

러너와 가이드 베인의 연동을 통한 마이크로 카프란 수차의 출력 최적화

박노현* · 이영우***

Output Optimization of Microhydro Kaplan Turbine by Double Regulating Runner and Guide Vane

No-hyun Park*, Young-woo Rhee***

Key Words : Micro-hydropower(마이크로발전), Kaplan turbine(카프란 수차), Runner blade(러너 블레이드), Guide vane(가이드 베인), Double regulating(연동) Turbine efficiency(수차 효율)

ABSTRACT

Recently so much attention has been focused on renewable energy and, since its sources to exploit are already almost saturated in the country, the practical alternative to this situation could be a micro-turbine which uses the low head and low flow. From a point of view of local micro-turbine design capacity and manufacturing technology, the problems such as the accumulation of technical skills, the expansion of related industries, the national policy expansion and the turbine efficiency to improve are still vulnerable and it's true that there are also negative views about the economic feasibility, the technicity and the operation management of the micro-turbine. However, if the improvement can be done in technology of low-head double regulation micro-turbine to generate more outputs and the operation management can be reliably realized, the micro-turbine will be re-evaluated as an applicable source of renewable energy, even the output is small, and by a paradigm shift, it could realize a power generation as an economic and rational system.

1. 서론

최근 기후변화와 지구 온난화에 따른 세계적인 심각성이 대두되면서 신재생에너지원의 활용방안에 대하여 많은 관심이 집중되고 있다.

학계 및 실무에 따라 약간씩 기준은 다르나 수력발전은 크게 대수력과 소수력, 초소형 용량으로 구분하고 있다.

수력을 포함한 소수력의 개발은 이미 답보 상태이므로 대안으로서 비교적 개발 비용이 적고 초소형 발전설비의 규모로 환경 저해요인이 작으며 시스템 구성적으로도 간편하고 유리한 200KW 이하의 틈새를 활용 할 수 있는 검토와 연구 방안이 필요하다.

특히 최근에는 저낙차 조건에서 관로에 설치된 형태의 마

이크로(micro power) 수차로 분류하여 소규모 수원지 및 관로, 수로 등에 적용 될 수차 개발과 성능개선에 대한 연구가 주목을 받고 있다.

마이크로 발전이란 기존의 전통 방식처럼 수력에 대한 원리와 구조를 같이 하면서도 수력에 비하여 비교적 작은 설비 구성으로 Package 형태의 연구와 개발 적지를 찾아 프로펠러(Propeller) 형태의 개발과 적용이 이루어지고 있다.

수차의 종류에 따라 다르지만 우리나라의 소형 하천이나 소류지, 관로 등의 5m 전후의 저낙차의 특성에 미루어 볼 때 아직은 70%대의 기기 효율로서 선진국의 85% 이상의 수차 효율에 비해 저조한 것이 현실이다.

마이크로 수차에 대한 현재의 국내외 연구 동향을 보면 국외의 경우 이미 90% 가까이 실증 및 효율 실현으로 발전되어 있으나 반면 국내의 산학연 공동 또는 논문으로 소형 카프란 수차에 대한 연구⁽³⁾를 하였으나 낮은 수차 효율에 머무르고 있으며, 러너에 따른 성능 분석을 통하여 러너 효율의 관계

* 충남대학교 녹색에너지기술 전문대학원

** 충남대학교 녹색에너지기술 전문대학원

† 교신저자, E-mail : ywrhee@cnu.ac.kr

를 증명한 보고서⁽⁴⁾와 유체기계공업학회에 펠톤 터빈에 대한 성능해석 사례⁽⁵⁾ 등이 보고된 바가 있으나 이 역시 효율 면에서는 70%대에서 보고되어 있다.

저낙차에 적용성이 많은 카프란 수차의 경우에는 러너 블레이드(runner blade)와 가이드 베인(Guide vane)의 각도 변화에 의한 제어적 연산 작용으로 인하여 기기의 특성을 최적화 하는 것이 보통이다.

이러한 성능에 영향을 주는 러너의 배열 및 고정 각도와 조절 각도, 개체 특성을 통합하여 그 변화와 흐름을 분석하고 기기의 가변적 상호작용에 의한 최적 값을 찾아서 운영할 수 있도록 하여 출력(Output) 특성을 높이는 것과 적절한 효율 점을 찾는 메커니즘으로 동일한 수차로 보다 높은 출력을 보장 할 수 있으므로 기존 에너지원의 효율 증대라는 차원에서 중요한 의미를 갖는다.

2. 마이크로 수차의 설계 및 시험조건

2.1 마이크로 수차의 일반 특성 및 설계 조건

본 논문에서는 러너와 가이드 베인의 위치제어(Position Control)에 따른 출력 특성과 각도의 변화에 따른 출력의 특성 값을 효율 값으로의 측정 확인 목적이 아니라 단독 개도에 비하여 연동 개도가 얼마나 출력을 개선하는지에 대한 분석으로 연동 운영에 대한 특성을 알아보려 한다.

