

유도가열 기법을 이용한 저주파 용접예열 시스템 구현

양주영¹, 김수찬¹, 박준모^{2*}

한경대학교 전기전자제어공학과¹, 동명대학교 전자·의용공학부²

Implementation of Low Frequency Welding Pre-heating System Using Induction Heating

Juyeong Yang, Soochan Kim¹, Junmo Park^{2*}

¹Hankyong National University, Department of Electrical, Electronic and Control Engineering, Human Science Institute

²Tongmyong University, School of Electronic and Biomedical Engineering

요 약 용접예열은 본 용접 전에 금속이 용착되는 모재면을 일정한 온도로 가열하는 것을 의미한다. 냉각속도 조절에 따른 재료 경화 정도 감소, 불순물 편석억제, 열적 변형방지, 그리고 수분제거 등 인접 영향부의 균열을 방지할 수 있다. 이러한 이유에서 고품질의 용접을 위하여 반드시 필요한 작업이다. 유도가열은 전자기유도 현상을 응용하여 전기에너지를 열에너지로 변환시키는 효율적인 가열방식이다. 기체 및 액체를 이용한 연소발열과 비교하여 신속한 가열뿐만 아니라 청결하고, 안정적이며, 경제적이다. 단순한 구조로 주파수와 코일의 형태를 변형하여 가열체의 형상, 깊이, 재질에 관계없이 가열할 수 있다. 본 논문에서는 유도가열 기법을 이용하여 저주파 용접예열 시스템을 구현하였으며, 3종의 자동차 변속기 부품을 대상으로 권선코일 내에서 각 변속기 높이에 따라 권선코일 저항, 인덕턴스 및 자동차 변속기 부품의 온도변화를 관찰한 결과 전류의 변화는 저주파 가열에 있어 매우 중요한 요인으로 작용함을 확인하였다.

• 주제어 : 유도가열, 저주파 가열, 용접

Abstract Welding preheating means that the surface of the base material to which the metal is welded before the main welding is heated to a constant temperature. It prevents the cracks of the adjacent influences such as reduction of material hardening degree by controlling the cooling rate, suppression of segregation of impurities, prevention of thermal deformation, and moisture removal. For this reason, it is a necessary operation for high quality welding. Induction heating is an efficient heating method that converts electric energy into heat energy by applying electromagnetic induction phenomenon. Compared with combustion heat generated by gas and liquid, it is clean, stable, and economical as well as rapid heating. It can be heated regardless of the shape, depth and material of the heating body by modifying the shape of the frequency and the coil with a simple structure. In this paper, we implemented a low frequency welding preheating system using induction heating technique and observed the temperature changes of coil resistance, inductance and automotive transmission parts according to the height of each transmission in winding coil for three kinds of automotive transmission parts. We confirmed that the change of current is a very important factor in the low frequency heating.

• Key Words : Induction heating, Low frequency heating, Welding

Received 23 March 2018, Revised 19 June 2018, Accepted 25 June 2018

* Corresponding Author Junmo Park, School of Electronic and Biomedical Engineering, Tongmyong University, 428, Sinseon-ro, Nam-gu, Busan, Korea. E-mail : jmpark@tu.ac.kr

I. 서론

Faraday가 전자유도현상을 발견한 이래로 이를 활용한 유도가열장치는 가장 효율적으로 전기에너지를 열에너지로 바꾸는 장치로 많은 사람들이 수십 년에 걸쳐 연구되어졌고, 널리 사용되고 있다[1].

