

## 접착제로 접합된 DCB 시험편의 피로 해석에 관한 연구

최해규<sup>1</sup>, 홍순직<sup>2</sup>, 김세환<sup>3</sup>, 조재웅<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>공주대학교 신소재공학부

<sup>3</sup>공주대학교 기계자동차공학부

## Study on Fatigue Analysis of DCB Specimen Bonded

Hae-Kyu Choi<sup>1</sup>, Soon-Jik Hong<sup>2</sup>, Sei-Hwan Kim<sup>3</sup> and Jae-Ung Cho<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju University

<sup>2</sup>Division of Advanced Materials Engineering, Kongju University

<sup>3</sup>Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju University

**요약** 본 논문에서는 접착제로 접합된 DCB(이중외팔보) 시험편의 피로 해석을 수행하였다. 두께가 25 mm 및 40 mm인 두 모델들의 피로수명과 피로손상의 해석 결과를 비교해보면, 두께 25 mm인 모델이 두께 40 mm인 모델에 비하여 수명과 손상이 불리한 것으로 나타났으며 불규칙 피로하중에서는 'SAE transmission'에서 가장 불리한 값을 나타냈다. Rainflow matrices에서는 'SAE bracket history'에서 가장 취약한 것으로 나타났다. Damage matrices에서는 상대적으로 두께 25 mm인 모델이 불리한 모습을 보였지만, 상대적인 손상 가능성에서는 두께 40 mm인 모델이 더 높은 것으로 나타났다. 또한 'SAE transmission'에서 가장 안정한 경향을 보이고 있고 상대적인 손상으로서 약 1.1에서 1.8 % 정도로 가장 작은 것으로 나타났다. 본 연구에서 얻어진 해석 결과를 접착제로 접합된 실제 복합재 구조물에 적용시켜 파괴거동을 분석하고 그 기계적인 특성을 파악할 수 있다.

**Abstract** In this study, the fracture behaviour of DCB(double cantilever beam) specimen with aluminum foam composite materials is analyzed by simulation. By comparing the analysis results with two models of 25 mm and 40 mm, the model with thickness of 25 mm is weaker than 40 mm at fatigue life and damage. Two models are unfavorable at 'SAE Transmission' in case of nonuniform fatigue load and rainflow matrices are weakest at 'SAE Bracket history'. In damage matrices, the model with 25 mm of thickness is weaker than the model with 40 mm of thickness but the model with 40 mm of thickness relative damage possibility is higher than in case of 25 mm. As two models are safest at 'SAE Transmission', the relative damage becomes the lowest value from 1.1 to 1.8 %. The mechanical property can be investigated by applying these analyses results with the real composite structure bonded with adhesive and analyzing fracture behaviour.

**Key Words** : Double cantilever beam(DCB), Thickness of model, Fatigue life and damage, Rainflow matrix, Damage matrix, Fracture behaviour

### 1. 서론

현재 각종 공업제품에 있어서 대부분 경량화를 목적으로 복합재료가 광범위하게 사용되고 있다. 항공산업에서 시작으로 복합재료의 사용이 검토되고 있으며 자동차사업도 지구환경보호의 관점으로부터 연비향상에 대한 사

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0006548).  
본 논문은 한국연구재단 국제협력연구사업(D00004) 지원으로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Jae-Ung Cho

Tel: +82-41-521-9271 email: jucho@kongju.ac.kr

접수일 12년 04월 25일 수정일 12년 06월 01일

회적 요구가 높은 것 등 구조요소에 복합재료가 유력한 재료의 한가지로 고려되고 있다[1-2].

