

## 인버터 구동방식에 의한 실습선 냉각수 펌프의 에너지 절감 방법

임명환† · 안병원\* · 김부기\*\*

(원고접수일 : 2009년 4월 7일, 원고수정일 : 2009년 7월 14일, 심사완료일 : 2009년 8월 13일)

### Put Investigation on the energy saving method using inverter driving for cooling pump at MMU training ship

Myeong-Hwan Lim† · Byong-Won Ahn\* · Bu-Gi Kim\*\*

**Abstract :** The ships have a lot of electric machinery needed to supply electricity from the moment of launching coming out of dry dock to docking at jetty. Thus, the ships always have to use alternator and electric machinery that has low efficiency under the low load. Many government service ships like the MMU training ship have been spending lots of time at jetty rather than sailing at sea. These ships are operated under the condition of low load due to the operation of basic machinery at jetty and electric machineries are driven with the status of low efficiency. This paper would suggest the energy saving method for these ships. The investigation describes that shore connection is a great asset to these ships and that the flow rate control by adjusting revolution with the adoption of inverter is better than flow rate control by using throttle valve to save energy. The result is based on the investigation of cooling pump at MMU training ship.

**Key words :** Saving energy(에너지 절감), Inverter(인버터), Cooling water pump(냉각수 펌프), Training ship(실습선)

### 1. 서 론

일반적으로 범용 유도전동기의 공칭효율은 중 · 소용량에서는 약 85% 정도이며 대용량은 90% 정도이므로 비교적 효율이 높은 편이다. 이러한 효율치는 유도전동기를 정격부하에서 운전할 경우의 효율값이며 부하율이 낮은 경우에는 운전효율이 급격

히 떨어지는 특성을 가지고 있다. 산업현장에서 유도전동기의 적용시 전동기의 용량은 과부하상태를 대비하여 보통 20%~30% 정도의 여유율을 두어 선정되며, 운전패턴에 따라 중부하와 경부하를 오르내리는 부하변동으로 운전시간 중 상당부분이 정격보다 낮은 경부하 상태에서 운전하게 된다. 전동기는 최대부하에 맞도록 선정해야 하기 때문에 대

† 교신저자(목포해양대학교 실습선 새누리호, E-mail:imhys@mmu.ac.kr, Tel: 061)240-7460)

\* 목포해양대학교 기관시스템공학부

\*\* 목포해양대학교대학원

부분전동기는 규약효율보다 낮은 상태에서 운전되고 있다. 경부하 상태에서 유도전동기의 입력전압을 조절하여 운전효율을 피하는 방법<sup>(1)</sup>들이 여러 면에서 진행되어 왔다. 유도전동기의 운전조건에 항상 적응하여 효율을 개선 할 수 있다면 전력손실을 감소시켜 에너지 절약에 큰 역할을 할 것이다<sup>(2)</sup>.

선박의 냉각수 계통을 설계할 때 적도지방이나 여름철의 해수온도를 32°C인 표준주위 환경조건<sup>(3)</sup>에 따라 설계하고 있다. 따라서 봄, 가을, 겨울의 경우는 냉각수량이 남아 유량을 조절하기 위해서는 바이패스라인이나 밸브의 개도를 조절하여 유량을 조절한다. 이렇게 불필요한 유량으로 인해 마우스링, 고가의 메카니컬 씸(Seal)의 마모 및 임펠러와 해수파이프의 부식을 가중시키고, 이로 인한 안전 운항과 유지보수비용의 증가로 연결된다. 이런 문제의 해결은 회전수에 유량이 비례하는 관계를 이용하여 회전수가 일정한 유도전동기의 입력단에 주파수를 조절할 수 있는 인버터를 사용하여 개선할 수 있다. 인버터는 직류를 교류변환하는 장치로 주파수의 조절과 역률개선의 효과가 있고, 효율의 개선으로 고효율 운전이 가능하다.

본 논문에서는 목포해양대 실습선에서 항상 구동되는 냉각수 펌프에 인버터를 설치하여 운전한 결과 에너지 절감효과를 확인하였다. 따라서 접안 시간이 많은 선박의 에너지 절감 방법에 관한 제안으로 연구결과 육전이 유리하고, 에너지 절감을 위해 인버터를 채용하여 밸브에 의한 유량조절을 회전수에 의한 유량조절로 바꾼다면 고효율로 운전할 수 있는 것을 실제 목포해양대학교 실습선의 냉각수 펌프를 이용하여 실험하여 증명하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 원심펌프의 동력과 효율

원심펌프는 변곡된 다수의 것이 달린 임펠러가 밀폐된 케이싱내에서 회전함으로써 발생하는 원심력의 작용에 의하여 액체는 회전축의 중심에서 흡입되어 반지름 방향으로 흐르는 사이에 압력 및 속도에너지지를 얻고, 이 가운데 과잉된 속도에너지는 안내깃을 지나 와류실을 통과하는 사이 압력에너지

로 회수시키는 장치<sup>(4)</sup>이다.

