

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.12.1013>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

적층각도를 지닌 CFRP 시험편에서의 크랙전파 특성 §

황규완* · 조재웅**† · 조종두***

* 공주대학교 대학원 기계공학과, ** 공주대학교 기계자동차공학부
*** 인하대학교 기계공학과

A Property of Crack Propagation at the Specimen of CFRP with Layer Angle

Gue Wan Hwang*, Jae Ung Cho** and Chong Du Cho***

* Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju Univ.

** Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju Univ.

*** Division of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received May 12, 2016 ; Received September 27, 2016 ; Accepted October 10, 2016)

Key Words: Compact Tension Specimen(CT 시험편), Layer Angle(적층 각도), Total Deformation(전변형량), Strain Energy(변형 에너지), Equivalent Stress(등가 응력), Carbon Fiber Reinforced Plastic(C.F.R.P)

초록: CFRP는 탄소섬유를 기반으로 수지를 함침하여 제조된 복합소재로, 높은 비 강도와 경량성을 지니 다양한 분야에서 널리 사용되어지고 있다. 특히 일방향 탄소섬유는 적층 각도를 적용할 수 있으며 이 때 적용된 적층 각도로 구성된 CFRP는 적층 각도가 없는 것보다 더 높은 강성을 가지고 있다. 본 논문에서는 적층 각도 변화에 따른 CFRP 소형 인장시험편의 크랙 전파와 파괴거동에 관한 것으로, 각 적층 각도에 따른 크랙 성장의 특성을 고찰한다. 적층 각도가 증가함에 따라 최대 응력 값이 작게 나타나고 크랙 전파가 더디게 나타나지만, 적층 각도 60°를 기점으로 그 응력이 다시 증가되므로 서, 적층 각도에 따른 한계를 보이고 있다. 본 연구결과는 기계구조물의 CFRP사용에 있어 구조물내의 결함이 발생하였을 때의 피로파괴 가능성을 검증하는 자료로 사용될 수 있다고 사료된다.

Abstract: CFRP is the composite material manufactured by the hybrid resin on the basis of carbon fiber. As this material has the high specific strength and the light weight, it has been widely used at various fields. Particularly, the unidirectional carbon fiber can be applied with the layer angle. CFRP made with layer angle has the strength higher than with no layer angle. In this paper, the property of crack growth due to each layer angle was investigated on the crack propagation and fracture behavior of the CFRP compact tension specimen due to the change of layer angle. The value of maximum stress is shown to be decreased and the crack propagation is slowed down as the layer angle is increased. But the limit according to the layer angle is shown as the stress is increased again from the base point of the layer angle of 60°. This study result is thought to be utilized with the data which verify the probability of fatigue fracture when the defect inside the structure at using CFRP of mechanical structure happens.

1. 서 론

복합재료는 기존의 단일금속에 대비하여 높은

강도와 비강도, 그리고 경량성을 지니고 있어 에너지 효율성을 증시하는 현대에 이르러 주목 받고 있는 소재다.⁽¹⁻⁶⁾ 이런 복합재료 중에서도 탄소섬유를 기지로 한 CFRP는 가장 주목받고 있는 소재이다. 탄소섬유 특유의 질긴 인장력은 이를 굳히기 위한 수지와 만나 같은 무게의 금속에 비해 높은 강도를 지니게 되는데, 여기에 섬유설계를 통한 적층구조를 적용하게 되면서 기존의 직조형태

§ 이 논문은 2016년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계 학술대회(2016.4.7.-8., 서귀포 KAL호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, jucho@kongju.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

의CFRP에 비해 더 좋은 물성을 확보할 수 있게 되었다. 이를 위해 본 논문에서는 30, 45, 60, 75도의 4가지 적층각도를 지닌 CFRP 소형 인장시험편을 구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 시뮬레이션 해석을 진행하며 해석결과를 토대로 변형에너지와 변형량, 응력값을 상호 비교한다. 이를 통하여 얻어진 결과값들을 바탕으로 재료 내에서 파괴를 야기 할 수 있는 크랙의 역학적 거동을 분석할 수 있고, 재료 내에 존재하는 크랙에 의한 영구적 변형, 변형 에너지, 응력의 발생으로 재료의 파괴 가능성이 있음을 알 수 있었다.^(7~12) 본 연구결과를 통하여 적층각도가 적용된 CFRP 구조물 내에서의 결함 또는 구멍이 발생하였을 시, 피로 파괴 가능성을 검증할 수 있는 자료로 사용될 수 있다고 사료된다.^(13~23)