획득된 데이터를 기준으로 도출된 최적화 결정 방법은 향후 관로 형식의 마이크로 수차의 설계 및 제작, 개도에 따른 운영과정까지 영향을 줄 수 있을 것으로 예상된다.

일반적으로 마이크로 수차는 소수력 수차와 비슷한 구조와 기능을 가지고 있으며 출력에 관한 구성 값들도 식(1)과 같이 대부분 같은 구성 요소로 이루어져 있다.

$$P = 9.8 \times Q \times H \times \eta_t \times \eta_g \quad (1)$$

where, P : Output (kW), Q : Discharge (m³/sec)
 H : Rated head (m), η_t : Turbine efficiency (%)
 η_g : Gen' efficiency (%) η : Total efficiency ($\eta_t \times \eta_g$)

여기서 출력에 대한 기준을 설정하고자 실제 사용하고자 하는 임의의 값으로 주요 요소들에 대한 실험을 위한 사이트의 조건은 다음 Table 1과 같다.

Table 1 Micro hydropower turbine sample input data

Input Item	Input Data
Gross Head	6.5m
Discharge	1.0m ³ /s
Generator Efficiency(%)	90%
Theoretical output	50kW

Note) Not include head & discharge of lose.

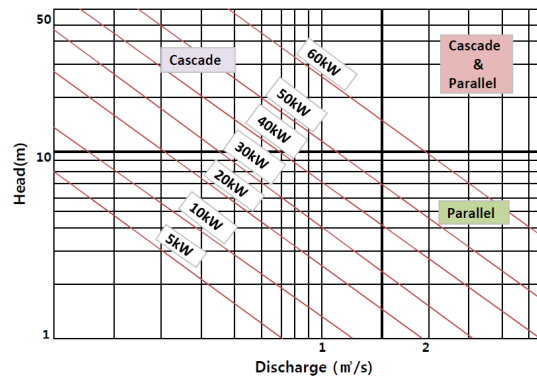


Fig. 1 Selection table of turbine

이로 인하여 극히 한정된 낙차와 기준에만 적용되고 제한적 5m 전후의 저낙차와 2m³/s의 유량에 적용될 수 있는 100kW 이하의 수차는 낙차와 유량에 따른 효율과 출력 값이 Fig. 1과 같은 영역에서 나타나는 것을 볼 수 있다.

수차에 있어서 효율의 증대는 경제성과도 직결되므로 고 효율의 수차설비는 생산력의 증대와 같은 의미이다.

현실적으로 저낙차 형의 수차에 대해서는 관심도가 적고 개발 사례도 많지 않아서 효율에 관한 검증 사례가 거의 없으며 대부분 실험적 수준에서 연구의 대상으로만 적용되어 지고 있다.

이러한 수차의 특성은 플랜지 형태의 관로 조립형으로 탈부착이 용이하고 특정구간에 낙차를 활용하는 이점과 유체의 전달이 관로를 통하여 이루어지므로 기후적, 외부적 손실이 거의 없이 수차까지 용이하게 도달 할 수 있다는 장점이 있다.

다만, 관로 활용 형태는 이송되는 유체의 기본적인 기능이나 목적에 영향을 주지 않도록 설치점을 선정하여야 하며 사용되는 유체의 특성도 고려하여야만 한다.

Fig. 2처럼 설계된 기본 요소를 보면 460mm의 러너 지름을 계획하고 rpm은 560에 60Hz의 데이터를 기준으로 하여 설계하였으며 수차의 배치형태는 Fig. 3과 같이 소형 Pit에 의한 수평형으로 하여 배치하고 설계 기준에 따라 방출구와 입구도 동일한 조건을 기준으로 설계 하였다.

