

벡터 제어 인버터 구동 원심펌프시스템의 에너지 절감 평가

서상호*† · 김경욱** · 김형호** · 윤인식*** · 조민태***

Evaluation of Energy Saving with Vector Control Inverter Driving Centrifugal Pump System

Suh Sang-Ho*, Kyungwuk Kim**, Hyoung-Ho Kim**, In Sik Yoon***, Min-Tae Cho***

Key Words : Inverter driving centrifugal pump system(인버터 구동 원심펌프시스템), Operation efficiency(운전효율), Variable speed drive(가변속 운전), Energy saving rate(에너지 절감율), Duty cycle(펌프 사용율)

ABSTRACT

The purpose of this study is to achieve energy saving effect of inverter driving multistage centrifugal pump. For determining the operation points in the pump system, the system curves should be obtained experimentally. To get the system curves, three pumps combined in parallel and one pump operated with different rotational speeds. But for variable speed pump system, energy saving rates can not be evaluated from operation efficiencies. That is why operation efficiencies, system curves, duty cycles, and input powers of the pump system were measured by the constructed experimental apparatus. The duty cycle segmented into different flow rates and weighting the average value for each segment by the interval time. The system was operated with two different periods. The mean duty cycles were collected from apartment and found that the system operated at 40% and at 50% or below capacity. Measured energy saving rate was 58.16%. Estimating method of energy saving rate could be more effective operation index than that of operation efficiency.

1. 서론

이산화탄소 규제가 강화됨에 따라 에너지의 효율적 사용은 매우 중요한 이슈가 되고 있다. 최근 국토교통부는 ‘친환경 주택의 건설 기준 및 성능’ 고시를 개정해 전용면적 60㎡ 이상과 이하의 새 아파트는 에너지 사용량을 기존 대비 각각 40%와 30% 이상 줄이도록 했다. 원심펌프는 산업용 전력 소비량의 큰 부분을 차지하는 유체기계이므로 효율을 높이기 위한 연구가 이루어지고 있다⁽¹⁾. 펌프의 형상 최적설계를 통한 효율 향상 연구는 지속적으로 수행되고 있으며⁽²⁻⁶⁾ 펌프 전체 시스템의 효율 향상을 위해 인버터 구동 회전수 제어 방식을 통한 연구도 활성화 되고 있다. 최근 펌프 전체 시스템의 성능 향상을 위해서는 펌프와 연결된 유도전동기, 인

버터의 효율 증가와 작동방식의 개선 등이 요구된다. 인버터 구동 시스템에서 사용하는 유도전동기의 제어방법은 크게 스칼라 제어 방식과 벡터 제어 방식으로 나눌 수 있다.⁽⁷⁾ 스칼라 제어 방식에는 전압과 주파수의 비를 일정하게 하는 V/F 제어가 있으나, 이 방식은 자속의 크기만을 제어하기 때문에 고효율이 요구되거나 정밀한 제어가 필요한 곳에는 적합하지 않다. 벡터 제어 방식은 토크와 자속을 분리하여 제어하기 때문에 정밀하고 고효율의 제어를 할 수 있다. 인버터 구동 방식으로 가변속 운전을 할 경우 운전효율을 크게 향상시킬 수 있다. 그러나, 가변속 펌프에 대한 운전효율 측정방법과 성능지표에 대한 연구는 거의 없는 것으로 조사되었다.⁽⁸⁾ 본 연구의 목적은 가변속 펌프의 운전효율을 구하여 에너지 절감효과를 평가하는 것이다. 먼저 가변속 펌프의 운전효율을 평가할 수 있는

* 송실대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Soongsil University)

