

샌드위치 복합재료의 압축 특성에 관한 시뮬레이션 해석

방승옥¹, 국정한², 김세환³, 조재웅^{3*}

¹공주대학교 대학원 기계공학과, ²한국기술교육대학교 기계정보공학부,

³공주대학교 기계자동차공학부

Simulation Analysis on the Compression Property of Sandwich Composite

Seung-Ok Bang¹, Jeong-Han Kook², Sei-Hwan Kim³ and Jae-Ung Cho^{3*}

¹Division of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju University

²School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

³Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju University

요 약 본 연구에서는 다공성 심재를 갖는 샌드위치 복합재료의 압축해석을 수행하였다. 알루미늄 폼 및 허니컴 코어 샌드위치 복합재료의 유한요소모델은 솔리드 요소를 적용하였다. 알루미늄 폼 코어의 경우에는 유효등가손상모델을 적용하였다. 면내 압축해석에서 알루미늄 폼 및 허니컴 코어 샌드위치의 압축 최대하중이 비슷했다. 그러나 알루미늄 허니컴 코어 샌드위치의 하중 지지구간이 더 길었다. 면외 압축에서는 알루미늄 허니컴 코어 샌드위치의 압축 최대하중이 알루미늄 폼 코어 샌드위치보다 높게 나왔다. 시뮬레이션 해석을 통하여 샌드위치 복합재료의 압축 거동을 얻을 수 있었다.

Abstract In this study, compression analyses of sandwich composites with porous core were carried out. Finite element models of aluminum foam and honeycomb core sandwich composite material were applied solid element. In the case of aluminum foam core, valid equivalence damage model was applied. In the in-plane compression analysis, the maximum load of aluminum foam core sandwich was similar with that of aluminum honeycomb core sandwich. But in case of aluminum honeycomb core sandwich, the load support region becomes longer in comparison with aluminum foam core sandwich. In the out-plane compression analysis, compression maximum load of aluminum honeycomb core sandwich was higher than that of aluminum foam core sandwich. Through these Simulation analysis, obtains the behavior of sandwich composites.

Key Words : Sandwich Composite, Foam, Honeycomb, Compression Analysis, Finite Element Model

1. 서론

산업이 발전하면서 금속재료의 사용 조건은 점점 더 가혹해지고 복잡화되는 동시에 종류도 다양해지고 있다. 단일 재료로는 강성, 내식성, 내마모성, 경량성, 내열성, 차음성 등과 같은 특성을 만족시키지 못하기 때문에 각각의 특성을 만족시키는 재료들을 조합하려는 연구가 끊임없이 진행되어 왔다.

이러한 복합재료는 2종 이상의 재료를 조합·성형하여 단일 재료가 나타낼 수 없는 성질을 갖도록 한 재료이다. 즉, 성분이나 형태가 다른 두 종류 이상의 소재를 거시적으로 조합한 재료이다.

다양한 분야에서 사용되고 있는 복합재료들은 각각 다른 장단점을 가지고 있기 때문에 산업분야에 적용하기 위해서는 보다 정확한 특성 분석이 중요하다.

Reyes [1-4] 등은 실험데이터를 바탕으로 유한요소법

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0006548).

*교신저자 : 조재웅(jucho@kongju.ac.kr)

접수일 11년 12월 29일

수정일 12년 01월 30일

게재확정일 12년 02월 10일

을 이용하여 수치해석을 하였고, De Giorg [5-7] 등은 균일한 배열의 기공 벽을 갖는 다공성 재료 모델을 해석하여 실험데이터와 비교하고 파괴 거동을 구현하였다. 그러나 소재 자체의 복잡성으로 재료를 모델링하고 파괴 거동을 시뮬레이션하기란 매우 어렵다.

본 연구에서는 다공성 복합재료의 압축 특성에 대한 데이터와 유한요소모델(Finite element model)을 가지고 압축해석을 수행함으로써 하중 및 변형량을 구하였다. 또한 압축이 진행되는 동안 발생하는 좌굴 및 파괴 거동을 해석으로도 구현하고자 하였다.

