

다중 디지털 영상 상관 기법과 유한요소해석을 사용한 복합재 원통형 구조물의 좌굴 현상에 대한 연구

A study on buckling behavior of composite shell using multi-DIC method and finite element analysis

초록

얇은 두께를 가진 원통형 구조물은 항공우주분야에서 많이 쓰이는 구조물이다. 우주 발사체의 많은 부분은 이러한 원통형 구조물로 이루어져 있는 것이 대표적인 예이다. 상대적으로 얇은 두께를 가진 원통형 구조물은 축 하중을 받을 때 횡 방향으로 향하는 큰 변형이 생기게 되는데 이를 좌굴 변형이라고 하며, 이는 구조물에 치명적인 손상을 주게 된다. 그러므로 발사체의 설계단계에서 원통형 구조물의 좌굴 변형에 대해 미리 검증을 진행할 필요가 있다.

본 연구에서는 탄소섬유 프리프레그로 제작된 복합재 원통형 구조물의 축 방향 압축 실험에 대해 다루었다. 실험에 사용한 복합재 원통형 구조물 시편은 3D 스캐닝 장비를 사용하여 스캔하여 구조물의 기하학적 불완전성을 계측하였다. 실험이 진행되는 동안에는 다중 DIC 시스템을 사용하여 원통형 구조물의 360도 전 영역 좌굴 변형 이미지를 기록하고 ARAMIS® 프로그램을 사용하여 분석하였다. 복합재 원통형 구조물의 축 방향 압축 시험에 대한 유한요소해석에서 실제 계측된 불완전성을 적용하여 측정된 좌굴 하중과 유사한 좌굴 하중을 계산하였다.

Key Words : Buckling, Multi-DIC method, Finite Element Analysis, Imperfection, 360° full-field measurement

서론

원통형 구조물은 항공우주 분야에서 많이 사용되고 있는 구조물 형태이다. 항공기 또는 발사체의 무게 경량화를 위해 얇은 두께를 가지지만 높은 하중을 견딜 수 있는 원통형 구조물이 요구되고 있다. 얇은 두께를 가진 원통형 구조물이 축 압축 하중을 받을 때 좌굴(Buckling)현상이 일어난다. 원통형 구조물의 좌굴 변형은 횡 방향으로 일어나는 큰 변형이며 원통형 구조물에 대해 심각한 영향을 준다. 원통형 구조물에 좌굴을 일으키는 하중을 좌굴 하중(buckling Load)이라고 한다. 원통형 구조물의 좌굴 하중과 좌굴 모드에 대해 많은 연구가 이루어졌으며 좌굴 하중은 주로 원통형 구조물의 높이, 두께, 직경 및 재료에 의해 결정된다⁽¹⁾. 원통형 구조물의 좌굴 모드로는 대칭 좌굴 모드(Axis-symmetric Mode), 비대칭 좌굴 모드(Diamond Mode), 굽힘 모드(Euler Mode), 복합 좌굴 모드(Mixed Mode) 등이 있으며 좌굴 모드 마다 최대 좌굴 하중이 다르다⁽²⁾.

원통형 구조물의 좌굴 하중은 원통형 구조물의 설계, 제작에 있어서 가장 중요한 요소이다. 원통형 구조물의 좌굴 하중을 얻기 위해 압축 시험을 통한 좌굴 하중 분석⁽³⁾, 유한요소해석을 통한 좌굴 하중 도출⁽⁴⁾, 비파괴적 방법을 통한 좌굴 하중 예측⁽⁵⁾ 등 많은 방법들이 시도되었다.

원통형 구조물의 좌굴 하중은 여러 가지 불완전성(Imperfection)의 영향을 받는다. 이론적으로 완벽한 원통형 구조물(Perfect Shell)에 비해 실제 제작된 원통형 구조물은 여러 가지 불완전성을 포함하고 있다. 구조물의 기하학적 불완전성(Geometric Imperfection)⁽⁶⁾, 하중 불완전성>Loading Imperfection)⁽⁷⁾, 보조개모양 결함(Dimple-shape Imperfection)⁽⁸⁾, 불안정한 두께 분포(Thickness Imperfection)⁽⁹⁾ 등의 영향으로 실제 제작된 원통형 구조물의 좌굴 하중은 선형해석으로 얻은 좌굴 하중 값보다 작다. NASA는 1986년에 완벽한 원통형 구조물의 좌굴 하중 대비 실제 제작된 원통형 구조물의 좌굴 하중의 비 - Knockdown Factor(KDF) ρ 에 대한 예측식을 제시하였다.

