

수도관로를 이용하는 소수력의 최적 설계 방안

이형묵\*,김기원\*,변일환\*, 홍정조\*,이은웅\*\*  
한국수자원공사\*,충남대학교\*\*

The Optimum Design Plan for Small Hydropower Plant Using of Waterpipe

Lee, Hyoung-Mook\*, kim. ki-won\*, Byun il-hwan\*, Hong Jeong Jo\*, Lee Eun-Woong\*\*  
Korea Water Resource Corporation\*, Chungnam University\*\*

**Abstract** - Many domestic organizations are pushing ahead with small hydropower business to develop a renewable energy. In addition each organization gradually spreads small hydropower business with searching the best site for it. And KOWACO (Korea Waters Resources Corporation) answers a purpose of the government policy to spread the wide use of a renewable energy. This study explains the researching programs for the best development sites for small hydropower generation with using water pipes managed and controlled by KOWACO.

그리고 소수력에 이용할수 있는 낙차는 다음 표2와 같다.

표2. 수차발전기 유효낙차

종 류	낙 차	비 고
총 낙 차	36.90m	
최대유효낙차	32.15m	
정격유효낙차	26.75m	
최소유효낙차	15.08m	

사용수량은 운문댐 수도관로의 월평균 용수공급량을 감안한 결과 3.2 m<sup>3</sup>/s를 결정하였으며, 이에 발전시설용량은 식(1)으로 산출하여 700kW이다.

$$P_G = 9.8HQ\eta_g(\text{kW}) \text{----- (1)}$$

$$9.8 \times 3.2 \text{ m}^3/\text{s} \times 26.75[\text{m}] \times 0.84 = 706.3\text{kW} \approx 700\text{kW}$$

1. 서 론

신재생 에너지를 개발하고 보급하기 위한 많은 연구가 국내외에서 이루어지고 있고, 우리나라에서는 국책사업으로 권장되고 있다.

본 연구는 기존의 운문댐에 설치되어 있는 도수터널의 수도관로상 잉여압력을 이용하는 소수력발전소를 세우기 위한 최적 설계이다. 수도관로에 설치하는 소수력 발전기의 운영시 내·외부적 사고로 비상정지 하게되면 생활용수와 공업용수의 공급중단등 문제가 발생하게 된다. 그러므로, 수도관로를 이용하는 소수력 개발에서는 수도관로의 안정성이 중요하다. 그래서 소수력개발시 수차발전기의 보호와 수도관로를 이용할수 있는 최적 설계방안을 마련하여 청정 에너지를 활용한 무공해 전원을 개발하는데 자료를 얻고자 한다.

2. 운문댐 수도관로 소수력개발

2.1 운문댐 용수공급계통과 소수력

경북 청도군 운문면 곡관리 위치한 운문댐 제원은 수위와 관로는 그림1, 표1과 같다

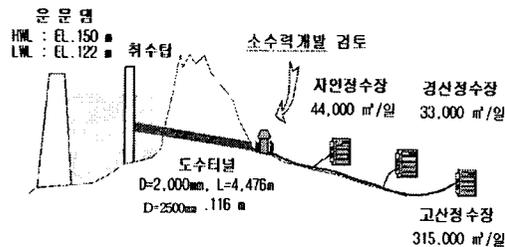


그림1 소수력 개발 예정지 개요도  
표1. 운문댐 수위

구 분	수 위	비 고
상시만수위	EL. 150.00m	
정격 수위	EL. 144.60m	
발전저수위	EL. 132.93m	
저 수 위	EL. 122.00m	
방 수 위	EL. 113.10m	

