

직렬공진 PWM인버터를 이용한 DPH시스템의 성능평가

이진우 · 김용주 <호서대학교 교수, 특허청 전기심사담당관>

1 서 론

전자유도가열 발열체와 유체이동과의 새로운 열 교환방식은 파이프라인 시스템에 있어서 여러 가지의 기체, 액체 및 증발체 등을 저온에서 초고온에 이르기 까지 고정도의 가열이 가능한 방법으로 일체의 연소 과정이 없다는 점에서 작업환경의 개선이 가능하며, 온도제어 신뢰성에 뛰어난 특성을 보이는 전자유도 유체 가열기술은 IGBT대응의 고주파 인버터를 사용하여 고성능·고효율의 시스템화가 가능한 고주파 PE (Power Electronics)의 새로운 분야로 주목받고 있다.

이러한 고주파 인버터는 상용교류·다이오드전류 비평할 직류로부터 수(kHz)~수(MHz)의 고주파교류를 발생시킬 수 있는데, 본고에서의 고주파 인버터는 모듈타입의 IGBT를 사용한 위상지연 PWM공진형 고주파인버터를 도입하여 부하로서 고주파자속을 발생시키는 유도자 워크코일, 즉 이동유체를 가열시키기 위해 와전류를 이용하는 특수하게 설계된 넓은 전열면적을 갖는 적층형 타입의 규칙충진형 발열체를 사용한다.

부하계는 이러한 규칙충진형 구조물을 내장한 유체 가열 용기, 용기 출구의 유체온도를 안정하게 제어하기 위하여 열 전대 일점 검출에 의한 자동 튜닝 PID 제어부로 구성한다. 이러한 전기에너지→열 교환 변환시

스템은 절연체의 파이프내부에 새롭게 설계된 유도발열체 구조물을 통과하는 이동유체의 난류(亂流)를 이용하여 유체를 내부로부터 가열하는 방식(DPH: Dual Packs Heater)과 유도발열체를 내장한 자성(磁性)스테인레스와 알루미늄의 2중 구조의 금속합판 구조의 발열체인 용기 파이프의 내벽을 유체가 접촉 이동하여 외부로부터 내부로 향하는 가열방식(SPH: Single Pack Heater)으로 나누어볼 수 있다.

본고에서는 새롭게 제시된 DPH 및 SPH방식의 고주파 공진형 인버터제어를 이용한 전자유도 열 유체 가열방식의 에너지 생성 및 그 응용 시스템을 예로 들어 시뮬레이션에 의한 동작해석, 실험결과 및 이동 유체의 순시가열시스템의 성능평가와 그 응용에 대해 서술하고자 한다.

2. 전자유도 유체가열 시스템의 구조

그림 1에 나타낸 DPH시스템의 구조는 절연 파이프내의 가열용기 내부에 특수발열체인 적층형 규칙 충진물을 워크 코일로부터 전자유도에 의해 와전류로 발열시켜 절연파이프 용기에 물이나 공기 등의 이동 유체를 전자(電磁)유도 발열체인 적층형 규칙 충진물에 접촉시킴에 따라 작은 비열로 급속 가열을 가능하게 하는 새로운 유체가열 시스템의 구조를 나타낸다.

