

해수 담수화 공정의 고압펌프 가변속 운전에 따른 동력 절감

우성우*[†] · 김영혁*

Reduction of Power Consumption by Variable Speed Operation of High Pressure Pump in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plant

Sungwoo Woo*[†], Yeonghyeok Kim*

Key Words : Variable-speed Driven Pump(가변속 펌프), Performance Evaluation(성능평가), Operation Efficiency(운전효율), Energy Consumption(에너지 소비)

ABSTRACT

In seawater reverse osmosis desalination plant, pumps consume nearly 90% of the electrical energy. The purpose of this study is to compare the energy consumptions of the high pressure pump before the installation of inverter and after the installation of the inverter and to evaluate the performance of variable speed driven high pressure pump. Calculated energy saving of the variable speed driven high pressure pump was around 14% at relatively clean condition of the membrane. However, the certain extent of the saving should be continuously monitored year by year depending on the fouling and aging of the membranes.

1. 서 론

전 세계적으로 인구의 증가와 기후 변동의 영향으로 이용 가능한 양질의 물이 제한적으로 공급되고 있으며, 수많은 인구가 물 부족 문제에 직면하고 있다. 세계보건기구(WHO)에 따르면 우리나라도 물 부족 국가로 분류되고 있어, 수량 자원 확보에 대한 대책이 필요하다. 우리나라는 여름철에 강수량이 집중되며 대부분의 강수량이 별도로 보관되지 못하고 하천을 통해 바다로 흘러가 여름철을 제외한 기간에는 물 부족이 발생하게 된다. 특히 겨울철 가뭄이 심해지면 봄철 농경용수도 부족하게 되어 그 해 농사에 영향을 미치게 되며, 서해안 등 일부 지역에서는 공장용수도 부족한 실정이다. 이러한 물 부족 문제를 해결하기 위해 해수담수화가 유력한 해결 방안으로 거론되고 있다. 국토의 삼면이 바다로 둘러싸여 있는 우리나라의 지형 특성상 풍부한 해수를 잘 이용 한다면 물 부족국가란 오명을 벗어날 수 있으며 나아가 물을 이용한 복지정책을 통해 물 복지 국가란 명성을 얻을 수 있다. 이를 위해서 해수를 담수로 만드는 기술의 발달과 경제성이 확보되어야 한다. 그리고 해수 담수화에 대한 국민적인 의식수준

개선이 동반되어야 한다. 현재 해수담수화에 대한 인식은 수자원을 인위적으로 변화 시킨 것으로 간주되어 식수에 대한 거부감을 가지고 있다. 사실 해수에는 많은 이온과 불순물이 함유되어 있으나 그 농도는 강물에 비하여 매우 낮은 수준이다. 강물의 경우에는 유기물질이 강물로 유입되면서 심한 규조류 번식으로 인해 언론에서 회자되는 녹조 라떼 문제가 발생하며, 이러한 강물을 취수하여 전통적인 방법으로 정수하여 가정으로 보낼 경우 가정에서 받는 상수도 물에 냄새가 발생하여 시민의 불안을 야기 시키는 경우가 발생한다. 그러나 해수담수화의 경우에는 불순물의 농도가 강물보다 낮을 뿐만 아니라 고도의 정수 처리공정을 거쳐 바닷물을 여과하고 소금 성분의 이온을 제거하기 때문에 일반 강물 정수장의 물 보다 수질이 더 좋다. 이러한 해수담수화를 가정용 및 산업용으로 공급하기 위해서 담수화 하는 생산단가가 저렴해야 하는데, 현재의 해수담수화 플랜트에서는 물 1톤을 생산하기 위해 드는 비용은 일반 강물 정수장 보다 높으며, 이는 전력 에너지 소비가 높기 때문이다. 높은 전력 에너지 소비는 물 생산단가 상승의 주요한 원인이 되므로 에너지 소비량을 절감하는 것이 주요한 관심사가 되고 있다.

* 두산중공업(Doosan Heavy Industries & Construction)

[†] 교신저자, E-mail : sungwoo.woo@doosan.com

산업용 펌프 제어시스템은 유량이나 압력을 제어하기 위하여 일정한 속도에서 운전하고 외부에 조절장치가 있는 정속 펌프 시스템과 펌프의 회전수를 변동시켜 가변속으로 운전하여 제어하는 가변속 펌프 시스템이 있다.^(1,2) 서상호, 김경욱 등은 원심펌프의 가변속 운전에 따른 에너지 절감 효과를 평가할 수 있는 방법에 대해 연구 하였으며⁽³⁾, 최상범, 임명환 등은 선박용 펌프의 해수 온도 변화에 따른 효율적인 유량 제어 연구를 통하여 선박용 해수 펌프에 회전수를 제어할 수 있는 인버터를 설치하여 효율적인 유량 제어를 통한 소비전력 절감 효과를 확인한 결과 온도에 따라 20~30%의 소비 전력 절감효과를 확인 하였다.⁽⁴⁾ 김서훈, 박효순, 송규동 등은 사무소 건물의 HVAC 시스템의 순환 펌프에 인버터를 적용하여 펌프 제어 전략을 여러 방법으로 검토 연구 하였으며, 제어 전략에 따라 8.8~45.9%의 동력 절감 율을 얻었다고 하였다.⁽⁵⁾ 해수 담수화 플랜트에 설치된 펌프들도 이와 유사한 방법으로 제어 할 수 있으나 인버터 등의 초기 투자비용이 저렴하지 않아 플랜트 건설 초기에 선택하기에는 쉽지 않을 수 있다. 그러나 전력 에너지 비용이 비싼 국가에서는 운영비를 감안하여 공장 운영기간 전체에 걸친 전력비 절감 비용을 함께 고려하여 평가해 볼 필요가 있다.

