

## 발전소 온배수의 수력에너지 개발에 관한 연구

강금석\* · 이대수\*\* · 김지영\*\*\*

### A Study on Hydro Energy Development of Discharged Cooling Water at the Power Plant

K. S. Kang\*, D. S. Lee\*\*, and J. Y. Kim\*\*\*

*Key Words* : Discharged cooling water(온배수), Hydro energy(수력에너지), Thermal power plant(화력발전소)

#### ABSTRACT

Cooling seawater of thermal power plant which amounts about 5 cms per 100 MWe has hydro energy of about 3,000 kW at the thermal power plant complex, but this useful hydro energy has not been developed. Therefore, the feasibility study on hydro energy development of three power plants located in the southern and western coast of Korea was performed. Three target power plants are Samcheonpo, Boryeong and Hadong thermal power plant. The design head to discharge cooling water by gravity and the head caused by tidal level in the southwestern coastal area, could be used for the production of electric power. The various alternatives were studied and technical feasibility and economical efficiency were clearly proved.

#### 1. 서론

삼천포, 보령, 당진 등 국내 대형 기력발전단지에서 냉각수로 사용되고 방류되는 해수는 약 150 cms로 (100 MWe당 약 5 cms) 약 3,000 kW 이상의 수력에너지에너지를 보유하고 있으나, 현재 활용되지 못하고 그대로 해양으로 방류되고 있어 이 소수력에너지의 개발 방안을 검토하였다. 발전소 온배수의 원활한 배수를 위한 설계 낙차와 함께 남서해안의 조위변화에 따른 낙차를 이용하는 것으로 소수력 발전 방식과 조력발전 방식의 특징을 동시에 활용하는 것이다.

하천의 소수력 발전은 하절기에 집중된 우리나라 강우 특성으로 인하여 발전가능 기간이 여름철로 제한을 받으나 발전소 방류구에서는 연중 방류량이 일정하여

이를 이용할 경우 연중 일정한 전력을 생산할 수 있고 발전량 또한 매우 큰 장점이 있으며, 발전소 냉각수는 해수이지만 흐름조건이 비교적 균일하고 파랑조건, 부유사, 해조류, 부유물 등의 문제가 자연 해양조건보다 양호하여 조력, 조류력 발전 방식보다 적용여건이 매우 양호하다. 또한, 발전소 방류구에서는 미관상 보기 좋지 않은 거품이 발생하고 있고 온배수 열영향 등으로 인하여 지역주민 및 환경단체와 마찰가능성에 항상 노출되어 왔으나, 온배수 배수구에 수력발전 시스템을 도입할 경우 수중방류 구조를 취하게 되어 거품발생을 억제할 수 있으며 온배수 영향의 저감 효과도 기대할 수 있다.

본 연구에서는 국내의 기력발전소 가운데 삼천포, 보령, 하동 화력발전소에 대하여 소수력에너지 개발 방안을 검토하였다. 배수로에 댐을 축조하여 방류수 전량을 발전에 이용하는 댐식, 배수로 중간에서 방류수 일부를 취수하는 수로식, 배수로의 빠른 유속을 이용하는 흐름식 발전 방안을 중심으로 각 발전소의 구체적인 적용여건에 따라 다양한 대안을 검토하여 기술적 가능성 및 경제성이 충분함을 입증하였다.

\* 한국전력공사 전력연구원  
E-mail : gldstn@kepri.re.kr

\*\* 한국전력공사 전력연구원  
E-mail : dslee@kepri.re.kr

\*\*\* 한국전력공사 전력연구원  
E-mail : jykim77@kepri.re.kr

## 2. 수력에너지 개발 가능성

발전소의 순환수 계통은 냉각수를 바다에서 순환수 펌프로 취수하여 복수기를 거쳐 다시 바다에 방류하는 구조로서 개념적으로 소수력발전에 이용할 만한 여유낙차를 최대한 줄이는 것이 적절한 설계일 것이다. 그러나, 조석에 따른 해수위 변화가 클 때에는 간조시 상당한 여유낙차가 발생한다. 여기에서 발전소의 해수 방류수를 이용한 소수력 개발의 가능성이 발견된다. 또한, 특정 발전소의 경우는 설계 여유낙차를 이용할 수 있는 구조인 경우도 있다.

발전소 해수냉각수를 이용한 소수력 발전의 특징은 다음과 같다.

