

# 열역학적 방법을 이용한 펌프 운전성능 평가법 검토

강신형\* · 김진권\* · 홍순삼\*\* · Alex Yates\*\*\*

## Evaluation of Thermodynamic Method for Pump Performance Measurement

Shin-Hyoung Kang\*, Jin-Kwon Kim\*, Soon-Sam Hong\*\*, Alex Yates\*\*\*

*Key Words: Pump Performance(펌프성능), Thermodynamic Method(열역학적 방법), Yatesmeter(에이즈메터)*

### ABSTRACT

Thermodynamic method of pump performance measurement calculates pump efficiency and flowrate by measuring fluid temperature increase and pressure rise through the pump. The theory of this method is investigated and precise comparison experiment with classical hydraulic method was conducted to verify the accuracy. Classical hydraulic pump performance measurement results and Yatesmeter results based on the thermodynamic method showed good agreement in measured performance.

### 1. 서 론

에너지를 대량으로 소비하는 펌프의 경우에 설치된 기계가 설계된 유량, 즉 최고효율점에서 운전이 되도록 기계와 시스템을 매칭하는 것이 중요하다. 설치된 펌프는 수십 년을 수명으로 운전되기 때문에 운전 도중 관로 상태가 변하고 또 펌프 자체의 성능이 변하여, 최고 효율점을 벗어나서 운전되는 경우가 많다. 이러한 경우 운전상태를 실시간 또는 정기적으로 평가하여 펌프가 최적의 상태에서 운전되도록 유지하는 것은 에너지 절약 및 경제적인 관점에서 매우 중요하다.

펌프성능은 일정한 펌프 회전수에서 유량에 따른 압력상승, 동력 및 효율의 변화를 나타낸다. 펌프성능을 측정하기 위한 전통적인 수력학적 방법에서는 오리

피스, 노즐, 피토관 등을 이용하여 유량을 측정하고, 압력상승량과 펌프의 축 토크 및 회전수를 측정하여 이들을 구한다. 최근에는 간편한 초음파 유량계 등을 사용하기도 한다. 펌프의 성능측정은 주로 제작자의 시험실이나 연구실에서 이루어진다. 이때 신뢰성있는 계측기기를 각종 규정에 따라서 설치하고 계측하기 때문에 평가된 성능은 그 신뢰도가 높다. 그러나 현장에서 제품의 성능을 평가하는 경우에는 계측기기, 특히 유량계를 규정에 맞게 설치하기 어려운 경우가 많다. 또한, 여러 대의 펌프가 병렬 또는 직렬 운전될 때 각각의 운전상태를 평가하기 위해서 각 펌프마다 유량계를 설치함은 비경제적이다.

전통적인 방법에 비해 널리 알려지지 않았지만, 펌프를 통한 유체의 온도상승을 측정하여 펌프의 손실을 직접 평가하고, 이를 이용하여 효율을 평가하는 소위 열역학적 방법이 있다. 액체는 열용량이 커서 유동손실에 대한 유체온도의 상승은 매우 작기 때문에, 이에 따른 온도의 증가량을 무시하는 수력학적인 관점에서 그 정확도가 의심되는 방법이었다. 그러나, 열역학적

\* 서울대학교 기계항공공학부  
\*\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부  
\*\*\* Advanced Energy Monitoring Systems, UK.  
E-mail : kangsh@snu.ac.kr

방법은 1963년에 Foord 등<sup>(1)</sup>이 고정밀도의 교류저항 브리지를 1/1000 K 까지 온도를 측정할 수 있도록 구성함으로써 실용화가 가능하게 되었다.

1964년에 Foord 등<sup>(2)</sup>은 저압 및 고압 펌프에서 효율을 측정하여 기존의 방법과 1% 이내로 일치함을 확인하였다. 열역학적 방법을 이용하는 펌프성능 측정법으로 영국 AEMS (Advanced Energy Monitoring System)사에서 개발된 Yatesmeter는 유량계 전후에 직경의 5-10배 길이의 공간을 확보해야 하는 전통적인 방법에 비해서, 설치상의 제한이 적으면서도 정확도가 있다는 주장하에 실용화된 계측시스템이다. 그러나 아직 우리나라의 산업체에서는 이에 대한 직접적인 경험이 없기 때문에 Yatesmeter에 대한 신뢰성을 확인할 수 없었다. 이의 정확도가 수력학적 방법과 유사하다는 것이 확인되거나 설치조건에 따른 그 성능특성이 파악된다면, 유량을 측정하기 위하여 별도의 계측장치 없이도 현장에서 펌프의 운전성능을 측정할 수 있어서, 펌프의 작동상태를 쉽게 모니터링할 수 있게된다.