특히 유도가열 방식은 기존의 기체 및 액체에 의한 연소발열과 비교하여 청결성, 안정성이 높아 작업환경을 크게 변화시킬 수 있었다. 가열효율이 또한 높아 경제적이고 신속한 가열을 가능해 위밍업 등에 소요되는 소비전력을 줄일 수 있다. 출력 및 온도제어가 용이하여 편리하며, 안정성 및 배출가스 등의 오염 물질의 발생이 없어 위생적이며, 청결하다[2]. 구조적으로는 단순한 장비 구조와 자유로운 용접 자세와 변수 제어를 통해 가열 부위를 제한할 수 있는 등 많은 장점으로 인해 다양한 산업 분야에 적용되고 연구되고 있다. 반면, 다중 물리 문제를 풀어야 하고 알루미늄과 같이 투자율이 낮은 비자성 금속일 경우 높은 주파수로 인한 코일과 인버터 손실도 동시에 상승하는 문제점 등 재료의 자기적 특성 변화를 고려해야 하기 때문에 해석적인 접근이 어려운 점도 있다[3]. 용접 예열은 용접 작업의 일부 공정으로 본 용접 이전에 용접 중 금속이 용착되는 모재면을 목표로 일정한 온도로 가열하는 것을 말한다. 이로 인해 얻을 수 있는 효과는 냉각속도 조절에 따른 재료 경화 정도 감소, 불순물 편석억제, 열적 변형방지, 수분제거의 효과가 있다. 예열 용접은 용접부 또는 인접한 영향부분의 균열을 방지하기 위해 균일하며 고품질의 용접을 위하여 반드시 필요한 작업이다[4].

본 연구에서는 저역대의 가변주파수 공진형 용접예열시스템을 제안하고 220V/60Hz 상용 주파수를 입력하여 자동차 변속기 부품의 형태에 3종의 자동차 변속기 부품을 대상으로 권선코일 내에서 각 변속기 높이에 따라 권선코일 저항, 인덕턴스 및 자동차 변속기 부품의 온도변화를 관찰한 결과 전류의 변화는 저주파 가열에 있어 매우 중요한 요인으로 작용함을 확인하였다.

II. 본론

2.1 저주파 유도가열

금속 가열에 이용되는 일반적인 방법은 유도가열이며 고정 또는 주파수를 가변하여 스위칭 하는 방식으로 많은 산업현장에서 사용되고 있다. 또한 반도체 소자를 활용한 병렬공진회로 방식은 직렬공진회로 방식에 비해 가열코일에 흐르는 전류가 인버터 전류용량의 Q배에 해당하는 전류를 보내므로 급속 가열을 용이하게 하는 장점과 설비전원의 전류용량이 작아도 되는 장점을 가지고 있으며 전류원 인버터 사용으로 전원장치에서의 고장 전류 발생 시 보호 동작이 용이한 장점을 가지고 있으므로 열악한 작업환경에서 강한 내구성의 장점을 가지고 있다[5].

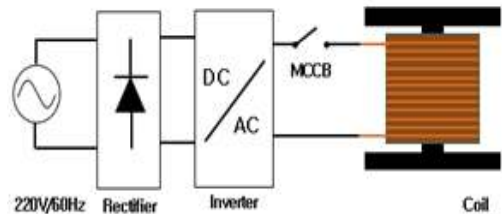


Fig. 1. Induction heating schematic

교류전원을 코일에 도통 시키면 자계 내에서 도전성을 가진 피가열체에 와전류가 발생된다. 와전류 I와 피가열체가 가지고 있는 고유저항 R에 의해 $P = I^2R$ 의 줄열이 발생한다. 이와 같이 발생된 열에너지로 가열하는 방식을 유도 가열이라 하며 주파수의 크기에 따라 저주파 유도가열과 고주파유도가열로 분류할 수 있다.

Fig.1은 상용 220V/60Hz 교류 전원을 정류기를 거쳐 직류전원으로 변환한다. 이를 Inverter에서 저주파 또는 고주파 전원으로 변환하여 코일에 인가함으로써 자계를 형성하여 유도가열을 수행하는 과정을 나타낸 모식도이다. 출력단에 MCB(배선용 차단기)를 추가하여 코일에 과전류가 도통 되는 것을 방지 하였다.

