

# 녹색성장을 위한 발전소 방류수 재활용에 따른 소수력 발전 유입수로 설계 방안



정 상 화  
한국건설기술연구원 연구원  
kikimurah@kict.re.kr

## 1. 서론

세계적으로 주요 이슈가 되고 있는 기후변화의 주요 원인으로 지구 온난화를 들고 있으며 이산화탄소는 온난화의 주범으로 지목되고 있다. 이러한 이산화탄소의 발생 및 증가를 막고 사회적 발전을 위한 대안으로 녹색성장에 주목하고 있다. 이러한 녹색성장의 핵심은 탄소저감으로 이를 위해 저탄소 공법개발이나 자원 재활용 방안을 들고 있다. 산업분야 중 탄소 발생이 큰 분야로 자동차와 발전소 특히 화력발전소를 들고 있다. 이에 하이브리드 자동차나 탄소 포획 및 저장 시설을 갖춘 화력발전소를 건설함으로써 탄소 저감을 위한 연구를 활발하게 진행하고 있다.

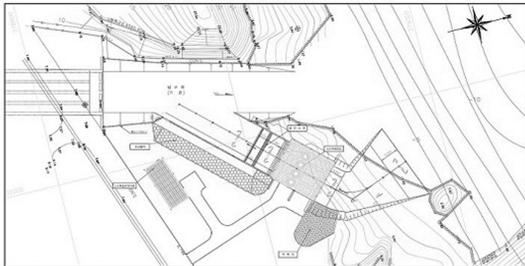
석탄 및 중유 등 화석연료를 통해 전기를 생산하는 화력발전소의 경우 열에너지를 전기에너지를 변환하는 과정에서 반드시 냉각수를 사용하여 고온으로 가열된 터빈을 적정 온도로 유지할 필요가 있으며 이 과정에서 대량의

냉각수가 필요하다. 따라서 대부분의 발전소들은 해안에 근접해 있으며 해수를 용이하게 취수할 수 있도록 설계된다. 이렇게 많은 에너지를 사용하여 인위적으로 취수되는 냉각수는 발전소 터빈을 냉각시킨 후 다시 바다로 방류하게 되는데 오직 터빈을 냉각하는 목적으로만 사용되어 에너지 활용측면에서 큰 효율을 보이지 못하는 사례 중의 하나이다. 이에 따라 주요 발전소에서는 에너지 효율을 높이기 위해 본 발전소 취수시스템의 방류수로에 분기수로를 건설하여 낙차를 이용한 소수력 발전소의 유량을 공급하고 이를 통해 전기를 생산함으로써 에너지 효율을 제고하기 위한 방안을 마련하고 있다. 이러한 소수력 발전소에서는 기존에 방류되던 냉각수를 재사용하여 전기를 생산하는 재활용이 가능케 하여 자원 재활용을 통한 녹색성장의 방안으로 제안되고 있다. 그러나 최초 본 발전소 설계단계에서 방류수 재활용이라는 목적을 감안하지 않았기 때문에 수리학적 설계상 소수력 발전소 운영에 문제가 발생할

수 있으며 본 연구에서는 수리모형실험을 통해 소수력 발전소 설계상 문제점 중 유입수로 설계 제원 한계에 따른 출력 난조 현상의 원인규명과 이를 해결하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 문제점

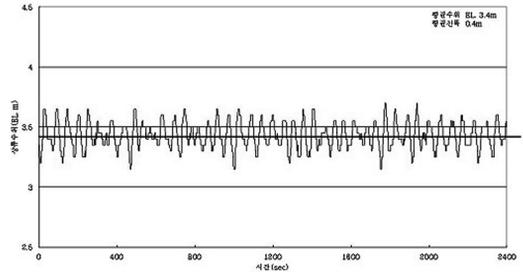
본 발전소 방류수로와 소수력 발전소로 유입되는 수로의 형상은 그림 1에 나타낸 바와 같다. 그림 1과 같은 수로 설계는 기존 방류수로 구조물을 변형하지 않고 지반의 상태를 감안하여 설계되었다. 이러한 설계에 따라 건설된 소수력 발전소는 가동 시 수로 분기부를 경계로 직하류부에는 난류가 심하며, 이하의 하류부는 좌안부의 유속이 빨라 와류 현상이 발생하고 있다. 이에 따른 수면진동 현상이 나타난다.