이러한 배경하에서 먼저 실험실 내에서 전통적인 수력학적 방법에 의한 펌프성능 측정결과와 Yatesmeter에 의해서 측정된 펌프성능 측정결과를 비교, 검토함으로써, 열역학적 방법에 의한 펌프성능 측정법의 신뢰성을 검토해 보는 것은 관련된 기술자에게 유익한 자료가 될 것이다.

## 2. 이론적 배경 및 관계식

펌프를 입 출구를 가진 정상상태 단열 개방시스템으로 단순화하여 열역학 제 1법칙을 적용하면, 펌프에 입력되는 일률  $\dot{W}_m$ 은 유효한 출력일률  $\dot{W}_{out}$ 과 손실을  $\overline{Losses}$ 의 발생으로 나타난다.

$$\dot{W}_m = \dot{W}_{out} + \overline{Losses} \quad (1)$$

여기서 유효출력일  $\dot{W}_{out}$ 은 유량  $Q$ 와 전헤드 상승  $\Delta H$ 의 곱으로 표시된다. 이때 펌프 내에서 발생하는 각종 유동손실  $\overline{Losses}$ 가 통과하는 유체의 온도상승  $\Delta T$ 로 나타난다고 하면,

$$\dot{W}_{out} = Q \cdot \rho g \Delta H \quad (2-a)$$

$$\overline{Losses} = Q \cdot \rho C_p \Delta T \quad (2-b)$$

로 표현된다.

이때 펌프의 효율  $\eta_p$ 는 입력일률에 대한 유효한 출력일률의 비이므로

$$\eta_p = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{W}_m} = \frac{1}{1 + \frac{C_p \Delta T}{g \Delta H}} \quad (3)$$

와 같이 계산될 수 있다.

한편, 펌프의 유효출력  $\dot{W}_{out}$ 은 모터의 입력일률  $P_m$ , 모터효율  $\eta_m$ , 펌프효율  $\eta_p$ 의 곱으로 표시되므로

$$\dot{W}_{out} = Q \cdot \rho g \Delta H = P_m \eta_m \eta_p \quad (4)$$

의 관계가 성립하고, 유량  $Q$ 는

$$Q = \frac{P_m \eta_m \eta_p}{\rho g \Delta H} \quad (5)$$

에 의해서 계산될 수 있다.

열역학적 방법에서는 펌프의 성능을 식 (3)과 식 (5)를 사용하여 구하게 된다. 즉, 펌프 전후의 온도상승량  $\Delta T$ 와 전헤드상승량  $\Delta H$ 를 측정하여 식 (3)에서 펌프의 효율을 계산하고, 모터의 입력전력  $P_m$ 을 측정하고, 모터의 효율  $\eta_m$ 을 결정할 수 있으면, 식 (5)에서 유량  $Q$ 를 구할 수 있다. 따라서 성능특성 즉, 유량  $Q$ 에 대한 전헤드상승  $\Delta H$  및 펌프효율  $\eta_p$ 의 변화를 구할 수 있다.

이 방법에서 가장 핵심이 되는 사항은 손실을 직접 평가한다는 것이며, 이를 위해서는 펌프를 통한 온도 상승량  $\Delta T$ 를 신뢰성 있게 측정할 수 있는 계측방법이 확보되어야 하고, 또 계측된 온도차이가 유동손실을 의미있게 나타낼 수 있어야 한다. 또한 이 방법이 의미를 가지기 위해서는 펌프 입출구에서의 온도분포가 온도 측정 정확도의 범위 이내로 균일해야 하고, 베어링이나 실링 등의 기계적 마찰열이 유체의 온도 상승에 영향을 미치지 않아야 하며, 펌프로부터 대기로의 열 전달량이 무시될 수 있어야 한다. 일단 펌프의 효율이 평가된 다음에 식 (5)에서 유량을 추정하게 된다. 이때 모터의 부하와 작동온도에 따라서 변동하는 모터의 효율  $\eta_m$ 을 합리적으로 추정할 수 있어야 한다.

