

## 50kW급 횡류수차 내 공기 유입이 성능에 미치는 영향

김준호<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2014년 4월 1일, 원고수정일 : 2014년 4월 14일, 심사완료일 : 2014년 5월 14일)

### Effect of air inflow on the performance of a 50kW-class cross-flow turbine

Jun-Ho Kim<sup>†</sup>

**요약:** 최근 소수력 발전은 화석에너지의 고갈 및 환경 문제를 해결할 수 있는 대안으로 우리나라 뿐만 아니라 세계 각국이 심혈을 기울이고 있다. 본 연구에서는 소수력 발전의 최적화를 위해 입지 조건 및 특성을 고려하여 저·중낙차 및 유량 변동이 심한 지역에 적합하도록 2개의 가이드 베인을 갖는 횡류수차를 개발하여 실증시험을 실시하였다. 또한 CFD를 이용한 선행 연구 결과를 바탕으로 하여 수차 입구 단의 낙차를 일정하게 유지한 상태에서 공기 유입 및 밸브 위치에 따른 성능 변화를 검증하였다. 그 결과 공기 유입이 재순환 유동과 러너를 통과한 유체가 주축에 충돌하면서 발생하는 수력학적 손실을 최소화시킬 수 있어 수차의 성능과 효율 개선에 효과적임을 검증할 수 있었다.

**주제어:** 횡류수차, 소수력, 성능, 공기 유입

**Abstract:** Small hydropower has been considered as a solution to resolve the problem of exhaustion of fossil fuel and industrial pollution. In this study, we developed and tested a Cross-Flow Turbine with two guide vanes to optimize the small hydropower for the site condition with large fluctuation of head and flow rate. Furthermore, in the condition of constant inlet head, CFD analysis was carried out to analyze the effect of air suction and valve position on the performance characteristics. The results showed that the air suction can minimize the hydraulic loss caused by the Recirculation flow in the runner passage and flow impact on main shaft so that it can increase the turbine efficiency and output power.

**Keywords:** Cross-flow Turbine, Small Hydropower, Performance, Air Inflow

## 1. 서론

전 세계적으로 화석연료를 사용함으로써 발생하는 이산화탄소 등의 온실 가스의 증가로 인해, 지구 온난화 현상과 산성비와 같은 지구 환경 변화를 초래하게 되었고, 지속적인 유전개발로 인해 화석 연료의 고갈이라는 심각한 문제에 직면하고 있다 [1]. 이러한 문제점들에 대한 대책의 일환으로서 현재 주목받고 있는 것이 재생 가능한 자연에너지이다. 신·재생에너지 중에서 수력발전은 높은 위치에 있는 하천이나 저수지 물을 낙차에 의한 위치

에너지를 이용하여 수차의 회전력을 발생시키고 이 회전력으로 발전기를 돌려 전기에너지로 변환시키는 방식이다. 특히, 수력 발전 중 국내 대부분의 지형처럼 계절별 유량 변동이 심하고 물의 낙차가 작은 곳에서도 효율적인 발전이 가능한 소수력 발전용 횡류수차(Cross-Flow Turbine)가 유리할 것으로 판단된다. 또한, 횡류수차는 비교적 구조가 간단하여 제작 및 유지보수의 편의성이 높아 향후 대체에너지 개발에 폭넓게 응용될 수 있기 때문에 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.

<sup>†</sup> Corresponding Author: R&D 1 Team, R&D Center, Hyosung Goodsprings Inc., 303, Gongdan-ro, Sungsan-gu, Changwon, 641-290, Korea, E-mail: hec-kjh@hyosung.com, Tel: 055-279-7808

횡류수차의 성능향상을 위한 이전의 연구로는 최 등에 의해 수차 측면 내부로의 공기유입이 성능에 미치는 영향에 대해서 수치해석적 연구가 수행되었고, 극저비속도 영역에서 적용 가능한 마이크로 횡류수차에 대해서 가이드 베인의 각도에 따른 수차성능 및 내부유동이 검토되었다[2]-[4].

