

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(3), 194-199(2013)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.3.194>

복합재료 적층판 기계적 체결부 응력집중계수에 대한 고찰

권정식*, 김진성, 이수용

A Study on Stress Concentration Factor of Composite Laminate

Mechanical Joints

Jeong-Sik Kwon*, Jin-Sung Kim and Soo-Yong Lee

Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

ABSTRACT

In this paper, the results of composite laminate mechanical joints test (ASTM D5961) are compared with the theoretical strength calculations and FEM analysis results. To calculate the S.C.F. (stress concentration factor) on joint strength, equations on metallic and composite materials in ASM Handbook used and compared with experimental results. The difference of joint strength are compared by geometrical parameters and joining types (single/double lap joint). In FEM analysis, to find efficient FEM model on composite laminate mechanical joint, several FEM models are compared with experimental test results.

초 록

복합재료 적층판 기계적 체결부 표준시험 (ASTM D5961) 결과에 대하여 이론적 강도 계산 및 유한요소 해석결과를 비교한다. 응력집중계수를 산출하기 위하여 ASM Handbook의 금속 및 복합재료에 대한 산출식을 이용하여 실험 결과값과 비교한다. 형상학적 인자들과 체결방식(단일/이중 겹침)에 따른 체결강도의 차이도 비교한다. 유한요소 해석에 있어, 복합재료 적층판의 기계적 체결부의 효율적인 유한요소 모델을 찾기 위해 몇 가지 유한요소 모델들과 실험 결과들을 비교한다.

Key Words : Composite Laminate(복합재료 적층판), Mechanical Joint(기계적 체결), S.C.F.(Stress Concentration Factor, 응력집중계수), Geometrical Parameters(형상학적 인자), Double Lap Joint(이중 겹침 체결), Single Lap Joint(단일 겹침 체결)

1. 서 론

항공기 구조물에 있어 복합재료 적층판의 기계적 체결부는 일반적으로 금속 체결재를 이용하여 두 부재를 연결한다. 이때 체결부의 허용하중 및 체결강도는 체결방식에 따라 평면에서의 단일

또는 이중 겹침 방식과(single and double lap joint in plane mode) 체결 부재에 대한 수직 방향의 체결(pull-through)로 분류되어지며, 각각의 조건에 대하여 체결강도 및 허용하중을 계산하고 시험하게 된다. 일반적으로 평면에서의 체결부 정적강도 계산은 모재강도, 체결재 인장 및 전단

† Received: October 7, 2012 Accepted: February 1, 2013

* Corresponding author, E-mail : jungsik_78@naver.com

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

강도를 이용하여 체결부 소재의 인장 및 압축강도, 베어링 강도를 산출한다. 그리고 면내 수직 방향에 대해서는 모재에 수직방향으로 전달되는 하중에 대하여 체결재 인장 강도 및 모재 허용하중을 산출하며, 각각 두 모드에 대해서는 ASTM의 표준 시험절차(D5961, D7332)에 의거하여 시험을 하며, 이들 결과에 대하여 이론적 강도값과 비교한다. 이 때 주요 실험인자로서 적용되는 체결부 직경, 폭, 모재두께, 가장자리 거리에 의한 체결부 강도 변화는 형상학적/실험적 응력집중계수(stress concentration factor)를 이용하여 나타낼 수 있으며, 추가적으로 체결재의 종류, 홀공차(hole clearance), 체결토크(fastening torque), 체결 모재의 종류(metals, composites)의 영향도 고려되어야 한다.

본 논문에서는 CFRP(HFG CU-125NS, UD Prepreg) 적층판 기계적 체결부에 대하여 ASTM D5961 Proc. A, B 표준시험 결과를 바탕으로 평면에 대한 정적 강도를 ASM Handbook에 따라 계산하였고 체결부 응력집중계수 산출식[2]을 바탕으로 시험결과와 비교 및 검증하였다. 또한, 유한요소 모델의 해석결과에 대하여 응력집중계수를 형상학적 인자인 폭, 가장자리 거리에 대하여 분석하였다. 유한요소 모델 별 결과와 시험 결과를 비교함으로써 응력집중계수 산출식에 대한 적합성을 재확인하였다.