2.2 소수력 발전기 설치계획

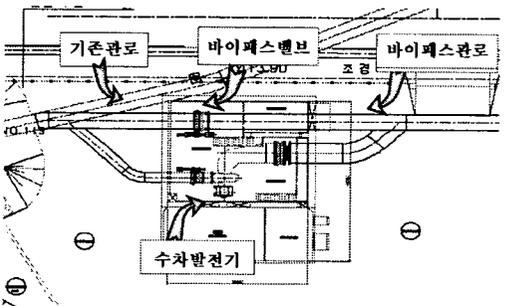


그림 2 소수력 수차발전기 개요도

2.2.1 수차발전기

수차는 유량 및 낙차조건에 따라 표준화된 수차모델, 제작회사 등의 선정도표를 비교 검토한 결과 25m의 중낙차, 소용량 수차에 적합한 횡축 Francis 수차로 선정하였으며 발전기용량은 식(1)에서 정격출력이 700kW(최대출력:850kW)로 선정하였다. 수차의 린너는 고정형이며 가이드베인의 개도를 조절하여 유량을 제어함으로써 수차출력을 제어토록 하였다. 16극 발전기용 수차의 정격 속도는 450rpm이며, 최대 유효낙차에서 발전기가 무부하 상태로 가이드베인이 모두 열렸을 때에도 모든 회전부가 2분 동안 안전하게 견디도록 설계하였다. 린너는 최대낙차, 최대부하에서 급단시에도 수압 및 원심력에 충분히 견딜 수 있도록 충분한 강도를 갖도록 수차를 설계하였다.

2.2.2 입구밸브 및 관로설비

입구밸브는 유량 32 m<sup>3</sup>/s를 충분히 유입해야 하는 각각 내경 1,200mm의 카운터 웨이트를 갖춘 유압자동식 플랜지형 버터플라이 밸브로, 최대낙차에서 어떠한 유량에 대해서도 폐쇄할 수 있도록 하며, 입구밸브의 폐쇄는 카운터웨이트의 자중 및 유압실린더에 의해서 가능토록 한다. 입구밸브의 현장조작반은 수차발전기의 기동 및 정지시에 자동적으로 개폐될 수 있도록 기동, 정지 및 제어설비를

내장하고 현장/원방 절환스위치를 설치함으로써, 소수력 발전소의 제어실 및 통신 채널을 통한 운문댐관리단 제어실에서도 조작이 가능토록 하였다.

또한 바이패스관을 설치하고 가운데웨이터를 갖춘 유압 작동시 프렌지형 버터플라이밸브를 설치하여 수차발전기 가동시 입구변이 열리고 닫히고 바이패스밸브간 연계 작동하도록 설계하였다.

### 3. 최적 설계 방안

#### 3.1 수차발전기의 설계시 착안 사항

수차 및 발전기의 회전체 자체가 지니고 있는 고유GD<sup>2</sup>가 수차 및 발전기에 따라 수압상승율(δP), 속도상승율(Δn) 및 수차 가이드베인 폐쇄시간 등에 의해 요구되는 GD<sup>2</sup>이 필요하므로 수차발전기는 고유GD<sup>2</sup>와 소요GD<sup>2</sup>의 차이만큼 증가되는 중량을 추가하여야 한다.

그러나 소수력 발전소에서 δP, Δn 및 가이드베인 폐쇄시간(T<sub>s</sub>)의 결정에 따라서 수차 발전기 중량 증가에 따른 설비비 상승, 또는 수압관로 및 토목 공사비의 상승과 밀접한 관계가 있으므로 위의 인자를 결정할 때는 경제적으로 최적점을 찾아야 한다.

따라서 경제적인 최적점은 고유GD<sup>2</sup>와 소요GD<sup>2</sup>의 값이 같은 경우이며 상기의 계산에서 보는바와 같이 고유GD<sup>2</sup>와 소요GD<sup>2</sup>의 값이 약간 다르나 제작사별로 다소의 차이가 있으므로 본 소수력 발전소에서는 소요GD<sup>2</sup>값으로 기준 한다.

운문 2소수력발전소는 운문댐에서 급호강계통광역상수도 정수장에 공급하는 관로에 설치된다. 따라서 발전기 가동 중에 정전등 전기적사고나 수차발전기 고장등으로 수로를 비상 급폐쇄 하게되면 수격현상에 의한 수압상승과 하강이 주기적으로 반복하여 관로 및 수차에 무리한 충격이 가해질 것으로 예상된다.

발전기의 부하가 갑자기 차단되었을 때 수차에 유입되는 수압도 이에 따라 급격히 감소되는 것이 바람직하지만 이 경우 반동수차에서는 대응이 어렵다. 그래서 반동수차의 경우 가이드베인을 급속 폐쇄하면 수압관로의 수격작용에 의해 수압이 급상승하게 되므로 이것을 피하기 위해 몇초 후에 가이드베인을 폐쇄한다. 이렇게 몇초 늦게 가이드베인을 폐쇄하는 시간에 수차에 유입되는 과도한 물에너지를 수차 및 발전기의 회전부를 가속시켜 속도상승을 일으킨다. 속도상승을 적게 하기 위해서는 회전부의 관성모멘트(GD<sup>2</sup>)를 크게 하거나 가이드 베인의 폐쇄시간을 짧게 하여야 한다.