## 3. 실험장치 및 방법

전통적인 수력학적 방법에 의해서 펌프의 성능을 정밀하게 측정할 수 있는 Fig. 1의 펌프성능 시험장치

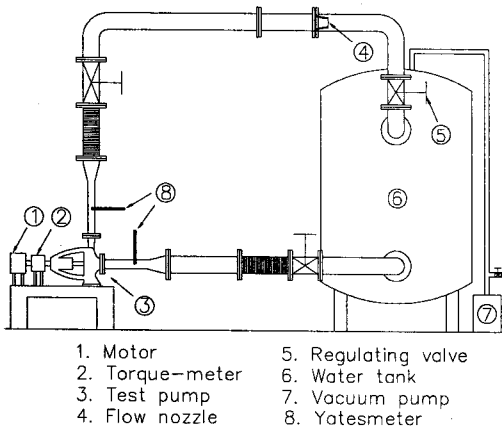


Fig. 1 Configuration of pump performance test facility

에서, 전통적인 수력학적 방법에 의한 펌프성능시험과 온도상승 및 모터입력일을 측정에 의한 Yatesmeter에 의한 펌프성능시험을 동시에 실시하였다. 사용된 펌프는 15마력의 3상 유도전동기에 의해 1750 rpm 으로 구동되고, 작동점에서 유량  $Q=1.2 \text{ m}^3/\text{min}$ , 헤드  $H=30\text{m}$ , 일률 15마력이고, 임펠러 직경 260mm인 원심펌프 HES 65-250이다.

전통적인 수력학적 방법에서 유량  $Q$ 는 미리 검정된 노즐의 차압을 측정함으로써 계산하고, 헤드상승  $H$ 는 펌프 입출구에서 압력을 압력변환기를 사용하여 측정한다. 펌프 구동축에 설치된 토크측정기에서 펌프입력 토크  $\tau$ 를 측정함으로써 입력일률  $\dot{W}_m$ 을 계산하고, 이를 이용하여 효율  $\eta$ 를 계산한다. 비교실험과 별도로 측정된 펌프의 차원화된 성능특성을 Fig. 2에 나타내었다. 두가지 회전수 1750과 1500 rpm에서 평가된 성능은 상사성이 매우 좋다. 유량계수의 증가에 따라 압력계수가 감소하고, 일률이 증가하는 전형적인 원심펌프의 성능특성을 나타내고, 약 63%의 최대효율을 가진다. 여기서 무차원화에 사용된 단위는 회전수  $n$ 은 rps 이고, 나머지는 모두 SI 단위계를 사용하였다.

성능시험 장치에서는 인버터로 펌프의 회전수를 정속 제어하면서 실험할 수 있도록 되어 있지만, Yatesmeter의 전력계가 인버터의 출력신호로 부터 모터입력전력을 측정하는데 문제가 있어서, 3상 유도전동기를 직결하여, 부하에 따라 변동하는 회전수는 타코미터로 측정하였다. Yatesmeter 방법에서는 펌프 입출구 직경의 2배 정도 떨어진 파이프 부분에 Fig. 3 에서와 같이 설치된 탭에 압력센서와 온도센서를 설치하고 유체 온도차  $\Delta T$ 와 헤드상승  $H$ 를 측정하여 식 (3)에서 펌프

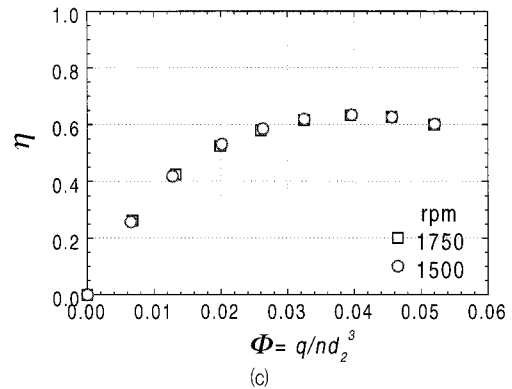
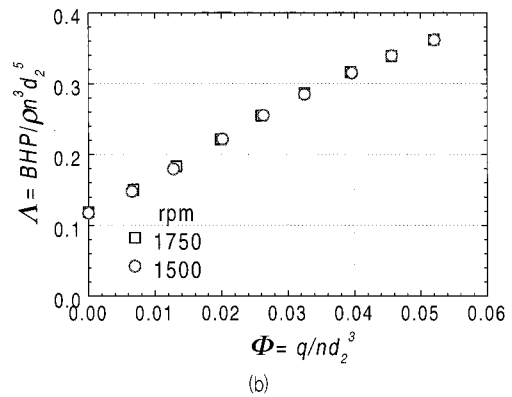
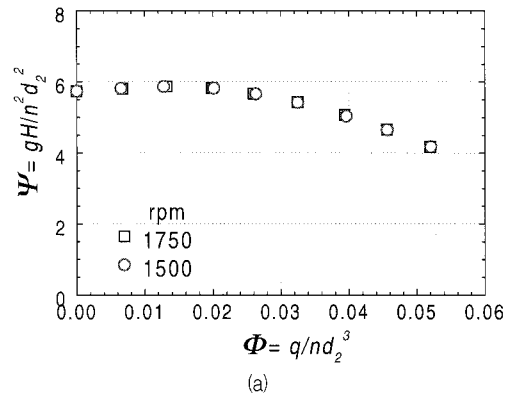


