

# 탄소섬유 발열체를 이용한 증기 보일러 개발에 관한 연구 Study on the Development of Steam Boiler using Carbon-fiber Heater

김부안\* · 강석준\*\* · 최영민\*\*\* 문창권\*†

Bu-Ahn Kim\*, Suk-Jun Kang\*\*, Young-Min Choi\*\*\* and  
Chang-Kwon Moon\*†

(Received 09 December 2016, Revision received 15 June 2017, Accepted 15 June 2017)

**Abstract:** Carbon fiber shows excellent heat generation value and thermal efficiency comparing with the metallic materials because of its far infrared-rays and radiant heat. So, high performance and economic steam boiler system for the industry can be manufactured by using the carbon fiber heater. The far infrared ray radiation rate was more than 90 % of carbon fiber. Steam boiler system with carbon fiber heater in this study is made up of heating section. In the proof test of steam boiler, the aimed temperature and dwelling time were at 500°C for 8,000 hours, 600°C-3,000 hours, and 700°C-1,000 hours. The temperature rise rate of steam boiler with carbon fiber heater was about 40% faster than that of the conventional boiler.

**Key Words :** Carbon Fiber, Thermal Efficiency, Far Infrared-rays, Radiant Heat, Steam Boiler

## 1. 서 론

열은 모든 분야에 공통으로 필요한 에너지 자원이다. 특히, 현대사회에서 친환경 에너지 자원 개발에 많은 연구개발과 투자를 하고 있으며, 최근 에너지 절약과 환경문제에 대한 새로운 패러다임을 제시하고 있다. 이로 인하여 기기의 소형화, 경량화 그리고 고성능화를 위한 고효율의 에

너지원에 대한 요구가 증가되고 있다.

전기로 발열되는 발열체(이하 전기발열체)의 종류는 발열체를 이루는 주재료와 사용용도, 발열방식 등 여러 가지로 구분할 수 있다. 일반적인 전기발열체의 발열방식은 전자흐름을 방해하는 저항에 의한 것이며, Table 1에 여러 가지 재료의 저항 값을 정리하여 보인다. 그리고 각종 산업 환경에서 사용되는 발열체는 금속열선을 이용한 발열

\*† 문창권(교신저자) : 부경대학교 재료공학과  
E-mail : moonck@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6356

\*김부안 : 부경대학교 재료공학과

\*\*강석준 : 부경대학교 기계공학협동과정

\*\*\*최영민 : 부경대학교 재료공학과 대학원

\*† Chang-Kwon Moon(corresponding author) : Department of Materials Science and Engineering, Pukong National University.  
E-mail : moonck@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6356

\*Bu-Ahn Kim : Department of Materials Science and Engineering, Pukong National University.

\*\*Suk-Jun Kang : Department of UR Interdisciplinary Program of Mechanical Engineering, Graduate School, Pukong National University.

\*\*\*Young-Min Choi : Department of Materials Science and Engineering, Graduate School, Pukong National University.

체가 대부분이며, 고온발열 시 부식에 대한 우려와 내마모성, 열효율 및 경제성이 떨어진다는 평가를 받고 있다.

한편, 탄소섬유(Carbon fiber)는 고온강도, 내열성, 내충격성 및 내약품성이 매우 우수한 재료이다. 그리고 전기 전도성이 있어 금속 도선과 같은 용도로 사용할 수 있다는 특징도 가지고 있다. 탄소섬유의 전기전도율은 일반적으로 결정성에 의존을 하는데 흑연화섬유가 탄소화섬유보다 높은 전기 전도율을 보이는데, 전자가  $1.5\sim 3.0 \times 10^{-5} \Omega m$ , 후자가  $0.5\sim 0.8 \times 10^{-5} \Omega m$  정도이다. 그리고 열팽창 계수가 다른 재료에 비해 매우 낮아 치수 안정성이 우수하며, 전자파 차폐기능이 있어 통전 발열 시 전자파 발생 강도가 인체에 무해한 수준인 3 mG 이하 이며 높은 열전도성과 더불어 우수한 원격외선 방사 효과도 알려져 있다.<sup>1)</sup>