회전부의 관성모멘트(GD<sup>2</sup>)는 발전기의 관성모멘트를 결정하므로 경제적인 설계치 이상으로 할 경우 제품의 중량이 증가되어 가격상승의 요인이 된다. 그래서 폐쇄시간을 짧게 하면 수압상승이 커져서 수압관, 수차의 런너 두께를 크게 하여 강도를 크게 하여야 한다. 수압상승도 경제적인 문제와 기술상의 한계가 있으며 폐쇄 시간(T<sub>s</sub>), 속도의 상승(Δn), 수압의 상승(δP) 및 관성모멘트(GD<sup>2</sup>)와의 관계는 불가분의 관계가 있다.

#### 3.2 무구속속도(N<sub>r</sub>), 수압상승(δP), 허용수두(H<sub>a</sub>), 가이드베인 폐쇄시간(T<sub>s</sub>), 관성모멘트(GD<sup>2</sup>) 값 계산

□ 수차발전기 특성에서 무구속 속도(N<sub>r</sub>)

- 수차 비속도 N<sub>s</sub>는 식(2)에 의해 20212 (m·kW) 이며

$$N_s = N \times \frac{P^{0.5}}{H^{1.25}} \text{-----}(2)$$

- 회전속도 N은 식(3)에 의해 430[rpm] 된다.

$$N = \frac{N_s \times H^{5/4}}{P^{1/2}} \text{-----}(3)$$

- 무구속 속도 N<sub>r</sub>은 규정 의해 844.14(rpm)

U.S.B.R의 규정 식(4)에 의하면[참고문헌:미개척국]

$$N_r = 0.63(1.158025 \times N_s)^{0.2} \times N \text{-----}(4)$$

Water Power & Dam Construction 규정 식(5)에 의하면

822.15(rpm)이 된다[참고문헌:미국 댐학회지]

$$N_r = (1.52 + 1.52 \times 10^{-3} \times N_s) \times N \text{-----}(5)$$

□ 수압상승 수두 S

수차발전기 운전시 가이드베인 폐쇄시간(T)별 수압상승S는 식(6)이고 Allevis 식에 의해 계산한다.

$$S = \frac{\sum L \times V}{g \times H_r \times T} \text{-----}(6)$$

여기서 수압상승율은

$$\Delta P = \frac{S}{2} (S \pm \sqrt{S^2 + 4}) = \frac{\Delta H}{H_r}$$

L : 수압관로 길이 (m)

V : 관로내 평균 유속 m/sec

g : 중력 가속도(9.8m/s<sup>2</sup>)

H<sub>r</sub> : 기준낙차(m)

ΔH : 수압상승치(m)

P<sub>max</sub> : 최대수압 (P<sub>st</sub> + ΔH) = (35 + 73.43)

H<sub>st</sub> : 최대 정수압 = F.W.L - 방수로 정지수위 = EL. 151.00 - EL. 113.10 = 38.9m

P<sub>st</sub> : 수차 중심에서 정수압

= F.W.L - 수차 중심표고

= EL. 151.00 - EL. 116.00 = 35.0m

$$\Delta P = \frac{P_{max} - P_{st}}{H_{st}} \text{-----} \frac{\Delta H}{H_{st}}$$

가이드베인 폐쇄시간(T<sub>s</sub>) 8초일 경우 관로반경 2.5m의 터널 구간을 통과하는 사용수량 3.2m<sup>3</sup>/s의 유속 v는

V(=  $\frac{Q}{A}$ )은 0.65m/sec이며 관로길이 L=4.476(m)에서 L×V은 2.900(m<sup>2</sup>/sec)이다.

그리고 터널출구 - 발전소 구간의 관로반경 2.0m에서의 유속 V(=  $\frac{Q}{A}$ )는 1.01m/sec이고 관로길이 20m L×V는 20.2(m<sup>2</sup>/sec)이 흐른다.

단, 16m 발전소 유입관로의 관로반경 1.2m에서의 유속 v은 2.82m/sec이고 L×V은 45.1(m<sup>2</sup>/sec)이다.

그리고 전관로의 ΣLV은 = 2,974.7(m<sup>2</sup>/sec)이다.

