

고효율 유도가열형 전기온풍기에 관한 연구

(A Study on the Electrical Fan Heater using High Efficiency Induction Heating)

신대철* · 우형균**

(Dae-Chul Shin · Hyoung-Gyun Woo)

Abstract

A proposed the electrical fan heater using induction heating is innovative system which applied IH(Induction Heating) magnetic induction heating generated from induction-heated metallic package and high-frequency power circuit technique for thermal converse technique. In this occurs not burning, so that the working environment and deterioration of products can be improved. The existing heater that low efficiency by heated resistance or using fossil fuel of coal, diesel, kerosene has problems about burden for high cost price.

In this paper are compared efficiency the existing heaters and designed electrical fan heaters using 3[kW]-Class full-bridge resonant inverter. In addition, action analysis and application of system are discussed.

Key Words : Induction Heating, Resonant Inverter, Electrical Fan Heater, Heater

1. 서 론

1.1 연구의 배경

일반적으로 난방장치는 석탄, 경유, 등유 등의 화석 에너지를 이용한 장치가 대부분을 차지하고 있으며 이러한 화석에너지 사용은 지속적인 원가상승에 따라 겨울철 난방비용에 커다란 부담으로 작용하고 있다. 또한 화석에서지를 이용한 난방장치에서 배출되는 배기

가스가 실내로 유입되는 경우, 생산품의 품질저하 및 작업자의 환경문제를 초래하는 경우가 발생하는 등의 취약점들이 대두되고 있다. 따라서 최근에는 이러한 문제점들을 대처하기 위해 전기를 이용한 난방장치의 사용이 늘어나는 추세이고 이러한 전기 난방장치에 대한 에너지의 효율적 사용측면에서 경제성과 안전성을 높이기 위한 지속적인 연구개발이 이루어지고 있다[1].

전기 가열법은 화석연료를 이용하는 연소 가열법에 비해 열 효율적 측면과 제어적 측면에서 월등히 우수하다. 이러한 전기가열방식으로는 저항가열, 아크가열, 유도가열, 유전자열, 전자빔가열, 적외선 가열 등이 있으며 그중에서도 유도가열(Induction Heating) 분야는 교류자계 중에서 도전성 물체에 유도되는 와전류손(Eddy Current Loss), 히스테리시스손

* 주저자 : 호서대학교 전기공학과 교수
** 교신저자 : 호서대학교 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 041-549-5651, Fax : 041-549-5651
E-mail : dcsin@hoseo.edu
접수일자 : 2011년 12월 7일
1차심사 : 2011년 12월 20일, 2차심사 : 2012년 1월 17일
심사완료 : 2012년 2월 21일

(Hysteresis Loss)을 이용하여 가열하는 방식으로 방사 가열이나 연소가열의 가열방식은 열원과 피열물 사이의 온도차가 크기 때문에 효율이 나쁘지만, 유도 가열은 표피효과에 의하여 피열물 자체가 가열되므로 손실이 적고 효율이 좋으며, 표면만 가열이 가능하다는 것 이외에도 여러 측면에서 유리한 점이 많아 여러 분야에 응용되고 있다[2].

유도가열은 고주파 전력회로 기술과 특수충진물에 의한 열교환기술을 응용한 가열방식이다. 기존의 전기 온풍기는 주로 니크롬선을 사용한 발열체와, 세라믹 표면에 얇은 금속 막의 저항을 이용한 세라믹 발열체 또는 카본의 저항을 이용하는 카본 발열체 등에 전류를 저항에 직접 흘려서 발생하는 줄열(joule heating)을 이용하여 공기를 가열하는 방식으로 실내 온도를 조절한다.

그러나 기존의 일반 전기 온풍기는 구조적으로 발열체와 공기의 접촉 면적과 열전도율이 작아 온풍기의 열 공급능력과 에너지 효율이 매우 낮다는 단점을 가지고 있으며, 따라서 큰 소비전력을 요구하여 가정용 이외의 용도로 주로 사용되고 있다.

