

PVDF 센서를 이용한 수압램 하중을 받는 복합재 T-Joint의 동적 변형률 측정

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

Measurement of Dynamic Strains on Composite T-Joint Subjected to Hydrodynamic Ram Using PVDF Sensors

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

ABSTRACT: The hydrodynamic ram (HRAM) phenomenon is one of the main types of ballistic battle damages of a military aircraft and has great importance to airframe survivability design. The HRAM effect occurs due to the interaction between the fluid and structure, and damage can be investigated by measuring the pressure of the fluid and the dynamic strains on the structure. In this paper, HRAM test of a composite T-Joint was performed using a ram simulator which can generate HRAM pressure. In addition, calibration tests of PVDF sensor were performed to determine the circuit capacitance and time constant of the measurement system. The failure behavior of the composite T-Joint due to HRAM pressure was examined using the strain gauges and a PVDF sensor which were attached to the surface of the composite T-Joint.

초 록: 수압램 현상은 전투용 항공기의 주요 전투 손상 중 하나이며, 항공기 기체 생존성 평가에 중요한 영향을 미친다. 수압램 효과는 유체-구조물간의 상호관계를 통하여 나타나며, 구조물의 동적 변형률을 측정하여 파손 거동 및 파손 여부를 확인할 수 있다. 본 논문에서는 수압램 현상을 모사할 수 있는 수압램 시험 장치를 이용하여 수압램에 의한 복합재 T-Joint의 파손 시험을 수행하였다. 또한 계측기기의 입력 정전용량과 시간 상수 확인을 위해 PVDF 센서 보정 시험을 수행하였다. 복합재 T-Joint에 스트레인 게이지와 전하증폭기를 사용하지 않은 PVDF 센서를 부착하여 수압램 현상에 의한 복합재 T-Joint의 동적 변형률을 측정하였다. PVDF 센서와 스트레인 게이지의 동적 변형률을 이용하여 복합재 T-Joint의 파손 거동 및 파손 여부를 확인하였다.

Key Words: 수압램(Hydrodynamic ram), PVDF 센서(PVDF sensor), 복합재 T-Joint(Composite T-Joint), 동적 변형률(Dynamic strain)

1. 서 론

전투용 항공기는 전장에서 많은 외부 위협을 받으며 외부 충격에 의하여 심각한 전투 손상을 입을 수 있다. 수압

램 현상은 대표적인 전투 손상으로서 유체를 포함하는 구조물에 고속의 물체가 관통 또는 폭발함에 따라 발생하고, 날개 내부를 연료탱크로 사용하는 항공기 날개 구조물에 서 주로 발생한다. 수압램 효과로 인하여 약 680 기압(10,000

Received 25 May 2018, received in revised form 10 September 2018, accepted 14 September 2018

*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

psi) 이상의 압력이 연료탱크에 발생 될 수 있다고 보고되고 있다[1]. 이러한 압력은 연료탱크와 인접 구조물에 큰 손상을 일으킬 수 있고, 특히, 수압램이 복합재 구조로 제작된 항공기 구조 체결부에 미치는 영향 분석은 기체 생존성 설계를 위한 필수적인 요소라고 할 수 있다.

수압램 효과는 유체-구조물간의 상호관계를 통하여 나타나는 현상이므로 수압램 효과에 의한 구조물의 파손을 정확하게 예측하는 것은 매우 어렵기 때문에 수압램 현상에 대한 수치적 연구와 이를 뒷받침하는 실험적 연구가 동시에 수반되어야 한다. 그러나 유체와 구조물에 대한 상호관계의 규명이 어려울 뿐 만 아니라 다양하고 복잡한 구조물 손상 거동을 수치적 해석기법만으로 규명하기에는 어려움이 있으며, 실험적 연구는 시간 및 비용이 많이 소요되는 문제점이 있다. 따라서 간단한 연구 모델에 대한 수치적 연구와 이를 뒷받침하는 실험적 연구를 통하여 수압램 현상에 대한 이해와 기체 생존성을 증가시킬 수 있는 구조 설계가 가능하다.

Heimbs[2,3]는 여러 복합재 T-Joint design에 대하여 정적 인장 시험과 동적 인장 시험을 수행하여 변위와 하중을 비교하였고, 3-cell box와 6-cell box에 대하여 수압램 해석을 수행하였다. Varas[4,5]는 알루미늄과 CFRP 사각 튜브에 60%, 75%, 100%로 유체를 채운 후, 600 m/s, 900 m/s 속도의 발사체로 관통 시험을 수행하였다. 발사체와 연료탱크의 파손 거동을 고속카메라로 촬영하여 Cavitation이 커질수록 유체의 압력이 높아지는 것을 확인하였고, 연료탱크 표면에 부착한 스트레인 게이지를 통하여 구조물의 변형이 더 크게 발생하는 것을 확인하였다. 또한 수압램에 의하여 구조물에서 진동과 변형이 크게 발생하는 것을 확인하였다. Czarnecki[1,6]는 수압램 효과를 모사할 수 있는 Ram simulator로 두께와 체결방식이 각기 다른 여러 복합재 T-Joint의 파손 시험을 수행하여 스트레인 게이지로 파손 변형률을 측정하였다.