구조시험의 세부적인 절차로서 ASTM D5961 Proc. A, B에 대하여 형상학적 인자인 폭, 가장자리 거리에 대하여 인자를 설정하여 시험편을 구분하였으며, 표준 시험편에 대하여 동일한 시험조건으로 수행 및 시험결과를 산출하였다. 강도계산의 과정에서는 주어진 시험결과를 바탕으로 최대하중에 대하여 인장강도, 베어링 강도를 계산하였으며, 유한요소 해석에서는 표준시험 모델에 대하여 2D, 3D 형상으로 체결부를 모델링하였으며 표준시험 조건과 동일한 경계조건을 설정하였다. 특히 체결부 베어링 하중 조건에 대하여 기 연구된 베어링 응력에 대한 하중 형태를 모사하기 위하여 유한요소 모델을 설정하였으며, 해석 결과와 시험 결과를 베어링 하중 및 응력 분포에 대하여 설정된 모델과 비교하였다.

II. 본 론

2.1 기계적 체결부 강도계산 및 시험결과

2.1.1 베어링강도 및 응력집중계수

복합재료 기계적 체결부의 강도계산은 기본적인

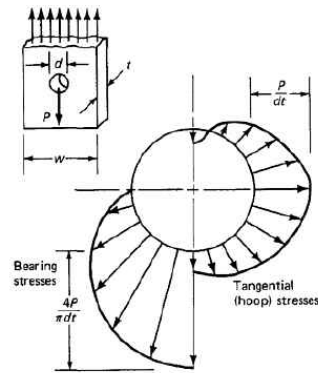


Fig. 1. Bearing, tangential stresses at bolt hole

인 베어링 강도식을 기반으로 산출할 수 있으며, 체결재 접촉면에 대한 응력분포는 접촉면에 수직인 베어링 응력과 접축응력(tangential(hoop) stress)로 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다[1]. 여기에서 체결재 접촉면의 최대 응력은 공칭 베어링 강도값보다 식(3)과 같이 $4/\pi$ 만큼 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다. 그리고 베어링 하중에 의한 응력 분포는 다시 모재의 홀을 제외한 평균 인장응력으로 식(1)과 같이 다시 계산할 수 있다. 여기서 기계적 체결부의 파손강도는 크게 베어링 파손에 의한 베어링 강도와 모재의 파손 형상에 따른 파손 강도를 식(1), (2)와 같이 계산할 수 있다.

기계적 체결부 모재의 파손은 일반적으로 원공 주변의 응력집중 현상으로 모재의 인장강도 값보다 낮은 강도값에서 파손된다.

$$\sigma_{nd} = \frac{P}{(W-d)t} \tag{1}$$

$$\sigma_{br} = \frac{P}{dt} \tag{2}$$

$$\sigma_{bearing}^{ult} = \frac{4P}{\pi dt} \tag{3}$$

복합재료 기계적 체결부의 응력집중계수는 일반적으로 실험식에 근거하여 식(5)와 같이 산출되는데[1] 이론적 응력집중계수와 인자인 폭(W), 체결재 직경(D), 가장자리 거리(e)와 재료에 의한 인자인 적층패턴이 추가적으로 포함된다. 식(5)에서 K_{tc} 는 기계적 체결부 모재에 대하여 0°방향의 섬유 함유량 계수 C와 K_{te} 를 기반으로 산출되며, 식(4)에서 체결부 최대 인장강도에 대한 응력집중계수로 적용된다.