Fig. 1은 실제 실험에 사용된 원심펌프특성곡선이다. 이 관계에서 알 수 있는 것은 동력과 효율은 유량에 비례하고, 양정은 비례하다 반비례하는 관계가 있다. 그 이유는 속도가 증가해야 유량과 양정이 증가하는데 속도가 증가하면 관로저항이나 출구 손실이 증가하기 때문이다.

펌프에 관련된 수식으로 동력은

$$L_w = \frac{\gamma H Q}{102 \times 60} [KW] \quad (1)$$

효율은

$$\eta = \frac{\text{수동력}}{\text{축동력}} = \frac{L_w}{L} \quad (2)$$

상사법칙에 의한 유량과 회전수의 관계는

$$\frac{Q_1}{D_1^3 N_1} = \frac{Q_2}{D_2^3 N_2} \quad (3)$$

양정과 회전수의 관계

$$\frac{H_1}{D_1^2 N_1^2} = \frac{H_2}{D_2^2 N_2^2} \quad (4)$$

동력과 회전속도는

$$\frac{L_1}{\gamma D_1^5 N_1^3} = \frac{L_2}{\gamma D_2^5 N_2^3} \quad (5)$$

이와 같이 유량은 회전수에 비례하고, 양정은 회전수의 제곱에 비례하며, 동력은 회전수의 3승에 비례<sup>(5)</sup>한다.

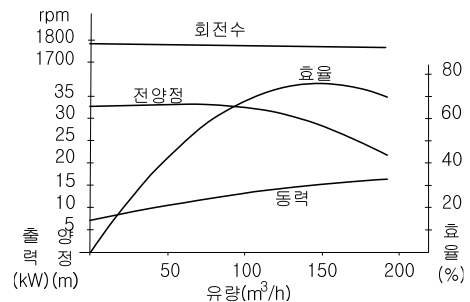


Fig. 1 Characteristic curves of centrifugal pump

Fig. 2는 수격현상의 계산에 사용되는 완전 특성곡선(complete characteristic curve)을 나타낸 것으로 양정을 일정히 했을 때 펌프의 회전수와 유량에 토크를 나타내고 있다. 이 그래프에서 유량은 회전수에 비례함을 알 수 있다.

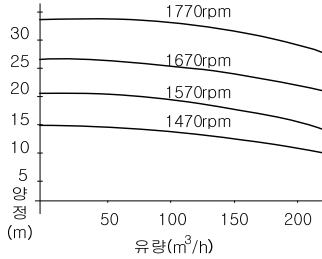


Fig. 2 Relations of head, flow rate, rpm

2.2 전동기의 효율

전동기의 효율은 출력에 대한 입력의 비이다. 입력은 출력과 손실의 합<sup>(6)</sup>으로 표현할 수 있다.

$$\eta = \frac{\text{출력}}{\text{입력}} = \frac{\text{출력}}{\text{출력} + \text{손실}} \quad (6)$$

손실은 무부하손과 부하손이 있다. 무부하손은 고정손실로 전동기를 운전하면 반드시 손실이 생기고 부하손은 부하에 의해 생기는 손실이다.

$$\text{손실} = \text{무부하손} + \text{부하손} \quad (7)$$

$$\text{무부하손} = \text{기계손} + \text{철손} + \text{계자동손} \quad (8)$$

$$\text{부하손} = \text{전기자동손} + \text{표유부하손} \quad (9)$$

$$\text{철손} = \text{히스테리시스손} + \text{와류손} \quad (10)$$

히스테리시스손  $W_h$

$$W_h = K_\eta \cdot B_m^{1.6} f V \quad (11)$$

와류손  $W_e$

$$W_e = K_e \cdot B_m^2 f^2 V \quad (12)$$

전동기의 속도는 주파수에 비례하므로

$$N_s = \frac{120}{P} f \quad (13)$$

전동기의 용량이 클수록 좋고, 부하가 많을수록 좋다. 역률도 전부하 근처에서 가장 좋고, 동기속도에서는 역률이 가장 나쁘다. 즉 부하가 적으면 역률이 나쁘다<sup>(7)</sup>.

기계손은 베어링의 마찰손과 회전자의 풍손으로 되어 있어 주파수가 낮아지면 기계손이 적어진다. 식 (11)의 히스테리시스손은 주파수의 1.6승에 비례하고, 와류손은 주파수의 2승에 비례하므로 주파수가 낮아지면 회전수가 낮아져 무부하 손실이 작아지므로 전체적인 손실이 적어져 효율이 상승한다.

