

적층각도가 다른 단방향 CFRP와 SM45C샌드위치형 복합재료에 관한 융합적 연구

박재웅¹, 조재웅^{2*}

¹공주대학교 대학원 기계공학과, ²공주대학교 기계자동차 공학부

Convergence Study on Composite Material of Unidirectional CFRP and SM 45C Sandwich Type that Differs in Stacking Angle

Jae-Woong Park¹, Jae-Ung Cho^{2*}

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

²Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju University

요약 본 연구에서는 고분자재료인 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)과 구조용 금속인 SM45C로 이루어진 이종 복합재료가 경량화 재료용으로 사용되고 있다. SM45C를 심재로 갖고 양면에 섬유 적층각도가 다른 단방향 CFRP를 접착시킨 샌드위치형 복합재료를 이용하여 CT(Compact Tension)시험을 기초로 한 유한요소 해석을 진행하였다. CT시험은 하중을 받는 재료내의 크랙으로 인한 파괴거동을 확인하기 위한 대표적인 방법이다. 이종 복합재료를 기계 구조물에 적용하기 위해서는 크랙 및 구멍에 대한 영향을 연구하여야 한다. 샌드위치형 복합재료의 CT시험에 의한 파괴거동을 시뮬레이션 해석으로 연구하였다. 본 연구 결과로서, [0/60/-60/0]의 적층각도를 가진 단방향 CFRP 샌드위치형태 복합재료가 우수한 강도를 갖으며 최대 등가응력은 약 182GPa정도가 나타났다. 또한 복합 재료 형상으로서의 디자인적 요소를 융합 기술에 접목함으로써 그 미적인 감각을 나타낼 수 있다.

• 주제어 : 이종 복합재료, 단방향 CFRP, 유한요소 해석, 적층각도, 융합

Abstract In this study, the inhomogeneous material composed of CFRP(carbon fiber reinforced plastic) and structural metal of SM45C is used for the light material. The finite element analysis on the basis of compact tension test was carried out by using the composite material for sandwich type bonded with the unidirectional CFRP that differs in fiber stacking angle at both sides with the core of SM 45C. CT test is the representative method to confirm the fracture behaviour due to crack in material under the load. The effect on crack and hole must be investigated in order to apply inhomogeneous material to mechanical structure. As the result of this study, the fracture behaviour by CT test of the composite material for sandwich was studied by simulation analysis. The sandwich composite of unidirectional CFRP with the stacking angle of [0/60/-60/0] has the superior strength and the maximum equivalent stress of about 182GPa. Also, the esthetic sense can be shown as the designed factor of shape with composite material is grafted onto the convergence technique.

• Key Words : Inhomogeneous material, Unidirectional CFRP, Finite element analysis, Stacking angle, Convergence

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

Received April 15, 2017

Accepted July 20, 2017

Revised June 14, 2017

Published July 28, 2017

1. 서론

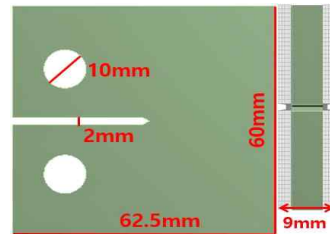
자동차 산업에서는 배출가스에 대한 규제에 따라 연료소비율을 개선하고 배출가스 처리장치에 대한 연구를 진행 중이다. 하지만 내연기관의 특성상 연료소비율을 개선하면 배출가스의 증가가 일어나고 그에 따른 후처리 장치가 필요하여 환경과 성능을 둘 다 만족시키기 어렵다[1,2,3,4]. 연료소비율개선과 배출가스규제를 모두 만족시키는 기술로는 차량 경량화가 있다. 현재 경량화의 기술은 알루미늄 또는 금속재료의 강도 개선으로 진행 중이지만 미래의 경량 소재는 고분자소재와 금속재료의 융합으로 이루어 낼 수 있다. 그 예로 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)이 있다[5,6,7,8,9]. CFRP는 대표적인 고분자 소재로 섬유구조를 갖는 경량 재료이다. 따라서 섬유구조 특성으로 재료를 가공하거나 구멍 또는 크랙이 생성되면 강도가 크게 낮아진다. 이러한 특성으로 우수한 강도를 갖지만 기계 재료에 쉽게 적용하기 힘들다 [10,11,12,13]. 본 연구에서는 CFRP의 특성과 단점을 보완하기 위해 SM45C와 Unidirectional CFRP 이중 재료 샌드위치형태 복합재료를 제시하였다. 이러한 경량화 복합재료는 기계구조물 어디서든 적용가능하며 경량화로 인한 성능향상 및 기계효율 증대를 이룰 수 있다. CFRP에는 직조형태, 단방향형태 등의 여러 형태가 있는데 본 연구에서는 단방향 형태를 사용하였다. 샌드위치 형태의 복합재료는 이중재료의 각각의 특성이 재료에 나타날 수 있는 장점이 있다. CFRP와 금속 재료인 SM45C를 융합하여 크랙에서 나타나는 특성을 파악하기 위한 연구를 진행하였다[14,15]. 연구방법에는 CT(Compact Tension) 시험을 기초로 한 유한요소 해석이다. CT시험은 재료의 피로파괴와 크랙에서 발생하는 파괴거동을 집중적으로 확인 할 수 있다.[16,17,18] 유한요소 해석법은 실험에 대한 비용을 절감하고 실험에서 확인하기 힘든 현상에 대한 규명을 하기 위한 방법으로 현대산업에서 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 CT시험을 기초로 한 시뮬레이션 해석을 진행하였다[19,20].

