

소수력수차의 효율측정과 분석사례

김응태*, 정용채, 박장원

Hydraulic Efficiency measurement of small turbine and example of it's analysis

Eung-Tae Kim, Yong-Chea Jung, Jang-Won Park

Key Words : Performance of hydraulic turbine(수차의 성능), Small turbine(소수력수차), Pressure-time methode(압력 시간법), Acoustic method of discharge measurement(유량계법에 의한 측정)

ABSTRACT

The Purpose of this writing is a presentation of small turbine efficiency measuring method, applicable new technology, and several analysis result for real turbine. Measurement methods of hydraulic efficiency written in here are extracted from small turbine applicable international code(IEC, ASME). It includes brief synopsis of 'Current meter method' and 4 other methods and ASFM as a new small turbine applicable technology. And several analysis of test result are for recently performed domestic small turbine result in Korea. Through this presentation of extracted code, I hope that it make other small turbine concern be familiar to perform an efficiency test for small turbine. And, some analysis of that, make other to feel the importance of efficiency test.

1. 서론

소수력 수차발전설비에서 수차효율시험의 필요성은 효율이 나타내는 기기성능의 종합적인 척도로서 가장 중요한 의미를 갖고 있다. 소수력 사업은 경제성 부족과 주변지역민의 민원으로 개발이 주춤하였으나, 정부의 신재생에너지 보급확대 정책으로 공공기관이 주도적으로 개발하여 40개소의 소수력발전소가 가동중에 있어 양적으로는 증가되었으나, 성능에 대한 기술적인 개선을 위한 노력은 충분하지 못하였다.

본 연구에서는 소수력을 계획하거나 운영하고 있는 사업자들의 이해를 높이고자 수차효율 측정방법의 관련기술을 알아보고자 하며, 수차효율 측정사례를 비교 분석함으로써 국가 자원 활용의 극대화와 기술력의 향

상에 기여하고자 한다.

2. 효율측정

2.1. 개요

수력발전소 발전사용수량 측정기술의 소수력 수차 적용은 단순한 기술적인 제약이외에 현지여건에 따른 제한이 추가된다. 현재 수력수차의 효율시험에 대한 국제적인 기준은 국제전기기술위원회(IEC)⁽¹⁾와 미국기계공학회(ASME)⁽²⁾에서 각각 제정·운영하고 있다. 이 기술기준에서 제시하는 방법들은 대부분의 대수력에 적용이 가능하다. 그러나 소수력은 경제적 타당성이나 측정 장치 구성, 측정조건 충족의 문제로 적용이 불가능 면이 있다. 본 논문에서는 해당 기준에서 소수력에 적용이 가능한 것만을 서술하고자 한다.

국제기준이 제시하고 있는 기술은 기술적인 검토와 실증경험에 의하여 신뢰성이 확보된 기술만을 포함하고 있다. 따라서 일부기술의 경우 기술적으로 객관적

* 한국수자원공사

E-mail : js2517i@kowaco.or.kr

인 검증이 이루어졌으나 기준에서 인정치 않는 것도 있고, 이는 해당 기준의 회원국가간에 이전으로 남아 있기도 하다. 일부 신기술의 경우가 이러한 사례가 될 수 있으며 이러한 부분에 대한 성능의 검증은 이해당사자간의 협의에 따르게 된다.

수차의 효율측정에 가장 어려운 부분은 정확한 발전사용수량의 산출이다. 열역학법(Thermal method)을 제외한 모든 효율측정방법은 궁극적으로 사용수량의 측정을 위한 방법이기도 하다. 이는 유량을 제외한 유효나차와 전력량 및 수차의 기계적손실의 측정은 유량에 비하여 상대적으로 정확하고 용이하게 측정될 수 있기 때문이기도 하다.

2.2 수차의 효율측정

수차의 효율측정을 위한 발전사용수량의 측정은 제한된 측정 조건하에서 필요한 정확도를 고려하여 결정한다. 따라서 이해 당사자 간의 그 실효성과 경제성에 대한 합의가 측정방법의 검토단계에 수반되어야 한다.

측정방법 선정상의 제한은 대상설비에 측정 장비의 설치와 관련한 관로의 노출여부 또는 접근성, 형상, 규격 등의 조건과 연속운전허용부하 또는 설비의 가동정지 조건 등과 같은 운영상의 조건을 들 수 있다.

원칙적으로 수차발전기의 인수시 또는 준공이후 성능진단시험시의 위한 효율측정은 절대유량 측정법에 의하는 것으로 규정되어있다. 그러나, 운영상의 목적* 또는 편의와 참고적인 자료로 상대유량에 의한 측정법(지수법 등)이 제한적으로 사용될 수도 있다.

IEC41에서 규정하는 유량측정의 구분은 다음과 같다.

- ① 절대유량 측정법 : 면적속도법으로서 커런트미터, 피토티브, 압력시간법(김슨법), 추적법(경과시간 측정, 피토티, 확산/희석법 dilution), 표준위어, 표준차압발생장치, 표준체적유량측정, 초음파, 열역학법
- ② 상대유량 측정법 : 지수차압법(윈터케네디법), 비표준차압, 비표준위어, 단류초음파, 단류커런트 등 절대유량값에 대한 상대 물리량 측정방식

3 효율측정기술

* 가변익 수차의 경우 Guide vane과 Runner Vane의 최적 연동값추정, 절대유량측정방법으로 교정된 조건하에서 상대적 성능의 경향 확인과 같은 운영상 목적.

