

합성수지 소재 접착을 위한 고주파 유도가열 접착기 설계

추연규*, 김현덕*, 장우환**

*진주산업대학교, **(주)동영엔지니어링

Design of High-Frequency Induction Heating Welder for Synthetic Resin Sheet

Yeon-Gyu Choo*, Kwang-Seok Lee*, Hyun-Duck Kim*, Yeoun-Sik Park**, Woo-Heung Jang***

*Jinju National University, **Dong Young Eng. Co., Ltd.

e-mail : ygchoo@jinju.ac.kr

요 약

기존에 적용중인 유전가열 합성수지 접착기술의 경우 진공관 소자를 사용하여 10MHz 대역 이상의 스위칭 주파수를 사용하고, 유전손실이 비교적 높은 PVC 소재에 제한적으로 적용해 왔다. 다른 합성수지 소재에 비해서 유전손실이 낮은 친환경적인 소재에 대해서는 적용이 어려운 기술인 관계로 최근들어 부각되는 친환경적 소재의 적용 확대로 인하여 기존 유전가열 방식의 접착기술은 한계에 접하고 있다. 본 논문에서는 고주파 유도가열 관련 기술을 응용하여 친환경적인 합성소재의 직접가열의 문제점을 간접가열에 의한 온도제어를 적용하여 고주파 유도가열 접착기를 설계하였다.

1. 서 론

신발, 가방, 의류 등의 제조분야에서 합성수지 소재는 광범위하게 사용되고 있다. 특히 신발 갑피 장식용으로 사용되는 합성수지 소재로 완제품을 제조하기 위해서는 합성수지와 타소재와의 접착 혹은 합성수지간의 접착공정이 흔히 요구되는데, 현재 합성수지 소재로 많이 사용되고 있는 PVC 등 합성수지 소재의 접착방법으로는 고주파 유전가열 방식이 많이 사용되고 있다.^[1]

기존에 적용중인 유전가열 합성수지 접착기술의 경우 진공관 소자를 사용하여 10MHz 대역 이상의 스위칭 주파수를 사용하고, 유전손실이 비교적 높은 PVC 소재에 제한적으로 적용해 왔다. 다른 합성소재에 비해서 유전손실이 낮은 친환경적인 소재에 대해서는 적용이 어려운 기술인 관계로 최근들어 부각되는 친환경적 소재의 적용 확대로 인하여 기존 유전가열 방식의 접착기술은 한계에 접하고 있다.

친환경적인 합성소재인 PE, PP, EVA, PU 등은 낮은 유전손실로 인하여 기존의 고주파 유전가열 방식의 적용이 곤란하다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 고주파 유도가열 방식을 응용하여 고주파 유도가열 접착기를 설계하였다. 고주

파 유도가열의 접착방식은 전자유도작용을 이용하여 영구자석 대신 코일에 교류전류를 흘려 교번자속이 발생하게 함으로써 피가열체에 유도

전류(와 전류)를 흐르게 하면 이 유도전류는 와전류손실에 의해 주울열을 발생시키게 되는데, 이렇게 발생된 열로써 피가열물을 가열하는 방식이다. 고주파 유도가열의 주된 응용분야는 금속의 열처리, 고주파 용해로, 고주파 용접 및 일반 금속 가열 등인데 친환경적인 합성수지 소재를 접착할 경우 직접가열 방식으로는 어렵다. 본 논문에서는 유도가열을 응용하여 접착금형을 제작하여 간접가열에 의한 온도제어를 PID 제어기를 사용하여 합성수지 소재를 접착할 수 있도록 고주파 유도가열 접착기를 설계하였다. 설계된 접착기의 성능을 평가하기 위하여 PID 제어기에 의한 온도제어를 실험을 통하여 확인하였다.

II. PID 제어기

연속시간 제어시스템의 설계에 널리 이용되고 있는 제어기의 하나는 PID 제어기이다. 여기서 PID란, 비례(Proportional), 적분(Integral), 미분(Derivative) 제어를 의미한다. 비례제어는 편차신호에 K_p 만을 곱한 것이고, 적분제어는 편차신호의 적분치에 K_i 를 곱한 것이며, 미분제어는 편차신호의 시간미분치에 비례하는 신호를 만드는 것이다. 적분제어의 기능은

*본 연구는 산업자원부 산업기술개발사업 지원에 의해 연구하였습니다.