** 송실대학교 대학원 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Soongsil University)

*** (주)두크(Dooch Co., Ltd.)

† 교신저자, E-mail : suhsh@ssu.ac.kr

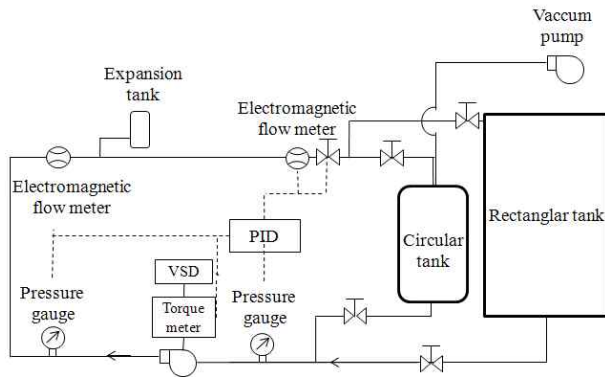


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus

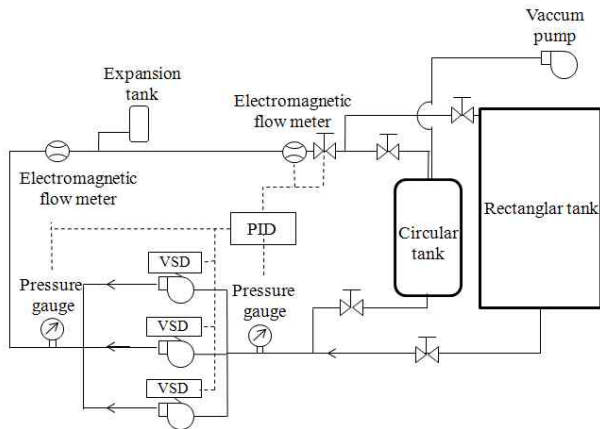


Fig. 2 Experimental layout of 3 pumps in parallel operation

실험장치를 설계·제작하여 운전효율을 평가할 수 있는 방안을 강구하고, 에너지 절감효과를 평가할 수 있는 평가시스템을 구축하여 에너지 절감효과를 평가하였다.

2. 시험장치 구축과 평가방법

가변속 구동 펌프는 정속 구동형 펌프시스템과는 달리 부하 사용량에 따라 적정한 가변속 운전을 통해 운전효율을 향상하고 사용 에너지를 절약할 수 있다. 가변속 펌프시스템에 대한 에너지 절감효과를 평가할 수 있는 규격화된 평가 방법이나 검증방법은 없다. 본 연구에서는 가변속 운전에 따른 평가 방법에 관해 연구하였다.

2.1 시험장치 구축

가변속 펌프의 성능특성을 구하기 위해 Fig. 1과 같은 평가시스템을 설계하고 제작하였다. 제작된 펌프시스템은 전자유량계와 전동밸브 및 컨트롤 장치를 부착하여 가변속 펌프의 성능특성을 구할 수 있게 하였다. 특히, 백터 제어가 가능한 범용 인버터를 부착하였다. 이때 인버터를 통해 펌프

Table 1. Specifications of the experimental equipments

Equipment	Specification
Pump	DR 20-60
Motor	Vector Moter 11 kW
Inverter	SV01101S7-4No-22 A
Electromagnetic Flow Meter	BELIMO BLC100-EPIV
Pressure Tank	PWB-DCP-100LV-4 bar
Vaccum Pump	30 Torr, 1050 l/min, 2.2 kW

속도를 제어하기 위해 전용 성능 소프트웨어를 설치하였다. 펌프의 성능을 비교 평가하기 위한 사각 저수탱크의 길이는 2.5 m, 폭과 높이는 각각 4.5 m와 2.5 m로 하였다. 공동현상 실험을 위한 원형 저수탱크의 크기는 직경 1.5 m, 높이 2.5 m로 4m³이고, 공통 배관의 직경은 100 mm, 시험용 펌프 배관의 직경은 50 mm이다. 시험용 펌프 전후 각각 5D 만큼의 간격에 각각 -1~1 bar, 0~15 bar 범위의 압력계를 설치하였다. 시험용 펌프는 입형 다단 원심펌프 11 kW, 5.5 kW급이고, 3상 유도전동기를 사용하였고, 펌프에 전달되는 축동력을 정확히 측정하기 위해 시험용 펌프와 유도전동기 사이에 토크미터를 설치하였다. 수격작용 방지를 위한 팽창탱크, 유동제어 PC와 연결되어 유량을 자동제어 할 수 있는 복합유량계와 수동으로 조절하기 위해 게이트밸브를 설치하였다. 캐비테이션 시험을 위해 진공펌프를 원형 저수탱크에 설치하였다. 펌프 시험장비의 사양은 Table 1과 같다.