수압램 현상에 의하여 구조물에는 매우 높은 주파수 영역의 동적 거동이 발생하기 때문에 동적 특성이 우수한 센서를 이용하여 구조물의 동적 변형률을 측정해야 한다. 또한 소형화된 장비로 신호를 취득할 수 있다면 센서의 활용 영역이 더 넓어 질 수 있다.

본 논문에서는 동적 특성이 우수한 PVDF 센서를 이용하여 수압램 현상에 의한 구조물의 동적 변형률 측정 가능성을 제시하기 위하여 PVDF 센서 보정 실험과 복합재 T-Joint의 수압램 시험을 수행하였다. PVDF 센서 보정 시험을 통하여 측정장비를 포함한 전체 회로의 정전용량과 시간 상수를 확인하였고, 수압램 현상을 모사 할 수 있는 Ram simulator로 스트레인 게이지와 PVDF 센서가 부착된 복합재 T-Joint의 수압램 시험을 수행하여 복합재 T-Joint의 동적 변형률을 측정하였다. 전하증폭기를 사용하지 않은 PVDF 센서로 측정된 폐회로 신호 전압(short circuit voltage)을 변

형률로 변환하고 스트레인 게이지로 측정한 변형률과 비교하여 PVDF 센서의 수압램 현상에 의한 구조물의 동적 변형률 측정 및 손상 탐지 활용 가능성을 고찰하였다.

2. 이론적 배경

2.1 수압램 현상

수압램 현상(HRAM, Hydrodynamic Ram)은 구조물의 손상과 발사체의 진행에 따라 Fig. 1과 같이 4단계(shock, drag, cavitation, exit)로 나눌 수 있다[3,4]. Shock stage는 유체가 포함되어 있는 구조물의 벽면에 고속의 발사체가 충돌함에 따라 구조물의 벽면에 발사체에 의한 직접적인 충격손상이 발생하고 유체에 반구 형태의 충격파가 발생한다. 충격파의 크기는 발사체의 충돌에너지에 의해 결정되며 충격 위치에서 멀어짐에 따라 압력의 크기는 감소한다. Drag stage에는 구조물의 벽면을 관통하여 유체 속을 이동하는 발사체가 유체의 항력에 의하여 속도가 감소하게 된다. 발사체의 이동 경로에 따라서 유체 입자는 발사체의 에너지를 전달 받아 가속도를 갖게 되어 구형의 압력파를 발생시키고, 발사체 뒤에는 순간적으로 유체가 없는 Cavity가 발생한다. 이때 발생하는 압력은 Shock stage에서 발생하는 압력보다는 낮지만 지속시간이 길어 구조물의 변형 및 파괴에 큰 영향을 미친다. Cavitation stage는 Cavity가 팽창 및 수축을 반복하면서 조금씩 사라지는 진동현상이 나타난다. Exit stage는 발사체가 구조물의 반대쪽 벽면에 직접적인 충격손상을 발생시키고 구조물을 관통하여 외부로 지나간다.

2.2 PVDF 센서 신호와 변형률 관계

PVDF 센서는 PZT 센서(압전 세라믹 센서)와 더불어 지능 구조물의 작동기와 센서로 많이 사용된다. PVDF 센서는 성형이 용이하고, 주파수 응답성이 높으며, 우수한 선형성과 높은 출력 전압 등으로 감지기로 많이 사용된다. PZT 센서는 강성이 크고 깨지기 쉽지만 PVDF 센서는 질기고 유연한 기계적 특성을 가지며, 얇은 두께(10~760 μm)의 다양한 필름 형태로 생산되므로 사용되는 용도에 따라 여러 크기와 형태로 자유롭게 조정할 수 있다. 또한, PVDF 센서는

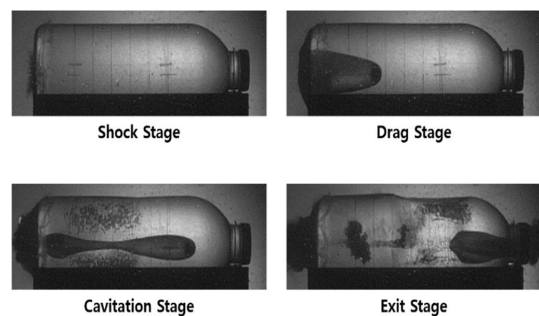


Fig. 1. Phases of hydrodynamic ram

사용 주파수 영역($10^{-3} \sim 10^9$ Hz)이 넓어 미세한 동적 변형에서 큰 동적 변형까지 폭 넓은 범위의 동적 변형을 측정할 수 있다.

PVDF 센서는 강성(2~4 GPa)이 낮기 때문에 스트레인 게이지처럼 센서의 변형률과 센서의 부착 위치에서의 구조물의 변형률이 PVDF 센서의 임계 주파수보다 높은 동적인 하중에 의한 변형률을 측정 할 때에는 신호증폭기를 사용하지 않아도 변형률을 측정 할 수 있다[7,8].

