

수압램 시험을 위한 복합재 T-Joint의 파손 압력 예측

김동건* · 고은수* · 김인걸*[†] · 우경식** · 김종헌***

Failure Pressure Prediction of Composite T-Joint for Hydrodynamic Ram Test

Dong-Geon Kim*, Eun-Su Go*, In-Gul Kim*[†], Kyung-Sik Woo**, Jong-Heon Kim***

ABSTRACT: Aircraft wing structure is used as a fuel tank containing the fluid. Fuel tank and joint parts are consists of composite structure. Hydrodynamic Ram(HRAM) effect occurs when the high speed object pass through the aircraft wing or explosion and the high pressure are generated in the fuel tank by HRAM effect. High pressure can cause failure of the fuel tank and the joint parts as well as the aircraft wing structure. To ensure the aircraft survivability design, we shall examine the behavior of the joint parts in HRAM effect. In this study, static tensile tests were conducted on four kind of the composite T-Joints. The failure behavior of the composite T-joint was examined by strain gauges and high speed camera. We examine the validity of the Finite Element Modeling by comparing the results of FEA and static tensile tests. The failure stresses and failure pressure of the composite T-Joint were calculated by FEA.

초 록: 항공기 날개 구조물은 유체를 포함한 연료탱크로 사용되며, 연료탱크와 날개구조물을 연결하는 체결부는 복합재 구조물을 사용한다. 항공기 날개 구조물에 고속의 물체가 관통 또는 폭발하게 되면 수압램 현상이 발생하며, 수압램 현상에 의해 연료탱크에 높은 압력이 생성된다. 이러한 높은 압력은 날개구조물 뿐만 아니라 연료탱크와 체결부의 파손을 야기하기 때문에 전투용 항공기의 기체 생존성 확보를 위해서는 수압램 효과에 대한 체결부의 거동을 확인해야 한다. 본 연구에서는 수압램 검증 시험에 앞서 항공기의 복합재 날개 외피와 스파 체결부를 모사한 4종류의 복합재 T-Joint에 정적 인장 시험을 수행하여 시편의 파손 거동을 스트레인 게이지와 초고속 카메라를 통해 확인하였다. 스트레인 게이지를 통해 얻은 변형률을 기준으로 동일한 형상과 하중 조건을 갖는 유한요소해석 모델링의 해석 결과를 비교하여 모델링의 타당성을 확인하였으며, 정적 하중에서 복합재 T-Joint의 파손 응력을 확인하였다. 유한요소해석을 통해 향후 진행될 수압램 시험에서 각 시편이 파손되는 압력을 예측하였다.

Key Words: 수압램(Hydrodynamic ram), 복합재 T-Joint(Composite T-joint), 파손 기준(Failure criteria), 정적 인장 시험(Static tensile test), 층간 전단 응력(Interlamina shear stress)

1. 서 론

수압램 현상은 대표적인 전투 손상 중 하나로 항공기의

연료탱크로 사용되는 날개 구조물에 고속의 물체가 관통 또는 폭발함에 따라 발생한다. 수압램 현상에 의해 항공기 날개 구조물의 연료탱크에서는 680기압(10,000 psi) 이상의

Received 28 March 2016, received in revised form 28 April 2016, accepted 28 April 2016

*Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University

*[†]Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University, Corresponding author (E-mail: igkim@cnu.ac.kr)

**School of Civil Engineering, Chungbuk National University

***Agency for Defense Development

높은 압력이 발생할 수 있으며, 수압램 현상에서 발생하는 높은 압력은 항공기 연료탱크 뿐만 아니라 연료탱크와 날개 구조물을 연결하는 체결부에도 큰 영향을 미친다[1,2]. 전투용 항공기의 경우 효율성을 위해 날개 구조물의 체결부 등을 복합재 구조물로 사용하며, 전투용 항공기 기체의 생존성 확보를 위해서는 발사체의 관통 및 폭발에 의해 날개 내부에서 발생하는 수압램 효과에 대한 체결부의 거동을 확인해야 한다.