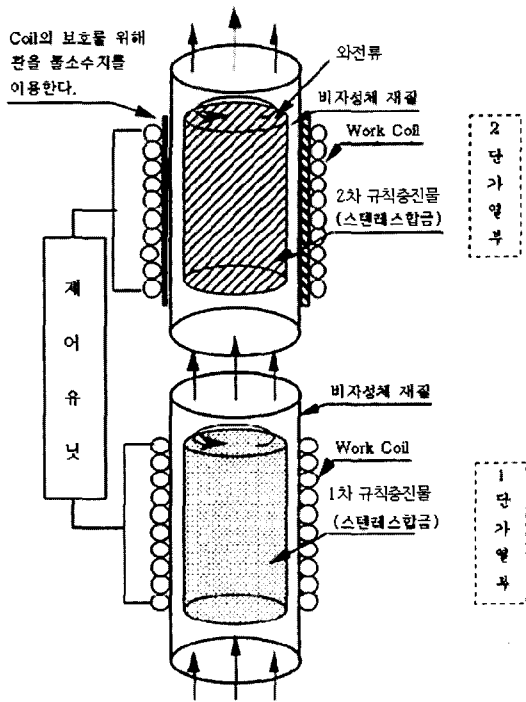


그림 1. DPH 시스템의 구조

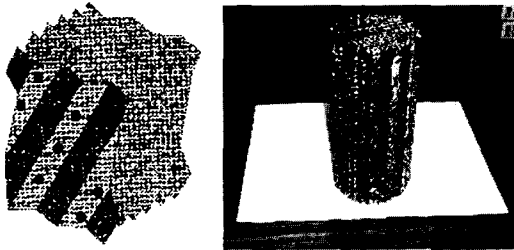


그림 2. 적층형 규칙충진물

그림 2는 발열체로서 특수하게 설계된 적층형 규칙 충전 발열체를 나타내는데 이 발열체는 금속선이 아닌 금속 박판(薄板)을 이용하기 때문에 고온 가열시 단선, 단락 및 전기절연 성능이 뛰어나며 열 용량이 작은 발열부의 구성이 가능하고 유체통과 저항이 극히 작아 출력부의 온도응답특성이 빠르며 정밀 온도 제어가 가능하다는 종래의 유체가열장치에서 얻을 수 없었던 뛰어난 특성을 갖는다.

3. 고주파 인버터 및 그 제어장치

그림 3에 고주파인버터로서 정주파 PWM방식 전류형 직렬부하 공진형 인버터를 나타내는데 이것은 절연파이프의 두께, 내부의 적층형 규칙 충전발열체의 소재 그리고 가열 유체계에 의해 변화하는 인덕턴스와 저항분으로 구성되는 전기회로 모델로 볼 수 있다.

실제로 워킹코일과 피가열 물체계의 사이에 정합 트랜스가 사용되는데 R-L부하와 L을 보상하는 C로부터 직렬공진 회로계를 위한 고효율 운전을 위하여 인버터의 동작 주파수 선정이 매우 중요하다. 이는 R-L회로에 직렬보상 콘덴서 C를 사용하여 R-L-C 직렬부하 공진회로 부하계를 구성하는데 발열체를 극한 정도까지 가열하지 않으면 전기회로 정수는 거의 변화하지 않기 때문에 R-L회로계로 볼 수 있으므로 직렬부하보상 콘덴서 C는 R-L부하계의 L을 보상하는 최적동조조건 하에서 사용 가능하다.

R-L부하계의 R이 IGBT의 도통저항에 비해 비교적 큰 경우에는 직렬공진회로계가, R-L부하계의 R이 IGBT의 도통저항에 비해 작은 경우에는 직렬 인덕턴스를 갖는 병렬공진회로가 효율적 측면에서 유리하다 할 수 있다.

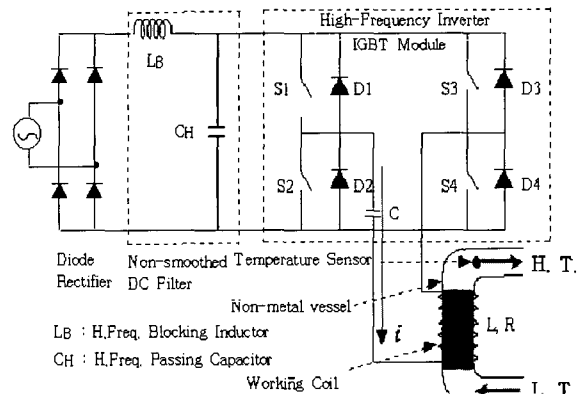
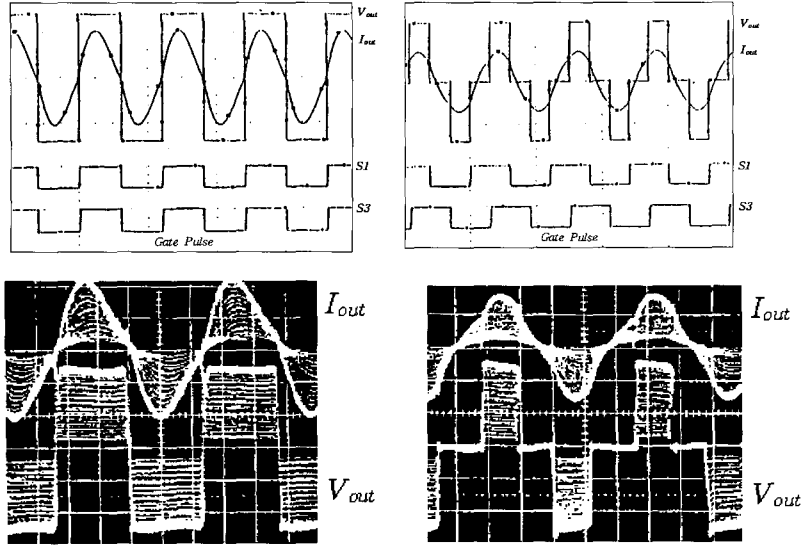


