

수리실험을 이용한 발전소의 순환수 취수부 흡입수조의 와류저감에 관한 연구

엄중현* · 이두한** · 김형수***

Eom, Junghyun*, Lee, Du Han**, Kim, Hung Soo***

On Vortex Reduction Characteristics of Pump Sump Circulating Water Intake Basin of Power Plant Using Hydraulic Experiment

ABSTRACT

Among the main facilities of the power plant, the circulating water used for cooling the power generation system is supplied through the Circulation Water Intake Basin (CWIB). The vortexes of various types generated in the Pump Sump (PS) of CWIB adversely affect the Circulation Water Pump (CWP) and pipelines. In particular, the free surface vortex accompanied by air intake brings about vibration, noise, cavitation etc. and these are the causes of degradation of CWP performance, damage to pipelines. Then power generation is interrupted by the causes. Therefore, it is necessary to investigate the hydraulic characteristics of CWIB through the hydraulic model experiment and apply an appropriate Anti Vortex Device (AVD) that can control the vortex to enable smooth operation of the power plant. In general, free surface vortex is controlled by Curtain Wall (CW) and the submerged vortex is by the anti vortex device of the curtain wall. The detailed specifications are described in the American National Standard for Pump Intake Design. In this study, the circulating water intake part of the Tripoli West 4×350 MW power plant in Libya was targeted, the actual operating conditions were applied, and the vortex reduction effect of the anti vortex device generated in the suction tank among the circulating water intake part was analyzed through a hydraulic model experiment. In addition, a floor splitter was basically applied to control the submerged vortex, and a new type of column curtain wall was additionally applied to control the vortex generated on the free surface to confirm the effect. As a result of analyzing the hydraulic characteristics by additionally applying the newly developed Column Curtain Wall (CCW) to the existing curtain wall, we have found that the vortex was controlled by forming a uniform flow. In addition, the vortex angle generated in the circulating water pump pipeline was 5° or less, which is the design standard of ANSI/HI 9.8, confirming the stability of the flow.

Key words : Circulation water intake basin, Vortex, Anti vortex device, Curtain wall, Column curtain wall

초록

발전소의 주요시설 중 발전 시스템 냉각용으로 사용되는 순환수는 순환수 취수부(Circulation Water Intake Basin)를 통해 공급된다. 순환수 취수부 중 흡입수조(Pump Sump)에서 발생하는 다양한 형태의 와류는 순환수펌프(Circulation Water Pump) 및 관로에 악영향을 미친다. 특히, 공기의 흡입을 동반한 자유표면 와류는 진동, 소음, 공동현상 등을 발생시켜 순환수펌프의 성능 저하, 관로의 손상을 일으키며 발전이 중단되는 주요 원인이 된다. 따라서 수리모형 실험을 통해 순환수 취수부에 대한 수리특성을 반드시 확인하고, 와류 발생 시 와류를 제어할 수 있는 적

* 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 선임주무원, 공학박사

(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jhum@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 연구위원, 공학박사 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · dhlee@kict.re.kr)

*** 종신회원 · 교신저자 · 인하대학교 사회인프라공학과 교수 (Corresponding Author · Inha University · sookim@inha.ac.kr)

Received September 5, 2022/ revised September 15, 2022/ accepted September 15, 2022

절한 와류제어장치(Anti Vortex Device)를 적용하여 원활한 발전소 운영이 가능하도록 해야 한다. 자유표면 와류 저감을 위해 와류제어장치 중 커튼월(Curtain Wall)을 사용하는 것이 일반적이며, 자세한 내용은 American National Standard for Pump Intake Design에서 기술하고 있다. 본 연구에서는 리비아 Tripoli West 4×350 MW 발전소의 순환수 취수부를 대상으로 하였으며, 실제 운영조건을 적용하고, 수리모형 실험을 통해 순환수 취수부 중 흡입수조에서 발생하는 와류제어장치의 와류저감 효과를 분석하였다. 또한, 수중와류 제어를 위해 플로어 스플리터(floor splitter)는 기본적으로 적용하였고, 자유표면에서 발생하는 와류제어를 위해 새로운 형태인 컬럼 커튼월(Column Curtain Wall)을 추가적으로 적용하여 효과를 확인하였다. 본 연구에서는 일반적으로 적용되었던 커튼월에 새로 개발한 컬럼 커튼월을 추가적으로 적용하여 수리 특성을 분석한 결과, 균일한 흐름이 형성되면서 와류가 제어되는 것을 확인하였다. 또한, 순환수펌프 관로 내에서 발생하는 와류각도는 ANSI/HI 9.8의 설계기준인 5° 이하로 나타나 흐름의 안정성을 확인하였다.