본 논문에서는 절연체 용기 내에 특수 스테인레스 발열체 부하를 수납하는 방식에 유도가열 원리를 적용하여 기체를 직접 가열하게 되는 전기온풍기를 제안하였다. 그리고 본 논문의 온풍기와 기존 많이 사용되는 라디에이터 및 가스히터를 비교하여 효율 및 경제성의 효과를 도출하고 동작해석 및 시스템 응용에 대해 논한다. 설계한 전기온풍기는 스위칭 주파수 20[kHz]대역에서 동작하는 3[kW]급 풀-브릿지 고주파 직렬 부하 공진형이며 LC공진 설계시 부하 자체를 L로 설정하여 효율을 최대화 하였다.

1.2 연구의 목적 및 방법

본 연구의 목적은 과거에 효율이 낮지만 간편하게 이용할 수 있다는 이점으로 화석연료나 저항가열을 이용한 온풍기들의 이용이 많았지만 현재는 에너지 절약 차원을 넘어선 환경 문제로 까지 대두되고 있는 사회 분위기에 맞춰 고효율 유도가열 시스템을 온풍기로 사용한 활용성을 확인하기 위함이다.

본 연구는 소속대학교 1공학관의 공간을 활용하여

그림 1과 같은 실험실 내에 3[kW]급 유도가열 온풍기, 3[kW] 라디에이터, 가스히터의 장치들을 설치하여 동일한 조건으로 온풍기 성능을 시험하였다.

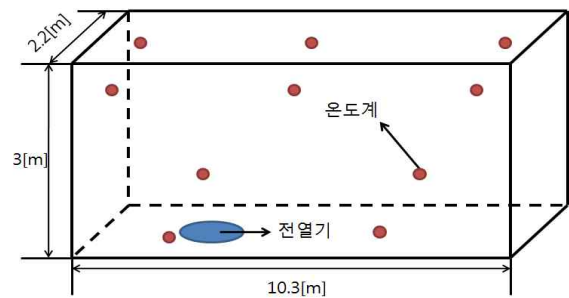


그림 1. 실험방법
Fig. 1. Experimental method.

일정한 10(상 : 6, 하 : 4)개의 위치에 K-type 온도계를 설치하여 상단과 하단의 온도를 비교하고 각 부분 온도의 평균치를 토대로 하여 효율과 경제적 비교를 통한 유도가열 온풍기의 시스템에 대해 논하기로 한다.

2. 관계이론

2.1 유도가열의 원리

유도가열은 1831년 Michael Faraday의 전자 유도현상을 이용한 것으로 가열코일에 고주파 교류전류가 흐를 때 발생하는 고주파 자계 중에 도전성을 가지는 금속을 놓으면 금속에 식 (1)의 유기기전력이 발생되고 이로 인하여 금속의 표면에 와전류가 유기되어 표피저항에 의해 $P = I^2 R [W]$ 의 전력 크기만큼 주열을 발생시키는 원리이다.

이러한 열의 대부분은 식 (2)로 표현되는 표피두께 δ 내에 분포하게 되며, δ 는 유도 가열의 인버터 동작주파수를 결정하는 중요한 요소가 된다[3].

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \tag{1}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 \times 10^{-7}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}} \tag{2}$$

여기서 ρ : 저항률 [$\Omega \cdot m$], μ_r : 비투자율, f : 주파수 [Hz]

그림 2와 같이 가열하고자 하는 도체에 코일을 감고 이 코일에 고주파 교류 전류를 흘리면 도체 내에는 고주파 자속이 발생한다.