그림 3. 전류형 직렬부하 PWM 공진형 인버터

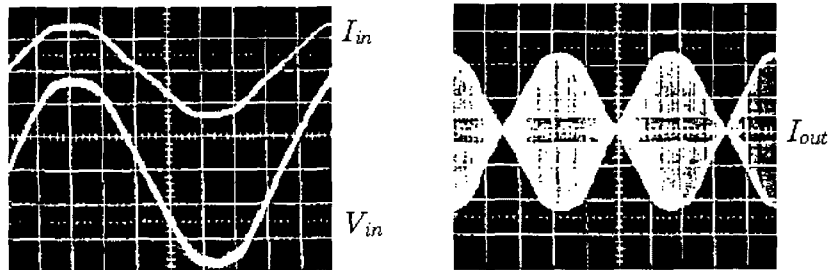


50A/div, 100V/div, 50 μ s/div

(a) Full Power Load

(b) Half Power Load

그림 4. 시뮬레이션 파형과 실측된 출력전압 및 전류 파형



50A/div, 100V/div, 5ms/div

그림 5. 입력전압 및 전류 파형과 출력전류 파형

그림 4는 직렬 부하공진 PWM 인버터와 Pspice 시뮬레이션에 의한 출력전압 및 전류 파형을 비교한 것으로 그림 3의 인버터가 원활히 동작함을 알 수 있으며, 그림 5는 60(Hz) 입력의 상용전원 파형과 고주파 출력전류 파형을 나타낸 것으로 액티브 필터 제어의 보정 없이 본 제안시스템의 인버터회로가 원활히 동작되고 있음을 알 수 있다.

그림 3에서 사용한 IGBT는 후지사의 2MBI 100N-060제품으로 내압이 600(V), 100(A)이다. 또한 1차측의 파라미터로 용량이 0.1(μ F)인 콘덴서 여러개를 병렬로 하여 사용하였으며, 코일 값인 인덕턴스는 106(μ H)로 조정하였고 이때의 출력은 400(V), 25(A), 10(kW)이며 공진 주파수는 20(kHz)이다.

2차측 에서는 출력을 400[V], 15[A], 6[kW]로 하였으며 용량이 0.1[μF]인 다수의 콘덴서를 병렬구성 하고 인덕턴스는 80[μH]로 공진 주파수는 20[kHz] 이다.

4. 고주파 인버터제어 전자유체가열 시스템

그림 6은 상용전원을 수십[kHz]의 HFAC로 변환 및 변조하기 위한 전력변환 프로세서와 가열용기(질 화계 불소수지관) 출구의 유체의 온도를 제어하기 위한 신호변환 제어계의 구성도를 나타낸다.

일반적으로 열 교환기라는 것은 2개의 기체 및 액 체 등의 증발체의 온도차를 격벽 등을 이용하여 혼합 하지 않고 열 이동을 행하게된다. 그러나 본 방식은 그림 2와 같은 적층형 규칙 충진 금속발열체의 내부 까지 가열하므로 발열체의 직경, 체적 및 재질, 절연 파이프 등의 두께 등의 항목에 따라 다소간 차이는 있으나 수십[kHz]대의 고주파전류가 필요하므로 인버 터의 스위칭소자로서 저전압강하 타입의 IGBT모듈 (100[A]/1200[V])을 적용한 전압형의 전류공진방 식을 적용하였다.