검색어 : 순환수 취수부, 와류, 와류제어장치, 커튼월, 컬럼 커튼월

1. 서론

우리나라 뿐 만 아니라 전 세계적으로 전기 사용량이 급증하고 있다. 이에 따라 필연적으로 전기가 부족한 국가에서는 발전소 건설이 이루어지고 있으며, 많은 전기를 생산해야 하는 발전소일수록 발전시스템의 하나인 복수기(condenser)를 냉각시키기 위해 많은 순환수를 필요로 하게 된다. 일반적으로 순환수는 발전소가 위치한 주변의 해수나 하천수를 이용하여 순환수 취수부의 후단(rear end)에 위치한 흡입수조의 순환수펌프를 통해 복수기로 연결된다. 또한 충분한 순환수를 공급하기 위해 순환수 취수부와 순환수 펌프를 대형으로 제작하고 있다. 순환수 취수부는 일반적으로 펌프장, 흡수정, 섬프장, 흡입수조, 취수장, 펌프섬프 등 다양하게 불리고 있으며, 본 연구에서는 순환수 취수부로 정의하였다. 순환수 취수부의 순환수펌프와 같은 대용량 펌프의 경우 펌프 흡입수조의 형태와 규모가 적절하지 못할 경우 흐름 현상이 난류로 변하면서 펌프 성능에 악영향을 주는 와류와 선회류(swirl)등을 발생시킨다. 와류나 선회류 같은 흐름은 자유표면이나 수중에서 발생하여 펌프로 유입되게 되며, 이로 인해 펌프의 불안정한 운전상태를 유발시켜 펌프의 성능저하와 손상의 원인이 된다. 펌프가 손상되면 복수기에 원활하게 순환수를 공급하지 못하게 되어 발전이 중단되는 주요 원인이 되고, 자유표면에서 발생하는 와류 중 공기의 흡입을 동반한 와류는 진동, 공동현상(cavitation) 등을 발생시켜 펌프의 성능저하를 가져온다. 또한, 수중에서 발생하는 수중와류는 바다와 벽면에서 발생하며 펌프의 관로 내부에서 선회류를 발생시켜 펌프를 손상시킬 수 있다. 따라서 순환수 취수부의 흡입수조는 펌프의 정상적인 가동을 위하여 자유표면에서 공기의 흡입을 동반한 와류와 펌프 관로로 유입되는 선회류가 발생하지 않는 구조로 설계하여야 한다. 또한 흡입수조에서 발생하는 와류와 선회류를 저감하기 위해서는 흡입수조에 적절한 와류제어장치를 적용하여 와류저감에 대한 분석이 필요하다.

Sweeney et al.(1982)은 흡입수조의 설계에 필요한 일반적인 사항을 제시하였고, Shabayek(2010)은 수리모형 실험을 통해 2열

펌프 시스템을 갖춘 흡입수조의 구간 별 흐름 분석을 수행하여 HI (Hydraulic Institute)의 기준과 검토하였으며, 와류 발생 저감을 위한 흡입수조 측벽(Sidewall), 커튼월 등의 와류제어장치 설치 위치 및 규모 등을 제안하였다. Sarkardeh et al.(2010)은 수리모형 실험을 통해 흡입수조에서 발생하는 와류의 강도와 발생 형태에 대한 상관성을 규명하였고, 취수부 유입각도 및 Froude수 변화에 따른 와류 저감 방안에 대해 제시하였다. Kabiri-Samani and Borghei(2012)는 취수부 흡입 파이프에서 발생하는 와류를 저감시키기 위해 파이프 측에 직사각형의 와류저감 장치를 제안하였으며, 저감 장치의 설치 개수, 배열, 크기에 대한 효율성을 분석하였다. 또한, 자유 표면에서 발생하는 와류 저감을 위한 설치 가이드라인을 제시하였다. Norizan et al.(2019)은 취수부 바닥면에 설치한 와류 제어장치 중 하나인 플로어 스플리터(Floor Splitter)의 높이 변화에 따라 취수 관로에서 발생하는 와류 저감 효과를 분석하였으며, 저감 장치의 높이는 유입 입경 대비 최소 0.3D 이상으로 설치하도록 제시하였다. 또한 플로어 스플리터에 대해 많은 수리모형 실험연구가 진행되면서 수중와류 제어에 제일 효과적인 것으로 확인되었다. 이에 따라, 최근에 건설되는 순환수 취수부의 흡입수조에는 기본적으로 플로어 스플리터가 설치되고 있다.

Kim et al.(1996)은 동해화력발전소의 순환수 취수부 중 흡입수조를 축척 1/10로 제작하여 수리모형 실험을 수행하였다. 순환수펌프가 가동될 때 공기흡입와류와 수중와류가 일어나지 않도록 수조의 흡입부 내부에 와류방지장치를 설계하고 와류의 발생 상태를 관찰하였다. 실험결과 공기흡입와류는 유량이 증가하고 수위가 낮아짐에 따라 강하게 발생하는 경향을 확인하였다. 특히, 수면과 근접한 위치에서의 유동이 안정적일수록 발생확률이 낮아짐을 확인하였다. Choi et al.(2009)은 자유표면에서 공기를 동반한 와류와 선회류가 발생하면 펌프 흡입구 아래에서는 국부적인 압력저하로 공동현상이 발생함을 확인하였다. 이러한 흐름특성은 펌프의 효율저하, 진동 및 소음 문제를 일으킬 수 있으므로 수리모형 실험 등을 통해 흡입관 주위의 흐름특성을 파악하는 것이 반드시 필요함을 확인하였다. Lee et al.(2016)은 순환수 취수부의 후단에 위치한

흡입수조의 효율적인 운영을 위한 펌프 배치 및 수위에 따른 흡입수조 흐름특성 연구를 위해 축소 모형을 제작하여 실험을 수행하였다. 실험결과 흡입수조의 수위변화에 따른 자유표면외류 및 형상에 대해 검토하였다. Byeon et al.(2020)은 입자영상유속측정법(Particle Image Velocity, PIV)을 이용하여 흡입수조 내 유속분포 및 외류강도를 측정하기 위한 촬영 및 분석 조건들에 대한 민감도 분석을 수행하여 흡입수조 내 유속 및 외류강도 측정의 한계를 확인하고 최적 방법들을 제시하고자 하였다. 이를 위해 우선 레이저를 이용하여 흡입수조 내 흐름을 촬영하였고, 상관영역 크기와 촬영 시간간격 및 측정 간격의 변화에 따른 유속분포와 와도 분포를 비교하여 민감도를 검토하였다.

위와 같은 많은 연구가 수행되어 왔지만, 실제 발전소의 순환수 취수부의 운영특성을 고려한 외류제어장치의 적용에 따른 외류저감 효과를 확인한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 순환수 취수부의 운영 특성을 고려하여, 새로운 외류제어장치를 개발하였으며, 외류제어장치의 적용에 따른 외류저감 효과를 수리모형 실험을 통해 확인하였다.