2.2 운전 효율 및 에너지 절감 평가방법

2.2.1. 운전효율 평가방법

펌프의 운전점은 양정곡선과 저항곡선이 만나는 교점으로 정의된다. 가변속 구동의 운전효율을 평가하기 위해 펌프의 양정-유량 곡선과 펌프시스템의 저항곡선을 구해야 한다. 이를 위해서 병렬로 된 펌프 3대를 이용하여 펌프를 1대 단독운전, 2대 및 3대 병렬 운전하여 저항곡선을 구하였다. 일반적으로 펌프의 저항곡선을 구하기 위해 펌프 1대의 정격유량 100%를 기준으로 펌프 2대 구동 시 정격유량의 140%, 펌프 3대 구동 시 정격유량 150%의 유량에 해당하는 운전점으로부터 시스템 저항곡선을 구하는 경험적인 방법을 이용한다. 펌프 1대를 구동했을 때의 정격유량에 대한 운전점 A, 두 대 작동했을 때 정격유량의 140% 되는 운전점 B 그리고 세 대 작동했을 때의 정격유량의 150% 되는 운전점 C를 구한 뒤 이 교점이 통과하는 곡선을 저항곡선으로 하였다. Fig. 3에 위와 같은 방법으로 구한 저항곡선이 제시되어 있다. 경험적으로 구한 저항곡선과 달리 펌프를 1대, 2대 그리고 3대 운전했을 때 효율이 최대가 되는 유량을 기준으로 한 운전점을 연결하여 Fig. 4와 같이 저항곡선을 구하였다.

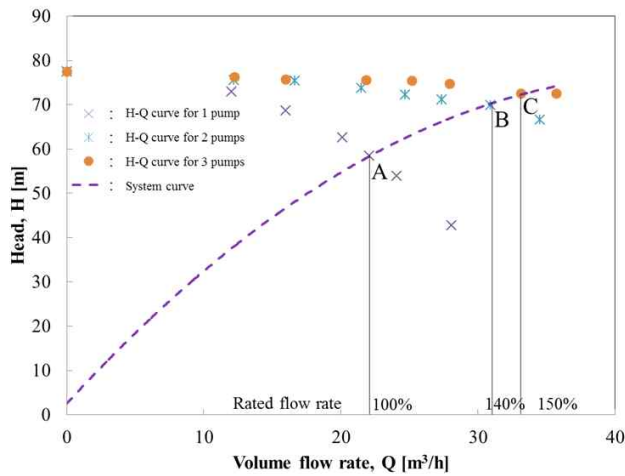


Fig. 3 Pump system curve by the empirical method

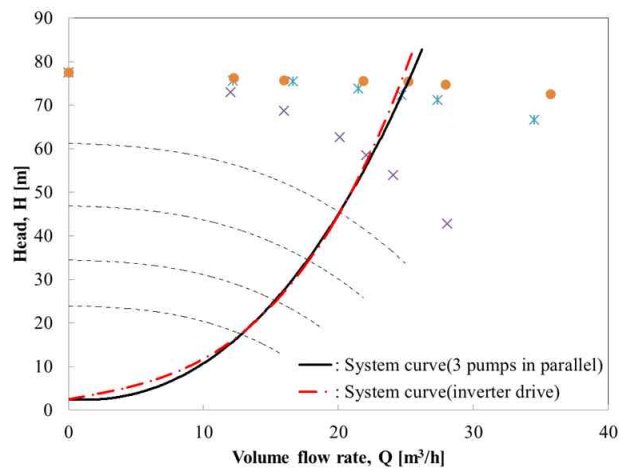


Fig. 5 Comparison of system curves by the inverter drive and 3 pumps in parallel operation

