

펌프의 효율측정 장비에 관한 연구

Study on the Device for Pump Efficiency Measurement

배철오*

Bae cherl-O*

요 약 문

요약 : 펌프는 산업 및 건설현장에 급수, 냉난방 및 산업공정에서 다양하게 사용되고 있으며, 전체 국가 전력의 약 20%를 소비하고 있다. 하지만 에너지 낭비요소에 대한 관리의 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 만일 효율이 저하된 상태로 펌프가 운전된다면 그의 에너지 낭비는 대단히 크게 된다. 펌프의 경우 초기 구입비용에 비해 사용하면서 발생하는 전력비용이 대단히 크기 때문에 이러한 낭비를 줄이기 위해서는 펌프의 효율을 정기적으로 측정하여 펌프의 운전 상태를 진단함으로써 펌프의 최적운전상태 및 교환주기 등을 제시할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 펌프의 효율측정을 위해 열역학적 방법과 수력학적 방법(전통적인 방법)의 두 가지 방법으로 측정할 수 있는 장비에 대해서 소개하고 실제 펌프의 효율을 계산하여 그 유효성을 확인하였다.

주제어 : 펌프효율, 열역학적 방법, 수력학적 방법

Abstract : Pumps are used widely in feed water, cooling & heating system and process line of industrial and construction fields. They consume nearly 20% of the each nation's total electrical energy. But The management of pump energy wasn't controlled well. Their loss of energy is huge if they have been operated at low efficiency. The first buying cost of pump is small compare to the power consumption of pump, so we can recommend the suitable replace time and best operating condition of parts and pump to measure the pump efficiency. Pump efficiency is usually measured according to the two methods which they are called thermodynamic method and traditional technique. And we measured the pump efficiency using two methods using potable pump efficiency measurement device and compared the results with the real performance curve offered from pump maker.

Keywords : pump efficiency, thermodynamic method, traditional technique

* 목포해양대학교 기관시스템공학부

1. 서 론

수력학적 방법으로 펌프의 효율을 측정할 경우에는 전통적으로 아래의 수식을 이용하여 계산한다.[1]

$$\eta_p = \frac{Q \times (P_D - P_S)}{2298 \times \eta_M \times P_M} \quad \text{식(1)}$$

식(1)에 의한 효율의 계산의 경우 유량, 헤드, 압력 및 전동기의 전력이 필요하게 된다. 즉, 유량(Q)을 측정할 수 있고, 전압과 전류를 측정할 수 있는 watt transducer가 설치되어 있거나 모터의 전력(P_M)을 알 수 있으며, 압력센서를 통하여 펌프 입출구단의 압력차를 구할 수 있으며 위의 식을 이용하여 펌프의 효율을 측정할 수 있다.

이들 측정값들 중 유량의 경우 정확하게 측정하기가 매우 어려운 설정이다. 많은 펌프의 경우 각 계통에 정확하고 개별적인 유량계가 설치되어 있지 않으며, 특히 직경이 큰 파이프의 경우 그 비용이 많이 들게 된다. 또한 경우에 따라서는 설치하기도 어렵고, 유지 보수하기에도 쉽지 않다. 유량계의 정밀도는 센서에 부착된 오염물이나 파이프내의 파편 등의 영향으로 많은 차이를 발생시킨다. 이러한 유량계에 의한 펌프효율의 오차를 줄일 수 있는 방법이 열역학적 방법이다.[2]~[5] 이 방법은 펌프 내에 흐르는 유체와 펌프 로터사이의 에너지변환을 응용한 방법 중의 하나이다.[6] 열역학적 방법에 의한 펌프의 효율계산은 아래식과 같다.

$$\eta_p = \frac{E_H}{E_M} \quad \text{식(2)}$$

여기서 E_H는 유체의 단위 질량당 수력학에너지를 나타내고, E_M은 유체의 단위 질량당 기계적인

에너지를 나타낸다. 또한 E_H와 E_M은 아래의 식(3)과 (4)로 각각 나타낼 수 있다.

$$E_H = \frac{dP}{\rho} = \frac{P_D - P_S}{\rho} \quad \text{식(3)}$$

$$E_M = a \cdot dP + c_p \cdot dT \\ = a(P_D - P_S) + c_p(T_D - T_S) \quad \text{식(4)}$$

윗 식들에서 사용된 변수를 Table 1에 표시한다.