- 연중 안정적인 고유량의 확보가 가능하다.
- 이용 가능한 낙차는 2~5 m로서 저낙차이다.
- 해수이므로 부식 및 해조류 등의 부착 가능성이 있다.
- 조위에 따라 발전시간의 제한을 받으며 발전소 하류 방류수위의 변화가 크다.
- 화력발전소의 배수로 및 방류구의 형식(개수로, Box Culvert 등)에 따라 에너지 개발에 영향을 받는다.
- 방류수 전량을 활용하는 안과 일부를 활용하느냐에 따라 공사비 규모 및 기존 화력발전소의 순환수계통에 대한 영향 및 관련성이 크게 좌우된다.
- 발전소 부지 외에 소수력 발전을 계획하게 되므로 공유수면 사용허가 등 관계기관과의 협의·승인 등이 필요하다.
- 해변에 접하고 있으므로 태풍, 해일 등에 취약할 수 있다.
- 기존 화력발전소의 가동 중단 불가로 공사에 상당한 어려움이 있다.
- 국내외적으로 적용한 예가 거의 없다.

현재, 국내외적으로 화력발전소의 해수방류수를 이용한 소수력발전의 사례를 발견하기 힘들다. 그 원인으로서는 기존 발전소 순환수 계통에 영향을 미칠 것이라는 점과 해수를 사용함에 따라 발전설비의 부식 및

해조류 부착의 문제가 심각할 것이라는 점, 공사비가 과다할 것이라는 점, 가동 중인 발전소 배수로를 변경하는 것이므로 시공성이 극히 불량할 것이라는 점이다. 그러나, 해수를 이용하는 조력, 조류력, 해수양수발전소가 운영되고 있고, 순환수 계통의 펌프 및 순환수 관로가 모두 해수를 이용하는 구조물이므로 부식 등 구조물 재료의 문제는 극복이 가능한 문제이다. 순환수 계통에 미치는 영향 또한 간조시의 여유낙차를 이용하는 것이므로 문제가 되지 않으며, 결국에는 개발 방식에 따른 시공성과 공사비 규모와 발전량을 고려한 경제성이 핵심적인 문제이다.

## 3. 발전량 산정

발전소의 해수냉각수 배수로는 일반적으로 Fig. 1과 같은 구조이다. Seal Well 이후는 중력에 의한 자연방류 구조를 취하고 있다. 조석에 의한 해수위의 변화에 따라 낙차가 변화하며, 방류량은 발전소 가동상황과 계절에 따른 냉각수량의 차, 조위에 따라 결정된다.

화력발전소의 방류수를 이용한 수력발전의 시설용량은 방류량과 낙차에 따라 결정되는데 일조석주기당 에너지는 다음과 같다.

$$E_0 = \rho g Q H T \quad [\text{kWh}] \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ 는 해수밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $Q$ 는 방류량,  $H$ 는 평균해수면에 대한 Weir 상단의 수두,  $T$ 는 조석 주기이다.

일조석주기당 평균출력(이론수력)은  $P_0 = \rho g Q H$ 이며, 대조기, 소조기의 조차의 변화에 관계없이 일조석주기당 에너지 및 평균출력은 일정하다. 즉, 일조석주기당 에너지 및 평균출력은 발전소 가동현황에 따른 방류량만의 함수인 것이다.

그러나, 조위 변화에 따라 최소, 최대 낙차가 나타나므로, 수차의 낙차에 따른 효율의 변화를 포함하면 총발전가능량을 산정하는데 있어서 조위의 변화는 중요한 역할을 하게 된다. 또한,  $H$ 는 배수구조물의 형상,

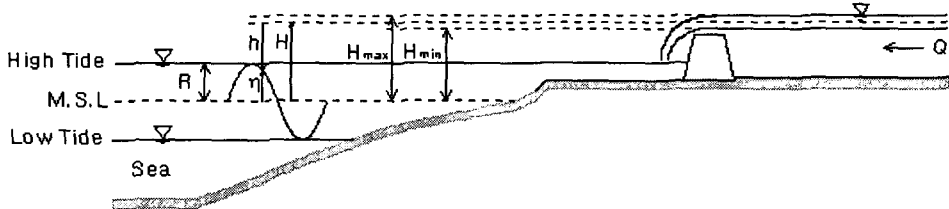


Fig. 1 방류수 이용 수력발전량 산정 개념도

마찰에 따른 수두손실을 고려하여 유효낙차( $H_e$ )를 사용하게 된다.

