

열역학법에 의한 펌프의 수력효율측정

권영준* · 서창덕** · 정용채*** · 박장원****

Efficiency measuring in pump using Thermodynamic method

Kwon Young June*, Seo Chang Deok**, Jung Yong Chea***, Park Jang Won****

Key Words : Thermal methode(열역학법), Hydraulic efficiency(수력효율), Sampling methode(채수법)

ABSTRACT

An applying Thermodynamic method for the purpose of measuring hydraulic efficiency of pump-motor system, based on IEC60041 code, is not easy to adopt at field test. Even though there were splendid development in measuring technic in discharge measuring through the hydraulic machine, lots of unsolved problems concerned in flow-rate are still remain in measuring hydraulic efficiency in hydraulic machine. The key point in measuring hydraulic efficiency is to measure exact flow-rate. So, Thermodynamic methode provides a good solution. This methode measures hydraulic efficiency by detecting the difference of temperature and pressure between the hydraulic process of machine, without measuring flow-rate of pump or turbine. By measuring temperature in mK level and absolute pressure in pascal, we can get a difference of thermodynamic specific energy in Molliere chart before and after of hydraulic process, and that difference is equal to hydraulic loses.

Following the standard in proceeding Thermodynamic methode, I hope these trial and records make others be familiar to the thermal methode and make it easier to beginner for trial.

1. 서 론

수력기기의 효율측정에 있어 축윤활, 수밀부 및 연결부 등의 기계적 효율은 비교적 손쉽고 정확하게 측정이 가능한 반면, 수력효율은 유량측정의 제반 제약 사항으로 인하여 정확한 측정에 제한을 가지고 있다. 이로 인해 기기의 성능을 나타내는 종합효율의 측정과 관리에 있어서 정확도가 떨어지며, 이러한 제한조건은 실험실이 아닌 실제 현장에서는 더욱 문제가 된다.

근래의 센서기술과 계측기술의 발달은 기존에 적용해왔던 측정기술에 많은 향상이 있었고, 또한 전자파나 초음파 특성을 이용한 여러 가지 유량 측정 기술이 새롭게 적용되고 있다. 그러나, 이러한 대부분 방법들

은 효율을 측정하는데 필요한 여러 종류의 물리량을 감지, 변환 및 계측하는 일련의 과정상에 상당히 많은 제약이 아직도 남아있으며, 또한 본래의 이상적 조건과 현장의 실제 조건은 차이로 인해 측정에 많은 어려움이 상존하고 있다. 이러한 기존 측정법의 제한조건에 비교할 때, 물의 열역학적 특성을 이용하는 효율측정방법(이하 열역학법)의 경우는 유량의 측정 없이 수력효율을 챌 수 있고, 측정의 불확도가 $\pm 1.5\%$ 이내이면서 측정 제한 조건이 mK 단위 온도의 정확한 측정 정도라는 점에서 비교적 용이하며 안정적인 측정기법이라 할 수 있다.

* 한국수자원공사 에너지사업처

E-mail : k2s1275@kowaco.or.kr

열역학법은 국제적으로 표준화¹⁾된 방법으로 절차서가 제정되어 있으며, 이미 선진국에서는 이를 활용한 측정장비가 개발되어 보급 및 적용이 확대되어 있다. 최근 국내에서도 이 측정방법과 측정장비²⁾를 도입하여 적용 중에 있어, 이 측정방법에 의해 수행한 시험사례를 고찰함으로써 본 측정법의 보편적 적용성을 확인하고 관련 기술의 전파와 정착을 도모코자 한다.

2. 측정원리

열역학법에 의한 효율의 측정은 물리에르선도에서 상태 1, 2에서 등엔트로피 과정과, 등온 과정 및 정압 과정의 합인 실제과정간의 비에너지 차이(그림 1 참조)로 나타나는 수력 손실값을 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 손실값의 정확한 측정이 가능하다면 효율과 유량을 얻을 수 있는 것이다.