또한, Fukutomi 등은 횡류수차의 성능향상을 위해 각 요소별 최적형상에 대한 검토 및 노즐형상에 따른 성능변화에 대해서 실험 및 수치해석을 통한 연구를 수행하였다[5][6].

본 연구에서는 횡류수차 내부로의 공기 유입이 수차 성능에 미치는 영향에 대해서 실물 크기의 시제품을 제작하여 실증 시험을 통해 성능변화에 미치는 영향에 대한 기초적인 자료 제공을 목적으로 한다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 50kW급 수차 설계 및 제작

실증을 위한 적지 조사를 통해 저유량에 유리하고 유지보수가 비교적 용이한 횡축형 횡류수차를 선정하였다. 수차의 러너 치수는 낙차가 0.5~2.0m의 범위를 기준으로 설계되었으며, 외경  $D_1 = 450\text{mm}$ , 내경  $D_2 = 300\text{mm}$ 로 결정하였다. 실험에 사용한 러너 및 실물 수차의 형상을 Figure 1과 2에 보이고 있고, 구조적 안전성을 확보하기 위해 축이 러너를 관통하여 측벽에 설치된 베어링으로 지지되는 형태이다. 러너의 길은 30매이고 원주방향으로부터 측정한 것 출구각은  $87^\circ$ , 입구각은  $30^\circ$ 이다. 수차의 회전수를 결정하기 위해 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고, 회전수  $N=350\text{rpm}$ 으로 계산되었다.

$$N = K_1 \times \frac{\sqrt{H}}{D_1} \quad (1)$$

여기서, 상수  $K_1 = \frac{60 \times k_{u1} \times \sqrt{H}}{\pi}$  이고,  $k_{u1}$ 은 원주방향 속도 성분으로서 약 0.5정도로 설정하였다. 종횡비  $\alpha$ 를 이용하여 러너의 폭을 결정하기 위해 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \left( \frac{N_s}{K} \right)^2 = \frac{B}{D_1} \quad (2)$$

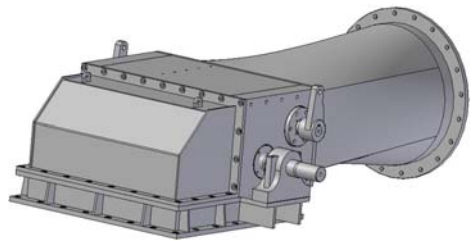
비속도  $N_s$ 와 비례상수  $K$ 는 각각 식 (3)과 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (3)$$

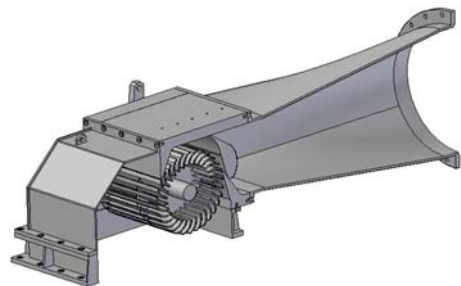
$$K = \frac{60k_{u1}\sqrt{2g}}{\pi} \times \sqrt{\frac{\sqrt{2g}}{6} \times 9.8 \times \eta} \quad (4)$$

비속도  $N_s=100$ 이고 비례 상수  $K$ 는 약 95로서 러너폭은  $B=500\text{mm}$ 로 결정하였다.

횡류수차의 경우 일반적으로 가이드 베인을 1:2로 분할하여 유량의 변화에 따라 1/3유량용 가이드 베인 단독, 2/3유량용 가이드 베인 단독, 또는 동시에 제어하면서 하천이나 저수지의 계절별 유량 변동에 따라 대응 운전이 가능하도록 한다.