3.1 커런트 미터(Current meter)

3.1.1 개요

이 측정법은 가장 오래된 절대유량 측정방법의 하나로 다른 측정방법의 적용이 불가능한 저낙차수차의 수로에서 측정이 이루어지며, 규격에서 요구하는 익차의 수량이 많고 각 익차의 교정과 설치용 구조물의 제작 및 측정 등 상당한 비용이 소요된다. 상당수의 프로펠러형 익차가 지정 점의 유속을 측정하고 그 값에 단면적을 곱함으로써 개수로나 관로의 유량을 잰다. 국부적인 지역의 속도를 여러 개의 익차가 동시에 측정하여 유량을 계측한다. 잘 교정된 장비를 규격에 따라 설치하여 측정하였을 경우 측정점조건**에 따라 1.3 ~ 1.8 %정도 불확도 이내의 유량 값을 얻을 수 있다.

이 측정법의 적용가능 측정 점은 다음과 같으며 소수력의 경우도 적용은 가능하나, 그림1과 같은 측정장비의 구성이 필요하여 경제성과 편의성이 떨어진다

- ① 수압철관과 폐수로
- ② 구조물의 인입측
- ③ 개수로의 상하류측(저수지측 또는 방수로측)

3.1.2 적용조건

측정 시 물은 충분한 청수로 용존 또는 부유물질로 인하여 측정결과가 영향을 받지 않아야 한다. 속도분포에 따라 일정한 합산 기법이 적용되어야 하며 특히 경계면의 경우 경험 또는 이론적으로 유도되어 검증된 추정식이 적용된다. 이러한 기법이 적용된 경우 측정단면에 대하여 잘 정리된 이론의 적용이 요구된다.

개수로에 적용될 경우, 잘 정리된 단면으로 가공된 수로에서 적용되어야 한다. IEC규격에서는 자연적인 흐름은 측정에서 배제하고 있다. 각 익차의 측정은 최소한 2분 이상의 시간을 경과하여야 한다. 속도의 변화가 있을 경우 최소한 4주기 이상의 변화에 대한 측정이 이루어져야 한다. 이 경우 최소한 10 - 15분 이상의 정상상태 운전조건에서의 변화를 관찰한 후 결정이 이루어져야 한다. 측정 점의 수량은 원형 수압철관의 경우 최소한 13개 이상이어야 하며, 반경(내부반경 R로 m단위)에 따라 단위 측정단면에 $4 \cdot \sqrt{R} \sim 5 \cdot \sqrt{R}$ 개소의 측정점이 필요하다. 측정단면이 사각형인 경우는 최소 25개 이상으로 하고 단면적(m²단위)에 따라 측정단면에 $24 \cdot R^{\frac{1}{3}} \sim 36 \cdot R^{\frac{1}{3}} \cdot \sqrt{R}$ 개소의 측정이 필요하다.

** 측정점이 개수로, 폐수로의 형태, 경사여부 등 인 경우

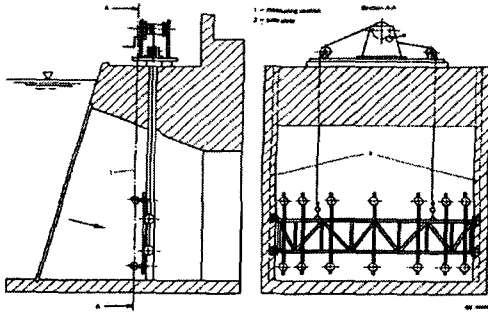


그림 1 Current meter의 유량측정도

3.2 압력시간법

3.2.1 개요

이 측정법은 운동량 보존법칙을 이용한 절대유량 측정방법이며, 잘 교정된 센서와 측정 장비를 사용할 경우 일반적인 측정 불확도는 1.7 %정도이다.

압력시간법은 측정조건의 충족이 용이하며 비용도 저렴하여 소수력 적용성이 가장 높은 측정법으로 다수의 소수력 적용사례가 있는 측정방법이다.

압력시간법의 측정원리는 폐쇄된 관로상의 흐름을 일정한 속도로 차단할 경우의 차단지점의 속도의 감소량이 흐름차단지점(밸브, Guide vane 등) 압력의 상승으로 반영되고, 폐쇄전후 압력의 시간적 변화를 측정할 수 있다면 이 값에서 속도의 변화량을 구할 수 있으므로 이 값으로 유량을 산출하는 것이다.

식으로 정리하면,

$$\rho LA \frac{dv}{dt} = -A\Delta p \quad (\text{여기서 } \Delta p = P_d - P_u) \quad (1)$$

$$A \int_t^0 d_v = -\frac{A}{\rho L} \int_t^0 (\Delta p + \xi) dt \quad \rightarrow \quad (2)$$

$$Q = Av_0 = \frac{A}{\rho L} \int_t^0 (\Delta p + \xi) dt + Av_t \quad (3)$$

그림2는 선도상의 면적이 압력의 변화로 반영된 속도에 해당하는 물리량이다.