특히 해수 담수화 플랜트에는 공정 단계별로 여러 종류의 송수 펌프들이 필요하다. 즉, 해수를 바다로부터 취수 및 전처리 공정으로 송수하는 해수 공급 펌프(Seawater supply pump), 전처리 공정에서 처리된 해수를 역 삼투 공정으로 송수하는 펌프(Filtered seawater pump) 및 역 세척용 펌프(Back wash pump), 역 삼투 막에 삼투압 이상의 높은 압력으로 해수를 공급하는 고압 펌프(High pressure pump), 생산된 담수에 미네랄을 첨가 하는 공정에서 사용되는 각종 펌프들과 최종 생산된 물을 도시로 송출하는 펌프(Product water transfer pump)등을 들 수 있다. 해수담수화 플랜트의 전력소모량 중 펌프에 의하여 소요되는 에너지는 총 에너지량의 90% 이상에 달한다. 이들 펌프 중 염분을 걸러내기 위해 높은 압력으로 역 삼투 막에 해수를 공급 하는 고압 펌프의 전력 소모량은 펌프에 사용 하는 전력량의 70% 이상을 차지한다. 따라서 고압 펌프의 전력 소모량을 절감하는 것이 해수담수화 플랜트의 전력 소모량을 줄이는 효과적인 방법이 될 수 있다. 본 연구에서는 해수담수화 공정의 고압 펌프에 인버터를 추가 설치하여 고압 펌프를 가변 속도로 운전이 가능하게 함으로써 에너지 절감 효과를 분석하고자 하였다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 연간 해수 온도 및 염도

Fig. 1은 2015년 부산시 기장군 인근의 월별 해수 온도 및 염도 측정 결과를 나타낸 그래프 이다. 해수 온도는 2월

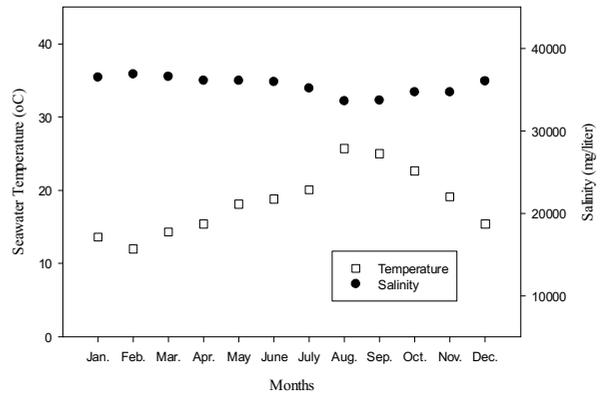


Fig. 1 Monthly seawater temperature and salinity of the site in Busan city

에 12°C로 가장 낮고 8월에 25.7°C 까지 상승하였다. 염도는 7월에 35,125 mg/liter로 가장 낮았고 2월에 36,866 mg/liter로 가장 높았다. 우리나라는 4계절이 뚜렷하며 여름철 집중 강우와 겨울철 가뭄 현상으로 해수의 수온 및 염도가 일 년 내내 변화 된다. 해수 온도는 중동 지역보다 약 10°C 이상 낮은 반면 계절별 온도 변화는 최대 13.7°C까지 많은 차이가 발생하므로 해수담수화 설비에서 에너지 절감을 위한 최적 운전 방안이 필요하다.