2. 해석 모델 및 조건

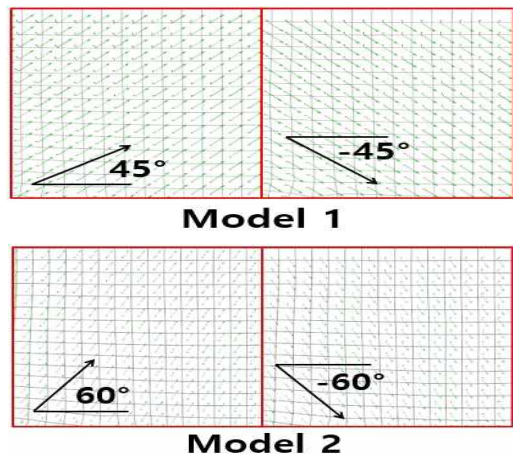
2.1 해석 모델

[Fig. 1]은 해석 모델을 나타낸다. 해석 모델은 가로

62.5mm, 세로 60mm인 CT(Comapact Tension)시험 편이다. 구멍의 직경은 모두 10mm로 동일하며 크랙의 폭은 2mm이다. 또한 해석 모델은 SM45C를 심재로 갖고 양면에 Unidirectional CFRP판이 접착되어 있는 샌드위치형태 이중 복합재료이다. SM45C의 두께는 5mm이며 Unidirectional CFRP판의 두께는 2mm이다. 따라서 해석 모델의 총 두께는 9mm이다. [Fig. 2]은 두 가지 해석 모델을 나타낸다 Unidirectional CFRP의 Lamina 적층구조가 Model 1은 [0/45/-45/0]이며 Model 2는 [0/60/-60/0]이다. 섬유각도에서 -각도를 추가한 것은 보편적인 섬유강화 플라스틱에서 굴곡현상을 방지하기 위해 사용되는 방법이다. 각 모델의 적층구조는 ANSYS에서 사용되는 ACP(ANSYS Composite PrepPost)를 사용하여 구조설계를 진행 하였다. ACP는 섬유구조 복합재료를 설계하는 프로그램이다. 단방향 CFRP는 적층각도 45°와 60°가 가장 강한 강도를 갖는 것으로 알려져 있다. Table 1은 해석 모델에서 사용된 재료의 물성치를 나타낸다. Unidirectional CFRP의 경우 섬유구조이기 때문에 좌표상의 각 방향에 따라 재료가 갖는 물성치가 다르다.



[Fig. 1] Analysis model



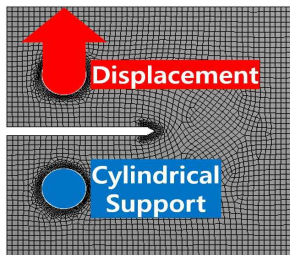
[Fig. 2] Stacking angle of Unidirectional CFRP due to each model

<Table 1> Material properties of SM45C and unidirectional CFRP

Material	SM45C	Unidirectional Type CFRP
Density(kg/m ³)	7850	1.57
Young's Modulus (MPa)	2.05x10 ⁵	1.32x10 ⁵ (X) 8980(Y) 8980(Z)
Poisson's Ratio	0.29	0.3(XY) 0.74(YZ) 0.3(XZ)
Yield Strength (MPa)	343	1440(X) 51.72(Y) 51.72(Z)

2.2 해석 조건

[Fig. 2]는 해석 조건을 나타낸다. 해석 조건은 일반적인 CT시험과 동일한 조건으로 크랙을 기준으로 상부 구멍에는 Displacement를 부여하여 강제 변위를 주었으며 하부 구멍에는 Cylindrical Support를 부여하여 구속하였다. 강제변위는 최대 15mm까지 정적인 속도로 부여하였다. 또한 강제 변위 속도는 1mm/mon이다.