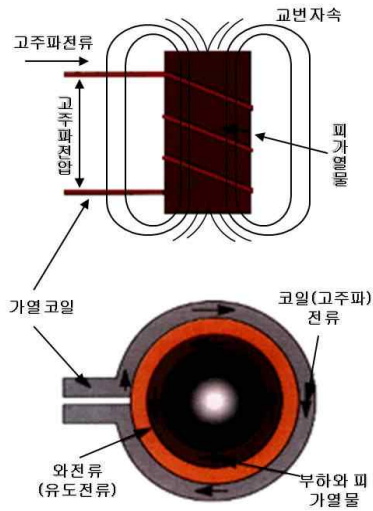


그림 2. 유도가열의 원리
Fig. 2. Principle of induction heating

이 도체 내에는 전자유도 작용에 의하여 코일 내에 있는 금속은 변압기의 2차 권선에 기전력이 발생하는 것과 같이 유도전류가 발생하여 와전류가 흐르게 되며, 이 와전류는 금속의 단면 각부에 균일하게 흐르는 것이 아니고 금속의 표면에 집중적으로 흐르게 되며 내부로 갈수록 지수 함수적으로 감소하게 된다.

이 와전류가 임의의 저항을 가진 도체 내를 흐르면 그 도체 내에 주울 열이 발생하며 이것이 와전류 손실로 식 (3)과 같다[4].

$$P_e = \frac{(\pi f a B_m)^2 V}{4\rho} \quad [W] \quad (3)$$

여기서 a : 철심의 반지름[m], f : 주파수[Hz], B_m : 최대 자속밀도[T], ρ : 저항률[Ω/m], V : 철심의 체적[m³]이다.

일반적으로 유도가열 시스템은 가열코일과 부하를 각각 1, 2차 측으로 하는 변압기 등가 모델로 표현할 수 있다.

이 등가회로 모델은 그림 3과 같이 하나의 등가 인덕턴스 L_{eq} 와 등가 저항 R_{eq} 의 직렬연결로 나타낼 수 있

다. 그림 3의 등가회로는 풀어 정리하면 식 (4)와 같다.

$$\frac{V_1}{I_1} = R_{eq} + j\omega L_{eq} \quad (4)$$

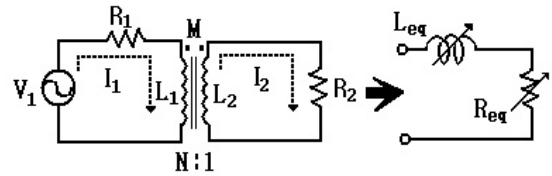


그림 3. 유도가열 시스템의 등가회로
Fig. 3. The equivalent circuit of induction heating system

한편 식 (4)에서 등가화 된 파라메타 L_{eq} , R_{eq} 는 가열 부하의 크기와 위치, 가열코일과 부하사이의 거리, 부하의 도전율과 투자율, 동작주파수 등에 의해 변하게 된다. 또한 변압기 2차측 저항 R_2 는 와전류의 침투깊이 δ 에 의해 결정되므로 식 (5)와 같다. 실제 유도 가열에 의해 발생하는 출력전력은 저항과 전류의 관계에 의해서 식 (6)으로 표현된다[5].

$$R_2 = \frac{\rho}{\delta} = \sqrt{\pi\rho\mu f} \quad (5)$$

$$P = I_2^2 R_2$$

$$P = (NI_1)^2 \cdot \sqrt{\pi\rho\mu f} \quad (6)$$

여기서 N : 가열코일의 턴수, $I_2 = NI_1$ 이다.

2.2 공진형 인버터

인버터는 직류전원을 교류전원으로 변환하는 장치로 대전력을 얻기에 가장 적합한 풀-브릿지 인버터를 이용한다.

그림 4는 인버터로서 풀-브릿지 직렬부하 고주파 공진형 인버터를 나타내는데 이것은 절연과이프의 두께, 내부의 발열체부하의 소재 그리고 가열 유체계에 의해 변화하는 인덕턴스와 저항분으로 구성되는 전기회로 모델로 볼 수 있다.

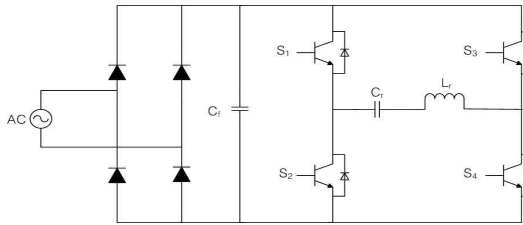


그림 4. 직렬공진 인버터
Fig. 4. Series resonant inverter

R-L부하와 L을 보상하는 C로부터 직렬공진 회로계를 위한 고효율 운전을 위하여 인버터의 동작 주파수 선정이 매우 중요하다[6].