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

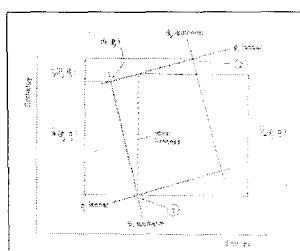


그림 1 펌프에서 과정선도(운동, 위치에너지 생략)

1) IEC60041 Code

2) 상표명 HEMS로 한국수자원공사와 에탄시스템이 개발한 펌프 및 수차의 효율측정장비

2.1 산출식

펌프와 수차에서 효율의 산출은 동일한 물리법칙이 적용되나 세부적으로 개념적인 차이가 있다. 편의상 여기서는 펌프를 기준으로 서술한다.

펌프의 종합효율은 정의에 따라,

$$\eta_{\text{종합}} = \eta_{\text{전기}} \cdot \eta_{\text{기계}} \cdot \eta_{\text{수력}} \quad (1)$$

이고 펌프의 수력효율은 다음과 같다.

$$\eta_{\text{수력}} = \frac{E_{\text{수력}}}{E_{\text{기계}}} \quad (2)$$

$E_{\text{수력}}$: 생산 또는 이용 가능한 비수력에너지

$E_{\text{기계}}$: 실제 축으로 전달된 비기계에너지

수력 효율은 각각의 위치에너지, 운동에너지, 엔탈피의 단위질량당 변화 비율이므로,

$$E_{\text{수력}} = \frac{(p_2 - p_1)}{\rho} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (3)$$

$$E_{\text{기계}} = \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_\theta (p_2 - p_1) + \left(\frac{\partial h}{\partial \Theta} \right)_p (\Theta_2 - \Theta_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \Delta E_m \quad (4)$$

라 할 수 있고 식 (3)과 (4)을 미지수인 유량과 효율간의 관계식으로 표현하기 위해 $v = \frac{Q}{A}$ 을 대입하고, 공장시험결과에 근거한 산출된 ‘전기효율’과 기기가동 중 측정된 열교환량 또는 코드(IEC, ASME 등)의 산출식으로부터 산출한 ‘기계효율’을 대입한 후, 나머지 해당 상태값(밀도, 등온계수, 정압비열, 대기압, 중력가속도 등)을 관련 기준에 의거 산출하여 식 (1)에 대입하면

$$\eta_{\text{종합}} = \frac{C_1 Q^3 + C_2 Q}{C_3 Q^3 + C_4 Q} \quad (5)$$

상기와 같이 효율과 유량 및 네 개의 상수로 이루

어진 식 (5)를 얻을 수 있다

상기의 식 (5)와 종합효율에서 전기효율과 기계효율 값을 상수로 처리치 않고 동일항을 소거시켜 얻은식을 유량과 효율의 관계로 표현한 식 (6)을 연립하여 풀면 종합효율과 유량값을 동시에 얻을 수 있다

$$\eta_{\text{종합}} = \frac{\rho \cdot Q \cdot g \cdot h}{P_{\text{단발값}}} = \frac{\rho \cdot Q \cdot E_{\text{수력}}}{P_{\text{단발값}}} \\ = \frac{C_5 Q^3 + C_6 Q}{P_{\text{단발값}}} \quad (6)$$

상기 펌프 경우의 산출식을 수차에 적용할 경우에 는 식 (2)와 (6)을 역수로 취하여 연산하면 된다.

수차에서의 경우 수력효율에 수력손실값 즉 정압과 정이 반영되는 비기기에너지의 향이 효율식의 분자에 포함되고 '-'의 값을 갖게 되면서 펌프에서의 경우에서 보다 결과값에 미치는 영향이 커지게 된다.

대략 이 영향은, 전동기 및 운영 낙차에 따라 정확 한 값은 달라질 수 있으나, 전력 1,000kW/수두 50m 정도에서 비교할 때, 펌프에서의 수온변화가 효율의 미 치는 영향은 동일 규격 수차의 약 절반 정도이다.

