

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(1), 21-29(2017)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.1.21

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

복합재료 적층판 기계적 체결부 파손시험 및 점진적 파손해석에 대한 연구

권정식*, 김진성**, 양용만**, 이수용***

A Study for Failure Test and Progressive Failure Analysis on Composite Laminates Mechanical Joint

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

Department of Aerospace & Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

ABSTRACT

In this paper, the total procedure for composite laminate mechanical joint (ASTM D5961 Proc. A, B) from fixture design to test analysis was showed. Composite laminate mechanical joints were analyzed using the FEM(Finite Element Method) and compared to test results. A progressive failure analysis was applied to FEM to analyze the failure behavior of test specimens. Three failure theories - maximum stress, maximum strain, and Tsai-Wu were applied to FEM to predict test failure load. General parameters for composite laminate joints were reviewed and the differences of bearing strength were compared with major parameters.

초 록

복합재료 적층판 기계적 체결부(ASTM D5961 Proc. A, B)에 대하여 치구 설계에서 시험 결과의 해석까지 전체 과정을 제시하였다. 복합재료 적층판 기계적 체결부를 유한요소법을 사용하여 분석하였으며 시험 결과와 비교하였다. 시험편의 파손 거동을 분석하기 위해 점진적 파손해석 방법을 유한요소법에 적용하였다. 시험 파손 하중을 예측하기 위해 3가지 파손이론(최대 응력, 최대 변형률, Tsai-Wu)을 FEM에 적용하였다. 기계적 체결부의 일반적인 변수들을 검토하였으며 주요 변수에 대하여 베어링 강도 차이를 비교하였다.

Key Words : ASTM D5961, Mechanical Joint(기계적 결합), Fixture Design(치구 설계), FEM(유한요소법), Nonlinear Analysis(비선형 해석), Progressive Failure Analysis(점진적 파손해석), Composite Failure Theory(복합재 파손이론)

1. 서 론

복합재료 적층판의 기계적 체결부는 체결 방식에 따라 분류 및 정의되는데 겹침 결합은 일반적

으로 평면 내에서 단일 또는 이중 겹침 결합으로 정의된다. 이 때 주요 하중은 패스너의 전단 하중을 통하여 전달된다. Pull-through 결합 방식에서 주요 하중은 평면 내 수직방향으로 패스너의

† Received : September 26, 2016 Revised : December 18, 2016 Accepted : December 20, 2016

* Corresponding author, E-mail : youngaircraft@gmail.com

인장하중을 통하여 전달된다. 복합재료 기계적 체결부에 대한 표준시험은 ASTM D5961[1], D7332[2]에 각각 정의되며 기계적 체결부를 해석하기 위해서는 체결방식, 체결부 치수, 패스너 종류, 체결 토크 등이 적층판 자체의 형상변수[3]와 함께 주요 변수로 고려된다. 복합재료 체결부 해석을 위해 다양한 시험·해석적 방법이 연구되었는데 대표적으로 Chang은 패스너 접촉부에 대하여 분포 하중 조건을 제시하였고[4] 특성곡선 (Characteristic Curve)을 이용한 파손 예측모델을 제시하였다[5,6]. 특성곡선을 산출하기 위해서는 Open-hole 및 베어링 압축시험을 추가로 수행 및 분석하여야 한다.

본 논문에서는 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), CYCOM 5276-1, UD(Unidirectional) Prepreg가 적용된 적층판 기계적 체결부 시험 ASTM D5961 Proc. A, B에 대하여 상세한 치구 설계 모델을 제시, 시험 결과에 대한 분석, 점진적 파손해석 및 적층판 파손이론을 이용한 유한요소법, 상세한 2D, 3D FEM 모델을 제시하여 시험 설계 - 결과 예측 - 시험 결과의 비교·분석에 대하여 전체 과정을 검토하고자 한다.

II. 본 론

2.1 표준시험

2.1.1 시험치구 및 변수

ASTM D5961에서는 복합재료 기계적 체결부 베어링 거동에 대한 표준시험을 절차 A, B로 정의하며 시험편 체결방식 및 시험 경계조건에 따라 별도의 시험치구를 적용한다.

절차 A(Double Shear Test)와 시험 주요 변수인 패스너 체결 토크, 베어링 변형률을 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 시험치구를 설계하였으며 Fig. 2와 같이 적용하였다. 패스너 체결 토크는 토크 부싱 및 와셔를 통하여 시험편에 전달할 수 있다. 절차 B(Unstabilized Single Shear Test)를 수행하기 위해 Fig. 3과 같이 베어링 변형률을 측정하기 위한 보조 치구를 적용하였다[7]. 하중, 변형률, 변위는 MTS 810 시험기를 통하여 측정하였으며 시험 결과 및 분석에 사용되는 주요 변수에 대한 정의는 아래와 같다.