PVDF 센서에 생기는 이상적인 개회로 전압 $\bar{V}(t)$ 는 식 (1) 과 같다.

$$\begin{aligned}\bar{V}(t) &= \frac{Q(t)}{C_p} \\ &= \frac{1}{A_p} \int_{A_p} (C_x \varepsilon_x + C_y \varepsilon_y) dx dy \\ &= (C_x \bar{\varepsilon}_x + C_y \bar{\varepsilon}_y) \\ &= \bar{\varepsilon}_x (C_x - \nu C_y)\end{aligned}\quad (1)$$

A_p 는 PVDF 센서 전극판의 유효면적을 나타낸다. $\bar{\varepsilon}_x$ 와 $\bar{\varepsilon}_y$ 는 센서 전극판에서의 평균 변형률을 나타내며, 등방성 재료의 경우 $\bar{\varepsilon}_y$ 는 $-\nu \bar{\varepsilon}_x$ 와 같다고 가정할 수 있다. C_p 는 PVDF 센서의 정전용량이며, C_x 와 C_y 는 PVDF 센서 상수로 다음과 같다.

$$C_p = \frac{\chi_{33} A_p}{t_p}, \quad C_x = \frac{t_p e_{31}}{\chi_{33}}, \quad C_y = \frac{t_p e_{32}}{\chi_{33}} \quad (2)$$

여기서 χ_{33} 과 t_p 는 압전 재료의 두께방향 유전률과 센서 두

Table 1. Typical properties of PVDF sensor

Property	Symbol	Unit	Value
Density	ρ_p	$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	1.78
Elastic modulus	E_1	GPa	2.1
	E_2	GPa	1.22
Poisson's ratio	ν_{12}		0.33
	ν_{21}		0.192
Piezo strain constants (Laterally Clamped)	d_{31}	$\times 10^{-12} (\text{m/m})/(\text{V/m})$	23.0
	d_{32}	$\times 10^{-12} (\text{m/m})/(\text{V/m})$	3.0
	d_{33}	$\times 10^{-12} (\text{m/m})/(\text{V/m})$	33.0
Permittivity (at 10 kHz)	χ_{33}	$\times 10^{-12} \text{ F/m}$	103
Dimension	a_p	mm	15
	b_p	mm	10
	t_p	μm	28
Sensor constant	C_p	$\times 10^{-12} \text{ F}$	567.63
	C_x	V/ ε	14,211
	C_y	V/ ε	6,287

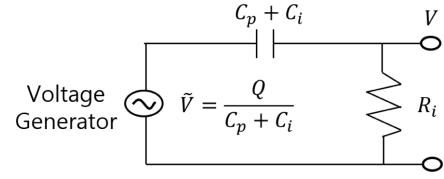


Fig. 2. Equivalent circuit of piezoelectric sensor

께이며, e_{31} 과 e_{32} 는 압전 상수이다. 본 논문에서 사용된 PVDF 센서의 주요 특성 값은 Table 1과 같다.

PVDF 센서가 계측 기기에 연결되면 변형률에 의해 센서에서 발생하는 전하량은 시간 상수 $R_i(C_p + C_i)$ 에 따라 신호의 크기와 위상이 실제 변형률 신호와 다르게 된다. Fig. 2는 센서가 계측 기기에 연결됐을 경우의 모식적인 회로도이며, 이때의 준개회로 전압(Quasi open circuit voltage, $\tilde{V}(t)$)과 이상적인 개회로 전압(Open circuit voltage, $\bar{V}(t)$)의 관계식은 다음과 같다.

$$\tilde{V}(t) = \frac{C_p}{C_p + C_i} \bar{V}(t) \quad (3)$$

준개회로 전압과 실제 폐회로 전압(Short circuit voltage, $V(t)$)는 다음과 같이 표현된다.

$$I = (C_p + C_i) \frac{d}{dt} (\tilde{V}(t) - V(t)) = \frac{V(t)}{R_i} \quad (4)$$

양 변을 라플라스 변환하고 초기 조건을 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{V}(t) = V(t) + \frac{1}{R_i(C_p + C_i)} \int_0^t V(\tau) d\tau \quad (5)$$

전하증폭기 연결 없이 측정된 폐회로 전압 신호 $V(t)$ 와 PVDF 센서의 평균 변형률 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{\varepsilon}_x = \{V(t) + \frac{1}{RC} \int_0^t V(\tau) d\tau\} \times \frac{1}{\frac{C_p}{C_p + C_i} \times (C_x - \nu C_y)} \quad (6)$$

여기서 RC 는 시간 상수이며, C_i 는 계측 기기의 입력 정전용량으로 본 논문에서는 PVDF 센서 보정 실험(Calibration test)을 수행하여 각각 확인하였다.

3. PVDF 센서 보정 실험

3.1 PVDF 센서 보정 실험 구성 및 방법

전하증폭기를 연결하지 않은 PVDF 센서로 측정한 폐회로 전압 신호를 변형률로 계산하기 위해서는 PVDF 센서 보정 실험이 반드시 필요하다. 또한 PVDF 센서 보정 실험을 수행하여 정확한 RC 와 C_i 를 확인하기 위해서는 실제 실험 장치의 구성과 동일한 조건에서 실험을 수행하여야 한다.

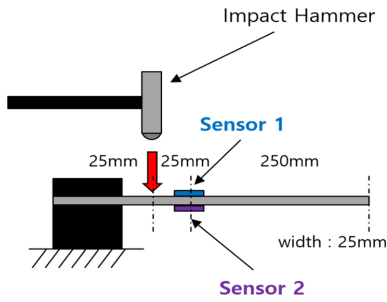


Fig. 3. Experimental setup for PVDF sensor calibration test

본 논문에서는 복합재 T-Joint 수압램 실험의 장치 구성과 동일하게 마그네틱 센서 2개, 스트레인 게이지 4개, PVDF 센서 1개, 압력 센서 2개, 고속카메라 1개를 DAQ 시스템에 연결하여 PVDF 센서 보정 실험을 수행하였다.