미 공군[3]에서는 수압램 거동을 확인하기 위해 수압램 현상을 모사할 수 있는 Ram simulator와 Air gun을 사용하여 다양한 형태의 T-Joint 시편에 대해 수압램 시험을 수행하여 수압램 하중에 대한 각 시편의 변형률을 비교 및 분석하였다. 본 논문에서는 수압램 검증 시험에 앞서 항공기의 복합재 날개 외피와 스파 체결부를 모사한 4종류의 단순화된 복합재 T-Joint 시편에 대하여 수압램 현상에 의해 발생하는 압력 대신 집중 하중을 가해 정적 인장 시험을 진행하였다. 정적 인장 시험을 진행하여 집중 하중이 가해졌을 때 초고속 카메라를 통해 복합재 T-Joint의 파손 거동을 확인하였다. 상용 유한요소 프로그램인 MSC. PATRAN/NASTRAN을 사용하여 정적 시험과 동일한 형상과 하중 조건을 갖는 복합재 T-Joint를 모델링하였으며, 유한요소해석을 진행하였다. 정적 시험을 통해 확인한 파손 시 하중과 파손 시 복합재 T-Joint에서 확인한 변형률을 기준으로 유한요소해석의 타당성을 확인하였다. 초고속 카메라를 통해 확인한 복합재 T-Joint의 파손 거동을 바탕으로 상용 유한요소 프로그램을 통해 정적 인장하중을 받는 복합재 T-Joint의 층간 전단응력을 계산하였다. 각 시편의 파손 시 하중 위치에 관계없이 층간 전단응력이 일정함을 관찰하였으며, 향후 진행될 수압램 시험을 위해 각 시편의 정적 파손 압력을 계산하였다.

2. 본 론

2.1 복합재 T-Joint 시편

본 논문에서 사용한 복합재 T-Joint 시편은 미 공군에서 수행한 Co-bonded 체결부 형태의 수압램 시험 결과를 참고하였으며, 시편은 일반적인 항공기 날개 구조물의 스킨 외피와 체결부를 모사한 T-Joint 형태로 제작하였다. 향후 수행할 복합재 T-Joint 수압램 시편수준 검증시험의 시험 장치 등을 고려하여 Flange의 길이가 100 mm, Web의 길이가 100 mm인 Laminate Skin T-Joint를 제작하였으며, Flange 부분에 Honeycomb Core를 삽입하여 Flange의 길이가 140 mm, Web의 길이가 100 mm인 Sandwich Skin T-Joint를 제작하였다. Fig. 1과 같이 시편의 Web 부분은 3개의 [0/45/-45/90]_s으로 적층하였으며, Flange 부분은 [0/45/-45/90]_{2s}으로 적층하였고 Web과 Flange의 접합부의 양쪽으로 20 mm 길이의 [0/45/-45/90]_s 보강재를 더하였다. 제작된 복합재 T-Joint 시편

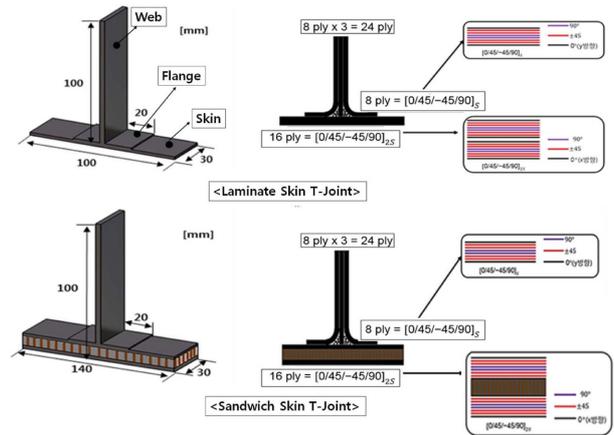


Fig. 1. Laminate skin T-joint & sandwich skin T-joint



Fig. 2. Composite T-joint & cut out T-joint

Table 1. Material property (USN-150b)

Property	USN-150b	
Elastic modulus (GPa)	E_1	131
	$E_2 E_3$	8.2
Shear modulus (GPa)	G_{12}	4.5
	$G_{23} G_{13}$	3.5
Poisson's ratio	ν_{12}	0.28
Density (kg/m ³)	ρ	1580
Thickness (mm)	t_{ply}	0.13

의 형상은 Fig. 2와 같으며 추가적으로 낮은 하중 조건에서도 파손이 발생하도록 시편을 Cut-out 하여 다양한 형상의 복합재 T-Joint를 제작하였다.

