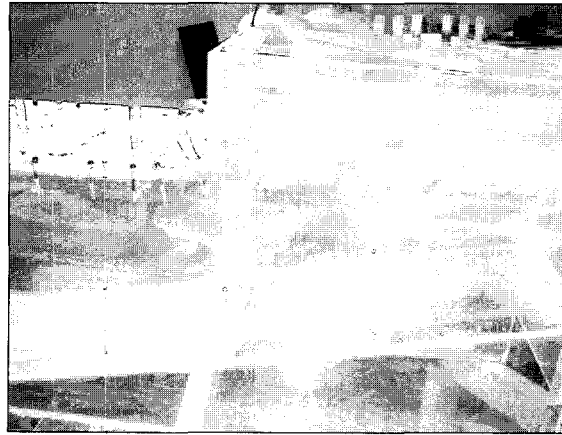
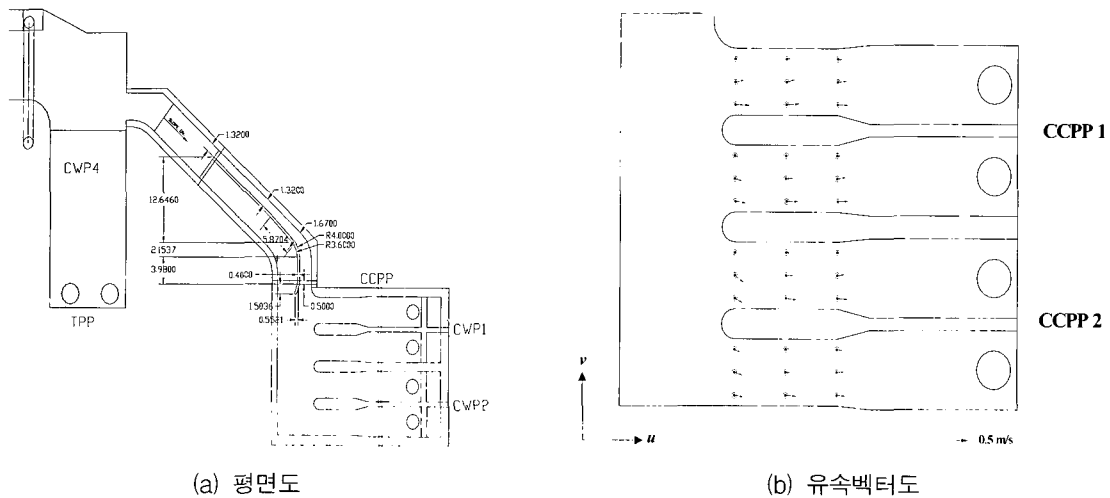


그림 12. 암거상단에 설치된 다공판



(a) 평면도

(b) 유속벡터도

그림 13. 복합화력발전소 최종개선안 평면도 및 유속벡터도

라서 암거의 상류에 유량의 균등 배분이 가능한 대책을 강구해야 한다. 그러나 신규 취수로의 제원이 결정되지 않은 상황에서 격벽 등 흐름을 개선하기 위한 구조물을 설치하는 것은 비합리적이다. 그러므로 개선 9안에 다공판을 도입하여 최종 개선안 수리모형실험을 하였다(그림 12).

최종 개선안에 대한 제작도면은 그림 13 (a)와 같다. 최종 개선안은 CCPP 2호기 신설시 CWP 취수로의 위치와 방향을 고려하여 암거 상류쪽 흐름을 개선하면 CCPP 1·2호기 CWP chamber내 흐름이 CWP 운영에 문제를 발생시키지 않을 수 있음을 확인하는 수리모형 실험이다. 이를 실현하기 위하여 암거 선단에 다공판을 설치하여 암거로 유입되는 흐름을 균등하게 분포시켰다. case 2(CCPP 1, 2호기 가동)의 최종 개선안 수리모형 실험에 의한 CCPP의 유속 벡터는 그림 13 (b)에 나타나있고 흐름 판단기준을 만족하는 것으로 나타났다.

6. 결 론

신설될 복합화력발전소(CCPP) 계획안과 개선안에

대한 수리 및 수치모형실험이 2가지 순환수취수펌프운 영안에 대하여 수행되었다. 수리 및 수치모형실험의 결과를 평가하기 위하여 취수로 및 순환수취수펌프장(CWP)내 흐름에 대한 평가기준을 설정하였다. CCPP 계획안에 대한 2차원 수치모형실험을 통하여 얻어진 와도를 수리모형실험결과와 비교하여 와류발생가능성을 평가하였다. 계획안과 선정된 개선안 수리모형실험결과는 다음과 같다.

- 1) 계획안은 취수로의 직선부길이가 상대적으로 짧고, 취수로의 경사가 상당히 급하여 CWP내의 유속분포가 균일하지 않기 때문에 큰 규모의 와류가 발생하였으므로 흐름평가기준을 만족하지 못하였다.
- 2) 개선 1안은 취수로의 암거부분에 격벽을 설치하여 유속분포의 차이를 어느 정도 완화시키어 역류 발생 지점을 감소시켰지만 여전히 CCPP 1호기의 CWP II에서는 큰 규모의 와류가 발생하였다.
- 3) 개선 7안은 개선 1안의 격벽을 기존 취수로 방향으로 더 연장하고 신설될 취수로와 기존 취수로의 연결부를 완만하게 연결시키어 개선 1안에서 발생

했던 역류는 제거되었지만 다른 지점에서 역류가 발생하였다. 이는 암거(box structure) 말단에서의 CWP 부근 유속이 상대적으로 크기 때문에 CCPP 1호기 CWP 격벽에 충돌하면서 CWP II로 유입되지 못한 물이 CWP I로 역류하기 때문이다.

- 4) 개선 8안은 개선 7안에 암거(box structure) 말단부에 도류벽(guide wall)을 추가로 설치하여 CCPP 1호기 CWP II로 직접 유입되는 유량을 감소시켰다. 그 결과 큰 규모의 와류가 발생하지 않았고 따라서 흐름평가기준을 만족하고 있는 것으로 나타났다. 최종 개선안은 시공성, 공사기간 및 경제성 등을 고려하여 선정되었다.

공간적인 제약조건이 있는 순환수취수펌프장 및 취수로 설계의 경우 격벽과 도류벽을 이용하면 순환수취수펌프장의 흐름상황을 개선할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 격벽의 설치 위치에 따라 급경사 만곡 취수로(steep bend)의 흐름 형태가 변화되기 때문에 적용시 수리모형실험을 수행하여 위치를 결정해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력기술주식회사의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

- ASCE, (2000) *Hydraulic Modeling*, Virginia.
- Hecker, G.E. (1984) "Scale effects in modeling vortices." *Symposium on Scale Effects in Modeling Hydraulic Structures*, International Association for Hydraulic Research.
- Sweeney, C.E., Elder, R.A., and Hay, D. (1982), "Pump sump design experience summary." *Journal of Hydraulic Division*, Vol. 108(HY3). pp. 361-365.
- Tullis, J.P. (1979) "Modeling in design of pumping pits." *Journal of the Hydraulic Division*, Vol. 105 (HY9), pp. 1053-1063.
- US Army Corps of Engineers (1997), *User Guide To RMA2*, WexTech Systems, Inc. New York.

(논문번호:04-118/접수:2004.12.29/심사완료:2005.06.30)