특히 IGBT의 $V_{CE(sat)}$ 가 낮은 것일수록 유리한 데 이러한 관점에서 IGBT보다 MCT 및 B-SIT의 도입도 유용하리라 판단된다.

또한 다이오드 정류기의 출력 측에 비평활 LC필터 를 사용하므로 상용주파수의 전원 측에서 보면 복잡한 액티브 PWM제어를 행하지 않고 고효율 특히 선 전류의 정현파화 기능을 갖게되었다. 이로 인하여 본 시스템은 전원환경에 뛰어난 특성을 갖는다.

부하 측에서 보면 그림 6과 같이 간단히 제어시스 템을 구성할 수 있기 때문에 항상 공진주파수에 가까 운 동작점 이른바 최대출력 공급 정합조건 근처에서 스위칭이 이루어지도록 위상지연 PWM제어에 의해 부하에 적합한 정합환경을 만족시킨다. 더욱이 고주

파 인버터에 의한 DC-HFAC 변환부의 크기축소 및 무게의 경량화라는 고밀도화가 가능한 직렬 공진회로 에 의한 ZCS동작 모드를 이용하므로 IGBT처럼 MOS 게이트 드라이브로 turn-on, 바이폴라 모드에 서 turn-off하는 스위칭소자에서는 테일전류에 의한 과도손실도 극히 적다. 따라서 노이즈필터의 소형화 가 가능하며 급격한 전압저지에 대해서는 클램프형 무손실 스너버회로의 구성만으로 시스템의 안정동작 을 도모할 수 있다.

위상지연 PWM Full-Bridge 인버터에서의 기준 압은 lossless 인덕턴스 스너버제어 상(相)압이 lossless 캐패시턴스 스너버로 구성되어있으므로 이 러한 관점에서 PWM제어 프로세서에서도 소프트스 위칭을 행할 수 있으므로 PWM제어에 관계없이 소프 트스위칭이 실현 가능하도록 보조공진 전류(轉流)암 링크 타입의 고주파 PWM인버터의 도입도 생각할 수 있다.

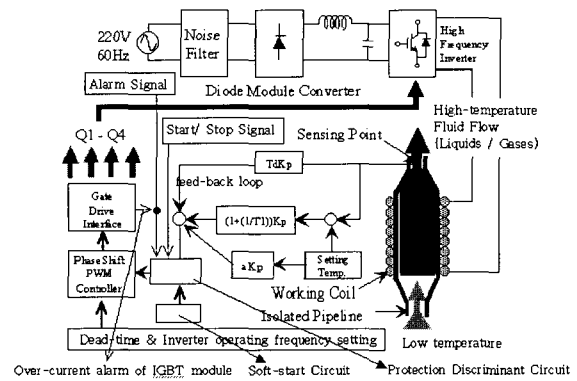


그림 6. 제어 시스템의 구성도

그림 7은 실제 사용된 공진형 인버터회로장치를 나 타내는데 1차 측은 5[kW]로 2차 측은 3[kW]로 정 합 설계되어 그림 8에서 알 수 있듯이 DPH부하를 오토튜닝 PID제어방식에 의해 동작이 가능하도록 시스 템을 구성하였다.

