

LFT-D공법을 이용한 탄소 장섬유 강화 열가소성 복합재의 특성에 관한 연구

박명규^{1*}, 박시우²

¹영남이공대학교 기계계열, ²한국섬유기계연구원 시스템기계연구부

A study on the properties of the carbon long-fiber-reinforced thermoplastic composite material using LFT-D method

Myung-Kyu Park^{1*}, Si-Woo Park²

¹Division of Mechanical Engineering Technology, Yeungnam University College

²Mechanical System Research Division, Korea Textile Machinery Research Institute

요약 탄소섬유강화 복합재는 기계적 물성이 우수하여 다양한 산업분야에서 활용되고 있으나 섬유길이가 짧은 단섬유 형태로 함침 되고 있어 강도와 강성을 증대시키는데 한계가 있다. 이를 보완하기 위한 LFT-D성형은 탄소 또는 유리섬유를 열가소성 수지와 혼합하여 압출 후 프레스 성형하여 제품을 만드는 공법으로 연속공정이 가능하고 사출성형에 비해 생산성이 높아 자동차 구조용 부품을 제작하는데 사용할 수 있다. 본 연구에서는 LFT-D공법으로 성형된 탄소 장섬유강화 열가소성 복합소재의 기계적 특성을 파악하기 위하여 탄소 장섬유의 함침과 압출공정을 수행할 수 있는 Lab scale의 소형 압출기 시스템을 제작하였다. Lab scale의 소형 압출기를 사용하여 제작된 탄소 장섬유 복합소재를 프레스 성형하여 시편을 제작하고 재료의 기계적 특성을 평가한 결과, 탄소섬유길이, 프레스 가압압력 및 탄소섬유 함유량이 복합소재의 강도 및 강성의 증가에 영향을 미침을 알 수 있었다. 향후 탄소 장섬유 복합소재의 기계적 성질 향상을 위해서 혼합 스크류 설계, 탄소 섬유코팅 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

Abstract Carbon fiber-reinforced composite materials have been widely used in various industrial fields, but there are limits to increasing their strength and stiffness, because of the short-length fibers that are impregnated in them. In this study, a lab-scale small extruder system was developed with the capability to perform the carbon fiber impregnation and extrusion process in order to evaluate the properties of long-length carbon fiber reinforced thermoplastic composite materials molded by the LFT-D method. Specimens were made with the small extruder to press-mold long-length carbon fiber composite materials and evaluate their material properties. As a result, it was found that the carbon fiber length, press load and carbon fiber contents have a considerable influence on the strength and stiffness. Additional studies on such factors as the mixing screw design and coating of the carbon fiber are needed in order to improve the mechanical properties of carbon fiber composite materials.

Keywords : Carbon long-length fiber, CFRP, Extruder, Impregnation, LFT-D

1. 서론

최근 경량화 소재로 각광받고 있는 CFRP(Car-bon

Fiber Reinforced Plastic) 복합재료는 항공기, 자동차 등 다양한 분야에 활용이 가능하고 그 기계적인 물성이 우수하여 독일, 일본, 미국 등 선진국 등에서는 이 분야에

이 논문은 2015학년도 영남이공대학교 연구조성비 지원에 의한 것임

*Corresponding Author : Myung-Kyu Park(Yeungnam University College)

Tel: +82-53-650-9211 email: mky@ync.ac.kr

Received February 29, 2016

Revised (1st April 5, 2016, 2nd April 20, 2016)