P_{max} = 최대 시험/해석 하중

ϵ_{br} = 베어링 변형률

F_{bru} = 최대 베어링 강도

o_{br} = 베어링 강도

δ = 시험/해석 변위

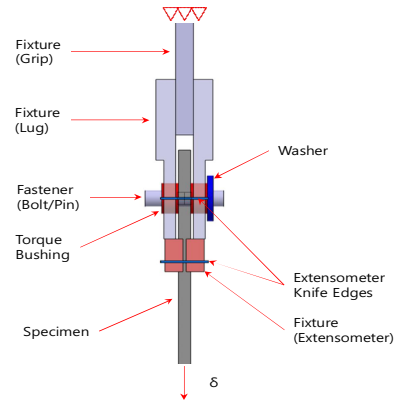


Fig. 1. ASTM D5961 Proc. A Design



Fig. 2. ASTM D5961 Proc. A test



Fig. 3. ASTM D5961 Proc. B test

2.1.2 시험구성 및 결과

복합재료 적층판의 강도변화, 체결방식 그리고 패스너 종류와 같은 주요 변수에 대하여 베어링 강도를 평가하기 위해 Table 1과 같이 시험 계획을 구성하였으며, 개별 시험편의 정보는 Table 1에서 Test ID로 표시하였다. 체결에 사용된 패스너 정보 및 물성은 Table 2와 같다.

각 시험편에 대한 시험 결과는 3가지 파손모

Table 1. Test matrix and test IDs

Joint Type	Fastener	Stacking Sequence No. and Plies ¹⁾		Test ID ²⁾	
Double Shear / Single Shear (Unstabilized)	Bolt / Hi-lok	01	[45/90/-45/0/-45/45/90/0/90/-45]s	DS01-BF, BH	USS01-BF, HH
		02	[45/90/-45/0/-45/45/90/0/45/-45]s	DS02-BF, BH	USS02-BF, HH
		03	[45/90/-45/0/-45/45/0/45/-45/45]s	DS03-BF, BH	USS03-BF, HH
		04	[45/90/-45/0/90/0/-45/45]s	DS04-BF, BH	USS04-BF, HH
		05	[45/90/-45/0/90/0/-45/90/45/0]s	DS05-BF, BH	USS05-BF, HH
		06	[45/90/-45/0/-45/45/0/45/-45/0]s	DS06-BF, BH	USS06-BF, HH
		07	[45/90/-45/0/90/0/-45/0/45/0]s	DS07-BF, BH	USS07-BF, HH
		08	[45/90/-45/0/0/0/-45/0/45/0]s	DS08-BF, BH	USS08-BF, HH
1) Plies : 1 ply = 0.19 mm (0.0075 inch)					
2) TEST ID : XX XX - XX - XX					
XX(X) :		Joint Type, DS(Double Shear), USS(Unstabilized Single Shear)			
XX :		Stacking Sequence No. 01([45/90/-45/0/-45/45/90/0/90/-45]s)			
X :		Fastener, B(Bolt), H(Hi-lok)			
X :		Fastening Torque, F(Full), H(Half)			
-XX :		Specimen Number			

Table 2. Fasteners and Allowable Loads[8]

Fastener	Nut(Collar)	Dia.(Inch)	Strength(MPa)	Allowable Load(kN)
Bolt(NAS6804)	Nut(MS35650)	6.35 mm (0.25)	1103 (Ftu)	34.9 (Tension)
Hi-lok(HL12V8)	HL97	6.35 mm (0.25)	653 (Fs), 817 (Ftu)	20.7 (Shear), 25.9 (Tension)

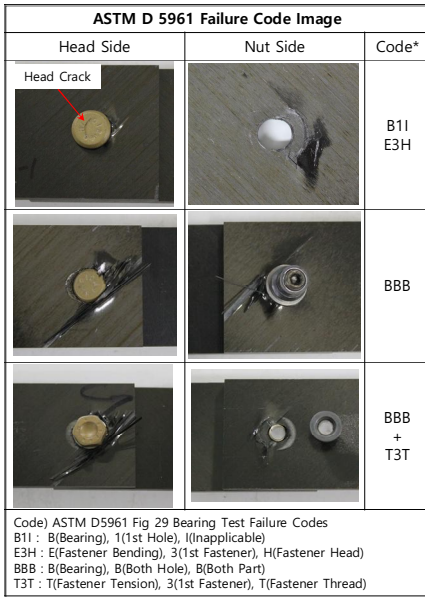


Fig. 4. ASTM D5961 Failure Code

드 (단일 적층판 베어링 파손, 양쪽 적층판 베어링 파손, 적층판 베어링 파손 및 패스너 복합파손)로 분류되어 나타났으며 ASTM D5961 11.5에 따라 구분된 3자리 파손코드와 이미지는 Fig. 4와 같다.