한편, 흐름식발전의 경우 발전량 산출식은 다음과 같다.

$$P = 0.5 \times \eta \times \rho \times A \times V^3 \quad [\text{kW}] \quad (2)$$

여기서,  $P$ 는 출력,  $\eta$ 는 효율,  $A$ 는 수차의 전면 면적,  $V$ 는 유속이다.

## 4. 개발방안

### 4.1 개발방식

발전소의 해수방류수를 이용한 소수력에너지 개발방안으로서 개념적으로 3가지 방안을 고려하였다. 첫째는 댐식으로서 발전소 배수로 하류단 전체를 차단하고 소수력발전시설을 설치하는 방안이다. 주요하게 조석에 의한 낙차를 이용하는 방식으로 충분한 조위차만 있다면 대부분의 발전소에서 적용 가능한 방안으로서 방류량 전체를 소수력 발전에 이용할 수 있어 발전량이 크지만 가동중 발전소의 하류단을 막는 것으로서 시공조건이 불량하고 공사비 규모가 매우 크며 순환수계통에 미치는 영향이 크다. 둘째는 수로식으로서 Seal Well에서 혹은 배수로에 보를 추가로 설치하여, 우회수로를 통하여 취수, 발전하는 구조로서 방류수 일부를 이용하는 방안이다. 조위차와 설계낙차를 동시에 이용하여 이용가능 수두가 제일 크지만 유량을 부분적으로 이용하며 순환수계통에의 영향이 없는 방식이다. 그러나, Seal Well이나 배수로 상단에서 취수를 하고 우회수로를 설치할 공간이 확보되어야 하므로 모든 발

Table 1. 소수력 개발 방식별 특징

구분	댐식	수로식	흐름식
1.발전방식	배수로 말단에 댐을 설치	배수로에서 부분취수	배수로의 속도에너지 이용
2.사용수량	방류수 전량이용	방류수 일부 이용	방류수 전량 이용
3.유효낙차	-조석에 의한 낙차만 이용 가능 -설계조위(H.H.W.L)에서 배수로 방류 기능 보장 -이용가능 낙차 큼	-배수로 설계낙차와 조석에 의한 낙차 모두 이용 가능 -순환수계통 영향 없음 -이용가능 낙차 제일 큼	-배수로 수위 변화 없음 -순환수계통 영향 없음
4.출력 /발전량	-제일 큼	-비교적 큼	-적음
5.총사업비	-공사비 제일 큼	-공사비 큼	-공사비 적음
6.시공성	-시공성 불량	-시공성 불량	-시공성 좋음
7.적용성	-대부분의 발전소에서 적용 가능 -가동보/고정보 방식	-일부 발전소에서 가능	-대부분의 발전소에서 적용 가능

전소에서 이용가능한 방식은 아니다. 셋째는 흐름식으로서 배수로의 빠른 유속을 이용하여 조류력 발전에 이용되고 있는 데리우스 터빈이나 헬리컬 터빈을 적용하는 방식이다. 이 방안은 순환수 계통이 미치는 영향이 거의 없고 설치가 용이하나 발전량이 매우 작고 실용화를 위해서는 터빈 및 발전기, 수차의 형식, 배치방식, 계통연결 방안에 대한 연구가 필요한 실정이다.

### 4.2 적용 가능 수차

화력발전소 방류수를 이용한 수력발전소의 이용낙차는 2 ~ 6 m 이하로 매우 작아서 저낙차용 수차 혹은 흐름에너지를 이용한 수차의 적용이 필요하다. 소수력 발전 방식에는 입축 프로펠러 터빈(Vertical Propeller Turbine), 튜브 수차(Tubular Turbine), 횡류수차(Cross-Flow Turbine)를 적용할 수 있으며, 흐름식 발전에는 Gorlov's Helical Turbine, Davis Turbine 등을 적용할 수 있다. 이중 일반적으로 낙차 15 m 이하의 소수력용 수차로는 튜브(Tube)수차 및 입축 프로펠러 터빈(Vertical Propeller Turbine)의 사용 범위가 가장 크다. 흐름식 발전의 경우 Helical 터빈 등이 개발되어 현재 실용화를 추진 중이다.