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

서의 시장 선점을 위해서 CFRP 복합재료의 제조 시스템 및 응용 제품에 대한 다양한 연구를 진행하고 있다 [1-4]. CFRP 복합재료의 기지재료는 열경화성 수지와 열가소성 수지를 이용하는데 열경화성 수지는 경화반응 등에 의한 성형사이클 시간의 증가나 내충격성, 재활용이 불가능한 점 등의 문제가 있어 최근에는 열가소성 수지를 이용한 기술개발이 진행되고 있다. 특히 열가소성 수지는 경화반응이 필요 없어 성형사이클 시간 단축이 가능하고 생산성이 높은 이점이 있으나 본래의 내열성 부족 및 성형시의 고점도에 의한 함침성이 나쁜 점 등에 따라 실용화가 늦어지고 있는 실정이다[5]. 현재 상용화되어 있는 단섬유 강화 복합재료는 제조 공정중 0.2~0.5mm 정도의 단섬유 길이를 갖는 일반적인 기술로서 강도와 강성 특성을 증대시키지 못하고 있는 실정으로 섬유의 길이를 길게 하고 섬유의 함유량을 높이거나, 연속섬유를 이용한 열가소성 복합재 성형기술 개발이 필요하다[6,7]. 장섬유(3mm~25mm)와 열가소성수지를 이용한 LFT(Long Fiber Thermoplastic)는 수지와 섬유가 함침된 펠렛(Pellets)을 제조한 후에 압출 및 프레스 성형을 하는 LFT-G(Long Fiber Thermoplastic-Granules)공법과 탄소섬유를 원하는 길이로 바로 chopping하면서 수지와 함침하여 컴파운딩하는 LFT-D(Long Fiber Thermoplastic-Direct)공법이 있다. 동일한 양의 섬유가 함유된 LFT-G시스템과 LFT-D시스템에서 제작된 복합재의 기계적 물성을 비교·분석하면 후자가 전자보다 훨씬 높은 물성을 보여 주고 있는데, 이것은 LFT-D 시스템에서 제작된 복합재는 재냉각되지 않으며, 이미 용융된 상태에서 성형기에 투입되어 제품 성형을 위해 재용융을 위한 압축이 불필요하고, 고형 펠렛에서 나타나는 섬유조직의 파단현상이 없기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 성형사이클이 짧으면서 구조용 부품 생산에 적합한 LFT-D 공법은 장섬유와 열가소성 수지를 직접 함침하여 복합재료를 압출한 후 압축할 수 있는 연속 생산시스템으로 생산원가절감과 함께 LFT-G에 비해 강도를 향상시킬 수 있는 공법으로 알려져 있다. 장섬유 강화 플라스틱 복합재에 대한 연구는 대부분 유리섬유와 사출성형에 의한 내용이며 탄소섬유를 활용한 LFT-D에 대한 연구는 거의 보고되지 않고 있다[7-10]. 탄소 장섬유를 함침하기 용이한 LFT-D공법을 이용하여 제작된 CFRP가 구조용 부품으로의 적용성을 파악하기 위하여 강도물성치 분석을 수행할 필요가 있다. 따라서 본 연구

에서는 탄소 장섬유와 열가소성수지의 함침과 압출공정을 수행할 수 있는 Lab scale의 소형 압출성형기 시스템을 구성하였으며, 소형 압출기를 사용하여 탄소 장섬유를 열가소성수지에 함침시키고 압출된 탄소 장섬유복합 소재를 평판성형하여 시편을 제작하고 소재의 강도물성을 분석하였다. 이를 통해 LFT-D공법을 적용한 탄소 장섬유 강화 열가소성복합재를 소재 특성에 미치는 부품으로의 적용가능성을 확인하였다.

2. 함침과 압출시스템

2.1 시스템 구성

탄소 섬유를 열가소성수지와 연속적으로 함침 및 혼련하는 LFT-D공정을 구현하기 위하여 탄소섬유와 열가소성수지의 함침과 압출을 수행하는 시스템은 먼저 투입된 열가소성수지를 1차 용융시킨 후, 일정한 길이로 공급되는 탄소 섬유와 2차 믹싱시켜서 압출하여 제품의 프레스성형 공정에 투입될 복합재료를 만드는 압출성형 시스템으로 구성하였다. LFT-D시스템의 개략도는 Fig. 1과 같으며 Fig. 2는 Lab scale로 제작된 수지와 탄소섬유를 혼합 및 압출하는 소형압출성형기 사진을 나타내고 있다.