Table 1에 설정된 각각의 시험편에 대하여 시험 최대하중, 베어링 강도 그리고 파손코드를

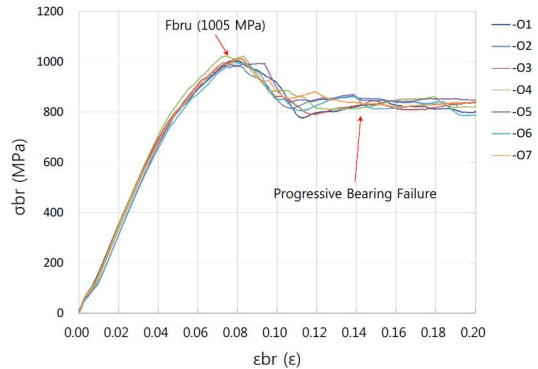


Fig. 5. DS01-BF results (B11)

Table 3에 나타내었다.

DS(Double Shear) Test의 결과는 모든 적층패턴에 대하여 베어링 파손(B11)으로 나타났으며 파손 특성은 Fig. 5에서와 같이 최대 베어링 강도에서 파손 후 점진적 베어링 파손이 진행되었다.

USS(Unstabilized Single Shear) Test의 결과는 양쪽 적층판 베어링 파손(BBB) 또는 적층판 베어링 파손 및 패스너 복합파손(BBB+T3T) 2가지로 나타났다.

코드 BBB 파손 특성은 Fig. 6에서와 같이 초기 베어링 파손 후 최대 베어링 강도까지 점진적으로 진행되었다. 코드 BBB+T3T 파손 특성은 Fig. 7에서와 같이 초기 베어링 파손 후 점진적

파손 진행 중 Table 2에서 제시된 값보다 낮은 하중에서 패스너가 파손되었다. 이는 패스너에 전달되는 전단 및 인장 복합하중에 의해 패스너가 파손되었다. 특히 패스너 헤드 크랙(Head Crack)과 그립(Grip)과 나사산의 경계부 파손은 패스너에 작용하는 복합하중에 의해 양쪽 끝단에

작용하는 굽힘모멘트에 의해 파손되었다[9].

체결 타입에 따른 베어링 강도 차이는 동일한 패스너로 체결된 각 적층판에 대하여 Double Shear Test가 Unstabilized Single Shear Test 보다 10%이상 높은 베어링 강도가 나타남을 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 이는 단일 겹침 결합에서

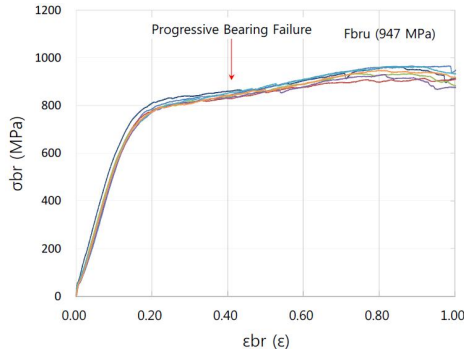


Fig. 6. USS03-BF results (BBB)

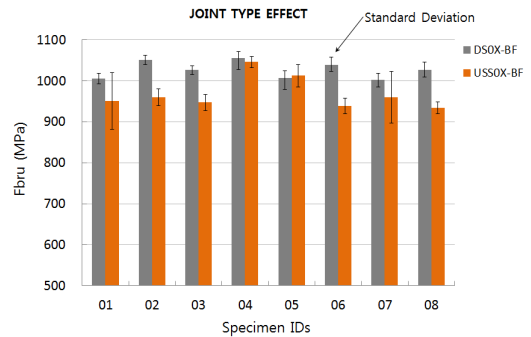


Fig. 8. Joint Type Effect for Fbru

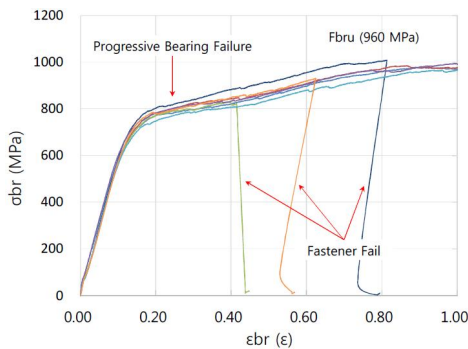


Fig. 7. USS07-BF results (BBB+T3T)

