

적층각도에 따른 CFRP 평판에서의 굽힘으로 발생한 크랙 파손에 관한 해석적 연구

황규완¹, 조재웅^{2*}

¹공주대학교 대학원 기계공학과, ²공주대학교 기계자동차 공학부

Analysis Study on the Damage of Crack Happening with the Bending at CFRP Plate due to Stacking Angle

Gue-wan Hwang¹, Jae-ung Cho^{2*}

¹Department of Mechanical & Automotive Engineering, Graduate School, Kongju University

²Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju University

요약 본 논문은 탄소섬유로 구성된 평판형태의 시험편에 굽힘 모멘트가 작용할 때 내부의 섬유구조에서 발생하는 굽힘 응력과 전단응력, 변형에너지에 관한 것이다. CFRP는 무수히 많은 섬유가 다축구조를 형성하고 있어 굽힘 조건에서 응력을 효과적으로 분산할 수 있다. 이때 적층각도에 따라 다양한 물성을 보이게 되는데, 섬유의 수평방향인 Stacking angle 0°에서부터 수직방향인 90°에 이르기까지의 결과에 있어, Stacking angle이 증가함에 따라 증가 응력과 전단응력이 점차 줄어들며 60°를 기점으로 다시 증가함을 보이고 있다. 본 연구결과를 토대로, 적층각도에 따른 평판에서의 굽힘으로 인한 파손특성을 해석적 접근을 통해 고찰하였으며, 본연구는 파손방지와 내구성 향상을 위한 안전설계에 기여할 수 있다고 사료된다. 또한 평판 형상으로서의 디자인적 요소를 융합기술에 접목함으로써 그 미적인 감각을 나타낼 수 있다.

• **주제어** : 탄소섬유강화플라스틱, 다축구조, 적층각도, 굽힘, 파손

Abstract This study investigates the bending stress, shear stress and deformation energy happening at the inner fiber structure when the bending moment is applied to the specimen with flat shape composed of carbon fiber. As CFRP is composed of innumerable fibers with multi-axes, the stress under bending condition can be effectively distributed. These stresses is shown to increase again at the starting point as this angle of 60°. Therefore, the condition at the stacking angle of 60° is seen to become most adequate under the state where the bending stress happens. On the basis of this study result, the damage property by the bending at the plate due to stacking angle was examined through the analytic approach. it is thought that this study can be devoted to the safe design for damage prevention and durability improvement. Also, the esthetic sense can be shown as the designed factor of shape with flat plate is grafted onto the convergence technique .

• **Key Words** : Carbon fiber reinforced plastic plate, Multi-axes, Stacking angle, Bending, Damage

*Corresponding Author : 조재웅(jucho@kongju.ac.kr)

Received January 3, 2017

Revised February 4, 2017

Accepted March 20, 2017

Published March 28, 2017

1. 서론

복합재료는 오늘날에 이르러서 다양한 산업분야에서 금속을 대체하면서도, 이에 버금가는 비강도와 비강성을 지니고 있다. 여기에 더불어 탄소섬유 또는 유리섬유, 케블라섬유등 각종 경량 섬유를 기지(Matrix)로 한 탄소섬유 강화플라스틱이 가지는 뛰어난 경량성으로 인해 점차 그 사용처가 넓어지고 있다. 과거에는 레저와 스포츠에서 사용되었지만, 기술이 발전함에 따라 이를 차량과 항공기, 산업기계에 적용하고 있다. 본 논문에서는 이 중에서도 탄소섬유를 기지로 한 탄소섬유 강화플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastic)을 이용한 복합재료 평판에 고정된 모서리와 모멘트를 가하는 부위에서의 굽힘 환경에서 발생하는 크랙파손에 관한 것으로 이때 적층각도에 따라 시험편의 특성을 해석적 연구를 통해 규명한다. 해석적 연구의 수행에 있어 ANSYS를 통해 얇은 시트 한 장, 한 장을 적층하여 구성된 해석모델을 사용하며 이때 가해지는 굽힘 특성에 있어 발생하는 등가응력과 전단응력, 변형에너지의 결과값을 통해 크랙의 전파와 파손의 정도를 파악할 수 있다. 이 같은 연구결과를 통해 평판형태의 탄소섬유 강화플라스틱을 이용한 구조물의 설계를 위한 기반데이터를 제공할 수 있으며 이를 통해 안전설계에 기여할 수 있을 것으로 사료된다[1-5].