그림 5의 페이저 등가회로에서 직렬 RLC회로에 대한 입력 임피던스는 식 (7)과 같다.

$$Z(j\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (7)$$

식 (7)의 허수 부분이 식 (8)과 같은 조건을 만족하면 0이 된다.

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (8)$$

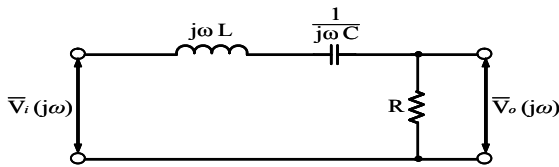


그림 5. 직렬공진 인버터의 페이저 등가회로
Fig. 5. Phasor equivalent circuit of series resonant inverter

위의 관계를 만족하는 ω 의 값을 공진주파수 ω_0 라고 하며 식 (9)와 같다.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (9)$$

공진상태에서는 전압과 전류가 동상이므로 위상각이 0이고 역률이 1이 된다. 직렬 회로의 경우 공진 상태에서 임피던스가 최소가 되므로, 주어진 전압에 대해 전류가 최대가 된다. RLC 직렬회로에 대한 선택도를 Q 라고 할 때 식 (10)과 같고, 입·출력 전압의 관계를 ω_0 와 Q 로 나타내면 식 (11)과 같다.

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (10)$$

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (11)$$

식 (10)은 Q 가 R 에 종속적이며, R 에 반비례 관계를 알 수 있다. 또한 R 의 변화에 따른 Q 의 변화와 Q 에 따른 주파수 선택성을 보여준다. 그리고 식 (11)은 스위칭주파수에 따른 진폭을 나타낸다[7].

3. 시스템 구성

그림 6에 나타난 시스템의 구조는 세라믹 재료의 파이프로 다수의 홀과 방열편으로 구성된 발열체 부하를 가열코일로부터 전자유도에 의해 와전류로 발열시켜 관내 송풍기에 의해 불어넣은 공기를 전자유도 발열체인 부하에 접촉시킴에 따라 작은 비열의 발열체를 급속하게 온도를 올릴 수 있는 유도가열 온풍기 시스템의 구조를 나타낸다.

발열체는 금속박판을 이용하기 때문에 고온 가열시 단선, 단락 및 전기절연 성능이 뛰어나며 비열이 작으며 열용량이 큰 발열부의 구성이 가능하고 기체 통과 저항이 극히 작아 출력부의 온도 응답특성이 빠르다.

또한 표면적이 크다는 것은 히터로 사용할 경우 전열면적을 많이 사용할 수 있고 복수로 적층되어 있는 작은 용적의 금속판에 의해 충분한 전열면적을 확보할 수 있어 금속판 자체가 자기발열을 한다는 특징을 갖고 있다.

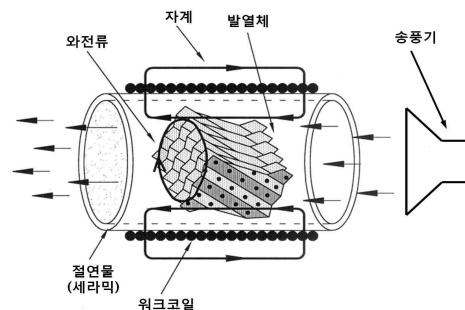


그림 6. 시스템의 구조
Fig. 6. Configuration of system

그림 7은 제작한 폴-브릿지 고주파 공진형 인버터의 블럭도를 보여준다.