Fig. 2 Performance characteristics of the pump

효율  $\eta_p$ 를 구하고, 모터의 입력전력  $P_m$ 을 측정함으로써 유량  $Q$ 를 계산한다. 그러나, 이번 실험에서는 모터의 입력전력  $P_m$ 을 측정할 수 없어서 모델링된 모터의 효율  $\eta_m$ 을 사용하는 대신에, 토크미터로부터 구해진 펌프입력 일률을 식 (5)의  $P_m \eta_m$ 에 사용하여 유량을 계산하였다.

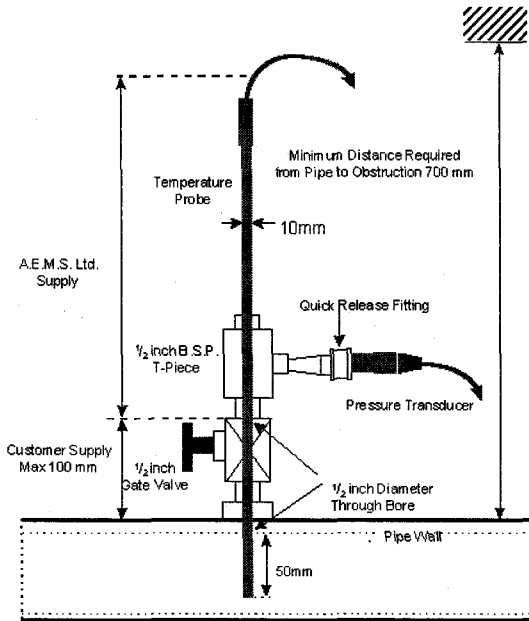


Fig. 3 Configuration of Yatesmeter installation

#### 4. 실험결과 및 검토

##### 4.1 온도상승량 측정의 정확도 및 재현성

열역학적 방법에 의한 펌프성능 측정방법에서 가장 관심있는 사항은 펌프를 통한 유체의 미소한 온도상승량을 효율의 측정에 필요한 정밀도와 재현성을 가지고 측정할 수 있는냐는 것이다. 적용된 펌프에 대해서 펌프 입구의 수온과 펌프를 통한 수온 상승을 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 실험장치가 Fig. 1에서와 같이

폐회로를 구성하기 때문에 실험을 진행함에 따라 내부의 수온은 조금씩 상승한다. 밸브를 최대한 연 상태에서 서부터 밸브를 잠그면서 유량을 줄여가면서 측정했기 때문에, 펌프입구에서 측정된 수온을 나타낸 Fig. 4(a)에서 유량이 줄어들며 따라 수온이 상승하는 것을 알 수 있다. 전 범위의 유량을 측정된 뒤에 최고효율점 유량에서 반복 실험을 하여 검은 점으로 나타내었다. 이때의 펌프 입출구를 통한 수온의 상승량을 측정하여 Fig. 4(b)에 나타내었다. 온도상승량은 수두손실에 비례하는데, 측정된 펌프에 대해서 온도상승량은 대체로 50 mK (milli-Kelvin)에서 120 mK사이의 값을 나타낸다. 설계유량 부근에서 손실이 적으므로 온도상승이 적고, 유량이 감소함에 따라 손실의 증가에 의해서 온도상승량이 증가함을 확인할 수 있다. 실험이 진행됨에 따라 수온이 상승한 이후에 재측정한 최고효율점은 검은 점으로 나타내었으며, 첫 번째 측정점과 일치함을 알 수 있다.