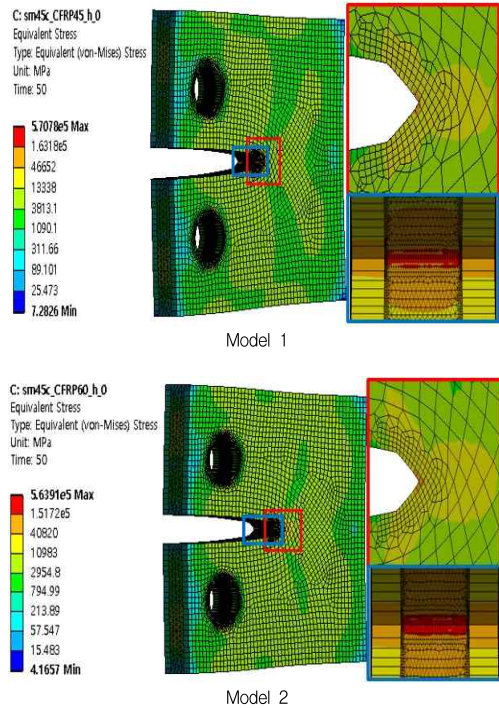


[Fig. 3] Analysis condition

3. 해석 결과

[Fig. 4]는 Unidirectional CFRP적층 각도에 따른 모델들의 등가해석 분포이다. Model 1의 최대 등가응력은 약 571GPa으로 크랙 중심부에서 나타났다. Model 2의 최대 등가응력은 약 564GPa으로 크랙 중심부에서 나타났다. 두 가지 모델 모두 크랙 중심부에서 최대 등가응력이 나타났으며 심재로 사용된 SM45C에서 최대 등가응력이 나타났다. [Fig. 4]에서 보이는 것과 같이 중앙 크랙 부분의 측면도와 정면도를 확대하여 제시하였다. 각 모델의 크랙 부분의 측면도를 보면 Model 2에서 발생하는 등가응력이 더 넓게 분포하는 것을 확인 할 수 있다. 크랙 부

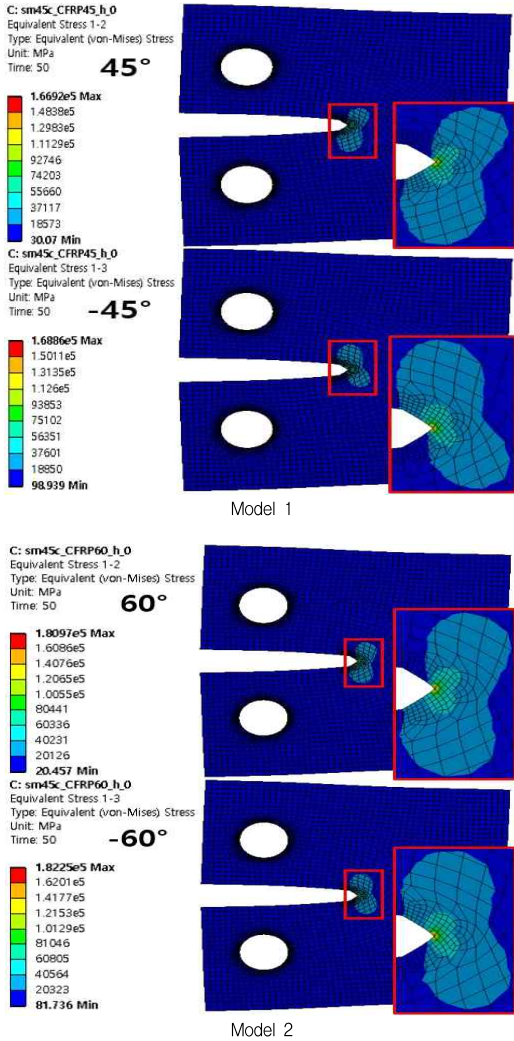
분의 정면도에서는 Model 2의 최대 등가응력이 Model 1에 비하여 넓게 분포함을 확인 할 수 있다. 이는 Model 1이 Model 2보다 응력집중이 심하다는 것으로 확인할 수 있다.