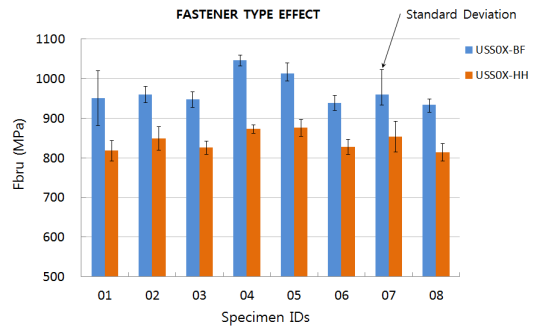


Fig. 9. Fastener Type Effect for Fbru

Table 3. Test matrix and test results

Test ID	Pmax(kN)	Fbru(MPa)	Failure Code	Test ID	Pmax(kN)	Fbru(MPa)	Failure Code
DS01-BF	23.6	1005	B11	USS01-BF	22.1	950	BBB+T3T
DS01-BH	23.6	1011	B11	USS01-HH	19.5	818	BBB+E3H
DS02-BF	24.8	1051	B11	USS02-BF	22.3	960	BBB
DS02-BH	24.3	1039	B11	USS02-HH	19.9	849	BBB
DS03-BF	24.7	1027	B11	USS03-BF	22.0	947	BBB
DS03-BH	24.6	1045	B11	USS03-HH	19.9	826	BBB
DS04-BF	18.8	1056	B11	USS04-BF	20.1	1046	BBB
DS04-BH	19.9	1028	B11	USS04-HH	17.0	873	BBB
DS05-BF	23.9	1007	B11	USS05-BF	23.5	1013	BBB
DS05-BH	23.8	989	B11	USS05-HH	20.7	876	BBB+T3T
DS06-BF	24.9	1039	B11	USS06-BF	21.9	938	BBB
DS06-BH	25.2	1033	B11	USS06-HH	19.6	828	BBB+E3H
DS07-BF	24.1	1002	B11	USS07-BF	22.7	960	BBB+T3T
DS07-BH	24.6	1048	B11	USS07-HH	21.1	854	BBB+E3H
DS08-BF	25.1	1027	B11	USS08-BF	22.1	934	BBB
DS08-BH	25.2	1084	B11	USS08-HH	19.1	813	BBB

패스너 및 시험편에 작용하는 복합하중에 의해 이중 겹침 결함보다 낮은 하중에서 적층판 또는 패스너가 파손되기 때문이다.

Figure 9에서는 볼트(Bolt)로 체결된 체결부가 하이록(Hi-lok)으로 체결된 체결부보다 20% 이상 높은 베어링 강도가 나타났고 이는 Table 2에 나타나 있듯이 볼트의 높은 인장강도 때문이다.

2.1.3 유한요소 모델링 및 해석

적층판 기계적 체결부의 해석을 위해 체결방식(Double/Single Shear)에 따른 FEM(Finite Element Method) 모델을 시험 경계(L/BCs, Load and Boundary Conditions)조건을 반영하여 Fig. 10~13과 같이 구성하였다.

2D FEM 모델은 시험치구와 패스너를 RBE(Rigid Body Element) 요소를 이용하여 시험 전체 모델을 구성하였으며, 3D FEM 모델은 시험편 및 패스너 접촉조건(Contact Condition)을 적용하여 구성하였다[10,11].

Double Shear Test 해석을 위한 2D, 3D FEM 모델은 Fig. 10, 11과 같고 Unstabilized Single Shear Test 해석을 위한 2D, 3D FEM 모델은 Fig. 12, 13과 같다[12,13].

해석에 사용된 라미나(Lamina)의 기계적 물성은 Table 4에 나타나 있으며, 체결부 해석을 위해 MSC Patran/Nastran Sol. 400 비선형 해석기법이 적용되었다[14]. 최대 체결 강도를 예측 및 비교하기 위해 주요 적층판 파손이론(Max.

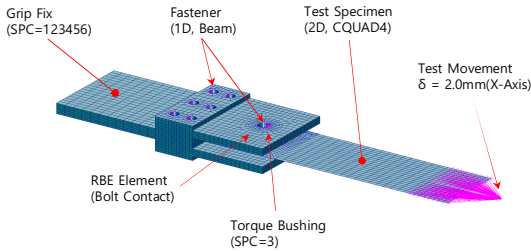


Fig. 10. DS 2D Element Modeling, L/BCs

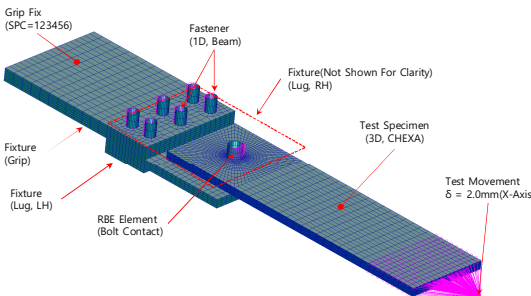


Fig. 11. DS 3D Element Modeling, L/BCs

Stress, Max. Strain, Tsai-Wu)과 점진적 파손해석(Progressive Failure Analysis, PFA) 기법을 이용하여 파손해석을 수행하였다. 시험편 파손 특성을 고려하여 Immediate/Gradual 물성저하 모델을 PFA에 각각 적용하였다.