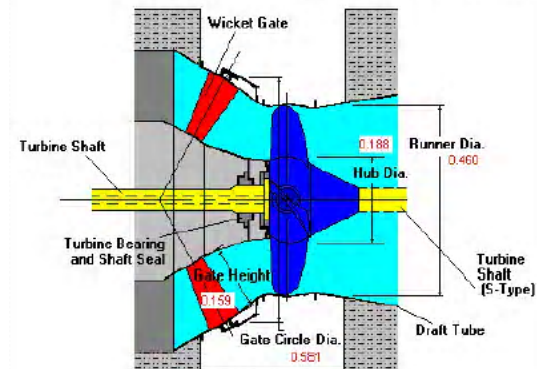


Fig. 2 Runner TURNPRO design data

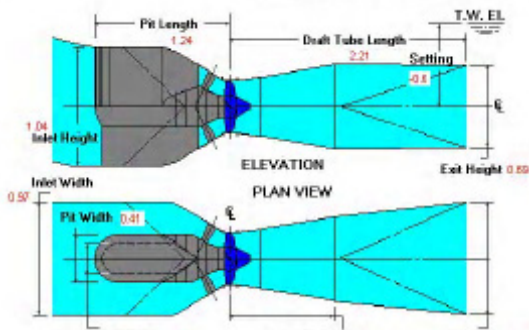


Fig. 3 Turbine arrangement drawing

2.2 마이크로 수차의 실행 분석 및 시험조건

대부분의 마이크로 수차에서 나타나는 두 가지 장애 요소인 경제성과 성능 향상 부분의 요소를 해결할 수 있는 방안으로 제작에 대한 비용적 요소의 개선과 더불어 저낙차 형의 수차를 적용함으로써 효율을 높일 수 있다면 이는 많은 생산성을 가질 것으로 기대 된다.

먼저 경제적 장애 요인의 해소 차원에서 Fig 3의 a와 b처럼 기존의 목형에 의한 제작 부분은 시간과 목형제작 등의 공정과 비용이 소요되며 대부분의 목형을 외부 제작하는 사례에서 볼 때 공정률에서도 운반 이동 및 외주 가공의 로스(lose)가 많으며 기술적인 요소 관리의 어려움이 있다.

본 논문 수차의 경우에서 Fig. 4의 c와 d는 러너 및 가이드 베인의 규모가 작으므로 CNC선반을 활용한 소재를 직접 연속으로 정삭하여 제작하는 형태의 기법으로 가공하는 것이 시간적으로 유리 하므로 상황별 적절한 방법을 사용하여 제작시간 및 비용의 절감으로 경제성을 확보 하였다.

실험에 사용된 수차의 형태는 위에서 열거한 기준으로 설계되고 제작된 Fig. 5에서와 같은 관로 형태의 소형 수차를 사용하였으며 실제 현장시험을 위한 설치 및 철거의 어려움이 있어 고정된 형태에서 각 요소들만 조정하여 기재하는 방식으로 진행 하였다.

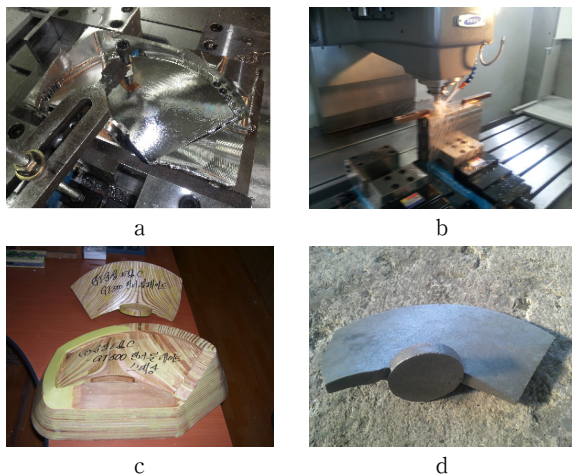


Fig. 4 Runner wood form(a, b) & Direct processing methods(c, d)



Fig. 5 Output Test of photos using by Penstock

작동방식은 고정식 베인 또는 러너 블레이드 형식은 제외하고 출력 성능에 영향을 주는 수차 형식 중 고정 범위에서 러너 하나만 조절 할 수 있는 단동식 수차(single regulating)와 러너 블레이드와 가이드 베인을 동시에 조절하는 연동식 수차(double regulating) 방식의 두 가지로 구분하여 검토하였다.

관로의 유체 이동 특성에서는 일반 노출식 관로보다는 유체의 정형적인 흐름이 일정기간이 경과함에 따라 안정적인 분포로 러너에 전달되고 압력과 속도의 두 가지 조건에서의 유동 특성은 각 베인의 개폐전후에 따라 압력차이가 있었다.

Fig. 6의 표시처럼 가이드 베인 앞부분의 일시 전단 속도를 분석한 결과 관 경계면을 주위로는 마찰응력이 크게 작용하여 파란색으로 보이는 것처럼 유속이 현저히 느려졌으며 반대로 관로 중앙으로 갈수록 층류 이동 현상이 있었고 최고 2.1m/s의 속도를 변화를 보였다.

이후 가이드 베인과 러너 블레이드를 통과하며 전체적으로 값이 변형되므로 단순히 유체 흐름에 대한 일정 구간의 속도 순간 값으로 참고하고 마찰계수나 마찰 손실은 별도로 표현하지 않았다.