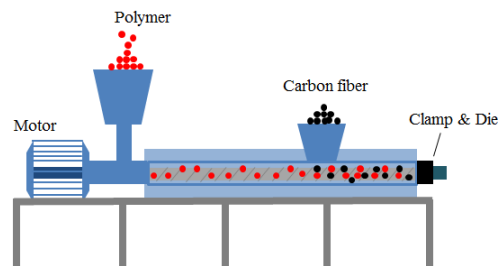


Fig. 1. Schematic drawing of LFT-D system



Fig. 2. Photo of small extruding machine

본 연구에서 사용된 압출기의 배럴부는 전체길이가 2,000mm이며 Head zone이 360mm, Metering zone을 800mm, Compression zone을 240mm로 설계 제작하였다. 압축기 내부의 온도조절을 위하여 Fig. 3과 같이 7개 구간으로 나누어 히터를 설치하고 수지가 비등하지 않도록 온도를 조절할 수 있도록 하였다. 열가소성수지와 탄소섬유의 공급은 압출성형기 상부의 호퍼를 통해 수동 공급되고 압출기성형기 배럴 내부 스크류의 회전에 의해 혼합 및 이송되어 압출되도록 하였다.

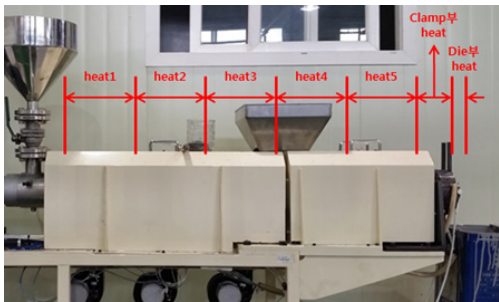


Fig. 3. Photo of heating zones

본 연구에서 사용된 압출기의 배럴부는 전체길이가 2,000mm이며 Head zone이 360mm, Metering zone을 800mm, Compression zone을 240mm로 설계 제작하였다. 압축기 내부의 온도조절을 위하여 Fig. 3과 같이 7개 구간으로 나누어 히터를 설치하고 수지가 비등하지 않도록 온도를 조절할 수 있도록 하였다. 열가소성수지와 탄소섬유의 공급은 압출성형기 상부의 호퍼를 통해 수동 공급되고 압출기성형기 배럴 내부 스크류의 회전에 의해 혼합 및 이송되어 압출되도록 하였다.

2.2 스크류 설계 및 제작

수지와 탄소섬유의 혼합을 위한 스크류는 싱글타입의 스크류로 설계 제작하였으며, 스크류의 최종단에는 탄소섬유와 수지의 믹싱을 최적화하기 위한 Mixing zone 영역의 스크류를 설계 제작하였으며, Fig. 4는 성형압출기에 사용된 스크류의 형상을 나타내고 있다.

압출기 출구로부터 600mm지점인 Metering zone 구간에 탄소섬유 투입을 위한 Hopper를 설치하여 수지(Matrix)와 혼합이 원활히 이루어지도록 하였다. 스크류의 피치는 일정 간격 피치 스크류를 사용하였으며, Metering zone의 출구 영역에 탄소섬유와 수지의 혼합

성을 높이기 위하여 배럴내 복합재 체류시간을 증가시킬 수 있도록 톱니바퀴 형식의 스크류 형태를 적용하였다. 스크류의 직경 40mm, Head zone의 직경 26mm, Compression zone의 직경 36mm이며 Metering zone의 직경 40mm로써 L/D=40으로 설계 및 제작하였다.

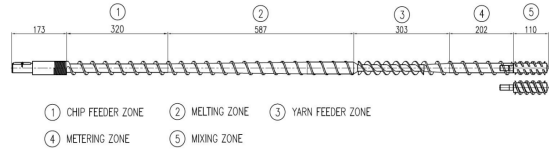


Fig. 4. Drawing of single screw

3. CFRP 성형방법 및 시편제작

3.1 CFRP 성형방법

탄소 장섬유를 이용한 CFRP 시편성형은 LFT-D 공법을 구현하기 위하여 제작된 압출성형기의 수지와 탄소섬유의 혼합, 고온 복합재 제조, 프레스성형 순서로 이루어진다.

먼저 수지와 탄소섬유의 혼합은 압출기의 7개 히팅구간으로 이루어진 히팅온도 조절기로 1시간 정도 예열을 하여 압출기 전체 온도가 설정한 온도 구간에 도달할 수 있도록 한다. 수지의 용융온도는 190℃~215℃로 설정하였으며, 압출기 상단에 설치된 호퍼를 통하여 절단된 탄소섬유를 공급하여 수지와 혼합되도록 하였다. 압출성형기에서 토출된 CFRP소재를 평판으로 성형하기 위하여 급형을 이용하여 최대하중 50ton의 유압식 Hot 프레스를 사용하여 3분간 가압하여 평판소재로 제작하였다.