정상상태오차를 감소시키는 동작을 행하게 되며, 미분제어의 기능은 응답의 오버슈트를 감소시키는 예측 동작을 행한다. 동일한 PID 제어원리가 디지털 제어에 적용될 수 있다. 디지털 PID 제어는 DDC(Direct Digital Control)에 속하는 제어방식으로, 제어대상 시스템의 조작량을 결정하는 것에 제어편차에 대한 비례, 적분, 미분의 3항 동작을 이용하는 방식으로, 그 원리는 연속시간 제어를 확장하여 이용되고 있는 방식이다. 또 한 대의 컴퓨터에서 수십 수백개의 루우프를 제어하는 직접디지털 제어의 경우 대부분의 제어 루우프는 PID 제어방식에 관한 경우가 많다.^[4] 이산시간 제어시스템에 있어서의 속도형 디지털 PID 제어 알고리즘은 다음 식과 같다.

$$u(n) = u(n-1) + K_P(e(n) - e(n-1)) + K_I e(n) + K_D(e(n) - 2e(n-1) + e(n-2))$$

여기서, $u(n)$ 은 이산시간 n 에서의 제어입력이고 K_P , K_I , K_D 는 PID 제어기의 비례, 적분, 미분 파라미터들이다.

PID 제어기는 아날로그 시스템에 있어서, 스텝 응답에 바탕을 둔 PID 제어기의 파라미터들을 결정하는 간단한 방법들이 Ziegler와 Nichols에 의해 발전되어 왔었다. Ziegler-Nichols 동조규칙은 다른 많은 시스템을 모의실험 해법으로써 경험적으로 발전되어 왔다. 이산시간 시스템에 있어서 Takahashi는 Ziegler-Nichols 방법에 바탕을 둔 특별한 방법을 소개했다. 그러나 Ziegler-Nichols 동조규칙은 페루프 시스템에 너무나 약하게 영향을 준다는 결점을 가지고 있다. 어떠한 프로세스에서도 정교한 제어 수행을 얻기 위해서는 PID 제어기의 다양한 파라미터들이 시도되어야 하고 수동적으로 동조 되어야 한다. 이러한 수동적인 동조방법은 적절한 제어기 파라미터를 얻기 위해 시행착오로 인한 시간 소요가 많으므로 효과적이지 못한 결점이 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 자기동조 제어방법이 나타나기 시작했다. 자기동조 제어기의 큰 장점으로는 플랜트를 효율적으로 제어하기 위해 적절한 제어기 파라미터를 추정할 수 있다. 그림 1은 자기동조 제어기의 블록선도를 나타내고 있다.^[3]

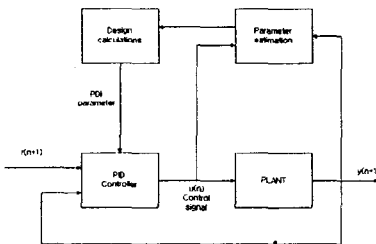


그림 4. 자기 동조 제어기의 블록선도

III. 고주파 유도가열 접착기 설계

유도가열기는 물체의 전기가열을 위해 근래에 와서는 반도체식 고주파 발생기가 대부분을 이루며^[1], 생산설비의 자동화, 품질향상, 전력의 절감을 위해 전자, 가전, 금속, 자동차 공업 등 여러 분야에 응용되고 있다. 최근에는 SI-TR(SIT), Si-Thyristor, IGBT, 쌍극성 MOSFET 등과 같은 새로운 고속 대전력용 반도체 전력소자들의 개발에 의해 가능한 고주파 스위칭 범위가 20kHz~수백 kHz인 공진형 전력 인버터와 컨버터의 설계가 가능해졌다.^{[4][5]}

고주파를 이용한 응용분야는 주로 열을 얻는데 쓰여지며, 그 방법은 발열원리 및 용도에 의해 구분된다. 일반적으로 고주파 가열에서는 유도가열 및 유전가열로 나눌 수 있다. 유도가열이란 금속과 같은 도전물질에 고주파 자장을 가할 때 도체내에서 생기는 맴돌이 전류에 의하여 물체를 가열하는 방법이며, 유전가열이란 유전체에 고주파 전장을 가할 때 생기는 유전손에 의하여 유전체를 가열하는 방법을 말한다.^[1]