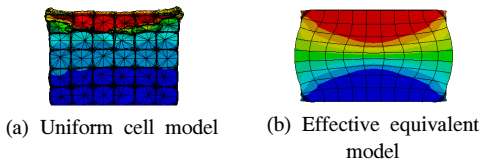
2. 연구모델 및 해석결과

2.1 연구모델

샌드위치 구조의 유한요소해석은 셸(Shell) 요소를 적용하는 방법과 3차원 솔리드(Solid) 요소를 사용하는 방법이 있다.

셸 요소를 사용하는 모델링 방법은 두께 방향으로 불연속적인 모델을 모사할 수 있고 모델링 및 해석 시간이 빠르기 때문에 일반적으로 많이 사용되고 있다. 그러나 샌드위치 구조의 해석에서는 요소의 특성상 심재 부분에 변형이 일어난 후에도 평면을 유지하고 있기 때문에 실제 심재의 거동을 구현하기가 어렵다.

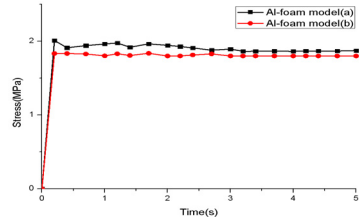
본 해석에서는 알루미늄 폼 및 허니컴 코어 샌드위치의 유한요소모델에 솔리드 요소를 적용하였다. 그러나 알루미늄 폼 코어의 경우에는 기공의 크기나 분포가 불균일하기 때문에 유효등가손상모델을 적용하였다.



[그림 1] 알루미늄 폼 심재 모델의 압축해석
[Fig. 1] Compression analysis of Al-foam core model

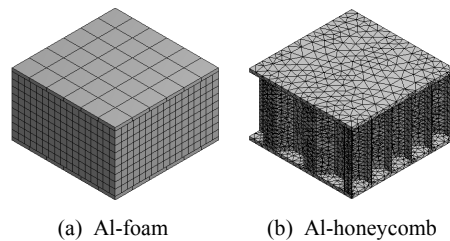
그림 1은 체적과 질량이 같고 밀도를 제외한 모든 물성치가 동일한 알루미늄 폼 코어를 모델을 동일한 조건 하에서 5 mm 압축을 시킨 것이다. (a)는 기공의 크기가 같고 균일하게 배열되어 있는 모델이고, (b)는 밀도만 다르게 하여 단순화시킨 유효등가손상모델이다. (a)의 경우에는 각각의 셀들의 구조가 붕괴되면 압축되는 모습을 구체적으로 볼 수 있지만 요소와 절점들의 수가 많아 해

석 시간이 길었다. (b)의 경우에는 재료의 거동이 단순하였지만 그림 2를 보면 두 모델의 해석결과가 유사한 것을 볼 수 있었다. 따라서 구조가 복잡한 알루미늄 폼 코어와 같은 재료의 해석에서는 유효등가손상모델을 사용하는 것이 더 효율적이다.



[그림 2] 알루미늄 폼 심재 모델의 응력-시간 곡선
[Fig. 2] Stress-time curve of Al-foam core model

그림 3은 해석에 사용된 유한요소모델로 33×33×20 (mm)의 치수를 갖는다. 폼 코어의 경우 좌우가 대칭인 반면, 허니컴 코어는 실제 제품과 동일한 크기의 셸을 갖도록 하기 위하여 약간 비대칭으로 설계하였다. 알루미늄 폼 코어 샌드위치는 육면체 요소(Hexahedral Element)로 분할하였으며, 절점 및 요소들의 수는 12,906 개와 2,673 개로 하였다. 알루미늄 허니컴 코어 샌드위치는 사면체 요소(Tetrahedral element)로 분할하였으며, 절점 및 요소들의 수는 13,825 개와 49,614 개로 하였다. 알루미늄 폼 코어는 Aluminum SAF40, 면재와 알루미늄 허니컴 코어는 Aluminum 3003 재질을 사용하였으며, 각 재료의 물성치는 표 1과 같다.