궁극적으로 측정이 필요한 압력측정 대상지점의 센서사용 방법에 따라 두 가지의 측정법으로 분류되는데, 두 지점으로부터 동일한 조건의 도압관을 이용하여 차압계까지 연결하여 차압을 측정하는 차압선도법과 각각의 지점 압력을 개별 센서로 측정한 후 유량을 산출하는 개별선도(분리선도)법이 있다.

각각의 측정법은 자료처리, 센서설치, 대상설비의 관로조건에 따라 구체적인 적용과 관련한 사항의 검토가

필요하다.

3.2.2 적용조건

압력시간법 측정을 위한 개략적인 제한조건은 다음과 같으며 실제 적용성의 검토를 위해서는 세부적인 검토가 필요하다.

- ① 10m 이상의 두 측정단면간 거리
- ② 50m³/s 이상의 두 측정단면간의 거리×최대 출력시 평균유속값
- ③ 각각의 측정단면은 곡관, 분기 등의 불규칙부분에서 관경의 2배 이상 떨어져야 하며, 측정단면간에는 자유 수면이나 큰 불규칙성이 없어야 함
- ④ 5% 이하의 흐름폐쇄 후 유량(누수량) 및 이로 인한 두 단면간의 속도수두와 손실수두의 합이 최대차압 상승치의 0.5% 이하 일 것
- ⑤ 한 개의 관로에 수차가 2대 이상 접속한 경우 측정 단면 간에 분기점이 없어야 함.
- ⑥ 2% 이하의 측정단면간 관로상수* 계산관구간(측정점간 전체대비) 등

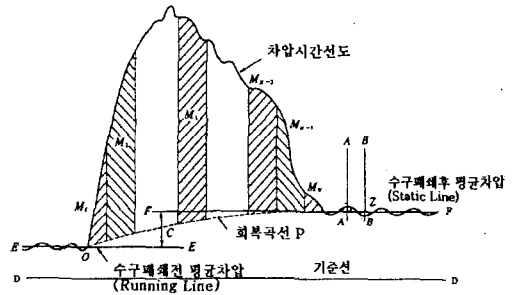


그림 2 압력시간법 차압선도

3.3 열역학법

3.3.1 개요

이 측정법은 유량과 수력효율을 에너지보존법칙에 의해 계산으로 구해내는 절대유량 측정방법이다. 이 측정법은 다른 것과 달리 유량의 측정을 목적으로 하지 않고 수력효율의 연산에 필요한 수력손실량의 측정을 목적으로 한다. 이러한 특성으로 이 측정법에서 요구하는 측정조건은 측정점이 열역학적상태의 대표점으로서 적합함이 가장 중요시된다.

열역학법의 경우, 압력시간법과 같은 단속적 측정이

* 동일/균일(확대, 축소) 측정구간의 길이를 단면적으로 나눈 값으로 속도변화값의 적분수행시 상수로 처리되는 값

아닌 실시간 측정이 가능하고 측정 점에 대한 제한이 크지 않은 장점이 있으나 열역학적 상태의 측정제한조건으로 유효낙차의 제한이 있다.

측정의 불확도는 측정조건에 따라 달라지며 대략 100m 정도의 정격낙차를 가진 수차에서 1.7% 정도이며 현재까지 수차에 적용한 최저 낙차는 65m인 것으로 알려져 있다.

3.3.2 측정원리

열역학법에 의한 효율의 측정은 그림3과 같이 물리에르선도에서 상태 1, 2에서 등엔트로피 과정과, 등온 과정 및 정압과정의 합인 실제과정간의 비에너지 차이로 나타나는 수력 손실 값을 상태간의 온도와 압력 값에 근거하여 구할 수 있다는데서 출발한다.

이상적인 과정에서는 수력기기 입·출구의 에너지 변화는 압력 또는 속도에너지만의 합으로 나타나지만, 실제과정에서는 압력 및 속도 이외에 손실에 해당하는 온도의 변화가 추가된다. 그러므로, 실제과정에서 온도로 반영된 손실 값의 정확한 측정이 가능하다면 효율과 유량을 얻을 수 있는 것이다.

다만, 물의 온도변화로 반영된 수력 손실 값의 측정을 위하여 일정수준 이상의 측정정확도가 확보될 수 있는 온도측정값 허용오차(1/1000 ℃) 이내의 측정결과를 제공하는 센서 및 관련 장비의 구성이 필요하고, 온도 및 압력의 측정이 해당단면의 열역학적 상태를 대표할 수 있는 지점에서 수행되어야 한다는 전제조건을 만족시켜야 한다.