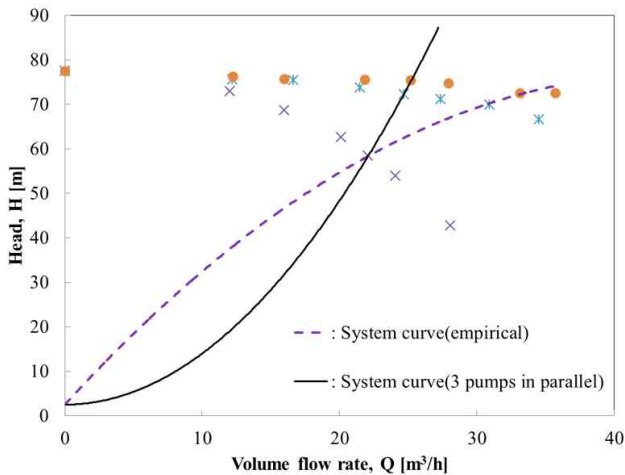


Fig. 4 Comparison of system curves by the empirical method and 3 pumps in parallel operation

Fig. 4에는 경험적인 방법으로 구한 저항곡선이 함께 제시되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 서로 다른 방법으로 구한 저항곡선의 경향은 다르게 나타난다. 두 저항곡선 중에서 어느 저항곡선이 물리적으로 타당한지 여부를 검증하기 위하여 가변속 펌프의 회전속도를 변화시키면서 Fig. 5와 같이 정격유량에서의 저항곡선을 구하였다. Fig. 5에는 Fig. 4의 결과들이 중첩되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 펌프를 3대 병렬 운전하여 효율이 최대가 되는 운전점으로 구한 저항곡선과 회전속도를 변화시키면서 구한 운전점을 이용하여 구한 저항곡선은 거의 일치한다. 저유량과 고유량 범위에서는 2% 이내의 오차를 나타내지만 그 사이 유량 영역에서는 저항곡선이 완전히 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 가변속 펌프의 운전효율을 구하기 위해서는 가변속도에 따른 양정-유량곡선과 저항곡선만 구하면 된다. 즉, 다시 말해 여러 대의 펌프를 병

렬 운전하여 저항곡선을 구하는 방법을 이용할 필요가 없음을 실험으로 확인할 수 있다.

가변속 운전 시의 펌프시스템의 운전효율을 구하기 위해 시스템 저항곡선을 구하였으나 가변속 운전의 경우 회전수에 따라 유량과 양정이 계속적으로 변하여 하나의 효율값을 가질 수 없기 때문에 운전효율을 가변속 운전 시의 펌프시스템의 성능지표로 구하는 것은 쉽지 않다. 이러한 문제점에 대한 대안으로 정속 운전 시의 펌프시스템과 가변속 운전 시의 펌프시스템의 입력동력을 구하여 가변속 운전 시 절감되는 에너지 절감율을 평가지표로 삼는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

2.2.2. 에너지 절감 평가방법

운전효율을 이용하여 에너지 절감율을 구할 수는 없다. 가변속 펌프의 에너지 절감율을 구하는 방법은 먼저 성능시험을 수행하여 가변운전 시 성능특성(H-Q, P-Q, η -Q)과 앞서 적용한 방법으로 저항곡선을 구한 뒤, 펌프 사용율(duty cycle)을 실험으로 측정하여 정속운전과 가변속 운전 시의 에너지 사용량을 비교하는 것이다. 운전 시 펌프의 축동력은 토크미터를 통하여 측정하고, 펌프 시스템에 필요한 입력동력은 제어 인버터를 통하여 측정한다. 펌프의 유량패턴은 해당 펌프의 사용 용도에 따라 달라지게 된다. 펌프의 유량패턴을 측정하기 위해서는 펌프가 설치된 곳에 유량계를 설치하여 실시간으로 유량의 변화를 측정하여 데이터를 수집해야 한다. 유량패턴을 측정하여 백분율 정격유량에 대한 백분율 총 운전시간을 구해야 한다. 구해진 입력동력과 평균 사용율⁽⁹⁾로부터 연간 에너지 절감율⁽¹⁰⁾을 구하여 벡터 제어 인버터 구동 원심펌프시스템의 성능을 평가하는 지표로 사용할 수 있다.