온도와 압력은 각각의 센서프로브로부터 측정되고, ρ, c_p와 a(등온계수)의 3가지 값은 fluid properties table(ISO 5198)에서 특정된 값이다.

Table 1 List of parameters

심볼	설명
c _p	비열(specific heat capacity)
dP	차압(differential pressure)
dT	차온도(differential temperature)
P _D	출구압력(discharge pressure)
P _S	입구압력(suction pressure)
Q	유량(flow rate)
T _D	입구온도(inlet temperature)
T _S	출구온도(outlet temperature)
η _M	기계효율(mechanical efficiency)
η _p	펌프효율(pump efficiency)
ρ	유체밀도(fluid density)

열역학적 방법은 단지 2개의 변수인 온도와 압력만 결정되면 펌프효율을 측정할 수 있는 매우 간단한 방법이며, 더욱이 온도와 압력 트랜스미터는 저가로 설치되기 때문에 현재 이 방법이 다양하게 활용되고 있다. 반면에 열역학적 방법에 의한 펌프효율 측정에 있어서 온도가 매우 중요한 인자이며, 펌프 입출구의 온도차를 측정하기 위해서는 보통 1mK[°C]를 측정할 수 있는 정밀도 높은 센서가 필요하다.

2. 시스템의 구성

2.1 소프트웨어

사용자 펌프효율 계산에 필요한 프로그램의 틀로 써는 센서 인터페이스가 편리하고 프로그램이 손쉬운 LabVIEW 프로그램을 사용하였다.[7][8]

2.2 하드웨어의 구성

2.2.1 실험에 사용된 센서

펌프효율 측정을 위해서는 가능한 한 정밀도 높은 온도, 압력 트랜스미터가 필요하며, 또한 측정하고자 하는 대상물의 온도나 압력이 비슷한 범위 내에서 선정하는 것이 중요하다. 온도 트랜스미터는 AUTROL사에서 압력 트랜스미터는 KONICS사에서 제작된 것을 사용하였다.[9] 그의 상세 사양은 Table 2와 같다.

Table 2 Description of temperature and pressure sensor

온도 트랜스미터	
모델명	ATT2100-S1K0-M1BA
전 원	12~45 Vdc
출 력	4~20 mA
입 력	RTD PT100
온도측정범위	0~40℃

압력 트랜스미터	
모델명	TPS20-G17-F8
전 원	15~35 Vdc
출 력	4~20mA
출정범위	0~20kg/cm ²
부 하	600 ohm

Fig. 1은 온도와 압력센서의 실제 사진을 나타내고 있다.



(a) Temperature sensor (b) Pressure sensor

Fig. 1 Photo of temperature and pressure sensor

Table 3은 실험에 사용된 전자유량계의 사양을 나타내며, 관경에 마그네틱 자장을 형성하여 배관에 5 μ s/cm 이상의 전도도를 가진 유체가 통과하며 발생하는 전압을 전극을 통해 측정 표시하는 고정밀 유량계이다. 자동 영점조정기능, 빈관 검출기능, 정·역전 방향 측정기능 등의 기능을 내장하며 있으며, LCD 창을 통하여 유량 및 오류 상황을 확인할 수 있다.[11]

Table 3 Description of electromagnetic flow meter

전자유량계	
모델명	WinTEC WTM1000
전극재질	ST5316L(standard)
측정범위	단면적(3A~800A)× 유속범위(0.03~10m/s)
정 확 도	0.3~10m/s : F.S±0.5% 0.03~0.3m/s : F.S±1.0%
전 도 도	5 μ s/cm
표 시	LCD 4line×16digital
출 력	4-20 mA / RS232C

Fig. 2는 WinTEC사에서 제작된 전자유량계의 사진을 나타내고 있다.