복합재료를 이용한 구조물에 기존의 용접이나 드릴로 구멍을 뚫어 볼트, 너트에 의한 체결방식을 사용하게 되면 가공 과정이나 시간이 증가할 뿐만 아니라 무게도 증가한다. 이러한 문제점들 때문에 최근에는 에폭시 접착제

계재확정일 12년 07월 12일

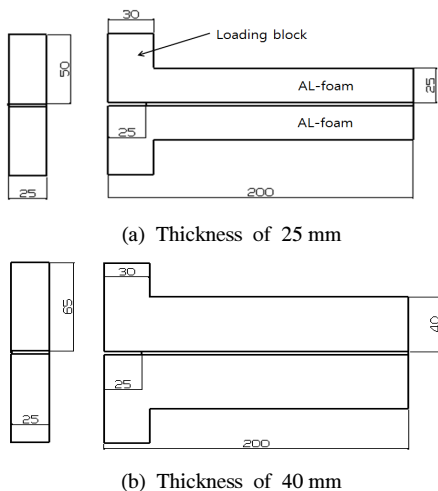
와 같은 특수 접착제를 이용하여 복합재료들을 접합하는 접착제 구조물의 사용이 증가하고 있다. 그러나 충분한 강성과 강도를 가지고 설계되었음에도 불구하고 기계 또는 접착 구조물이 충격에 의해 파손되는 것을 최근 여러 가지 사고를 통해서도 알 수 있다. 이것은 복합재료 접합면의 파단이 접착 구조물에 존재하는 이물질 또는 결합에 의해 발생된 균열과 관련이 있다. 따라서 복합재료를 이용한 접착 구조물의 충격피로와 접합면에 대한 파괴인성을 연구하는 것이 중요하다[3,4].

본 연구에서는 ISO 국제규격(ISO 11343)[5]과 영국 공업 규격(British standard ; BS 7991)[6]에 의거하여 DCB 시험편을 3D 모델링하여 유한요소해석을 수행하였다. 3D 모델링과 해석에는 ANSYS 프로그램[7]이 사용되었다.

이러한 해석적 연구에서 얻어진 결과를 통하여 접착제로 접합된 실제 복합재 구조물에 적용시켜 피로 파괴거동을 분석하고 그 기계적인 특성을 파악할 수 있다.

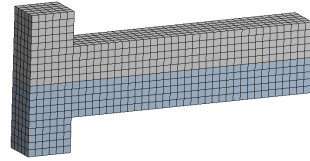
## 2. 해석 모델 및 경계조건

그림 1은 해석에 사용된 DCB 형태의 모델의 도면을 보여주는 그림으로서 치수의 단위는 mm이다. 모델의 종류는 (a) 와 (b)의 2가지로서 좌측과 같이 측면의 폭은 25 mm로 통일하였고, 우측과 같이 길이는 200 mm로 통일하며, 두께는 25 mm와 40 mm를 각각 모델링하였다. 또한 그림 1과 같이 하중 블록이 있는 부분의 끝으로 25 mm를 띄운 시점부터 모델의 반대쪽 끝까지를 접합된 것으로 설정하여 해석을 수행하였다.



[그림 1] 모델링 도면  
[Fig. 1] Modelling drawing

본 해석에는 DCB 유한요소모델을 육면체 요소(Hexahedral element)로 분할하였으며, 형상은 그림 2와 같다.



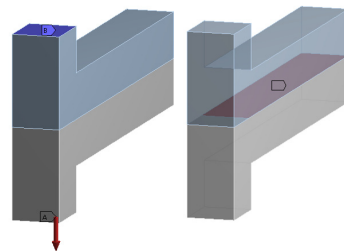
[그림 2] 유한요소 모델  
[Fig. 2] Finite element model

모델의 재질은 구조용 강으로 설정하였으며, 접착된 부분은 접합 조건을 사용하였다. 해석에 사용된 구조용 강 재료의 물성치[6]는 표 1과 같다.

[표 1] 재료의 물성치  
[Table 1] Material properties

Property	Structural steel
Density(kg/m <sup>3</sup> )	7850
Young's modulus(Pa)	2.0×10 <sup>11</sup>
Poisson's ratio	0.3
Shear modulus(Pa)	1.6667×10 <sup>11</sup>
Tensile yield strength(Pa)	2.5×10 <sup>8</sup>

그림 3과 같이 하중 블록의 상부는 고정조건으로서 구속하였고, 하부의 하중 블록에는 200 N의 하중을 부여하였다. 접촉면은 하중 블록이 있는 부분의 앞부분에서 25 mm 떨어뜨려 접합된 것으로 설정하였다.