3. 효율의 측정

3.1 측정장비의 구성

측정에 적용한 장비(HEMS)는 관련 규격에 근거하여, 성능과 현장의 시험측정조건을 만족시키는 센서와 데이터취득장비 및 연산도구로 구성되어 있으며 개략 흐름도는 그림 2와 같다.

제시된 흐름도는 일반적인 펌프를 기준으로 하였으며 펌프의 현장 설치조건에 따라 온도의 측정지점이 증가되어야 한다.

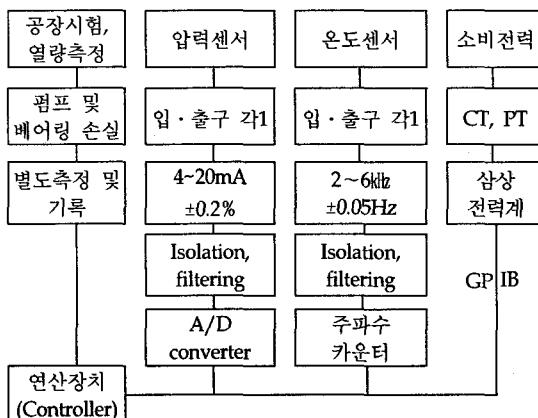


그림 2 시험측정장치 구성도

3.1.1 온도센서의 선정

온도신호의 정확한 취득은 열역학법에 의한 효율측 정법에서 가장 중요한 부분이다. 압력에 비하여 요구 되는 정확도가 높은 반면, 측정오차가 결과에 미치는 영향은 상대적으로 크다.

센서의 선정기준으로 국제기준에서 요구되는 성능 인 mK 이하의 온도값 측정기능을 만족하는 것과 측정 현장과 부대조건으로 응답성, 견고성, 경제성과 측정지 점간 거리제한 및 열역학법용으로의 사용실적 등을 고려하여 선정하였으며, 사양은 다음과 같다.

- 측정범위 : -5 ~ +35°C
- 정 확 도 : ±0.001°C
- 응답속도 : 0.7 초

3.1.2 압력신호의 취득

압력신호는 신뢰성이 충분히 검증된 압력변환기를 사용하였으며 사양은 다음과 같다.

- 측정범위 : -5 ~ +20 kgf/cm²
- 정 확 도 : ±0.08%
- 안정성 : 0.1%F.S(1년)

3.1.3 전력신호의 취득

전력은 삼상 삼선식 2전력계법을 적용하였으며 사양은 다음과 같다.

- 측정범위 : 600V, 20A
- 정 확 도 : ±0.35%

3.2 취득자료의 연산

각각의 센서에서 취득된 신호는 적정한 신호처리과정을 거쳐 콘트롤러로 입력되도록 하였고, 전동기의 효율은 제작시 공장에서 수행한 시험결과를 이용하여 미리 산출한 추세식으로 전력계의 입력신호에 따라 실시간 효율값을 산출하도록 연산 알고리즘에 프로그램에 반영시켰으며, 배어링의 기계적 효율은 손실값이 경미하여 무시하였다.

3.3 측정

열역학법의 적용에서 가장 중요한 온도의 측정방법은 두 가지로 나누어진다. 첫 번째는 물속에 직접 센서를 삽입하여 온도를 측정하는 직접법(Direct

operating procedure)이고 두 번째는 물을 채수하여 측정하는 채수법(Sampling methode)이다.

각각의 방법은 장단점이 있는데, 직접법의 경우 센서가 유수에 노출되어야 하므로 물의 속도나 부유물질 등으로 인한 수감부의 파손에 대한 고려가 필요하고, 입출구의 유속의 차이가 클 경우 점성가열효과에 의한 오차를 고려하여야 하나, 온도센서를 관로에 삽입하고 수밀을 유지하는 정도로 간단하게 구성될 수 있는 편리함이 있다.