따라서 본 연구는 탄소섬유로 만든 발열체의 제조 및 탄소섬유 발열체를 이용한 증기 보일러를 제작하여, 기존의 금속 발열체를 사용한 보일러 시스템과 비교하여 에너지 절감효과 및 발열 효율을 비교 검토하고자 한다.<sup>2-4)</sup>

Table 1 Resistivity of various materials

Materials	Resistivity( $\Omega m$ , 20°C)
Silver	$1.59 \times 10^{-8}$
Copper	$1.68 \times 10^{-8}$
Iron	$1.00 \times 10^{-7}$
Carbon	$3.00 \times 10^{-5}$
Water	$2.00 \times 10^1$

## 2. 탄소섬유 발열체

### 2.1 탄소섬유의 전처리

발열체의 제조에 앞서 본 연구에서는 탄소섬유에 대해서 합사, 권선 및 소성 공정을 실시하였다. 일반적으로 탄소섬유는 취성적인 성질이 있기 때문에 발열체 제작 시, 쉽게 끊어져 보풀이 생기기 쉽다. 이것을 방지하기 위해서 탄소섬유 원사를 고속으로 회전시켜 꼬임을 준 다음 발열체의 용도나 용량에 따른 발열체 직경을 맞추기 위하여 동중 또는 이중의 섬유를 합하는 합사 공정을 실

시하였다. 이러한 공정이 끝난 후에는 발열체의 사용목적, 전열면적 및 사용온도 등에 부합하는 권선 공정을 실시하였다. 한편, 탄소섬유 발열체는 상기의 여러 가지 전처리 공정 조건에 따라 저항값이 변화하는 특징이 있다. Fig. 1은 12 K(12,000 가닥)의 탄소섬유 발열체에 대해서 다발수(C)에 따른 저항 값과 소모 전력량의 변화를 보인 것이다. 여기서 전압은 220 V로 하였으며, 발열체 길이는 1.0 m로 하였다. 이에 의하면 탄소섬유 다발 수(C)의 증가에 따라 저항 값은 감소하고 있으며, 소모 전력량은 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

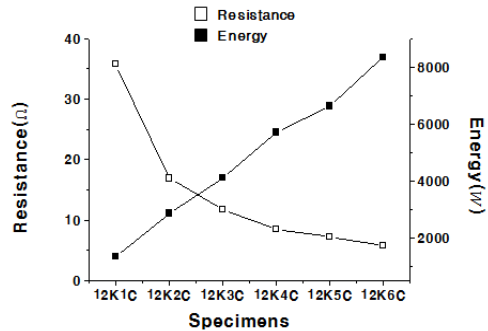


Fig. 1 Variation of resistance and Electric energy for the various bundle of carbon fiber filament

### 2.2 발열체 제조

탄소섬유 발열체의 전극은 1,700°C 이상의 고온에서도 접촉 불량이나 과열에 의한 전극 손상이 발생하지 않도록 설계되어야 한다. 이를 위하여 열팽창계수가 거의 동일한 흑연을 소재로 하여 나사 형으로 제조하여 전극으로 사용하였다. 또한 탄소섬유 발열체는 통전 시, 불순물로 인한 용기 내 압력 상승과, 흑화 또는 백화 현상으로 인한 수명의 단축 등의 여러 가지 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 탄소섬유에 흡착된 불순물을 제거하기 위하여 1,300~1,700°C 이상의 고온에서 진공 열처리를 실시하였다. 또한 탄소섬유 발열체의 사용온도 확보와 수명을 높이기 위해 석영관 속에 진공상태로 봉입한 후 양단을 압관하였다.<sup>4)</sup> Fig. 2는 완성된 관상형 탄소섬유 발열체를 보인 것이다.