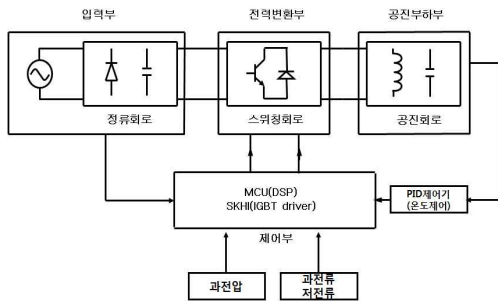


그림 7. 제안한 시스템의 구성도
Fig. 7. A block diagram of the proposed system

시스템 구성은 크게 입력부, 전력변환부, 출력부, 제어부로 나눌 수 있다. 입력부는 정류회로로 구성되며 주요 소자는 단상 브릿지다이오드와 콘덴서로 브릿지다이오드 뒷단에 사용되는 콘덴서는 상용주파수의 전원 측에서 보면 복잡한 액티브 PWM제어를 행하지 않고 고효율 특히 선 전류의 정현화 기능을 갖도록 설계하는데 시스템 특성상 120[Hz] 리플성분을 그대로 통과시킬 수 있도록 수 $[\mu F]$ 정도의 용량을 사용하였다. 전력변환부는 스위칭회로로 구성되며 본 실험에서 사용한 스위칭소자는 정격전압, 스위칭 주파수와 냉각능력을 고려한 전류정격, 안전동작영역에 적합한 모듈타입 IGBT 600[V], 75[A]이며 제어부의 주요 소자는 DSP, IGBT드라이버인 SKH1 22B를 사용하였다.

본 논문에서의 인버터 제어방식은 출력단에 온도센서를 부착하여 설정온도와 출력온도를 비교하는 방식으로 온도차에 따른 4~20[mA]를 제어부에서 입력받아 출력되는 주파수를 가변하여 전력을 제어하고 PID 제어의 사용으로 응답성을 좋게 하였다.

출력부는 공진회로로 구성되며 콘덴서(C)와 부하(L)가 있다. 공진 파라메타로는 용량이 0.1 $[\mu F]$ 인 고내압 콘덴서를 병렬 연결하여 사용하였으며, 부하의 인덕턴스는 90 $[\mu H]$ ~120 $[\mu H]$ 로 조정하였다. 공진 콘덴서는 주파수 특성이 좋은 폴리프로필렌계열을 주로 사용하지만 리플전류를 고려해서 1,200[V]의 내압을 사용하였다. 또 부하이자 공진 L은 자성스텐레스(발열체), 세라믹(절연체), 릿쯔와이어(가열코일)로 특수하게 설계하였다.

4. 실험 및 검토

그림 8은 IGBT에 입력되는 게이트 전압파형을 나타내고 그림 9는 제작한 유도가열 온풍기 장치에 부착된 폴브릿지 인버터의 전압과 부하(L)전류의 파형을 실측한 파형이다.

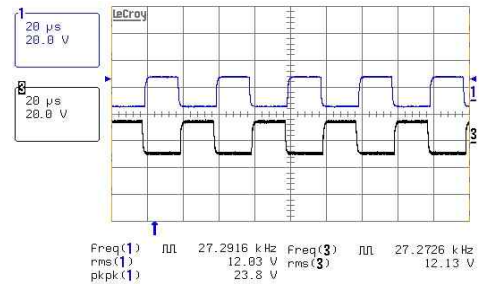


그림 8. 게이트 파형
Fig. 8. Gate waveform

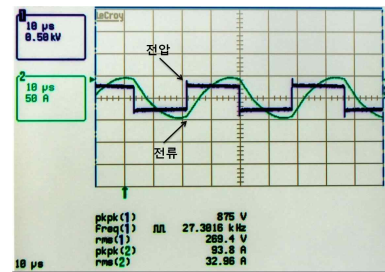


그림 9. 출력파형
Fig. 9. Output waveform

제작한 인버터 장치는 입력전압 220[V], 입력전류 14[A], 출력전류 30[A], 스위칭 주파수는 27.3[kHz]로 설계된 온풍기로 그림 11의 시뮬레이션 파형을 통해 올바른 동작을 확인할 수 있다.