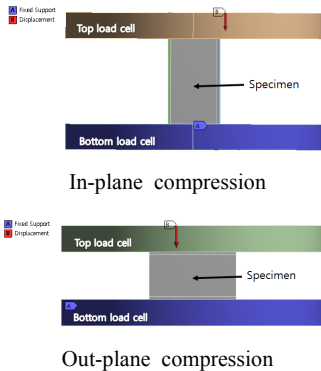
[그림 3] 샌드위치 복합재료의 유한요소모델
[Fig. 3] Finite element model of sandwich composite

[표 1] 재료의 물성치
[Table 1] Property of materials

	Al - SAF40	Al - 3003
Density(kg/m ³)	400	2,730
Young's modulus(MPa)	2,374	66,500
Poisson's ratio	0.29	0.33
Yield strength(MPa)	1.8	186
Shear modulus(GPa)	0.92	25

2.2 해석조건

그림 4와 같이 하단은 고정시키고 상단 로드셀에는 강제변위를 주었다. 수렴성을 높이기 위하여 해석 스텝을 25개로 나누었으며, 하나의 스텝은 1 s 동안 0.2 mm를 이동하도록 하여 총 5 mm의 강제변위를 주었다. 시험편과 로드셀 사이에는 0.3 정도의 마찰계수를 주었고, 심재와 면재 사이에는 Bonded 조건을 주었다.

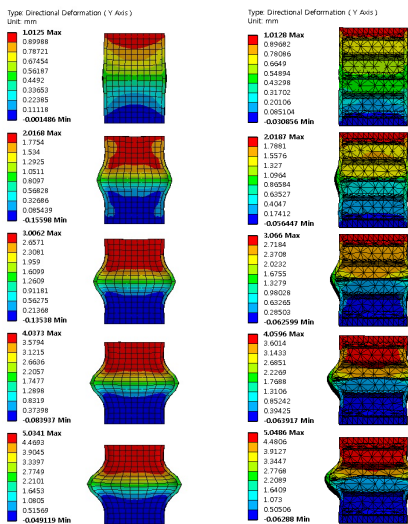


[그림 4] 시뮬레이션 제약 조건
[Fig. 4] Constraint conditions at simulation

2.3 해석결과

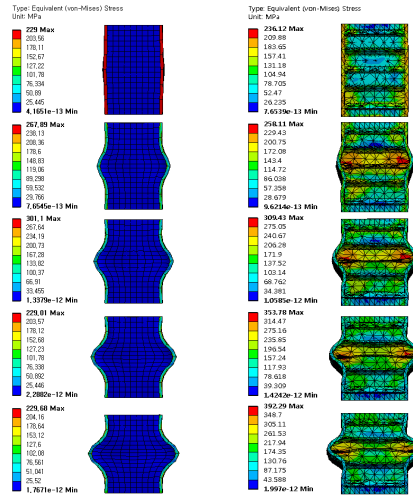
2.3.1 면내 압축해석

그림 5는 알루미늄 폼 및 허니컴 코어 샌드위치를 면내 방향으로 5 mm 압축한 해석 결과이다. 변위가 증가함에 따라 심재와 면재에 좌굴이 발생하며 주로 시험편의 중심부에서 압축이 이루어졌다.