2. 연구방법

본 연구에서는 표준CT 시험편에 대하여 실험에 앞서 사전 해석을 통해 경향성을 미리 파악하며 이에 대한 수정된 실험법을 도입할 수 도 있으므로 본 해석의 결과는 중요하다 할 수 있다. 먼저 Fig. 1은 구조해석 프로그램인 ANSYS에서 해석을

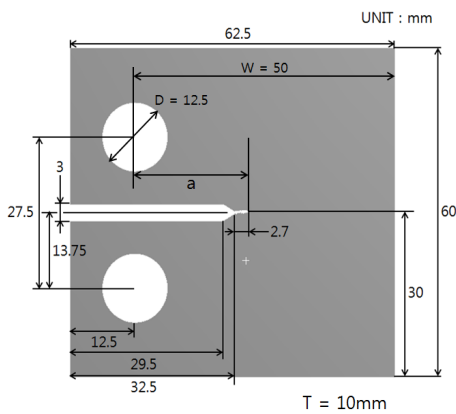


Fig. 1 Dimensions of compact tension specimen

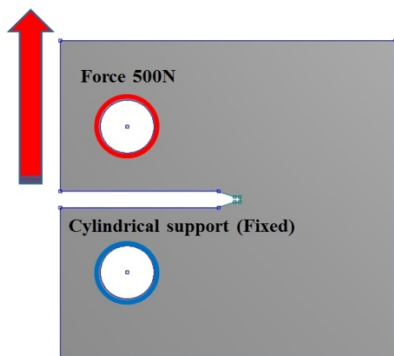


Fig. 2 Simulation condition of specimen

수행을 하기 위해 구성된 해석모델에 관한 것으로 표준 CT 시험편의 설계에서 착안하여 만들었다. 이런 해석모델을 Fig. 2의 해석조건을 입력하는데, 상부의 구멍에는 로드셀에 연결되어 +Y축 방향으로 500N상당의 힘으로 잡아 당기며, 하부의 구멍은 인장실험기에 고정된다. 이때 고정되는 하부의 구멍은 볼트를 통하여 고정되므로 Cylindrical support로 고정부가 해석에 미치는 영향을 최소화 하였다. Fig. 3은 이렇게 구성된 모델의 섬유설계에 관한 것으로 많은 직조형태의 종류 중에서도 일방향성 탄소섬유에 대한 내용이다. CFRP에 적층각도가 적용되게 되면, 다축구조로 모델을 이해할 수 있으며 이때 x_1 은 섬유방향을, x_2 는 층 안의 섬유와 수직인 방향을, x_3 는 층과 수직인 방향을 나타낸다.

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

식 (1)의 좌항은 응력을, 우항은 변형률에 관한 행렬이며 $[C_{ij}]$ 는 경도에 관한 행렬을 나타낸다. 또한 해석에 적용된 일방향성 탄소섬유는 수직 등방성 재료로 여기게 되므로 $E_1 \gg E_2, E_2 = E_3$ 의 특성을 토대로 다음의 식 (2)의 섬유방향 및 섬유와 수직방향의 푸아송 비와 탄성계수와 관계를 구한다. 이를 통해 각 섬유방향에서의 푸아송 비와 탄성계수의 차이로 인한 패널의 물성을 지니게 되며 이를 토대로 해석조건하에서의 파괴특성을 파악할 수 있다.