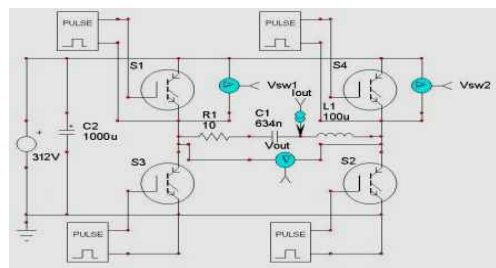


그림 10. 시뮬레이션 회로
Fig. 10. Simulation circuit

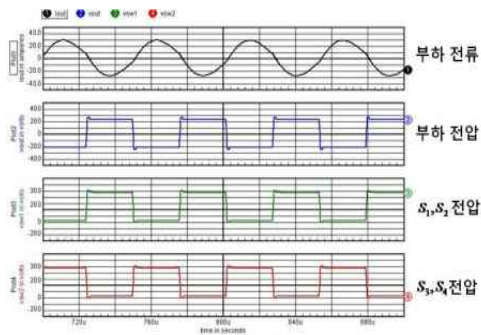


그림 11. 시뮬레이션 파형
Fig. 11. Simulation waveforms

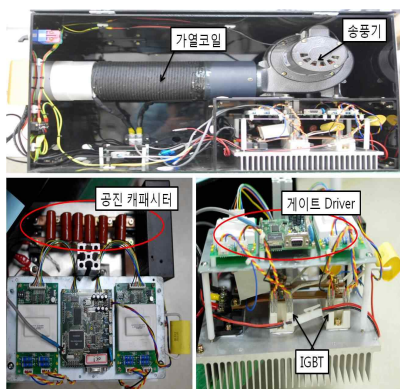


그림 12. 시스템 구성
Fig. 12. System composition

그림 12는 제작한 온풍기의 전체적인 구성으로 가열 코일 내부에 발열체가 삽입되어 있고, 5.5[m³/min]의 최대풍량을 가지는 송풍기에 의해 출구쪽에서 열풍이 발생하게 된다. 공진 캐패시터는 0.1[μF] 1200[V]를 병렬로 6개 연결하였고 가열 코일의 L값은 90[μH], 게이트 드라이버와 IGBT는 아래와 같이 구성하였다.

구성한 시스템의 효율을 측정하기 위해 식 (12)와 같은 열변환효율로 계산하였다. 기체의 열변환 효율보다 정확한 효율을 측정하기 위하여 같은 실험장치에 물을 넣어 실험하였다.

$$\eta = \frac{C \cdot M \cdot \Delta T}{860 \cdot P \cdot t} \quad (12)$$

표 1의 결과에 따라 측정된 값을 계산한 결과 90.7[%]의 효율을 확인할 수 있었다.

본 연구의 실험은 3대의 난방 제품들로 설정하였으

며 그림 13과 같이 제작한 유도가열 온풍기, 라디에이터, 가스히터이다.

표 1. 효율측정값
Table 1. Measure value of efficiency

최초온도[℃]	17
최종온도[℃]	82
시간[h]	5/60
전력[kW]	3
질량[ℓ]	3

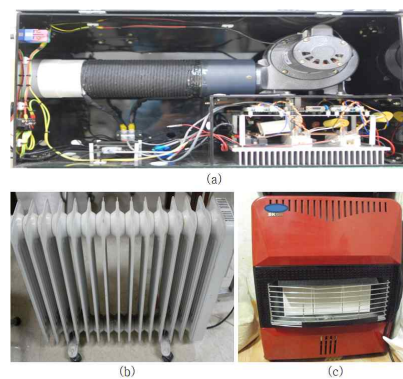


그림 13. 실험 장치
Fig. 13. Experimental set up heater system

표 2. 실험 결과
Table 2. Experimental result

종류 시간[분]	Induction Heater[℃]	Radiator[℃]	Gas Heater[℃]
최초	13.34	14.63	13.72
20	21.44	19.68	20.92
40	22.51	21.46	22.08
60	22.97	22.24	22.68
80	23.39	22.55	23.12
100	23.72	22.81	23.58
120	23.86	23.07	23.97
150	23.97	23.37	24.72
180	24.41	23.55	25.38
210	24.81	23.77	25.82
240	25.17	24.01	26.26
300	25.12	24.55	26.58

실험 공간에서 난방실험결과의 온도평균은 표 2와 같고 외부 온도는 유도가열 실험시 7.1[°C], 라디에이터 8.0[°C], 가스히터 7.5[°C]로 외부온도 오차는 ±0.2 [°C]이다.