2.2 시스템 구성 및 펌프 제어 시스템

2.2.1 시스템 구성 및 펌프 제어 방식

부산시 기장군 대변리에 설치된 해수담수화 플랜트의 2 MIGD (1MIGD=4,546 m³/day) 공정의 역 삼투압 시스템은 Fig. 2 (a)에 나타난 바와 같이 고압 펌프, 모터, 에너지 회수장치 및 역 삼투 막 트레인으로 구성되어 있다. 고압 펌프 및 모터는 설계 당시 결정된 일정한 속도로 회전하며 해수를 가압하여 에너지 회수장치로 공급한다. 시운전 및 역 삼투 막 상태가 파울링 되지 않은 상태일 경우 3~5년 후 파울링 된 상태에 비해 상대적으로 낮은 압력의 해수를 필요하므로 이를 감안하기 위하여 압력 조절 밸브를 고압 펌프 후단에 설치하여 에너지 회수 장치로 공급되는 해수의 압력을 조절한다. 에너지 회수장치는 터보차저(Turbocharger)를 설치하였다. 압력 조절 밸브로부터 유출되는 고압의 해수는 에너지 회수 장치에서 추가로 가압되어 역 삼투 막으로 공급된다. 역 삼투 막에서는 해수로부터 담수가 분리, 생산된 후 남은 해수는 약 6.5%로 농축된 염수(Brine)로 되며 여전히 높은 압력을 갖고 막으로부터 배출되어 에너지 회수 장치의 터빈부로 유입되며 터빈을 회전시켜 그 반대쪽의 동축(同軸)으로 설치된 펌프를 회전시켜 해수를 가압한 후 저압 상태로 된 후 시스템에서 배출된다. 고압 펌프는 일정한 속도로 회전하며 확정된 유량과 압력으로 해수를 송출하는 정속, 정유량 시스템이었다. 그 대신 담수 생산량을 일정하게 유지하기 위

해수 담수화 공정의 고압펌프 가변속 운전에 따른 동력 절감

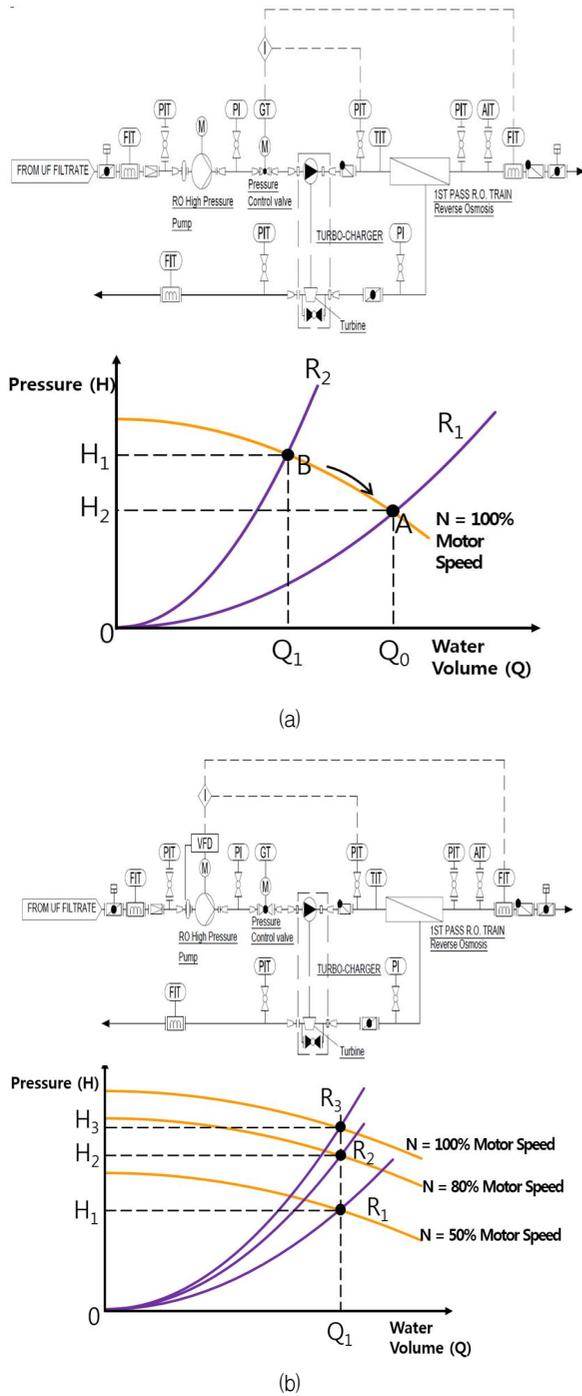


Fig. 2 (a) Constant speed pump and valve control system and (b) variable speed pump system

해 해수 공급 압력 조절 밸브의 개폐 정도를 조절하였다. 이러한 압력 조절 밸브에서 손실되는 수두 차이가 모두 고압 펌프의 동력 손실로 볼 수 있다. 본 연구에서는 제어 방법을 펌프 정속 운전 및 압력제어 밸브의 차압 제어 방식에서 펌프의 변속 운전에 따른 최고 효율 운전 방식으로 제어 방법을 변경하여 고압펌프의 전력 절감 효과를 분석하고자 하였다. Fig. 2(b)는 본 연구에 사용된 가변속 펌프시스템의 펌프 변속제어 계통도 이다. 이를 위해 기존에 설치된 정속 제어

Table 1 Specification of High Pressure Pump/Motor and Inverter

Pump	Model	300×250 RN
	Type	Centrifugal pump
	Differential Head	400 m
	Capacity	835 m ³ /hr
	Efficiency	83 %
	Minimum Continuous flow	200 m ³ /hr
Motor	Type	HRQ3 451-26E
	Power	1,350 kW
	RPM	3,570
	Volts/Phase/Cycles	6,600/3/60
	Full load AMPS	137.3A
	Efficiency	94.5% @100% load
	Efficiency	94.2% @75% load
	Efficiency	93.3% @50% load
	Power factor	0.91
Inverter	Model	N5000-1700H6 IGBT
	Rated Capacity	2,000KVA
	Phases	3
	Rated Frequency	0~60 Hz
	Rated Voltage	6.6 kV
	Rated Current	175 A
	Efficiency	97%