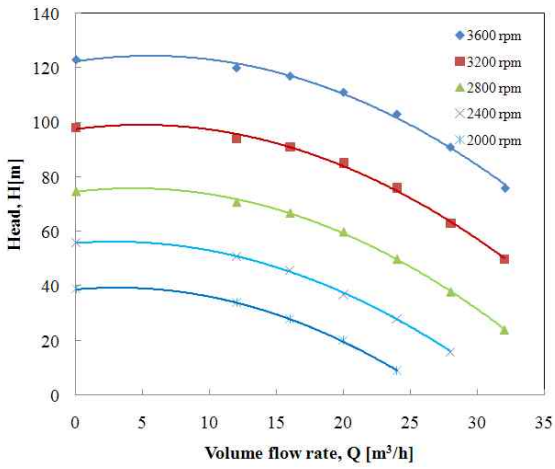


Fig. 6 H-Q curves with different rotational speeds

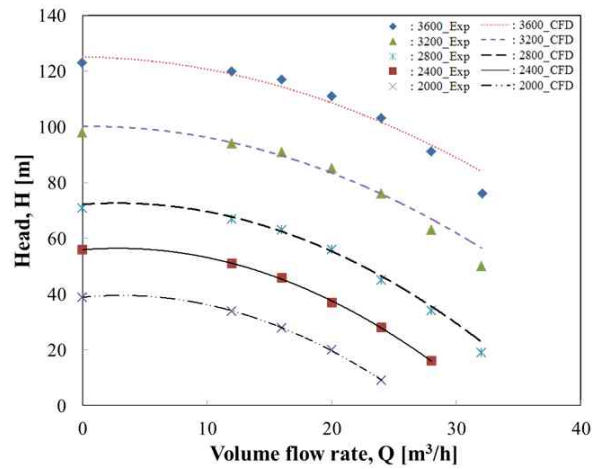


Fig. 9 Comparison of the experimental and numerical H-Q curves

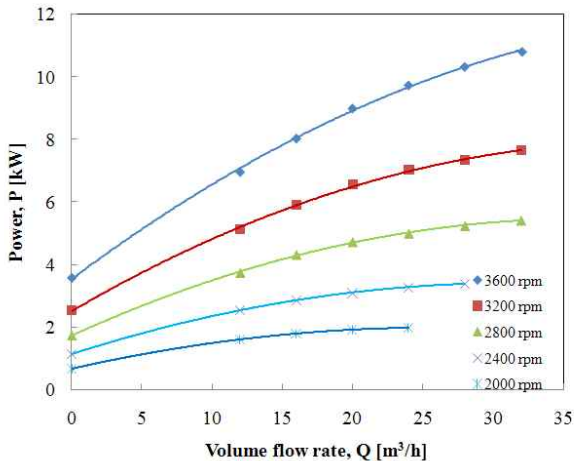


Fig. 7 P-Q curves with different rotational speeds

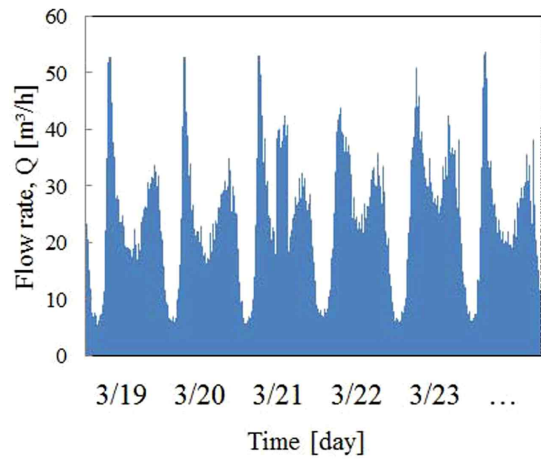


Fig. 10 Flow rate patterns of the pump system

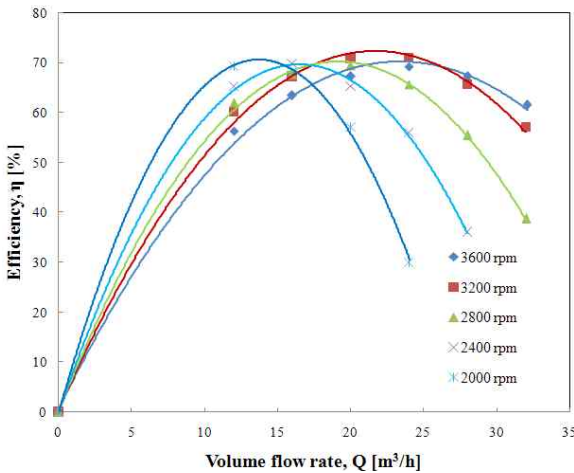


Fig. 8 η - Q curves with different rotational speeds

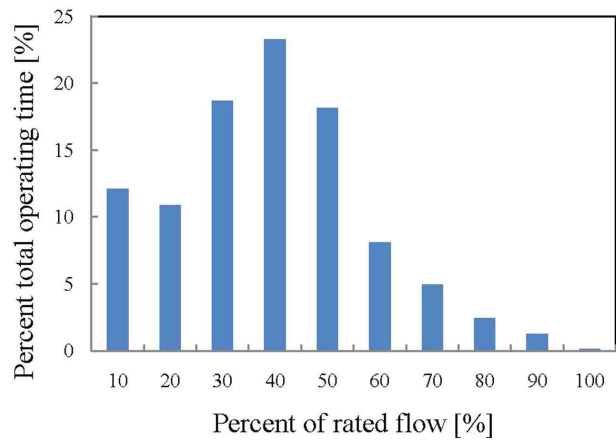