식(6)에 있는 K_{te} 는 폭(W), 직경(D)에 대하여 베어링 하중을 받는 응력집중계수이며 식(7)에서

가장자리 거리 대비 폭의 비로 산출된다.

$$F_{tu} = K_{tc} \frac{P}{(W-d)t} \quad (4)$$

$$K_{tc} = 1 + C(K_{te} - 1) \quad (5)$$

$C \approx$ Correlation factor (%0° plies)

$$K_{te} = \frac{W}{D} + \frac{D}{W} + 0.5(1 - \frac{D}{W})\theta \approx \frac{W}{D} + \frac{D}{W} \quad (6)$$

$$\theta = (\frac{W}{e} - 1) \text{ if } e/W \leq 1, \theta = 0 \text{ if } e/W \geq 1 \quad (7)$$

2.1.2 기계적 체결부 표준시험

복합재료 기계적 체결부에 대하여 이론적·실험적 응력집중계수와 체결부 형상학적인자 e/D, W/D에 대한 영향을 확인하기 위하여 Table 1과 같이 실험인자를 설정하였고 표준시험 절차인 ASTM D5961 Proc. A, B[5]에 따라 진행하였다. 시험에 사용된 복합재료의 적층패턴은 주 구조물 체결부에 추천되는 준 등방성 패턴[0/±45/90]_{2S}을 선정하였고 오토클레이브를 사용하여 적층판을 성형한 후, 홀 가공 및 체결재 결합을 통하여 Proc. A, B시편을 각각 제작하였다. 또한, 기본 기계적 물성은 ASTM D3039, ASTM D3518, ASTM D6641, 그리고 ASTM D2344에 따른 시험을 통해 획득하였다. Fig. 2는 ASTM D5961 Proc. A(Double lap joint)의 시험이며, Fig. 3은 D(Double lap shear)_5.5(W/D)_3(e/D) 시편에 대한 베어링 응력-변형률 선도이다. Fig. 4는 시험 후 시편 형상으로 베어링 파손을 나타낸다.

Table 1에서 설정된 형상인자 e/D, W/D에 대한 이중 겹침 시험의 베어링 강도 결과를 Table 2에 나타내었다.

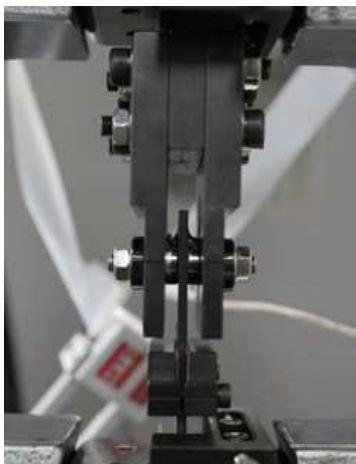


Fig. 2. Double lap joint test

Table 1. Joint test factor and level

Factors	Details	Level
Type	Double/Single Lap Joint	2
e/D	1.25, 1.5, 2.0, 3.0	4
W/D	2.0, 2.5 3.0, 4.0, 5.5	5