수압상승 S 값은 식(6)에서 1.418이고

$$\Delta P(\text{수압상승율}) = \frac{S}{2} (S + \sqrt{S^2 + 4}) = \frac{\Delta H}{H_r}$$

ΔH(수압상승치)는 식(7)에서 73.43m 되어

설계수두는 = 정낙차 + 수압상승치 = 100.18m

□ 허용수두(H<sub>a</sub>)

허용수두 H<sub>a</sub>는

관내경 D가 1,200mm일 경우 185.25(m) 가된다.

$$H_a = \frac{20 \times \delta_a + \eta \times (t - \epsilon)}{D} \text{-----}(8)$$

δ<sub>a</sub> : 허용응력 : 1300kgf/cm<sup>2</sup>

η : 용접률 (90%)

t : 관두께 (mm)

ε : 부식허용두께 (1.5mm)

D : 관 내경

관내경 D가 2000, 2500mm일때의 허용수두는 표3과 같이 계산된다.

표 3. 수압상승 및 허용수두 결과값

직경 (mm)	정격수두 Hr(m)	수압상승 ΔH(m)	설계수두 H <sub>a</sub> (m)	두께 (mm)	허용수두 H <sub>a</sub> (m)	비고
1,200	36.75	73.43	100.18	11	185.25	OK
2,000				15	157.95	OK
2,500				18	154.44	OK

□ 수차발전기 관성모멘트( $GD^2$ )

일반적으로 대용량 발전소의 경우 수차 가이드베인 폐쇄시간( $T_s$ )은 3초~6초 사이에서 결정하나 소용량 발전기에서는 좀 짧은 편이다. 소용량에서는 무구속속도( $N_R$ ) 연속시간 2분을 고려하여 가이드베인 폐쇄시간은 30초~40초 사이에서 수압상승율을 고려하여 결정한다. 또한 속도상승률( $\Delta n$ )은 동기 발전기의 경우 연계 계통 운용의 안정도에도 밀접한 영향이 있으므로 대개 30%~40% (프랑스 수차 경우)이나 소수력에서는 정격속도에 2배에 이르러도 수차발전기에 무리가 없이 운영되도록 제작하고 있다. 본 운문(II) 소수력 발전소에서는 표준화, 간소화에 의해 경제성을 고려한 수차-발전기는 고유  $GD^2$ (식9 :참고문헌 전기공학핸드북(1967)) 식10:참고문헌 USBR(1976))으로 하는 안내변 폐쇄시간, 속도 상승률은 최대 무구속 속도에 상당한 값 이하로 하여 수압 상승률인 수격을 고려하였다.

$$GD_0^2 = \frac{132 \cdot kVA^{\frac{4}{3}}}{N^{2.15}} \text{ (ton-m}^2\text{)} \text{-----(9)}$$

$$GD_0^2 = \frac{0.6 \times (MVA)^{1.25} \times 10^6}{N^{1.98}} \text{ (ton-m}^2\text{)} \text{-----(10)}$$

kVA : 발전기 출력(피상전력)

N : 회전수

식(9)에 의해 고유  $GD_0^2$ 을 구하면 3.079 ton-m<sup>2</sup> 이고 식(10)에 의해 구하면 3.91 ton-m<sup>2</sup>되나 제작사, 재질 및 제작 방법에 따라 다소 차이가 있을 수 있다.

그러면 수차-발전기가 요구하는 실제 소요 $GD^2$ 값을 정격낙차에서 계산하면 표4와 같다.

1) 계산에 의한 값

표 4. Calculation data 삼

구 분	data	비 고
정격유효낙차 $H_R$	26.75m	
정격사용수량 $Q_1$	3.20m <sup>3</sup> /sec	
수차출력 $P_1$	745kW	
회전수N	450 rpm	
속도 변동율 $\Delta n$	80%	
최대 수압 $P_{max}$	286m + 734m = 1020m	

2) ZLV : 2,974.72m<sup>2</sup>/sec(앞의 속도합계 참조)

3) 수격에 의한 수압상승

저수지 수위 : EL. 144.600m

수차 중심 표고 : EL. 116.000m

방수로 수위 : EL. 113.100m

수차중심에서의 정수압,  $P_s$ : 저수지 수위 - 수차중심 표고  
= 144.60 - 116.00 = 28.60m

최대수압,  $P_{max}$  : 102.03m

수격에 의한 수압상승:  $\Delta H$ :  $P_{max} - P_s = 73.43m$

수격에 의한 수압상승율 $\Delta P$ (참고문헌: 수차발전기설계기준)

$$\Delta P \left( \frac{\Delta H}{H_{max}} \right) \text{은 } 274.5\% \text{이다.}$$