펌프성능이 회전수에 대한 상사를 이루므로, 펌프의 특정한 운전점 (여기서 예로 설계점)에서 관로의 밸브 개도를 고정한 채로 펌프회전수를 변화시키면, 펌프 내부의 수력학적 손실은 펌프회전수의 제곱에 비례할 것이므로, 온도상승 역시 회전수의 제곱에 비례하는 경향을 보여야 한다. 이를 통해서 온도차 측정의 재현성을 확인하고 손실수두의 변화에 대한 예측된 온도차의 변화가 합리적인지를 확인하기 위하여, 회전수를 변화시키면서 펌프를 통한 유체의 온도상승을 측정하여 Fig. 5에서 검토하였다. 온도차  $\Delta T$ 를 펌프의 회전수  $n$ 의 제곱으로 나눈 값이 거의 일정한 값을 나타내고 있으므로 합리적인 경향을 나타낸다고 볼 수 있다.

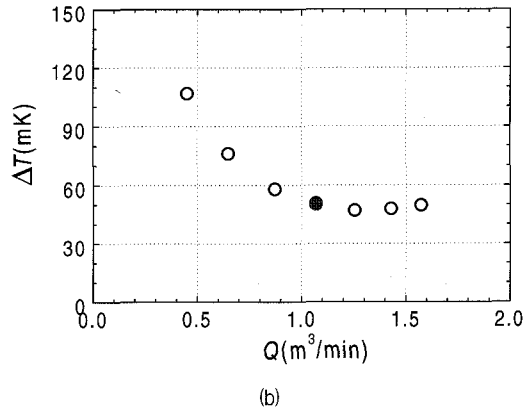
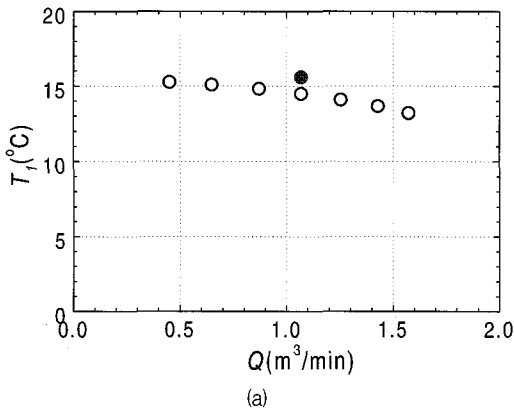


Fig. 4 Variation of (a) inlet temperature and (b) water temperature increase through the pump measured by Yatesmeter

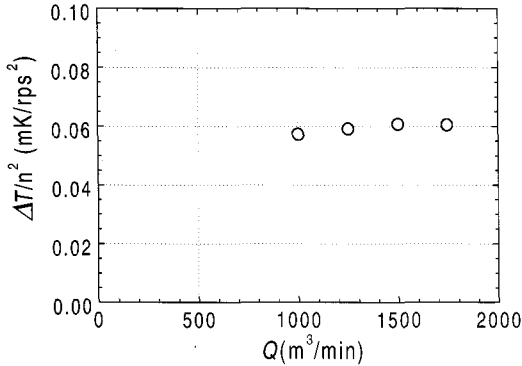


Fig. 5 Variation of water temperature increase through the pump with rotational speed of impeller

참고로 AEMS사에서는 펌프의 전양정이 25m 이상인 경우에 Yatesmeter의 사용을 권고하고 있다. 이는 수두손실이 이보다 작은 경우 온도측정에 의한 손실 예측의 신뢰성이 적어짐을 의미한다

#### 4.2 성능측정 결과비교

동일한 펌프에 대해서 유량, 압력, 토크 측정에 의한 전통적인 수력학적 펌프성능측정과 온도차, 압력, 모터 입력파워 측정에 의한 열역학적 방법에 의한 성능측정을 동시에 실시하여서, 측정된 성능을 비교하였다. 단, 본 비교실험의 경우에 Yatesmeter가 영국으로부터 수송 도중 전력계 부분이 파손되어, 모터의 입력파워를 측정하여 모터효율 모델로부터 식 (5)의 분자를 계산하는 대신, 전통적 방법에 의해서 측정된 펌프의 입력

토크값을 입력하여 유량을 계산하였다. 즉, 열역학적 방법의 두가지 핵심요소 중 하나인 모터효율 모델 및 그에 의한 유량측정의 정확도는 검증할 수는 없었지만, 나머지 한 핵심요소인 펌프를 통한 온도차의 측정에 의한 펌프효율의 측정은 비교해 볼 수 있다.