복합재 T-Joint 시편은 UD prepreg인 USN-150b(SK Chemical)를 사용하였으며, UD Prepreg의 물성치는 Table 1과 같다.

2.2 복합재 T-Joint 시편 정적 인장 시험 방법

본 논문에서는 정적 시험을 위해 INSTRON사의 10톤 용량 만능시험기(INSTRON 5882)를 이용하였다. 정적 인장 시



Fig. 3. Static tensile test set-up

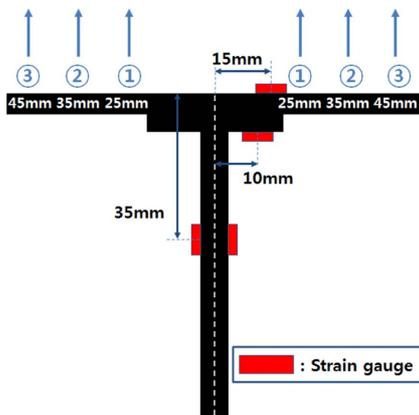


Fig. 4. Location of the strain gauge

험은 Fig. 3과 같이 시편의 Web 부분을 만능시험기의 아래쪽에 고정하고 Skin 부분의 아래쪽에 원형봉 지그를 이용하여 위쪽으로 하중을 가하여 정적 인장 시험을 진행하였다. 원형봉 지그는 시편의 Skin 부분에 대칭으로 집중 하중을 전달하고, 하중을 가하는 위치를 시편의 중심으로부터 25 mm, 35 mm, 45 mm 위치로 바꿀 수 있도록 설계하였다.

복합재 T-Joint 시편에 대한 정적 인장 시험은 Laminate T-Joint 시편의 경우 중심으로부터 거리가 25 mm, 35 mm, 45 mm인 지점, Sandwich T-Joint 시편의 경우 35 mm, 45 mm인 지점, Cut-out T-Joint 시편의 경우 35 mm인 지점에서 각 3회씩 진행되었으며, 모든 정적 시험의 시험기 변위 속도는 1 mm/min으로 설정하였다. 스트레인 게이지는 Fig. 4와 같이 시편의 Web 부분 35 mm 지점의 양쪽과, Flange 부분 10 mm 지점에 부착하였으며, Cut-out T-Joint 시편의 Flange 부분 15 mm 지점에 스트레인 게이지를 추가적으로 부착하여 복합재 T-Joint의 변형률을 측정하였다. 정적 인장 시험을 통해 복합재 T-Joint 시편의 파손 시 하중, 파손 시 변형률을 확인하였으며, 초고속 카메라를 통해 복합재 T-Joint 시편의 파손 거동을 확인하였다.

2.3 복합재 T-Joint 시편 정적 인장 시험 결과

2.3.1 Laminate T-Joint 시편 정적 인장 시험 결과

Laminate T-Joint의 25 mm 지점에 하중을 가했을 경우 Fig.

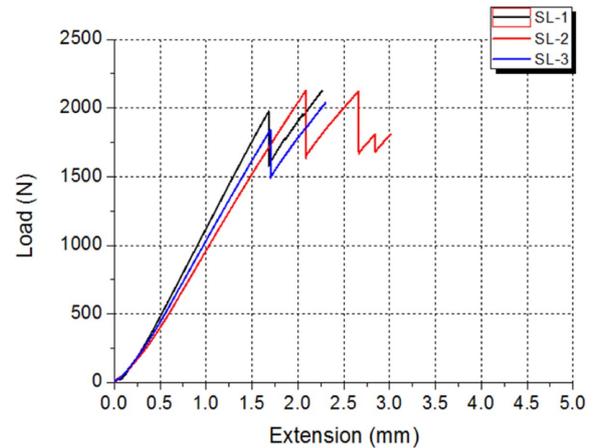


Fig. 5. Load-extension graph of laminate T-joint (Loading position : 25 mm)