### 4.3 검토 사례

국내의 기력발전소 가운데 삼천포, 보령, 하동 화력발전소에 대하여 소수력에너지 개발방안을 검토하였다.

#### 4.3.1 삼천포 화력

삼천포 화력발전소의 경우(Fig. 2) 방류부의 조건 및 해상조건 등을 고려하여, 댐식으로서 방류구 하류 전

면 해상과 교량인근 육상부에 수력발전소를 두는 안과, 수로식으로 기존 웨어 상·하류부에서 취수구를 설치하여 발전하는 방식, 흐름식으로 배수로에 수차를 설치하여 발전하는 방식을 검토하였다. 개발안 검토를 위해서 현지 여건을 감안, 9개의 대안을 설정하였으며, 소수력발전 6개안(댐식 2개안, 수로식 4개안), 흐름식 발전 1개안, 혼합식 2개안으로 되어 있다. 댐식은 출력은 약 2,600 kW로 제일 크나 공사비가 과다하였고, 흐름식은 경제성이 높지 않았다. 수로식이 계통낙차의 이용이 가능하여 적용 여건 매우 양호하여 배수로 좌안에 수로식 발전 방식인 제3안을 최적으로 선정하였다.

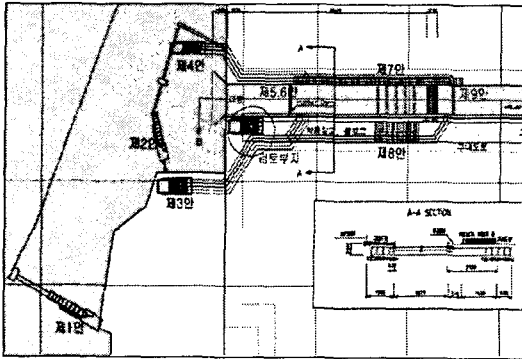


Fig. 2 삼천포 화력 개발안

#### 4.3.2 보령 화력

보령 화력발전소의 경우(Fig. 3) 댐식으로 방류구 하류 전면 해상에 수력발전소를 두는 안과, 수로식으로 기존 방류구 Box Culvert부에서 취수구 및 Box 수로를 설치하여 발전하는 방식, 흐름식 발전으로 기존 방류구 Box 하류부 배수로에 수차를 설치하여 발전하는 방식을 검토하였다. 또한, 혼합식으로는 1안(댐식)과 3안(흐름식)의 조합으로 하였다. 댐식은 출력은 약

2,000 kW로 제일 크나 공사비가 과다하였고, 수로식은 경제성이 불리하였으며, 흐름식이 발전량은 크지 않지만 경제성 높아 (B/C Ratio 1.43) 배수로에 흐름식 수차를 설치하는 제3안을 최적으로 선정하였다.

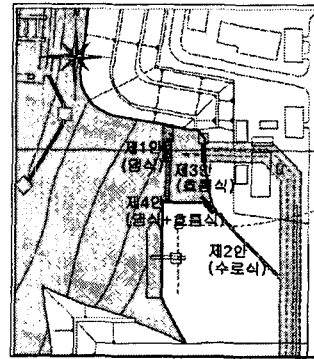


Fig. 3 보령 화력 개발안

#### 4.3.3 하동 화력

하동 화력발전소의 경우(Fig. 4) 댐식으로 방류구 하류 전면 해상에 소수력발전소를 두는 안(1안)과 흐름식 발전으로 기존 방류구 Box 하류부에 배수로와 수차를 설치하여 발전하는 방식(2안, 3안)을 검토하였다.