(a) Shape of cross-flow turbine



(b) Sectional view of cross-flow turbine

Figure 1: 3D modeling of 50kW-Class cross-flow turbine



(a) Runner



(b) Cross-flow turbine

Figure 2: Assembly of all component

이 경우 제어가 복잡해지는 단점이 있지만, 최고 효율점에서 운전이 가능하다. Figure 3은 횡류수차가 가이드 베인을 2매 사용 하였을 때의 효율 특성을 나타내고 있고, Francis와 같이 일반적인 수차에 비해 넓은 유량대에서 고효율 운전이 가능하다.

Figure 4는 횡류수차의 내부 유로와 공기 흡입 밸브 위치를 나타내고 있다. 공기 흡입 밸브는 수차의 전면 케이스 상부에 장착하여 밸브 개폐를 통해 공기 주입

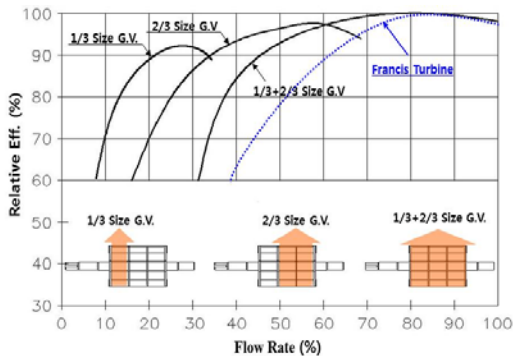


Figure 3: Efficiency characteristics of cross-flow turbine by guide vane operation

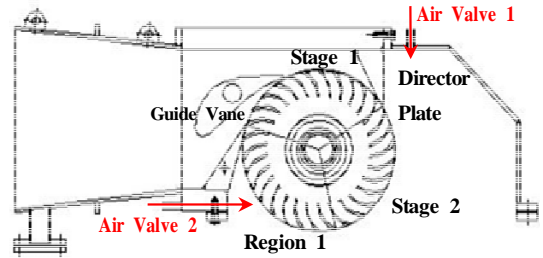


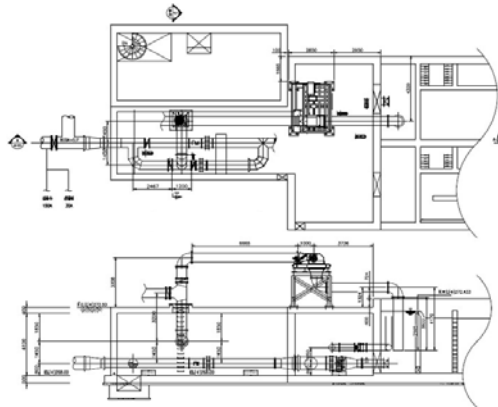
Figure 4: Division of internal flow passage of cross-flow turbine and position of air valve

및 차단을 할 수 있도록 했다. 설명의 용의성을 위해 러너를 노즐부터 상부 가름판까지를 Stage 1, 상부 가름판부터 러너 출구까지를 Stage 2, 나머지 부분을 Region1으로 나누어 3개 부분으로 구분하였다.

## 2.2 실험 장치 및 방법

Figure 5에는 본 연구를 위한 실증지점의 횡류수차의 개략도를 보이고 있고 횡류수차 내 공기 흡입의 유무가 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 실증지점에 50kW급 횡류수차 발전 시스템을 설치된 상태를 나타내고 있다. 횡류수차를 이용한 소수력 발전시스템의 위치는 동화댐(전북 장수 소재)에서 동화정수장의 착수정까지 유입되는 수도관로 상에 횡류수차를 설치하여 자연스럽게 형성된 물의 에너지를 이용하여 잉여 에너지를 수차가 회수하는 형식을 취하고 있다. 그러나 실증지점인 동화정수장의 시설 허용 유량에 제약이 있어 실험 시 유량을 제어해야만 하고 이로 인해 설계 유량점까지는 성능 특성 실험을 할 수 없었다. 허용 유량 내 실험을 위해 기 설치되어 있는 밸브와 수차 전단의 밸브를 추가 설치하여 유량 및 압력을 제어함으로써 정수장의 운영여건을 맞춰 실시하였다.