직렬공진 PWM인버터를 이용한 DPH시스템의 성능평가

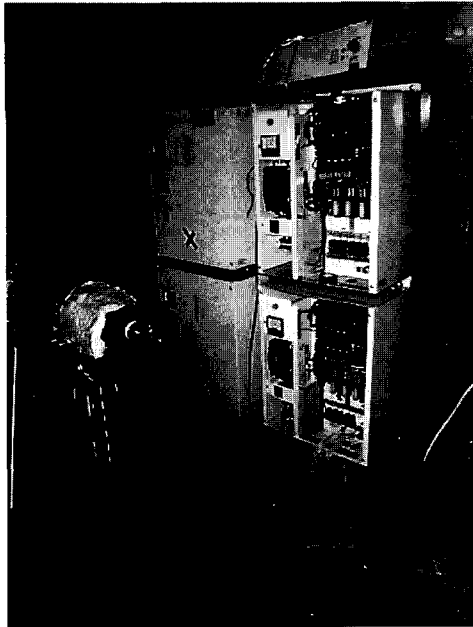


그림 7. 공진 인버터 실험장치

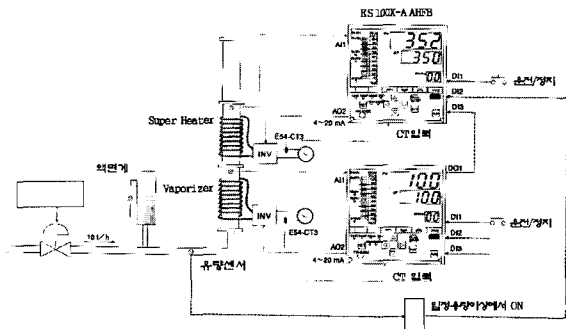


그림 8. DPH부하의 오토튜닝 PID제어 도면

5. 실험기의 성능 평가

표 1은 공진형 인버터를 이용한 DPH시스템의 사양을 나타내며, 그림 9는 DPH시스템의 정상상태에서의 동작특성을 나타내고있는데 전압형 직렬공진 인버터의 출력이 정주파수의 위상차 Ψ 를 0° 에서 180° 까지 자유로이 가변 시킴에 따라 연속적으로 조정되고 있음을 알 수 있다.

표 1. DPH시스템의 기본사양

항목	단위	DPH
보일러축용량	kW	5
2차축용량	kW	3
증발증기량	kg/hr	6.5이상
사용압력		상압
온도제어방식		2자유도PID제어
급수방식		직결방식
사용전원		3상 220V
설비전력	kVA	8.5

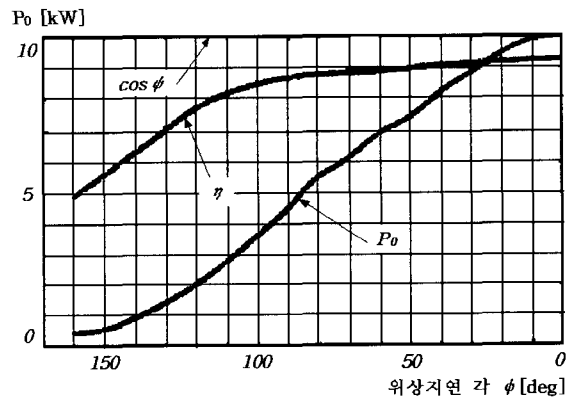


그림 9. 제안된 인버터유도가열기의 정상상태 특성

여기서 제안된 본 시스템의 전력변환 효율은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \times 100[\%], \quad P_{OUT} = c \Delta T \frac{\Delta Q}{860} \times 1000[\text{W}]$$

여기서, $\cos\Psi(\times 0.1)$: Power factor, $C \cong 1.0$ (Specific Heat)

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

$\eta(\times 10\%)$: Power conversion efficiency, $P_{OUT}[\text{kW}]$: output power, $P_{IN}[\text{kW}]$: input power, T_1 : Vessel의 1차 검출온도, T_2 : Vessel의 2차 검출온도이다.

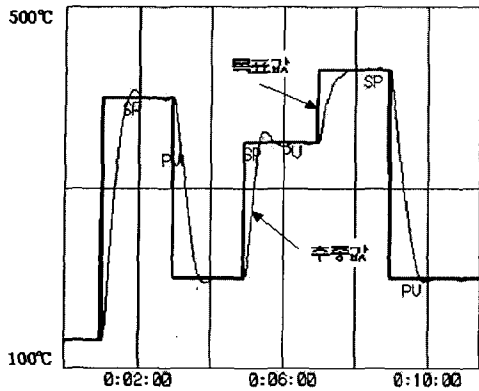


그림 10. 전자유도 가열부의 온도추종 특성

그림 10은 유체로서 공기를 사용하여 가열한 열풍 발생장치의 경우의 온도추종특성을 나타내는데 절연 파이프라인에 흐르는 기체는 공기만이 아닌 다양한 증발체의 급속 가열이 가능하며 또한 발열부의 열용량이 작기 때문에 출구온도의 응답성 및 제어성이 우수하고 내부발열체가 단선 및 단락 되는 부분이 없으므로 내열성이 뛰어나며 저압 고온의 온도변화에 적합한 특성을 갖는다.