Fig. 11 Mean duty cycle of the pump (March 19 to April 2, 2014)

3. 결과 및 검토

가변속 펌프의 에너지 절감율을 구하기 위해 성능특성을 Fig. 1과 같은 실험장치를 이용하여 Figs. 6~8과 같이 구하

였다. 실험으로 구한 성능특성의 신뢰성을 검증하기 위해 수치시뮬레이션을 수행하여 구한 결과와 비교하였다(Fig. 9). 시험결과와 수치시뮬레이션 결과는 잘 일치함을 확인할 수 있다. 시험용 펌프가 설치된 아파트 단지 내에 초음

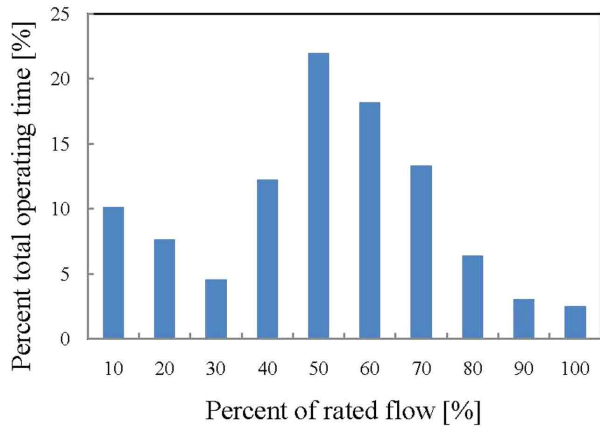


Fig. 12 Mean duty cycle of the pump (March 19 to June 3, 2014)

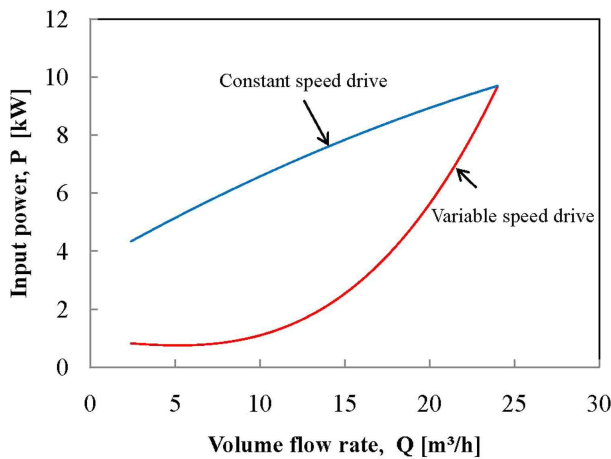


Fig. 13 Pump input power versus flow rate for the constant and variable speed drives