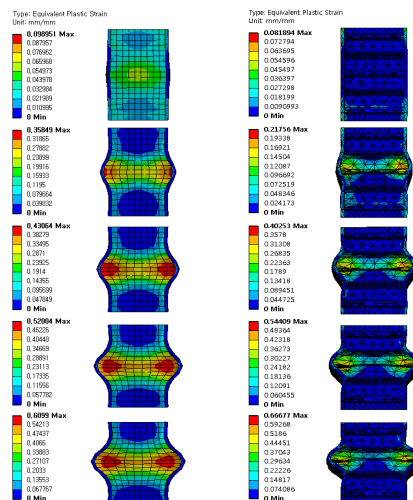
[그림 5] 시뮬레이션 결과에서 샌드위치의 변형(면내)
[Fig. 5] Deformation of sandwich at simulation result(In-plane)

그림 6은 알루미늄 폼 및 허니컴 코어 샌드위치를 면내 방향으로 압축할 때 발생하는 응력의 분포를 나타낸다. 알루미늄 폼 코어 샌드위치의 경우에는 낮은 응력을 받는 심재에 비하여 면재는 최대 300 MPa 정도의 높은 응력이 발생하는 것을 볼 수 있었다. 알루미늄 허니컴 코어 샌드위치의 경우에는 392 MPa 정도의 최대 응력이 심재에서 발생하였다.



[그림 6] 시뮬레이션 결과에서 샌드위치의 등가응력(면내)
[Fig. 6] Equivalent stress of sandwich at simulation result(In-plane)

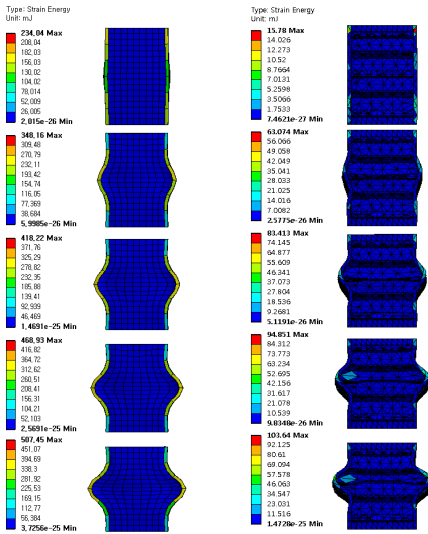
압축이 진행되면서 알루미늄 폼은 0.61, 알루미늄 허니컴은 0.67 정도의 소성 변형률이 그림 7과 같이 좌굴된 심재 부분에 발생하였다.



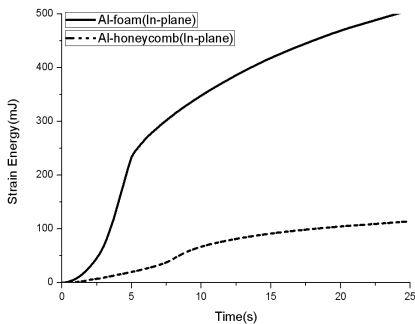
[그림 7] 시뮬레이션 결과에서 샌드위치의 소성 변형률(면내)
[Fig. 7] Plastic strain of sandwich at simulation result(In-plane)

그림 8은 재료에 발생하는 변형 에너지로 알루미늄 폼은 507.45 mJ, 알루미늄 허니컴은 103.64 mJ 정도의 최대 변형 에너지가 면재 부분에 생기는 것을 볼 수 있었다.

그림 9는 시간에 따른 변형 에너지를 나타낸 것으로 알루미늄 폼이 알루미늄 허니컴 보다 높은 값을 보였지만, 모두 좌굴이 발생하는 구간에서 변형 에너지가 급증하는 것을 볼 수 있었다.



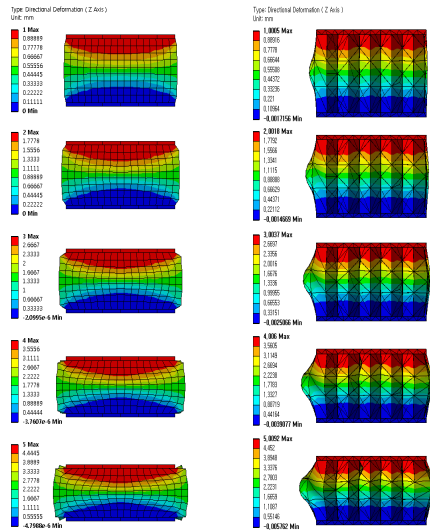
[그림 8] 시뮬레이션 결과에서 샌드위치의 변형 에너지(면내) [Fig. 8] Strain energy of sandwich at simulation result(In-plane)