4) 안내변 폐쇄시간 ( $T_s'$ ) 산정(참고문헌: 수차발전기설계기준)

$$T_s' = \frac{K(\sum LV')}{\tau \cdot H_R} \text{-----(11)}$$

$$\tau' = \frac{g \cdot \delta_H}{\sqrt{1 + \delta_H}} \text{-----(12)}$$

$\tau'$  은 14.6초이고  $T_s'$  은 7.00초이다.

5)  $GD^2$  의 계산

수차요구  $GD^2$  와 발전기고유  $GD_0^2$ 을 식(13) [참고문헌:수차발전기설계기준]에 의거 4.49(ton-m<sup>2</sup>)이다.

여기서

$$GD^2 = \frac{364P(1 + \frac{\delta_P'}{2})^{1.5} (\frac{T_s'}{2} + t_d)(N_R - \Delta n^2)K}{\Delta n \cdot N^2 \cdot N_R} \text{-----(13)}$$

P : 수차출력

$T_s'$  : 안내변 폐쇄시간

$\Delta n$ : 속도상승률(∴ 통상 80% 이내)

$\delta_P$  : 수압상승률

k : 수차형태에 따른 비정수(프랑스식 0.8)

$t_d$  : 가이드베인 데드타임 : 0.2sec

$N_R$  : 속도변동율( $(N_R - N)/N$ ,  $N_R = 0.87$ )

수차해석을 이용한 압력변화(폐쇄시간 14초)사이의 EPANET 모델시험용 장비를 이용하여 구한 결과 값은 그림3과 같다.

본 모델시험에서 14초에 수차발전기 입구변을 폐쇄시 전단압력이 당초 수두 150m에서 180m상승하는 현상을 보여주고 있으며 수차중심에서의 정수압은 입구밸브의 폐쇄로 떨어지기 시작하며 후단 관로압력도 용수공급이 되지 않아 수차설치 위치에서 압력이 급격히 떨어지는 현상을 보이고 있다.

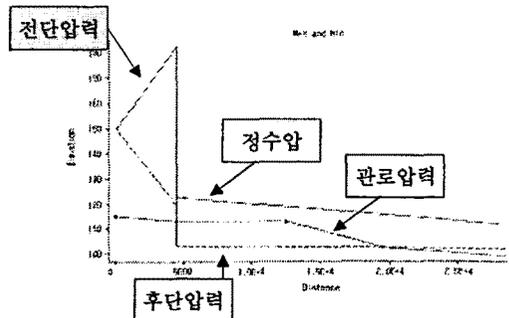


그림 3 EPANET 모델시험장비를 이용한 결과

4. 결 론

운문II소수력발전소의 수차발전기가 설치되기 위한 최적조건은 수차발전기 가이드베인 폐쇄속도를 7초로 하면 수압관로 및 수차발전기에는 큰 영향을 미치지 않는다.

또한 정전으로 인한 부하 차단이나 비상 정지시 가이드베인 폐쇄속도를 7초로 하면 수차발전기 관성모멘트( $GD^2$ )는 4.49(ton-m<sup>2</sup>)와 고유 관성모멘트( $GD_0^2$ )는 3.91(ton-m<sup>2</sup>)로 근접한 값을 나타냈고 수압상승 73.4m이내가 되어 관로의 허용수두내에서 운영되는 결과를 나타냈다.

그리고 정전이나 발전기 비상정지시 가이드베인 폐쇄속도를 7초 이내로 하면 되지만 안정적인 용수공급을 위해 변전설비의 차단기의 개폐신호를 바이패스관로의 밸브에 개폐명령을 주므로써 생활용수공급 및 발전기의 안정적인 운영에도 도움을 줄 수 있을 것이며 수차발전기의 수압상승, 관성모멘트도 최소화 시킬 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1]"소수력발전 타당성 보고서" 한국수자원공사 2002.7
- [2]"USBR" :U.S. Department of the Interior | Bureau of ReclamationContact : 미개척국(1976)
- [3]"Water Power & Dam Construction" 미국 댐건설 잡지
- [4]"수차발전설비설계기준" 산업기지개발공사 1985.10