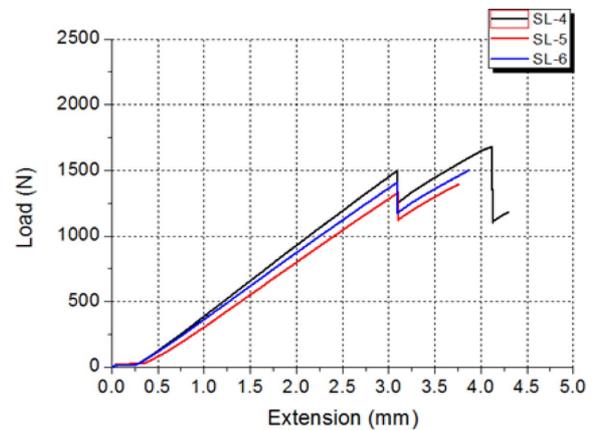


Fig. 6. Load-extension graph of laminate T-joint (Loading position : 35 mm)

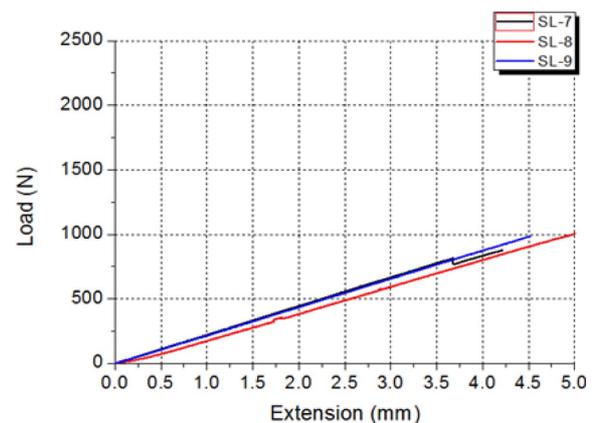


Fig. 7. Load-extension graph of laminate T-joint (Loading position : 45 mm)

5와 같이 평균 1979 N의 하중이 가해졌을 때 파손이 발생했으며, 그때의 파손 시 변형률은 Web 35 mm 지점에서 424 $\mu\epsilon$, Flange 10 mm 지점에서 5166 $\mu\epsilon$ 이 측정되었다.

Laminate T-Joint의 35 mm 지점에 하중을 가했을 경우 Fig. 6과 같이 평균 1326 N의 하중이 가해졌을 때 파손이 발생했으며, 그때의 파손 시 변형률은 Web 35 mm 지점에서 267 $\mu\epsilon$, Flange 10 mm 지점에서 5195 $\mu\epsilon$ 이 측정되었다.

Laminate T-Joint의 45 mm 지점에 하중을 가했을 경우 Fig. 7과 같이 평균 939 N의 하중이 가해졌을 때 파손이 발생했으며, 그때의 파손 시 변형률은 Web 35 mm 지점에서 137 $\mu\epsilon$, Flange 10 mm 지점에서 5004 $\mu\epsilon$ 이 측정되었다.

2.3.2 Sandwich T-Joint 시편 정적 인장 시험 결과

Sandwich T-Joint의 35 mm 지점에 하중을 가했을 경우 Fig. 8과 같이 평균 806 N의 하중이 가해졌을 때 파손이 발생했으며, 그때의 파손 시 변형률은 Web 35 mm 지점에서 174 $\mu\epsilon$, Flange 10 mm 지점에서 2707 $\mu\epsilon$ 이 측정되었다.

Sandwich T-Joint의 45 mm 지점에 하중을 가했을 경우 Fig. 9와 같이 평균 657 N의 하중이 가해졌을 때 파손이 발생했으며, 그때의 파손 시 변형률은 Web 35 mm 지점에서 112 $\mu\epsilon$, Flange 10 mm 지점에서 2626 $\mu\epsilon$ 이 측정되었다.

2.3.3 Cut-out T-Joint 시편 정적 인장 시험 결과

Cut-out Laminate T-Joint의 35 mm 지점에 하중을 가했을 경우 Fig. 10과 같이 평균 314 N의 하중이 가해졌을 때 파손이 발생했으며, 그때의 파손 시 변형률은 Web 35 mm 지점에서 55 $\mu\epsilon$, Flange 10 mm 지점에서 6325 $\mu\epsilon$, Flange 15 mm 지점에서 -696 $\mu\epsilon$ 이 측정되었다.