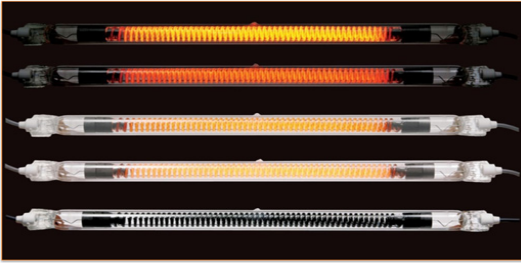


Fig. 2 Carbon-fiber heater

### 2.3 탄소섬유 발열체 특성 시험

탄소섬유 발열체는 쾌속발열 및 원 적외선, 복사열 방사라는 우수한 특징을 가지고 있다. 탄소섬유 발열체와 기존의 니크롬선 발열체(시즈히터, sheath heater)의 특성을 비교하기 위하여 2.0(w)×3.3(l)×2.0(h) m의 동일한 공간과 보온조건을 조성하여 실험하였다. 그리고 초기 설정온도는 두 경우 모두 실온으로 하였다. 탄소섬유 발열체와 니크롬선 발열체에 대해서 일정한 전력을 가한 후, 동일한 위치에서 측정된 온도를 비교한 결과의 한 예를 Fig. 3에 보인다. 이에 의하면, 탄소섬유 발열체는 통전 후 7분여 만에 주위 온도가 60.4℃로 되었고, 동일 위치에서의 니크롬선 발열체에 의한 온도는 42.2℃로 나타나 탄소섬유 발열체가 니크롬선 발열체에 비해 43% 높은 열전달 효율을 나타냈으며, 이러한 경향은 통전 후, 약 60분이 지나 온도가 100℃ 부근에 이를 때까지 유지되었다.

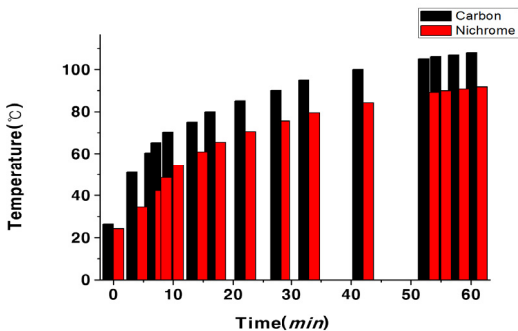
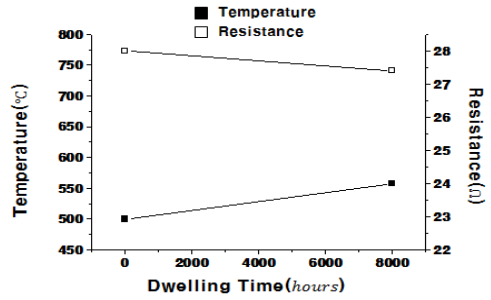
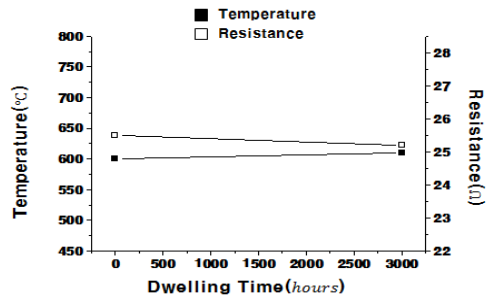


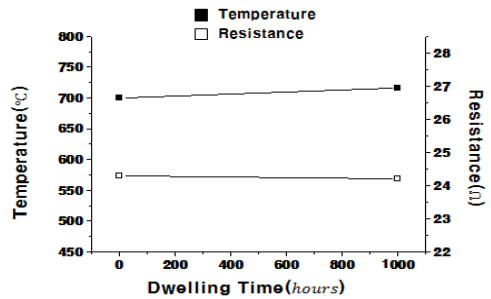
Fig. 3 Comparison of heating rate between carbon-fiber heater and nichrome wire heater according to heating time