채수법의 경우는 관로 내부의 물을 일정 유속 범위 이내로 관로 외부로 흐르도록 유도하여 온도를 측정하는 방법으로, 직접법에서의 센서의 손상이나 가열효과로 인한 오차와 관련된 문제에서 자유로울 수 있는 장점이 있는 반면, 채수를 위한 기구부의 제작과 취급의 번거로움과 채수용 기구부의 단열에 각별한 주의가 필요하다는 단점이 있다.

일반적인 펌프현장에서는 측정대상 설비의 관경 자체도 작을 뿐만 아니라 측정지점간 단면적의 차이가 충분하게³⁾ 적으므로 센서 파손에 대한 대비용 보호기구를 제작한 후 이를 관에 삽입하는 직접법을 채용하기로 하였다.

현장설비별 센서의 삽입조건은 각기 상이하나 기준에 명시된 50mm 이상을 만족시키는 $90 \pm 10\text{mm}$ 에 맞추었다.

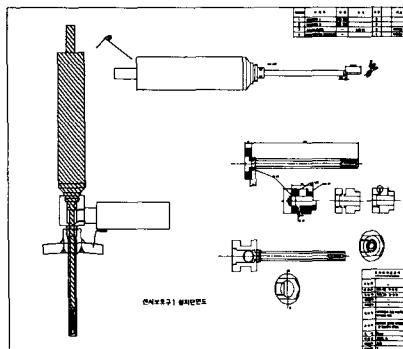


그림 3 직접법 적용을 위한 온도센서보호구 제작도

이 밖에 연산과 관련한 측정점 단면적, 해발고도와 위도는 실측 또는 도면의 값을 적용하였으며, 물의 밀도와 등온계수, 정압비열, 중력가속도는 기준에서 제시된 산출식을 사용하였다.

3) 유속을 기준으로 1.5% 이상의 차이가 발생할 때 1mK 정도의 온도차가 발생됨.

대기압의 경우는 별도로 측정하지 않고 표준 대기 압값을 일괄 적용하였다.

4. 측정결과

측정장비를 이용한 현장측정은 설치이후 운영기간이 2년 이내의 설비로 유지관리 상태가 양호한 것으로 각기 다른 세 현장에서 네 대의 설비에 대하여 실시하였다.

측정자료를 분석한 결과, 전반적으로 열역학법의 적용성이 매우 양호한 것으로 판단할 수 있었으나, 측정법의 특성과 현장 적용을 위한 실무 경험의 부족 등에서 기인하는 문제점 등의 추가적인 해결이 필요한 것으로 확인되었다.

4.1 Case 1 효율측정결과

첫 번째 측정대상 설비는 취수용 펌프모터로 사양은 다음과 같으며, 시험측정결과는 다음의 표 1에 요약되어있다.

- 설치시기 : '01.
- 취수량 : 172,800 m³/일
- 양정 : 120 m
- 전동기 : 3,350 hp
- 회전수 : 882 rpm
- 모터효율 : 97.5 %

측정은 현장의 기기 가동범위 이내에서 세 측정점에 대하여 두 차례에 걸쳐 밸브를 제어하여 실시하였다.

모터입력별 각각의 측정결과는 밸브제어이후 펌프입·출구 온도 및 압력값의 변화추이와 크기의 차이를 충분하게 관찰한 후 5분간의 측정값을 산술평균한 값이며, 전동기의 효율은 공장시험 성적서의 추세식을 적용하였고, 베어링 손실값은 무시하였다.

측정자료의 분석결과, 펌프 흡입측의 물은 펌프를 지나면서 전동기 입력에 따라 46 ~ 85(1/1000 °C)의 온도 상승이 있는 것으로 측정되었고, 동시에 측정된 해당조건에서의 압력값과 전력측정값에 근거하여 효율을 산출한 결과, 그림 4에서와 같은 특성을 나타냈으며 이는 공장시험결과와도 유사하였다.