Cut-out Sandwich T-Joint의 35 mm 지점에 하중을 가했을 경우 Fig. 11과 같이 평균 472 N의 하중이 가해졌을 때 파손이 발생했으며, 그때의 파손 시 변형률은 Web 35 mm 지점에서 93 $\mu\epsilon$, Flange 10 mm 지점에서 5578 $\mu\epsilon$, Flange 15 mm 지점에서 -4006 $\mu\epsilon$ 이 측정되었다.

2.3.4 Composite T-Joint 시편 파손 거동 확인

복합재 T-Joint 정적 인장 시험 결과 Laminate T-Joint 시편의 경우 Flange 부분 변형률이 5000~5200 $\mu\epsilon$, Sandwich T-Joint 시편의 경우 Flange 부분 변형률이 2600~2700 $\mu\epsilon$ 일 때 파손이 발생하였다. Cut-out 복합재 T-Joint 시편의 경우 기존 시편에 비해 낮은 하중에서 파손이 발생하였지만 Flange

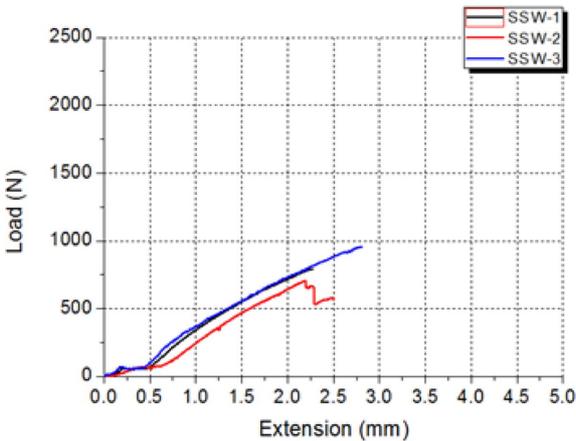


Fig. 8. Load-extension graph of sandwich T-joint (Loading position : 35 mm)

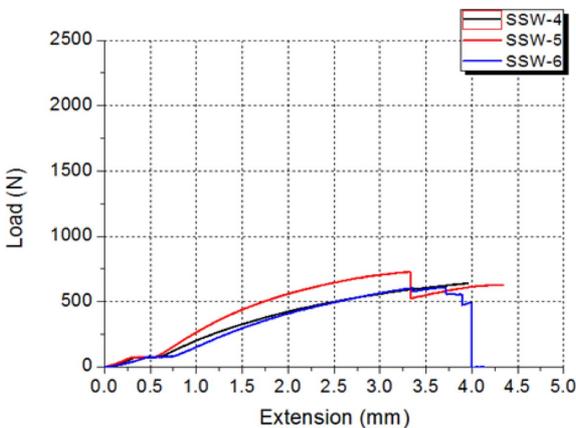


Fig. 9. Load-extension graph of sandwich T-joint (Loading position : 45 mm)

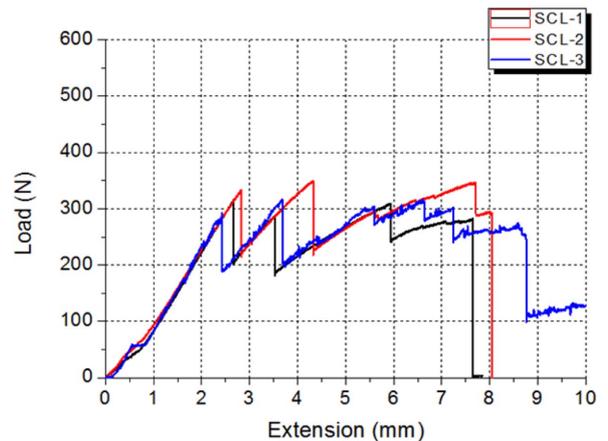


Fig. 10. Load-extension graph of cut-out laminate T-joint (Loading position : 35 mm)