[그림 9] 시간에 따른 변형 에너지 곡선(면내 압축) [Fig. 9] Strain energy-time curve (In-plane compression)

2.3.2 면외 압축해석

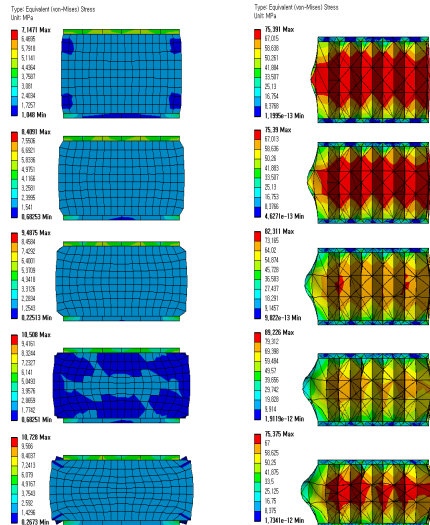
그림 10은 알루미늄 폼 및 허니컴 코어 샌드위치를 면외 방향으로 5 mm 압축한 해석 결과이다. 압축이 진행됨에 따라 알루미늄 폼과 허니컴 모두 심재에서 좌굴이 발생하였다. 심재의 하단보다는 상단부분이 먼저 변형되었으며 면재에는 변형이 거의 없었다.



[그림 10] 시뮬레이션 결과에서 샌드위치의 변형(면외) [Fig. 10] Deformation of sandwich at simulation result (Out-plane)

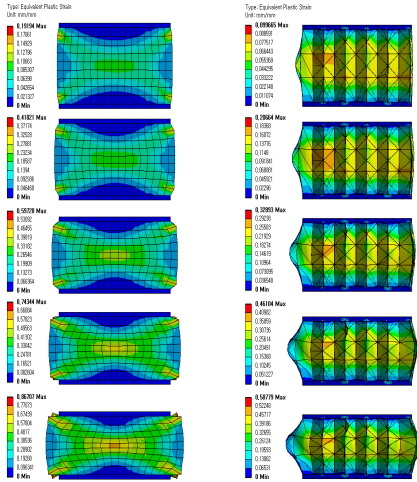
그림 11은 면외 방향으로 압축할 때 발생하는 응력의 분포를 나타낸다. 알루미늄 폼의 경우에는 하강하는 로드 셀과 만나는 상단 면재에 10 MPa 정도의 높은 응력이 발생하였으며, 심재에는 2 MPa 정도의 낮은 응력이 생겼다.

알루미늄 허니컴의 경우에는 면재 보다 두께가 얇은 심재의 중간 부분에서 75 MPa 이상의 높은 응력이 발생하면서 좌굴이 발생하였다.



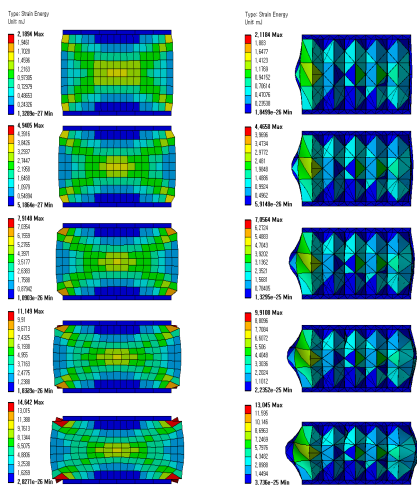
[그림 11] 시뮬레이션 결과에서 샌드위치의 등가응력(면외) [Fig. 11] Equivalent stress of sandwich at simulation result(Out-plane)

압축이 진행되면서 알루미늄 폼은 0.87, 알루미늄 허니컴은 0.59 정도의 소성 변형률이 그림 12와 같이 심재 중앙에 발생하였다.