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

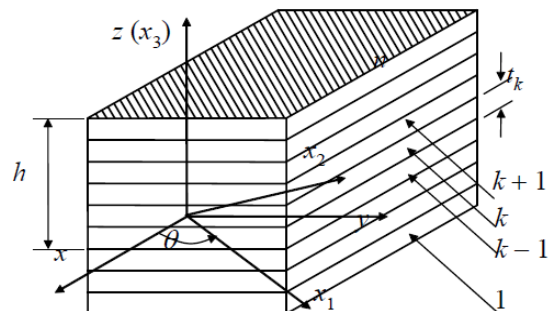


Fig. 3 Layer of axes

Table 1 Property of material

Material	Unidirectional carbon
Density(kg/m ³)	1.57
Young's Modulus XY(MPa)	1.32E+5
Young's Modulus XZ(MPa)	8980
Young's Modulus YZ(MPa)	8980
Poisson's Ratio XY	0.3
Poisson's Ratio XZ	0.74
Poisson's Ratio YZ	0.3
Shear Modulus XY(MPa)	50769
Shear Modulus XZ(MPa)	2580.5
Shear Modulus YZ(MPa)	50769

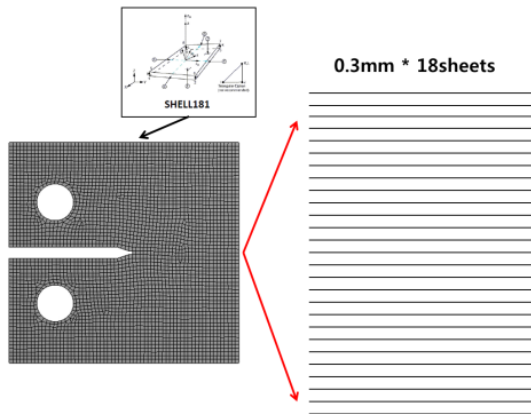


Fig. 4 Finite element method applied at the analysis model

Fig 4는 해석모델에 적용된 유한요소에 관한 관한 것으로 해석모델과 실제 실험시편은 위와 같이 0.3mm의 탄소섬유 18장을 겹쳐 수지로 함침 시키며, 이때 진공상태에서 압력을 가하며 경화 후, 기계적 가공을 통해 구성하였다. 본 논문의 해석모델의 유한요소는 절점 3745개, 요소 3565개로 각 시트마다 존재하며 이를 18개 층에 걸쳐 생성한다. 기존의 해석에서는 고체 요소를 사용했던 반면 본 해석에서는 얇은 낱장의 섬유를 모사하기 위해 Shell 181요소를 사용한다. 기존의 해석에서 사용되던 유한요소는 3차원상의 물체를 표현하기 위해 사용됐던 반면, CFRP는 얇은 섬유 한 장을 표현하기 위해 높이를 무시할 수 있다. 따라서 이런 해석 기법을 통해 기존의 고체요소로 해석되었던 복합재료의 한계를 섬유 한 장의 단계까지 확대하여 섬유 한 장에서의 크랙의 발생과 이에 따른 파괴거동을 파악할 수 있다. 해석에 사용된 탄소섬유의 물성치는 실험을 통해 다음의 Table 1에 나타내었다.