횡류수차 발전시스템에 유량을 공급하기 위해 정수장의 착수정 전단부에 위치한 지하층 By-pass 배관을 통해서 Tee 분기관을 이용해 지상으로 연결시키고 수차발전기로 배관 연결을 한 후 착수정으로 다시 유입시키는 구조를 취하였다. 실험을 위해 수차, 증속기 및 발전기를 공통 베드에 설치하였고, 수차의 유효낙차는 수차내 가이드 베인을 조



(a) Ground plan of test field



(b) Installation image-A (c) Installation image-B

Figure 5: Experimental apparatus for verification test

절하여 수차의 입구 단에서 일정한 압력 값을 유지할 수 있도록 하였다. 작동유체는 실증지점의 방수조로부터 도수관을 통해 흘러나온 물을 이용하였고 수차 전단의 밸브의 개방도에 의해 유량을 조절하였다.

횡류수차의 공기 유입에 따른 성능을 관찰하기 위해 케이싱 상단(Valve 1) 및 흡입구 하단(Valve 2)에 공기 흡입 밸브를 각각 1개씩 설치하여 밸브 개방시 케이싱 내부와 외부 압력차에 의해 자연 유입되도록 하였다.

수차에서 발생된 동력은 발전기와 연결된 부하기의 부하를 조절하여 회전수를 제어하고, 수차 흡토출구의 압력을 측정하였다. 공급되는 유량에 따라 서보 모터를 장착한 가이드 베인을 이용하여 실시하였고 각각의 가이드 베인은 2개의 서보 모터를 이용해 별도로 제어할 수 있도록 하였다.

실험 유량에 따라 적용되는 가이드 베인의 실험

Table 1: Test conditions for flow-rate using a guide vane

Inlet Head (m)	Flow Range (m3/s)	Guide Vain
15	0.09 ~ 0.2	1/3 size (2/3 size closed)
	0.18 ~ 0.4	2/3 size (1/3 size closed)
	0.24 ~ 0.6	1/3+2/3 size

조건은 Table 1과 같다. 저유량 대역에서 2/3 size의 가이드 베인을 완전 폐쇄하여 1/3 size 가이드 베인의 개도를 이용하여 실험을 실시하였고, 중유량에서는 1/3 size 가이드 베인을 폐쇄한 뒤 동일한 방법으로 2/3 size 가이드 베인의 개도를 조정하여 실험을 실시하였다. 또한 대유량 영역에서는 두 개의 가이드 베인을 동시에 같은 각도로 조작하며 개도를 조정해 실험을 실시하였다. 가이드 베인의 역할은 수차 입구단의 유량과 압력을 제어하면서 최대한 일정하게 유지시켜주는 것이나 각도 변화에 따라 유체의 흐름이 상부벽으로 이동하여 충격에 의한 에너지 손실뿐만 아니라 운전 중 진동을 일으킬 수 있다. 따라서 가이드 베인은 최대한 각도 조절을 하지 않는 범위 내에서 운전하는 것이 좋다.

### 3. 결과 및 고찰

Figure 6는 본 연구에 적용한 50kW급 횡류수차의 공기유입 유무에 따른 성능특성을 비교하기 위해 가이드 베인 조정을 통해 각 유량대별로 효율 특성 결과를 보이고 있고, Figure 7은 그때의 출력 특성 결과를 나타내고 있다. 실험 유량대역은 실증지점의 제약으로 인해 설계유량의 약 25~80%범위(공기 유입이 없는 경우 약 90%)에서 실시하였고 저유량 대역에서 공기 유입이 되지 않을 경우 진동발생 및 계측값의 신뢰도 저하로 인해 실시하지 못했고, Valve 2를 이용한 공기 유입 실험의 경우 저유량 대역(약 40%미만)에서 안정적인 유량공급이 가능해 1/3 size 가이드 베인 실험을 추가로