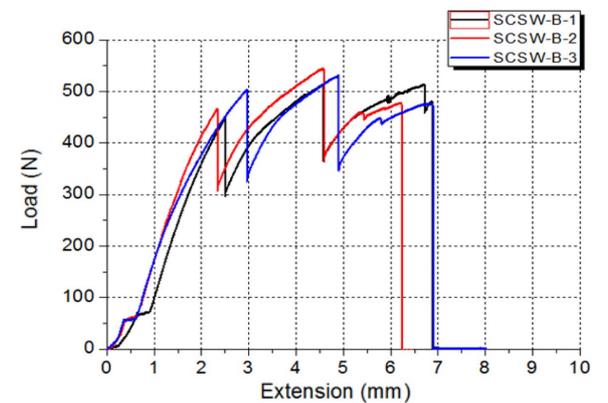


Fig. 11. Load-extension graph of cut-out sandwich T-joint (Loading position : 35 mm)

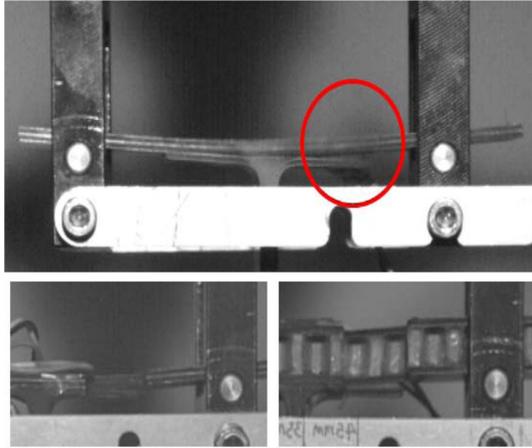


Fig. 12. Failure point of composite T-joint

부분에서 더 큰 변형률이 측정되었다. 또한 집중 하중이 가해지는 위치가 동일할 경우, Honeycomb Core가 삽입된 Sandwich T-Joint의 Skin 부분의 두께가 Laminate T-Joint의 Skin 부분의 두께보다 크지만 더 낮은 하중에서 파손이 발생하였다. 초고속 카메라로 시편의 파손 시 거동을 확인한 결과 Fig. 12와 같이 Web과 Flange 부분 접착층이 분리되는 형태로 파손이 발생한 것을 확인하였다.

2.4 복합재 T-joint 유한요소 모델링

정적 인장 시험에서 Web과 Flange 부분 접착층의 분리에 의해 복합재 T-Joint 시편의 파손이 발생한 것을 확인하였다. 접착층의 분리는 해당 부분의 층간 전단 응력이나 층간 인장 응력에 의해 발생되며, 정적 인장 시험을 통해 층간 전단 응력을 확인하기 어려우므로 상용유한요소 프로그램인 MSC.PATRAN/NASTRAN을 이용하여 유한요소해석을 진행하였다. Fig. 13과 같이 Web과 Flange 부분은 Hex8 요소, Filler 부분은 Wedge 15 요소를 사용하였으며, 실제 복합재 T-Joint의 적층된 두께가 10% 증가한 것을 고려하여 아래의 식 (1)을 통해 적층판의 물성치를 보정하였다. 적층판은 직교이방성 재료로 가정하여 계산하였고, 이때 복합재 T-Joint

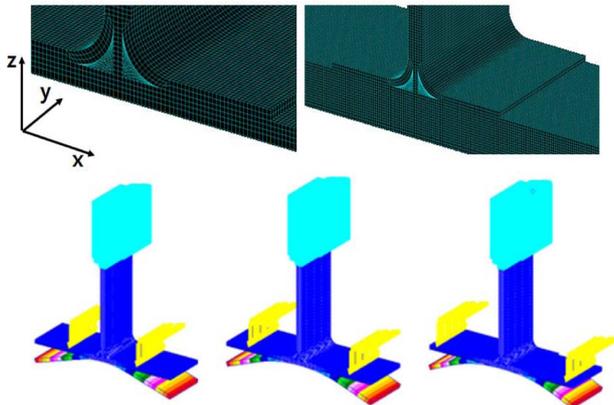


Fig. 13. FEA of composite T-joint

Table 2. Composite T-joint property

	Property (GPa)	
	Flange	$E_x E_y$
E_z		11.2
G_{xz}		19.3
$G_{yz} G_{yz}$		4.0
Web	E_x	11.2
	$E_y E_z$	45.7
	$G_{yz} G_{yz}$	4.0
Honeycomb Core	G_{xz}	19.3
	$E_x E_y$	0.01
	E_z	1
	ν_{xz}	0.1
	$\nu_{xy} \nu_{yz}$	0.09
	G_{xy}	0.0033
	$G_{yz} G_{xz}$	0.22 0.44