Fig. 2 Photo of flow meter

펌프 전동기에서 사용되는 소모 전력은 3상 3선 380V의 와트 트랜듀서와 전류를 입력할 수 있는 2개의 전류센서를 통하여 측정하였다. 와트 트랜듀서도 4~20mA의 출력을 내며, 전류센서의 경우 전동기의 전원케이블을 분리하지 않고 계측할 수 있는 클램프 타입의 전류센서를 사용하였다.

Fig. 3은 전동기의 소모 전력을 측정할 수 있는 장치들의 사진을 나타낸다.



(a) Watt transducer (b) Clamp current sensor

Fig. 3 Photo of measuring devices for motor's power consumption

2.2.2 데이터의 취득

Fig. 4는 펌프효율 측정을 위한 기본적인 데이터 입력과 관련된 그림을 나타내고 있다.

모두 9개의 센서로부터 전류 값을 NI9208 모듈로 입력받아 컴퓨터로 전송하게 된다.[12]

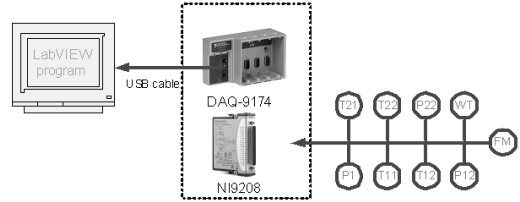


Fig. 4 Data acquisition diagram

T는 온도센서, P는 압력 트랜스미터, WT는 와트 트랜듀서 그리고 FM은 유량계를 나타낸다.

NI9208 전류 입력 모듈에는 노이즈 제거를 위해 50/60Hz 제거 기능이 내장된 $\pm 21\text{mA}$ 입력 16채널이 있으며, 500S/s의 샘플속도를 가지고 있고, 실시간으로 데이터를 처리할 수 있다. 특히 정밀한 온도측정을 위해 분해능이 높은 사양의 것을 사용해야 하므로 현재 시판중인 모듈 중에서 가장 분해능이 높은 24비트의 모듈을 선택하였다.

DAQ-9174는 소형, 휴대용 혼합 측정 테스트 시스템을 위해 구축된 4개의 슬롯을 가진 USB 새시로, NI9208 모듈을 이 4개 중에 하나의 슬롯에 삽입하여 USB를 통해 데이터를 전송하게 된다.

Fig. 5는 NI9208모듈로 연결되는 센서들의 결선도를 나타낸다. 본 실험에서는 2개의 펌프를 대상으로 실험을 실시하였고, 이들 센서들은 모두 4~20mA의 전류 출력을 내는 센서들이 사용되었다.

1대의 펌프 효율을 열역학적 방법과 수력학적 방법으로 모두 측정하기 위해서는 온도센서 2개, 압력센서 2개, 유량계 1개 및 전력변환기 1개의 최소 6개의 데이터가 필요하게 된다.

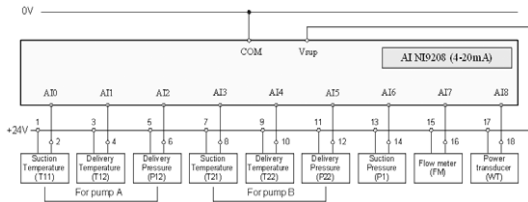


Fig. 5 The wiring diagram for input signals

2.2.3 펌프효율 측정 장비 모듈

Fig. 6은 펌프효율 측정을 위해 최종적으로 제작된 측정 장비 모듈의 사진을 나타낸다. 독립된 펌프 사이트에서 다양한 형태의 펌프효율 측정을 위해 장비는 이동이 가능한 포터블 형태로 제작되었으며, 12인치 터치기능이 포함된 산업용 컴퓨터로 실시간 효율진단이 가능토록 하였다. 이 모듈 내에는 센서로부터 전류신호를 입력받는 NI9208, DAQ9174, Watt transducer가 컴퓨터와 함께 내장되어



(a) Front panel



(b) Side and back panel

Fig. 6 Photo of pump efficiency measurement module

있으며, 각 센서로부터 유입되는 전류 신호선 들만 사진(b)의 back panel에 꽂아 주기만 하면 펌프의 효율을 측정할 수 있다.