2.3 인버터의 개념과 특성

인버터는 직류를 교류로 변환시키는 전력변환 장치로 주파수 변환기로 사용된다. 인버터는 전압과 주파수의 변화에 따라 VVVF와 CVVF로 운전되는데 정격주파수 이하에서는 VVVF로 사용되고 정격주파수보다 높을 경우에는 CVVF로 운전된다.

교류전원에서 주파수가 낮아지면 임피던스가 작아지므로 전압을 그대로 인가하면 과전류가 흘러 전동기나 인버터가 소손된다. 따라서 식 (14)와 같이 항상 자속은 일정하게 유지하여야 함으로

$$\Phi = 4.44K \frac{f}{E} \quad (14)$$

인버터의 장점은 주파수를 제어해서 식 (13)과 같이 회전수를 제어할 수 있다. 인버터를 사용하면 역률이 좋아지고 필요한 주파수에서 사용하므로 효율이 좋고 식 (5)에 의해 동력이 절감될 수 있다.

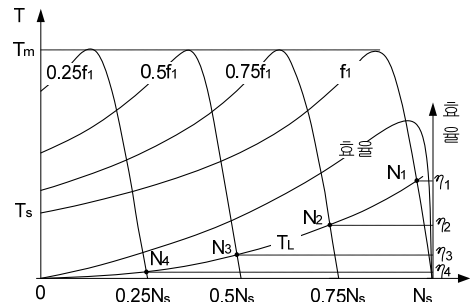


Fig. 3 Synchronous speed & torque by frequency variation

Fig. 4는 전동기의 특성을 나타낸 곡선이다. 토크, 역률, 출력 그리고 효율 등은 전동기의 속도가 낮아지면 커졌다 감소하는 성질을 갖고 있다. 또 동기속도에서는 모든 것이 0이 되는 특성도 갖고 있다. 저부하로 운전되면 효율과 역률이 나빠진다.

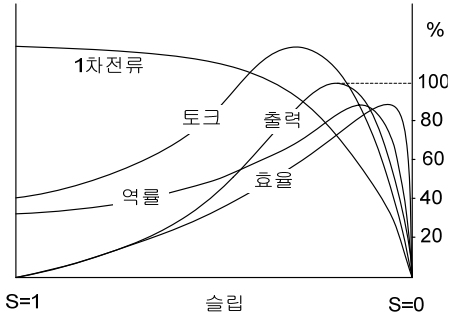


Fig. 4 Characteristics of 3φ induction motor

2.4 열전달

관의 단면A 속에서 밀도가 ρ인 유체가 평균유속  $u_m$ 의 속도로 흐를 때 유체의 질량유속  $\dot{m}$ 은 [7]

$$\dot{m} = \rho u_m A \tag{15}$$

관의 단면에서 유체는 일정한 속도로 흐르지 않기 때문에 관 단면을 흐르는 유체의 부피가 지나는 속도인 부피유속  $\dot{V}$ 은

$$\dot{V} = u_m A \tag{16}$$

이다.

열교환기에서 열전달은 두 유체 사이에서 일어나고 열교환기에서 주위의 열전달을 무시하고, 뜨거운 유체에서 잃은 에너지는 차가운 유체가 얻은 에너지와 같기 때문에 뜨거운 유체의 온도차이나 냉각유체의 온도차 중 하나의 유체를 사용해도 된다. 두 유체가 상변화가 일어나지 않는다면 전달되는 열량  $\dot{Q}$ 는

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \\ &= \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \end{aligned} \tag{17}$$

이다. 여기서 첨자의 h는 뜨거운 유체이며, c는 차가운 냉각유체를 나타내고, o와 i는 출구와 입구를 나타낸다<sup>[8]</sup>.

3. 시스템의 구성

Fig. 5는 2.5절의 결론으로 인버터 구동 냉각시스템의 구성도이다. HIGH SEA CHEST나 LOW SEA CHEST에서 해수를 흡입하여 P1은 속도제어 없이 그대로 전력을 공급하고, P2는 인버터에 의해 속도제어를 실시하고 속도의 기준은 쿨러의 출구 온도계의 온도가 25°C가 되도록 조정하도록 하였다. 해수의 입구온도는 7°C였다.