2. 연구모델

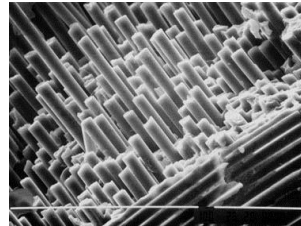
2.1 연구모델의 이론적 내용

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 = \tau_{23} \\ \sigma_5 = \tau_{31} \\ \sigma_6 = \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 = \gamma_{23} \\ \epsilon_5 = \gamma_{31} \\ \epsilon_6 = \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)의 좌항은 응력을, 우항은 변형률에 관한 행렬이며 $[C_{ij}]$ 는 경도에 관한 행렬을 나타낸다. 또한 해석에 적용된 Unidirectional carbon fiber는 Transversely isotropic material로 여기게 되므로 $E_1 \gg E_2, E_2 = E_3$ 의 특성을 토대로 다음의 식 (2)의 섬유방향 및 섬유와 수직방향의 푸아송비와 탄성계수와와의 관계를 구한다. 이를 통해 각 섬유방향에서의 푸아송비와 탄성계수의 차이로 인한 패널의 물성을 지니게 되며 이를 토대로 해석조건 하에서의 파괴특성을 파악할 수 있다.

$$\frac{v_{12}}{E_1} = \frac{v_{21}}{E_2}, \frac{v_{13}}{E_1} = \frac{v_{31}}{E_3}, \frac{v_{23}}{E_2} = \frac{v_{32}}{E_3} \quad (2)$$

Fig. 1은 이렇게 구성된 CFRP의 내부를 나타낸 것으로, 무수한 숫자의 섬유는 각각의 축의 역할을 수행함으로써 외부에서 가해지는 충격을 효과적으로 흡수할 수 있다. Table. 1은 본 연구에서 사용된 Unidirectional 탄소 섬유의 물성치다[6-13].



[Fig. 1] Inner structure of CFRP

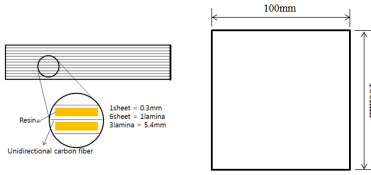
<Table 1> Properties of CFRP

Material	Unidirectional carbon
Density(kg/m ³)	1.57
Young's Modulus XY(GPa)	1.32
Young's Modulus XZ(MPa)	8980
Young's Modulus ZY(MPa)	8980
Poisson's Ratio XY	0.3
Poisson's Ratio XZ	0.74
Poisson's Ratio ZY	0.3
Shear Modulus XY(MPa)	5076.9
Shear Modulus XZ(MPa)	2580.5
Shear Modulus ZY(MPa)	5076.9

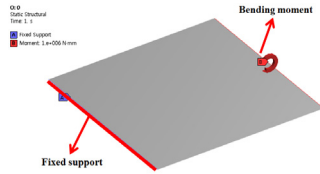
2.2 연구모델

Fig. 2는 해석을 위해 구성된 해석모델에 관한 것으로, 0.3mm의 얇은 시트 한 장을 18번 적층하여 구성한다. 이때 해석모델에 적용되는 유한요소는 Shell요소를 사용하는 이유에 있어, 얇은 섬유 한 장에서 Z축방향인 두께를 무시할 수 있어 2차원 평면으로 간주할 수 있다. 평판형성을 위한 섬유의 적층순서는 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°의 7가지 적층각도를 $[0/0/0/0/0/0]_3, [0/15/-15/15/-15/0]_3, [0/30/-30/30/-30/0]_3, [0/45/-45/45/-45/0]_3, [0/60/-60/60/-60/0]_3, [0/75/-75/75/-75/0]_3, [0/90/-90/90/-90/0]_3$ 와 같이 구성한다. 이와 같은 대칭형 구조는, 이후 실시된 실험을 위한 실험제작에 있어 한