Figure 5~7에서 제시된 주요 시험 결과와 비교하기 위해 DS01-BF 시험편의 2D, 3D FEM 해석 결과를 Fig. 14, 15에 각각 전체 파손지수(Failure Index)로 나타냈으며 Fig. 4의 베어링 파손(B1I) 이미지와 비교 시 파손 영역이 유사함을 확인할

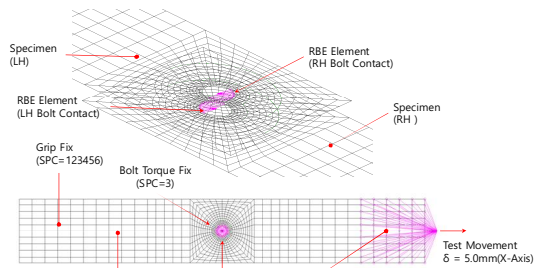


Fig. 12. USS 2D Element Modeling, L/BCs

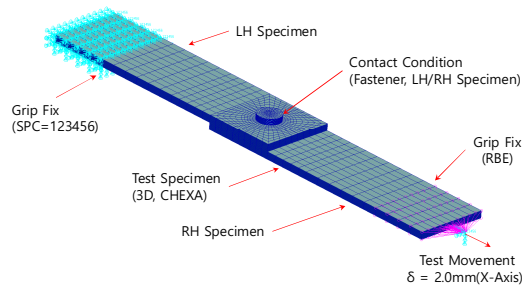


Fig. 13. USS 3D Element Modeling, L/BCs

Table 4. Lamina Properties

Property	Value	Unit
E11	130.5	GPa
E22	9.11	GPa
E33	9.11	GPa
ν12	0.33	
G12	5.06	GPa
G23	3.54	GPa
G31	5.06	GPa
Xt	2298	MPa
Xc	1373	MPa
Yt	72.7	MPa
Yc	234.7	MPa
τ12	110.0	MPa
ε1t	0.015	
ε1c	0.010	
ε2t	0.008	
ε2c	0.025	
γ12	0.025	

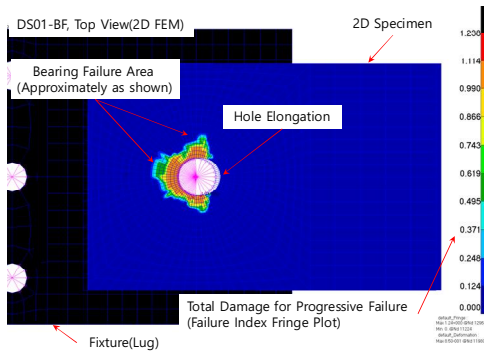


Fig. 14. DS01-BF 2D Analysis Result

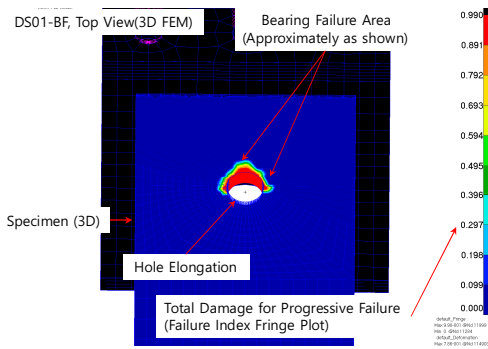


Fig. 15. DS01-BF 3D Analysis Result

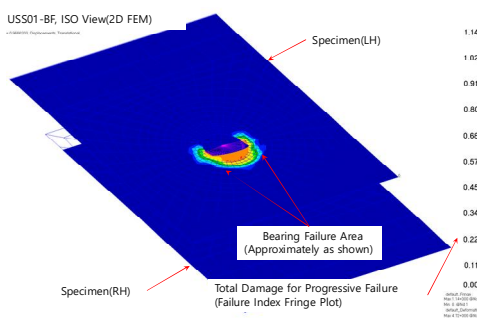


Fig. 16. USS01-BF 2D Analysis Result

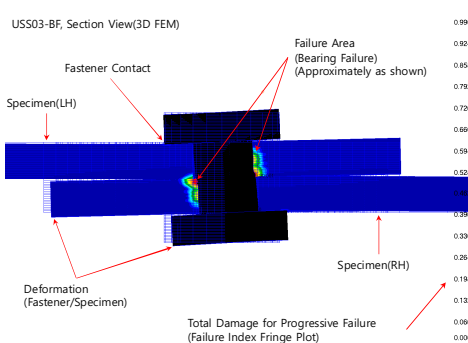


Fig. 17. USS03-BF 3D Analysis Result

수 있다.

USS01-BF, USS03-BF 시험편의 2D, 3D FEM 해석 결과를 Fig. 16, 17에 각각 전체 파손지수로 나타냈으며 Fig. 4의 베어링 파손(BBB) 이미지와 비교 시 파손 영역이 유사함을 확인 할 수 있다.