2. 수리모형 실험

2.1 실험장치

발전소의 순환수 취수부 및 부속 구조물에 대한 수리모형 제작은

발전소 건설에 따른 기본 설계도면(Hyundai Engineering, 2014)을 기준으로 제작하였으며, 일반적인 순환수 취수부의 개념도는 Fig. 1에 나타내었다. 흡입수조에서 발생 가능한 외류 및 선회류 제어에 위해 설치되는 외류제어장치는 ANSI/HI 9.8(1998)의 Pump Intake Design을 참고하여 제작하였다. 모형의 축척은 수리학적 상사와 재현 가능성을 고려하여 1/10로 제작하였으며, 유량공급장치(Water supply device)와 순환수 취수부, 순환수펌프로 구성하였다. 유량 공급장치는 철재를 이용하여 제작하였으며, 순환수 취수부는 흐름의 시각화를 위해 투명 이크릴을 사용하였다. 또한 이크릴의 수직면에 지지대를 설치하여 수압에 충분히 견딜 수 있도록 하였으며, 순환수 펌프는 유량 조절이 가능한 볼류트 펌프를 사용하였다(Fig. 2).

2.2 계측장비

유속 계측은 ALEC Electronics Co., Ltd.에서 만든 2차원 전자기 유속계를 사용하였으며, 지정된 계측 라인에 대해 깊이에 따라 3점 방식으로 유속을 측정 후 평균유속을 산정하였다. 펌프의 흡입수조에서는 설계기준(ANSI/HI 9.8, 1998)의 적합여부를 평가하기 위해 5점 방식을 이용하였다. 수위계측은 KENEK Co. Ltd.의 디지털 포인트 게이지를 사용하였으며, 추가로 계측위치에 피조미터를 설치하여 수위를 측정하여 정확성을 높였다. 유황분석은 흐름의 시각화를 위하여 긴 바늘이 장착된 주사기에 식용 염료를 주입하여 관측하였다. 염료를 사용하면 캠코더와 디지털 카메라를 통해

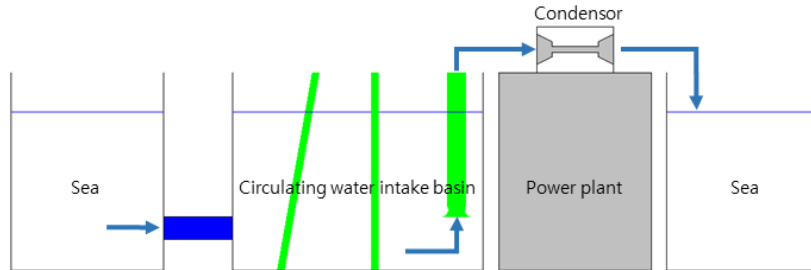


Fig. 1. Scheme of Circulating Water Intake Basin



Fig. 2. Hydraulic Model of Circulating Water Intake Basin

흐름 특성을 기록하여 분석이 가능하다. 또한, 비균일한 흐름 분포 및 흐름 분리와 같은 와류, 흐름 이상 현상의 존재와 위치를 식별할 수 있어 염료를 사용하였다. 순환수펌프 관로에서 발생하는 와류는 와류 계측기(swirl meter)를 사용하였다(Fig. 3).

2.3 실험조건 및 방법

발전소 순환수 취수부의 운영조건을 적용하여 흡입수조에서 와류 및 선회류 발생가능성이 가장 높은 저수위(Low Water Level)에 대한 6가지 실험조건을 선정하였다. 또한, 저수위 조건은 ANSI/HI 9.8(1998)에서 권장하는 펌프의 최소 침수깊이를 만족하지만 유입부로부터 동반된 난류흐름이나 물결의 영향으로 인한 와류 발생의 비정상성도 고려 할 필요가 있어 6가지 조건을 선정하였다. 6가지에 대한 실험조건은 실제운명을 위한 침사지와 회전스크린의 개폐 유무로 설정하였다. 순환수 취수부 중 주요시설의 OFF는 시설 운영 중 고장, 시설 개선 등을 위해 유지 보수를 위해 차단하는 것을 의미한다. 특히, Travelling band screen은 해양생물과 부유물의 유입으로 인해 유지보수가 빈번하게 발생한다. Circulating water pump가 모두 운영되는 조건을 선정 한

이유는, 타 발전소 순환수 취수부의 운영에 대한 연구와 운영사례를 참고하여 최악의 조건을 선정하였다(Table 1).

수리모형 실험은 0.48 m 사각위어를 통해 유입부에 연결된 직경 0.3 m의 취수 관로 4개의 라인에서 물을 공급 받는다. 순환수 취수부의 운영조건은 Case 1 ~ Case 6과 같이 각 시설의 개폐 유무로 선정하였으며, 실험조건은 실제 운영에 사용되는 실험유량 0.181 m³/s와 수위조건은 최저수위 -3.140 m로 동일하게 선정하였다 (Table 2). 발전시스템의 냉각수로 사용되는 순환수는 순환수펌프 8대로 공급되며, 순환수 취수부의 각 구간별 명칭은 Fig. 4에 나타내었다. 계측위치는 Line 1~8로 구성되며 유입부는 Line 1~2, 침사지는 Line 3~6, 흡입수조는 Line 7~8로 구성하였다(Fig. 5). 흡입수조에서 발생하는 와류계측은 염료를 이용하여 목측하였고, 카메라 및 캠코더를 사용하여 기록하였다. 순환수펌프의 관로 내 선회류 분석은 와류 계측기를 설치하여 측정하였고, 와류각도를 계산하여 ANSI/HI 9.8(1998)의 설계기준과 비교, 분석하여 적합여부를 평가하였다. 또한, 흡입수조에서 발생하는 수중와류 제어는 많은 연구결과를 통해 Floor Splitter가 가장 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 수중와류 제어를 위해 Floor Splitter는 기본