2.3 프로그래밍

센서에서 입력되는 값들은 특정 온도나 압력등의 mA 값으로, 이들을 실제 온도나 압력 데이터로 인식하기 위해서는 변환이 필요하게 된다.

온도의 경우 센서는 4~20mA를 출력하여 보내고 이 값은 0~40°C에 각각 대응이 된다. 따라서 이를 변환하면 아래의 식 (5)와 같이 환산할 수 있다.

$$T_D = \frac{(T_{mA} \times 1000 - 4) \times 40}{16} \quad \text{식(5)}$$

또한 압력의 센서도 마찬가지로이며 4~20mA의 전류값을 0~20kg/cm²에 대응하여 환산하면 아래 식 (6)에 의하여 바(1bar = 1.02kg/cm²) 압력으로 계산할 수 있다.

$$P_D = \frac{(P_{mA} \times 1000 - 4) \times 20}{16} \times 1.02 \quad \text{식(6)}$$

온도센서의 경우 정확한 절대온도 값이 필요한 것이 아니고, 펌프 입출력단 간의 차 온도만이 펌프 효율 계산에 관계하므로 계측 전에 1/1,000°C까지 두 온도계의 온도차가 나지 않도록 캘리브레이션을 행한다.

온도센서로부터 읽어 들인 데이터의 경우 15에서 30초 사이에 8개나 그 이상의 값들을 취하여 평균화 함으로써 온도 변화 값을 완화하고, 급격한 변화를 줄일 수 있도록 하였다. 다른 데이터 값도 모두 동일한 방법으로 평균화하였다.

펌프의 전 양정은 아래의 식 (7)에 의해서 계산된다.

$$H = \frac{P_D - P_D}{\rho \times g} \quad \text{식(7)}$$

Fig. 7은 펌프효율 측정을 위한 모니터링 프로그램의 화면을 나타낸다. 펌프 측의 센서들에서 입력된 값들은 실시간으로 수치와 그래픽으로 표시가 된다. 또한 모든 데이터는 엑셀 포맷으로 저장되어 추후에 분석을 할 수 있으며, 열역학적 방법과 수력학적 방법으로 계산된 효율이 동시에 표시됨으로써 그 차이 또한 확인할 수 있다. 경우에 따라서 펌프 현장에 효율측정을 위한 센서가 고정 설치되어 있는 경우도 있는데, 이와 같은 경우는 각 센서의 측정 범위만 소프트웨어적으로 변경하면 좀 더 편리하게 펌프효율 측정이 가능하다.

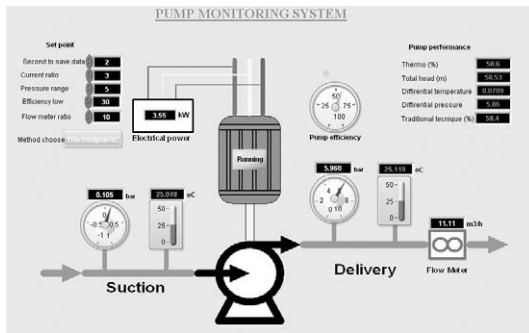


Fig. 7 User interface for pump efficiency measurement

3. 펌프효율 측정 실험

Fig. 8은 펌프효율 측정을 위해 구성한 전체적인 실험장치의 구성도를 나타낸다. 실외에 설치된 2,000리터 용량의 탱크내의 물은 Pump A와 Pump B의 운전에 따라 순환하여 다시 탱크의

상부로 되돌아오는 폐루프를 구성하고 있다.