(a) 500℃



(b) 600℃



(c) 700℃

Fig. 4 Lifetime tests of carbon-fiber heater

Fig. 4는 탄소섬유 발열체의 발열수명을 조사하기 위하여 일정온도에서의 발열지속시간과 저항값을 측정된 결과이다. 이에 의하면 탄소섬유 발열체의 표면온도를 500℃, 600℃ 및 700℃로 설정한 경우, 각 온도에서 8,000, 3,000, 1,000시간 발열을 유지시켜도 탄소섬유 발열체에는 별다른 문제점이 발생되지 않았다. 따라서 본 실험에서 행한 탄소섬유의 전처리공정 및 발열체의 제조공정

에서의 결합이나 불순물의 제거가 충분히 잘 이루어진 것으로 판단된다. 그리고 설정온도 500°C의 경우, 8,000시간 경과한 다음에 558°C로 약간 높게 측정된 것은 측정 공간의 보온 효과 내지 전압변화에 인한 것으로 생각된다.<sup>5)</sup>

한편, Fig. 5는 탄소섬유 발열체의 원적외선 방사율과 방사에너지를 각 온도별로 측정한 결과이다. 이에 의하면, 온도 150, 300 그리고 450°C에서 방사에너지는 각각  $1.48 \times 10^3$ ,  $5.14 \times 10^3$  그리고  $1.23 \times 10^4$  W/m<sup>2</sup>로 측정되었으며, 원적외선 방사율은 90% 이상의 높은 값을 보였다.

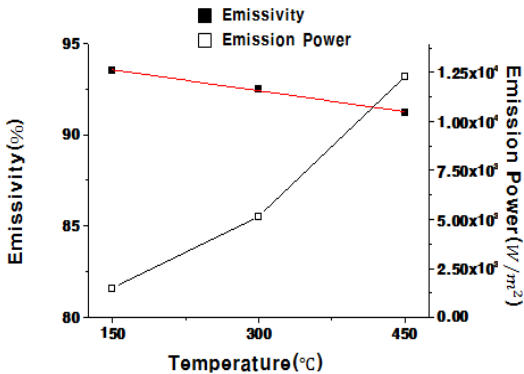


Fig. 5 Emissivity of far infrared rays for the carbon fiber heater

### 3. 탄소섬유 발열체 증기보일러

#### 3.1 저압용 증기보일러 및 성능평가

기존의 보일러는 Fig. 6의 물의 포화증기표에서 알 수 있듯이 온도 상승과 더불어 압력이 상승한다. 하지만 저압에서 고크열을 생산할 수 있다면 고 압력에서 생산하는 것보다 훨씬 경제적이며, 안전할 수 있다. 특히 증기보일러에서 증기가 되기 직전까지 물은 539 kcal/kg 잠열이 필요하고, 이 잠열은 증기가 증발되기 위해서 외부로부터 받은 열을 내부에 가지고 있는 예비적 열량이다. 현열과 잠열을 합한 것이 전열로서 0°C의 물 1 kg을 100°C의 포화증기로 만드는 총 열량은 639 kcal가 필요하다.