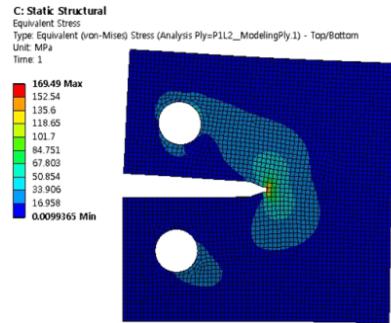


Fig. 5 Equivalent stress at the layer angle of 30°

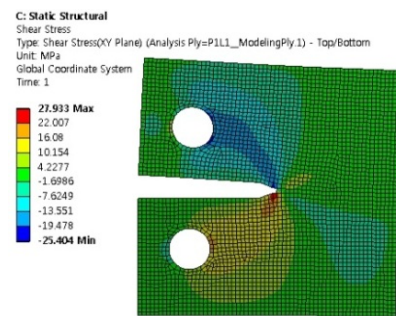


Fig. 6 Shear stress at the layer angle of 30°

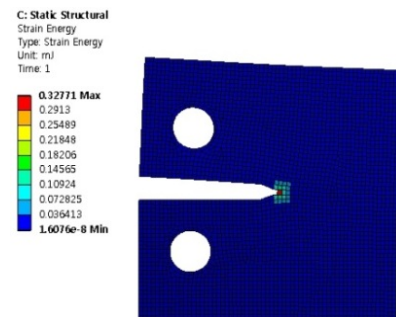


Fig. 7 Deformation energy at the layer angle of 30°

3. 연구 결과

Fig. 5, 6, 7은 적층각도에 관한 것으로 Fig. 5의 등가응력에 있어 크랙주변 부에서 약 170Mpa의 등가응력이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 등가응력의 진행방향은 상부 로드셀 방향으로 향하고 있음을 볼 수 있는데, 이는 Fig. 6의 전단응력이 하부 로드셀 방향으로 향하고 있음과 반대되는 결과를 보이고 있다. 이때 발생하는 전단응력은 약 28Mpa로 크랙의 시작 부 하단에서 최댓값을 보이고 있다. Fig. 7은 이때 발생하는 변형에너지로 크랙의 시작부위에서 약 0.327mJ의 값을 나타내고 있다. 다음의 Fig. 8, 9, 10은 적층각도 45도에서의 결과로 30도에 비해 응력값이 증가된 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 얘기한 식 (1)과 (2)에서 언급한

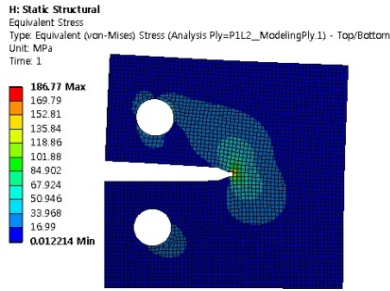


Fig. 8 Equivalent stress at the layer angle of 45°

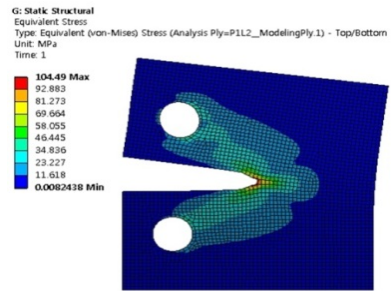


Fig. 11 Equivalent stress at the layer angle of 60°

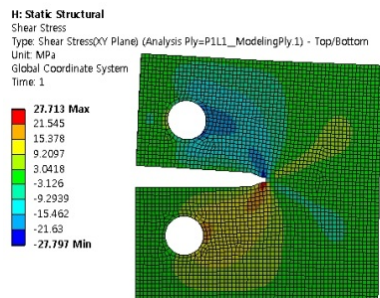


Fig. 9 Shear stress at the layer angle of 45°

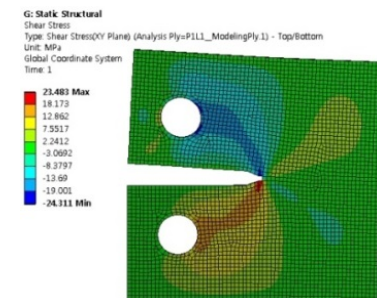


Fig. 12 Shear stress at the layer angle of 60°

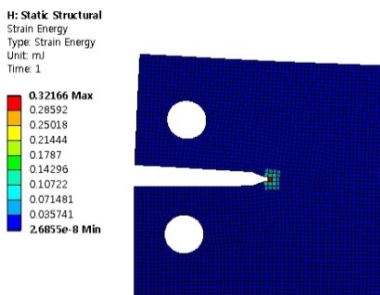


Fig. 10 Deformation energy at the layer angle of 45°

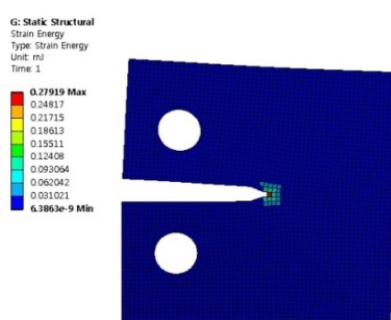


Fig. 13 Deformation energy at the layer angle of 60°

것과 같이 시험편 내의 적층각도 변화로 인한 푸아송 비와 탄성계수의 차이로 인한 재료 물성의 변화로 나타났다. 이때 Fig. 8에서 등가응력의 값은 187MPa로 18MPa 증가한 결과값을 보였으며 이때 Fig. 9의 전단응력은 27.713MPa로 소폭 줄어들었다. 하지만 적층각도 30도에서의 결과와 달리 전단응력의 이동방향이 상부 로드셀까지 넓어지는 결과를 통해 전단파괴의 위험성이 증가하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 10의 변형에너지 또한 0.321mJ로 소폭 감소하는 결과를 보였다.