또한, 그림 11에 온도응답특성 그래프에서 알 수 있듯이 급격한 온도상승 및 하강에 대해서도 뛰어난 온도추종특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

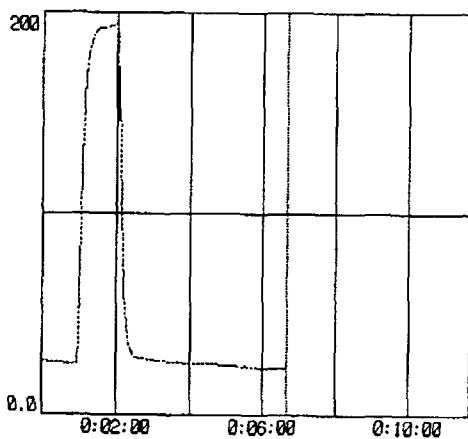


그림 11. 전자유도 가열기의 온도응답 특성

6. 열방사성 증발체 발생 시스템

과열(過熱) 증기는 포화증기를 재가열하는 re-boiler로서 열 교환기가 필요하지만 본 시스템에서는 가열장치를 그림 1에 나타낸 것과 같이 고주파 공진형 인버터제어 유도가열에 의한 포화증기 발생부(1단가열부)와 과열증기 발생부(열 방사성/ 2단가열부)로 나눌 수 있는 토탈 시스템을 그림 12에 나타내었다.

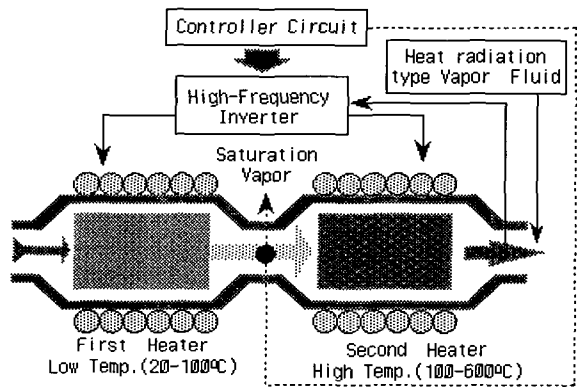


그림 12. 유도가열 포화증기 및 과열증기 발생장치

본 시스템은 공진형 인버터구동 제 1 전자(電磁)가열부에서 저압의 포화증기를 생성하고 다음의 제 2 전자(電磁)가열부에서 200~600[°C]정도의 저압 과열(열 방사성)증발유체를 순시 또는 연속적으로 출력하게된다.

각각의 전자(電磁)가열부에 의한 유체가열방식은 불소수지계의 절연체 용기내에 특수 스텐레스 합금의 박판 적층형 규칙 충전발열체를 수납하여 용기 외부의 고주파 공진형인버터 접속의 워킹코일로부터 비접촉 상태로 전자유도 와전류를 구조체에 흘림으로서 발열하게된다. 또한 제 1 전자가열부에 종래의 보일러 시스템을 도입하고 제 2 가열부로서 열방사성 증발유체를 발생시켜 방청, 살균, 건조의 각 프로세스를