3.2 시편제작

탄소 장섬유 강화 열가소성 복합재를 성형하기 위해 사용한 기지재료는 열가소성수지인 TPU(Thermoplastic Polyurethane)수지를 사용하였으며 물성치는 Table 1에 나타내었다. TPU수지는 마모 및 탄성과 접착성이 높은 특성 등의 여러 가지 우수한 물성으로 Film, Sheet, 기계 부품 및 자동차 외장부품 등의 다양한 용도로 활용되고 있다. 또, 보강섬유인 탄소섬유는 CFRP제작에 널리 사용되는 24K 등급의 탄소섬유를 사용하였으며 Table 2에 물성치를 나타내었다.

Table 1. Properties of TPU

Properties	Value
Specific gravity	1.3 g/cc
Tensile strength	56 MPa
100% Modulus	0.38 GPa
Elongation	160 %
Tear strength	29 MPa
Melt flow Index	12-18 g/10min

Table 2. Properties of carbon fiber(24K, 1.65 g/m)

Properties	Value
Diameter	7 μm
Tensile strength	4300 MPa
Tensile modulus	240 GPa
Ultimate strain	2.1 %
Density	1.8 g/cm ³
Sizing material amount	1 wt%

CFRP소재의 특성을 평가하기 위하여 인장시험 시편은 평판성형 후 복합재료 인장시험 규격 ASTM 3039에 따라 시험편의 길이 250mm, 두께 2.5mm로 제작하였으며 Fig. 5는 시험편의 형상을 나타내고 있다. 탄소 장섬유를 사용한 CFRP의 특성을 분석하기 위하여 탄소섬유길이, 프레스압력, 탄소섬유 함량에 따라 제작된 시험편으로 INSTRON사의 만능시험기를 사용하여 인장실험을 실시하였다.



Fig. 5. CFRP specimens

4. 실험결과

LFT-D공법을 이용한 탄소 장섬유강화 복합소재를 Lab scale로 제작한 소형 압출기를 통해 성형된 CFRP를 인장시험 한 결과는 다음과 같다. Fig. 6은 탄소섬유길이에 따른 인장강도, Fig. 7은 탄소섬유길이에 따른 탄성계

수를 나타내고 있다. 탄소섬유길이가 증가함에 따라 강도 물성치가 증가하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 복합소재의 섬유보강재의 길이가 증가할수록 강도값이 증가하는 현상과 일치하고 있음을 알 수 있다.

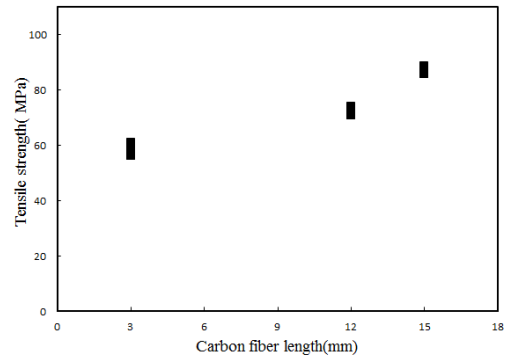


Fig. 6. A tensile strength variation with the length of carbon fiber

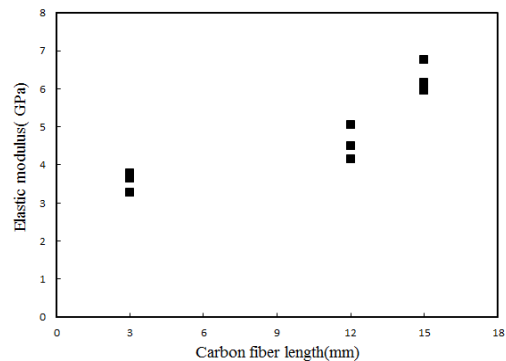


Fig. 7. A elastic modulus variation with the length of carbon fiber

Fig. 8은 압출성형기에서 토출된 복합소재 컴파운드를 Hot 프레스로 가하는 압력에 따른 인장강도, Fig. 9는 압력에 따른 탄성계수를 나타내고 있다. 복합소재 컴파운드를 가압하는 하중이 증가할수록 강도 물성치가 증가하고 있음을 알 수 있다. 가압력이 증가할수록 탄소섬유와 수지와의 접착성이 증대하여 강도특성이 향상되는 것으로 판단된다.