Fig. 11, 12, 13은 적층각도 60도에서의 결과로 앞선 두 결과에 비해 크게 낮아진 결과값을 보이고 있다. Fig. 11의 등가응력에 있어서 105MPa로 크게 낮아진 결과값을 보이고 있는데, 반면 등가응력의 분포에 있어서는 상 하부 로드셀 방향으로 진전하는 분포도를 보이고 있다. Fig. 12의 전단응력 분포

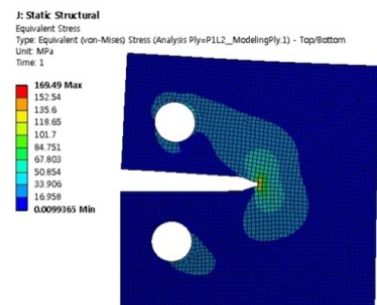


Fig. 14 Equivalent stress at the layer angle of 75°

에 있어서도 21MPa로 감소된 결과값을 보이고 있는데, 이에 있어서도 넓게 분포되는 경향을 보이고 있다. Fig. 13에 있어서도 변형에너지에 있어서도 감소된 결과값을 보이고 있다. 이는 뒤에 이어질 적층각도 75도와 함께 비교했을 때, 명확히 할

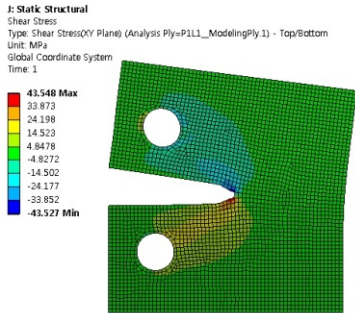


Fig. 15 Shear stress at the layer angle of 75°

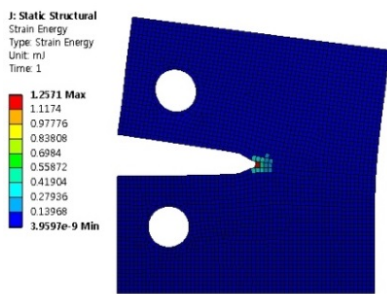


Fig. 16 Deformation energy at the layer angle of 75°

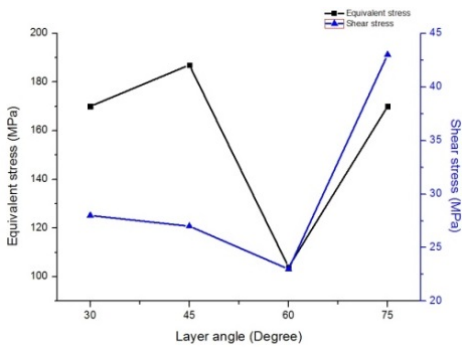


Fig. 17 Comparison of maximum equivalent stress and shear stress due to each layer angle