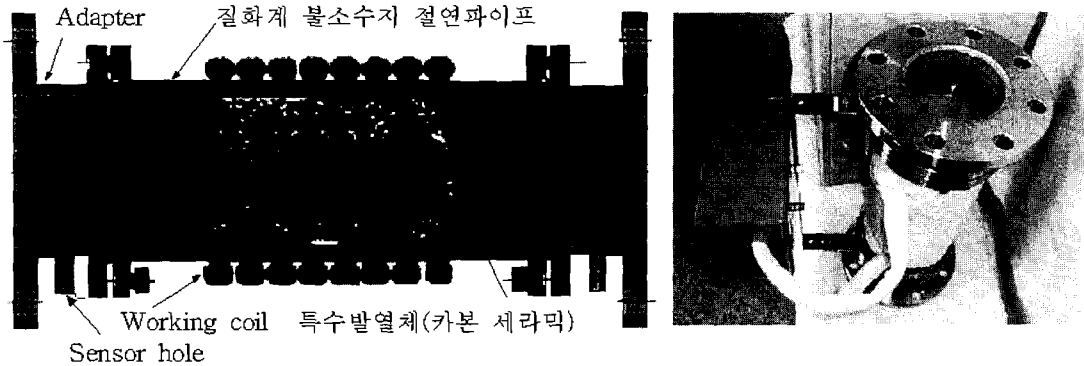


그림 13. 카본 세라믹을 이용한 가열부의 구조

동시에 달성 가능함으로서 금속제품 및 플라스틱제품 등의 가공 및 그린세정 등을 동시에 실현할 수도 있다.

특히, 2단 가열부를 그림 13의 왼쪽 도면에 나타낸 바와 같이 내부의 충전 가열물을 카본세라믹으로 대체하고 내열특성을 강화한 질화계 불소수지관을 이용하여 오른쪽의 사진에 나타낸 바와 같이 과열증기 발생부를 구성할 수 있다.

실제로 그림 14은 카본 세라믹을 2단 가열부로 구성하여 3분이라는 짧은 시간에 1000[°C]까지 가

열된 모습을 나타내는데, 이러한 전자(電磁)유도가 열시스템은 열 교환 효율이 높고 고정도의 온도제어와 순시가열이 가능한데 본 DPH시스템 장치는 비접촉식이므로 히터의 신뢰성이 높으며 스케일 부착에 따른 유체품질의 저하가 없으며 시스템전체를 소형화 할 수 있는 특징을 가지고 있다. 더욱이 공진형 인버터를 이용하는 유도가열방식의 가열에 의한 배기가스정화 시스템 및 배출 미립자 저감용 유도가열 공진형 인버터시스템의 연구개발도 진행 중에 있다.

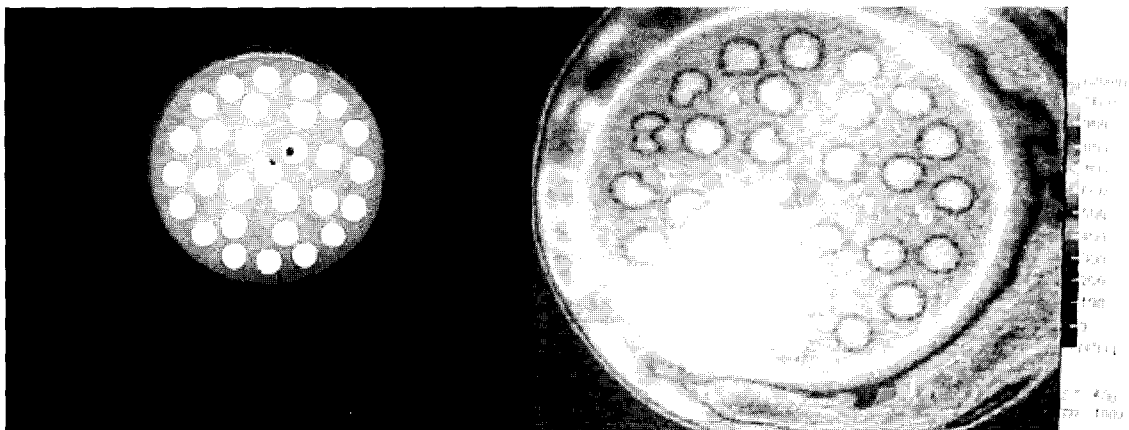


그림 14. 1000[°C]에서 가열된 카본 세라믹 충전물

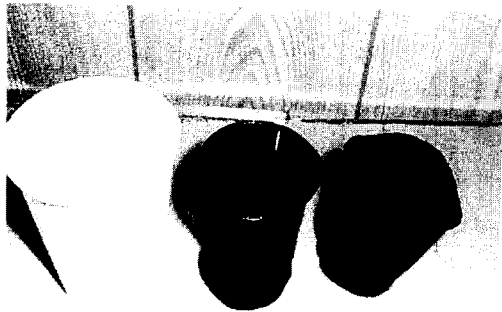


그림 15. 세라믹 충전물을 이용한 DPH시스템의 가공 예

표 2. 종래의 시스템과 DPH의 특징 비교

가열방식	단위	시즈히터	DPH
최고사용온도	도	260	500이상
전열방법		열매유	직접가열
총전기용량	kW	14	14
발열용량	kcal	8170	11000
모터 출력	kW	3.8	/
냉각수		모터냉각용	/
총중량	kg	600	20
목표온도 도달시간		약1시간	30~40초
전열면적	cm ²	약4400	약22000