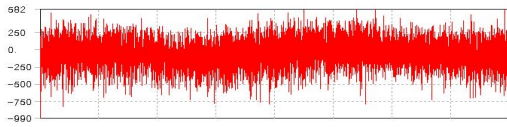


[그림 3] 경계조건  
[Fig. 3] Boundary condition

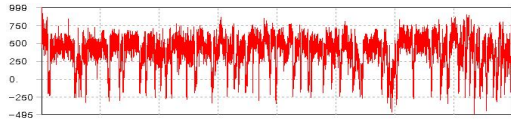
## 3. 해석 결과

그림 4는 본 연구에서의 피로 해석에 적용한 불규칙 변동 피로 하중에 대한 3가지 형태를 보이고 있다. 불규

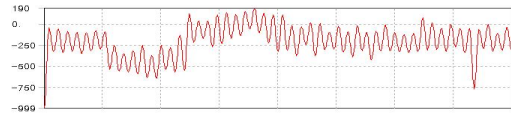
칙 진폭 피로 하중조건들은 ‘SAE bracket history’, ‘SAE transmission’ 및 ‘Sample history’로서 경과 사이클들에 대한 응력 진폭과 일정한 평균 응력의 내역을 나타낸다. 피로에 대한 해석 결과의 출력들은 피로 수명, 파손, Rainflow matrices 및 Damage matrices를 포함하고 있다. 각각의 출력들은 불규칙 진폭하중들로서 서로 비교 될 수 있다. 그림에서 세로축은 평균하중에 대한 적용 배율에 대한 내역으로써, ‘SAE bracket history’, ‘SAE transmission’ 및 ‘Sample history’는 각각 582~990, 999~495, 190~999까지의 적용 범위를 보이고 있다.



(a) SAE bracket history



(b) SAE transmission



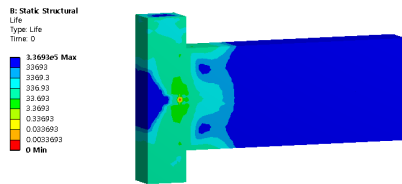
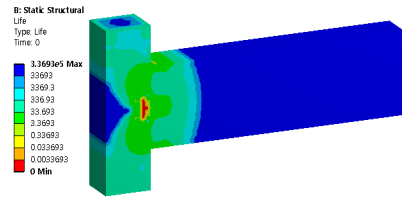
(c) Sample history

[그림 4] 전변형량 등고선

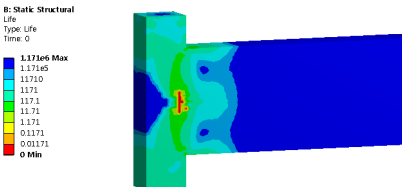
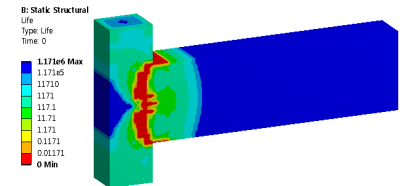
[Fig. 4] Contour of total deformation

본 연구의 모델에 대하여 사용 가능 수명에 대한 등고선 그림들이 그림 5에 나타나 있다. 이 결과는 모델 전체에 걸쳐서 계산 될 수 있는데 불규칙 진폭 하중으로 본 모델에 작용됨으로써 이 결과의 등고선 그림들은 주어진 피로 분석에 대하여 사용 가능한 수명을 보여 주고 있다. 해석 결과 두 모델을 비교하면 두께 25 mm인 모델이 두께 40mm인 모델에 비하여 전체적으로 예비크랙의 끝 부분에서 취약하다는 것을 알 수 있었으며, 특히 ‘SAE transmission’에서의 수명에서 취약한 부분이 많은 것으로 나타났다. 또한 그림들에서 볼 수 있듯이 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket history’가 그 최대 수명이 약  $3.37 \times 10^5$  Cycle로 그 수명이 가장 작음을 알 수 있고 하중의 변화가 완만한 ‘Sample history’의 경우가 그 수명이 약  $2 \times 10^7$  Cycle 정도로 가장 긴 것을 알 수 있었다. 두 모델 공히, ‘Sample history’의 경우는 피로 수명은 ‘SAE bracket history’의 경우보다 약 60배 정도 수명이 길고