Table 3. Test & FEA results

Specimen	Load [N]	Test Strain [με]		FEA Strain [με]	
		Web	Flange	Web	Flange
Laminate T-Joint (25 mm)	1979	424	5166	407	5344
Laminate T-Joint (35 mm)	1326	267	5195	269	5671
Laminate T-Joint (45 mm)	939	137	5004	188	5525
Sandwich T-Joint (35 mm)	806	174	2707	152	2619
Sandwich T-Joint (45 mm)	657	112	2626	132	2446
Cut-out Laminate T-Joint (35 mm)	314	55	6325	60	6364
		Flange	-6966	Flange	-6894
		Cut-out		Cut-out	
Cut-out Sandwich T-Joint (35 mm)	472	93	5578	94	5847
		Flange	-4006	Flange	-4260
		Cut-out		Cut-out	

의 Web과 Flange 부분 및 Honeycomb Core의 물성치는 Table 2와 같다.

$$E'_1 = \frac{1}{1.1}E_1 + \frac{0.1}{1.1}E_m \tag{1}$$

2.5 복합재 T-Joint 시험과 해석 결과 비교

복합재 T-Joint 정적 시험과 유한요소 해석 결과의 비교는 Table 3과 같다. 변형률을 비교하였을 때 Web 부분에서

는 10% 이내의 오차, Flange 부분에서는 최대 15% 이내의 오차가 확인되었으며 해석모델이 타당하다고 판단하였다.

2.6 복합재 T-Joint 파손 기준

초고속 카메라를 통해 복합재 T-Joint 시편이 접착면이 분리되는 형태로 파손이 발생하는 것을 확인하였으며, 접착층의 분리에 의한 파손은 파손 지점의 층간 전단 응력과 층간 인장 응력에 의해 발생한다. 또한 유한요소 해석에서 절점의 끝단에서는 응력값이 발산하여 절점의 끝단을 기준으로 층간 전단응력을 계산할 경우 오차가 발생할 수 있다. 따라서 각 시편의 층간 전단 응력과 층간 인장 응력을 확인하기 위해 Fig. 14와 같이 실제 파손이 발생하는 부분에서 2.5 mm 안쪽을 파손 기준점으로 선정하여 해당 지점의 층간 응력 정보를 비교하였다. 유한요소해석 결과 Table 4와 같이 각 시편의 층간 전단 응력(τ_{xz})이 유사한 경향성을 보여, 이것을 각 시편의 파손 기준으로 가정하였다. 파손 기준점의 층간 전단 응력(τ_{xz})이 Laminate T-Joint의 경우 -15~-17 MPa, Sandwich T-Joint의 경우 -4~-5 MPa, Cut-out Laminate T-Joint의 경우 -17~-18 MPa, Cut-out Sandwich T-joint의 경우 -14~-15 MPa일 때 복합재 T-Joint 접착층의 분리에 의한 파손이 발생하는 것을 확인하였으며, 해석 결과는 Table 4와 같다.

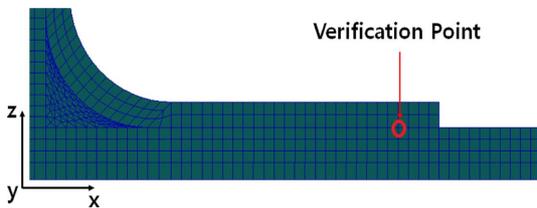


Fig. 14. Verification point for failure stress calculation

Table 4. Failure stress result

Specimen	Load [N]	τ_{xz} [MPa]	σ_{zz} [MPa]	τ_{max} [MPa]
Laminate T-Joint (25 mm)	1979	-17.01	-1.89	17.11
Laminate T-Joint (35 mm)	1326	-16.29	-5.77	17.28
Laminate T-Joint (45 mm)	939	-15.31	-7.31	16.96
Sandwich T-Joint (35 mm)	806	-4.86	-0.38	4.87
Sandwich T-Joint (45 mm)	657	-4.56	-0.47	4.58
Cut-out Laminate T-Joint (35 mm)	314	-17.73	-6.16	18.76
Cut-out Sandwich T-Joint (35 mm)	472	-14.69	-0.61	17.70