현장의 펌프운영조건상의 제약으로 공장시험에서와 같은 운영범위의 측정을 할 수는 없었으나, 설계 운영점을 포함하는 구간에 대한 반복측정에서 동일한 특성을 확인하였으며, 이 측정결과는 해당설비의 수력손실값을 충분히 나타내고 있는 것으로 판단된다.

| 측정일시 : 2003.6.3. | | | | | | | |
|------------------|------------|-----------|-----------|------------|----------|------------|-----------|
| 측정 순서 | 모터 입력 (kW) | 입구 수두 (m) | 출구 수두 (m) | 입구 온도 (°C) | 온도차 (mK) | 유량 (m³/hr) | 펌프 효율 (%) |
| 1 | 2,396 | 5.69 | 96.00 | 12.4208 | 46.68 | 8,150.0 | 84.49 |
| 2 | 2,177 | 4.41 | 105.50 | 12.4156 | 54.50 | 6,612.0 | 83.69 |
| 3 | 1,924 | 5.57 | 114.35 | 12.4070 | 85.48 | 4,998.0 | 76.90 |
| 4 | 1,923 | 5.58 | 114.34 | 12.4096 | 83.66 | 5,021.0 | 77.31 |
| 5 | 2,196 | 4.41 | 105.50 | 12.4032 | 54.80 | 6,634.0 | 83.69 |
| 6 | 2,386 | 5.69 | 96.00 | 12.4050 | 48.42 | 8,063.0 | 83.90 |
| | | | | | | | 91.23 |

표 1 측정장비 측정결과 요약표

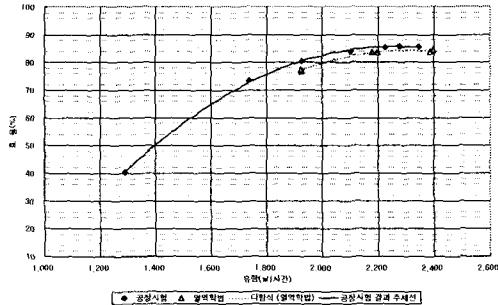


그림 4 Case 1 효율측정결과 곡선



그림 5 Case 1 센서 및 센서 설치그림

4.2 Case 2 효율측정결과

두 번째 측정대상 설비는 취수용 펌프모터로 사양은 다음과 같고, 설치이후 운영기간이 1년 이내로 공장시험에서 취득된 성능자료와의 비교가 의미 있을 것으로 판단하였다.

- 설치일시 : '02. 9.
- 취수량 : 28,008 m³/일
- 양정 : 74 m
- 전동기 : 362 hp
- 회전수 : 1,180 rpm

이 측정에서는 충분이 넓은 범위의 운영조건에서 측정이 2대의 펌프에 대해 시행되었고, 측정지점과 펌프와의 거리를 제외한 모든 조건은 Case 1과 같았다.

Case 2에서의 측정결과는 그림 6에 나타난 바와 같이 설계운영 범위 이하에서 2대의 설비가 유사한 성능 특성을 보여주고 있으며, 정상적인 측정 결과로 판단된다.

그러나, Case 1과 달리 출구측 측정지점이 펌프에서 너무 가까운 것으로 인하여 고유량 운전점에서 펌프를 통과한 물의 온도상승값이 충분히 반영될 수 없어 그림 6과 같은 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

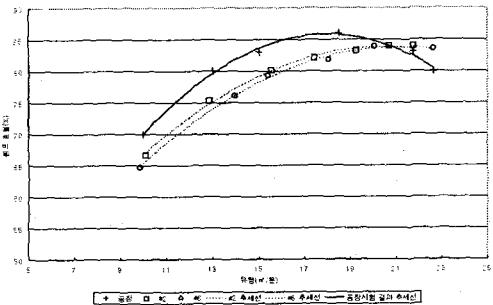


그림 6 현장 2 효율측정결과 곡선

4.3 Case 3 효율측정결과

세 번째 측정대상 설비는 취수용 펌프모터로 사양은 다음과 같다.