PVDF 센서 보정 실험은 Fig. 3과 같이 알루미늄 시편에 충격 망치(Impact hammer)를 이용하여 충격을 가하고, 동일한 위상에 부착된 센서의 신호를 측정하여 각각 비교하였다. PVDF 센서 보정 실험은 RC를 확인하기 위한 Calibration test 1과 C_i 를 확인하기 위한 Calibration test 2로 구성된다.

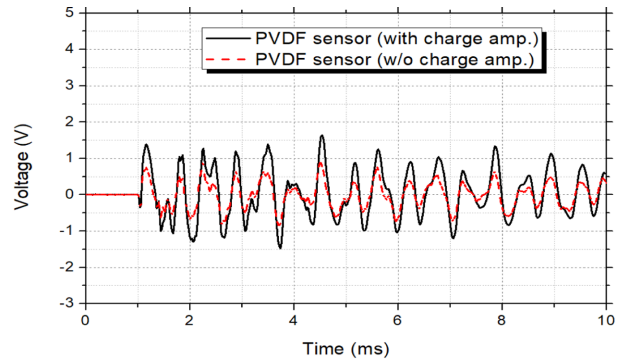
Calibration test 1은 RC를 확인하기 위해 전하증폭기가 연결된 PVDF 센서와 전하증폭기를 연결하지 않은 PVDF 센서를 알루미늄 시편의 동일한 위상에 부착하여 실험을 수행하였다. 전하증폭기를 연결하지 않은 PVDF 센서의 폐회로 전압 신호를 식 (5)를 이용하여 개회로 전압 신호로 변환하고 실제 개회로 전압 신호와 비교하여 RC를 확인하였다.

Calibration test 2는 C_i 를 확인하기 위해 전하증폭기가 연결된 PVDF 센서와 2축 스트레인 게이지를 알루미늄 시편의 동일한 위상에 부착하여 실험을 수행하였다. 2축 스트레인 게이지에서 측정된 변형률을 식 (7)을 이용하여 개회로 전압 신호로 변환하고 실제 개회로 전압 신호와 비교하여 C_i 를 확인하였다.

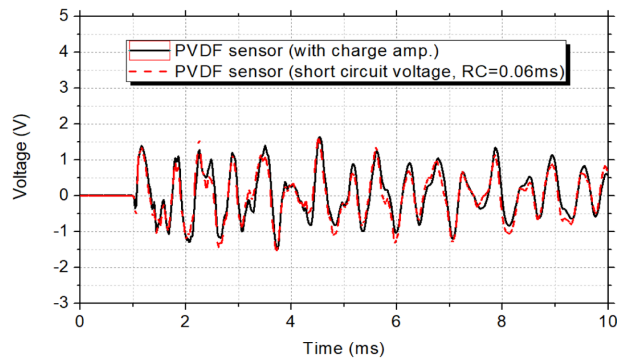
$$\tilde{V}(t) = \frac{C_p}{C_p + C_i} (C_x \bar{\epsilon}_x + C_y \bar{\epsilon}_y) \quad (7)$$

3.2 PVDF 센서 보정 실험 결과

Calibration test 1에서 측정한 전하증폭기가 연결된 PVDF 센서의 개회로 신호와 전하증폭기를 연결하지 않은 PVDF 센서의 폐회로 신호 결과는 Fig. 4(a)와 같으며, 전하증폭기 연결 유무에 따라 시간 상수에 의해 신호의 진폭 및 위상이 다르게 측정되는 것을 확인하였다. 또한 전하증폭기를 연결하지 않은 PVDF 센서의 폐회로 신호를 식 (5)를 이용하여 개회로 신호로 보정하고, 전하증폭기를 연결한 PVDF 센서의 실제 개회로 신호와 비교하여 시간 상수를 확인하였다. Fig. 4(b)와 같이 시간 상수 RC가 0.06×10^{-3} (sec)일 때,



(a) Measured signals



(b) Compensated signals ($RC = 0.06 \times 10^{-3}$ (sec))

Fig. 4. Comparison of the measured signals between PVDF sensor with charge amplifier and that from without charge amplifier (Calibration test 1)

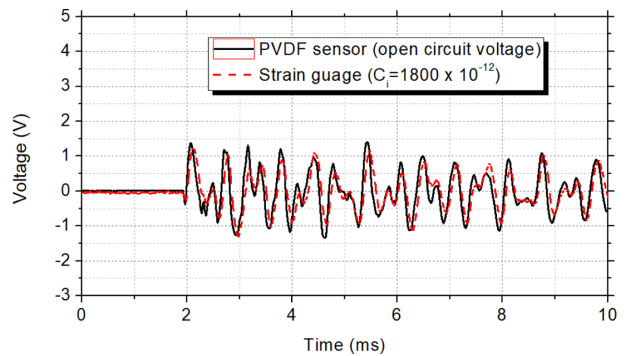


Fig. 5. Comparison of the measured signals between PVDF sensor with charge amplifier and strain gauges (Calibration test 2)

PVDF 센서의 보정된 개회로 신호와 실제 개회로 신호가 잘 일치하는 것을 확인하였다.