2.1.4 시험 및 FEM 결과 분석

Test 시 시험치구의 변형을 포함하여 FEM 해석 결과를 시험 결과에 직접 비교하기 위하여 주요 시험 결과 그래프인 Fig. 4~6을 하중-변위 그래프로 변환[15]하여 시험 각각의 결과와 2D, 3D FEM 결과를 포함하여 Fig. 18~20에 나타내었다.

Double Shear Test, DS01-BF 결과에 대하여 Fig. 10, 11에서 적용된 모델과 Max. Stress/Strain 파손이론을 이용한 FEM 결과는 Fig. 18에서 확인할 수 있듯이 시험 초기부터 Pmax 구간까지는 근접하나 점진적 베어링 파손 구간과는 차이가 발생되었다.

Unstabilized Single Shear Test, USS03-BF, USS07-BF 각각의 결과에 대하여 Fig. 12, 13에서 적용된 적용된 모델과 Max. Stress/Strain 파손이론을 이용한 2D, 3D FEM 결과는 Fig. 19, 20과 같이 Pmax가 초기 구간에서 나타났으며 2D Max. Strain, 3D Max. Stress FEM 결과는 시험 결과와 비교 시 많은 차이가 발생되었다. 이는 Fig. 12, 13, 16, 17의 FEM 모델과 파손 이미지에서 확인할 수 있듯이 베어링 영역의 FEM 요소(Element)들이 평면 내 수직방향으로 작용하는 하중에 의해 해석(PFA) 진행 중 초기에 파손되었고 물성이 저하되었기 때문이다.

적용된 해석모델 및 점진적 파손해석 결과는 전반적으로 Test 전체 구간에 대하여 초기 파손 이후 과도한 점진적 파손 구간에 대하여 차이가 발생되었으며 이는 Fig. 4에서 볼 수 있는 점진적 베어링 파손형상이 FEM에서 구현되지 않았음을 나타낸다.

Table 3의 결과 중 체결토크 전체(Full)가 적용된 시험편에 대하여 적층판 파손이론을 적용한 2D FEM 결과값과, 시험 결과 최대하중, 파손모드를 Table 5에서 종합하여 비교하였다.

3D FEM 결과값은 2D FEM 결과에 대한 상호 비교 검증을 위해 추가로 적용되었다.

Max. Strain 파손 이론을 적용한 FEM 결과 Pmax값이 Max. Stress를 적용한 값보다 낮게 나타났으며 이는 패스너 주변 베어링 영역에서 FEM 요소(Element)들이 Max. Stress를 적용한 결과보다 낮은 하중에서 파손되기 때문이다.

Double Shear Test의 시험하중 및 파손모드에

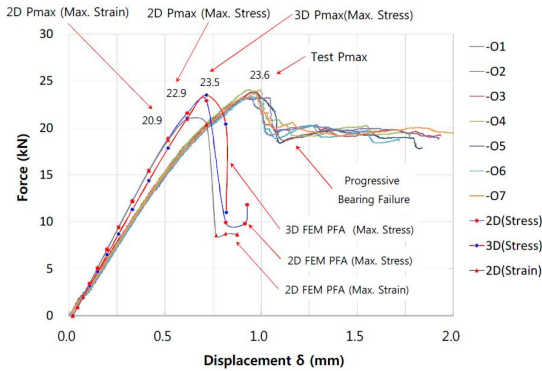


Fig. 18. DS01-BF 2D, 3D FEM Results

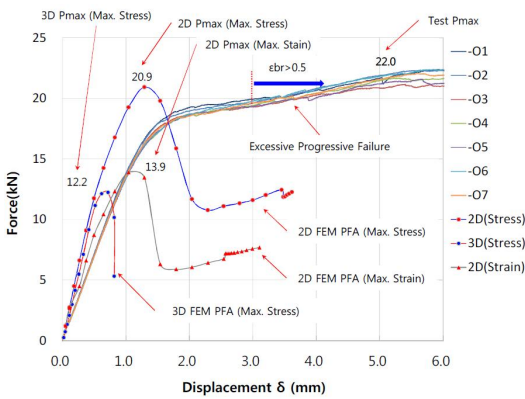


Fig. 19. USS03-BF 2D, 3D FEM Results

대하여 FEM 결과인 Fig. 14, 15, 18, 21과 Table 5의 결과값을 통하여 비교한 결과 동일한 파손모드와 최대하중이 15%(Tsai-Wu 포함 30%) 이내의 상대오차로 확인할 수 있다. 또한 FEM에 적용된 적층판 파손이론 중 Max. Stress, Strain 파손이론의 결과가 상대적으로 시험값에 근접함을 확인할 수 있다.