- 설치일시 : '02. 10.
- 취수량 : 109,440 m³/일
- 양정 : 76 m
- 전동기 : 1,675 hp
- 회전수 : 1,180 rpm
- 모터효율 : 97.5 %

이 측정에서도 전동기의 효율은 공장시험 성적서의 추세식을 적용하였고, 배어링 손실값은 무시하였으며, Case 2와 달리 펌프와 출구측 온도센서간의 거리를 현장여건이 허락하는 범위에서 최대한 떨어뜨려 측정하였다.

- 펌프에서 입/출구에서 측정점간 거리 : 1.68/2.83m
- 측정장비로 취득한 값이 나타내는 효율추세는 전체적으로 공장시험결과가 보여주는 추세를 나타내고 있어 측정점의 선정이나 측정절차는 정상적으로 수행된 것으로 판단되며, 현장시험 측정값과 공장시험 측정값을 비교 분석한 결과, 다음의 그림 7에 나타난 것과 같이 현재의 운영성능이 공장시험보다 약간 낮은(측정법의 오차범위를 1% 이내에서 초과하는 수준) 것으로

로 측정되었다.

이는, 현장운영조건과 공장시험조건과의 차이와 운영조건과 설계조건과의 차이 등으로 실제 성능의 변화 없이도 나타날 수 있는 수준이므로 펌프의 수력효율 저하로 판정 내릴 수는 없는 것으로 판단된다.

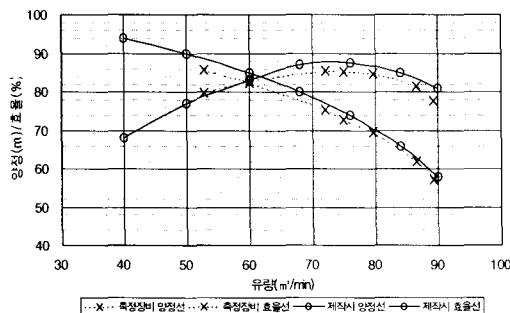


그림 7 현장 3 효율측정결과 곡선

5. 결론

열역학법에 의한 수력효율의 측정을 수행하기 위하여 관련 기술기준에 제시된 절차에 의거 장비를 구성하고 시험 측정을 수행한 결과 일반적인 펌프의 성능 측정에 적용성이 양호한 것으로 판단되었으며, 이의 적용에 큰 어려움이 없는 것을 알 수 있었다.

정밀한 온도의 취득과 취득 신호의 처리 및 현장 적용시 요구되는 여러가지 실무분야의 경험이 적은 상

태에서 관련 기준에서 제시된 수준의 측정결과를 취득 할 수 있었던 점에 미루어 판단할 때, 열역학법의 적용 한계점인 정밀한 온도의 측정은 적정한 센서의 선정과 기준에 부합되는 측정절차를 충실히 따르는 것으로 충분하게 해결될 수 있으며, 따라서 열역학법을 이용한 측정법은 보편적으로 사용하는데 어려움이 없는 측정기법으로 판단된다.

다만, 저양정, 수차설비 또는 배관 등에서 측정점의 취득자료가 열역학적 상태를 대표하기 곤란한 경우가 많고 또한 이로 인해 오차가 커지게 됨으로 열역학법의 적용에 신중을 기해야 하며, 이러한 오차 극복을 위한 실무적인 측정기법의 연구가 추가적으로 시행되어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) International Electro-technical Commission , 1991, Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines. IEC60041
- (2) Pump centre report 695/26, 1996, Pump Centre Report 695/27 - Draft - For Comment in IGHEM
- (3) L. Vinnogg, 1996, Thermodynamic Efficiency Measurements : The energy distribution in the boundary layer at the turbine inlet