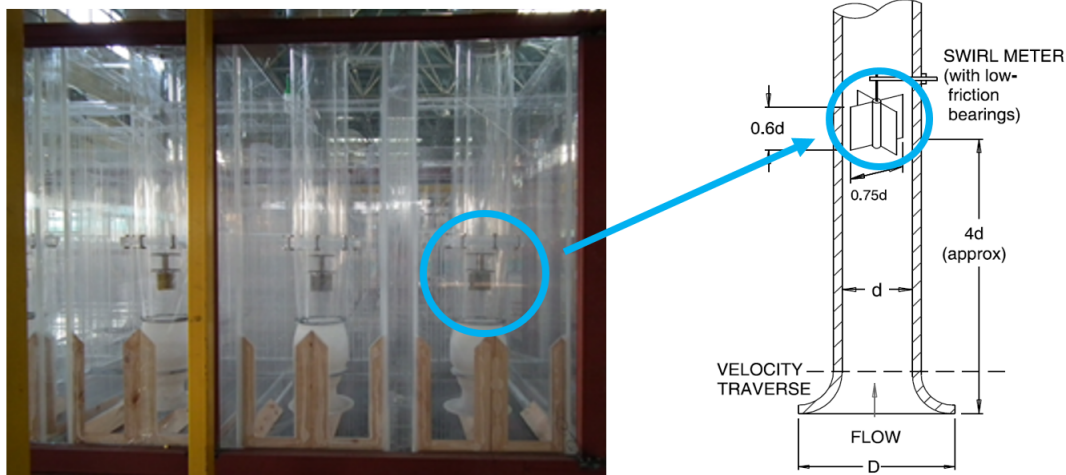


Fig. 3. Swirl Meter (ANSI/HI 9.8, 1998)

Table 1. Operating Conditions of Circulating Water Intake Basin

Case	Settling basin (on/off)				Travelling band screen (on/off)						Circulating water pump (on/off)								
	A	B	C	D	a	b	c	d	e	f	1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B	
1	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
2	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
3	OFF	ON	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
4	ON	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
5	ON	OFF	ON	ON	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
6	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON

Table 2. Experimental Conditions of Circulating Water Intake Basin

Case	Discharge of circulating water intake basin		Water level in circulating water intake basin (m)	Permeability of bar screen (%)	Permeability of travelling band screen (%)	Discharge
1	Prototype (m ³ /s)	57.167	-3.140	83.3	50	57.167
	Model (m ³ /s)	0.181				0.181
2	Prototype (m ³ /s)	57.167	-3.140	83.3	50	57.167
	Model (m ³ /s)	0.181				0.181
3	Prototype (m ³ /s)	57.167	-3.140	83.3	50	57.167
	Model (m ³ /s)	0.181				0.181
4	Prototype (m ³ /s)	57.167	-3.140	83.3	50	57.167
	Model (m ³ /s)	0.181				0.181
5	Prototype (m ³ /s)	57.167	-3.140	83.3	50	57.167
	Model (m ³ /s)	0.181				0.181
6	Prototype (m ³ /s)	57.167	-3.140	83.3	50	57.167
	Model (m ³ /s)	0.181				0.181

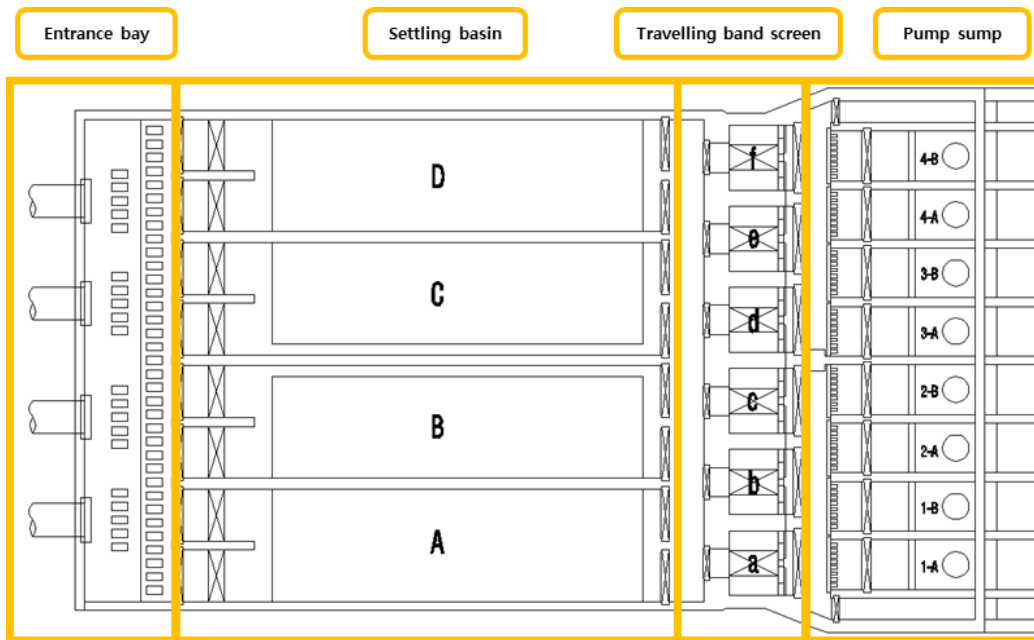


Fig. 4. Title of Each Section in the Circulating Water Intake Basin

적으로 적용하고, 자유표면와류 발생 여부를 확인하였다. Case 1~6의 모든 조건에서 자유표면와류가 다수 발생하였으며, 이를 제어하기 위한 와류제어장치를 설치하여 와류를 제어할 필요성을 확인하였다.