[Fig. 4] Distribution of equivalent stress due to model by stacking angle

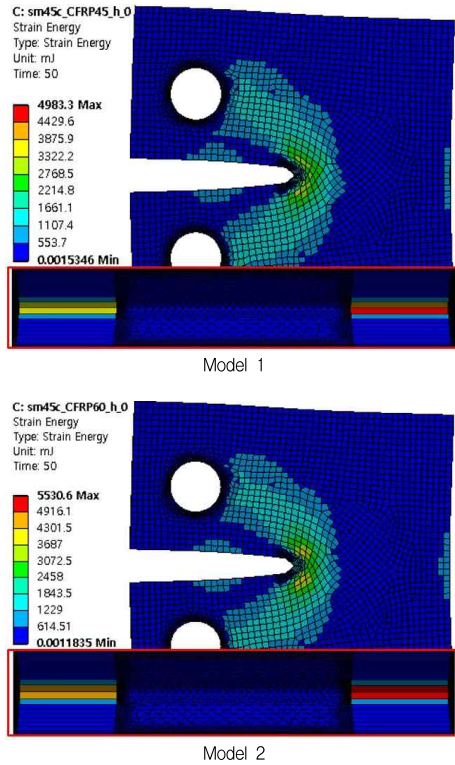
[Fig. 5]는 각 해석 모델의 Unidirectional CFRP에 내부 적층 각도에 따른 Ply별 등가응력 분포이다. Unidirectional CFRP에 lamina의 적층 구조는 Model 1 [0/45/-45/0], Model 2 [0/60/-60/0]이다. 따라서 각 모델의 2번 Ply와 3번 Ply를 확인하면 각도에 따른 Unidirectional CFRP의 특성을 확인할 수 있다. Model 1의 적층각도에 따른 Ply의 특성을 확인하면 45°의 경우 최대 등가응력 약 167GPa이 크랙 중심에서 나타났다. -45°의 경우 최대 등가응력 약 169GPa가 크랙 중심에서 나타났다. Model 2의 적층각도에 따른 Ply의 특성을 확인하면 60°의 경우 최대 등가응력 181GPa이 크랙 중심에서 나타났다. -60°의 경우 최대 등가응력 약 182GPa이 크랙 중심에서 나타났다. Model 1의 경우 Model 2에 비하여 적층각도가 작기 때문에 등가응력의 분포가 기울어지게 분포 되어 있다. 전체적인 최대 등가응력은 Model

2가 높게 나타났다. 또한 각도에 대한 특성이 나타나는 Ply는 2번과 3번이다.



[Fig. 5] Distribution of equivalent stress due to ply with another stacking angle by model

[Fig. 6]은 각 모델의 변형에너지 분포를 나타낸다. Model 1은 최대 변형에너지 약 4.98J이 Unidirectional CFRP에 나타난다. Model 2는 최대 변형에너지 약 5.53J이 Unidirectional CFRP에 나타난다. 시험편 뒷면에 작은 변형에너지가 형성되는건 크랙이 성장됨과 동시에 시험편 뒷면에서도 변형이 일어나기 때문이다.



[Fig. 6] Distribution of deformation energy due to each model

4. 결론

본 연구는 Unidirectional CFRP와 SM45C 샌드위치형 태 복합재료를 이용한 CT(Compact Tension)시험을 유한요소 해석법을 통한 시뮬레이션 해석을 진행하였다. 유한요소 해석 시뮬레이션 프로그램은 ANSYS를 사용하였다. 본 연구 결과는 다음과 같다.

1. 유한요소 해석은 해석 요소들의 절점을 통한 수학적 계산을 진행하기 때문에 섬유구조를 갖는 CFRP의 경우 많은 어려움이 있다. 특히 CT시험은 재료내의 크랙에서 나타나는 과파인자를 파악하기 때문에 요소 과파로 인해 더욱 어렵다. 본 연구에서는 ACP(ANSYS Composite PrepPost)를 통한 해석으로 시뮬레이션을 구현하였다.
2. 각 모델의 전체적인 형태에서 최대 등가응력을 비교하면 Model 1이 더 크게 나타난다. 등가응력 분포를 보면 Model 1이 높은 등가응력의 분포가 밀집되어 있음을 알 수 있는데 이는 응력의 집중이

Model 1에서 더 크게 나타남을 알 수 있다.