또한, 항공우주산업이 발전함에 따라 발사체 제작에 사용되는 재료도 달라지고 있다. 기존의 스테인리스강 또는 알루미늄합금보다 더 가볍고 무게 대비 에너지 흡수율(Specific Energy Absorption, SEA)이 더 높은 탄소섬유 복합재로 만들어진 발사체의 개발이 활발히 진행되고 있다.

Changzheng 5 발사체⁽¹⁰⁾, Ariane 6 발사체⁽¹¹⁾, NASA의 Marshall Space Flight Center(MSFC)에서 개발 중인 CTA8.1⁽¹²⁾ 등 발사체의 많은 부분은 탄소섬유 복합재 혹은 복합재/합금 하이브리드 재료로 만들어진 원통형 구조물이다. 따라서 복합재 원통형 구조물의 좌굴 하중과 좌굴 변형 현상에 대한 연구가 필요한 시기이다.

DIC 기법은 광학적 계측 장비를 사용한 비접촉식 변형 계측 기법이다⁽¹³⁾. 기존의 변형을 게이지, LVDT 등을 사용한 구조물의 변형 계측은 구조물과의 접촉으로 구조물에 영향을 주거나, 국부 구역의 변형 계측만 가능하다는 단점이 있다. DIC 기법은 비접촉식 광학적 변형 계측 방식으로 구조물에 영향을 주지 않고 구조물 전영역의 계측이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 원통형 구조물의 특성상 국부 좌굴(Local Buckling)이 일어나는 위치를 예측할 수 없기에 구조물의 360도 전 영역 계측이 필요하다. 비교적 큰 곡률을 가진 구조물의 전 영역 계측을 위해 다양한 방법들이 시도되었다.

Genovese의 연구에 의하면 DIC 기법을 사용하여 구조물의 360도 전 영역 변형을 계측을 진행하는 것은 주로 4가지 방법이 있다⁽¹⁴⁾. (i) 여러 대의 DIC 시스템을 측정 물체의 주위에 배치하여 동시에 계측을 진행하는 방법⁽¹⁵⁾; (ii) 단일 DIC 시스템이 측정 물체를 회전하면서 계측을 진행⁽¹⁶⁾; (iii) 측정 물체가 회전을 하면서 고정된 단일 DIC 시스템을 사용하여 계측을 진행하는 방법⁽¹⁷⁾; (iv) 측정 물체의 반사된 이미지를 얻어 전 영역에 대한 계측을 진행하는 방법이 있다⁽¹⁸⁾. 만능인장시험기를 사용하여 실험을 진행하는 특성상 물리적인 제약(Physical Constraint) 때문에 (iii)(iv) 방법을 사용하기에는 어려움이 있다. (ii) 방법은 특정 하중에서 하중을 유지시키고 카메라를 회전시켜 측정을 진행하고 실험을 계속해 나아가는 방법이기에 실험의 연속성에 영향을 준다. 또한 다른 측정 물체에 대해 새로운 카메라 회전용 레일을 제작해야 하는 등 여러 가지 제약점이 존재한다. 그러므로 여러 대의 DIC 시스템을 구조물의 주위에 배치시키고 실험을 진행하면서 연속적으로 구조물의 전 영역에 대해 계측을 진행하는 방법이 가장 효율적이고 정확한 방법이다.

본 연구는 정확한 유한요소해석(Extensive Analysis)을 통해 원통형 구조물의 실제 좌굴 하중값과 근사한 해석 결과값을 도출할 수 있는 유한요소해석 방법을 제시하기 위해 수행되었다.