유도가열이 가능한 재질은 전류가 도통 되는 도체에 한정되며 자성체 금속과 비철금속으로 나누어진다. 자성체 금속의 경우 자화에 따른 와전류손과 히스테리시스손이 발생하여 비철금속에 비해 가열이 쉬우며 효율이 좋다. 그 외 전류가 도통 되지 않는 비도체의 경우 별도의 응용기술을 이용해야 한다[5].

가열 코일에 도통 되는 주파수가 높아질수록 피가열체에 흐르는 전류가 표면에 집중되는 현상이 발생한다.

따라서 주파수가 높을수록 전류밀도는 표면에서 높고 내부로 갈수록 감소하게 된다. 이와 같은 현상을 표피 (skin effect)라고 한다. 전류밀도는 가열체의 표면으로부터 중앙내부로 갈수록 식(1)과 같이 지수 함수적으로 감소함을 볼 수 있고, 침투깊이는 맥스웰 방정식으로부터 도출되는 식(2)의 수식에 따라 변화 한다.

$$i_l : i_0 e^{-\frac{l}{d_0}} \quad (1)$$

i_l : 표면으로부터 l 만큼 깊이의 내부 전류밀도 [A/m^2]

i_0 : 표면에서의 전류밀도 ($l=0$) [A/m^2]

d_0 : 주파수 변화에 따른 침투깊이 [m]

$$d_0 = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad (2)$$

ρ : 피가열체 저항률 [$\Omega \cdot m$]

f : 코일의 입력주파수

μ : 피가열체 자성 투자율 [$\mu = \mu_0 \mu_r$]

(2)의 수식에 의하여 주파수가 높을수록 표피효과가 크게 된다.

임계주파수는 동일한 피가열물에 주파수를 바꾸어 가열하면 발열량은 주파수가 낮을 때는 주파수의 2제곱에 비례하여 증가하나 일정주파수 이상이 되면 평방근에 비례하여 증가하게 된다. 이러한 두 가지 특성의 경계가 되는 주파수를 유도가열의 임계주파수라고 하며 피가열 물질의 반경이 침투 깊이의 2.25배가 되는 주파수이다. 보통 효율을 높이기 위하여 임계 주파수 이상의 주파수를 사용한다[6]. 따라서 피가열체의 재질, 가열 부위 및 깊이에 따라 코일에 공급되는 교류전원의 주파수를 변경하여 최적화 할 수 있다.

2.2 유도가열용 저주파 공진형 인버터 및 코일

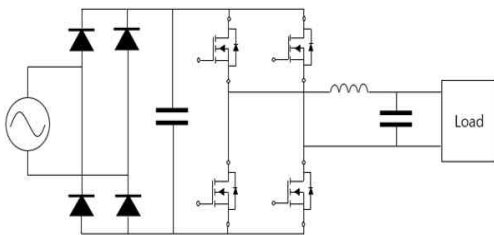


Fig. 2. Circuit of preheating system

Fig.2는 예열시스템의 전체 회로도를 나타낸다. 상용 220V/60Hz 전원을 예열 대상의 재질에 따라 최적화된 주파수를 출력하기 위한 VF(variable frequency)-Inverter이며 AC-DC Rectifier, DC LINK, Inverter, LPF(low pass filter)로 구성 되어 있다. 정밀 시스템이 아니므로 별도의 피드백 정보를 받지 않고 Open-loop 제어시스템을 구축하였다.