쪽으로 편향될 시, 휘어짐 현상이 발생하기 때문에 이를 예방하기 위함이다. 또한 각 섬유간은 레진을 통해 경화하여 고정한다. Fig. 3은 해석모델에 적용된 해석조건에 관한 것으로, 정사각형으로 구성된 평판의 한 면을 고정하고 반대편을 1000000N의 모멘트를 주며 한쪽으로 굽힘을 가한다. 이때 18개 층으로 구성된 각 층에서의 파손 형상을 파악한다.

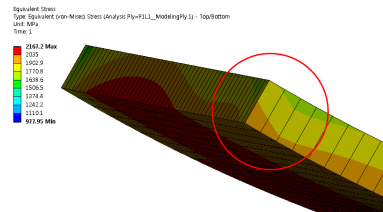


[Fig. 2] Analysis model



[Fig. 3] Constraint condition

그래프의 결과에 있어, 적층각도 0°의 경우는 굽힘 모멘트와 일직선상에 있어 약 7000MPa의 최대 등가응력이 발생함을 볼 수 있으며, 점차 적층각도가 증가함에 따라 감소하는 결과를 볼 수 있다. 이는 섬유의 적층각도가 증가함에 따라 다축구조를 가진 CFRP의 특성상 응력을 효과적으로 분산함을 의미하고 있다. 이런 양상은 적층각도 60°를 기점으로 다시 증가함을 볼 수 있다. 이 같은 최소값은 적층각도 90°에서도 볼 수 있지만 이는 응력의 전달방향과 섬유의 적층각도가 섬유와 직각을 이룰 때에만 한정되는 결과로 실제 구조물에서 다양한 방향에서 응력이 가해짐을 감안한다면 적층각도 60°를 사용할 때 구조적 안정성을 가질 수 있을 것으로 판단할 수 있다. 이때 적층각도 60°로 구성된 시험편에서의 최대 등가응력은 2167MPa로 나타났다. 다음의 Fig. 5는 적층각도 60°에서의 시험편 내에서의 등가응력을 나타낸 것이다 [14,15].

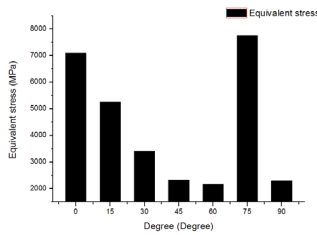


[Fig. 5] Contour of equivalent stress at the stacking angle of 60°

3. 해석결과

3.1 등가응력에서의 결과

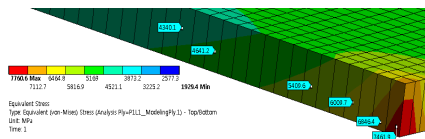
Fig. 4는 적층각도에 따라 굽힘 모멘트에서 발생하는 등가응력을 그래프로 정리한 것이다.



Stacking angle(°)	Equivalent stress(MPa)
0	7000
15	5300
30	3400
45	2350
60	2167
75	7700
90	2600

[Fig. 4] Equivalent stress due to stacking angle

Fig. 5에 있어, 적층각도 60°로 구성된 시험편의 넓은 면적에서 1700~1900MPa로 응력이 분산됨을 볼 수 있었으며, 굽힘 모멘트로 인해 최대등가응력이 발생하는 지점에 있어서도 파괴가 발생할 수 있는 지점은 발견되지 않았지만, 실제 구조물에 있어서는 2100MPa에 해당하는 응력은 섬유를 고정하는 레진의 크랙을 염두에 둘 수 있다. 하지만 레진이 파손으로 일부 떨어져 나가더라도 섬유의 절손이나 파손이 발생된 것이 아니므로 이는 쉽게 보수할 수 있어 구조물에 큰 영향을 끼치지 않을 것으로 판단된다.