본 연구에서는 3D 스캐닝 장비를 사용하여 제작된 원통형 구조물의 실제 구조적 불완전성과 하중 불완전성을 유한요소해석에 적용시켜 더욱 현실적인 해석 결과를 얻었다. 또한, 4대의 DIC 시스템을 동기화(Synchronize)시켜 축 하중을 받는 탄소섬유 복합재 원통형 구조물의 좌굴 현상을 연속적으로 계측하고 분석하였다. 복합재 원통형 구조물은 탄소섬유 프리프레그를 사용하여 제작되었으며 광학적 스캔 장비를 사용하여 제작된 원통형 구조물의 구조적 불완전성을 계측하고 유한요소해석에 적용시켜 현실적인 해석을 진행하고 유한요소해석 결과와 실험 결과를 비교분석 하였다.

본 론

본론에서는 다중 DIC 시스템을 사용하여 축 방향 하중을 받는 복합재 원통형 구조물의 360도 전영역 변형을 계측하고 분석하는 방법에 관해 서술하였다. 본 실험은 탄소섬유 프리프레그 복합재로 만들어진 복합재 원통형 구조물을 만능인장시험기(Universal Testing Machine, UTM)에 배치하고 압축하였다. 복합재 원통형 구조물의 좌굴 모드를 계측하기 위해 압축과정에서 복합재 원통형 구조물의 변형 과정을 다중 DIC 시스템을 사용하여 기록하고 변형 이미지를 ARAMIS[®] 프로그램을 사용하여 분석하였다. 또한, 실험결과를 검증하기 위해 유한요소해석을 진행하였다. 더욱 정확한 유한요소해석을 진행하기 위해, 실험에 사용된 탄소섬유 복합재의 물성을 인장 시험을 통해 얻고 유한요소해석에 적용하였다. 또한, 구조물의 불완전성은 얇은 두께를 가진 원통형 구조물의 좌굴 거동에 아주 큰 영향을 준다. 그리하여 실험을 진행하기에 앞서 3D 스캐닝 장비를 사용하여 구조물의 불완전성을 계측하고 이를 유한요소해석에 적용하였다. 마지막으로 실험결과와 유한요소해석 결과에 대해 비교분석을 진행하였다.

1. 시편 제작

1.1. 탄소섬유 복합재의 기계적 물성값 측정

본 연구에 사용된 복합재 원통형 구조물은 SKY FLEX[™]사의 WSN 03KP 200 YK51M 탄소섬유 직조

프리프레그(Woven Fabric Prepreg)를 사용하여 제작되었다. 원통형 구조물에 사용된 탄소섬유 프리프레그의 기계적 물성값을 파악하기 위해 제조사로부터 해당 재료의 기계적 물성값을 획득하였다. 하지만 경화 온도, 환경 및 성형 공정 등의 차이로 실험실 환경에서 제작된 탄소섬유 구조물의 물성은 제조사에서 측정한 재료의 물성값과 다를 수 있다. 또한, 후술할 유한요소해석에서 정확한 해석을 진행하기 위해 실제 사용된 성형 후 재료의 물성값을 파악할 필요가 있다.

탄소섬유 프리프레그의 물성값을 측정하기 위해 ASTM D3038 표준을 참고하여 물성 시험을 진행했다⁽¹⁹⁾. 그림 1과 같이 탄소섬유 프리프레그를 사용하여 길이 250mm, 너비 15mm, 두께 2.5 mm의 인장 시험용 시편이 제작되었다. 인장 시험은 핸드 레이업(Hand Lay-up) 방식으로 적층되어 진공환경에서 그림 1과 같은 온도 프로파일(Temperature Profile)을 따라 경화 되었다. 또한, 인장 시험기의 그립(Grip)이 시편에 영향을 주는 것을 방지하기 위해 그림 1과 같이 시편 보호용 탭(Tab)이 인장 시편의 양쪽 가장자리에 부착되었다. 보호용 탭은 유리섬유 복합재(Glass Fiber Reinforced Polymer)로 제작되었으며 길이 50mm, 너비 15mm, 두께 1.5mm이다. 시편 보호용 탭은 공업용 에폭시(Epoxy) 접착제를 사용하여 인장 시편에 부착되었으며 충분히 건조했다.