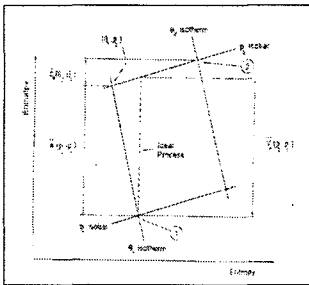


그림 3 물리에르 선도

3.4. 지수법

3.4.1 개요

Index methode 또는 Winter - Kennedy Methode라고 불리는 이 측정법은 사용수량과 효율의 보증 값과의 확인방법으로서 절대측정값에 대하여 2차적(보조

적)으로 측정결과를 제시할 수 있는 상대유량측정법이다. 일반적으로 이해당사자간의 합의를 전제로, 측정 장비가 적절하게 교정되었다고 인정될 경우 등 인수시에 제한적으로 사용할 수 있고, 운영 중 가변의 러너의 수차에서 가이드 베인 개도별 최적 러너각도의 추정에 사용될 수 있으나, 제한적으로 사용되는 상대적인 성능검증의 방법일 뿐 계약조건에 의해 또는 불이행에 의한 과징금 또는 보상금의 집행근거로서의 자료로는 사용될 수 없다.

지수법에서 지수 값은 임의의 비율 값으로 계약조건에 의해 유도·결정된다. 지수효율은 시험시 측정된 비수력에너지와 동력 그리고 비교정된 압력측정장치로 계측된 유량 값에 근거하여 산출되는 것이다. 상대효율은 지정 지수효율에 대한 참조 값으로 최댓값과 같이 어떤 값에 대한 비례적인 값으로의 의미를 가진다.

3.4.2 적용례

지수시험은 다음과 같이 현장에 적용이 가능하다.

- ①가변의 러너에서 가이드 베인과 러너의 최적 연동각의 추적으로, 인수시험 및 운영에서 필수적인 절차로서 불필요한 측정 점(운영점)의 수를 줄일 수 있음.
- ②인수시험에서 추가적인(부대적인) 시험결과와 제공. 일차적인 시험 측정법이 과도한 불확도를 나타내거나 시험자료 취득에 실패한 경우에 대한 예비기 될 수 있다. 이를 위해 차압측정장비의 적절한 교정이 반드시 선행되어야 함
- ③발전기 출력, 사용수량에 대한 상대적인 값으로서 성능 특성의 파악
- ④이해당사자 간의 합의를 전제로, 단순 출력의 보증확인
- ⑤이해당사자 간의 합의를 전제로 하고 측정 장비가 적절하게 교정되었을 경우, 보증점을 벗어난 영역의 성능에 대한 자료 취득
- ⑥기기의 부압작용조건 변경에 따른 효율과 출력의 변화량 산정
- ⑦기기의 마모, 보수 또는 가공에 따른 효율과 출력의 변화량 산정. 이 경우에 지수법 적용 시에는 기기의 가공에 따른 흐름 유형의 변경과 측정단면의 변경을 고려하여야 함
- ⑧영구적인 유량 측정설비로 특정 운영 점에서 절대유량 측정값에 의거하여 또는 현장 교정하여 사용수량의 측정에 사용
- ⑨발전소에서 복수기기의 운영 중 최적운영조건

추정

(10) 지수법을 이용한 성능곡선을 원형과 비교할 때는 모형시험결과를 근거로 하여야 함

지수시험의 결과는 기기의 적정 운영영역을 벗어나는 경우 신뢰도가 저하된다.

3.4.3 유량의 산출

수차 달팽이관의 유량측정용 차압은 그림4~그림6과 같이 취득된다.

유량의 산출 식은 다음과 같다.

$$Q = k \cdot h^n \quad (4)$$

여기서, h는 지정된 측정 탭에서 얻어진 차압 값이고 n은 통상 0.5이다.

지수차압법용 탭은 동일 원주상의 단면에 설치되어야 하며 한조의 탭이 추가적으로 설치될 것을 권고한다. 통상 내측 탭은 인접한 스테이베인의 중간정도로 흐름이 가장 적은부분에 설치하고 외측 탭은 최 외각에 위치하도록 한다.

횡측 달팽이관의 경우에는 배수 등의 용의함을 고려하여 탭을 상부측 반구 상에 설치하도록 한다.

벌브 등의 횡측수차의 경우는 고압측 탭은 그림에서와 같이 벌브나 축의 정체 점에 위치하고 저압측은 가이드 베인의 상류 측에 위치한다. 이 경우도 유량은 차압의 제곱근에 비례한다.