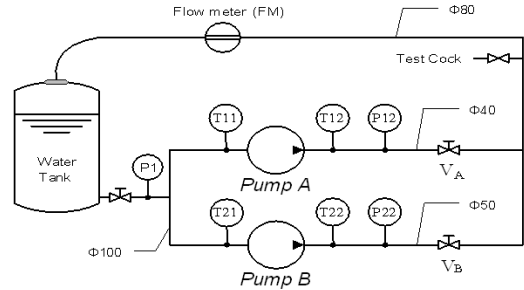


Fig. 8 Experiment installation in closed loop

Pump A와 Pump B는 모두 입형 다단 펌프로 DOOCH사에서 제작되었으며, 그 상세한 사양은 Table 4와 같다.

Table 4 Description of pumps

Pump A	
Model	DRL8-50
Power	3 [kW]
Q	9 [m³/h]
Total head	66 [m]
Motor efficiency	87.5 [%]
Speed	3500 [rpm]

Pump B	
Model	DRL16-50
Power	7.5 [kW]
Q	20 [m³/h]
Total head	85 [m]
Motor efficiency	89.5 [%]
Speed	3500 [rpm]

Pump B의 용량이 Pump A에 비해 용량이 크며 따라서 Fig. 8에서 보는 바와 같이 두꺼운 직경의 파이프에 Pump B가 설치되어 있다. 이들 펌프 실제 사진은 Fig. 9에 나타낸다.



Fig. 9 Photo of Pump A and B

펌프효율 측정은 실험실내에서 위 2대의 펌프를 대상으로 실시하였으며, 효율측정의 타당성을 확인하기 위해 메이커에서 제공한 펌프효율곡선상의 효율과 비교 검토하였다.

4. 실험결과 및 검토

4.1 펌프 입출구단의 온도차

Fig. 10은 Pump A를 6.2 bar의 압력으로 7시간 동안 운전 후 표시한 입출력단의 온도차 그래프를 나타낸다.

펌프의 임펠러를 통과한 출력측 물의 온도가 입구온도에 비해 높은 것을 알 수 있으며, 그 차는 0.182°C를 나타낸다.

순환하는 물은 외부로 빠져 나가지 못하고 폐루프 내에서 계속해서 순환하기 때문에 수온은 시간이

지남에 따라 점차적으로 증가함을 알 수 있으나, 그 차이는 거의 동일한 값을 유지하고 있다.

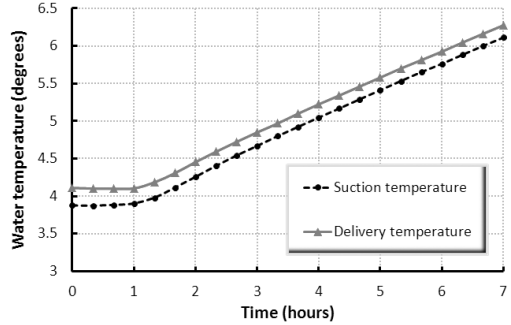


Fig. 10 Differential temperature of Pump A

Fig. 11은 Pump B를 9 bar의 압력으로 7시간 동안 운전 후 표시한 입출력단의 온도차 그래프를 나타낸다.

Fig. 10 그래프와 같이 폐루프내를 순환하는 물로 인해 시간이 지남에 물의 온도는 점진적으로 상승하였으며, 입출력단의 온도차는 0.105°C이었다. 용량이 큰 Pump B의 경우 두 온도차가 용량이 적은 Pump A에 비해 줄어들었음을 알 수 있다. 따라서 만일 용량이 더 큰 전동기의 입출력간의 온도차를 측정한다면 그 차이는 더 줄어들 것으로 예측이 되며, 이를 계측하기 위해서는 더욱더 정밀한 온도센서를 사용해야 할 것이다.