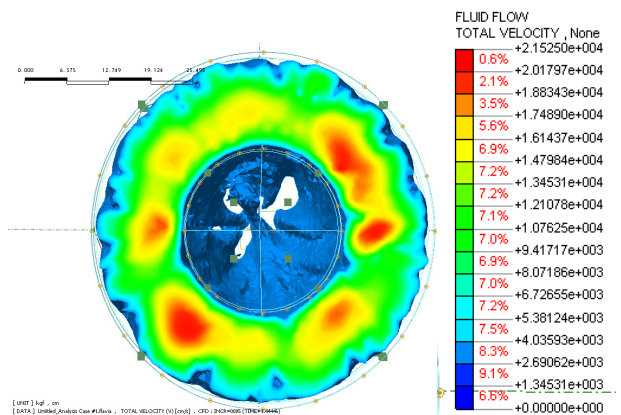


Fig. 6 Penstock of fluid distribution characteristics

Table. 2 Relationship table of Runner and guide vane

QT/Qm	Q	H	phi	psi	Q11	N11	eta
%	m3/s	m	φ	ψ	%	rpm	%
10	0.100	6.5	0.011	0.194	0.08	560	79.0
20	0.200	6.5	0.021	0.194	0.17	560	82.0
30	0.300	6.5	0.032	0.194	0.25	560	84.0
40	0.400	6.5	0.043	0.194	0.34	560	86.0
50	0.500	6.5	0.054	0.194	0.42	560	88.0
60	0.600	6.5	0.064	0.194	0.51	560	89.0
70	0.700	6.5	0.075	0.194	0.59	560	90.0
80	0.800	6.5	0.086	0.194	0.68	560	90.2
90	0.900	6.5	0.097	0.194	0.76	560	89.8
100	1.000	6.5	0.107	0.194	0.85	560	89.6

연동 제어는 일반 고정 형보다는 한 단계 높은 제어의 흐름을 구성하고 있지만 두 가지 요소를 조정하므로 러너의 지름에 따라 수차의 회전속도와 낙차와 유량의 운영범위를 프로그래밍 하여 최적의 운영 점을 찾을 수 있고 이로 인하여 발생될 수 있는 기기의 출력 특성 및 발전량 요소는 수차 운영에 밀접한 상관관계를 나타낸다.

일반적으로 Table. 2와 같이 유량의 변화에 따라서 가이드 베인과 러너의 변동 값, phi, 등이 변동되며 이에 출력 효율도 변동되는 것을 볼 수 있으며 이때 비속도는 고정 값으로 하였다.

이런 기본 자료는 러너의 움직임이 있는 러너 베인의 이동 각도(β)와 가이드 베인(α)의 이동각도로서 나타내며 그래프 상에서 예상되는 효율 값을 파악 할 수 있는 근거로 사용되고 있으며 이를 활용한 낙차 대비 유량 변동성에 대응하여 최적화 된 발전 운영방법을 제시할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 러너 블레이드의 개도에 따른 출력 특성

러너 블레이드의 개도에 따른 출력 특성을 결정짓는 요소는 비속도와 베인의 크기결정, 흡출높이와 캐비테이션 계수 등 다분히 많은 요소로 구성되어 지는데 여기서는 카프란 수차의 특성상 많은 상관관계를 조명 할 수 없으므로 인하여 단순히 시험된 결과를 기준으로 가이드 베인과 러너의 연동 실험값으로 출력 상승 차이를 알아보는 것으로 하였다.

러너와 가이드 베인의 각 각의 작용에 의한 메커니즘을 구성으로 하여 각 조정인자의 위치에 따른 출력을 결정짓는 인자에서 가이드 베인의 각 변위요소에 대한 계산식은 다음공식 2와 같다.

$$A_0 = av * zv / Dv \tag{2}$$

where, av = measured distance between guide vanes

zv = amount of guide vanes

Dv = diameter where av is measured

또한 러너 블레이드의 변화에 다른 값은 아래 식 3처럼 각 블레이드의 조절 각도에 따른 변위량으로 나타낸다.

$$\beta_0 = 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ \dots\dots\dots 28^\circ, 32^\circ \tag{3}$$

이 식에서 러너 베인의 각도가 변하는 형상은 일정한 간격에 규칙적이며 정량적으로 표현 할 수 있고 각 출력에 대한 각각의 변위별 이동을 측정 할 수 있다.

Table 3처럼 가이드 베인 변동 값 중 30~95%대의 일정 출력 이상 개도율을 산출 기입하고 러너를 각 개도치에 다른 4° 간격으로 할당하여 12°~32°까지 6번 기입하였고 이때 가로는 러너의 변동 값을, 세로는 가이드 베인의 변동 값으로 표기 하였다.