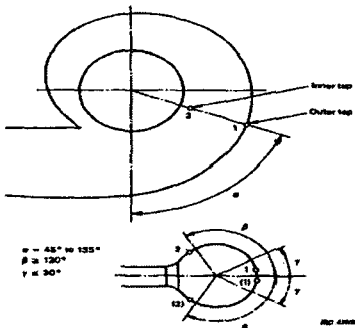


그림 4 스파이럴 케이싱 지수탭 설치도

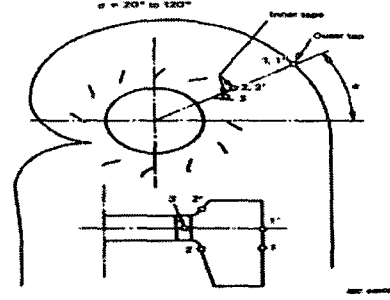


그림 5 세미스파이럴 케이싱 지수탭 설치도

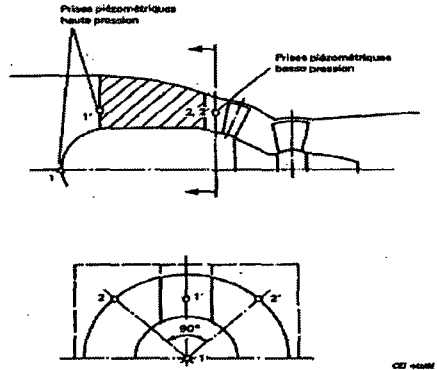


그림 6 횡측수차 지수탭 설치도

3.5 초음파 유량계법

3.5.1 개요

초음파 유량계법은 절대유량 측정법이고 그 적용은 국가별로 다른 입장을 취하고 있다.

초음파 유량계는 1955년 미국에서 Sing around법을 이용한 Maxson Flowmeter사가 항공연료용 유량계를 실용화하면서 급격한 기술의 발달이 이루어졌다.

초음파의 특성으로 인하여 관의 외부에서 유량의 측정이 가능하다는 장점으로 대유량 측정에 적용이 시작되었고, 1969년 일본에서는 수력발전소 수차효율측정지침(JEC 157-1969)을 제정한 후 개정(JEC 4002-1992)되어 전파시간차법의 경우는 수차효율시험용으로 사용되고 있으나, IEC60041-1991의 경우는 이해당사자간의 협의를 전제로 2차적인 방법으로서만 사용이 가능하도록 규정하였다.

통상 물의 속도 측정에는 0.1 ~ 2MHz 영역대의 초음파를 사용하며 매질에 전달되는 파동에 반영된 여러 가지 물리량의 변화를 측정하여 단면의 대표유속을 측

정하고 각종 연산을 거쳐 유량을 구한다.

3.5.2 적용조건

이 측정법의 적용을 위해서 기준에서는(IEC) 상류 측(하류)에 직경의 10(3)배의 균일 직선관로를 요구하며 직경 0.8m 이하와 유속 1.5% 이하에서는 적용을 제한하고 있다. 그러므로 측정 점 위치와 관련된 관로 조건과 유속조건이 적절할 경우에 소수력에 적용이 가능하며, 이때 최저 잘 교정된 장비로 측정조건을 만족시켜 측정할 경우 불확도는 1.0~2.0% 정도이다.

3.6. ASFM⁽³⁾ (Acoustic Scintillation Flow Measurement)

3.6.1 개요

이 측정법은 국제 기준에서 인정하고 있지 않은 신기술이다.

초음파표류(Acoustic Scintillation Drift)값을 재는 이 측정법의 측정원리는, 1940년대 후반에 전자파를 이용하여 광류(Solar wind)와 성층권 전리층의 이동을 측정하는데 최초로 사용되었으며 그 기술은 지금까지도 사용되어지고 있다. 1970년대에는 레이저나 다른 광원을 이용하여 대기 중 바람을 측정하는 데 적용되었으며 측정매질로 음파를 이용한 것은 1980년대 초에 해협의 흐름 양을 측정하는데 사용한 것이 최초이다.

조류의 측정은 캐나다 연방정부의 연구기관인 해양 과학연구소에서 1982년에 처음 시도되었다. 최초의 성공적인 측정은 브리티쉬 콜롬비아주의 빅토리아해협(폭650m)에서 1984년에 시행되었고 측정기구의 보안을 거쳐 동일 부서에 대하여 1986년과 87년에 재 시도되었고, 추가적인 보완으로 2,300m 폭의 해협에 대한 측정이 1988년과 89년에 실시되었다.

이후 10여 년에 걸쳐 이 기술은 북미와 유럽의 바다에서 북해와 흑해, 지중해와 보스포러스해의 해류를 재는데 적용되고 있다.

ASFM의 수력기기 적용은 1990년 콜럼비아강의 수차발전기에 커런트미터의 대안으로서 검토되면서 다음과 같은 적용성이 부각 되고 있다.

- ① 흐름에 장애를 주지 않는 센서로 구성(커런트 미터의 익차에 비교할 때)
 - ② 세 개의 센서를 사용함으로써 수직과 수평방향 유속의 동시측정이 가능(측정 점 상류의 fish screen과 같은 지장물이 있는 경우 중요)
 - ③ 추가적인 교정(기계적 구동부 또는 압력수감부의 교정)이 불필요
- 성능에 대한 검증은 제작사의 기준 유량 측정장비

(Tow-tank)와의 유량 값 절대비교 결과 모든 측정 점에서 1% 이내의 오차를 보이는 것으로 확인되었으며, 90년 Rocky Reach 댐의 최초 적용이후 북미지역 20여 개 설비에 적용한 사례가 있다.

3.6.2 측정원리

ASFM은 관로속 유체에서 발생하는 난류가 가진 고유한 초음파 파장 신호의 분석을 통해 유속을 측정하는 기법으로, 불규칙한 음파가 특정한 시점에서 고유한 형태를 띠고 이 파형이 상당량 감쇄된 후 일정한 거리를 이동하는 시간을 측정함으로써 측정단면 유체의 속도를 구하고 이 값으로 유량을 산출하는 것이다.