2.4 와류제어장치의 종류

순환수 취수부 중 순환수 펌프의 흡입구가 설치된 흡입수조에는 유입되는 난류 흐름 및 순환수펌프의 가동으로 인해 와류가 예측되거나 발생하였을 때는 적절한 와류제어장치를 설치하여 와류를

제어하여야 한다. 일반적으로 흡입수조에 설치하는 와류제어장치는 ANSI/HI 9.8(1998)의 설계기준을 참고하여 설치하며 필요에 따라 형태를 변형하거나 새로운 와류제어장치를 설치하여 와류를 제어해야 한다. 본 연구에서는 수중와류 제어를 위해 플로어 스플리터(floor splitter)는 기본적으로 적용하였고, 자유표면에서 발생하는 와류제어를 위해 새로운 형태인 컬럼 커튼월(Column curtain wall)을 추가적으로 적용하여 효과를 확인하였다. 또한, 일반적으로 적용되었던 커튼월에 새로 개발한 컬럼 커튼월을 복합적으로 적용하였다(Fig. 6).

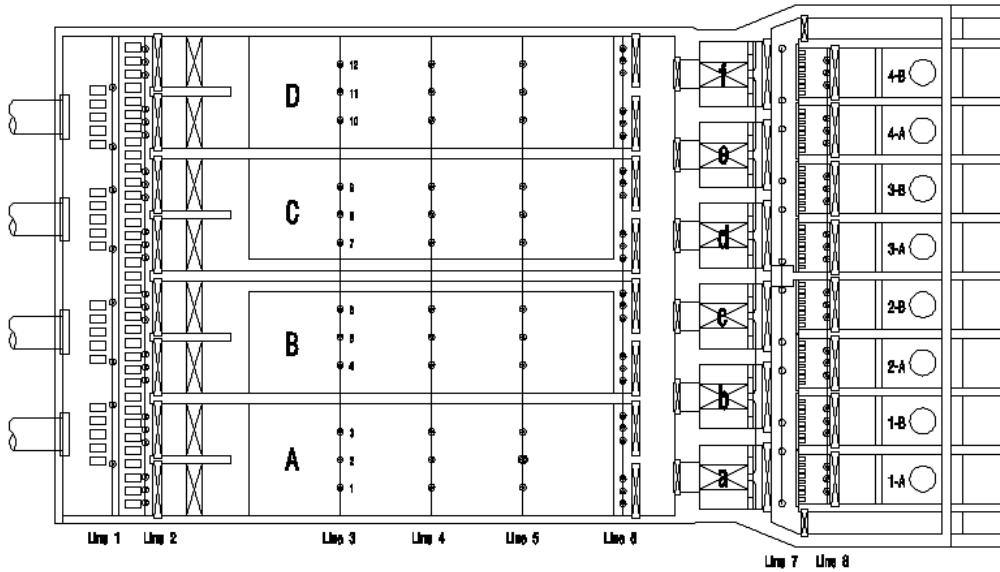


Fig. 5. Measuring Point of the Circulating Water Intake Basin

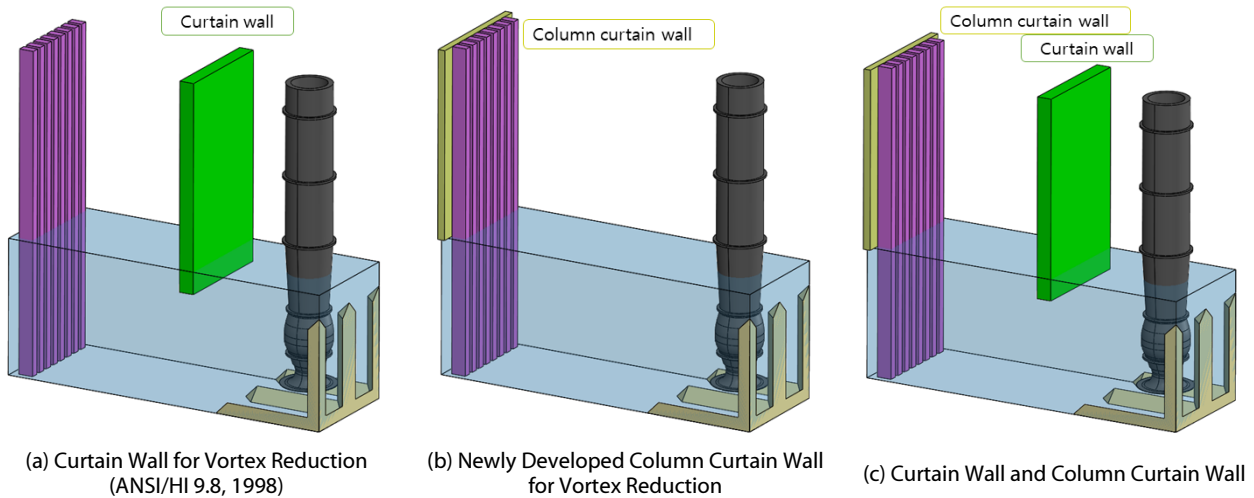


Fig. 6. Anti Vortex Devices

3. 실험결과 및 분석

3.1 흡입수조의 와류저감 효과 분석

흡입수조에서 발생하는 와류계측은 카메라와 캠코더를 이용하여 사진과 영상으로 비접촉 형태로 분석하였다. 또한 흐름의 시각화를 위하여 긴 바늘이 장착된 주사기에 염료를 주입하여 기록하였다. 3차원유속계와 같은 계측기기를 이용하여 수중에서 계측할 때는 흐름 상태를 교란시켜 전혀 다른 흐름특성을 발생시킬 수 있다. 따라서 흡입수조에서 발생하는 와류분석을 위해 비접촉식 분석방법을 선택하였으며, 와류의 발생여부와 위치 등을 기록하였다. 목측과 영상을 통한 와류에 대한 분석을 통해 실험조건 Case 1~6에서

와류제어장치 적용전에 모두 와류가 발생함을 확인하였다(Fig. 7).