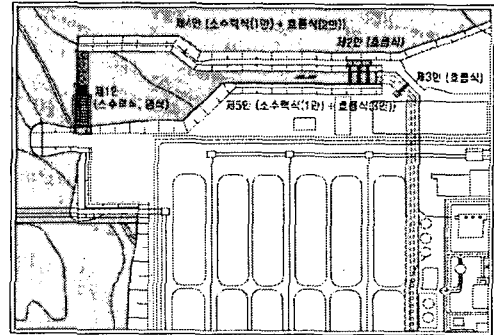


Fig. 4 하동 화력 개발안

Table 2 발전소별 배수로 설계 특성

구분	단위	삼천포화력	보령화력	하동화력
취수방식	-	1단 취수	2단 취수	1단 취수
호기당 취수량	m <sup>3</sup> /sec	19.5~26.0	26.1	26.0
총방류량	m <sup>3</sup> /sec	130.0	156.6	156.0
배수로 형식	m	Open Channel 28.15(폭)× 1련× 680(길이)	Box Culvert 4.7(폭)× 5.0(높이)× 3련	Box Culvert 4.7(폭)× 5.2(높이)× 3련
Seal Well 및 Weir 정부 표고	El.m	+2.8	+4.0	+2.0
조차	평균	m	1.8	4.6
	최대	m	4.3	9.7
설계고조위	El.m	+1.585	+3.93	+2.358

혼합식을 포함하여 총 5개 기본안 수립하였으며, 댐식은 출력은 약 3,000 kW로 제일 크나 공사비가 과다하여 경제성이 불리하였으며, 수로식은 지형 및 조위 조건상 적용이 어려웠고, 흐름식은 발전량은 크지 않지만 경제성 높아 배수로에 흐름식 수차를 설치하는 제2안을 최적으로 선정하였다.

### 5. 기존 발전소에의 영향 분석

온배수를 이용한 수력 개발시에는 기존 발전소의 배수로를 변경하여 이용하는 것으로 기존 발전소에 미치는 영향을 최소화하는 것이 중요하다. 삼천포화력에 댐식 소수력발전소를 건설할 경우 기존 배수로의 수리특성 변화를 3차원 유동해석 프로그램인 FLOW-3D와 수면변화해석 프로그램인 HEC-RAS를 이용하여 해석하였다.

발전소의 온배수량 및 해수위의 변화에 따라 발전소 순환수 계통에 영향을 미치지 않는 적정 운전수위를 결정하였다.

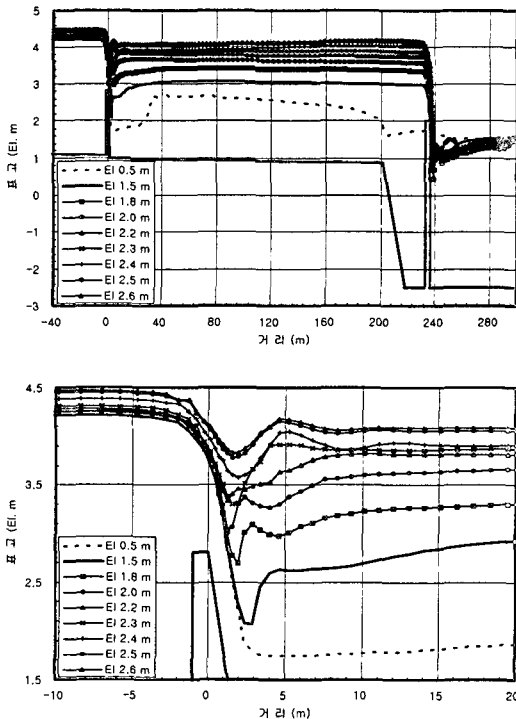


Fig. 5 수력발전소의 운전 수위에 따른 발전소 순환수 계통의 수위변화

### 6. 국내 개발 가능량 추정

국내 주요 기력발전소의 온배수에서 수력에너지 개발 가능량을 추정하였다. 국내 총설비용량은 약 62GW로서, 온배수가 아닌 일반수력 및 양수발전소의 소수력 개발 가능량은 제외하였고, 원자력, 내연및복합의 소수력 개발 가능량은 미미하여 제외하였다. 평균출력 계산시 효율은 80%, 가동률 85%, 대조기 평균조위 기준이며, 에너지 회수율은 댐식이 100%, 수로식 50%, 조류식 25%로 가정하였다. 상세검토 미수행 발전소는 수로식으로 가정하였다.

검토 결과, 서해안의 개수로 방식 방류 구조의 발전소가 가장 유리하였으며, 개발 가능량은 약 17 MW로 예상되었으며, 최대 포장수력은 약 46 MW, 평균출력은 약 23 MW이었다(Table 3).

### 7. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 국내외에 아직 적용 실적이 없는 화력발전소의 해수방류수를 이용한 수력발전시스템의 타당성을 평가하여 기술적 가능성 및 시공성, 경제성을 확인하였다.