방식의 고압 펌프 및 모터에 인버터를 추가로 설치하는 방안의 기술적 타당성 및 경제적 효과를 분석 하였다. 또한 2014년부터 2015년까지 인버터를 추가 설치하기 전에 운전한 데이터를 수집하였고, 2015년 말 인버터를 설치한 후 2016년 운전한 데이터를 수집하여 인버터 설치 전, 후의 데이터를 분석하였다. Table 1에 본 연구에 사용된 고압펌프와 모터 및 인버터의 사양을 나타내었다. 고압펌프의 용량은 835 m³/hr이며 송출 쪽과 흡입 쪽의 설계 헤드(Head) 차이는 400 m로 설계 되었다. 이 고압펌프의 송출 배관에는 압력제어 밸브가 설치되어 있고 그 후단에는 에너지회수장치가 설치되어 있어 압력제어밸브로부터 나오는 해수를 역 삼투막으로부터 배출되는 고 염수가 보유한 압력에너지에 의해 추가 가압하여 역 삼투막 막으로 공급하도록 되어 있다. 상기 고압 펌프 설계 헤드(Head) 400 m는 해수 온도 변화 및 설치 후 운전 시간 증가에 따라 역 삼투막의 오염에 따른 차압 증가를 감안하여 여유 있게 설계 된 것이다. 해수의 온도가 높거나 역 삼투막의 오염이 적은 상태에서는 상대적으로 낮은 운전 압력이 요구되므로 고압 펌프에서 일정 압력으로 송출 되는 해수의 잉여 압력 에너지는 유량 조절밸브로 조절하게 되므로 그 만큼 에너지 손실을 초래하게 된다. 이러한 에너지 손실을 절감하기 위해 고압 펌프 모터에 인버터를 추가로 설치하여 변속 운전을 가능하게 함으로써 고압 펌프의 동력 에너지를 절감하고자 하였다.

2.2.2 인버터 시스템

본 연구 관련하여 펌프의 회전수 조절을 위한 인버터 시스템을 Fig. 3에 나타내었다. 인버터 시스템은 6.6 kV의 상용 교류 전압을 받아서 펌프 구동 유도 전동기에 가변 전압-가변 주파수(Variable Voltage-Variable Frequency, VVVF)의 출력을 공급하는 장치이며, 상용 전원 입력 측의 진공 회로 스위치(Vacuum Circuit Switch, VCS) 한 면과 인버터 한 면, 출력 측의 진공회로(Vacuum Circuit, VC) 그리고 인버터 시스템의 고장이나 유지보수 시에도 펌프를 운전할 수 있도록 우회 진공회로 브레이커(By-pass VCB)로 구성되어 있다. 인버터 시스템은 6,600 Volts를 760 Volts로 변환 시키는 입력다권선 위상차 변압기와 15셀로 구성된 멀티레벨 전압형 고압인버터 그리고 제어부로 구성된다. 인버터 시스템은 단상 저압인버터의 직렬 다중화에 의한 펄스폭 변조(Pulse Width Modulation, PWM)제어로 별도의 출력 필터 없이 정현파에 가까운 시스템 출력을 제공하는 것이 특징이다. 인버터 시스템을 제어 방식에 따라 분류하면 V/F 제어 방식과 벡터 제어 방식 그리고 센서리스 벡터 제어 방식으로 나누어진다.⁽⁵⁾ V/F 제어 방식은 주파수를 변화시켰을 때, V/F(전압과 주파수 크기의 비)가 일정하면 모터가 발생 할 수 있는 토크도 일정하게 된다는 성질을 이용하여 주파수를 변화시켰을 때 전압도 정해진 패턴으로 동시에 제어하는 방식이다. 표준 모터를 그대로 사용할 수 있는 제어부의 구성이 간단하여 경제성 및 범용성이 높다. 벡터 제어 방식은 모터의 전류를 여자분 제어와 토크분 전류로 분리시켜 제어하는 방식이다. 이 방식은 고정밀도, 고응답이 가능하여 직류기에 필적하는 성능을 얻을 수 있으며 모터의 제반 특성을 기초로 연산에 의하여 제어하기 때문에 전용모터로 그 용도가 한정되며 속도 검출기가 필요하게 되는 등 구성이 복잡하여 범용성이 부족하다. 센서리스 벡터제어 방식은 모터 속도를 속도 검출기를 사용하지 않고 전압, 전류, 주파수에서 추정하여 벡터 연산을 하는 방식으로 모터의 제반 특성에 따른 불균일의 허용 값을 크게 함으로써 표준모터로도 사용할 수 있는 방식이다. 본 연구에 사용된 인버터 시스템은 전압과 운전 주파수의 비를 일정하게 하는 V/F 방식으로 제어되며 주파수 변동에 따라 출력 전압이 0~6.6 kV 범위에서 변동되어 유도전동기에 공급되지만 유도전동기 내부의 자속을 일정하게 유지하는 특징이 있다. 이러한 제어 방식은 펌프, 블로어(Blower), 팬(Fan) 등 초기 구동력이 크지 않고 정밀 제어가 필요 없는 산업용 설비에 널리 채택되고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 인버터 설치 타당성 분석