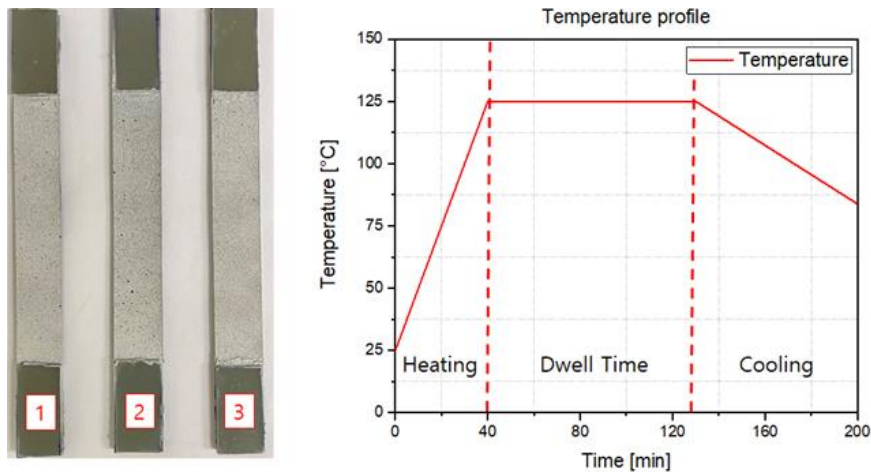


Fig. 1. 물성값 계측용 인장 시편 및 제작에 사용된 온도 프로파일

탄소섬유 프리프레그 인장 시편의 변형률을 측정하기 위해 3D DIC 시스템이 사용되었다. DIC 기법은 구조물과의 물리적 접촉 없이 계측 영역(Field of View, FOV)내의 전 영역 변형률을 계측할 수 있는 기법이다. 3D DIC 시스템은 FLIR™사의 Blackfly S USB3 카메라로 구성되었으며 렌즈 길이가 25 mm인 렌즈를 사용하였다. 변형률을 계측하기 위해 인장 시편의 표면에는 스펙클 패턴(Speckle Pattern)이 골고루 도포 되었다. 인장 시편을 만능인장시험기(Universal Testing Machine, UTM)에 장착하고 변위 제어를 통해 하중을 주었다. ASTM D3038 표준을 참고하여 2mm/min의 하중을 주었다. LabVIEW™ 프로그램을 사용하여 3D DIC 시스템을 제어하여 1초 간격으로 시편의 변형 이미지를 얻도록 하였다. 실험이 끝난 뒤 ARAMIS® 프로그램을 사용하여 변형 이미지에 대해 분석을 진행하였다.

이미지 분석을 통해 시편의 변형률을 계측하고 만능인장시험기의 로드셀(Load Cell)에서 얻은 응력 데이터와 결합시켜 그림 2와 같이 인장 시편의 응력-변형률 그래프를 얻었다. 응력-변형률 그래프의 탄성구간에서 얻은 탄소섬유 프리프레그의 인장계수는 58 GPa이며 푸아송비는 0.037, 인장강도는 570 MPa이다. 인장 시험에서 얻은 물성값과 제조사에서 얻은 물성값에 대한 비교는 표 1에 표시된 바와 같다. 표 1에서 알 수 있듯이 실제 측정된 물성값이 조금 더 낮다는 것을 알 수 있다. 이는 제조사와 서로 다른 성형 공정 또는 온도 프로파일을 사용하여 생긴 오차로 판단되며 후술할 복합재 원통형 구조물도 같은 성형 공정과 같은 온도 프로파일을 사용하여 제작되었기에 본 인장 시험에서 측정된 물성값을 후술할 유한요소해석에 적용하였다.