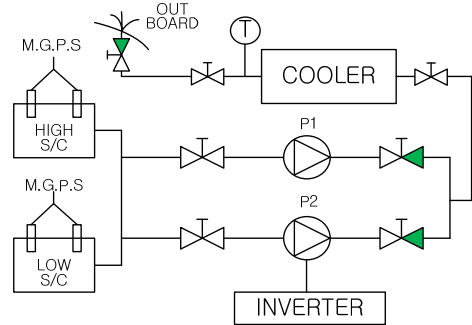


Fig. 5 Schematic of inverter driving cooling system

Table 1 Specifications of centrifugal pump

	type	원심펌프	효율
펌프	유량	125m <sup>3</sup> /h	73.5%
	양정	30m	(1775rpm)
전동기	3φ4극 유도전동기 440V, 60Hz, 18.5kW		92.0% (1775rpm)

4. 데이터분석

Fig. 6은 2월 한 달 동안 측정된 전력의 값이다. 계열 1은 인버터를 사용하지 않은 달의 에너지 소비량이고 계열 2는 인버터구동에 의한 에너지 절감률이다. 전체 에너지 절감률은 15.8%의 절감이 있었다. 실험을 실시한 기간이 짧아 연간 절감률은

알 수 없지만 여름철에 에어컨과 같은 부하가 증가한다면 절감률을 더 클 것으로 판단된다.

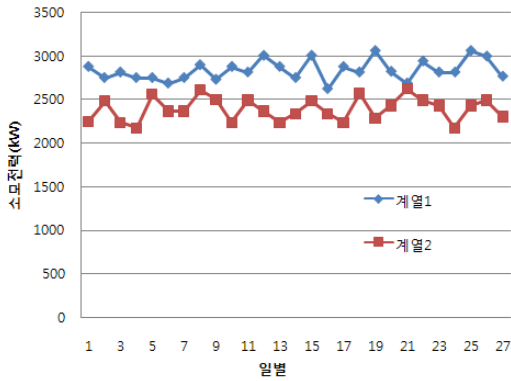


Fig. 6 Electric powers per day

Fig. 7은 설치 후 4년 된 냉각수 펌프의 임펠러 사진이다. 캐비테이션으로 인한 공식이 나타나 실제 유량과 수두를 낼 수 없어 교환한 것이다. 속도를 낮추면 캐비테이션이 줄어들 것으로 확신한다.



Fig. 7 Wear and tear on the impeller's shape by cavitation

### 5. 결 론

냉각시스템에서 냉각열량은 유체의 속도와 온도의 함수이므로, 유체의 속도는 유량에 비례하며, 유량은 회전수에 비례한다. 따라서 냉각하고자 하는 시스템의 열량에 따라 전동기의 회전속도를 제어하면 동력은 회전수의 3승에 비례하므로 충분한 냉각효과를 가지면서 동력과 손실을 줄일 수 있음을 확인하는 조사연구를 실습선에서 직접 운전하여 실증적으로 확인한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인버터를 이용한 가변주파수를 이용하여 전

동기의 속도를 제어하면 동력을 줄이면서 효율이 좋은 운전 상태로 유지할 수 있음을 확인하였다.

2. 전력사용량이 15.8% 감소하는 효과를 가져왔다.

3. 펌프의 임펠러 속도를 줄임으로, 캐비테이션을 줄여 유지보수비가 감소할 것으로 추정된다.

### 참고문헌

- [1] 이승철 외3인, “운전효율 향상을 위한 VVCF-유도전동기 구동시스템의 속도제어”, 신기술연구소논문집, 제25권, 1996.
- [2] 김부기, 삼상유도전동기의 가변변동에 따른 효율개선에 관한 연구, 충남대학교 대학원 석사논문, 1983.
- [3] 한국전급(KR), 선급 및 강선규칙, 적용지침, 제5편 기관장치 제1장, p. 1, 2008.
- [4] 김춘식 외2인, 유체기계 대학도서, p. 28, 1984.
- [5] 김영일, 원심펌프의 가변속 운전특성에 관한 연구, 한밭대학교 산업대학원 석사학위논문, 2003.
- [6] 이윤중 외1인, 전기기계, 문우당, p. 222, 1971.
- [7] 김철우 외1인, 전력전자공학, 북두출판사, p. 187, 1998.
- [8] 양재호 외6인, 열전달과 응용 동명사, p. 430, 1999.

### 저 자 소 개



#### 임명환(林明煥)

1961년 9월생, 1982년 목포해양전문대학 기관과 졸업, 1991년 호원대학교 기계공학과 졸업, 1998년 목포대학교 기계공학과 대학원 석사과정졸업(공학석사), 2004년 동대학원 박사과정졸업(공학박사), 1998년~현재 목포해양대학교 실습선 기관장



**안병원(安秉元)**

1963년 4월생, 1986년 한국해양대학교  
기관학과 졸업, 1991년 동대학원 석사  
과정졸업(공학석사), 1996년 동대학원  
박사과정졸업(공학박사), 1996년~현재  
목포해양대학교 기관공학부 교수,  
2002~2003 큐슈대학교 시스템정보 대학  
원 post doc'  
관심분야 : 로봇제어, FA 및 용접자동  
화, 전력전자



**김부기(金扶基)**

1974년 3월생, 1997년 목포해양대학교  
기관공학과 졸업, 2004년 동대학원 석  
사과정졸업(공학석사), 2001년~현재 목  
포해양대학교 실습선 기관사