Table 3 Table of Runner angle input data

R \ G	8°	12°	16°	20°	24°	28°	32°
30	-	-	-	-	10.7	-	-
40	-	5.3	14.2	18.9	16.3	13.8	9.8
50	-	13.4	20.3	24.9	22.8	19.8	15.0
60	-	19.7	26.0	28.8	28.6	26.0	21.0
70	-	25.4	29.7	31.7	32.1	30.9	27.1
80	-	28.9	31.4	33.2	34.8	33.3	29.2
85	-	31.5	32.6	34.2	35.0	34.0	29.4
90	-	31.6	32.8	34.4	34.7	33.7	29.5
95	-	32.7	34.5	35.3	35.4	33.6	29.5

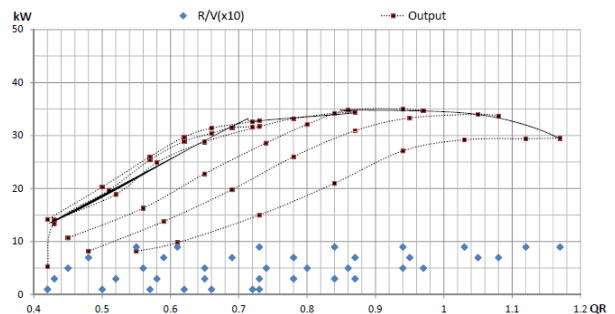


Fig. 7 Angle of the output changes according to the runners

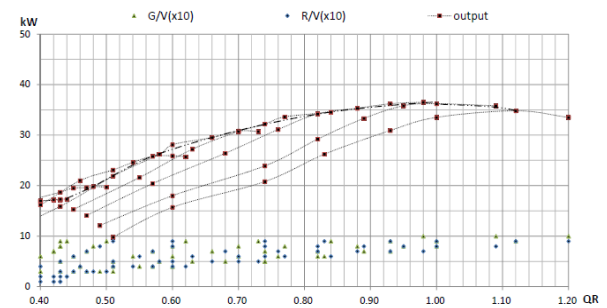


Fig. 8 Runner & guide vanes by double regulating of output data

Table. 4 Range of guide vanes and runner vane data

G \ R	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
35	21.4	22	21.8	21.6	21.9	21.8	21.3	20.2	18.7	17.1
45	25	25.7	25.6	25.7	27	27.8	28.3	27.7	26.4	24.7
55	26	27.5	27.6	27.4	29.2	31.6	33.4	33.2	32.2	31.9
65	26.6	28.4	28.4	28.4	30.6	33.2	33.6	33.9	33.5	33.6
75	27.1	28.9	29	29	31.2	34.3	34.5	34.5	34.6	34.5
85	27.1	29.1	29.1	29.2	31.4	34.6	34.7	35.2	35.7	35.8
90	-	-	29	29	31.4	34.5	35.2	35.7	36.6	35.2
95	27.2	28.8	29.1	29.6	31.3	34.3	35.6	36.3	36.5	34.6

발전량과 개도에 따른 수차 효율을 기록하여 적은 것이 Fig. 7과 같이 가이드 베인을 고정 후 러너 개방에 의한 출력 상승 값을 수직축의 그래프 상에 발전량의 단위인 kW로, 가로축은 유량변동을 m^3/sec 기준으로 표기하는 것으로 하였고, 그래프 눈금을 감안하여 가이드 베인과 러너 블레이드의 개폐율은 1/10로 축소하여 나타냈다.

이후로도 그림에서 보이는 축은 동일한 것으로 표시하였으며, 이에 따른 발전량의 변화 곡선 도는 통상적인 등고선형의 동향을 가지고 있었으므로 방향성이 동일하여 초기 구간의 출력 특성 편차는 고려하지 않았다.

이 실험에서는 출력에 대한 정량적인 달성이 목적이 아니므로 출력 경향을 검토 할 수 있는 기본적인 전, 후단 차압 방법인 관로 유량 측정 인덱스(index)법으로 적용 하였다.

3.2 가이드 베인과 러너 연동에 따른 출력 특성

수직축과 수평축의 기준이 동일한 기준에서 러너 블레이드의 각도와 Table 4의 가이드 베인의 조정 비율에 따른 가이드 베인과 러너 블레이드의 조정 각도인 $4 \sim 32^\circ$ 의 범위 내에서 러너의 조정값 비율 연동에 따라 1~5%씩 분할 기준으로 하여 동시 순차적으로 각 베인의 각도를 변경하도록 제어된 프로그램으로 미세하게 순차적 조절 하였다.

이에 기초하여 낙차와 유량의 변동성에 따른 수차의 출력을 측정된 결과 발전 값은 낙차의 영향으로 인하여 낮은 출력을 보였으나 Fig. 8의 전 운영시간대에 발전곡선에서 보이는 것처럼 등고선이 반원 형태에 걸쳐 전반적으로 고르게 분포하였으며, 발전 출력은 기동 초기부터 전형적인 경향으로 러너와 가이드 베인의 연동성에 의한 일반적인 발전 출력 증가의 운영 값을 나타내는 것을 볼 수 있었다.