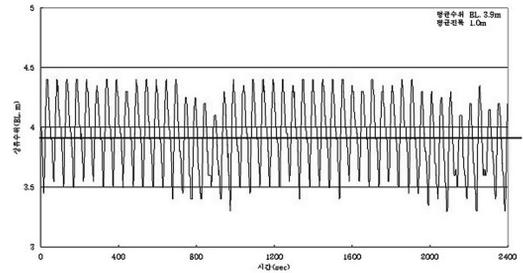
〈그림 1〉 방류수로 및 유입수로 형상

발전 모드에 따른 수면변화는 그림 2와 그림 3에서 나타난 바와 같다. 그림을 살펴보면 전호기발전시의 평균수위는 EL. 3.4m, 평균진폭은 0.4m임을 알 수 있으며 발전중단 시의 평균수위는 EL. 3.9m, 평균진폭은 1.0m로 나타났다. 그러나 하절기 미발전시 좌안수로 상단고(EL. 4.50m)를 최대 약 10cm 정도 월류하고 있다. 이러한 급격한 수면진동은 다음과 같은 발전소 운영에 문제점을 야기시킨다.

- (1) 발전소 가동을 위한 적절한 가동 초기 시간 결정
- (2) 발전소 가동 후 낙차 변화에 따른 전력생산 차질
- (3) 낮은 수위로 인한 발전소 구조물 안정성 문제 및 사용 내구연한 감소



〈그림 2〉 상류수위변화(전호기 발전시)



〈그림 3〉 상류수위변화(발전 중단시)

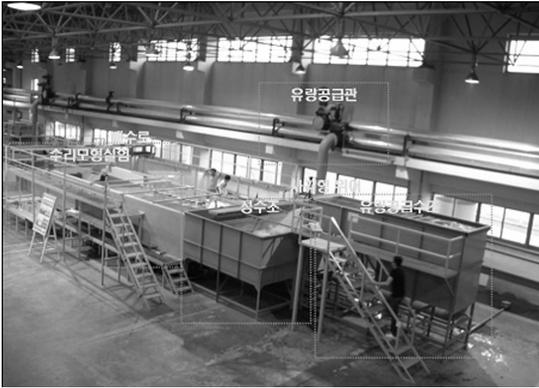
이러한 급격한 수면진동은 충분한 유입수로 제원을 확보하지 못해 본 발전소 방류수로에서 적정하게 유량이 유입되지 못하는 것이 원인이다. 따라서 수리모형실험을 통해 소수력 발전소 유입수로 내 적정유량 유입을 통한 수면진공 저감 방안을 마련할 필요가 있다.

## 3. 수리모형실험

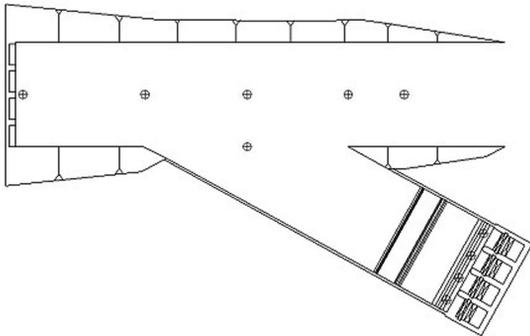
### 3.1 실험장치

모형제작의 용이성과 상사법칙 적용의 적정성 및 가능한 실험시설을 고려하여 축척은 1:15로 하였다. 또한 수리모형은 수로지점은 시멘트 모르타르를 이용하여 제작하였으며 우레탄 표면처리를 하여 조도를 조정하였고 소수력 발전소 구조물은 아크릴을 이용하여 제작하였다. 모형 축척에 따른 원형 대비 모형의 공급유량은 호기당 0.0138 m<sup>3</sup>/s이며 총 4개 호기를 가동하기 위해 최대 0.0552 m<sup>3</sup>/s의 유량을 사각형위어에서 공급하였다. 그림 4는 완성된 소수력 발전소 수리모형을 나타내며 그림 5는 수리

모형 내 수위 측정지점을 나타내고 있다. 수리계측은 2차원 마그네틱 유속계(모델명 : ACM250-D)를 이용하여 유속을 측정하고 초음파 센서(모델명 : P47-F4V-2D-1D0-330E) 수위계를 이용하여 수위 변동을 계속하였다. 또한 유량 상황을 파악하기 위해 LSPIV를 이용한 유속장을 측정하였다.



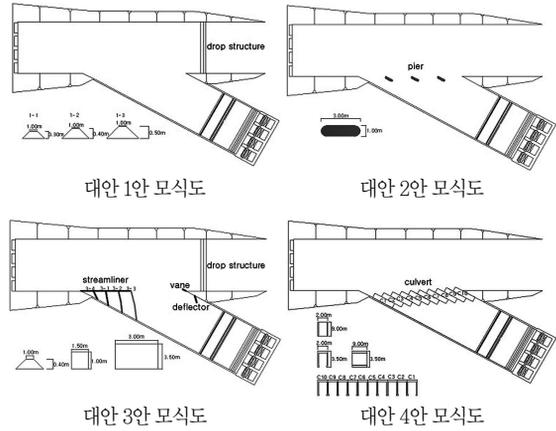
(그림 4) 수리모형 구조



(그림 5) 수리모형실험의 수위 측정

### 3.2 실험결과

소수력 발전소 분기수로내 수면 진동 발생 원인을 제거하기 위한 수리적 특성을 검토하였으며 이를 바탕으로 대안을 제시하였다. 제시된 대안은 1안 낙차공 설계안, 2안 교각 설계안, 3안 유선조정구조물 설계안, 4안 수로 암거 설치안 등 4가지의 대안이 제안되었으며 각 대안마다 수리모형실험을 통해 진동 저감효과를 검토하였다.