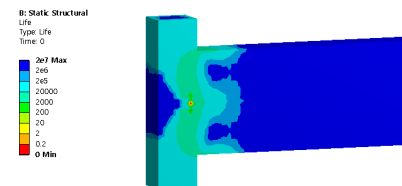
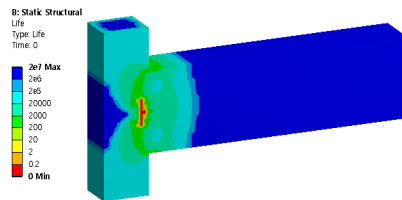
‘SAE transmission’의 경우는 ‘SAE bracket history’의 경우보다 3.5배 정도 수명이 길어짐을 알 수 있었다.



(a) SAE bracket histories on thickness of 25 mm and 40mm



(b) SAE transmission on thickness of 25 mm and 40 mm



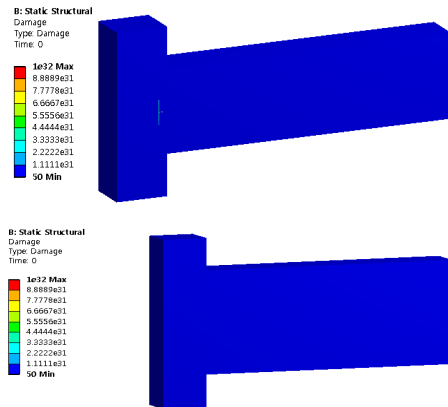
(c) Sample histories on thickness of 25 mm and 40 mm

[그림 5] 피로수명의 등고선 그림

[Fig. 5] Contour plots of fatigue life

그림 6은 피로 손상에 대한 등고선을 비교한 그림들로서 피로 손상은 설계 수명을 사용 가능 수명으로 나누는 것으로 정의된다. 해석 결과 두 모델을 비교하면 두께 25 mm인 모델이 두께 40 mm인 모델에 비하여 예비 크랙 부분에서 손상을 더 많이 받은 것으로 나타났으며, 특히 ‘SAE transmission’의 해석결과에서 두 모델의 손상은 그 차이를 확실히 보이고 있다.

또한 손상의 최소값을 비교하면, 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket history’에서 손상의 최소값이 두 모델에서 모두 2968로 ‘SAE transmission’와 ‘Sample history’에 비하여 높은 값을 보인다. 따라서 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket history’의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 완만한 ‘Sample history’의 경우가 손상 최소값이 두 모델 모두 50으로 가장 안정함을 보이고 있다.



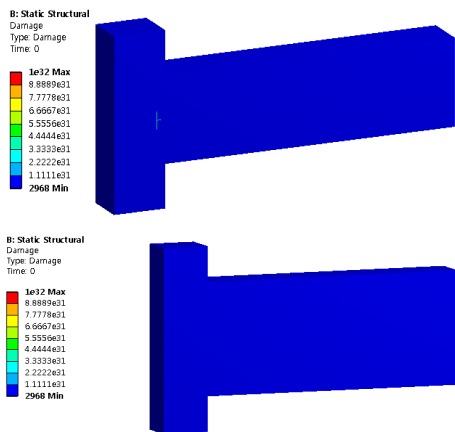
(c) Sample histories on thickness of 25 mm and 40 mm