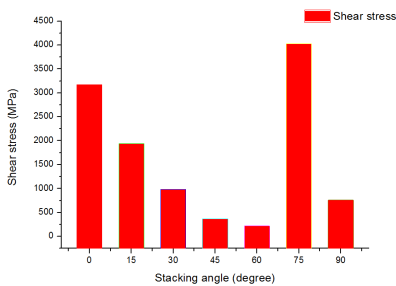


[Fig. 6] Contour of equivalent stress at the stacking angle of 75°

Fig. 6은 적층각도 75°에서의 등가응력 분포를 나타낸 것으로 전반적인 시험편에서 파손이 일어날 수 있는 부위가 다수 보임을 알 수 있다. CFRP는 금속의 파손형상과 달리 적층구조중에서 가장 약한 부위부터 파손이 시작됨으로 결과 값을 토대로 볼 때, 고정된 부위에서 파손이 시작되어 점진적으로 시험편 전체에 걸쳐 파손이 발생됨을 볼 수 있다. 이때 18층의 적층구조중에서 8번째와 9번째 적층구조에서 파손이 먼저 발생됨을 알 수 있었다.

3.2 전단응력에서의 결과

Fig. 7은 굽힘 모멘트가 발생될 때, 등가응력 이외에 발생하는 전단응력에 관한 것으로, 전단응력의 경우 앞선 등가응력에서의 결과와 달리 섬유 절손으로 이어져 강도저하를 야기하게 되므로 중요한 사안이다.

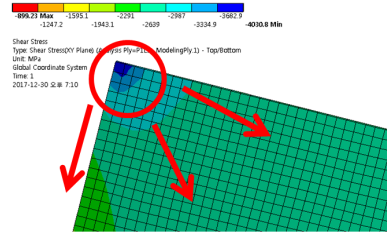


Stacking angle(°)	Shear stress(MPa)
0	3250
15	1900
30	1000
45	420
60	217
75	4030
90	760

[Fig. 7] Shearing stress due to stacking angle

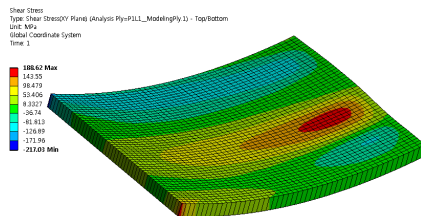
상기의 그래프에서도 볼 수 있듯, 적층각도가 증가함에 따라 전단응력도 감소하는 결과를 보이고 있지만 이는 60°를 기점으로 다시 증가하는 결과를 보이고 있다. 적층각도 75°의 경우, 섬유의 전단응력에 근접한 4030MPa이 나타나고 있어, 섬유가 절손될 수 있어 구조물에는 부적합함을 알 수 있다. 섬유가 절손된다는 것은, 외부의 섬유를 고정하는 역할을 하는 레진의 크랙과 파손이 이미 이루어졌음을 의미하므로 구조물이 외부 환경에 크게 취약해지게 된다. 따라서 구조물의 구조안정성을 위해서는 적층각도 75°를 지양하고, 적층각도 60°를 이용하는 것이

최적화됨을 알 수 있었다.



[Fig. 8] Propagation direction of shearing stress at the stacking angle of 75°

Fig. 8은 이런 전단응력의 발생지점과 전파방향을 나타낸 것으로, 굽힘 모멘트 발생 시, 고정부에서 시작된 전단응력이 점진적으로 시험편 중앙을 향해 전파되면서 연속적인 섬유절손이 발생될 수 있을 것임을 알 수 있었다. 실제 시험편에서를 가정한다면 연속적인 섬유 전단이 크랙을 발생시키며 섬유를 고정하고 있는 레진이 응력전달방향으로 갈라질 위험성을 염두에 둘 수 있어 구조물의 붕괴까지도 예상되는 결과이다.