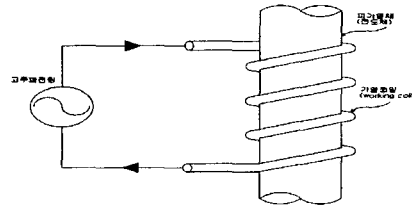


그림 2. 고주파 유도가열의 원리

고주파 유도가열 원리는 그림 2와 같이 가열하고자 하는 도체에 코일을 감고, 이 코일에 고주파 전류가 흐르면 도체 내에는 고주파 자속이 통과한다. 그리고 이도체내에는 전자유도 작용에 의하여 맴돌이 전류(Eddy current)가 흐르게 된다. 이 맴돌이 전류는 고주파 자장의 자속 변화에 의하여 생긴 것이므로 일종의 고주파 전류이며, 그 주파수는 고주파 전원의 주파수와 같게 된다. 도체 내에 흐르는 맴돌이 전류에 의하여 도체는 가열되고 전력 손실을 가져오는데 이것을 맴돌이 전류손이라 한다. 그러나 고주파 가열에 사용되는 고주파전원의 주파수는 매우 범위가 넓기 때문에 주파수의 크기에 따라 가열 특성이 많이 달라진다.^[6]

본 논문에서는 고주파 유도가열을 응용하여 고주파 유도가열 접착기를 설계하였으며, 전체 구성도를 그림 3과 같이 나타내었다. 그림 3의 고주파 시스템부에서 3상 입력의 R S T의 각 위상이 순서대로 3상 위상제어 정류기의 SCR에 점호신호를 주어야 하므로 3상의 위상을 검출하고 파형정형을 통해서 SCR 제어회로의 위상기준 신호로 공급한다. 전력실정신호와 주전력과 절연되도록 DCCT를 사용하여 펄터회로부터 검출된 직류출력신호를 비교 연산하여 설정신호에 근사하는 출력을 유지

할 수 있도록 각 SCR의 점호신호를 발생시켜 SCR 구동회로에 공급한다. SCR 공급회로는 SCR의 GATE 구동사양에 맞는 turn-on 전력을 발생시켜 3상 위상제어 정류기의 위상을 제어시킨다.^[7]

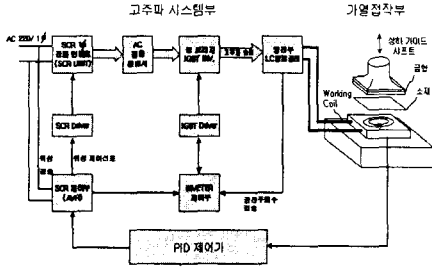


그림 3. 고주파 유도가열 접착기 구성도

3상 위상제어 정류기는 6개의 SCR을 이용하여 풀 브리지로 구성시켰으며 각 SCR에는 turn-off에서 발생하는 dv/dt, dt/di의 급격한 서지 출력으로 부터 보호될 수 있도록 RC 스노브 회로를 Anode 와 Cathode 사이에 접속하였다. LC 필터회로는 위상제어회로에서 정류된 전압전류의 고조파를 경감시키고 ripple을 감소시킨다. 인버터는 DC 전원을 교류전원으로 변환하는 회로로서 인버터의 종류가 많았으나 Full Bridge 인버터를 사용한다. 적절한 내압 내전류의 Power Device의 선정이 매우 중요 시되며 스위칭시 발생하는 스파이크 전압으로 인해 IGBT 소자 파괴를 보호하는 스노브 회로는 최소형인 RCD 방전 저지형으로 설계한다. IGBT는 전압 Driver 방식으로 설계되어야 하며 turn-off 기간중에 스위칭 잡음으로부터 소자의 보호와 스위칭 시간을 단축하기 위해 게이트에 역전압을 걸어 준다. Turn-on 기간중에는 IGBT의 Collector-Emitter 간 전류를 감시하면서 순간 과전류가 흐를 때 나타나는 전압을 검출해서 게이트 신호를 짧은 시간에 off시킨다. 그러므로 IGBT의 과전류 및 주 전력을 차단하여 IGBT의 파괴를 방지하는 신호를 출력하기 위한 driver 설계가 필요하다. 인버터 제어회로는 부하로부터 반환되어 오는 시변 공진주파수를 받아서 파형을 다시 정형하고 위상비교기로 보내어진다. 위상비교기는 전압 제어발전기로부터 출력되는 인버터의 구동주파수와 부하에서 반환되는 시변 공진주파수의 위상을 비교한다. 위상 비교된 출력은 Low Pass Filter, 전압제어 발전기, 펄스조합 논리회로를 통해서 인버터 구동회로의 입력주파수를 공급한다.