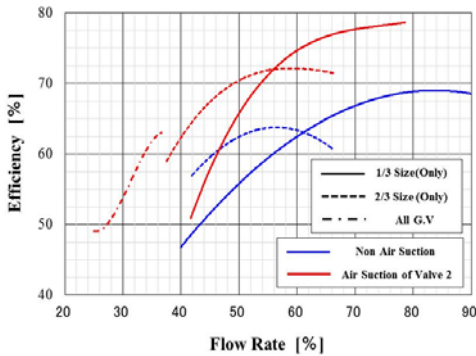


Figure 6: Comparison of efficiencies according to the air suction

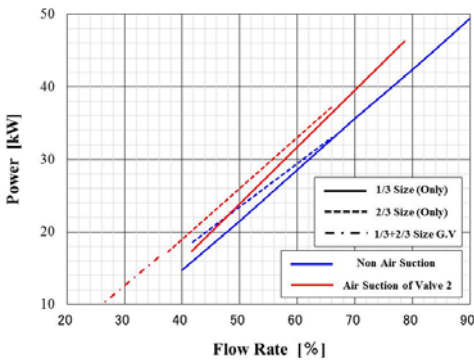


Figure 7: Comparison of power according to the air suction

실시할 수 있었다.

실험 결과를 비교하기 위하여 공기 유입 유무에 따른 실험 결과를 구분하여 나타내었고 Table 2에서 실험 결과를 비교하였다.

Table 2에서 보는 바와 같이 출력 및 효율은 수차 내 공기 흡입(Air Valve 2) 시 최대 약 12% 이상 더 높은 증가율을 나타냈고 저유량 대역에서도 안정적인 운전특성을 보였다. 하지만 전체 가이드 베인의 효율의 경우 실증지점의 유량 공급한계로 인하여 최고 효율점에서의 유량까지는 실험이 어려워 성능추세에 따라 예측하였다. 이러한 결과는 최등[2]의 CFD 해석을 통해 예측한 바와 같이 수차 내 공기 흡입에 의해 수차 내부 유동의 변화에 기인한다는 것을 입증한다. 이는 공기가 흡입되지 않은 조건일 경우 수차 흡입 단에서 유입되는 유체

가 Figure 4에서 보이는 Stage 1과 Region 1으로 흐르면서 주축과 충돌하게 되고 이로 인해 에너지 손실이 발생하면서 잔여 에너지를 2차 적으로 회수할 수 있는 Stage 2의 역할이 작아지게 된다. 그러나 공기 흡입 조건일 경우 러너 중심의 압력이 증가함으로써 유체는 Stage 1으로 대부분 흐르게 되고 주축과의 충돌에 의한 손실을 최소화함으로써 Stage 2의 2차 러너에 더 많은 에너지를 전달하였을 것으로 사료된다. 추가적으로 공기 흡입구를 입구단 아래 위치(Valve 1)한 실험에서는 성능 특성의 변화가 미미하여 본 연구에서는 무시하였다.

횡류수차의 실험을 통하여 저 유량대역에서 약간의 효율 저하는 발생하나 유량에 따른 가이드 베인의 효과로 효율 저하가 거의 없이 효율을 유지한 상태에 발전이 가능함을 알 수 있었고, 정격 유량점에서만 탁월한 성능을 발휘하는 일반적인 타 수차와 비교하여 부분 부하시에도 그 성능이 우수함을 알 수 있었다. 하지만 위의 결과에서 보는 바와 같이 어느 유량점 이하에서는 터빈으로서 역할을 하지 못하고 에너지를 소모하는 장치로서의 역할만 수행하였다. 이러한 현상은 타 수차에서도 마찬가지로이나 횡류수차의 경우 비교적 더 낮은 유량범위 영역까지 운전이 가능함을 실증함으로써 계절에 따른 유량변화가 극히 심한 지역에서도 충분히 적용 가능함을 알 수 있었다.