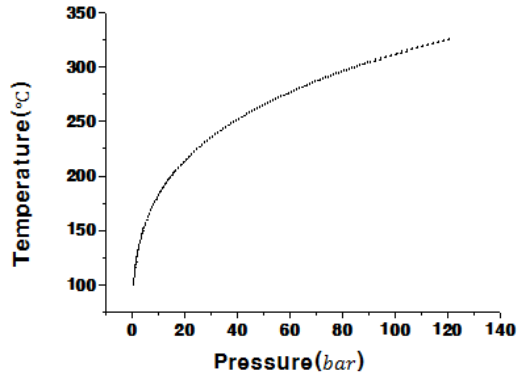


Fig. 6 Saturated water vapor pressure

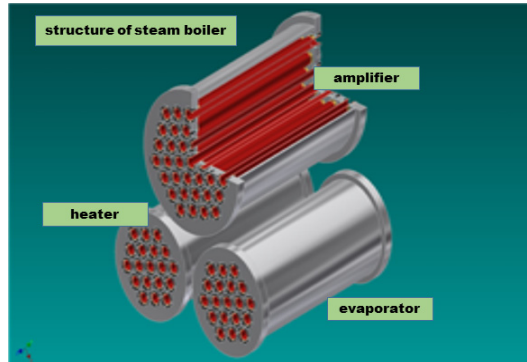


Fig. 7 Schematic diagram of the low-pressure steam boiler

Fig. 7은 저압용 증기보일러의 구조를 보인 것이며, Fig. 8은 저압용 증기보일러의 실제 모델을 나타낸 것으로, 1차 증발기, 2차 가열기 그리고 3차 증폭기의 형태로 이루어져 있다. 보일러는 1.5 m×1.2 m×1.8 m 크기의 일체형으로 구성하였고, 각 증발기에는 관상형 탄소섬유 발열체를 삽입하였다. 가열기와 증폭기는 압력과 증기량의 비체적에 따라 규격이 결정된다. 본 실험에서의 저압용 증기보일러는 증발부에서 100~110°C 습윤 증기를 발생시키고, 가열부에서 습윤 증기를 재가열하여 150~160°C의 증기가 되며, 증폭부에서 200°C 이상의 과열증기가 발생되도록 고안하였다.

한편, 보일러의 효율은 발생하는 포화증기 또는 과열증기량과 발열 소모량으로 평가할 수 있다.<sup>6)</sup>

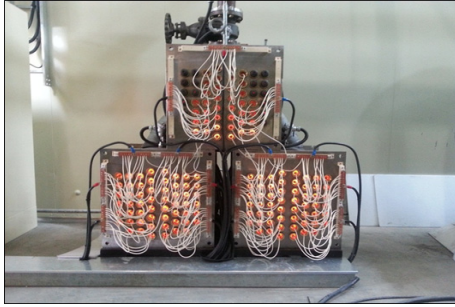


Fig. 8 Low-pressure steam boiler

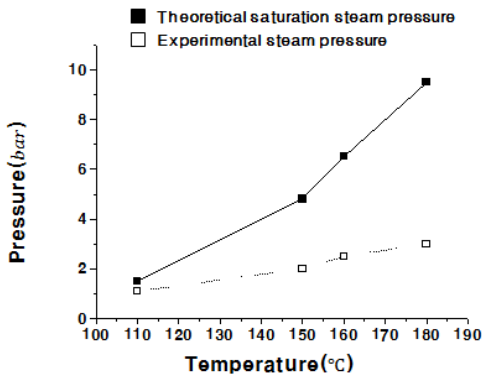


Fig. 9 Relation between saturated vapor pressure and temperature

Fig. 9는 증기의 압력과 온도와의 관계를 나타낸 것으로 포화증기표에 따르면 180°C의 증기를 발생시키기 위하여 절대압력 10 bar가 요구되나, 본 연구에서 제작한 저압용 증기보일러 발열실험 결과에 의하면 3 bar의 압력에서 180°C 과열증기를 생성할 수 있는 것으로 나타났다. Fig. 10은 저압용 증기 보일러의 온도에 따른 발열소모량을 보인 것인데, 110°C, 150°C, 160°C 및 180°C의 증기를 발생시키는데 필요한 발열소모량은 각각 641, 650, 652, 및 653 kcal/kg로 측정되었다. 이것은 포화증기표에 따른 이론값(643, 656, 659 및 663 kcal/kg)보다 더 적은 값이다. 따라서 저압용 증기보일러의 경우, 동일한 증기의 온도를 발생시키는데 필요한 발열소모량이 적게 들 뿐만 아니라 압력이 매우 낮은 상태에서도 증기의 온도를 높일 수 있음을 확인할 수 있었다<sup>7)</sup>.