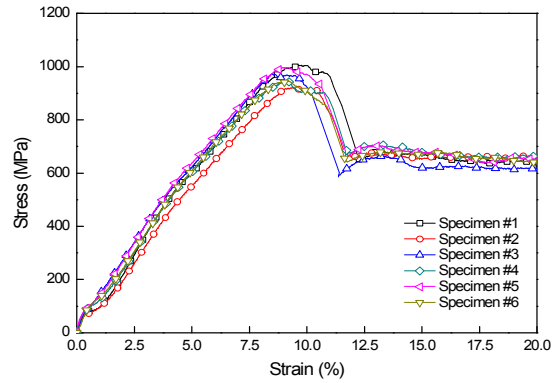


Fig. 3. Bearing stress-strain curves for double lap joint test

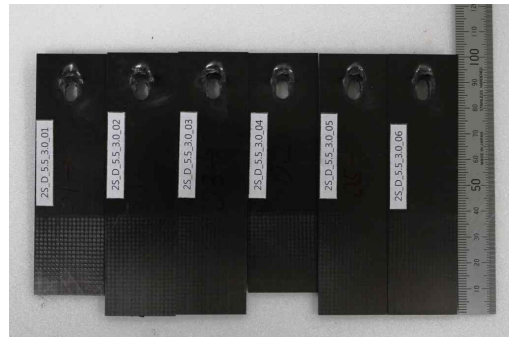


Fig. 4. Bearing failure modes of double lap joints

Table 2. Double lap joint test result

Material	Code ¹⁾	Result ²⁾ (MPa)	Failure (mode)
[0/±45/90] _{2S}	D_3_1.25	631.7	Cleavage
	D_3_1.5	793.3	Cleavage
	D_3_2	854.4	Net-tension
	D_3_2.5	906.8	Net-tension
	D_3_3	905.9	Net-tension
	D_2.5_3	758.2	Net-tension
	D_4_3	935.9	Bearing
	D_5_3	951.0	Bearing
	D_5.5_3	963.1	Bearing

- 1) D(Double lap shear)_X(W/D)_X(e/D)
- 2) Ultimate bearing strength



Fig. 5. Unstabilized single lap joint test

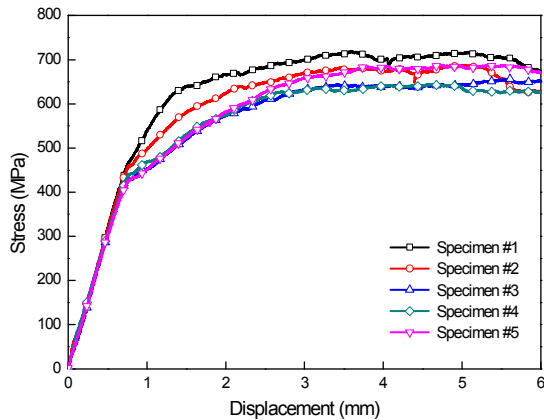


Fig. 6. Bearing strength-displacement curve

Figure 5는 ASTM D5961 Proc. B(unstabilized single lap joint test) 시험이며, Fig. 6은 S(Single)_5.5(W/D)_3(e/D) 시편에 대한 베어링 강도에 대한 변위 선도이다.

Table 1에서 설정된 형상인자 e/D, W/D에 대한 단일 겹침 시험의 베어링 강도 결과는 Table 3에 나타내었다.

2.1.3 기계적 체결부 응력집중계수 분석

선형 등방성 재료에 대한 이론적 응력집중계수를 참고문헌[1]을 통하여 계산하였고 또한 복합재료 기계적 체결부에 대한 응력집중계수(S.C.F)를 참고문헌[2]에 따라 산출하였다. 그리고 실험적 응력 집중계수 K_{tn} , K_{tb} 를 식(8)과 같이 각각 정의하고 Table 4에 결과를 나타내었다.

$$K_{tn} = \frac{\sigma_{tensile}^{ult}}{\sigma_{nd}}, K_{tb} = \frac{\sigma_{bearing}^{ult}}{\sigma_{br}} \quad (8)$$

Table 4의 결과에서 볼 수 있듯이 참고문헌[1]에서 식(5)에 따라 산출된 이론적 응력집중계수

K_{tc} 와 실험적 응력집중계수 K_{tn} 은 잘 일치함을 확인할 수 있다.

Figure 7과 Figure 8은 형상학적 인자(e/D, W/D)의 변화에 따른 이론 및 실험에 의한 응력 집중계수의 변화를 나타낸 것이다.

Table 3. Unstabilized single lap joint test results

Material	Code ³⁾	Result ⁴⁾ (MPa)	Failure (mode)
[0/±45/90] _{2S}	S_3_1.25	631.7	Cleavage
	S_3_1.5	793.3	Cleavage
	S_3_2	854.4	Net-tension
	S_3_2.5	906.8	Net-tension
	S_3_3	905.9	Net-tension
	S_2.5_3	758.2	Net-tension
	S_4_3	935.9	Bearing
	S_5_3	951.0	Bearing
	S_5.5_3	963.1	Bearing

3) S(Single lap shear)_X(W/D)_X(e/D)