표 2에는 종래의 시스템과 본 시작 실험기에 의한 특성을 비교한 것이며, 그림 15는 세라믹 충전물을

이용한 DPH시스템의 과열수증기에 의해 가열된 물체가 분위기 상태의 대기 중에서 무 산소 상태로 순간적으로 탄화가 진행됨을 나타낸 것이다.

7. 결 론

DPH 유도가열방식이 절연파이프 용기 내에 내장되는 적층형 규칙 충전가열체를 전자유도가열 이론에 의해 발열시켜 유체(기체, 액체 및 증발체 등)를 통과 시킴에 따라 발열체와 유체의 직접접촉에 의한 고효율의 열 교환이 행하게 되며 본 DPH시스템이 종래의 시스템보다 더 많은 장점과 고효율로 열 변환 운전이 가능함을 확인할 수 있었다.

또한, DPH시스템에 있어서 고주파인버터의 스위칭손실 및 노이즈 대책, 고성능화 그리고 소프트 스위칭방식에 대한 실증적 연구가 지속적으로 필요하며 특히, 고주파인버터의 회로방식 및 제어부의 개발과 유체 가열부의 새로운 구조(고온 내성화) 및 그 열 교환효과에 대해 보다 구체적으로 연구가 진행되어야 할 것이며, 실제로 다양한 분야에 적용실험이 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 内堀, 川村, 金龍柱, 中岡, "オートチューニング PID制御インバータによるデュアルボックス構造形電子誘導器液加熱システム", 平成 6年 電気関係學會 完濟支部 聯合大會GS-1, 1994. 11.
- [2] 石間, "誘導加熱用インバータの新型マッチング技術", 島田理化技報, Vol. 3, No. 1, pp. 29~31, 1993. 1.
- [3] Y. Uchihori, Y. Kawamura, Y. J. Kim and M. Nakaoka, "New Induction Heated Fluid Energy Conversion Processing Appliance incorporating Auto tuning PID control based

PWM Resonant IGBT Inverter with Sensorless Power Factor Correction", *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialist Conference*, pp. 1191~1197, 1995, June.

- [4] 畑中, 國武, "排出微粒子低減用高周波誘導加熱電源", *日本舶用機關學會誌*, 第31卷, 第6号, pp. 325~334, 1996. 6.
- [5] 金 龍柱, 中岡 陸雄, "部分共振高周波負荷共振 PWM Inverter を使用した小型電子ボイラ応用", *日本電氣學會全國大會*, pp. 4-124, 1999年. 3月.
- [6] Y J KIM, D C SHIN, "Soft-Switched PWM DC-DC Converter with Quasi Resonant-Poles and Parasitic Reactive Resonant Components of High-Voltage Transformer", *전력전자학회 논문지*, vol. 4, No. 4, pp. 384~395, 1999. 8.
- [7] 김용주, 신대철, 김기환, 內堀, 川村, "전압형 고주파 인버터를 이용한 간접유도가열 열유체 에너지시스템과 그 성능평가", *전력전자학술대회 논문집*, pp. 483~486, 2001. 7.

◇ 저 자 소 개 ◇



이진우(李鎭雨)

1984년 서울대 전기공학과 졸업.
1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1990~1994년 세명백트론(주) 연구실장. 1994년~현재 호서대학교 전기공학 전공 교수. 당학회 편수이사.



김용주(金龍柱)

1960년 3월 19일생. 1984년 건국대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 Univ. of Kobe(공학박사). 1995년 일본전자통신학회 국제학술조사위원. 1996년 SDI 선임연구원. 현재 특허청 전기심사담당관실 심사관, 호서대 전기공학과 겸임교수, 전력전자학회 학술위원.