이 측정법은 흐름의 수직방향으로 초음파를 송수신하고 Scintillation이라는 난류파의 특성을 이용함으로써, 현재 상용화된 초음파를 이용하는 유량측정방법이 일반적으로 요구하는 측정지점 전후의 관로조건보다 짧은 직관거리에서 사용이 가능하며, 유사한 조건에서의 유일한 측정방법이었던 커런트미터를 이용한 측정에서 요구되는 시간과 노력을 상당부분 절감시켜줄 수 있는 것으로 알려져 있다.

4. 효율 측정사례

소수력 수차에 대하여 실시한 효율측정의 사례로 유량의 측정은 압력시간법과 초음파유량계법을 이용하였으며, 측정 점은 성능보증과 관련한 계약 지정점인 정격낙차 환산가능구간에서 실시된 것과 저, 고, 정격 낙차에 대하여 각각 실시한 사례를 포함하였다.

4.1 사용 장비

시험 측정항목별 사용 장비는 표1와 같다.

표 1 사용장비 사양

구분	측정항목	측 정 장 비	모 델	제작자
발전기	출 력	Digital Power Meter	WT-130	Yokogawa
수 차	입구압 /상부압	Pressure Transducer	PMP-630	DRUCK
	차 압	deltabar S 차압변환기	PMD230/61 Q0045	Endress Hauser
	개 도	Stroke Transducer	FASTAR FSI200HP	DATA Instrument
	수 위	현장 수위계		
데이터 수집		Data Acquisition	PXI	NI
유 량		초음파유량계	1010WPR-PIGZ	Controler-tron

4.2 사례 1

4.2.1 개요

사례1은 소규모댐의 하천 유지용수 공급용 관로의 밸브에 수차를 추가 설치한 현장으로 연장구간의 노출 구간과 기존관로의 매설구간에 시공 전 미리 설치한 측정점간의 조건이 압력시간-차압선도법의 적용만이 가능한 조건이었고, 시험측정의 목적은 준공·인수시험시 정격낙차조건이 충족되지 않아 준공이후 정격조건 성능의 재확인이었다.

4.2.2 설계점

해당 설비는 횡축프란시스 타입의 수차로 정격낙차 41.7m, 수차출력 : 1,800kW에 수차계약보증 효율은 89.0%로 설계되었다.

4.2.3 측정결과

효율의 측정은 유효낙차 40.58~41.22m의 정격낙차 환산이 가능한 구간에서 1,491kW~1,746kW(수차출력)간의 출력으로 11회 실시되었으며, 최대효율 측정값 91.4% 정격출력 회귀 값은 89.96%에 보증효율값을 초과하는 것으로 판정되었으며 그림 7과 같이 설계 점에서 최고효율을 보이는 특성이 확인되었다.

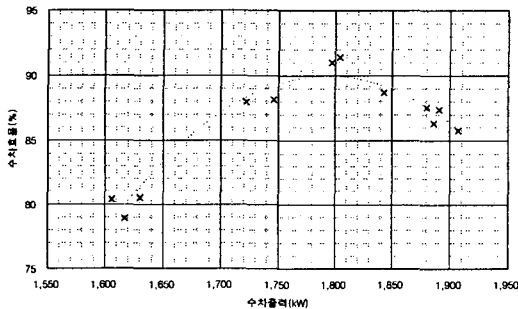


그림 7 사례1 측정결과

4.3 사례 2

4.3.1 개요

사례2는 양수발전소의 하부 댐에 설치된 소수력 수차의 경우로서 신설하는 수차용 관로상의 노출구간이 압력시간 차압선도법의 적용만 가능한 조건이었으며, 시험측정의 목적은 준공·시험시 정격낙차조건을 충족치 못하여 정격조건 성능의 확인이었다.

4.3.2 설계점

해당 설비는 종축프란시스 타입의 수차로 정격낙차 : 32.1m, 정격사용수량 : 1.52m³/sec, 수차출력 : 423.1kW에서 수차의 계약보증 효율은 88.58% 이다.

4.3.3 측정결과

효율의 측정은 유효낙차 환산구간에서 247kW~425kW(수차출력)간의 출력으로 6회 실시되었으며, 유효낙차 33.62m에서 최대효율 88.44%를 가지고 정격조건 허용오차범위(±1.5%) 이내에서 보증효율값을 만족하는 것으로 판정되었고, 실제수차의 최고 효율 점은 정격출력보다 약간 낮은 곳에서 나타내는 특성이 그림 8과 같이 확인되었다.

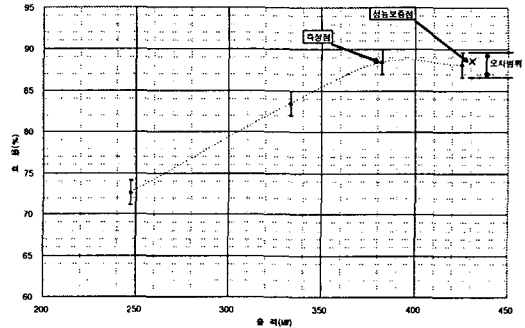


그림 8 사례2 측정결과

4.4 사례 3

4.4.1 개요

사례3은 용수전용댐에 설치한 수차로 용수공급용 관로의 노출구간이 있어 초음파유량계를 이용한 측정과 분리선도에 의한 압력시간법의 적용이 모두 가능한 조건이었다. 시험측정의 목적은 준공·인수를 위한 계약보증 성능의 확인이었다.