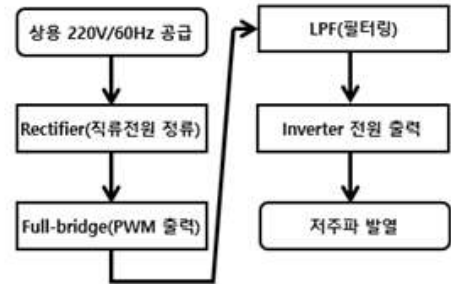


Fig. 3. Circuit driving sequence

전체 회로는 Fig.3과 같은 순서로 동작한다. Rectifier에서 정류된 직류전원은 MOSFET로 구성된 Full-bridge 회로에서 교류전원으로 변환된다. MOSFET는 TI사의 TMS320 계열의 DSP를 이용하여 스위칭 구동하였으며, 코일 전류 회생으로 효율이 좋은 Bipolar-PWM 방식으로 제어하였다.

$$f_{cut-off} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (3)$$

(L : 인덕턴스, C = 커패시턴스)

$$V_{out} = V_{DC} \sin \omega / \sqrt{2} \quad (4)$$

(V_{out} = 출력전압, V_{DC} = 입력전압)

출력단에서는 PWM 스위칭 주파수를 필터링 하는 2차 LPF를 Inductor와 Capacitor를 이용하여 설계 하였으며 수식(3)을 적용하여 Cut-off Frequency에 따라 주파수 응답을 고려하여 최적화된 L,C 값을 설계할 수 있다. 본 연구에서는 Cut-off Frequency를 2kHz로 설정하고 $L=1mH, C=6.8 \mu F$ 값으로 LPF를 제작 하였다. LPF를 통과한 PWM 신호는 Fig.4와 같이 주기적인 사인파 전압으로 필터링 된다.

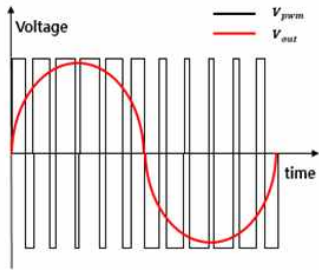


Fig. 4. Output Voltage

수식(4)는 입, 출력 전압의 관계식을 나타내며 최종적으로 220V에 주파수가 가변 되는 교류전원이 출력된다.

2.3 코어부

코어를 구성하는 전기강판은 포스코 주식회사의 방향성 전기강판 PH-Core(30PH105)를 사용했다. PG-Core보다 압연방향으로 배향성을 더욱 강화되었으며 저철손과 고자속밀도의 특성을 가진다. 코어는 Fig.5와 같이 E형, L형으로 제작하였다.



Fig. 5. E-type Core(Left), L-type Core(Right)

Bakelite 재질의 원통에 코일을 권선하여 Fig.6(좌)와 같은 형태로 제작하였으며 조립 후 결합하면 Fig.6(우)와 같은 모습을 한다.

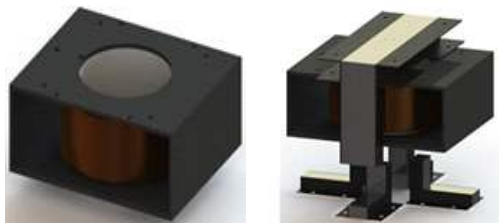


Fig. 6. Winding coil case

III. 실험 결과 및 고찰

Fig.7은 실험장치를 나타내고 있다. 저주파 예열기의 구성은 전기강판을 고정하는 브라켓으로 이루어진 코어부, 코일을 와인딩할 수 있도록 만든 원통형 보빈과 케이스로 이루어진 코일부, 전력을 조정할 수 있도록 꾸며진 전장부로 이루어져 있다.



a. Heating plate



b. Control Unit



c. Operation Panel



d. Temperature measurement

Fig. 7. System configuration and measurement

Fig.7은 시스템의 구성 및 측정부를 보여주고 있다. Fig.7(a)와 같이 L형 코어 위에 각 워크를 올려놓고 E형코어와 코일권선부가 조립되어진 헤드부가 내려와 전원이 투입됨과 동시에 가열이 시작된다.

실험은 각 워크를 투입하기 전과 후의 높이에 따른 권선코일의 저항과 인덕턴스를 측정하고 각 실험에 따라 220V/60Hz의 전원을 30-60초간 투입 후 투입 전과 후를 비교하였다. 현재 투입되고 있는 전압 및 전류는 Fig.7(c) 판넬부를 통하여 나타내었다. 변속기 부품의 온도는 Fig.7(d)와 같이 열전대를 이용하여 동일지점을 90도 간격으로 4번의 반복측정 후 평균하였다. 또한 상온과 온도를 비교하여 일정 온도까지 식힌 후 같은 실험을 3회 반복 하였다.