본 연구 대상인 고압펌프는 2013년 설치 당시 인버터를

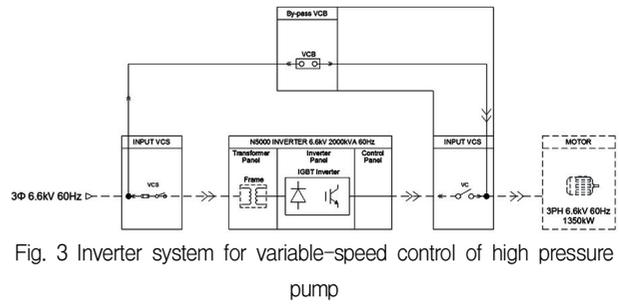


Fig. 3 Inverter system for variable-speed control of high pressure pump

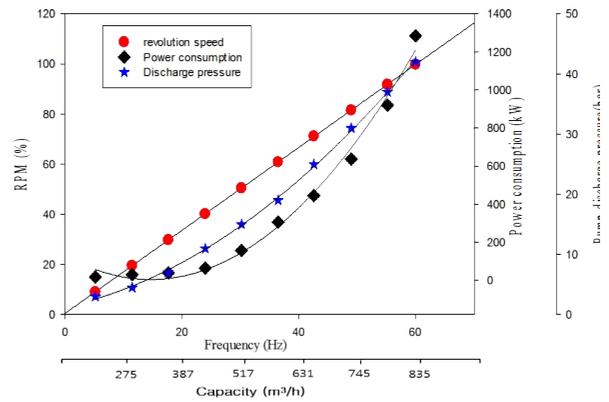
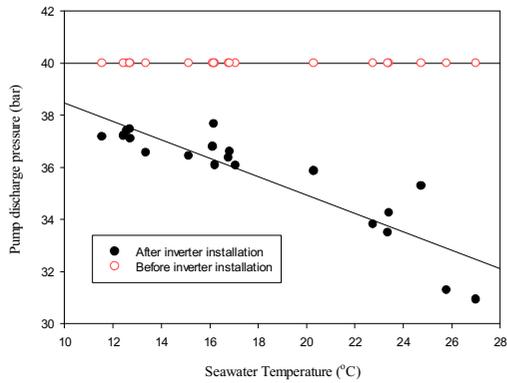


Fig. 4 Variation of Power consumption and revolution speed and pressure as per frequency

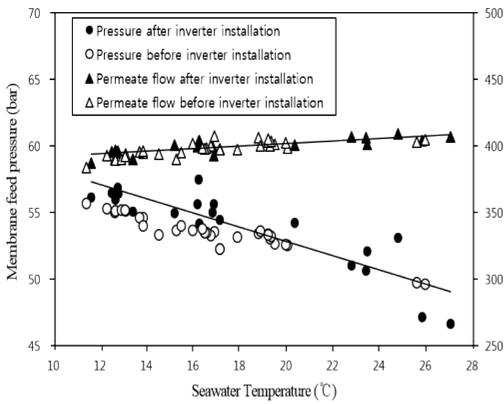
설치하지 않았고 고정된 일정한 속도에서 운전하도록 설계되었다. 그래서 인버터를 설치하여 변속 제어할 경우 기술적 문제점 발생 여부를 펌프와 모터 공급 업체에 문의 하여 가능성을 검토하였다. 펌프의 최소 운전 가능 유량(Minimum flow)은 200 m³/hr 이고, 정상운전 조건에서 송출 유량은 835 m³/hr 이다. 원심펌프이므로 변속 운전에 따른 유량 변화를 충분히 소화 할 수 있다고 판단하였다. 모터의 경우 3상 유도전동기로서 공급 업체에 의뢰하여 주파수 변동에 따른 회전속도 변화가 가능한지 검토하였으며, 변속 운전이 가능하다는 긍정적인 답변을 받았다. 그리고 인버터를 설치할 경우 필요한 추가적인 비용과 향후 운전기간 동안 절감 가능한 에너지 비용을 비교 평가하여 경제성 분석을 실시하였다. 그 결과 비록 인버터 추가 설치비용이 저렴한 것이 아니지만 에너지 절감 금액이 클 것으로 예상하여 수년 이내에 추가 설치비용을 회수할 수 있을 것으로 판단하였다.