4) Ultimate bearing strength

Table 4. S.C.F on double lap joint test

Specimen	ASM		Test	
	K_{tc}	K_{tc}	K_{tn}	K_{tb}
Al_D_6_3	6.7	-	2.1	0.7
Al_D_4_3	4.4	-	1.2	0.7
2S_D_3_1.25	3.4	1.6	2.1	1.5
2S_D_3_1.5	3.4	1.6	1.7	1.2
2S_D_3_2	3.4	1.6	1.6	1.1
2S_D_3_2.5	3.4	1.6	1.5	1.0
2S_D_3_3	3.4	1.6	1.5	1.0
2S_D_4_3	4.4	1.8	2.1	1.0
2S_D_5_3	5.5	2.1	2.8	1.0
2S_D_5.5_3	6.0	2.3	3.1	1.0
2S_D_2.5_3	2.9	1.5	1.3	1.3

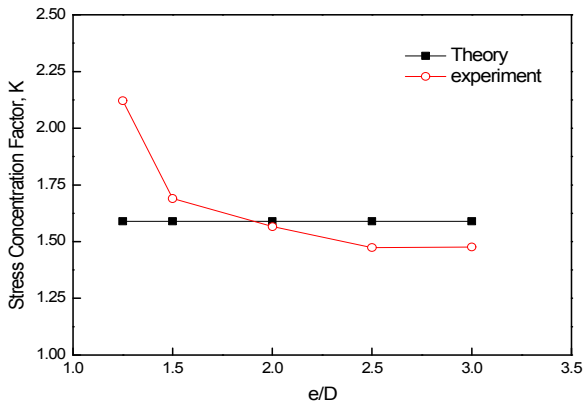


Fig. 7. K-e/D curve

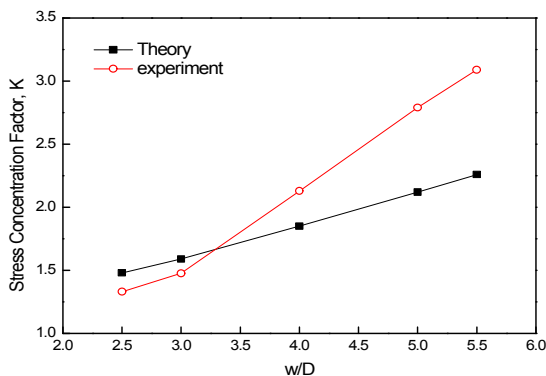


Fig. 8. K-W/D curve

Table 5. Comparison of S.C.F by joining method(double and single lap)

Specimen	D		S		$\frac{K_{tn}^{Double}}{K_{tn}^{Single}}$
	K_{tn}	K_{tb}	K_{tn}	K_{tb}	
2S_X_3_1.25	2.1	1.5	2.6	1.8	1.2
2S_X_3_1.5	1.7	1.2	2.3	1.7	1.4
2S_X_3_2	1.6	1.1	2.4	1.7	1.5
2S_X_3_2.5	1.5	1.0	2.2	1.6	1.5
2S_X_3_3	1.5	1.0	2.2	1.6	1.5
2S_X_4_3	2.1	1.0	3.2	1.5	1.5
2S_X_5_3	2.8	1.0	3.8	1.4	1.4
2S_X_5.5_3	3.1	1.0	4.4	1.4	1.4
2S_X_2.5_3	1.3	1.3	2.0	1.9	1.5

그리고 Table 5는 복합재료 기계적 체결부 체결 방식(Double/Single lap Joining)에 따른 실험적 응력집중계수 결과값을 서로 비교한 결과를 나타낸 것이며 동일한 조건에 대하여 단일 겹침에 의한 체결강도가 이중 겹침에 의한 체결강도에 비해 일정하게 베어링 체결강도가 저하됨을 알 수 있다. 이는 각 시험편에 전달되는 주 하중과 시험편 두께에 따른 모멘트 발생이 복합적으로 일어나기 때문이다.