표.1은 샘플워크 3종을 대상으로 실험한 결과이다. A work의 경우는 하단에 치절부분이 추가되어 있으며 B와 C work는 용접대상 부위의 높이가 다르다. 이러한 개별워크를 1차에는 높이 0mm, 2차에서는 높이 11mm,

3차에서는 높이 27.5mm를 바닥에서 띄워서 실험하였으며 실험전 환경은 상온 4(°C), 코일저항은 170.4 ohm, 출력전압은 374V였다. 표.2에서는 높이에 따른 각 위크의 저항과 인덕턴스를 측정하였다. 각각 높이가 높아짐에 따라 위크의 저항과 인덕턴스는 모두 감소하였다.

결과적으로 각 높이에 따른 실험결과 제작된 환경에서는 위크의 높이가 높아짐에 따라 코일부의 저항이 낮아지고 전류는 더 많이 인가되어 결과적으로는 동일한 시간에서는 코일의 저항이 낮아 더 많이 전류가 투입되었을 때 가장 높은 온도를 보였다.

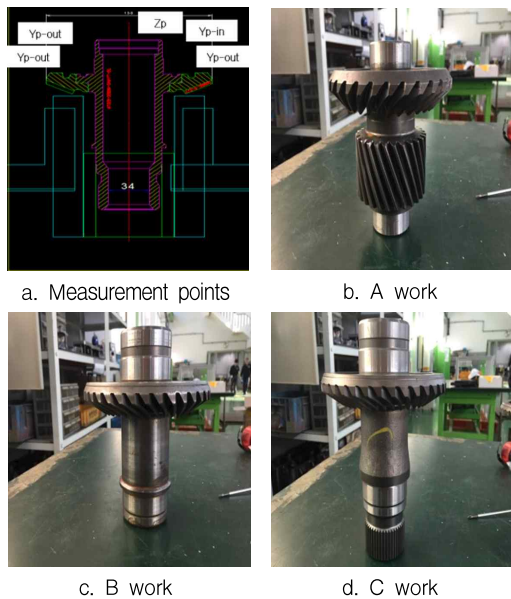
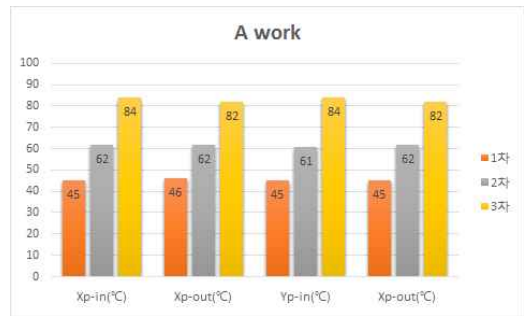


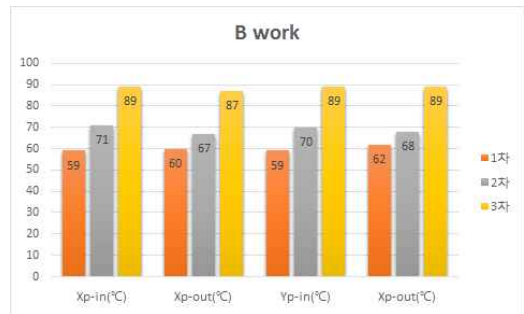
Fig. 8. Temperature measurement points and three type of heated objects

Table 1. Measurements according to the height of three types of objects to be heated