4.4.2 설계점

해당 설비는 횡축프란시스 타입의 수차로 정격낙차 : 37.79m, 정격사용수량 : 1.02m³/sec, 발전기출력 : 300kW에서 수차의 계약보증 효율은 88.0% 이다.

4.4.3 측정결과

효율의 측정은 정격낙차를 조금 벗어난 구간에서 99~299kW(발전기출력)간의 출력으로 12회 실시되었으며, 최대효율 76.7%로 계약보증값에 10% 가량 미달되는 것으로 추정되었다.

측정결과는 아래의 그림 9와 같다.

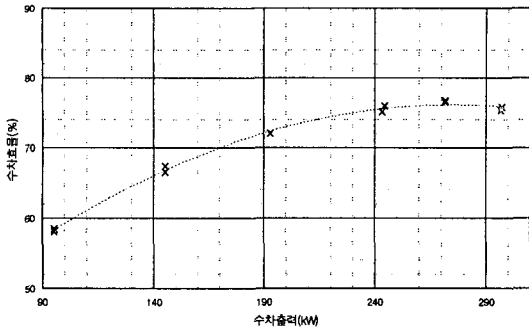


그림 9 사례3 측정결과

4.5 사례 4

4.5.1 개요

사례4는 수도용관로상의 잉여수두를 이용하기 위하여 관로 중간에 수차를 설치한 경우로 기존관로의 유량측정을 목적으로 설치된 유량계설의 관로조건이 초음파유량계의 적용에 적합한 상태였으며 수차와 벨브, 유량계이외의 부분이 매설되어 유량계범 이외의 측정방법적용이 불가능한 상태 이었다. 시험측정의 목적은 준공·인수를 위한 계약보증 성능의 확인이었다.

4.5.2 설계점

해당 설비는 중축프란시스 타입의 수차로 정격낙차 : 18.0m, 정격사용수량 : 2.4m³/sec, 수차출력 : 372kW에서 수차의 계약보증 효율은 88.0% 이다.

4.5.3 측정결과

효율의 측정은 최대낙차구간에서 318kW~376kW(수차출력)간의 출력으로 12회 실시되었으며, 측정결과 최대 효율 77.2%로 계약보증값에 미달된 것으로 측정되었다. 측정결과는 그림 10과 같다.

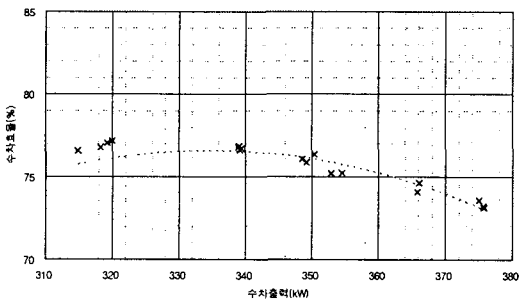


그림 10 사례5 측정결과

4.6. 사례 5

4.6.1 개요

사례5는 양수발전소의 하부 댐에 설치된 소수력 수차의 경우로서 초음파유량계를 이용하여 유량을 측정하였으며, 시험측정의 목적은 준공·인수를 위한 계약보증 성능의 확인이었다.

4.6.2 설계점

해당 설비는 횡축프란시스 타입의 수차로 정격낙차 : 43.6m, 정격사용수량 : 2.5m³/sec, 수차출력 : 750kW에서 수차의 계약보증 효율은 가중평균효율기준 79.29% 이다.

4.6.3 측정결과

효율의 측정은 최저, 정격, 최대낙차조건에서 각각 6 점 이상에서 실시하여 해당 지정 점에서 출력별 가중치를 각각 적용하여 효율을 산출한 결과 가중평균효율 81.46%로 계약보증값을 초과하는 것으로 확인되었으며, 그 결과는 그림 11과 표 2와 같다.

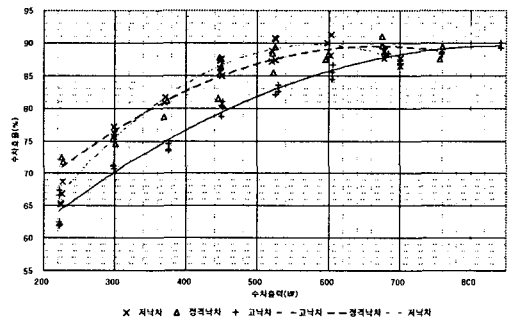


그림 11 사례5 측정결과

표 2 사례5 측정결과표

고낙차(47.5m) 출력별 가중치 및 측정결과								
수차출력(kW)	865	761	651	541	435	335	246	168
수차효율(%)	89.4	90.3	89.5	86.8	82.4	76.7	70.3	63.7
가 중 치	20	4	2	1				10
가중평균효율	82.47							
정격낙차(43.6m) 출력별 가중치 및 측정결과								
수차출력(kW)	788	690	587	486	389	299	218	149
수차효율(%)	89.4	90.8	90.3	87.6	83.1	77.2	70.5	63.8
가 중 치	12	4	1	2				7
가중평균효율	82.60							
저낙차(39.0m) 출력별 가중치 및 측정결과								
수차출력(kW)	700	609	515	427	337	258	187	127
수차효율(%)	86.4	89.1	88.9	85.9	80.1	72.8	64.4	55.9
가 중 치	17	1	6	1	3	1	1	7
가중평균효율	79.65							
전체가중평균효율	81.46							