인장강도 및 탄성계수의 결과 값이 또한, 인장시험 후 시험편을 소각하고 탄소섬유 함량을 측정하여 Fig. 10은 탄소섬유 함유량에 따른 인장강도, Fig. 11은 탄소함유량에 따른 탄성계수를 나타내고 있다. CFRP소재 내 탄소함유량이 증가할수록 강도특성이 향상되고 있음을 알

수 있다. 이는 탄소섬유 함유량이 증가함에 따라 탄소섬유사이 상호작용으로 인하여 강도특성이 향상되는 것으로 판단된다.

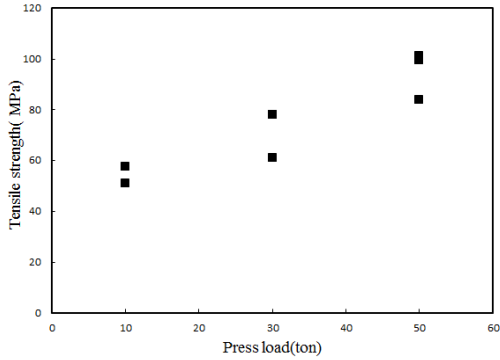


Fig. 8. A tensile strength variation with the press load

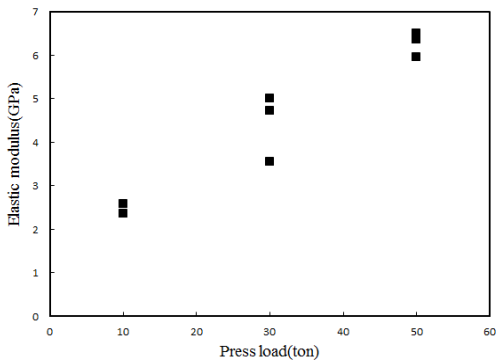


Fig. 9. A elastic modulus variation with the press load

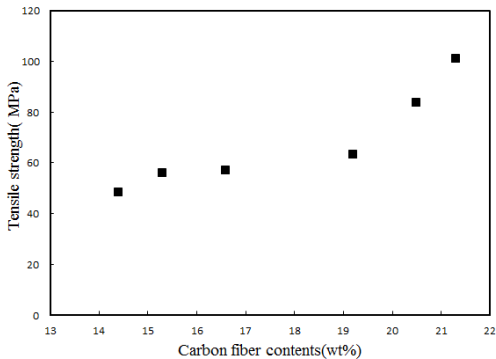


Fig. 10. A tensile strength variation with the carbon fiber contents

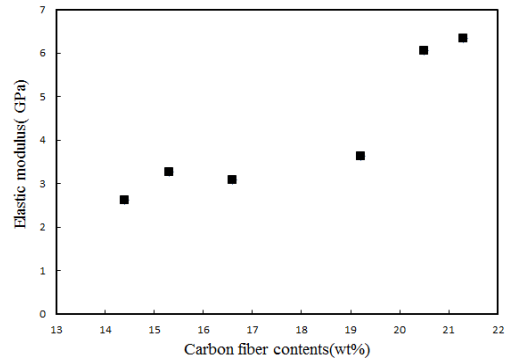


Fig. 11. A elastic modulus variation with the carbon fiber contents

5. 결론

최근 자동차 경량화를 위한 신소재 개발이 중요한 이슈로 대두되고 있는 가운데 탄소 섬유를 이용한 복합소재를 구조용 부품으로 사용하기 위해 많은 노력을 하고 있다. 본 연구에서는 CFRP제조 공법중 하나로 제품의 생산성과 강도를 향상시킬 수 있는 LFT-D 공법으로 탄소 섬유강화 복합재료를 Lab scale의 성형압출기에서 제작하여 탄소섬유길이, 가압압력 및 탄소섬유 함유량의 변화에 따른 재료특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 탄소섬유길이의 증가에 따라 탄소복합소재의 강도 및 탄성계수 값이 증가하였다. 단섬유 보다 장섬유를 사용하여 복합소재를 제작하는 것이 강도측면에서 유리함을 알 수 있다.
- 2) 압출성형 성형 후 프레스 가압 압력의 증가에 따라 강도 및 탄성계수 값이 증가하였다. 압력이 증가함에 따라 탄소섬유와 수지의 혼합접착력이 좋아져 복합소재의 강도가 증가한 것으로 판단된다.
- 3) 복합소재내의 탄소섬유 함유량을 분석하면 탄소함유량이 증가할수록 강도 및 탄성계수 값이 증가하였다.