Calibration test 2에서 2축 스트레인 게이지로 측정된 변형률로 계산한 개회로 신호와 전하증폭기가 연결된 PVDF 센서의 개회로 신호 결과는 Fig. 5와 같다. 계측 기기의 입력 정전용량 C_i 가 $1,800 \times 10^{-12}$ (F)일 때, 두 신호가 잘 일치하는 것을 확인하였다.

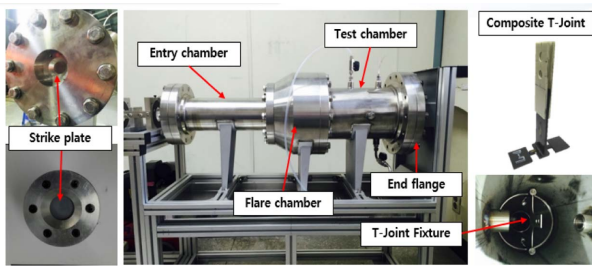


Fig. 6. Ram simulator and composite T-Joint

4. 복합재 T-Joint 수압램 실험

4.1 복합재 T-Joint 수압램 실험 장치 구성

복합재 T-Joint의 수압램 시험은 Fig. 6과 같이 수압램 현상을 발생시킬 수 있는 수압램 시험 장치(Ram simulator)를 이용하여 시험을 수행한다. 수압램 시험 장치는 가스건(Gas gun)에서 발사한 충격체(Puck)가 수압램 시험 장치의 충격판(Strike plate)에 충돌함으로써 내부 유체에 높은 압력의 수압램 현상을 발생시키는 장치이다. 내부 유체에서 발생한 압력파는 수압램 시험장치의 Test chamber에 설치된 T-Joint 시편에 충돌하여 에너지를 전달하고, T-Joint 시편의 파손을 발생시킨다. 이러한 T-Joint 시편의 파손은 항공기 연료 탱크 내부에서 발생한 수압램 현상에 의한 T-Joint의 파손과 유사한 경향성을 가진다.

복합재 T-Joint 수압램 시험은 가스건과 수압램 시험 장치로 구성된다. 가스건에서 발사되는 충격체는 64 g의 실린더형 황동 충격체를 사용하였으며, 충격판은 6 mm의 Steel plate를 사용하였다.

4.2 복합재 T-Joint 시편 및 센서

복합재 T-Joint 수압램 실험의 시편은 Laminated skin T-Joint를 사용하였다. Prepreg는 Sk Chemicals의 USN 150B를 사용하였으며, 물성은 Table 2와 같다. 복합재 T-Joint의 Web은 $[0/45/-45/90]_5$ 으로 3회, Skin은 2회 적층하여 제작하였다. 시편 Web의 크기는 Fig. 7과 같이 $100 \times 30 \times 3.3$ mm, Skin은 $100 \times 30 \times 3.3$ mm로 제작하였으며, 수압램 시험 장치와 연결을 위해 Tap을 부착하였다. 또한 낮은 수압램 하

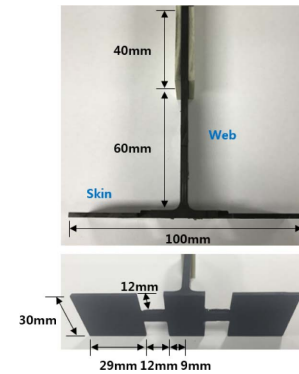


Fig. 7. Dimensions of composite T-Joint specimen

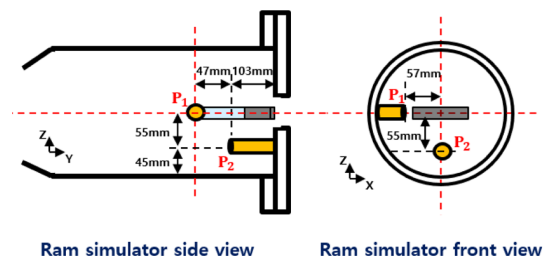


Fig. 8. Location of the pressure sensors

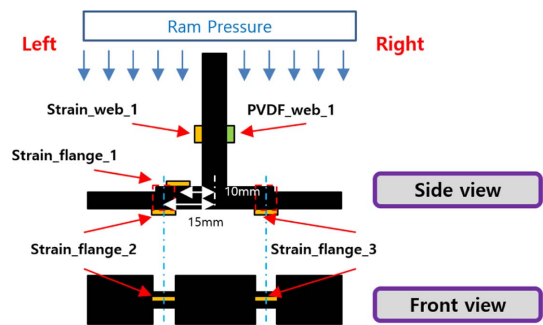


Fig. 9. Location of the strain gauges and PVDF sensor

중에서도 파손이 발생하도록 Skin의 양쪽에 12×12 mm의 Cut-out을 만들어 T-Joint 연결 부위의 유효폭을 6 mm로 제작하였다.