현재, 본 연구에서 타당성을 밝힘으로서 삼천포, 태안, 하동, 당진화력에 대하여 온배수를 이용한 소수력발전시스템의 설치를 추진 중에 있다.

### 참고문헌

- (1) 電力土木技術協會(1995). 火力·原子力發電所 土木構造物의 設計.
- (2) 동력자원부(1991). 저낙차용 수차개발, 생산기술 연구원.
- (3) 산업자원부(1999). 소수력발전소의 경쟁력 강화에 의한 개발활성화 방안 연구, 한국에너지기술연구소.
- (4) 산업자원부(2004). 화력발전소의 해수방류수를 이용한 수력발전시스템 타당성 조사 연구.
- (5) 산업자원부(2005). 발전소 온배수를 이용한 1,500 kW급 수력발전 상용화기술 개발(중간보고서).
- (6) 한국해양연구소(1993). 조력발전 기술 현황 분석.

Table 3. 발전소 온배수를 이용한 수력에너지 개발 가능량

발전원	발전소명	설비 용량 (MW)	위치	온배수 (cms)	최대 조위차 (m)	최대 포장수력 (kW)	평균출력 (kW)	개발 가능성	개발 가능비율	개발가능 출력(kW)	발전 방식	비고
석탄화력	영동#1,2	325	동해	16.3	0.39	31.1	15.3	x	0.00	-		
	삼천포#1-6	3,240	남해	162.0	3.19	2,532.2	1,247.5	O	2.40	2,994.1	댐식	개발중
	서천#1,2	400	서해	20.0	7.11	696.5	343.1	O	0.50	171.6		
	보령#1-6	3,000	서해	150.0	7.85	5,771.2	2,843.2	O	0.25	710.8	조류식	
	군산	66	서해	3.3	6.87	111.2	54.8	O	0.50	27.4		
	태안#1-6	3,000	서해	150.0	6.70	4,924.5	2,426.1	O	0.50	1,213.1	수로식	개발중
	하동#1-6	3,000	남해	150.0	4.01	2,948.8	1,452.8	O	1.00	1,452.8	조류식+댐식	개발예정
	동해#1,2	400	동해	20.0	0.39	38.2	18.8	x	0.00	-		
	호남#1,2	500	남해	25.0	3.75	459.9	226.6	O	0.50	113.3		
	당진#1-4	2,000	서해	100.0	10.27	5,032.3	2,479.2	O	0.50	1,239.6	수로식	개발중
영흥#1,2	1,600	서해	72.0	10.28	3,626.8	1,786.8	O	0.50	893.4	수로식		
소 계	17,531		868.6		26,172.6	12,894.2			8,815.9			
유류 및 가스화력	여수#1,2	500	남해	25.0	0.39	47.8	23.5	x	0.00	-		
	제주#1-3	160	남해	8.0	2.83	111.1	54.7	O	0.50	54.7		
	서울#4-5	250	서해	12.5	-	-	-	x	0.00	-		
	인천#1-4	1,150	서해	57.5	9.69	2,731.3	1,345.6	O	0.50	1,345.6		
	평택#1-4	1,400	서해	70.0	9.39	3,219.4	1,586.1	O	0.50	1,586.1		
	영남#1,2	400	동해	20.0	0.68	66.6	32.8	x	0.00	-		
	남제주#1,2	20	남해	1.0	3.20	15.7	7.7	O	0.50	7.7		
	울산#1-6	1,200	동해	60.0	0.68	199.9	98.5	x	0.00	-		
소 계	5,080		254.0		6,391.8	3,149.0			2,994.1			
석탄화력 *건설예정	보령7,8	1,000	서해	50.0	7.85	1,923.7	947.7	O	1.00	947.7	댐식	개발예정
	태안7,8	1,000	서해	50.0	6.70	1,641.5	808.7	O	1.00	808.7	댐식	개발예정
	하동7,8	1,000	남해	50.0	4.01	982.9	484.3	O	1.00	484.3	댐식	개발예정
	당진5-8	2,000	서해	100.0	10.27	5,032.3	2,479.2	O	1.00	2,479.2	댐식	개발예정
	영흥3,4	1,600	서해	72.0	10.28	3,626.8	1,786.8	O	0.50	893.4	수로식	개발예정
소 계	6,600		322.0		13,207.3	6,506.7			5,613.3			
총 계	29,211		1,444.6		45,771.7	22,549.9			17,423.3			