3.3 연동성에 의한 출력 관계 및 효율 최적화

일반적으로 효율성과 출력을 같은 관계로 인식하지만 엄밀한 의미의 효율과 출력 값은 유사할 뿐 사실상 효율과 출력은 일부 상이한 위치에서 형성되어질 수도 있다

단적으로 말하여 효율은 좋으나 출력은 약간 떨어질 수도

있으며 반대로 출력 값은 좋으나 효율이 상대적으로 낮게 나타날 수도 있는 것이다.

이러한 관계를 표현하기 위한 것으로 모델 테스트를 통하여 수차의 특성을 정리한 것이 힐 커브(Hill curve)이며 힐 곡선상의 데이터를 근거로 하여 효율과 더불어 출력의 기본 값을 알 수 있고 이를 토대로 발전량을 예측할 수 있으며 이는 효율 환산 식 등으로도 표현 된다.

대형 수차의 경우에서는 초기 건설시 효율이 가지는 의미가 경제성 분석에 중요한 영향을 미치므로 이 부분을 감안하여 모델 테스트를 활용하여 그 성능을 예측하고 힐 커브에 의한 자료를 활용하지만 소형이나 마이크로 수차에서는 예산의 문제로 모델 테스트 검토 자체가 무의미하기 때문에 보편적으로 기존의 소형 수차의 기준을 통상 적용하거나 경험치의 의한 사례를 기준으로 적용 한다.

낙차에 대한 변동이나 유량 값들의 관계를 통하여 나타낼 수 있는 효율 및 출력 값 들을 최근 디지털 제어의 발전으로 인하여 마이크로 센서 등을 활용하는 제어의 메커니즘을 확인하여 출력을 나타낼 수 있는 여러 가지 효율의 환산식이 사용되고 있다.

여기서는 요소 중 최고 효율점에서 환산이 아닌 효율점 전후로 한 넓은 의미의 상황에 적용 할 수 있도록 되어있어 카프란 모델에 권장되는 Hutton의 환산식에 의한 제어 요소를 활용하여 수차의 출력에 적용 하였다.

수차를 제어하는 유압 장치(single line diagram)의 제어 흐름과 관련하여 비례제어 및 미분, 적분 하에서의 수압 변동률, 속도 수하율 등과 서브 모터(servomotor)와 서브 모터 길이(servomotor stroke 변화율과 회전속도에 따른 신호량에 따라서 반응하는 응답속도의 차이를 비교하여야하나 미세한 차이므로 응답은 동일 시간차로 간주 하였다.

합성효율을 구하기 위한 수차와 발전기의 효율은 일반적으로 원형수차에서 적용되는 가중평균 효율공식을 참고로 하였으나 효율을 측정하기에는 별도의 설비와 장치들이 요구되며 관로 조건상 설치가 불가하여 별도로 효율은 표현하지 않았으며 출력으로만 확인 하였다.

또한 정격 운영의 최적 값과 효율 동향을 안다는 것은 중요하며 이는 규정된 유량값이나 규정 낙차를 사용하는 일정 범위 외에서는 캐비테이션이나 높은 불규칙 진동과 같은 많은 난류가 생기게 된다.

그래서 유량 기준 프로펠러 수차의 110~90%인 운영범위와 카프란 전체 운영범위인 125~65% 운영범위의 내에서 벗어나는 수차의 가동은 하지 않는 것은 상례이며 발전운영에 대한 기본 요소이기 때문에 발전량 비교를 이 운영 범위 내에서 기준하여 실험하는 것으로 하였다.

이는 수차가 장기간이 지나면서 가질 수 있는 기기의 손상이나 수명 주기, 보수와도 연관되는 문제이다.

본 논문에서 최적화를 위한 러너 블레이드와 가이드 베인

의 연동 운영장치는 기존 러너의 작동 요소에서 하나의 요소를 부가한 제어 기능으로 가이드 베인과 러너의 상호 메커니즘에 의한 제어를 활용하는 방안으로 하였다.

운영되는 낙차와 유량에 관한 공식과 그래프 값들은 정해진 범위 안에서 그 효율 및 성능 값이 개선되어지고 그로인하여 출력 역시 제어인자에 의한 변동으로 발전 출력에 영향을 주는 것으로 예측 된다

제어에 의한 각 각의 베인 연동에 대한 관계를 Fig. 9의 한 개의 제어 메커니즘을 이용한 실선과 Fig. 10의 2개의 연동 메커니즘을 활용한 이중 점선을 비교하여 볼 수 있다.

두 발전량에 나타나는 것처럼 실선보다 이중 점선이 보는 바와 같이 전체적으로 완만한 상위 라인의 형태로서 지속적인 발전이 유리한 것으로 출력의 차이를 읽을 수 있다.