이와 같이 설계된 PLL 회로는 인버터 구동주파수를 가변되는 부하회로에 의한 시변 공진주파수에 빠른 응답으로 추종시키므로 역율이 항상 1에 가깝게 하여 부하효율을 증대시킨다. PLL의 Capture 및 Lock Range를 공진주파수의 가변폭 이상으로 적절히 조정하므로써 다양한 부하코일에 대응할 수 있는 넓은 주파수 대역의 출력을 얻게 한다.

가열접착부의 구조는 working coil 내부에

Ferrite core가 장착되어 있으므로 강한 자계가 접착금형이 표면에 유도되고, 접착금형의 표면에는 유도자계에 의한 맴돌이 전류(Eddy current)가 발생하게 된다. 그리고 이 맴돌이 전류는 접착금형의 전기저항에 의해 금형 전체를 간접 가열시키게 된다. 통상적인 제품에 있어서 가열의 주대상인 접착금형을 합성수지 접착부의 형상과 일치시켜 제작되는데, 주요 소재로 열전달율이 높은 알루미늄 또는 그 합금소재가 바람직하나 유도가열시 알루미늄 소재의 표면가열은 스틸(steel) 소재의 표면가열보다 3배 정도 높은 출력과 주파수를 요구하기 때문에 몰드 전체를 알루미늄으로 사용하는 것은 최종제품 가격상승의 원인이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 폭발접합방법과 같은 다양한 관련기술을 필요로 한다.

고주파 유도가열 접착기에서는 접착 금형표면의 온도를 소재에 따라 일정하게 유지하여야 되므로, 열전쌍(Thermo-couple) 온도센서로써 표면온도를 검출한다. 그리고 검출된 온도는 적절히 전압신호로 변환되고, 이 전압신호는 12bit A/D converter에 의해 Digital 양으로 변환되어 설정치와 현재치의 오차신호를 PID 제어기에 의해 접착금형의 표면을 설정된 온도까지 유지하게 된다.

IV. 실험 및 결과

앞 장에서 설계된 고주파 유도가열 접착기의 접착온도 특성을 평가하기 위하여 그림 3과 같이 실험장치를 구성하였다. 친환경적인 합성소재를 접착하기 위하여 접착금형의 온도를 소재의 접착온도에 따라 온도제어가 가능하도록 PID 제어기를 사용하였다.

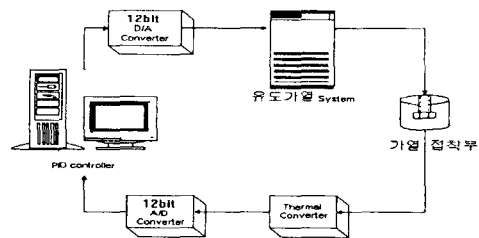


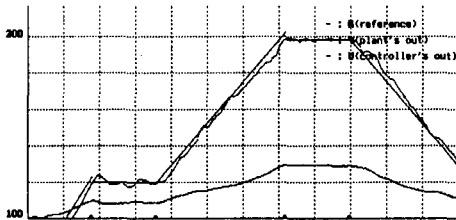
그림 7. 실험장치 구성도.