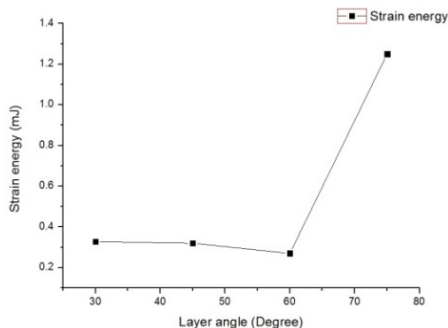


Fig. 18 Comparison of deformation energy due to each layer angle

수 있다. Fig. 14, 15, 16의 결과값에서 볼 수 있듯이 적층각도 60도를 전후로 증가응력이나 기타 결과

값의 상하관계를 볼 수 있는데, 먼저 Fig. 14의 결과값에 있어 현재까지의 결과값 중에서 가장 높은 170MPa의 값이 나타났으며 전단응력에 있어서도 43MPa로 높았으며 응력분포 또한 좁은 부위에 걸쳐 나타나 있어 변위가 지속될 시, 크랙 주변부의 파손으로 이어질 수 있다. 또한 변형에너지에 있어서도 1.257mJ로 가장 높게 나타나 이를 구조물에 사용할 시, 파괴의 위험성이 높아질 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 17은 앞서 언급한 적층각도에 대한 최대응력과 전단응력, Fig. 18은 변형에너지를 그래프로 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 적층각도를 지닌 CT 시험편 내의 크랙 거동에 대한 구조해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 증가응력의 값에 있어 각 적층각도를 비교해 보았을 때, 적층각도 60도에서 가장 낮은 105MPa의 값을 보였으며, 적층각도 75도에서 170MPa로 가장 높은 결과값이 도출되었다. 이를 통해 구조물에 적용될 시 적층각도 60도에서 가장 안정한 것으로 볼 수 있다.

(2) 전단응력의 값에 있어 각 적층각도를 비교해 보았을 때, 적층각도 60도에서 가장 낮은 21MPa의 값을 보였으며, 적층각도 75도에서 43MPa로 가장 높은 결과값이 도출되었다. 또한 전단응력의 분포에 있어 적층각도 60도는 넓은 부위에 적용 응력이 고루 분포되어 있지만, 75도에서 높은 응력값이 집중분포되어 전단파괴의 위험성이 높음을 알 수 있었다.

(3) 변형에너지의 값에 있어 각 적층각도를 비교해 보았을 때, 적층각도 75도에서 1.25mJ로 가장 높게 나온 것을 제외하면 나머지 적층각도에서는 0.3mJ안팎의 결과값으로 안정된 값을 보이고 있다. 이를 통해 적층각도 75도를 구조물에 적용할 시, 구조물의 가해진 하중에 의해 변형을 일으키기 쉬움을 알 수 있었다.

(4) 본 연구에서 얻어진 결과값들을 통하여 재료 내에서 파괴를 일으킬 수 있는 크랙의 역학적 거동을 분석할 수 있고, 응력의 발생 및 증가로 재료의 파괴 가능성이 있음을 알 수 있었으며 이를 바탕으로 하여 기계구조물에 적용된 적층각도를 지닌 CFRP 구조물에 대한 안정성평가를 위한 기반자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

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

참고문헌
(References)