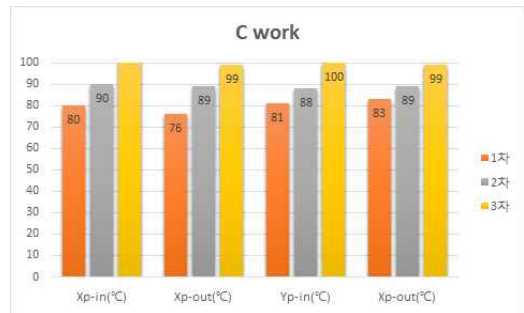
구분		X		Y		Z	전류 (A)	저항 (Ω)
		Xp-in (°C)	Xp-in (°C)	Xp-in (°C)	Xp-in (°C)	Xp-in (°C)		
A	1차	45	46	45	45	45	30	98.98
	2차	62	62	61	62	62	30	97.57
	3차	84	82	84	82	91	34.3	84.07
B	1차	59	60	59	62	75	25.7	87.3
	2차	71	67	70	68	77	28.8	84.2
	3차	89	87	89	89	101	33.8	71.93
C	1차	80	76	81	83	90	35.8	62.17
	2차	90	89	88	89	97	38.5	56.85
	3차	101	99	100	99	105	39.8	53.29



a. A work temperature variation



b. B work temperature variation

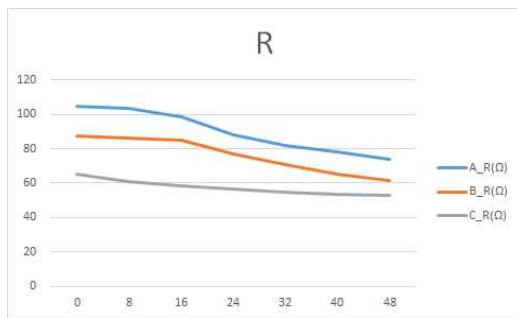


c. C work temperature variation

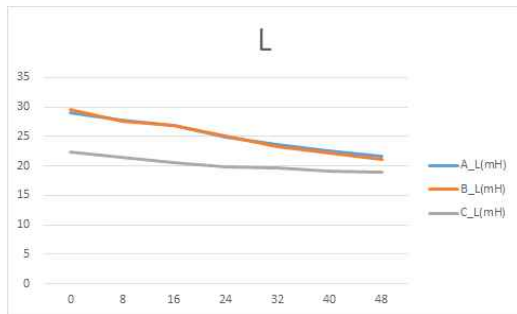
Fig. 9. Temperature change of each measurement point

Table 2. Resistance and inductance measurement test according to height

높이 (mm)	A		B		C	
	A_R (Ω)	A_L (mH)	B_R (Ω)	B_L (mH)	C_R (Ω)	C_L (mH)
0	104.9	29.0	87.3	29.5	65.5	22.3
8	103.8	27.8	86.2	27.6	61.2	21.4
16	98.4	26.9	84.8	26.9	58.5	20.6
24	87.8	24.8	76.9	25.0	56.5	19.9
32	82.1	23.6	70.7	23.3	54.5	19.6
40	78.0	22.5	65.5	22.1	53.5	19.2
48	74.1	21.7	61.7	21.1	52.9	19.0



a. Resistance change of each work



b. Inductance change of each work

Fig. 10. Resistance and inductance change of each work according to height

IV. 결론

저주파대역에서 유도가열 기법을 이용한 가변주파수 공진형 용접예열 시스템을 제안하여 3종의 자동차 변속기 부품을 이용하여 권선코일 내부에서 각 부품이 위치하여 있는 높이에 따라 코일의 저항, 인덕턴스의 변화에 따라 전원 투입 후 피가열체의 온도 변화를 관찰하였다. 저주파 가변주파수 공진형 인버터를 이용한 금속재질의 변속기 부품의 유도가열에 있어 기존의 기체 및 액체에 의한 연소발열과 비교하여 청결성, 안정성이 높아 작업환경을 크게 변화시킬 수 있으며 워밍업 등을 위한 소비전력을 줄일 수 있으며 출력 및 온도제어가 용이하며 상자성체를 이용한 저렴한 간단한 형태의 가열방식으로 기대가 된다. 또한 주파수 대역을 조절함에 따라 간단한 구성으로 고주파에 비해 쉽게 심부까지 열을 전달할 수 있으며 가열을 통하여 용접 전에 표면의 오염 물질의 빠른 제거 등의 우수한 장점을 이용하여 널리 활용 수 있다고 유추되어진다. 다만 과전류에 대한 제한 장치 및 안전장치가 고려되어야 하며 코일의 정확한 내부 저항을 LCR-METER로