와류제어장치인 커튼월과 컬럼 커튼월을 복합 적용하였을 때에는 Fig. 8과 같이 와류가 완전히 제어되었음을 확인하였다.

3.2 순환수펌프 관로의 와류저감 효과 분석

순환수펌프 관로 내에서 발생하는 선회류는 ANSI/HI 9.8(1998) 설계기준을 참고하여 와류 계측기를 관로 내에 설치하여 계측하였다. 선회류의 와류각도 측정은 60초간 블레이드의 회전수를 측정하며, 회전수를 이용하여 관로 내에서 발생하는 와류각도를 계산한다. 와류각도는 관로 내에서 와류의 강도를 확인하는데 사용되고, 권장되는 와류각도 기준은 5° 이내이며, Eq. (1)과 같다.

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

여기서, $V_a(4Q/\pi D^2)$ =축방향 평균속도, $V_i(\pi dn/60)$ =블레이드 끝단에서의 접선 평균속도, Q =유량(m^3/s), D =파이프 직경(m), d =와류 계측기 직경(m), n =와류 계측기 회전수(rpm)이다.

와류제어장치를 적용하기 전, 와류 계측기의 회전을 통해 계산된 와류각도의 분포는 $0^\circ \sim 7.25^\circ$ 로 나타났다. Case 1과 Case 3의 실험결과는 설계기준 와류각도 5° 이하로 계산되어 설계기준을 만족시키지만, Case 2, Case 4, Case 5, Case 6은 설계기준 이상으로 계산되어 와류제어장치의 설치가 필요한 것으로 나타났다 (Table 3).

와류제어를 위해 커튼월을 설치하여 와류 저감효과를 확인한

결과, Case 1의 와류각도 분포는 $0^\circ \sim 0.105^\circ$, Case 2는 $0.011^\circ \sim 5.047^\circ$, Case 3은 $0^\circ \sim 0.894^\circ$, Case 4는 $0^\circ \sim 4.953^\circ$, Case 5는 $0.011^\circ \sim 4.733^\circ$, Case 6은 $0^\circ \sim 1.146^\circ$ 로 나타났다. Case 2의 3-B를 제외한 모든 실험조건은 설계기준 와류각도 5° 이하로 나타나 설계기준을 만족하는 것으로 나타났다(Table 4). 하지만, 모든 순환수펌프 관로에서의 와류각도는 설계기준을 만족시켜야 하므로, 새로운 와류제어장치의 적용이 필요한 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 흡입수조에서 발생하는 와류를 추가적으로 제어하기 위하여 새로운 형태의 컬럼 커튼월을 개발 및 적용하여 와류 저감효과를 확인하였다. 커튼월에 컬럼 커튼월을 복합적으로 적용하여 실험 한 결과, Case 1의 와류각도 분포는 $0^\circ \sim 0.6^\circ$ 로 나타났으며, Case 2는 $0^\circ \sim 1.4^\circ$, Case 3은 $0^\circ \sim 0.3^\circ$, Case 4는 $0^\circ \sim 0.7^\circ$,

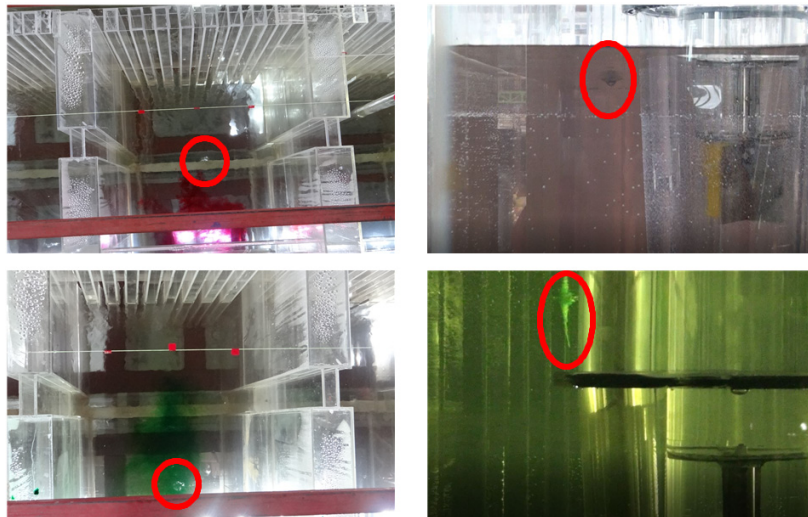


Fig. 7. Observation of Vortex in the Pump Sump (Before Installation)

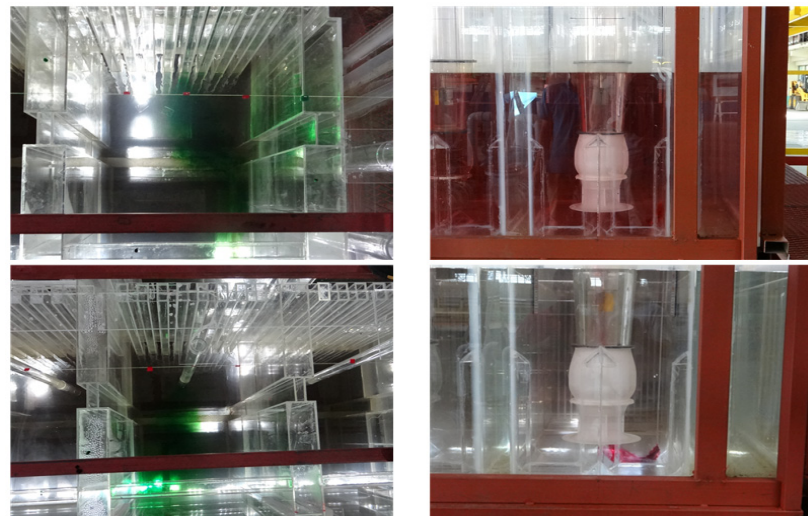


Fig. 8. Observation of Vortex in the Pump Sump (After Installation)