3. Unidirectional CFRP의 각 Ply에 따른 등가응력을 확인하면 Model 1의 적층각도 45°, -45°인 Ply들의 경우 분포가 사선방향으로 기울어져 있음을 확인할 수 있다. 즉, Unidirectional CFRP내부에서 작용되는 등가응력은 섬유 적층각도에 대한 영향을 크게 받는 것을 확인하였다.
4. 전체 모델의 최대 등가응력과 Unidirectional CFRP에서 작용하는 최대 등가응력을 비교면 전체 모델에서는 Model 1이 더 큰 최대 등가응력을 나타냈지만, Unidirectional CFRP 내부에서는 Model 2가 더 크게 나타났다. 이는 전체적인 모델에서 응력 집중으로 인해 최대 등가응력은 Model 1이 크게 나타나지만 Unidirectional CFRP의 모델만 확인 하였을 때 강도면에서는 Laminate 적층 구조 [0/60/-60/0]인 Model 2가 유리함을 확인할 수 있다.
5. 각 모델의 변형 에너지를 확인하였을 때 Model 2의 최대 변형에너지가 Model 1에 비하여 높다. 해석 조건에서 같은 조건으로 최대 15mm의 강제변위를 부여하였기 때문에 Model 2의 구조가 강도면에서 유리하다는 것을 확인할 수 있다.
6. 본 연구를 통한 데이터로 인해 Unidirectional CFRP와 SM45C등 구조용 금속의 융합을 하였을 때 Laminate 적층구조 [0/60/-60/0]이 유리함을 확인하였으며 이는 금속 재료와 고분자 재료의 융합으로 경량성을 갖은 이종 복합재료의 최적 설계를 이룰 수 있다. 또한 유한요소법의 신뢰도가 약 90%로 검증되어져 있으므로 이후 실험에서도 유사한 데이터를 얻을 수 있고 실험의 비용 및 시간을 절감할 수 있다. 그리고 경량화 소재를 이용하여 일반적인 소재의 두께를 줄임으로서 경량화를 이룰 수 있다고 사료된다.

ACKNOWLEDGMENTS

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

본 논문은 2016년도 한국연구재단의 국제협력사업 지원을 받아 연구되었음(No. 2016K2A9A2A06004689).

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] J. W. Park, S. S. Cheon, J. U. Cho, "A Study on Fracture Behavior of Center Crack at Unidirectional CFRP due to Stacking Angle", Composites Research Special Issue Paper, Vol. 29, No. 6, pp. 342-346, 2016.
- [5] J. W. Park, J. U. Cho, "A Study of Fracture Behavior due to the Propagation of Center Crack at Unidirectional CFRP through Finite Element Analysis", Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 19, No. 1, pp. 21-26, 2017.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] M. J. Kang, J. U. Cho, "A Study on Structural Durability due to the Configuration of Ripper at Excavator", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 5, No. 2, pp. 13-18, 2014.

[17] M. S. Koh, S. K. Kwon, S. L. Gil, "A Study for the Dynamic Characteristics and Correlation with Test Result of Gantry Robot based on Finite Element Analysis", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 13, No. 1, pp. 269-274, 2015.

[18] Y. T. Kim, Y. S. Jeong, "Optimization Routing Protocol based on the Location, and Distance information of Sensor Nodes ", Journal of digital

Convergence, Vol. 13, No. 2, pp. 127-133, 2015.

[19] S. M. Gu, S. I. Park, K. D. Park, "A Study on the Contribution Evaluation of Developer in Convergence Social App Manufacturing Platform", Journal of digital Convergence , Vol. 13, No. 9, pp. 225-233, 2015.

[20] K. C. Kim, "Development of Optical Illusion Design Pattern for Furniture Using a UV Curing Resin," Journal of Convergence for Information Technology, Vol. 7, No. 1, pp. 43-48, 2017.

저자소개

박재웅(Jae-Woong Park) [정회원]



- 2017년 2월: 공주대학교 기계자동차공학부(공학사)
- 2017년 3월 ~ 현재: 공주대학교 대학원 기계공학과(공학석사 과정)

<관심분야>

기계 및 자동차 부품 설계 및 내구성 평가, 파괴 역학, 유한요소 해석법

조재웅(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