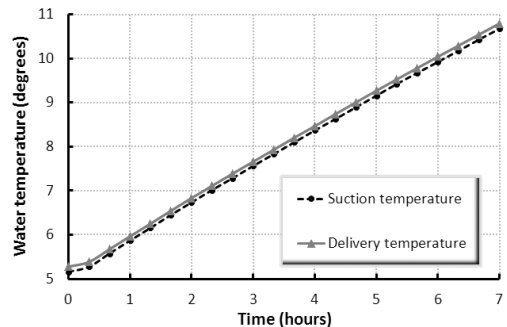


Fig. 11 Differential temperature of Pump B

4.2 펌프 입출구단의 압력차

펌프효율은 펌프입출구단의 압력차의 변화에 따라 많은 차이를 실험을 통해서 확인하였고, 반복 실험을 통하여 Pump A의 경우 약 6.2bar의 압력차에서 가장 높은 펌프의 효율을 얻었다. 또한 용량이 큰 Pump B의 경우는 9bar에서 최고 효율을 얻었다.

Fig. 12는 최대 효율이 측정되었을 때, Pump B의 입출력 압력을 나타내는 그래프이다. 입력단은 거의 압력이 없는 대기압과 같은 상태이며, 출력은 대부분 9bar를 나타내고 있다.

펌프제조사에서 제공되는 펌프성능곡선의 경우 주로 펌프유량 변화를 기준으로 효율을 표시하고 있다. 압력변화와 유량변화는 밀접한 관계를 가지고 있으며, 본 연구에서도 압력변화 대신에 유량변화를 기준으로 효율 등을 나타내고 있다.

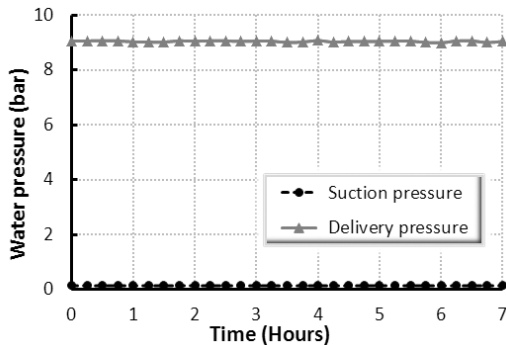


Fig. 12 Differential pressure of Pump B

4.3 펌프효율의 측정 및 분석

Fig. 13은 Pump A를 대상으로 Fig. 14는 용량이 큰 Pump B를 대상으로 유량변화를 하여 측정된 펌프의 효율곡선을 나타낸다. 맨 상단에 위치한 곡선이 펌프제조사에 제공한 성능곡선을 나타내며,

하단에 표시된 두 개의 곡선이 펌프효율 측정 장비로 측정한 결과를 나타낸다. 전체적으로 열역학적 방법이나 수력학적 방법 모두 비슷한 경향을 보이고 있지만, 수력학적 방법이 좀 더 변화가 크지 않고 제조사 성능곡선과 근접해 있다는 것을 확인할 수 있다. 두 펌프 모두 설계치 보다는 약간 낮은 효율로 측정되었지만, 이는 펌프 설치등과 관련된 오차로 예측할 수 있다. Pump A의 경우 유량이 11m³/h (6.2bar)에 근접할 때 최고의 효율인 60%에 도달하였고, 효율의 정확도는 전형적으로 그 오차를 ±2%를 보기 때문에, 실제 제조사의 설계 효율과 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다. 또한 좀 더 정밀한 온도센서를 사용한다면 그 오차를 ±1% 내로 줄일 수도 있을 것이다.

Fig. 14의 Pump B의 경우는 유량이 22m³/h (9bar)에서 수력학적 방법으로는 62%~63%의 효율이 측정되었으며, 열역학적 방법으로는 62%~64%가 측정되었다. 열역학적 방법으로 측정된 효율 곡선의 변동 폭은 Pump A에 비해 용량이 큰 Pump B가 좀 더 작은 것을 알 수 있으며, 이는 펌프의 입출력단의 온도차의 변화량이 Pump B가 작은 것에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 좀 더 대용량의 펌프의 효율을 열역학적 방법으로 측정한다면 효율곡선이 좀 더 매끄럽게 계산될 것이다.