Table 3. Results of Vortex Angle in the Circulating Water Pump Pipeline (Before Installation)

Circulating water pump pipeline									
Classification		1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
Vortex angle (°)	Case 1	1.520	0.000	0.480	0.000	0.000	0.020	0.010	0.140
	Case 2	6.120	1.260	3.740	0.000	0.160	4.680	6.920	0.390
	Case 3	3.700	0.280	0.540	0.000	0.190	0.490	0.000	0.000
	Case 4	2.800	0.620	0.050	2.430	0.310	5.060	7.250	0.380
	Case 5	2.950	2.100	5.070	0.020	0.240	4.210	6.930	0.290
	Case 6	0.990	0.020	0.030	1.790	0.210	0.010	6.090	0.540
ANSI/HI 9.8(1998)		Below 5°							

Table 4. Results of Vortex Angle in the Circulating Water Pump Pipeline (Curtain Wall Installation)

Circulating water pump pipeline									
Classification		1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
Vortex angle (°)	Case 1	0.000	0.063	0.000	0.042	0.000	0.105	0.000	0.000
	Case 2	0.011	0.873	0.610	0.757	0.158	5.047	1.504	1.052
	Case 3	0.000	0.894	0.042	0.210	0.042	0.736	0.137	0.053
	Case 4	0.663	0.032	0.032	0.000	0.042	4.953	1.651	1.125
	Case 5	0.926	0.011	0.694	0.011	0.011	4.733	1.567	1.262
	Case 6	0.011	1.136	0.011	0.011	0.000	0.600	0.032	1.146
ANSI/HI 9.8(1998)		Below 5°							

Table 5. Results of Vortex Angle in the Circulating Water Pump Pipeline (Curtain Wall and Column Curtain Wall Installation)

Circulating water pump pipeline									
Classification		1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	3-B	4-A	4-B
Vortex angle (°)	Case 1	0.600	0.000	0.100	0.000	0.100	0.000	0.000	0.000
	Case 2	0.600	0.200	1.400	0.000	0.000	0.300	0.800	0.200
	Case 3	0.300	0.300	0.100	0.000	0.100	0.100	0.000	0.100
	Case 4	0.700	0.000	0.100	0.100	0.000	0.200	0.200	0.100
	Case 5	0.600	0.400	0.400	0.000	0.100	0.100	0.300	0.100
	Case 6	0.000	1.200	0.400	0.000	0.000	0.100	0.000	0.000
ANSI/HI 9.8(1998)		Below 5°							

Case 5는 0°~0.6°, Case 6은 0°~1.2°로 나타났다. 모든 실험조건 Case 1~6은 설계기준 와류각도 5° 이하로 나타나 설계기준을 만족하는 것으로 나타났다(Table 5 and Fig. 9).

4. 결론

본 연구에서는 기존 발전소의 순환수 취수부에 대한 연구 및 와류저감에 필요한 방법들을 조사, 분석하여 발전소의 정상적인 운영을 위한 순환수 취수부의 와류저감 방법을 도출하였다. 일반적으로 와류저감을 위해 적용되는 커튼월과 새로 개발한 컬럼 커튼월

의 와류저감 효과를 확인하기 위하여 수리모형에 적용하여 분석하였다. 또한, 와류제어장치를 적용하기 전에는 흡입수조에서 자유표면와류가 다수 발생하였으며, 발생된 와류는 순환수펌프로 유입되어 관로내에서 와류각도가 최대 7.25°로 나타나 와류제어장치의 적용이 필요한 것으로 나타났다. 와류저감을 위해 적용한 와류제어장치의 실험결과는 다음과 같다.

첫 번째로, 미국설계기준 ANSI/HI에서 제안하고 있는 커튼월을 흡입수조에 적용하여 분석한 결과, 흡입수조에서 발생하는 자유표면와류는 비교적 많이 제어하였지만, 완전히 제어하지는 못하였다. 또한, 흡입수조에서 발생된 와류가 순환수펌프로 유입되어 관로내