표 3은 각각의 장치들의 겨울철 실내 적정기준 23 [°C], 하루평균 4회 사용을 기준으로 하여 경제성을 비교하였다. 가스히터의 경우 0.38[kg/h]의 연료소모와 1,200[원/kg]을 기준으로 하였고 전기료는 기본요금과 누진세를 포함한 가격이다.

표 3. 경제성 비교
Table 3. Economics comparison

종류	비용		
	23[°C][원]	1일[원]	30일[원]
Induction Heater	447	618	54,152
Radiator	497	818	76,384
Gas Heater	532	2128	64,296

5. 결 론

본 논문에서는 폴브릿지 공진형 인버터를 이용한 새로운 유도가열형 온풍기를 제안하였다. 부하자체를 L로 하는 LC공진형을 제안하여 효율을 높일 수 있었고, 실험을 통하여 같은 전력량으로 사용되는 전기 라디에이터와의 비교와 열변환 효율을 계산하여 고효율임을 검증하였고, 기존 난방장치와 비교로 경제성 효과를 확인하였다. 또한 공진형 인버터를 이용한 기체 가열방식은 유도가열에 있어 새로운 가열방식으로 기대가 되며 충분한 열원으로서 가능성을 확인할 수 있었다.

전기료는 누진세가 포함되어 있다는 단점이 있고 가스히터는 초기동작시 오염물질 발생과 고가의 연료비 등의 단점에 주의하여 소비자의 현명한 판단과 사용이 필요할 것으로 사료된다.

공진형 인버터를 이용한 유도가열 제품의 활용성이 많아지고 넓어지기 위해서는 새로운 구조의 제안과 스위칭 손실 및 노이즈대책, 내열성 절연재료의 고성능화에 대한 실증적 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의글

본 연구는 호서대학교의 교내연구(과제번호 : 20110029)의 지원으로 수행되었으며, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] 최창용, 김홍건, “대형 전기온풍기 정상상태 열적성능의 현장시험에 관한 연구”, 한국공작기계학회 추계학회 논문집, pp. 99-103, 2002.
- [2] Y. J. Kim, K. H. Kim, D. C. Shin, “Electromagnetic Indirect Induction Fluid Heating System using Series Resonant PWM Inverter and Its Performance Evaluations”, The Transactions of The Korean Institute of Power Electronics, vol. 7, No. 1, pp. 48-53, FEB, 2002.
- [3] S. M. Jang, S. H. Lee, H. C. Park, “Electromagnetic Induction Heating and Its Application”, Proceedings of KIEE, vol. 50, No. 2, pp. 9, FEB, 2001.
- [4] 신대철, 김성호, 폴브릿지 공진형 인버터를 이용한 알루미늄 박판가열에 관한연구, 조명,전기설비 학회 논문지, Vol. 19, No. 8, pp. 56-61, 2005.
- [5] 유상봉, 이동윤, 현동석, “유도 가열 인버터의 특성 및 시스템 동향”, 전기학회지, vol. 50, No. 2, pp. 22, 2001년 2월.
- [6] 권혁민, 신대철, 김기환, 김용주, “간접유도가열용 고주파 공진형 인버터 시스템에 관한 연구”, 전력전자학술대회 논문집, pp. 322~325, 2002년 7월.
- [7] 홍순찬, 전희중, 백형래, 원중연, “PSpice를 활용한 전력 전자공학”, 인터비전, pp. 431~433, 2002년 2월.

◇ 저자소개 ◇



신대철 (申大澈)

1952년 3월 2일생. 1974년 건국대학교 전기공학과 졸업. 1976년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원(박사). 1989~1990년 나가사키대학 visiting scholar. 1981년~현재 호서대학교 전기공학과 교수.



우형균 (禹亨均)

1981년 4월 8일생. 2007년 호서대학교 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년 동 대학원 전기공학과 박사과정.