[그림 6] 피로 손상의 등고선 그림

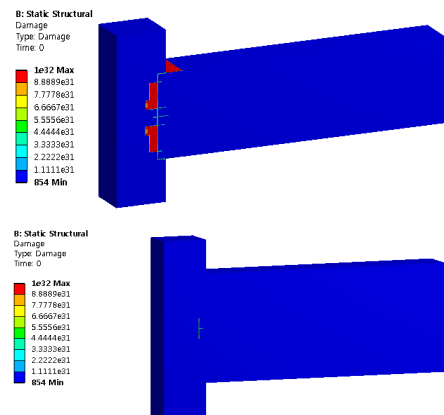
[Fig. 6] Contour plots of fatigue damage

임계 위치에 대한 Rainflow matrices에 대한 그래프를 그림 7에 나타내었으며, ‘SAE bracket history’, ‘SAE transmission’, ‘Sample history’들의 3가지 불규칙 진폭하중에 대해서만 적용된다. Rainflow matrices는 해석에 가해지는 하중 내역의 구성으로서 진폭응력과 평균 응력에 대한 그 빈도수들로서 그려지는데 z축은 주어진 진폭 응력과 평균 응력에 대한 빈도수에 해당된다. 여기서 진폭 응력은 피로 사이클에서의 최대 응력과 최저 응력의 차이를 나타낸다. 해석 결과 두 모델 모두 거의 같은 피로 현상을 보였으며, 평균 응력과 응력 진폭이 25 mm인 모델에 비하여 40 mm인 모델이 낮은 값을 나타내었다. 두 모델 모두 ‘SAE bracket history’의 경우가 상대적인 손상은 평균응력이 0부근의 상태에서 최대의 빈도수가 80 정도로서 상대적인 손상을 많이 일으켜 어떤 다른 경우들 보다는 더 파손의 가능성이 더 일어남을 알 수 있었다. 또한 ‘Sample history’의 경우는 이 상태에서 최대의 빈도수가 5 정도로서 손상을 가장 적게 일으켜 그 파손의 가능성이 가장 적음을 알 수 있었다.

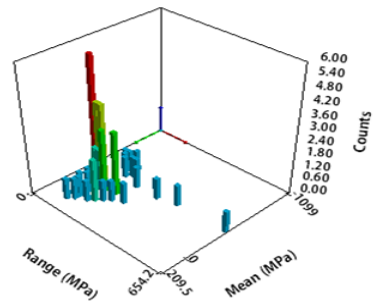
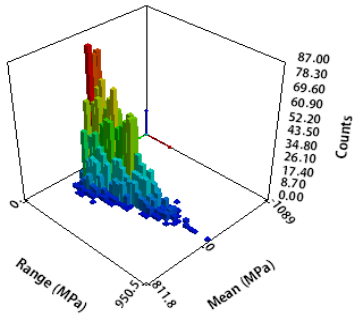
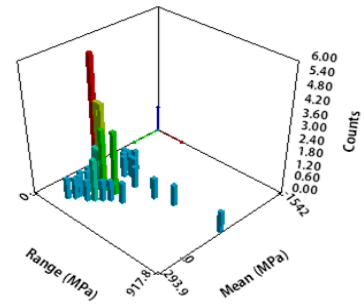
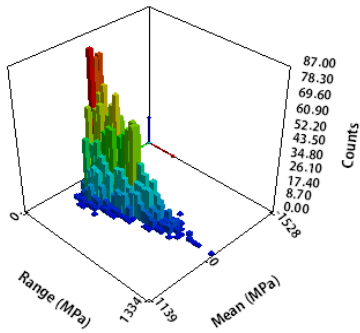
그림 8은 본 연구 모델에서 파손에 대한 임계 위치에서의 Damage matrices에 대한 3차원 그래프를 비교한 그림들이다. Damage matrices는 불규칙 진폭하중에 대해서만 적용되는데 109 Cycle의 무한 수명에 대한 상대적 손상 가능성을 나타내고 있다. 해석 결과 두 모델을 비교하면 두께 25 mm인 모델이 두께 40 mm인 모델에 비하여 전체적으로 불안정한 모습을 보이고 있다. 또한 불규칙 진폭하중들에 대한 비교를 해보면 ‘SAE transmission’의 경우에 가장 안정한 경향을 보이고 있고 상대적인 손상으로 약 1.1%에서 1.8% 정도로 가장 작은 것으로 나타났다.