4.7. 사례분석

300kW~1,800kW 출력의 5대의 수차효율측정 결과를 정리하면 표3과 같으며 이 결과에서 두 가지의 중요한 결론을 얻을 수 있다.

첫 번째는 수차의 효율로 나타나는 기기의 성능 확인이 반드시 필요하다는 것이다. 사례 3과 4의 경우 실제 측정결과가 보증값 대비 10% 까지 낮은 것으로 측정되는데, 이는 효율 값만을 이야기하면, 발전기의 성능이 비교적 균일함을 고려할 때 전력생산량 저하의 직접적인 원인이 수차효율임을 의미하고, 수력효율이 낮은 수차의 손실에너지는 유해진동 또는 열의 형태로 기기의 지지유허활부 등에 나쁜 영향을 미쳐 기기수명이 단축되는 악순환의 고리가 된다고 할 수 있으므로 기기정지로 인한 부차적인 손실은 더 크다고 할 수 있다.

두 번째는 수차의 효율측정 결과는 계약보증점의 확인뿐 아니라 최적운영점을 제시함으로써 향후 운영의 주요 기준을 제시한다는 것이다. 사례 1의 경우 성능보증 지정 점과 최고 효율점이 일치함으로써 설계조건에 운영점이 적합한 것으로 확인 되었으나, 사례 2의 경우는 지정 점에서 보증 값은 만족시켰으나 최고 효율 점은 지정출력보다 약간 낮은 곳에서 나타나는 것으로 확인되었고, 사례5의 경우도 가중 평균치를 만족시켜 계약성능값은 충족시키는 것으로 확인되었으나 낙차별 최고 효율 점은 각기 다르게 나타나는 특성이 확인되어 향후 해당낙차별 효율을 고려한 운영이 가능한 기준이 제시됨을 알 수 있다.

표 3 수차효율측정결과 비교

측정항목 수차형식	출력 (kW 수차)	정격 낙차 (m)	사용수 량 (m ³ /sec)	상승보 증값 (%)	측정 결과 (%)	계약 충족
횡축프랑스	1,800	41.7	-	89.70	91.4	○
중축프랑스	423.1	32.1	1.52	88.58	88.44	○
횡축프랑스	300	37.79	1.02	88.0	76.7	×
중축프랑스	372	18.0	2.4	88.0	77.2	×
횡축프랑스	750	43.6	2.5	79.29	81.46	○

5. 결론

신재생에너지의 개발 및 보급·확대를 위한 관련법 규가 정비되고 소수력발전소가 늘어나면서 관심이 확산되고 보급이 점차 늘어나고 있는 있으나, 소수력 기술은 선진국에 비해 관련 기술의 후발사업자로서 소수력 사업자의 기술적, 제도적 기반이 열악한 것은 부인할

수없는 사실이다.

소수력 사업에 대한 낮은 인식과 사회적인 저평가, 경제성 있는 개발가능 자원의 제한 등으로 인하여 소수력 사업의 성공을 위해서는 규모를 통한 경제성의 확보보다는 기술적인 접근을 담보로 하는 효율적인 관리와 생산을 위한 노력이 필요하다.

대수력과는 달리 소수력 수차의 효율시험에는 일정 수준이상의 기술비용이 요구되는 방법의 적용은 제한을 받을 수밖에 없다. 그러나 건설초기부터 체계적인 접근을 통하여 모색한다면, 경제성이 확보되는 범위에서 적용이 가능한 시험방법이 확보될 수 있을 것이다.

수차효율시험의 중요성은 수차효율측정 사례분석에서와 같이 직접적으로는 인수 직후의 전력생산량으로 나타나고, 간접적으로는 기기의 수명과 관련하여 장기적인 사업 수익성에 영향을 미치게 되므로 장·단기적으로 가장 중요한 절차임은 묵인할 수 없을 것이다.

본 연구를 통하여 소수력 수차의 효율측정 관련 기술의 공유, 보급 등을 통해 국내기술의 발전에 도움이 되고, 제한된 자원의 합리적인 활용에 보탬이 되기를 바란다.

참고문헌

- (1) IEC60041, 1991, International Standard Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines.
- (2) ASME(The American Society of Mechanical Engineers) PTC-18, 1992, Hydraulic Turbine performance test codes
- (3) Latif Bouhadji, Daviv.D.Lemon, Comparison of discharge measurement by current meter and acoustic scintillation methods at La Grande-1, IGHEM 2004 Luzern Switzerland