3.2 주파수 변화에 따른 펌프의 성능 특성

Fig. 4는 고압 펌프용 모터에 설치된 인버터의 주파수 변화에 따른 펌프 임펠러 회전수와 소비전력, 출력 압력 변화를 실측하여 나타낸 그래프이다. 펌프 임펠러 회전수는 주파수를 5.2 Hz부터 시작하여 6.3 Hz씩 증가시키면서 60 Hz까지 측정된 것을 백분율로 나타낸 것이다. 펌프의 회전수는



(a)



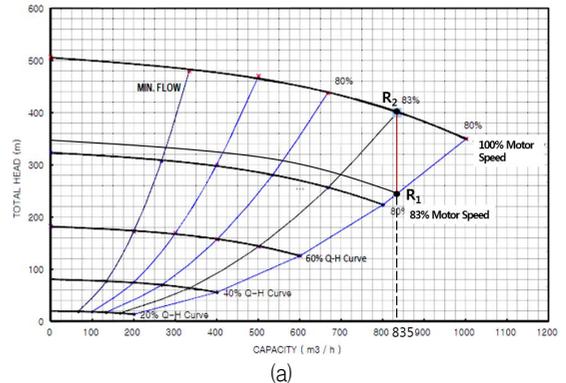
(b)

Fig. 5 (a) Pump discharge pressure vs. seawater temperature and (b) Membrane feed pressure and permeate flow rate vs. seawater temperature

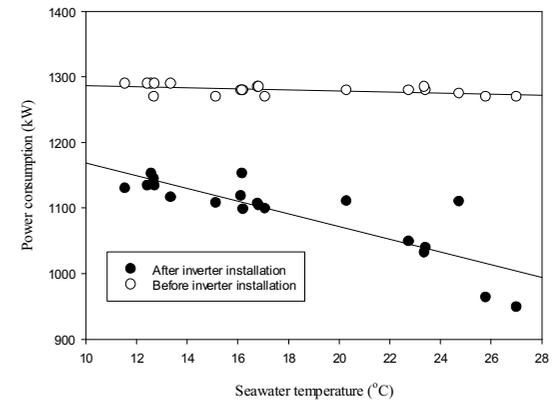
주파수 증가에 따라 일정한 간격으로 직선적으로 증가하였으며, 펌프 출구 압력은 60 Hz에서 42 bar를 나타내었다. 펌프의 동력은 17.7 Hz까지는 완만하게 증가하였으나 그 이후부터 급격하게 증가하였으며, 60 Hz에서 1,284 kW를 나타내었다. 회전수가 50%이고, 펌프 송출 압력이 약 15 bar 미만에서는 회전수 변화에 따른 동력 소모량의 변화는 적은 반면 주파수가 30 Hz 이상이며 회전수가 50% 이상에서는 동력 소모량의 변화가 회전수 변화에 따라 크게 변하는 것을 알 수 있었다.

3.3 해수 온도 변화에 따른 담수 생산량 및 고압 펌프의 송출 압력

Fig. 5(a)는 인버터 설치 전, 후 해수 온도 변화에 따른 고압 펌프의 송출 압력 변화를 나타내었고, Fig. 5(b)는 해수 온도 변화에 따른 역 삼투 막으로 공급되는 해수의 압력 및 생산수의 유량을 나타낸 것이다. 인버터를 설치하기 전인 2014~2015년에는 3,570 rpm의 일정한 속도로 고압펌프가 운전되었으므로 해수 온도 변화에 관계없이 펌프 송출 압력은 약 40 bar로 일정하게 유지되었다. 그러나 2015년 12월



(a)



(b)

Fig. 6 (a) Performance curve of inverter installed HP pump (b) Comparison of power consumptions of HP pump vs. seawater temperature

인버터를 추가 설치 한 후 2016년 운전한 결과 해수 온도가 증가함에 따라 고압 펌프의 송출 압력이 감소하는 추세를 확인 할 수 있다. 이는 동일한 담수 회수율 48.4%로 담수 생산량을 약 395~403 m³/hr 범위에서 일정하게 유지한 상태로 운전한 결과 해수 온도가 높을 경우 역 삼투 막에 공급되는 압력이 낮아 펌프 회전수가 자동으로 조절되기 때문이다.

3.4 해수 온도 변화에 따른 고압 펌프의 동력 절감 효과

Fig. 6 (a)는 인버터 설치된 고압 펌프의 성능곡선을 나타낸 것이다. 정상 운전시 송출 유량은 835 m³/hr으로 유지되며 온도에 따라 송출 압력은 변화하게 된다. 송출 압력의 변화에 따라 Motor Speed도 변화 되는데, R₁과 R₂인 83~100% 범위의 Motor Speed에서 운전되므로 동력 소모량의 변화 또한 나타나게 된다. Fig. 6(b)는 인버터 설치 전과 후의 해수 온도 변화에 따른 고압 펌프의 동력 소모량을 나타낸 그래프이다. 인버터를 설치하기 전에는 설계 당시 확정된 일정 속도로 운전되었으므로 해수 온도 변화에 상관없이 약 1,260~1,290 kW의 전력 에너지를 소모하였다. 그러나 인버터를 설치한 후에는 964~1,155 kW 범위에서 전력 에너지를

Table 2 Comparison of energy cost savings of variable speed pump against fixed speed pump