(a) SAE bracket histories on thickness of 25 mm and 40 mm



(b) SAE transmission on thickness of 25 mm and 40 mm

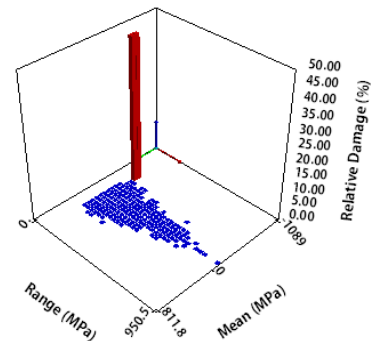
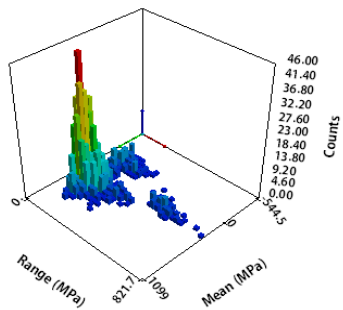
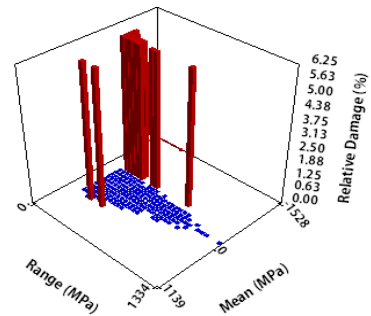
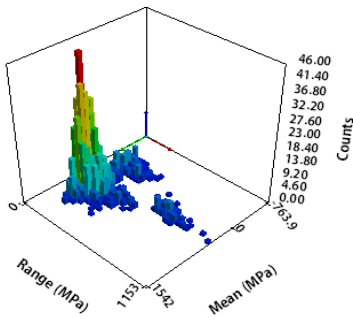


(a) SAE bracket histories on thickness of 25 mm and 40 mm

(c) Sample histories on thickness of 25 mm and 40 mm

[그림 7] Rainflow matrix의 해석 결과

[Fig. 7] Plots of rainflow matrix



(b) SAE transmission on thickness of 25 mm and 40 mm

(a) SAE bracket histories on thickness of 25 mm and 40 mm

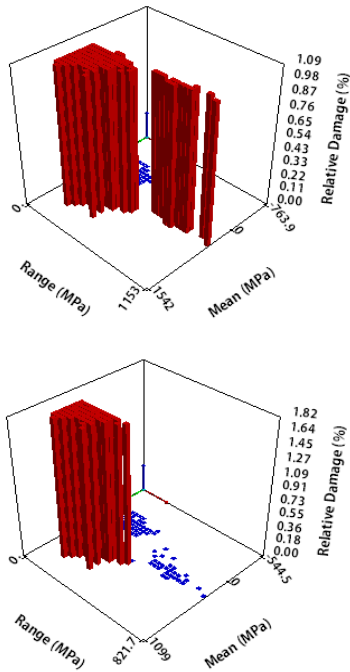
### 4. 결론

본 연구에서는 접착제로 접합된 DCB 시험편의 피로 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