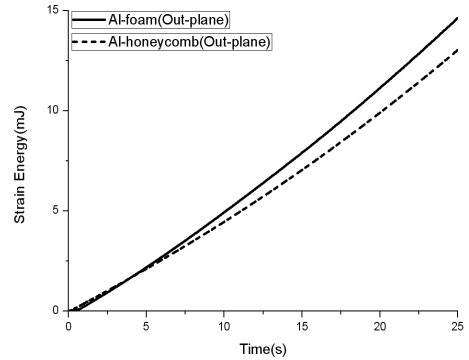
[그림 12] 시뮬레이션 결과에서 샌드위치의 소성 변형률 (면외)
[Fig. 12] Plastic strain of sandwich at simulation result (Out-plane)

그림 13은 압축으로 인하여 재료에 발생하는 변형 에너지로 알루미늄 폼은 14.64 mJ 정도의 최대 변형 에너지가 심재와 면재가 접촉하는 외곽 부분에 생겼고, 알루미늄 허니컴은 13.05 mJ 정도의 최대 변형 에너지가 심재 부분에 생기는 것을 볼 수 있었다.



[그림 13] 시뮬레이션 결과에서 샌드위치의 변형 에너지 (면외)
[Fig. 13] Strain energy of sandwich at simulation result (Out-plane)

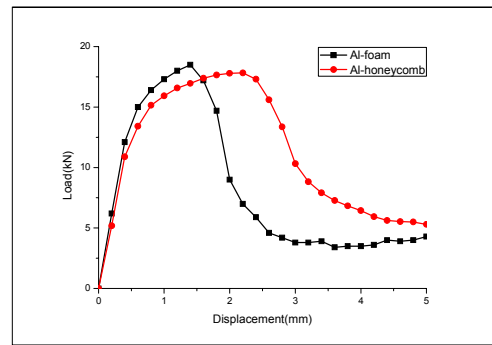
그림 14는 시간에 따른 변형 에너지를 나타낸 것으로 알루미늄 폼이 알루미늄 허니컴 보다 높게 나왔다.



[그림 14] 시간에 따른 변형 에너지 곡선(면외 압축)
[Fig. 14] Strain energy-time curve (Out-plane compression)

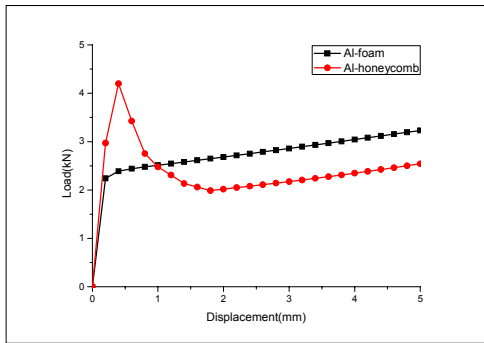
2.3.3 해석결과와 분석

그림 15는 변위가 5 mm 변하는 동안 면내 압축하중의 변화로 알루미늄 폼과 알루미늄 허니컴이 비슷하게 18 kN 정도의 압축 최대하중을 보였지만, 알루미늄 허니컴이 알루미늄 폼보다 하중 지지구간이 더 길게 나왔다.



[그림 15] 시뮬레이션 결과에서 폼 및 허니컴의 하중-변형 비교(면내 압축)
[Fig. 15] Comparison with load-displacements of foam and honeycomb(In-plane compression) at simulation result

그림 16은 면외 압축하중의 변화로 알루미늄 폼 샌드위치는 0~0.5 mm 사이의 변위에서 압축 최대하중이 급격히 증가한 후 2.5 kN 정도의 하중으로 유지되다가 증가하는 결과를 보였다. 알루미늄 허니컴 샌드위치는 알루미늄 폼보다 높은 4.3 kN 정도의 최대하중을 보였다.