Temperature ℃	Period days	Fixed speed pump			Variable speed pump		
		Power consumption (kW)	Specific power consumption (kWh/m ³)	Used power consumption (kWh)	Power consumption (kW)	Specific power consumption (kWh/m ³)	Used power consumption (kWh)
11	14	1,276	3.37	428,925	1,132	2.98	380,519
12	56	1,276	3.37	1,715,698	1,132	2.99	1,521,519
13	28	1,276	3.37	857,849	1,132	2.99	760,797
14	39	1,276	3.37	1,194,861	1,130	2.98	1,058,332
15	28	1,276	3.37	857,849	1,127	2.98	757,852
16	25	1,276	3.37	765,937	1,123	2.96	673,990
17	35	1,276	3.37	1,072,312	1,117	2.95	938,599
18	21	1,276	3.37	643,387	1,109	2.93	559,412
19	13	1,276	3.37	398,287	1,101	2.91	343,516
20	12	1,276	3.37	367,650	1,090	2.88	314,087
21	8	1,276	3.37	245,100	1,078	2.85	207,101
22	20	1,276	3.37	612,749	1,065	2.81	511,306
23	20	1,276	3.37	612,749	1,050	2.77	504,141
24	7	1,276	3.37	214,462	1,033	2.73	173,690
25	13	1,276	3.37	398,287	1,016	2.68	316,975
26	8	1,276	3.37	245,100	996	2.63	191,333
27	3	1,276	3.37	91,912	975	2.57	70,244
28	6	1,276	3.37	183,825	953	2.52	137,259
29	9	1,276	3.37	275,737	929	2.45	200,723
Sum	365			11,182,678			9,621,396
Electricity cost* (KRW)				1,230,094,539			1,058,353,553

* Electricity unit cost=110 KRW / 1 kWh

소비하였고, 해수 온도가 증가할수록 전력 소모량이 감소하는 경향을 나타내고 있어 타당성 검토 당시 예상한 바와 같이 에너지 소모량 측면에서 운전이 최적화 되고 있다고 볼 수 있다. 각각의 해수 온도에서 운전된 고압 펌프의 에너지 소모량 측정 데이터를 기반으로 연간 에너지 소비량 절감 정도를 예측하여 Table 2에 나타내었다. 고압 펌프가 해수 온도 변화에 따라 변속으로 운전 되는 경우와 고정된 일정한 속도로 운전되는 경우 모두 일일 기준 24시간 동안 일 년 내 운전된다고 가정하였다. 전력비용은 한전에서 발표한 산업용 전력 요금체계를 기준으로 1 kWh당 평균 110원으로 가정하였다. 2016년 운전 결과 기준으로 연간 전력 에너지 절감 비용은 약 171,741천원으로 인버터 설치 전과 비교하여 약 14% 절감하는 것으로 계산 되었다. 고압 펌프 가변속 운전을 위하여 추가로 설치된 인버터 시스템의 설치비용이 많이 드는 단점이 있지만 에너지 비용 절감 금액을 감안 하면 수 년 내에 투자비를 회수 할 수 있다. 2014년 시운전 후 2016년까지 해당 플랜트는 주위 민원 발생으로 연속적으로

운전되지 못하였고 필요에 따라 간헐적으로 운전되었다. 그래서 역 삼투압 막은 보존 약품을 사용하여 장기 보존을 하여야 하였으며, 수일간의 운전 후 또 다시 보존 과정을 되풀이 하여 역 삼투막 운전 연수는 작다. 향후 장기간 연속 운전이 될 경우 막의 오염 상태에 따라 필요한 압력도 증가할 것이므로 에너지 절감 비용의 크기는 매년 줄어 든 후 막 교체 등으로 운전 안정화된 후에는 일정하게 유지될 것으로 예상된다. 따라서 에너지 절감효과는 향후 수년 동안 지속적으로 관찰하여 평가 할 필요가 있다.

3.5 펌프 효율 평가

펌프의 운전 효율을 포함한 성능 특성 평가 방법은 열역학적 방법과 수력학적 방법으로 평가할 수 있다. 열역학적 방법에 의한 평가 방법은 펌프의 효율을 측정 할 때 온도와 압력만으로 측정이 가능하다. 그러나 해수 담수화 플랜트에서 고압 펌프 전, 후의 해수온도 변화가 크지 않기 때문에 열역학적 방

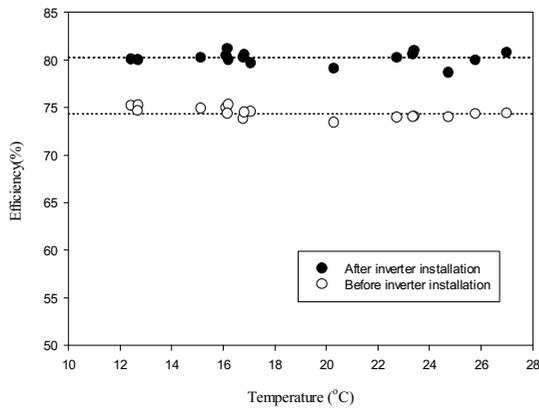


Fig. 7 Comparison of H.P pump efficiencies vs. seawater temperature

법보다 수력학적 방법으로 펌프의 효율을 평가 하였다. 효율 계산은 아래 식(1)와 식(2)를 통해 식(4)와 같이 계산하였다.