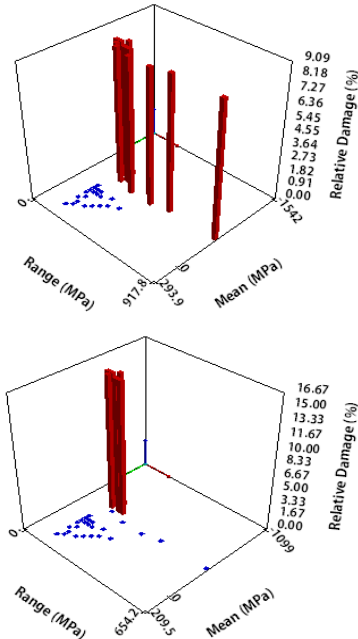
1. 두 모델의 피로수명과 피로손상의 해석 결과를 비교해보면 두께 25 mm인 모델이 두께 40 mm인 모델에 비하여 수명과 손상이 불리한 것으로 나타났으며, 두 모델 모두 예비 크랙의 끝 부분에서 취약한 것을 알 수 있었다. 또한 불규칙 피로하중에서는 ‘SAE transmission’에서 가장 불리한 값을 나타냈다.
2. Rainflow matrices의 해석 결과에서는 상대적으로 두께 25 mm인 모델이 불리한 값을 나타내었으며, 불규칙 피로하중에서는 ‘SAE bracket history’에서 가장 취약한 것으로 나타났다.
3. Damage matrices의 해석결과 에서는 상대적으로 두께 25 mm인 모델이 불리한 모습을 보였지만, 상대적인 손상 가능성에서는 두께 40 mm인 모델이 더 높은 것으로 나타났다. 또한 ‘SAE transmission’에서 가장 안정한 경향을 보이고 있고 상대적인 손상으로서 약 1.1 %에서 1.8 % 정도로 가장 작은 것으로 나타났다.
4. 본 연구에서 얻어진 해석 결과를 통하여 접착제로 접합된 실제 복합재 구조물에 적용시켜 파괴거동을 분석하고 그 기계적인 특성을 파악할 수 있다.

### References

- [1] S. O. Park, Z. K. Rhee, "Analysis for strength estimation of adhesive joints", Symposium on Emerging Technologies in Manufacturing System Engineering, pp. 98-107, 2004.
- [2] S. O. Bang, J. H. Kook, S. H. Kim, J. U. Cho, "Simulation Analysis on the Compression property of Sandwich Composite", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation society, Vol. 13, No. 2, pp. 778-484, 2012.
- [3] Blackman, B.R.K., Dear, J.P., Kinloch, A.J., MacGillivray, H., Wang, Y., Williams, J.G. and Yayla, P.,S. R. Ahuja, et al., "The Failure of Fibre Composites and Adhesively Bonded Fibre Composites under High Rates of Test Part III Mixed-mode I/II and Mode II Loadings", Journal of Materials Science, Vol. 31, No. 17, pp. 4467-4477, 1996.
- [4] H. K. Choi, S. H. Kim, J. U. Cho, "Study on Structural Analysis of DCB Specimen Bonded with



(b) SAE transmission on thickness of 25 mm and 40 mm



(c) Sample histories on thickness of 25 mm and 40 mm

[그림 8] Damage matrix의 해석 결과

[Fig. 8] Plots of damage matrix

Aluminum Foam Composite", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation society, Vol. 13, No. 4, pp. 1488-1495, 2012.

- [5] International Standards Organization, ISO 11343, Geneva(Switzerland), 1993.
- [6] British Standard, BS 7991, "Determination of the Mode I Adhesive Fracture Energy GIC of Structure Adhesives Using the Double Cantilever Beam (DBC) and Tapered Double Cantilver Beam (TDCB) Specimens", Imperial college of science and technology (JISC), pp. 3-13, 2001.
- [7] Swanson, J., Ansys 12.0, Ansys Inc, U.S.A, 2009.

**최 해 규(Hea-Kyu Choi)**

[준회원]



- 2011년 2월 : 공주대학교 자동차 공학과(공학사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과(공학석사)

<관심분야>

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

**홍 순 직(Soon-Jik Hong)**

[정회원]



- 2001년 2월 : 충남대학교(박사)
- 2003년 5월 : 급속응고신소재연구소
- 2005년 5월 : University of Central Florida
- 2005년 7월 ~ 2006년 3월 : 한국원자력연구원
- 2006년 4월 ~ 현재 : 공주대학교 신소재공학부 교수

<관심분야>

금속재료, 분말재료, 나노재료

**김 세 환(Sei-Hwan Kim)**

[종신회원]



- 1971년 2월 : 수도공과대학 기계공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 국민대학교 대학원 기계설계학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 국민대학교 대학원 기계설계학과 (공학박사)
- 1997년 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)**

[종신회원]



- 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