2.1.4 기계적 체결부 유한요소 해석

복합재료 적층판 기계적 체결부의 유한요소 해석은 실험 결과를 기반으로 하여 다양한 패턴에 대하여 파손강도 및 모드를 예측할 수 있다.[4] 본 연구에서는 다수의 체결재가 적용되는 복합재료 항공기 구조물의 해석에 있어 체결재를 3차원으로 직접 모델링하지 않고 해석에 적용할 수 있는 간략한 모델[6]들을 Table 6, Fig. 9와 같이 설정하고 앞서 실시된 체결부 실험결과, 최대 베어링 강도값을 비교함으로써 FEM 모델에 따른 실험결과와의 차이를 비교하였다.

Patran/Nastran을 이용한 각각의 모델에 대한 유한요소 해석결과를 Fig. 10에 나타내었다. 각각의 모델에 따라 최대 응력과 최대 응력 발생위치가 각기 다르게 나타남을 확인할 수 있다. 각 모델에 대한 해석, 실험 및 이론적 계산에 의한 결과를 Table 7에 나타내었다.

Table 6. FEM models for double lap joint

Model	Details
A	2D 모델 생성 및 선형해석 강체 요소(RBE Element)를 이용하여 집중 하중을 홀 가장자리로 하중전달
B	2D 모델 생성 및 선형해석 체결부 홀 가장자리 코사인 함수 형태의 하중전달[3]
C	2D 모델 생성 및 비선형 해석 강체 체결재와 홀 가장자리 접촉을 이용한 홀 가장자리 베어링 하중 전달
D	3D 모델 생성 및 비선형해석 강체 체결재와 홀 가장자리 접촉을 이용한 홀 가장자리 베어링 하중전달

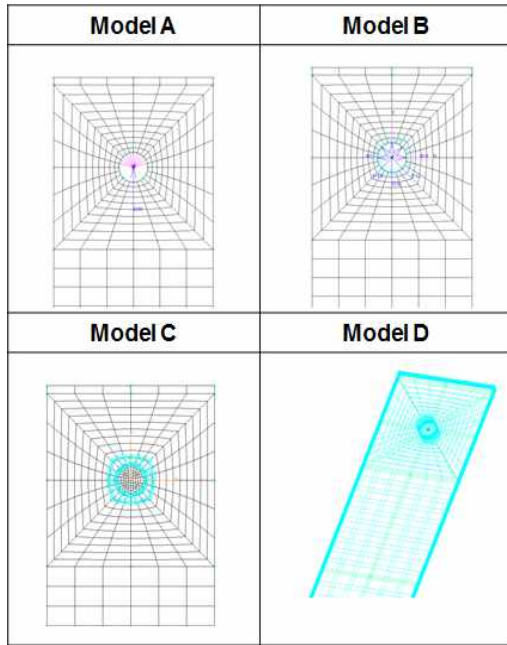


Fig. 9. FEM modeling of double lap joint

Table 7. Comparison of ultimate bearing strength and failure mode

	Test	Eq(3)	FEM Model			
			A	B	C	D
$\sigma_{bearing}^{ult}$	952	1212	2320	1390	2370	1710
Failure	B	-	N.T.	B	B	C

N.T. : Net-tension, B : Bearing, C : Cleavage

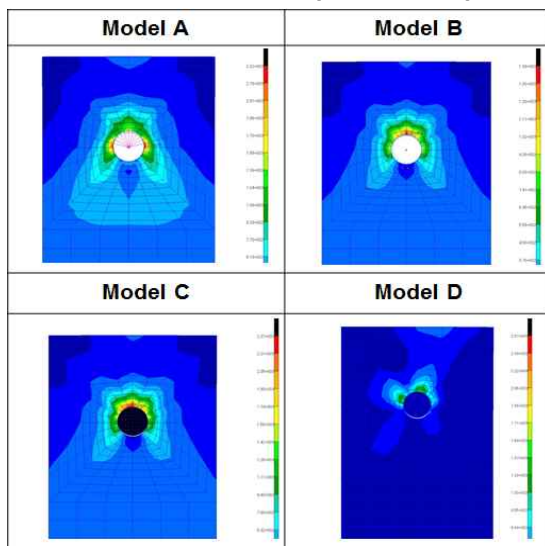


Fig. 10. Results of finite element analysis by models

특성길이(characteristic length)에 따른 파손 예측을 참조하면 Fig. 10에서 모델 A의 경우 최대

응력값의 발생 각도가 90° 즉, Net-tension 파손, 모델 B, C의 경우 0° Bearing 파손, 모델 D의 경우 Cleavage 파손을 예상할 수 있는 위치에서 최대 응력값이 나타났다[7,8].