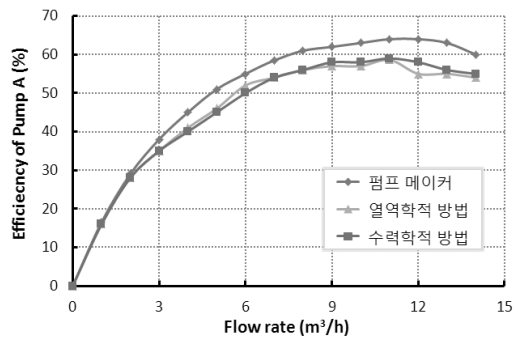


Fig. 13 Efficiency curve of Pump A

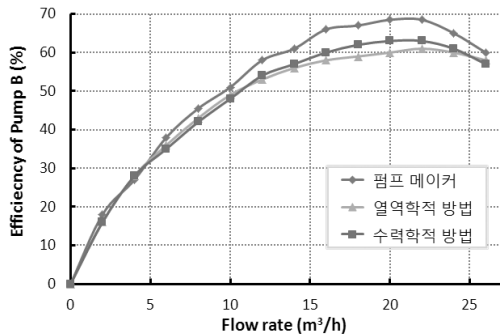


Fig. 14 Efficiency curve of Pump B

Fig. 13에서와 같이 Pump A의 유량을 변화시켰을 때 최고의 효율을 얻은 지점은 유량이 11m³/h였다. Fig. 15는 이 최고의 효율지점에서 유량을 11m³/h로 고정하고 그 지점에서의 효율안정도를 나타낸 그래프이다. 약 20시간 넘게 최적의 유량으로 연속 운전한 결과를 나타낸다.

그래프에서 알 수 있듯이 수력학적 방법의 효율 변화는 약 58%~60% 사이를 변화한 반면, 열역학적 방법은 58%~61%정도의 범위에서 그 변화가 측정되었다. 열역학적 방법의 계측이 약 1%정도 많은 변화를 나타냄을 확인할 수 있다. 이는 온도센서의 민감도에서 그 차이가 발생한 것으로 예측된다.

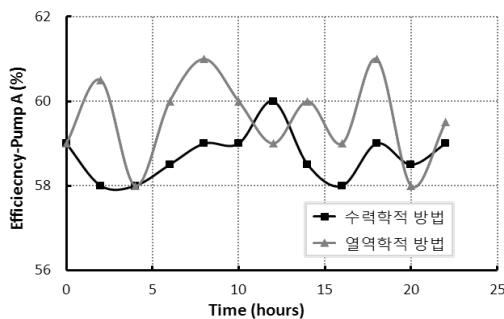


Fig. 15 Efficiency curve of Pump A at Q=11m³/h

Pump B의 최고효율을 나타낸 유량은 22m³/h으로 측정되었으며, Fig. 16은 최고효율 유량으로 Pump

B를 20시간 이상 연속 운전한 효율의 변화를 나타낸다. 열역학적 방법은 62%~64%의 2% 변화가 있었으나, 수력학적 방법은 62%~6%의 1% 정도밖에 변화가 없었다. 따라서 용량이 좀 더 큰 펌프의 경우는 그 효율 변화량이 좀 더 줄어들 것으로 예측된다.