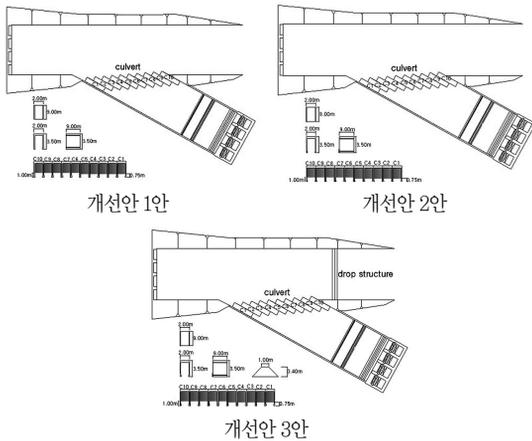


(그림 6) 대안별 모식도

(표-1) 대안별 운영조건에 따른 파고 비교 결과

대안	구분	하절기 수위		동절기 수위		춘추절기 수위		비고
		발전중단	발전	발전중단	발전	발전중단	발전	
1안	파고(m)	0.76	0.81	0.83	0.52	-	-	
2안	파고(m)	0.99	0.43	0.62	0.41	-	-	
3안	파고(m)	0.99	1.02	0.15	0.49	-	-	
4안	파고(m)	0.11	0.28	0.10	0.29	0.11	0.28	

표 1의 파고 비교 결과 결과를 살펴보면 최저 진동 현상을 보이는 대안 4안(수로 암거 설치안)이 최적의 대안으로 선정되었다. 대안 4안은 실제 진동현상과 비교해서 약 90%의 저감효과를 보이고 있음을 알 수 있었고 진동 저감을 위한 최적안이라고 판단된다. 그러나 대안 4안에서 순차발전 연계 운영에 따른 수위 진동 문제와 연간 운영에 따른 계절별 수위 설계기준을 벗어나는 문제가 나타났다. 이를 해결하기 위해 대안 4안의 개방부 조정(개선안 1안), 대안 4안의 수로암거 유입부 모서리 곡선처리(개선안 2안), 대안 4안의 높이 0.4 m 낙차공 설치 방안(개선안 3안)을 제시하여 수리모형실험을 통해 효과를 검증하였다 (그림 7 참조).



〈그림 7〉 개선안별 모식도

〔표-2〕 개선안 3안 지점별 유속

대안	구분	하절기 수위		동절기 수위		춘추절기 수위		비고
		발전중단	발전	발전중단	발전	발전중단	발전	
1안	평균(EL, m)	3.62	2.69	2.76	2.04	-	-	
	파고(m)	0.14	0.28	0.09	0.22	-	-	
2안	평균(EL, m)	3.66	2.75	2.78	2.10	3.26	2.50	
	파고(m)	0.15	0.30	0.10	0.22	0.14	0.31	
3안	평균(EL, m)	3.82	2.84	3.06	2.23	3.46	2.55	
	파고(m)	0.11	0.28	0.10	0.29	0.11	0.28	

〔표-3〕 개선안 3안 지점별 유속

위치	지점	하절기		동절기		춘추절기		비고
		발전중단	발전	발전중단	발전	발전중단	발전	
방수로 수로암거 전면	C1	2.50	3.95	2.45	3.93	2.45	4.15	
	C2	2.53	3.74	2.48	3.16	2.39	3.79	
	C3	2.54	3.65	2.49	2.96	2.45	3.48	
	C4	2.53	3.42	2.49	2.72	2.55	3.43	
	C5	2.48	2.61	2.45	2.52	2.63	3.62	
	C6	2.40	2.02	2.33	2.19	2.46	3.68	
	C7	2.24	2.32	2.16	1.60	2.29	3.77	
	C8	2.09	2.37	2.02	2.02	1.86	3.03	
	C9	1.83	1.84	1.73	1.70	1.39	2.03	
	C10	1.79	1.36	1.76	1.30	0.73	1.54	
	평균	2.29	2.73	2.24	2.41	2.12	3.25	
분기수로 발전소 전면	#1	0.04	1.34	0.04	1.06	0.03	0.84	
	#2	0.03	0.88	0.03	0.69	0.06	0.57	
	#3	0.01	0.74	0.03	0.70	0.05	0.44	
	#4	0.06	1.05	0.08	1.09	0.03	0.65	
	평균	0.03	1.00	0.04	0.89	0.04	0.62	
낙차공 상하류	Dd(상)	3.64	2.17	2.95	2.66	3.59	2.98	
	Dd(하)	4.65	3.79	4.63	4.38	4.60	4.64	