복합재 T-Joint 수압램 실험에서 사용된 주요 측정 센서는 마그네틱 속도 센서 2개, 스트레인 게이지 4개, PVDF 센서 1개, 압력 센서 2개이며, 고속카메라 1개를 사용하였다. 마그네틱 속도 센서를 이용하여 충격체의 초기 속도를 측정하였고, 압력 센서를 Fig. 8과 같이 복합재 T-Joint 시편 전방에 설치하여 복합재 T-Joint 시편에 작용하는 유체의 압력을 측정하였다. P_1 은 Test chamber 측면에서, P_2 는 정면에서 압력을 측정하였다. 또한 Fig. 9와 같이 스트레인 게이지와 전하증폭기를 연결하지 않은 PVDF 센서를 복합재 T-Joint 시편에 부착하여 동적 변형률을 측정하였다. 복합재 T-Joint 수압램 실험에서 주요 측정값의 Sampling rate은 50 kHz로 수행하였다.

Table 2. Material properties of unidirectional Carbon/Epoxy lamina

Property	Symbol	Unit	Value
Elastic modulus	E_1	GPa	131.0
	E_2, E_3		8.2
Shear modulus	G_{12}, G_{13}	GPa	4.5
	G_{23}		3.5
Poisson's ratio	ν_{12}, ν_{13}		0.28
	ν_{23}		0.47
Ply thickness	t_{ply}	mm	0.144

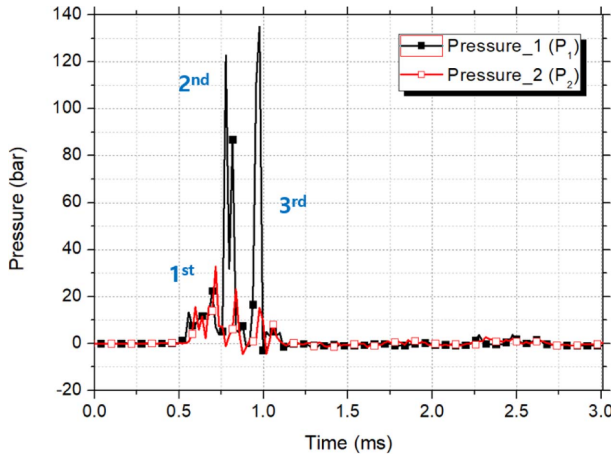


Fig. 10. Pressure-time history in Ram simulator

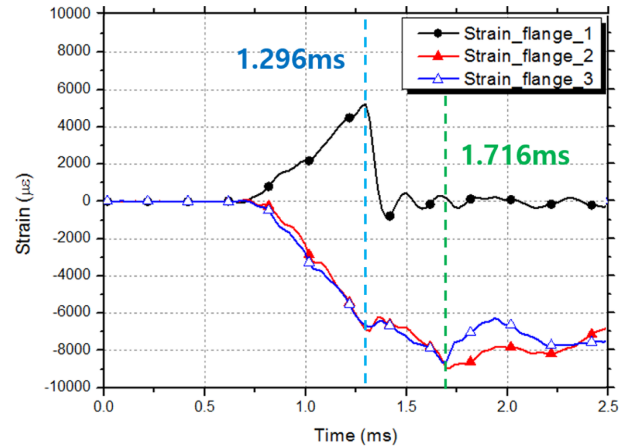


Fig. 12. Strain-time history measured by strain gauges at flange

5. 복합재 T-Joint 수압램 실험 결과 및 고찰

5.1 수압램 시험 장치 내부 유체 압력

복합재 T-Joint 수압램 실험에서 충격체의 초기 속도는 183.3 m/s로 측정되었다. 또한 충격체와 충격판의 충돌에 의해 충돌판에 변형이 발생하였으며, 수압램 시험 장치 내부 유체에 수압램 현상이 발생하였다. 수압램은 Fig. 10과 같이 충돌 후 0.5~1.1 ms에서 발생하였으며, 크게 3단계로 발생하였다. 충격체와 충격판의 충돌에 의한 압력파가 0.5~0.75 ms에서 발생하였으며, 수압램 시험 장치 끝에서 반사된 반사파가 0.75~1.1 ms에서 2회 측정된 것으로 판단된다.

5.2 복합재 T-Joint 동적 변형률

복합재 T-Joint는 Fig. 11과 같이 Cut-out한 Web과 Flange 사이의 Bonding layer에서 파손이 발생하였다.

복합재 T-Joint의 Flange에 부착된 스트레인 게이지로 측정한 동적 변형률 신호는 Fig. 12와 같으며, Web에 부착된 스트레인 게이지와 전하증폭기를 연결하지 않은 PVDF 센서로 측정한 동적 변형률은 Fig. 13과 같다. 전하증폭기를 연결하지 않은 PVDF 센서로 측정한 폐회로 신호는 PVDF 센서 보정 실험을 통하여 확인한 변수들을 이용하여 개회로 신호로 변환하고, 변형률 신호로 변환하였다. 복합재 T-Joint의 Web에 부착된 스트레인 게이지와 PVDF 센서의 동적 변형률을 통해 복합재 T-Joint의 Web에서 굽힘이 발생한 것을 확인하였다. 이는 수압램 시험 장치 내부에서 발생한 수압램 현상이 매우 복잡한 거동을 보이기 때문에 양쪽