Unstabilized Single Shear Test의 하중 및 파손모드는 FEM 결과인 Fig. 19, 20, 22와 Table 5를 통하여 최대하중이 30%(Max. Strain, Tasi-Wu 포함 50%)이내의 상대오차로 확인할 수 있다. 상대오차가 Double Shear Test에 비해 큰

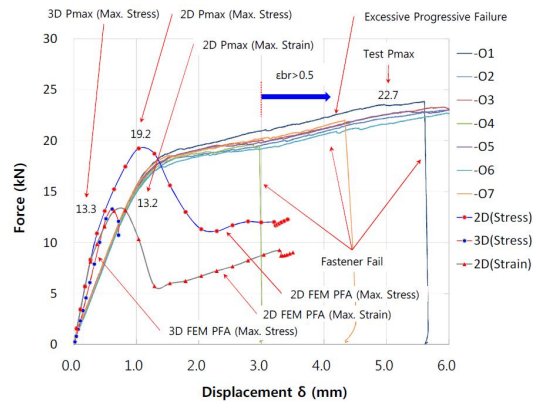


Fig. 20. USS07-BF 2D, 3D FEM Results

Table 5. Test and FEM Results Summary

Test ID	Test Result Pmax (kN),(S.D ¹)	Failure Code	FEM Pmax (kN) by failure theory, (R.E ²), (%)			Note
			Max. Stress	Max. Strain	Tsai-Wu	
DS01-BF	23.6(0.3)	B11	22.9(-3)	20.9(-11)	16.9(-28)	3D Model
			23.5(-1)	19.4(-18)	13.5(-43)	
DS02-BF	24.8(0.3)	B11	22.8(-8)	21.5(-14)	17.9(-28)	
DS03-BF	24.7(0.3)	B11	23.4(-6)	22.5(-9)	18.2(-26)	
DS04-BF	18.8(0.6)	B11	17.9(-4)	17.6(-6)	14.2(-24)	
DS05-BF	23.9(0.3)	B11	21.7(-9)	21.2(-12)	17.4(-27)	
DS06-BF	24.9(0.4)	B11	25.2(1)	23.4(-6)	19.3(-23)	
DS07-BF	24.1(0.4)	B11	23.6(-2)	22.9(-5)	18.8(-22)	
DS08-BF	25.1(0.3)	B11	25.4(1)	24.6(-2)	20.0(-20)	
USS01-BF	22.1(1.6)	BBB+T3T	18.9(-14)	12.6(-43)	10.6(-52)	
USS02-BF	22.3(0.5)	BBB	19.9(-11)	13.1(-41)	10.7(-52)	
USS03-BF	22.0(0.4)	BBB	20.9(-5)	13.9(-37)	10.8(-51)	3D Model
			12.2(-44)	11.7(-47)	11.7(-47)	
USS04-BF	20.1(0.3)	BBB	14.3(-29)	9.4(-53)	7.6(-62)	
USS05-BF	23.5(0.6)	BBB	18.5(-22)	12.3(-48)	10.4(-56)	
USS06-BF	21.9(0.4)	BBB	20.4(-7)	13.8(-37)	10.7(-51)	
USS07-BF	22.7(1.5)	BBB+T3T	19.2(-15)	13.2(-42)	10.5(-54)	3D Model
			13.3(-42)	11.6(-49)	10.5(-54)	
USS08-BF	22.1(0.4)	BBB+T3T	20.3(-8)	11.9(-46)	9.2(-58)	

1) S.D(Standard Deviation), kN

2) R.E(Relative Error, %) : (FEM Pmax - Test Pmax)/Test Pmax

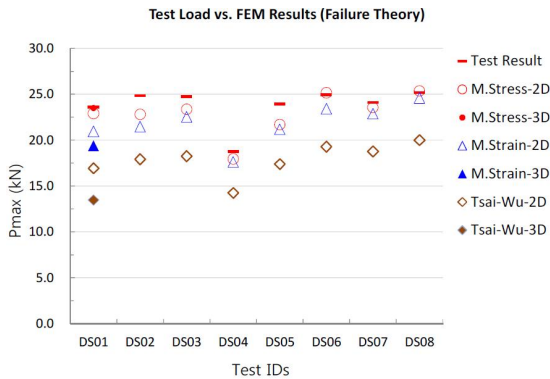


Fig. 21. DS0X-BF FEM & Test Results

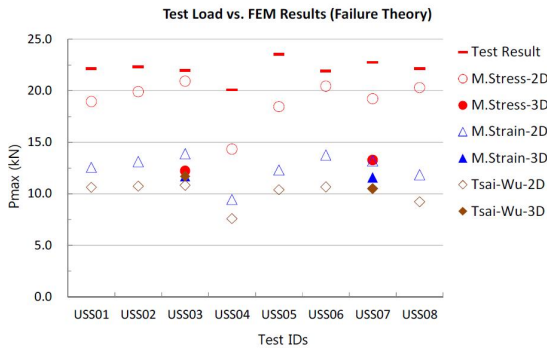


Fig. 22. USS0X-BF FEM & Test Results

이유는 Fig. 4, 6, 7의 파손형상과 그래프 그리고 FEM 결과인 Fig. 19, 20에서 확인할 수 있듯이 초기 베어링 파손이후 시험 종단까지의 과도한 (excessive) 점진적 파손($\epsilon_{br} > 0.5$) 진행과 패스너의 헤드 파손(E3H) 및 나사산부 파손(T3T)에 대하여 FEM으로 구현함에 있어 적용된 해석기법 Sol 400과 PFA의 제한 사항으로 판단된다.