파 유량계(FLUXUS F601)를 설치하여 2014년 3월 19일부터 4월 2일까지의 기간과 2014년 3월 19일부터 6월 3일까지 기간의 유량을 측정하였다. 측정된 유량패턴은 Fig. 10과 같다. 서로 다른 측정 기간 동안의 유량패턴은 유사한 것처럼 보이지만 총 측정 기간에 따라 펌프의 평균 사용율은 차이가 나는 것을 확인하였다. 펌프의 평균 사용율은 펌프의 정격 유량을 100%로 하여 10% 간격으로 10개의 구간으로 나누어 구간에 해당하는 사용율을 나타내었다. 펌프의 평균 사용율은 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 펌프의 평균 사용율 차이는 가변속 운전 시의 에너지 절감율 평가에 직접적으로 영향을 주기 때문에, 펌프 평균 사용율의 측정 기간을 가능한 길게 하는 것이 정확한 에너지 절감율을 구할 수 있다는 것을 확인하였다. 펌프 사용량에 따라 구분된 10구간의 유량범위에 대해 정속운전과 가변속 운전 시의 입력동력을 Table 2와 Fig. 13에 나타내었다. 작동시간을 연간 8760 시간(365일×24시간)으로 가정하여 계산하였을 경우 정속운전과 가변운전 시의 연간 에너지 사용량을 Table 3에 나타내었다. 정속운전과 가변운

Table 2 Comparison of power requirements for constant and variable speed pump systems

Flow (m ³ /h)	Head (m)	Shaft Power (kW)	Input Power (kW)
24.0	103.31/103.31	9.69/9.69	11.03/11.03
21.6	108.47/81.15	9.24/6.68	10.55/7.70
19.2	112.63/80.11	8.77/5.68	10.02/6.61
16.8	115.90/51.63	8.25/3.43	9.44/4.13
14.4	118.38/34.56	7.69/1.97	8.80/2.36
12.0	120.19/25.88	7.09/1.24	8.12/1.51
9.6	121.44/28.50	6.46/1.13	7.39/1.37
7.2	122.22/30.42	5.78/1.01	6.60/1.21
4.8	122.65/31.63	5.08/0.86	5.77/1.03
2.4	122.83/31.90	4.33/0.69	4.88/0.83

Table 3 Annual energy consumption for constant and variable speed drive systems

Flow (%)	Operation time(hr)	Input Power (kW)	Energy (kW · hr)
100	219.00	11.03/11.03	9.80×10 ³ /9.80×10 ³
90	267.67	10.55/7.70	7.06×10 ³ /5.15×10 ³
80	559.66	10.02/6.61	4.02×10 ³ /2.65×10 ³
70	1168.00	9.44/4.13	10.10×10 ³ /4.42×10 ³
60	1593.83	8.80/2.36	16.92×10 ³ /4.54×10 ³
50	1922.33	8.12/1.51	12.94×10 ³ /2.41×10 ³
40	1070.66	7.39/1.37	8.63×10 ³ /1.60×10 ³
30	401.50	6.60/1.21	3.69×10 ³ /0.67×10 ³
20	669.17	5.77/1.03	1.54×10 ³ /0.28×10 ³
10	888.17	4.88/0.83	1.07×10 ³ /0.18×10 ³
		Total	75.77×10 ³ /31.70×10 ³

전 시의 연간에너지 사용량은 각각 75.77×10³ kW·h와 31.70×10³ kW·h이다. 가변속 운전을 통한 펌프 시스템의 연간 에너지 절감량은 44.07×10³ kW·h로 58.16%의 절감율을 보였다.