표 2와 3을 살펴보면 개선안 2안은 수면파동이 0.28 m 이내로 줄어들었으나, 하절기 및 동절기 전호기 발전 시

수위가 각각 EL. 2.69 m, EL. 2.04 m로 설계 기준에 약간 미달되었다. 개선안 3안은 수면파동이 개선안 2안보다 약간 증가하여 0.30 m 이내이나, 하절기, 동절기 및 춘·추절기의 전호기 발전 시 수위가 각각 EL. 2.75 m, EL. 2.10 m, EL. 2.50 m로 설계 기준에 약간 미달되었다. 개선안 4안은 수면파동은 개선안 3안보다 조금 감소하여 0.28 m 이내로 감소하였으며, 하절기, 동절기 및 춘·추절기의 전호기 발전 시 수위가 각각 EL. 2.84 m, EL. 2.23 m, EL. 2.55 m로 설계 기준에 거의 도달하였음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 본 발전소 방류수를 재활용하여 소수력 발전소를 운영하기 위해 소수력 발전소 유입수로 설계를 위한 수리모형실험을 수행하였다. 기존 방류수로에 의한 소수력 발전소 유입수로의 시공 상 설계제원의 한계로 인해 소수력 발전소 유입수로 내 수면진동현상이 발생하였고 이는 발전소 호기별 토출유량에 비해 과다한 유량이 유입되는 것이 주요 원인으로 작용하는 것으로 판명되었다. 이러한 수면진동은 출력난조 현상을 발생시켜 발전소 효율 및 본 발전소 운영에 문제를 일으킬 소지가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 수리모형실험을 수행하였다.

유입되는 유량의 조절없이 수면진동현상을 제어하는 것이 매우 어려우며 수로내에서 상류와 하류 흐름 조건이 주기적으로 변동하는 상황에서는 수치해석이 어려워 수리모형실험을 통한 해석이 효율적임을 알 수 있었다.

수리모형실험을 통해 (1) 낙차공[대안 1안], (2) 교각[대안 2안], (3) 유선조정구조물[대안 3안], (4) 수로암거[대안 4안] 설치안을 제시하였고 대안 실험을 실시하였다. 그 결과 수로암거[대안 4안] 설치 방안의 효과가 가장 컸으며 연중 운영 및 순차발전제에 따른 개선 효과를 증대시키기 위한 개선안 수리모형실험으로 (1) 수로암거의 개방부 크기 조정[개선안 1안], (2) 수로암거 유입부 모서리 곡선처리

[개선안 2안], (3) 높이 0.4 m인 낙차공 설치[개선안 3안] 방안에 대해 개선안 실험을 실시하였다. 실험결과를 종합한 결과 개선안 3안이 가장 좋은 효과를 보이는 것으로 판단되었다. 그러나 개선안 3안은 낙차공의 추가 설치에 비용이 수반될 뿐만 아니라 시공 상 큰 어려움이 있다. 반면에 개선안 2안은 3안에 비해 전호기 발전 시 분기수로 내수위가 0.1 m 정도 낮으나 낙차공을 추가 설치하지 않기 때문에 비용과 시공 상 유리한 점이 있다. 따라서, 개선안 2안과 3안의 경제성을 비교 검토한 후 최종안을 선택하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 그리고 진동 저감을 위한 구조물 설계시 작은 제원 변화에도 흐름조건이 다양하게 변화하기 때문에 구조물 제작시 정확한 제원에 따른 제작이 중요함을 알 수 있었다.

녹색성장을 위한 다양한 탄소저감방안 중 기존 탄소발생 시설에 대한 다양한 보완 및 개선방안이 제시되고 있

다. 특히 발전소 시설에 대한 탄소 저감 방안에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으나 발전소 방류수에 대한 관심은 크지 않은 것이 현실이다. 그러나 방류수에 대한 재고찰을 통해 재활용 방안이 수립될 수 있으며 본 연구를 통해 수리모형실험이 크게 기여할 수 있음을 확인하였다. 따라서 녹색성장을 위한 다양한 탄소저감방안 마련 및 설계 계획 제안에 수리모형실험이 보다 활발하게 활용되기를 기대해 본다.

#### 참고문헌

1. 현대건설엔지니어링 (2007) 소수력수로 파고분석 검토서
2. V.T. Chow (1959) Open-Channel Hydraulics