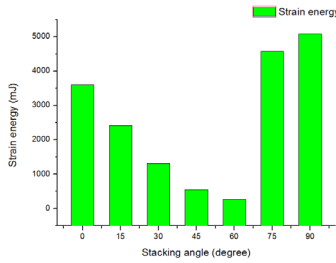


[Fig. 9] Contour of shearing stress at the stacking angle of 60°

Fig. 9는 적층각도 60°에서의 전단응력 분포를 나타낸 것으로 굽힘 모멘트가 발생됨에 있어 내부의 가장 취약한 부분으로 표시된 중앙부에서 최댓값이 나오고 있음을 알 수 있으나, 모두 섬유의 전단응력에 훨씬 미치지 못하는 값이 나옴을 알 수 있어 구조적으로 안정적임을 알 수 있었다.

3.3 변형에너지에서의 결과

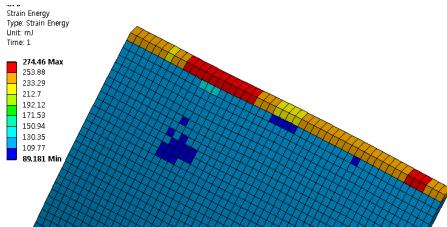
Fig. 10은 적층각도에 따라 적층된 시험편이 굽힘 모멘트를 받을 때, 내부에서 발생하는 변형에너지에 관한 것이다. 변형에너지의 결과 값을 전단응력과 등가응력에서 최대값이 발생한 시점에서 비교 분석했을 때, 최대 변형에너지의 산출을 통한 안전설계 데이터를 얻을 수 있다.



Stacking angle(°)	Deformation Energy(mJ)
0	3605
15	2760
30	1250
45	500
60	275
75	4600
90	4900

[Fig. 10] Deformation energy due to stacking angle

변형에너지에서의 결과 또한 앞서 서술한 증가응력과 전단응력에서의 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있는데, 적층각도 0°에서 3605mJ이 발생한 반면 적층각도가 증가함에 따라 점차 감소하여 적층각도 60°에서 최소값을 보이고 있다. 이때의 결과 값은 275mJ로 앞선 결과 값들과 비교할 때 적층각도 60°에서 기계적물성이 가장 좋은 것으로 판단할 수 있다. 또한 이후의 결과값들에 있어 적층각도가 증가함에 따라 매우 큰폭으로 변형에너지가 증가함을 알 수 있었다. 이같은 변형에너지값이 크면 클수록, 외부에서 가해진 힘에 의해 시편의 변형이 크게 발생됨을 의미하며 이로 인해 구조물의 변형을 야기할 수 있다. 또한 CFRP는 레진이 굳어 만들어지는 강성체이므로 큰 변형은 레진의 파손과 섬유와의 절손으로 이어지게 된다. 다음의 Fig. 11은 적층각도 60°에서의 변형에너지 분포를 나타낸 것이다.



[Fig. 11] Contour of deformation energy at the stacking angle of 60°

4. 결론

본 논문은 적층각도에 따라 구성된 시험편의 굽힘 모멘트에 따라 발생하는 크랙 파손에 관한 연구로, 해석적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 적층각도에 따른 굽힘 모멘트에 의해 발생하는 등가응력에 있어 적층각도가 증가함에 따라 감소하는 결과를 보여주며 적층각도 60°에서 최소값인 2167MPa이 발생하며 이후 다시 증가하는 결과를 보였다.
2. 적층각도에 따른 굽힘 모멘트에 의해 발생하는 전단응력에 있어 적층각도가 증가함에 따라 감소하는 결과를 보여주며 적층각도 60°에서 최소값인 217.3MPa이 발생하였다. 반면 적층각도 75°의 경우 섬유의 절손과 파단으로 이어질 수 있는 4030MPa이 발생하여 이를 구조물에 적용함을 적절하지 못함을 알 수 있었다.
3. 적층각도에 따른 굽힘 모멘트에 의해 발생하는 변형 에너지에 있어 적층각도가 증가함에 따라 감소하는 결과를 보이며 적층각도 60°에서 247mJ로 나타났다. 이를 통해 취성재료인 CFRP의 특성과 함께 볼 때, 구조적으로 안정함을 알 수 있었다.
4. 본 논문의 해석적 결과를 통해 얻어진 사전데이터를 토대로 CFRP의 내구성 향상 및 안전설계와 융합하여 개선설계에 기여할 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2015R1D1A1A01057607).