향후 LFT-D공법을 이용한 탄소 장섬유강화 열가소성 복합재를 생산하기 위한 양산시스템 구축을 위해서 탄소 섬유와 수지의 혼합성 향상을 위한 스크류 개선, 탄소섬유와 수지의 접착성 증대방안, 탄소섬유코팅, 최적 탄소

섬유길이, 탄소섬유함량 등에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] V. Labatut, J. Mayers, T. Greene, "Discontinuous LFT composites for Structural aerospace applications", JET Composites Magazine, No. 96 pp. 38-40, 2015
- [2] Michael, S., "LFT - development status and perspectives", Reinforced Plastics, Vol.52, pp. 32-39, 2008
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-3617\(08\)70036-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-3617(08)70036-5)
- [3] C. K. Park, C. D. Kan, "Investigation of opportunities for lightweight vehicles using advanced plastics and composites", NHTSA Report no. DOTHS 811 692, pp. 14-15, 2012
- [4] J. Markarian, "Long fibre reinforced thermoplastics continue growth in automotive", Plastics, Additives and Compounding, Vol. 9, pp. 20-22, 2007
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1464-391X\(07\)70025-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1464-391X(07)70025-9)
- [5] N. Ogata, H. Yasumoto, Hu Yu, T. Oglhara, T. Yanagawa, K. Yoshida, "Evaluation of interfacial properties between carbon fibres and semicrystalline thermoplastic matrices in single-fibre composites", J. Mat. Sci., Vol. 27, pp. 5108-5112, 1992
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01105281>
- [6] Visconti, I. Crivelli, "Design of continuous fiber composite structures", The Role of the polymeric matrix in the processing and structural properties of composites materials, pp. 545-586, Plenum Press, New York, 1983
DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-9293-8_32
- [7] H. Bijsterbosch, R. J. Graymans, "Polymer 6-long glass fiber injection moldings", Polymer Composites, Vol 16, No.5, pp. 363-369, 1995
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pc.750160504>
- [8] Dong Woo Lee, "Mechanical and electrical properties of long carbon fiber reinforced thermoplastic composites", pp. 30-31, Ph. D. Thesis of ChungNam National University, 2013
- [9] S. U. Yoon, J. K. Park, S. H. Jo, E. G. Kim, "Measurement of the fiber orientation distribution for thickness direction of injection molded long fiber reinforced polymer composites" Proceeding of The Korean Society For Technology of Plasticity Spring Conference, pp. 199-204, 1998
- [10] Kyu Se Lee, "A study on formability and property improvement of long fiber reinforced thermoplastics (LFT) using in-line compounding system", pp. 6, Ph. D. Thesis of University of Ulsan, 2015

박 명 규(Myung-Kyu Park)

[정회원]



- 1993년 2월 : 경북대학교 기계공학과(공학석사)
- 2005년 2월 : 경북대학교 기계공학과(공학박사)
- 1992년 12월 ~ 1996년 12월 : 한국원자력연구원 연구원
- 2004년 5월 ~ 2007년 3월 : 대구 전략산업기획단 선임연구원
- 2007년 4월 ~ 현재 : 영남공대학교 기계계열 교수

<관심분야>

산업기계, 탄소섬유복합체

박 시 우(Si-Woo Park)

[정회원]



- 1996년 2월 : 영남대학교 기계공학과(공학석사)
- 2001년 8월 : 영남대학교 기계공학과(공학박사)
- 2004년 3월 ~ 2004년 12월 : 경일대학교 기계공학과 연구교수
- 2005년 1월 ~ 현재 : 한국섬유기계연구원 부장(책임연구원)

<관심분야>

섬유기계, 산업기계