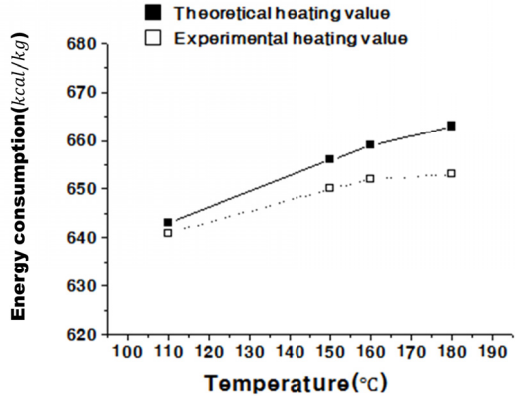


Fig. 10 Relation between energy consumption and temperature

### 3.2 분무식 과열증기보일러 및 성능평가

탄소섬유 발열체는 표면 발열온도가 600°C 이상이다. 고온의 탄소섬유 발열체로 분사된 물은 보일러 내에서 그 열에너지를 효율적으로 흡수할 수 있도록 되어야 한다. 또한 탄소섬유 발열체는 석영관에 진공상태로 봉입되어 있는 상태이기 때문에 보일러 내부의 상당한 압력과 충격에 견딜 수 있는 구조로 설계되어야 한다.<sup>8)</sup>

Fig. 11은 본 연구에서 제작한 분무식 과열증기 보일러의 설계도를 보인 것이다. 물은 보일러의 상부 및 좌 우측면 3곳의 노즐에서 분사되는 구조로 하였으며, 각 노즐에서 분사된 물은 탄소발열

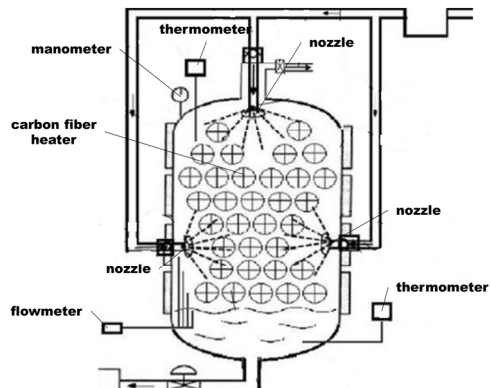


Fig. 11 Schematic diagram of the spray type superheated steam boiler

체에 의해 순간적으로 과열증기가 되도록 제작하였다. 이것은 탄소섬유 발열체에 접촉하는 물의 비표면적을 증가시키고자 하는 목적으로 제작한 것이다. Fig. 12는 과열증기 압력과 온도를 측정한 결과를 보인 것이다. 이에 의하면, 보일러의 내부 압력을 3 bar 정도로 유지하면 과열증기의 온도는 380°C 부근까지 상승시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 건식상태에서 700°C 이상의 고온 발열도 가능하였다. 이것은 기존의 발열체에 비해 탄소섬유 발열체는 복사열 효과가 매우 우수할 뿐만 아니라, 보일러의 공급수를 노즐에 의해 분사시킴으로써 탄소섬유 발열체에 접촉하는 물의 비 표면적이 크게 되어 발열체의 열전달 효율을 크게 높인 결과 때문으로 생각되어진다.

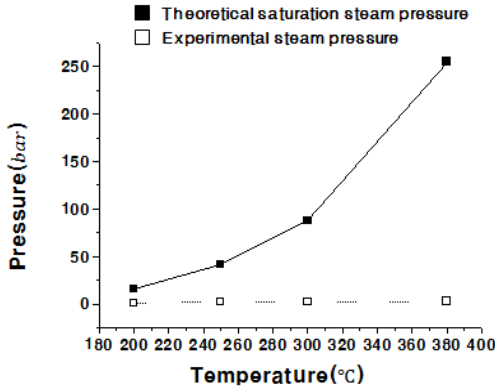


Fig. 12 Relation between saturated vapor pressure and temperature

### 3.3 에너지 절감효과

본 실험에서 제작한 탄소섬유 발열체를 이용한 저압용 증기보일러와 같은 용량의 경유보일러의 에너지 소비량을 측정한 결과를 Table 2에 보인다. 이에 의하면, 270리터 용량의 보일러의 물 온도를 40°C 올리는 데 들어가는 에너지는 탄소섬유 발열체 보일러의 경우에는 15.00 kW의 전력이 소비되었으며, 경유보일러는 2.16리터의 경유가 소비되었다. 이것을 원가로 계산하여 보면 약 68%의 에너지 절감효과가 나타난다는 것을 알 수 있다.