이런 제한 사항을 보완하기 위해서는 과도한 점진적 파손구간에 대하여 적층판 물성저하 모델과 패스너 파손 예측 모델이 함께 PFA에 적용되어야 시험 전체를 구현할 수 있음을 알 수 있다.

III. 결 론

ASTM D5961 표준시험에 대하여 상세 시험기구 설계 - 시험수행 - FEM 모델링 및 해석 - 시험 및 해석 결과 비교 분석과 같은 전체 일련의 과정 및 결과가 제시되었다. Proc. A, B에 대하여 주요 인자를 적용할 수 있는 상세한 시험기구 설계 모델을 제시하고 적용하였다.

시험 결과를 분석하기 위해 2D, 3D FEM 모델

을 제시하였으며, 주요 파손모드에 대하여 점진적 파손해석 기법 및 파손이론을 적용하여 분석하였다.

FEM 결과를 비교 분석한 결과 시험 초기 비선형 구간과 시험 최대 하중을 예측하기는 적합하나 시험 전체 구간의 거동을 점진적 파손해석으로 구현하기에는 제한적이었다.

적용된 FEM 모델 및 해석기법으로 Double Shear Test는 최대 15% 상대오차, Unstabilized Single Shear Test는 최대 30% 상대오차로 비교 및 분석하였다. 해석에 적용된 파손이론은 해석 결과값에 주요한 차이를 나타냈으며 적층판 파손이론 중 Max. Stress, Max. Strain 이론이 Tsai-Wu에 비해 상대적으로 시험 결과와 근접하였다.

본 연구에 적용된 FEM 모델 및 점진적 파손해석 기법은 향후 다른 재료의 복합재료 기계적 체결부를 예측하고 해석하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- 1) ASTM D 5961-08, Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.
- 2) ASTM D 7332-07, Standard Test Method for Measuring the Fastener Pull-through Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite.
- 3) ASM Handbook Vol. 21, pp.692~697.
- 4) Fu-Kuo Chang, Richard A Scott and George S. Springer, "Strength of Mechanically Fastened Composite Joints," Composite Material Journal, July. 1982, pp.470~494.
- 5) Fu-Kuo Chang, Richard A Scott and George S. Springer "Failure of Composite Laminates Containing Pin Loaded Holes-Method of Solution," Composite Material Journal, Vol. 18, May. 1984, pp.255~276.
- 6) Alaattin Aktas, Huseyin Imrek Yusuf Cunedioğlu, "Experimental and numerical failure analysis of pinned-joints in composite materials," Composite Structures, Vol 89, 2009, pp.459~466.
- 7) Marie-Laure Dano, Elhassania Kamal, Guy Gendron, "Analysis of bolted joints in composite laminates: Strain and bearing stiffness predictions," Composite Structures, Vol

79, 2007, pp.562~570.

8) HL12, 97 specifications <http://www.lisi-aerospace.com>

9) Tianling Qin, Libin Zhao, Jianyu Zhang, "Fastener effects on mechanical behaviors of double-lap composite joints," *Composite Structures*, Vol 100, 2013, pp.413~423.

10) M.A. McCarthy, C.T. MaCarthy, V.P. Lawlor, W.F. Stanley, "Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: part I -model development and validation," *Composite Structures*, Vol 71, 2005, pp.140~158.

11) B. Egan, C.T. McCarthy, M.A. McCarthy, P.J. Gray, R.M. Frizzell, "Modelling a single-bolt countersunk composite joint using implicit and explicit finite element analysis," *Computational Materials Science*, Vol 64, 2012,

pp.203~208.

12) Alvaro Olmedo, Carlos Santiuste, "On the prediction of bolted single-lap composite joints," *Composite Structures*, Vol 94, 2012, pp.2110~2117.

13) Kyle C. Warren, Roberto A. Lopez-Anido, Senthil S. Vel, Harun H. Bayraktar, "Progressive failure analysis of three-dimensional woven carbon composites in single-bolt, double-shear bearing," *Composite Part B*, Vol 84, 2016, pp.266~276.

14) MSC. Nastran 2014 Nonlinear User's Guide SOL 400.

15) Ao Du, Yuqing Liu, Haohui Xin, Yize Zuo, "Progressive damage analysis of PFRP double-lap bolted joints using explicit finite element method," *Composite Structures*, Vol 152, 2016, pp.860~869.