4. 결론

벡터 제어 인버터 구동 원심펌프시스템의 성능을 평가하기 위하여 시험장치를 설계하고 구축하였다. 실험과 수치시뮬레이션으로부터 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 인버터 구동 원심펌프시스템의 운전효율을 측정하기 위해 펌프 3대를 병렬로 연결하는 방법과 펌프 1대를

가변속 운전하여 구하는 방법을 사용하였고, 이들 결과들을 경험적인 시스템 저항곡선과 비교하였다. 세 방법 중에서 펌프 1대를 가변속 운전하여 시스템 저항곡선을 구하는 방법이 가장 바람직하다.

- 2) 가변속 운전을 하는 펌프 시스템의 경우 운전효율은 펌프회전수에 따라 달라지기 때문에 이를 성능 향상의 평가 지표로 채택하기는 어려움이 많다. 따라서 가변속 펌프의 성능 향상을 평가할 수 있는 지표는 에너지 절감율 평가가 타당함을 확인하였다.
- 3) 에너지 절감율은 가변속 운전에서 따른 운전효율과 시스템 저항곡선, 그리고 펌프 사용율로부터 구할 수 있다. 에너지 절감율에 대한 정확한 평가를 위해서는 충분한 기간 동안 측정된 펌프 사용율을 적용해야 한다.
- 4) 본 연구에서 적용한 인버터 구동 원심펌프시스템의 가변속 운전 시의 에너지 절감율은 정속운전에 비해 58.16%이다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20132010101870)

References

- (1) Aníbal T. de Almeida, Fernando JTE Ferreira and Dick Both., 2005, "Technical and economical considerations in the application of variable-speed drives with electric motor systems.", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41. No. 1, pp. 188~199.
- (2) Pyun, K. B., Kim, J. H., Choi, Y. S. and Yoon, J. Y., 2011, "Design Optimization of a Centrifugal Pump Impeller using RSM and Design of Volute", Korean Society for Fluid Machinery, Journal of Fluid Machinery, Vol. 15, No. 3, pp. 39~45.
- (3) Kim, S., Choi, Y. S., Yoon, J. Y. and Kim, D. S., 2008,

"Design Optimization of Centrifugal Pump Impeller Using DOE", Korean Society for Fluid Machinery, Journal of Fluid Machinery, Vol. 11, No. 3, pp. 36~42.

- (4) Mo, J. O., Kim, Y. T. and Lee, Y. H., 2012, "Numerical Study on Cavitation Performance Evaluation in a Centrifugal Pump Impeller", Korean Institute of Navigation and Port Research, Proceedings of the 36th KOSME Spring Conference, Vol. 36, No. 2, pp. 286~293.
- (5) Kim, S., Choi, Y. S. and Lee, K. Y., 2009, "A Numerical Study on the Flow Characteristics of Side-suction Inlet Geometry for Centrifugal Pump", Korean Society for Fluid Machinery, Journal of Fluid Machinery, Vol. 12, No. 6, pp. 7-12.
- (6) Jin, H. b., Kim, M. J., Son, C. H. and Chung W. J., 2013, "Spiral Casing of a Volute Centrifugal Pump -Effects of the Cross Sectional Shape-", Korean Society for Fluid Machinery, Journal of Fluid Machinery, Vol. 16, No. 4, pp. 28~34.
- (7) Jacobina, C. B., et al., 1995, "Vector and scalar control of a four switch three phase inverter." Industry Applications Conference, Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS'95., Conference Record of the 1995 IEEE, Vol. 3, pp. 2422~2429.
- (8) Suh, S.-H., Kim, H. H., MD. Rakibuzzaman, Kim, K. W. and Yoon, I. S., 2013, "A Study on the Performance Evaluation of Variable-speed Drive Pump", Korean Society for Fluid Machinery, Proceedings of the KFMA Annual Meeting 2013, p. 188.
- (9) Ma, Zhenjun, and Shengwei Wang, 2009, "Energy efficient control of variable speed pumps in complex building central air-conditioning systems." Energy and Buildings, Vol. 41. No. 2, pp. 197~205.
- (10) Rakibuzzaman, Suh, S.-H., Kim, K. W., Kim, H. H., Yoon, I. S. and Cho, M. T., 2014, "A Study on Energy Saving Rate for Variable Speed Condition of Multistage Centrifugal Pump", The 5th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science 2014, p. 39.