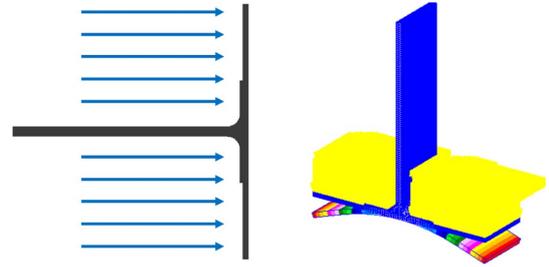


Fig. 15. Hydrodynamic ram pressure & FEA of distributed load

Table 5. Failure pressure of composite T-joint

Specimen	Pressure [bar]	Failure criteria [MPa]	τ_{xz} [MPa]	FEA Strain [$\mu\epsilon$]	
				Web	Flange
Laminate T-Joint	6.78	-15~-17	-17.67	401	6332
Sandwich T-Joint	2.28	-4~-5	-4.83	178	2456
Cut-out Laminate T-Joint	1.71	-17~-18	-17.13	Web	67
				Flange	6212
				Cut-out	-6701
Cut-out Sandwich T-Joint	1.29	-14~-15	-14.59	Web	99
				Flange	7660
				Cut-out	-4361

2.7 복합재 T-Joint 정적 파손 압력 예측

향후 진행될 수압램 시험에서는 수압램 시험장치 내부에서 복합재 T-Joint에 집중 하중이 아닌 Fig. 15와 같은 분포 하중 형태의 압력이 가해지게 된다. 본 논문에서 확인한 파손 시 층간 전단 응력을 기준으로 유한요소해석을 통해 4종류의 시편에 압력을 가해 파손 기준점에서 앞서 선정한 층간 전단 응력에 도달하는 파손 시 압력을 예측하였으며, 유한요소 모델링된 복합재 T-Joint 시편 Flange 부분의 각 절점에 하중을 가하여 수압램 하중을 모사하였다. Table 5와 같이 Laminate T-Joint의 경우 6.78 bar, Sandwich T-Joint의 경우 2.28 bar, Cut out Laminate T-Joint의 경우 1.71 bar, Cut out Sandwich T-Joint의 경우 1.29 bar의 정적 압력이 가해질 경우 시편의 파손이 발생할 것으로 예측하였다.

3. 결론

본 연구에서는 수압램 시험에 앞서 복합재 T-Joint의 정적 인장 시험과 유한요소해석을 진행하였다. 정적 인장 시험을 통해 복합재 T-Joint의 파손 시 하중 및 파손 시 변형률을 확인하였으며 유한요소해석 결과와 비교하여 유한요소 모델링의 타당성을 검증하였다. 초고속 카메라를 통해 복합재 T-Joint가 접착층의 분리에 의해 파손이 발생함을 확인하였으며, 유한요소해석을 통해 파손층의 층간 응력 정

보를 확인하였다. 시편의 형상이 동일할 경우 집중하중이 가해지는 위치에 상관없이 파손 시 층간 전단응력이 일정한 거동을 보여 파손 응력으로 선정하였으며, 파손 시 층간 전단응력을 통해 각 시편의 파손 압력의 크기를 예측하였다. 향후 진행될 수압램 검증 시험을 통해 정적 인장 하중과 수압램 하중을 받는 복합재 T-Joint의 거동을 비교 분석할 예정이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소가 지원하는 연구과제로 수행되었습니다(과제번호 ADD-13-01-08-23).

REFERENCES

1. Gregory, J.C., "Joint Resistance to Ram", AIAA US Air Force T&E Days, 2005.
2. Kim, J.H. and Jun, S.S., "Battle Tanks by Hydrodynamic Ram Effect", *Journal of KSAS*, Vol. 34, No. 4, 2006, pp. 17-24.
3. Ronald, H. and William, B., AFL Technical Report, 2006.
4. Park, J.W., Kim, I.G., Go, E.S., Park, S.H., and Kim, J.H., "Design of Composite T-Joint for Hydrodynamic Ram Test", *KSCM Conference*, 2014, pp. 53-54.