아래 Table. 5는 ESHA(European small hydropower association, Objectives for Small Hydro technology PART I, 184 page. France)의 간행물에서 유럽 수차 제작 업체의 연동 관련 수차 효율 특성 연구 결과를 표시한 것이다.

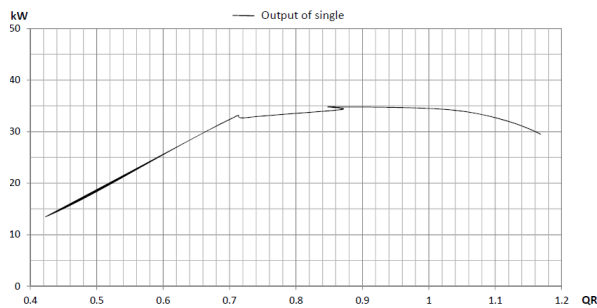


Fig. 9 Output of single regulating by Runner

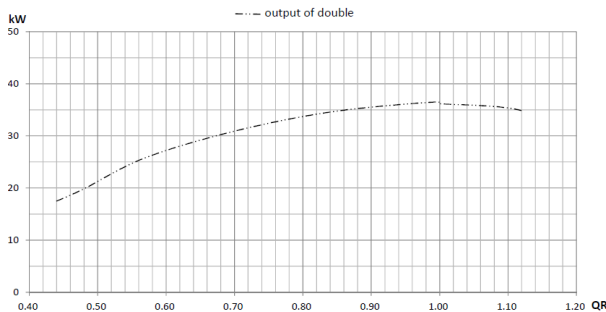


Fig. 10 Output of double regulating by guide vane & runner

Table 5 Overseas (Europe) the efficiency of microhydro power

Turbine type	Efficiency
Kaplan single regulating	90%
Kaplan double regulating	92%
Tubular	89%
Francis	92%

Note) EU standard. ESHA. 2004

위 Table을 바탕으로 비교해 볼 때와 최근 설치된 국내의 소수력 설비 중 카프란 수차의 운영에서도 약 2~3%정도의 발전 효율 지속성이 나타나는 사례와 출력 시험 결과에서 나타나는 것과 마찬가지로 이 실험에서도 마이크로 수차의 경우에 있어서도 출력의 크기가 전반적으로 높게 나타났다.

순차적 순간 실험방법과 유량 검증에 한계성으로 발전량에 비하여 효율을 직접 측정 환산 비교 할 수는 없었으나 전반적으로 연동 제어선의 영역에서 발전량으로 높게 나타남을 출력 측정 시험을 통하여 확인 하였다.

아래 공식 4는 카프란 수차의 러너 블레이드 하나가 발생하는 주 방향력(dF_u)을 구하고 공식 5는 이에 따라서 물의 작용을 나타 낸 것으로서 러너 블레이드의 물과 관련한 일의 양을 나타내고 이로 인하여 효율을 추정 할 수 있는 공식으로 러너 블레이드를 통과 할 때의 에너지 손실은 ω 값에 영향을 미치는 것으로 추정되며 이 경우 β 각도에 따라서 베인의 피치 값이 변동되므로 효율에 영향을 주고 이를 매개로 하여 출력에 영향을 미치는 것으로 추정된다.

공식에서 $dA \sin\beta$ 와 $dW \cos\beta$ 조정 인자 값에 의하여 효율이 조절되며 이때 나타나는 효율은 출력으로 변환 되어지는 것으로 추측 된다.

$$dF_u = dA \sin\beta - dW \cos\beta \text{ (kgf)} \tag{4}$$

$$\eta_h = \frac{u(dA \sin\beta - dW \cos\beta)}{u(dA \sin\beta - dW \cos\beta) + dWu} = \frac{1}{1 + \epsilon \frac{w}{u} \cdot \frac{1}{\sin\beta - \epsilon \cos\beta}} \tag{5}$$

where, μ ; runner blade peripheral speed (m / s)

ω : water relative velocity

dA : split turbine vane lift forces(kgf)

dW : drag force (kgf)

ϵ : lift & drag ratio(dA/dW)

마이크로 카프란 수차의 발전에 있어서도 비교된 이중 점선으로 나타나는 수차 출력 곡선에서 보이는 것처럼 가이드 베인과 러너 블레이드의 피치 각도가 제어인자의 조정 값에 따라 일정구간 수차의 운영 효율을 증가하고 발전량을 증가하는 것으로 나타난 것처럼 기존의 단일 가동식 보다는 연동에 의한 방식의 출력량이 전반적으로 보다 높게 나타났다.

이 출력 현상으로 미루어 볼 때 수차 블레이드의 피치각 변화에 따른 효율 변동과 발전량 증가가 있음을 확인 할 수 있었다.