Table 2 Comparison of Energy saving rate on the carbon-fiber heater boiler and diesel boiler

Heater	Carbon(A)	Diesel(B)
Energy consumption	15 KW	2.16 L
Prime cost(KRW)	45	980
Total cost(KRW)	675.0	2116.8
Energy saving rate (1-A/B)*100 (%)	68.1	

## 4. 결 론

탄소섬유 발열체 개발 및 탄소섬유 발열체를 이용한 저압용 보일러와 분무식 과열증기 보일러를 제작하고 그 특성을 비교 검토한 연구결과, 다음과 같은 중요한 결론을 얻었다.

탄소섬유를 함사, 권선 및 소성 등의 여러 가지 전처리 공정을 실시하고, 발열체의 전극으로는 열팽창계수가 거의 동일한 흑연을 사용함으로써, 수명과 성능이 매우 우수한 탄소섬유 발열체를 개발할 수 있었다.

저압용 증기보일러의 경우, 약 3 bar에서 200°C의 증기를 생산할 수 있었고, 기존의 보일러 시스템에 비해 구조가 간단하면서 안전성이 높은 보일러 제작이 가능하였다.

분무식 과열증기보일러의 경우, 약 3 bar에서 380°C까지 온도를 상승시킬 수 있었으며, 기존의 보일러 시스템에 비해 장치의 소형화와 경제적 이득을 가져올 수 있을 것으로 생각된다.

기존의 경유보일러와 탄소섬유 발열체 저압용 증기보일러의 연료소모비용을 비교한 결과, 약 68% 정도의 에너지 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

## References

1. V. Safarova and J. Gregr, 2010, "Electrical Conductivity Measurement of Fibres and Yarns", International Conference of Czech Republic.
2. C. T. Hsieh, D. Y. Tzou, Z. S. Huang, C. Y. Lee and J. K. Chang, 2016, "High Performance Infrared Heaters using Carbon Fiber Filaments Decorated with Alumina Layer by Microwave-

- assisted Method", Journal of The Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 59, pp. 521-525.
3. M. N. Slyadnev, Y. Tanaka, M. Tokeshi, and T Kitamori, 2001, "Photothermal Temperature Control of a Chemical Reaction on a Microchip using an Infrared Diode Laser", Journal of Analytical Chemistry, Vol. 73, pp. 4037-4044.
  4. G. J. Sweeny, P. T. Monaghan, M. T. Brogan and S. F. Cassidy, 1995, "Reduction of Infrared Heating Cycle Time in Processing of Thermoplastic Composites using Computer Modeling", Composites. Part A; Applied Science and Manufacturing, Vol. 6, pp. 255-262.
  5. J. K. Lee and G. H. Choi, 2015, "A Study on the Characteristics of Heating Performance of High-Performance Heat Pump with VI cycle using Re-Heater", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 69-75.
  6. S. S. Jung, S. I. Hwang, J. K. Yeom and S. H. Kim, 2015, "A Study on Characteristics of Spray and Combustion of LPG and CNG about the Effect of Impingement-wall under Direct Injection Condition", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19. No. 4, pp. 56-68.
  7. M. T. Brogan and P. F. Monaghan, 1996, "Thermal Simulation of Quartz Tube Infrared Heaters used in the Processing of Thermoplastic Composites", Composites. Part A; Applied Science and Manufacturing, Vol. 27, pp. 301-306.
  8. O. H. Kwon, Y. S. Yun and Y. R. Ryu, 2014, "Mechanical Behaviors of CFRP Laminate Composites Reinforced with Aluminum Oxide Powder", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18. No. 6, pp. 166-173.