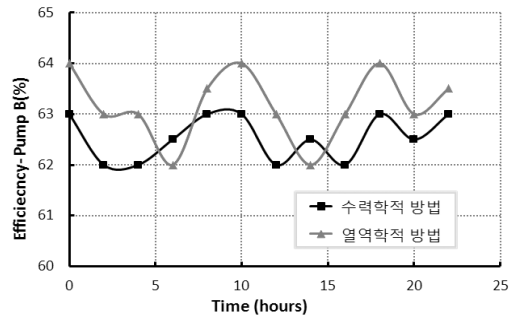


Fig. 16 Efficiency curve of Pump B at Q=22m³/h

Fig. 17과 18은 펌프 제조사에서 제공한 양정 데이터와 본 측정 장비로 계측하여 식 (7)에 의해

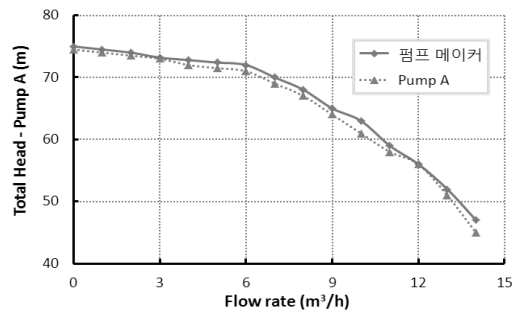


Fig. 17 Total head of Pump A

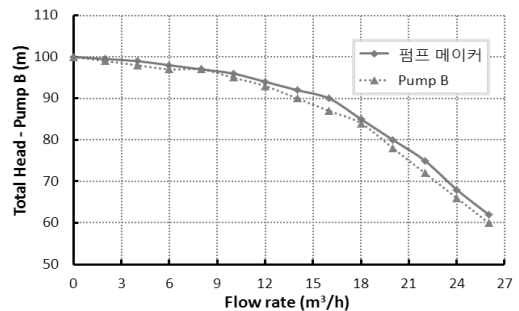


Fig. 18 Total head of Pump B

계산한 양정을 각각 펌프별로 비교한 그래프이다. Pump A나 Pump B 모두 제조사의 양정과 유사한 결과를 얻었음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

휴대용 펌프효율을 측정할 수 있는 장비를 개발하여 측정실험을 한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 수력학적 방법이 열역학적 방법 두 가지 방법으로 모두 동시에 측정할 수 있는 장비와 소프트웨어를 구현하였다.
- (2) 두 방법에 의한 효율측정 후 펌프 제조사에서 제공한 성능곡선 결과를 비교한 결과 비슷한 결과를 얻어 그 정확도를 확인할 수 있었다.
- (3) 최고 펌프 효율 지점에서 연속운전시 2~3%의 효율 변화가 있었으나 이는 펌프효율을 결정하는데 충분한 오차로 예상된다.
- (4) 수력학적 방법에 의한 효율측정이 좀 더 정확한 결론을 얻었으나, 실제 필드에 나가서 적용할 경우 고가의 정밀도 높은 유량계의 설치가 필수적이다.
- (5) 열역학적 방법의 경우 수력학적 방법에 비해 효율의 정확도는 약간 떨어지는 편이나, 2개의 온도센서와 2개의 압력센서만으로 구현할 수 있어 간단히 효율을 측정할 수 있다.
- (6) 펌프의 효율을 측정할 수 있는 두 가지 방법을 동시에 행함으로써 각각의 장단점을 비교 활용하여 펌프효율 측정의 정확도를 높일 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) <http://www.pumpcalcs.com/calculators/view/107>
- (2) 권영준, 서창덕, 정용채, 박장원, “열역학법에 의한 펌프의 수력효율측정, 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 546-551, 2004
- (3) Shantaram.S. Patil, H.K. Verma, Arun Kumar, “Efficiency measurement of hydraulic machines by thermodynamic method,” IGHEM, India Oct, 2010.
- (4) Mazyar Jalayer, “Energy reduction in pumping low consistency pulp fiber suspensions,” B.A.Sc, The University of British Columbia, 2007.
- (5) Routley Ross and Ken Baxter, “Pump Efficiency Monitoring and Management at Melbourne Water”, Bendigo, 2005.
- (6) Noah D. Manring, Measuring Pump Efficiency: Uncertainty Considerations, The ASME, Vol 127, pp. 280-283, 2005.
- (7) Gary W. Johnson and Richard Jennings, LabVIEW Graphical Programming 8.0, Fourth edition, McGraw-Hill, New York 2003.
- (8) M Zangeneh(2007), “Advanced Design Software for Pumps,” Wold Pumps, pp. 28-31.
- (9) <http://www.autrol.com>
- (10) <http://konics.co.kr>
- (11) http://www.m-wintec.co.kr/goods/goods_01_1.asp
- (12) <http://www.ni.com/products/>