고주파 유도가열 접착기의 온도 특성을 파악하기 위하여 16bit μ -computer가 설정치에 비례한 출력을 12bit D/A converter를 통해 유도 가열장치에 인가한다. 유도 가열장치는 설정치에 비례한 고주파 출력을 가열 접착부의 working coil에 인가한다. 그림 4에서와 같이 working coil 내부에는 Ferrite core가 장착되어 있으므로 강한 자계가 접착금형 표면에 유도되고, 접착금형의 표면에는 유도자계에 의한 맴돌이 전류(Eddy current)가 발생하게 된다. 그리고 이

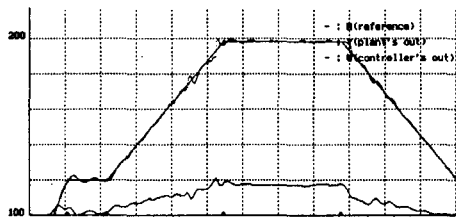
램들이 전류는 접착금형의 전기저항에 의해 금형 전체를 간접가열시키게 된다.

본 논문에서는 접착금형 표면의 온도를 소재의 특성에 따라 일정하게 유지하여야 되므로, 열전쌍(Thermo-couple) 온도센서로써 표면온도를 검출한다. 그리고 검출된 온도는 적절히 전압신호로 변환되고, 이 전압신호는 12bit A/D converter에 의해 Digital 양으로 변환되어 μ -computer는 설정치와 현재치와의 차인 오차를 입력받아 PID 제어기에 의해 원하는 온도를 출력한다. 이 제어신호는 D/A converter를 통해 출력함으로써, 접착금형의 표면을 원하는 온도로 유지하게 된다.

그림 5는 PID 제어기를 사용하여 고주파 유도가열 접착기의 온도제어 특성을 나타내었다.



(a) PID 제어기의 Tuning 전



(b) PID 제어기의 Tuning 후

그림 5. 고주파 유도가열 접착기의 온도 출력파형

V. 결론

본 논문에서는 고주파 유도가열 관련 기술을 응용하여 친환경적인 합성소재를 접착할 수 있는 고주파 유도가열 접착기를 설계하였고, 접착금형의 온도를 소재의 접착온도에 따라 온도제어가 가능하도록 PID 제어기를 사용하여 실험을 통하여 설계된 접착기의 온도제어 특성을 살펴보았다. 그 결과 PID 제어기에 의한 온도제어 특성은 우수함을 확인하였다. 그러나 통상적인 제품에 있어서 가열의 주대상인 접착금형은 합성수지 접착부의 형상과 일치시켜 제작되는데, 주요 소재로 열전달율이 높은 알루미늄 또는 그 합금소재가 바람직하나 유도가열시 알루미늄 소재의 표면가열은 스틸(steel) 소재의 표면가열보다 3배 정도 높은 출력과 주파

수를 요구하기 때문에 몰드 전체를 알루미늄으로 사용하는 것은 최종제품 가격상승의 원인이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 폭발접합방법과 같은 다양한 관련기술의 연구가 더 필요하다. 따라서 향후 과제로는 친환경적인 합성소재 접착을 위하여 고주파 유도가열 접착기를 제작하여 간접가열의 문제점 보완과 응용 범위를 확대하는 것이다.

참고 문헌

- [1] 이재건 "실무 고주파 가열", 진영사, 1996
- [2] Katsuhiko Ogata, "Pulse transfer function of a digital PID controller," Discrete time control systems, Prentice-Hall Inc., pp. 199-207, 1987.
- [3] K. J. Astrom and B. Wittenmark, "Adaptive control : Self-Tuning Control," Computer-controlled systems, Prentice-Hall Inc. pp. 438-440, 1990.
- [4] Denkishoin, "Bipolar Transistor 應用技術", 電氣書院, 1981.
- [5] H. Akagi, T. Sawae, A. Nabae, "130 kHz 7.5kW Current Source Inverters Using Static Induction Transistors for Induction Heating", IEEE Trans. on PE, Vol. 3, pp. 303-309, 1988
- [6] M. T. Maruhashi, "A Phase-Difference Angle Control Mode PWM High-Frequency Resonant Inverters using Static Induction-Transistors and Thyristers", IEEE PE-SC '87 Record, pp. 674-681, June, 1987.
- [7] 장중승, 김승철, 임영도, "뉴로-퍼지 제어기를 이용한 고주파 유도가열기의 시변부하에 대한 정전력 제어", 한국해양정보통신학회논문집, Vol. 2, No. 2, pp. 223~230, 1998.
- [8] 조원제, 최세영, 유종선, 하창식, 윤정식, "고무기술의 기초", 2000