측정하여 소모 전력을 확인해 볼 필요 및 코일 유도된 관성 전류를 안정적으로 Free-Wheeling 할 방안을 검토할 필요가 있다고 생각된다.

본 논문에서 제안한 저주파 가변주파수 공진형 유도가열기를 이용하여 자동차 변속기 부품 3종을 이용하여 권선코일 내에서 부품의 높이에 따라 코일의 저항 및 인덕턴스의 변화와 전원입력 후 피가열체의 온도변화를 관찰한 결과 전류의 변화는 저주파 가열에 있어 매우 중요한 요인으로 작용함을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] D. C. Yoon, K. B. Lee, Y. D. Choy, S. T. Beak, B. M. Han, Y. C. Soh Characteristic Analysis of Thyristor PWM Rectifier for low-frequency Induction Heating System," in *Proceedings of Power Electronics Annual Conference*, The Korean Institute of Power Electronics, vol. 2001, no. 7, pp. 681-684, 2001.
- [2] D. C. Shin, S. H. Kim "A Study on the Induction Heating for Aluminum Sheet Using High-Frequency Resonant Inverter," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 18, no. 3, pp. 90-94, May 2004.
- [3] W. S. Shin, H. C. Park, "Inverter for Induction Heating using Simultaneous Dual-Frequency Method," *The Transactions of The Korean Institute of Power Electronics*, vol. 16, no. 6, pp. 554-560, Dec. 2011.
- [4] I. J. Yoon, "A study on the thermal resistance characteristics of carbon fiber for the development of heater for preheating of welding joint" Graduate school of industry University of Ulsan, 2017.
- [5] D. M. Divan and G. L. skibinski, "Zero Switching Loss Inverters for High Power Applications," *IEEE IAS, Rec.*, vol. 25, no. 4, pp. 634-643, 1989.
- [6] B. G. Sung, "Design of a high frequency high efficiency series-resonant inverter for induction heating" Graduate school, Pusan National University, 1999.

저자 소개

양 주 영 (Juyeong Yang)



2012년 2월 : 동국대학교
컴퓨터학전공(공학사)
2014년 2월 : 한경대학교 대학원
전기전자제어전공(공학석사)
2014년~2016년 : (주)피엔에스
기술연구소
2017년~현재 : 에이플러스
주식회사

관심분야 : 영상처리, 머신비전, 생체신호 계측, 비파괴
검사, 잡음제거 등

김 수 찬 (Soochan Kim)



1994년 : 인제대학교 의용공학과
(공학사)
1998년 : 연세대학교 대학원 생체
공학협동과정(공학석사)
2003년 : 연세대학교 대학원 생체
공학협동과정(공학박사)
2003년~2004년 : Rensselaer
Polytechnic Institute (Post Doc.)
2004년~현재 : 한경대학교
전기전자에어공학과, 교수

관심분야 : 생체신호 계측 및 분석, HCI, 전자기장을
이용한 세포 성장 촉진, 바이오 임피던스 등

박 준 모 (Junmo Park)



1993년 2월 : 인제대학교
의용공학과(공학사)
1996년 2월 : 인제대학교
의용공학과(공학석사)
2008년 8월 : 부산대학교
의공학협동과정(공학박사)
2017년 2월 ~현재 : 동명대학교

전자·의용공학부 교수

관심분야 : 신호처리, 뇌 신경계 신호 분석