실제 시험에서 발생한 파손은 Bearing 파손으로 모델 B, C가 유사한 응력분포, 파손형태를 나타냈다. 그리고 모델 C, D의 경우 강체로 가정된 체결재와 적층판 홀 가장자리 접촉에 의한 접촉 응력이 고려되어 이론 계산값보다 큰 응력값이 홀 가장자리에 나타났다. 모델 B[3]에서 코사인 형태의 하중전달은 실제 시험편 파손형태 그리고 이론적 계산 최대 응력값과 15%차이로 유사하게 나타났다.

III. 결 론

복합재료 기계적 체결부에 대하여 ASM Handbook에 제시된 복합재료 적층판 기계적 체결부에 대하여 응력집중계수를 산출하고 표준 시험절차(ASTM)에 따른 시험결과와 비교 시 매우 적합한 결과를 얻었을 수 있었다. 그리고 일반적인 형상변수인 폭, 가장자리 거리에 대하여 응력집중계수를 산출함에 있어 ASM Handbook에 제시된 응력집중계수 산출식은 적합한 결과를 나타내었다. 추가적으로 체결방식에 따른 체결 강도 차이를 각각의 응력집중계수로 서로 비교한 결과 동일한 조건에 대하여 일정한 강도 차이를 확인하였다. 표준시험 결과에 대하여 유한요소 해석에서 효율성을 높일 수 있는 간략화된 4가지 유한요소 모델에 대하여 해석 결과값을 시험값과 비교 시 설정된 모델 B 즉, 코사인 함수 형태의 하중 전달 모델이 시험 결과를 잘 반영할 수 있음을 확인하였다. 이는 향후 다수의 체결재가 체결된 복합재료 구조물을 해석 시 주어진 재료에 대하여 간략화된 모델을 적용할 경우 해석의 효율성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 향후 추가적으로 동일한 재료에 대하여 각 적층 패턴별 결과에 대한 검증, 다른 재료에 대한 적용검증, 전체 파손형상에 대한 점진적 파손해석 및 비교 검증을 통하여 좀 더 일반화될 필요가 있다.

References

- 1) ASM Handbook Vol. 21 pp. 281-284
- 2) W. D. Pilkey, D. F. Pilkey, "Peterson's Stress Concentration Factor", 3rd Ed., John Wiley & Sons, 2008, pp. 233

- 3) F. K. Chang, R. A. Scott, G. S. Springer, "Strength of Mechanically Fastened Composite Joints" *Journal of Composite Materials*, Vol. 16, 1982. pp. 470~494
- 4) F. K. Chang, R. A. Scott, G. S. Springer, "Failure of Composite Laminates Containing Pin Loaded Holes-Method of Solution" *Journal of Composite Materials*, Vol. 18, 1984, pp. 255~278
- 5) ASTM D 5961-08, "Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates" *Annual Book of ASTM Standard*, 2008.
- 6) F. L. Matthews, G.A.O. Davies, D. Hitchings, C. Soutis, "Finite Element Modeling of Composite Materials and Structures" *CRC Press*. pp.183~193
- 7) A. Aktas, H. Imrek, Y. Cunedioğlu, "Experimental and numerical failure analysis of pinned-joints in composite materials" *Composite Structures* Vol. 89, 2009, pp.459~466
- 8) H. S. Ahn, J. H. Kweon, J. H. Choi, "A New Method to Determine the Characteristic Lengths for the Failure Analysis of Composite Joint" *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 16, 2003, pp. 10-21.