- (1) Song, K. N., Hong, S. D. and Park, H. Y., 2012, "Macroscopic High-Temperature Structural Analysis of PHE Prototypes Considering Weld Material Properties," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 9, pp. 1095~1101.
- (2) Kang, S. S. and Lee, J. H., 2011, "Evaluation of Fatigue Life and Structural Analysis for Dish-Type and Spoke-Type Automobile Wheels," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 10, pp. 1315~1321.
- (3) Song, K. N., Lee, H. Y., Hong, S. D. and Park, H. Y., 2011, "Macroscopic High-Temperature Structural Analysis Model of Small-Scale PCHE Prototype (II)," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 9, pp. 1137~1143.
- (4) Won, B. R., Jung, H. Y. and Han, J. S., 2013, "Structural Analysis and Shape Optimization for Rotor of Turbomolecular Pump Using P-Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 10, pp. 1279~1289.
- (5) Lee, D. H., Kim, H. S., Kim, B. K. and Lee, S. H., 2012, "Underwater Structure-Borne Noise Analysis Using Finite Element/Boundary Element Coupled Approach," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 7, pp. 789~796.
- (6) Yoo, S. Y., Jun, B. H., Shim, H. W. and Lee, P. M., 2014, "Finite Element Analysis of CFRP Frame under Launch and Recovery Conditions for Subsea Walking Robot, Crabster," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 38, No. 4, pp. 419~425.
- (7) Park, C. W., 2011, "Injection Molding and Structure Analysis of Inline Skate Frames Using FEA," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 11, pp. 1507~1514.
- (8) Lee, J. O., Lee, Y. S., Lee, H. S., Jun, J. T., Kim, J. H. and Kim, C. G., 2008, "Structural Analysis on the Heavy Duty Diesel Engine and Optimization for Bearing Cap," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 32, No. 5, pp. 402~410.
- (9) Han, C. W., Oh, C. M. and Hong, W. S., 2013, "Stress Analysis for Bendable Electronic Module Under Thermal-Hygroscopic Complex Loads," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 5, pp. 619~624.
- (10) Bao, C., Cai, L., Shi, K. and Yao, Y., 2015, "Estimation of J-resistance Curves for CT Specimen Based on Unloading Compliance Method and CMOD Data," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 43, No. 3, pp. 517~527.
- (11) Sun, P. J., Wang, G., Xuan, F., Tu, S. and Wang, Z., 2011, "Quantitative Characterization of Creep Constraint Induced by Crack Depths in Compact Tension Specimens," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 78, No. 4, pp. 653~665.
- (12) Wang, G., Liu, X. L., Xuan, F. and Tu, S., 2010, "Effect of Constraint Induced by Crack Depth on Creep Crack-tip Stress Field in CT Specimens," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 47, No. 1, pp. 51~57.
- (13) Han, M. S., Choi, H. K., Cho, J. U. and Cho, C. D., 2015 "Fracture Property of Double Cantilever Beam of Aluminum Foam Bonded with Spray Adhesive," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 1, pp. 5~10.
- (14) Cho, J. U., Lee, S. K., Cho, C. F., Sanchez, S. R., Blackman, R. K. and Kinloch, A. J., 2007, "A Study on the Impact Behavior of Adhesively-bonded Composite Materials," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 10, pp. 1671~1676.
- (15) Liu, C. H. and Chu, S. J., 2014, "Prediction of Shape Change of Semi-elliptical Surface Crack by Fatigue Crack Growth Circles Parameter," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 12, pp. 4921~4928.
- (16) Jung, S. H. and Lee, H. G., 2011, "Crack-tip Opening Angle-based Numerical Implementation for Fully Plastic Crack Growth Analyses," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 5, pp. 1201~1206.
- (17) Wen, J. S., Ju, W. E., Han, T. K., Choi, S. T. and Lee, K. S., 2012, "Finite Element Analysis of a Subsurface Penny-shaped Crack with Crack-face Contact and Friction under a Moving Compressive Load," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 9, pp. 2719~2726.
- (18) Jung, S. H. and Lee, H. G., 2011, "Crack-tip Field Characterization of Crack-tip Opening Angle-based Crack Growth — Plane Strain Single-edge Cracked Specimen Subject to Pure Extension," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 5, pp. 1207~1213.
- (19) Wu, Y. J., Wang, J. J. and Han, Q. K., 2012, "Contact Finite Element Method for Dynamic Meshing Characteristics Analysis of Continuous Engaged Gear Drives," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 6, pp. 1671~1685.

- (20) Cho, H. S., Cho J. U. and Cho, C. D., 2015, "Experimental and Analytical Verification of the Characteristics of Shear Fatigue Failure in the Adhesive Interface of Porous Foam Materials," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 6, pp. 2333~2339.
- (21) Bang, H. J., Lee, S. K., Cho, C. D. and Cho, J. U., 2015, "Study on Crack Propagation of Adhesively Bonded DCB for Aluminum Foam using Energy Release Rate," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 1, pp. 45~50.
- (22) Gao, T., Kinloch, A. J., Blackman, B. R. K., Sanchez, F. S. R., Lee, S. K., Cho, C. D., Bang, H. J., Cheon, S. S. and Cho, J. U., 2015, "A Study of the Impact Properties of Adhesively-bonded Aluminum Alloy Based on Impact Velocity," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 493~499.
- (23) Parida, S. K. and Pradhan, A. K., 2014, "3D Finite Element Analysis of Stress Distributions and Strain Energy Release Rates for Adhesive Bonded Flat Composite Lap Shear Joints Having Preexisting Delaminations," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 2, pp. 481~488.