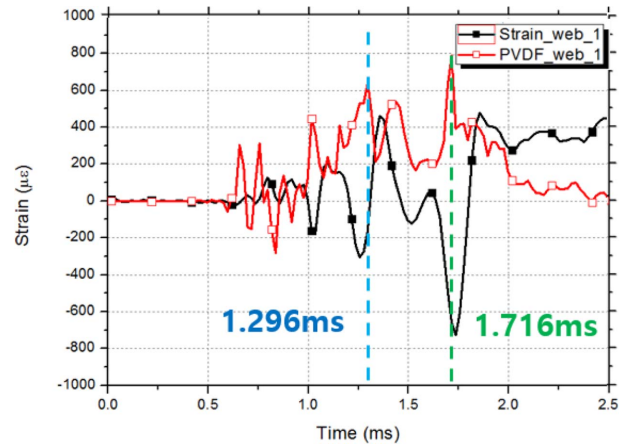


Fig. 13. Strain-time history measured by strain gauge and PVDF sensor at web

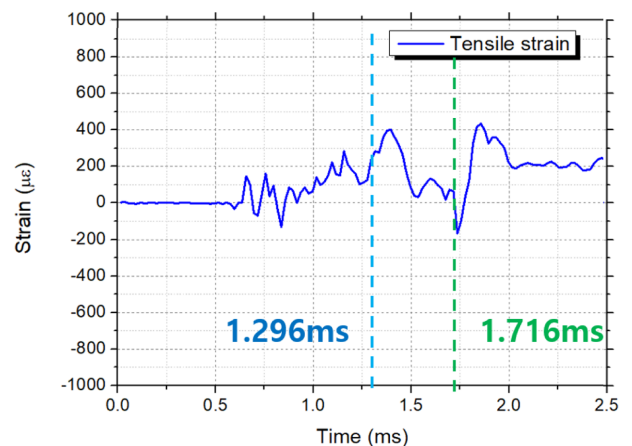


Fig. 14. Tensile strains at web



Fig. 11. Failure shape of composite T-Joint

의 Skin에 동일한 압력이 가해지지 않은 것으로 판단된다. 스트레인 게이지와 PVDF 센서로 측정한 동적 변형률은 식 (8)을 이용하여 인장 및 굽힘 변형률로 Fig. 14와 Fig. 15와 같이 변환하였다.

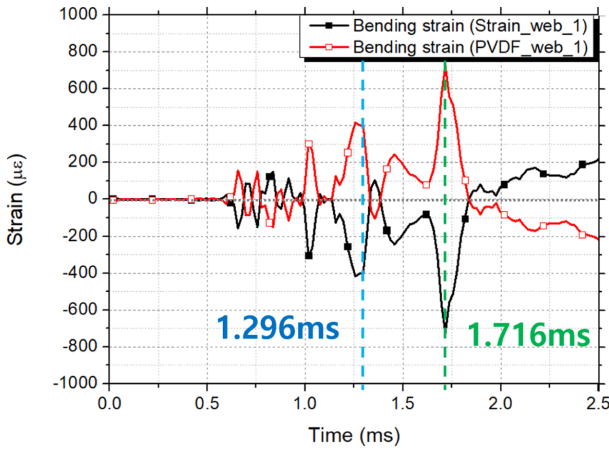


Fig. 15. Bending strains at web

$$\begin{aligned}\varepsilon_{tensile} &= (\varepsilon_{PVDF} + \varepsilon_{SG}) / 2 \\ \varepsilon_{bending} &= (\varepsilon_{PVDF} - \varepsilon_{SG}) / 2\end{aligned}\quad (8)$$

복합재 T-Joint의 Web과 Flange에서 측정한 동적 변형률을 비교하여 수압램 현상에 의한 복합재 T-Joint의 거동을 확인하였다. 복합재 T-Joint의 Flange의 동적 변형률과 Web의 굽힘 변형률을 통해 1.296 ms와 1.716 ms에서 복합재 T-Joint의 파손이 발생한 것을 확인하였으며, Strain_flange_1의 변형률이 크게 감소하는 1.296 ms에는 좌측 Flange에서, 1.716 ms에는 우측 Flange에서 파손이 발생하였다. 1.296 ms에 발생한 파손 변형률은 Strain_flange_1에서 5,227.9 $\mu\epsilon$, Strain_flange_2에서 -6,882.6 $\mu\epsilon$, Strain_flange_3에서 -6,668.3 $\mu\epsilon$ 으로 측정되었다. 또한 Web에서 굽힘 변형률이 400.5 $\mu\epsilon$ 이 발생하였으며 인장 변형률은 최대값 432.8 $\mu\epsilon$ 에 비해 55.3% 낮은 239.3 $\mu\epsilon$ 이 측정되었다. 1.716 ms에 발생한 파손 변형률은 Strain_flange_2에서 -8,928.2 $\mu\epsilon$, Strain_flange_3에서 -8058.3 $\mu\epsilon$ 으로 측정되었다. 또한 Web에서 굽힘 변형률이 725.2 $\mu\epsilon$ 으로 최대값이 발생하였으며 인장 변형률은 63.2 $\mu\epsilon$ 으로 낮게 측정되었다.

Flange에 비해 Web에서 높은 주파수의 진동이 발생하였다. 이는 수압램 현상에 의한 복합재 T-Joint의 변형시 Flange와 Web의 동적 특성에 따라 다르게 진동하는 것으로 판단된다. 따라서 수압램 현상에 의한 복합재 T-Joint의 동적 변형률을 측정할 때에는 PVDF 센서를 Web에 부착하여 실험을 수행하는 것이 유리한 것을 확인하였다.