저낙차 형의 소형 관로에 적용되는 수차의 경우에 있어서 같은 카프란 형태의 범주에 속하는 수차라도 러너와 가이드 베인의 연동 제어적용(Double regulating)을 통하여 수차의 운전 영역을 넓어짐을 알 수 있다.

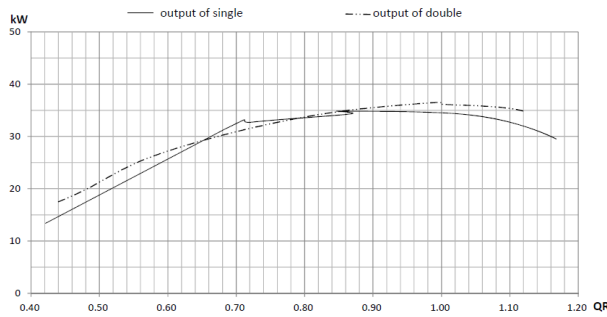


Fig. 11 Output graph of Single & double regulating

Fig. 11에서 출력 변화에 따른 곡선을 중복하여 나타 낸 것처럼 프로펠러와 카프란의 유량변동 특성 공통 영역인 90~110% 사이에서 일정한 구간을 두고 비교한 것으로 점선으로 표현한 단일 제어의 출력량보다 중복하여 제어를 시행한 이중 점선으로 표현한 출력량의 차이처럼 특히 정격 이상의 지점에서 효율을 2% 이상 높게 나타난 것을 출력 증가 그래프를 통하여 확인 하였다.

이는 전체적인 발전량의 증대와 동일하게 판단 할 수 있으며 이런 결과가 도출된 러너의 접수면 검토와 베인의 제어 각 함수관계 등 전반적인 각 인자들에 대하여는 앞으로도 연구 할 가치가 많은 요소이기도 하다.

4. 결 론

본 논문은 시험을 통하여 결론적으로 동일한 카프란 형태의 수차 일지라도 단동식 보다는 연동식이 피치 각의 다변 함수 관계에 의하여 결과적으로 발전량을 일정 부분 증대시킬 수 있다는 사실을 확인 할 수 있었다.

본 시험의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 가이드 베인과 러너 블레이드의 상호 연동 작용에 의한 이중 제어 기술은 러너 단일 조정 발전 방법보다 전체 적으로 2% 이상의 발전 출력 증가로 정격 조건 이상에서 지속적으로 출력이 높게 나타난다.
- 2) 저낙차 소형 관로 형태에 설치되는 카프란 수차의 경우에 있어서도 피치 각 제어에 따른 연동 방식을 적용 시 단동식보다 출력 증가로 경제성이 높다.

참고문헌

- (1) 이원한, 2004, “發電水力工學,” 東明社, pp. 3~15.
- (2) 이용천, 2011, “댐 및 수력발전 공학,” 씨아이알, pp. 239~311.
- (3) 이철형, 주영철, 박완순. “Performance characteristics of kaplan turbine,” Journal of the korean solar energy society Vol. 21, No. 1.
- (4) 이철형, 박완순. 2007, “Study on the kaplan type turbine for low head hydro resources,” Civil expo 2007. 10, pp. 3299~3302.
- (5) 오형우, 이상훈, 박노현, 유진승, 2010, “마이크로 펠튼 터빈의 버킷에 관한 설계,” 제 4회 유체기계 핵심기술 강습회, pp. 45~54.
- (6) P. Novak, A.I.B. Moffat and C. Nalluri and R. Narayanan, 2001, “Hydraulic Structures Third Edition,” pp. 468~521.
- (7) J. butler, “How to build & operate your own small hydroelectric plant,” pp. 287~296.
- (8) S. Davis, “serious water power solution from the experts microhydro. edited,” pp. 151~159.
- (9) J. Giesecke, E. l Mosony, “Wasserkraftanlagen Planung, Bau und Betrieb. 5. aktualisierte und erweiterte Auflage,” pp. 523~533.
- (10) EPRI Project Mnanger: D. Gray, 1999, “Hydro Life xtension Modernization Guides. Volume 1: Overall Process, Final Report,” December.
- (11) EPRI Project Manger: D.Gray, 2000, “Hydro Life Extension Modernization Guides. Volume 2: Hydromechanical Equipment. Final Report,” August.
- (12) 한국수자원공사, 2006, “소수력 개발 적지조사 보고서,” 7-3~8장.
- (13) J. Andrews & N. jelley. “Energy science principal, echonologies, and impacts,” pp. 70~71.
- (14) (財日)本農業土木綜合研究所, 1987, “Engineering Manual for Irrigation & drainage Small scale hydropower generation,” 제 1권, pp. 193~199.
- (15) European small hydropower association, 2004, “Guide on how to develop a small hydropower plant chapter 6,” pp. 152~198.