$$H = (P/\rho g + V^2/2g + z)_{discharge} - (P/\rho g + V^2/2g + z)_{suction} \quad (1)$$

$$E_h = \rho g Q H \quad (2)$$

$$\eta_p = E_h / E_m \quad (3)$$

$$E_m = \eta_m \times T \times \eta_i \quad (4)$$

식(4)에서 T는 모터에 공급된 전력에너지(kW)이고, η_m 은 모터의 효율을 나타내므로 E_m 은 펌프에 공급되는 축 동력이 라고 할 수 있다. 모터 효율은 100% 부하율 기준으로 94.5%를 사용하였고 모터에 공급된 전력에너지(T)는 운전제어실의 모니터에 표시된 값을 사용하였다. 인버터를 설치 한 경우 축 동력 계산에는 인버터의 효율(η_i) 97%도 고려하였다. 식(1)에서 언급된 압력과 유속 및 유량 정보는 현장에 설치된 계기로부터 읽은 값을 사용하여 펌프의 효율을 계산하였다. Fig. 7에 해수 온도 변화에 따른 펌프의 효율 변화를 인버터 설치 전과 후의 경우에 대하여 비교하여 나타내었다. 고압 펌프는 인버터 설치 전의 경우 약 73~75% 효율 범위 내에서 운전된 반면 인버터 설치 후에는 약 79~81% 범위에서 운전되어 인버터 설치 후 운전 효율이 증가하였음을 알 수 있다. 그 이유는 2015년 11월말 인버터를 설치한 후 역 삼투 막에 공급되는 해수의 압력은 막 오염(Fouling)증가 등의 원인에 의해 오히려 증가하였으나, 펌프 임펠러 회전 속도 최적 제어에 따른 전력 소비량이 감소하였기 때문이다. Table 1에 나타난 바와 같이 펌프 제조 공장에서 출하하기 전 고정된 최대 속도에서 시험한 고압펌프의 효율은 83%였다. 펌프를 실제 현장에 설치한 후 운전한 결과 운전 조건이 상이한 점은 있으나 고정된 일정한 속도에서 밸브 제어 방식으로 운전할 경우 효율은 약 10% 정도 더 작아 서상호 등의 논문에서 언급한 성능 허용 오차 보다 미달하였다.⁽¹⁾ 그러나 인버터를 설치 후 변속 제어를 하였을 경우 펌프 자체의 효율에 허용

오차 범위 5%내에서 운전되고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

해수담수화 플랜트의 전력 에너지 비용 절감을 위해 역 삼투막 막에 해수를 공급하는 고압 펌프의 제어 방식을 고정된 일정속도 운전 및 밸브 제어 방식에서 인버터를 이용한 변속 제어 방식으로 변경하였다. 그 결과 펌프의 운전 효율을 분석하기 위하여 고정 속도-밸브 제어 방식으로 운전한 과거 운전 결과를 수집하여 변속제어 방식으로 운전한 데이터와 비교 평가하였다. 2016년 기준 해수 온도 변화에 따라 변속 제어에 따른 전력 에너지 비용 절감은 약 14%로 나타났다. 변속 제어에 따라 펌프의 효율은 약 80% 정도에서 운전되어 제작 당시 공급 업체에서 평가한 83%에는 미치지 못하였지만 허용 오차 범위 내에서 만족스럽게 운전되었다. 그러나 고정속도-밸브 제어 방식으로 운전될 경우 펌프 효율은 약 73~75% 범위에서 운전되는 것으로 나타나 공급 업체에서 제시한 효율 보다 미달한 상태에서 운전되어 바람직하지 못한 제어 방식으로 판단되었다.

후 기

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(과제 번호(16IFIP-B089908-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- (1) Suh, S. H., Kim, H. Ho., MD.Rakibuzzaman, Kim, K. W., and Sik, Y. I., 2014, "A Study on the Performance Evaluation of Variable-speed Drive Pump," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 17, No. 5, pp. 83~88.
- (2) Park, H. Y. and Kim, K. Y., 2008, Pump Handbook 2nd edition, Dongmyeong publishing, Gyeonggi-do.
- (3) Suh, S. H., Kim, K. W., Kim, H. H., Yoon, I. S., and Cho, M. T., 2015, "Evaluation of Energy Saving with Vector Control Inverter Driving Centrifugal Pump System," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 18, No. 2, pp. 67~72.
- (4) Choi, S. B. and Im, M. H., 2014, "A Study on Efficient Capacity Control of a Marine Pump with the Variation of Sea Water Temperature," Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 20, No. 6, pp. 788~793.
- (5) Kim, S. H., Park, H. S., and Song, K. D., 2012, "The Analysis of Circulating Pump Energy Saving According to Variable Speed Control Strategies," The Journal of the Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, Vol. 12, No. 2, pp. 203~208.