Web의 동일한 위치에 부착된 스트레인 게이지와 PVDF 센서로 측정한 동적 변형률을 FFT(Fast Fourier Transform)한 결과는 Fig. 16과 같다. 약 12,500 Hz 보다 높은 주파수 영역에서 스트레인 게이지가 측정하지 못한 변형률을 PVDF 센서가 측정한 것을 확인하였다. 이를 통해 수압램 현상을 받는 구조물의 변형률 측정 시, PVDF 센서를 스트레인 게이지와 함께 사용한다면 보다 넓은 주파수 영역의 결과를

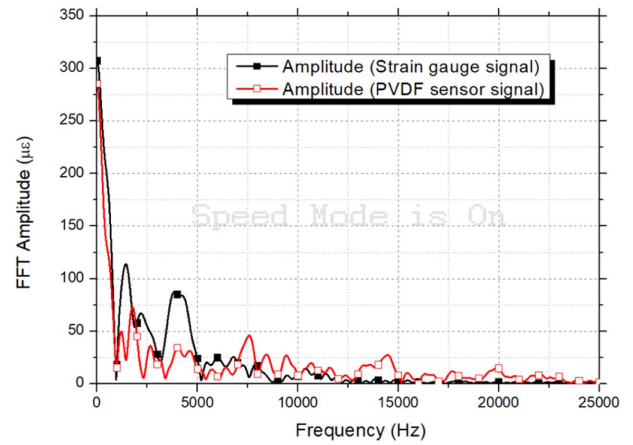


Fig. 16. FFT result for strain gauge and PVDF sensor signals at web

정확하게 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 PVDF 센서를 이용한 수압램 현상에 의한 구조물의 동적 변형률 측정을 제시하기 위해 PVDF 센서 보정 실험과 복합재 T-Joint의 수압램 시험을 수행하였다. 시편에 부착된 스트레인 게이지 신호와 PVDF 센서 신호로부터 T-Joint 체결부의 층간분리 시점과 파손하중과 관련되는 변형률 값을 측정할 수 있었다. PVDF 센서 보정 시험을 통하여 전체 회로의 정전용량과 시간 상수를 확인하였고, 수압램 현상을 모사 할 수 있는 Ram simulator로 스트레인 게이지와 PVDF 센서가 부착된 복합재 T-Joint의 수압램 시험을 수행하여 복합재 T-Joint의 동적 변형률을 측정하였다. 전하충폭기를 사용하지 않은 PVDF 센서로 측정된 폐회로 신호 전압을 변형률로 변환하고 스트레인 게이지에서 측정한 변형률과 비교하여 PVDF 센서의 수압램 현상에 의한 구조물의 동적 변형률 측정 및 손상 탐지 활용 가능성을 확인하였다. 수압램 현상을 받는 구조물의 변형률 측정 시, PVDF 센서를 스트레인 게이지와 함께 사용한다면 보다 넓은 주파수 영역의 동적 변형률 신호를 정확하게 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

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

REFERENCES

1. Czarnecki, G., Hinrichsen, R., and Maxson, M., "Joint Resistance to Ram," 2005 US Air Force T&E Days, 2005.

2. Heimbs, S., Duwensee, T., Nogueira, A.C., and Wolfrum, J., "Hydrodynamic Ram Analysis of Aircraft Fuel Tank with Different Composite T-Joint Designs," *Structures Under Shock and Impact VIII*, 2014, pp. 279-288.
3. Heimbs, S., Mierzwa, A., Duwensee, T., Dreu, C., Nogueira, A.C., May, M., Less, C., and Wolfrum, J., "Investigation of Static and Dynamic Failure Behaviour of Composite T-Joints," *Proceeding of the 4th ECCOMAS Thematic Conference on the Mechanical Response of Composites*, Azores, Portugal, Sep. 2013, pp. 25-27.
4. Varas, D., López-Puente, J., and Zaera, R., "Experimental Analysis of Fluid-Filled Aluminium Tubes Subjected to High-Velocity Impact," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, No. 1, 2009, pp. 81-91.
5. Varas, D., Zaera, R., and López-Puente, J., "Experimental Study of CFRP Fluid-Filled Tubes Subjected to High-Velocity Impact," *Composite Structures*, Vol. 93, No. 10, 2011, pp. 2598-2609.
6. Czarnecki, G., and Hinrichsen, R., "Assessment of Dynamic Skin-Spar Joint Failure Properties," *2007 US Air Force T&E Days*, 2007.
7. Kim, I.G., and Jung, S.M., "Modification of Analytical Model for the Low-Velocity Impact Detection Using Piezopolymer Sensor Signals," *Journal of the Korea Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 29, No. 2, 2001, pp. 70-76.
8. Kim, J.W., and Kim, I.G., "Detection of High-Velocity Impact Damage in Composite Laminates Using PVDF Sensor Signals," *Composites Research*, Vol. 18, No. 6, 2005, pp. 26-33.
9. Kim, J.H., and Jun, S.M., "Battle Damage Analysis of Aircraft Wing Fuel Tanks by Hydrodynamic Ram Effect," *Journal of the Korea Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 34, No. 4, 2006, pp. 17-24.
10. Kim, J.H., "Simulation of Hydrodynamic Ram of Aircraft Fuel Tank by Ballistic Penetration and Detonation," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 22, 2008, pp. 1525-1530.