[그림 16] 시뮬레이션 결과에서 폼 및 허니컴의 하중-변형 비교(면외 압축)

[Fig. 16] Comparison with load-displacements of foam and honeycomb(Out-plane compression) at simulation result

3. 결론

알루미늄 폼 및 허니컴 샌드위치 복합재료의 유한요소 모델을 가지고 수치해석적인 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. 알루미늄 폼과 같이 균일하지 않은 재료의 해석에서는 솔리드 요소를 단순화하여 유효등가손상모델로 해석하는 것이 더 효과적이다.
2. 면내 압축에서 알루미늄 폼 및 알루미늄 허니컴 샌드위치의 압축 최대하중은 18 kN 정도로 거의 비슷하지만 비하중 및 지지능력을 고려하여 보았을 때, 알루미늄 허니컴 샌드위치의 압축 특성이 더 우수하였다.
3. 면외 압축실험에서 알루미늄 허니컴 코어는 알루미늄 폼 코어보다 약 2배 정도 높은 압축 최대하중에 도달 후 파괴가 이루어졌다.
4. 유한요소해석으로도 실제와 유사한 복합재료의 거동을 구현할 수 있으며, 다양한 산업분야에 다공성 복합재료를 적용시키고 구조적 안전성을 예측 및 검증이 가능하다.

References

[1] A. Reyes, O. S. Hopperstad, T. Berstad, A. G. Hanssen and M. Langseth, "Constitutive Modeling of Aluminum Foam Including Fracture and Statistical Variation of Density", European Journal of Mechanics - A/Solids,

Vol. 22, Issue 6, pp. 815-835, November-December, 2003.

- [2] Rahul Jhaver, Hareesh Tippur, Processing, compression response and finite element modeling of syntactic foam based interpenetrating phase composite (IPC), Materials Science and Engineering: A, Vol. 499, Issues 1-2, pp. 507-517, January, 2009.
- [3] S. S. Kim, "Study of Properties Foaming Glass from Waste Glass", 2007 Spring Conference Proceeding of KAIS, pp. 126-128, May, 2007.
- [4] W. H. Lee, S. C. Han and W. T. Park, "Buckling Analysis of Laminated Composite Plates under the In-plane Compression and Shear Loadings", Transactions of KAIS, Vol. 11, No. 12, pp. 5199-5206, December, 2010.
- [5] M. De Giorgi, A. Carofalo, V. Dattoma, R. Nobile and F. Palano, "Aluminum Foams Structural Modelling", Computers & Structures, Vol. 88, Issues 1-2, pp. 25-35, January, 2010.
- [6] A. K. Kim, Kazi Tunvir, S. J. Park, G. D. Jeong, Md Anwarul Hasan and S. S. Cheon, "Study on Compressive Behavior of Heterogeneous Al-alloy Foam by Cruciform-Hemisphere Model", Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, Vol. 14, Issue 6, pp. 933, 2006.
- [7] H.X. Zhu, S.M. Thorpe, A.H. Windle, The effect of cell irregularity on the high strain compression of 2D Voronoi honeycombs, International Journal of Solids and Structures, Vol. 43, Issue 5, pp. 1061-1078, March, 2006.

방 승 옥(Seung-Ok Bang)

[준회원]



- 2010년 2월 : 공주대학교 자동차 공학과 (공학사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과 (공학석사)

<관심분야>

기계 및 자동차 부품 설계 및 내구성 평가, 피로 또는 충돌 시 동적 해석

국 정 한(Jeong-Han Kook)

[정회원]



- 1980년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1982년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1988년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1992년 1월 ~ 현재 : 한국기술대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

용접공학, 파괴역학, 재료강도 등

김 세 환(Sei-Hwan Kim)

[종신회원]



- 1971년 2월 : 수도공과대학 기계공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 국민대학교 대학원 기계설계학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 국민대학교 대학원 기계설계학과 (공학박사)
- 1979년 2월 : (주) 삼아 공장장
- 1982년 3월 : 천안공업대학 금형설계과 교수
- 2010년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

프레스 금형, 단조가공, 금형열처리

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 충돌 시 동적 해석