Table 2: Comparison of results of each test

	Guide Vane	Flow at BEP	Non Air	Air Inflow	Rate of Increase
Power (kW)	1/3 size	36.5%	-	17	-
	2/3 size	57%	27.9	31	10.0%
	All G.V.	84%	45.5	50.5	9.9%
Eff. (%)	1/3 size	36.5%	-	62.9	-
	2/3 size	56%	63	70.5	10.6%
	All G.V.	84%	69.3	79.5	12.8%

## 4. 결 론

본 연구에서는 자연 방류되어 착수정 입구단에서 밸브에 의해 폐기되는 수력 에너지를 효율적으로 이용하기 위해 수차의 적용 가능성을 충분히 검토하였고, 특히 횡류수차 내 공기 흡입이 성능에 미치는 영향을 입증하기 위해 최 등의[2] CFD 해석 결과를 토대로 실험을 실시하였다. 수차 내 공기 흡입에 의한 공기층 형성이 횡류수차의 성능에 미치는 영향에 대해 실험을 통해 비교하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 공기 흡입구를 통해 유입된 공기는 횡류수차의 성능과 내부 유동에 밀접한 관계가 있었다.

(2) 공기 흡입이 없을 경우 저유량 대역(정격 유량의 40% 이하)에서는 진동 및 입구단 압력 불균형을 수반하여 구동에 어려움이 있었다.

(3) 실증 지점의 허용 유량 제약으로 정격 유량까지 실험할 수는 없었으나, 정격 유량의 약 80%까지 실험을 통해 공기 유입에 따라 효율 약 12%, 출력 약 7% 정도 횡류수차 성능향상에 효과가 있었다.

- 공기 흡입시 수차의 최대 효율은 78.2%이고, 출력 약 45kW(at  $Q = 78.2\%$ ) 였음.

- 결과 그래프의 추세에 따라 정격 유량 ( $0.6\text{m}^3/\text{s}$ )에서 실험할 경우 효율 80%, 출력 60kW 이상 예상됨.

(4) 공기의 유량이 증가할수록 재순환 유동과 러너를 통과하며 발생된 충돌에 의한 수력학적 손실을 최소화시킬 수 있어 수차의 성능과 효율을 더욱 증가 시킬 것으로 사료된다.

(5) 수차의 상단 벽면에 설치한 공기 흡입구 (Valve 1) 실험을 통해 수차의 성능 특성을 검토하였으나 결과 값의 차이가 약  $\pm 1\%$  정도로 공기 흡입이 없는 경우와 유사했다.

## 참고문헌

- [1] D. H. Meadows, D. L. Meadows, and J. Randers, Beyond the Limits Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future, Chelsea Green Publishing Company, Vermont, U.S.A., 1992.
- [2] Y. D. Choi, J. I. Lim, and Y. H. Lee, "Performance and internal flow analysis on the 80kW-class cross-flow hydro turbine with the variation of effective head," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34, no. 5, pp. 703-710, 2010.
- [3] Y. D. Choi, J. I. Lim, Y. T. Kim, and Y. H. Lee, "Effect of nozzle shape on the performance and internal flow of a cross-flow hydro turbine," Journal of the Fluid Machinery and Systems, vol. 11, no. 4, pp. 45-51, 2008.
- [4] Y. D. Choi and S. W. Son, "CFD analysis on the performance and internal flow of a micro cross-flow hydro turbine in the rang of very low specific speed," Journal of the Fluid Machinery and Systems, vol. 15, no. 6, pp. 25-30, 2012.
- [5] J. Fukutomi, Y. Nakase, and T. Watanabe, "A numerical method of free jet from a cross-flow turbine nozzle," Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers, vol. 28, no. 241, pp. 1436-1440, 1985.
- [6] J. Fukutomi, Y. Senoo, and Y. Nakase, "A numerical method of flow through a cross-flow runner," International Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 34, no. 1, pp. 44-51, 1991.