전통적 수력학적 방법에 의해서 측정된 효율과 열역학적 방법에 의해서 측정된 효율을 Fig. 6(a)에 나타내어 비교하였다. 대응하는 검은 원과 흰 원으로 표시된 각 측정점은 동시에 측정된 점으로 동일한 작동점을 나타낸다. 여기서 효율은 각 방법에 의해서 독자적으로 측정된 값이고, Yatesmeter의 유량값은 측정된 토크의 값을 이용하여 구해진 것이다. 대응하는 각 점들은 유량 뿐만 아니라 효율이 잘 일치하고 있다.

헤드상승을 나타낸 Fig. 6(b)는 서울대학교 실험장치의 압력계와 Yatesmeter의 압력계에 의해서 측정된 헤드 상승량을 나타낸다. 헤드 상승량의 평가는 손실 및 효율의 평가와는 이론적으로 무관한 사항으로, 두가지 방법 모두 파이프 벽면에서의 정압을 압력변환기를 사용하여 측정한 값이다. 여기서 두 방법의 수두 차이는 압력계측의 위치 및 검정의 차이에서 나타난다고 생각된다.

본 연구에서는 동일한 펌프에 대하여 두가지 방법으로 효율을 측정하여 비교한 바, 두 결과가 상당히 신뢰성있게 일치하고 있음을 나타내었다. 앞으로 다양한 유동손실과 계측되는 온도의 차이와의 상관관계의 검증, Yatesmeter의 설치위치 및 설치된 위치의 유동 및 온도의 비균일성이 성능 결과에 미치는 영향 등에 대한 추가적인 연구를 수행한다면 그 성능을 보다 깊이 평가할 수 있겠다.

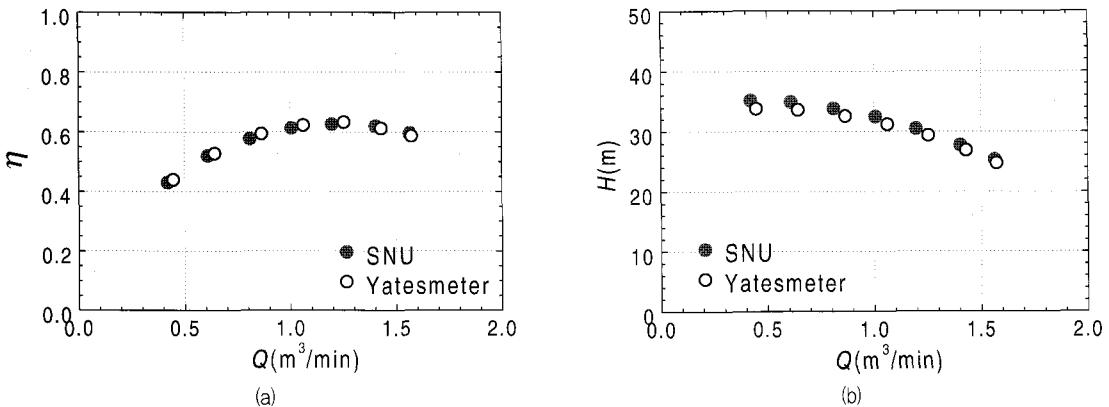


Fig. 6 Comparison of (a) head and (b) efficiency characteristic measured by classical method of SNU and thermodynamic method of Yatesmeter

## 5. 결 론

펌프를 통한 유체의 온도상승량을 측정함으로써 손실량을 계측하고 펌프의 효율을 평가하는 열역학적 방법에 의한 펌프성능 측정법을 검토하였다. 또 전통적인 수력학적 방법에 의한 펌프의 성능측정과 Yatesmeter를 사용하는 열역학적 방법에 의한 펌프성능 측정결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

온도 측정에 의한 펌프의 효율측정은 본 실험의 범위 내에서 합리적인 정확도와 재현성을 나타내었다. 열역학적 방법으로 측정된 펌프의 성능은 전통적인 수력학적 방법으로 계측된 펌프의 성능과 실험오차 한도 내에서 잘 일치하였다.

## 후 기

본 연구를 수행할 수 있도록 일부 장비와 기술인력을 지원해 준 EMS Korea 이종락 사장님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Foord, T. R., Langlands, R. C. and Binnie, A. J., 1963, "Transformer-ratio bridge network with precise lead compensation and its application to the measurement of temperature and temperature difference," Proceedings of I.E.E, Vol. 110, No. 9, pp. 1693~1700.
- (2) Foord, T. R., Langlands, R. C. and El-agib, A. R., 1964, "Thermometric Method of Measuring Hydraulic Efficiency," Water Power October 1964, pp. 432~434.