REFERENCES

- [1] K. W. Kang, "Vibration Fatigue Analysis of Spot Welded Component considering Change of Stiffness due to Fatigue Damage" Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 5, No. 1, pp. 1-8, 2014.
- [2] J. U. Cho, "Structure Safety Analysis on Crack Propagation in Compact Tension Specimen", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 5, No. 1, pp.

23-27, 2014.

[3] Y. J. Jang, K. W. Kang, "Simplified Load Calculation and Structure Test for Scale Down Model of Small Wind Turbine Blade according to IEC 61400-2", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 4, No. 3, pp. 1-5, 2013.

[4] Y. H. Cho, "Manufacturing convergence simulation system effect for the degree of perfection improvement of the new product", Journal of Digital Convergence, Vol. 13, No. 6, pp. 91-103, 2015.

[5] H. J. Jung, "The Analysis of Data on the basis of Software Test Data", Journal of Digital Convergence, Vol. 13, No. 10, pp. 1-7, 2015.

[6] G. W. Hwang, "A Property of Crack Propagation at the Specimen of CFRP with Layer Angle", Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 40, No. 12, pp. 1013-1019, 2016.

[7] T.A. Sebaey, E. Mahdi, "Behavior of pyramidal lattice core sandwich CFRP composites under biaxial compression loading", Composite Structures, Vol. 116, pp. 67-74, May, 2014.

[8] H. K. Choi and J. U. Cho, "Study on the Fatigue Analysis of DCB Model with Aluminum Foam", Journal of Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 14, No. 6, pp. 39-43, 2012.

[9] O. T. Thomsen, W. Rits, D. C. G. Eaton, S. Brown, "PLY DROP-OFF EFFECTS IN CFRP/HONEYCOMB SANDWICH PANELS-THEORY", Composites Science and Technology, Vol. 56, pp. 407-422, 1996.

[10] T.A. Sebaey, E. Mahdi, "Behavior of pyramidal lattice core sandwich CFRP composites under biaxial compression loading", Composite Structures, Vol. 116, pp. 67-74, May, 2014.

[11] M. Mohamed, S. Anandan, Z. Huo, V. Birman, J. Volz, K. Chandrashekhara, "Manufacturing and characterization of polyurethane based sandwich composite structures", Composite Structures, Vol. 123, pp. 169-179, 2015.

[12] B. J. Stauder, H. Kerber, P. Schumacher "Foundry sand core property assessment by 3-point bending

test evaluation" Journal of Materials Processing Technology, Vol.237, No. 7, pp.188-196, 2016.

[13] J. Cao, K. Cai, Q. Wang, J. Shi, "Damage behavior of a bonded sandwich beam with corrugated core under 3-point bending", Materials and Design, Vol. 95, No. 4, pp. 165-172, 2016.

[14] O. Zhao, L. Gardner, B. Young, "Buckling of ferritic stainless steel members under combined axial compression and bending", Journal of Constructional Steel Research, Vol.117, No. 12, pp.35-48, 2016.

[15] V. N. Pilipchuk, R. A. Ibrahim, I. Grace, "Low temperature brittle debond damage under normal compression of sandwich plates: Analytical modeling and experimental validation", Composite Structures, Vol. 98, pp. 24-33, 2013.

저자소개

황 규 완(Gue-Wan Hwang)

[정회원]



- 2015년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부(공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 대학원 기계공학과(공학석사 과정)

<관심분야> : 기계 및 자동차 부품 설계 및 내구성 평가, 피로 또는 충돌의 동적 해석

조 재 응(Jae-Ung Cho)

[정회원]



- 1980년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1982년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1986년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)

• 1988년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계·자동차공학부 교수

<관심분야> : 기계 및 자동차 부품 설계 및 내구성 평가, 피로 또는 충돌의 동적 해석