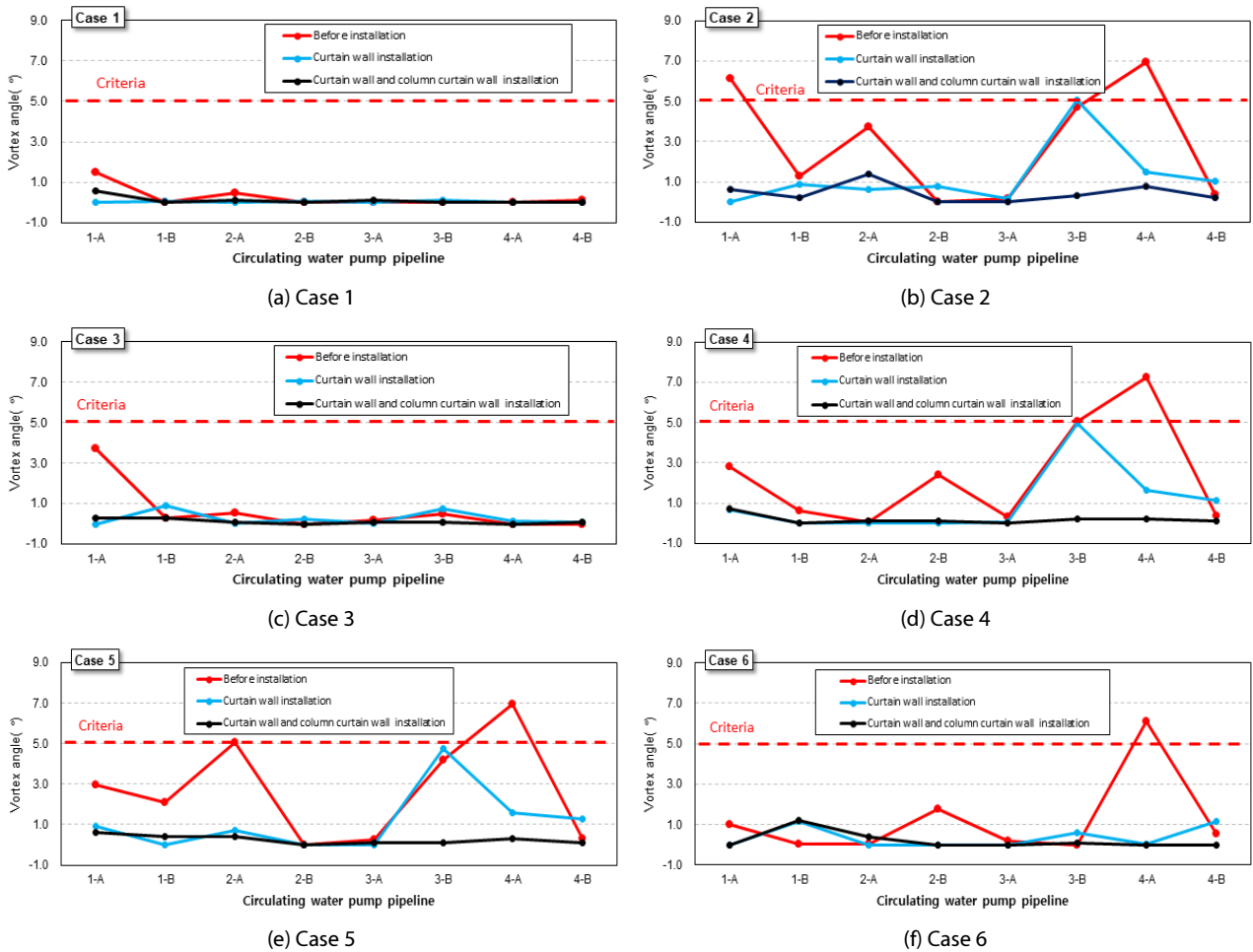


Fig. 9. Results of Vortex Angle in the Circulating Water Pump Pipeline

에서 발생하는 와류각도가 설계기준에 만족하지 못하였다. 이러한 결과는, 순환수펌프의 안정성에 문제가 발생 할 것으로 판단되며, 커튼월의 단일 적용은 적절하지 못한 것으로 나타났다.

두 번째로, 커튼월과 컬럼 커튼월을 복합적으로 적용하여 결과를 검토하였다. 검토결과, 순환수 취수부의 흡입수조에 대한 자유표면 와류는 완전히 제어하는 효과를 확인하였다. 이러한 와류 제어 효과로 인해, 순환수펌프 관로내에서도 설계기준 와류각도 5°이하로 나타났으며, 발전소가 정상적으로 운영 될 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용한 커튼월과 컬럼 커튼월의 복합적응으로 인한 와류 저감효과를 보았을 때 다양한 형태의 순환수 취수부 뿐 만 아니라 펌프장, 상·하수처리장 등을 건설할 때 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 향후에 와류 저감을 위한 와류제어장치의 위치 및 형태 등을 고려한 연구가 진행된다면 흡입수조에서 발생하는 와류 저감에 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다.

References

- ANSI/HI 9.8. (1998). *American national standard for pump intake design*, Hydraulic Institute, Parsippany, New Jersey, USA.
- Byeon, H. H., Kim, S. J. and Yoon, B. M. (2020). "A study of the velocity distribution and vorticity measurement in the pump sump using piv." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 40, No. 2, pp. 145-156 (in Korean).
- Choi, J. W., Choi, Y. D., Lim, W. S. and Lee, Y. H. (2009). "Numerical analysis on the flow uniformity in a pump sump model with multi pump intake." *Proceedings of the Korean Society for fluid Machinery*, Vol. 12, No. 4, pp. 14-22 (in Korean).
- Hyundai Engineering (2014). *Tripoli west 4 × 350 mw power plant project*.
- Kabiri-Samani, A. R. and Borghei, S. M. (2012). "Effects of anti-vortex plates on air entrainment by free vortex." *Scientia Iranica*, Vol. 20, No. 2, pp. 251-258.
- Kim, K. Y., Choi, J. H., Kim, J. Y., Ko, K. H., Kim, J. H., Cho, J. H., Lee, C. B., Kim, K. S. and Son, J. H. (1996). "Hydraulic model test

- of circulating water pump for thermal power plant.” *Proceedings of the Fall Conference of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, pp. 37-42 (in Korean).
- Lee, Y. H., Kim, S. J., Chen, Z., Singh, P. M. and Choi, Y. D. (2016). “Design and fundamental test on the pump sump scaled model.” *Korean Society for fluid Machinery Winter Conference*, Vol. 2016, No. 11, pp. 355-356 (in Korean).
- Norizan, T. A., Harun, Z., Abdullah, S. and Mohtar, W. H. M. W. (2019). “Effects of floor splitter height on the effectiveness of swirl angle reduction in pump intake.” *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, Vol. 57, No. 1, pp. 32-39.
- Sarkardeh, H., Zarrati, A. R. and Roshan, R. (2010). “Effect of intake head wall and trash rack on vortices.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48, No. 1, pp. 108-112.
- Shabayek, S. A. (2010). “Improving approach flow hydraulics at pump intakes.” *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, IJCEE-IJENS, Vol. 10, No. 06.
- Sweeney, C. E., Elder, R. A. and Hay, D. (1982). “Pump sump design experience Summary.” *Journal of Hydraulic Division*, Vol. 108, No. 3, pp. 361-377.