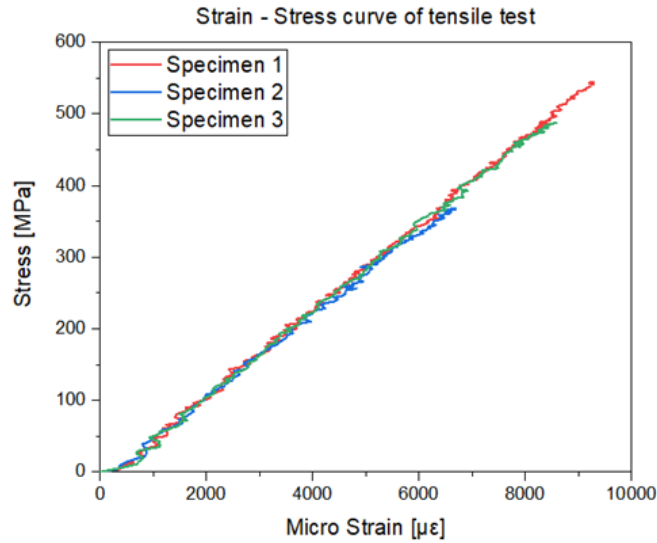


Fig. 2. 탄소섬유 복합재 인장 시편의 변형률-응력 곡선

Table. 1. 탄소섬유 복합재의 기계적 물성값

Property	Nominal*	Measured	Difference
E_1 [GPa]	72.7	58	79.8%
X_{1t} [MPa]	850	570	67.1%
ν_{12}	N/A	0.037	N/A
Data * provided from SKY FLEX™			

1.2. 탄소섬유 프리프레그 복합재 원통형 구조물 시편 제작

실험에 사용된 복합재 원통형 구조물은 원기둥형 몰드에 탄소섬유 프리프레그를 부착시키는 핸드 레이업 방식으로 제작되었다. 진공상태에서 경화를 마친 뒤 복합재 원통형 구조물과 원기둥형 몰드를 손쉽게 분리하기 위해 탄소섬유 프리프레그와 몰드 사이에 얇은 필름을 부착하고 그 위에 탄소섬유 프리프레그를 적층 시켰다⁽²⁰⁾. 적층된 원통형 구조물은 진공백(Vacum Bag)으로 배깅(Bagging)시키고 진공 펌프를 연결하여 가열챔버 속에서 경화 되었다. 경화에 사용된 온도 프로파일은 그림 1에서 사용한 것과 같다.

상술한 성형 공정을 통해 제작된 탄소섬유 복합재 원통형 구조물은 그림 3과 같다. 제작된 탄소섬유 복합재 원통형 구조물의 사이즈는 모두 지름 71.2 mm에 높이 90 mm, 두께 0.5 mm이다. 몰드에서 탈착된 원통형 구조물의 상, 하단은 사포지를 사용하여 평탄화(Flatten)시켰다. 그림에서 알 수 있듯이 원통형 구조물의 표면에 축 방향으로 배열된 주름 모양(Wrinkle) 결함이 있는 것을 확인할 수 있으며 이는 진공백 속에서 경화 되면서 생긴 결함이다. 이는 원통형 구조물의 기하학적 불완전성(Geometric Imperfection)으로 간주할 수 있으며 이는 원통형 구조물의 좌굴 하중에 영향을 준다.

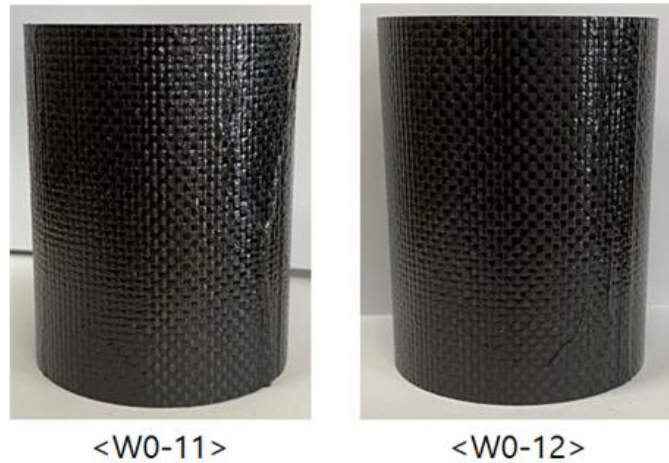


Fig. 3. 탄소섬유 복합재 원통형 구조물 시편

제작된 복합재 원통형 구조물의 기하학적 불완전성을 계측하기 위해 ATOS 광학적 계측 장비가 사용되었다. 그림 4와 같이 ATOS 시스템은 광학적 스캐닝 장비로써 스캐닝을 통해 피측정 물체의 3D 메쉬(Mesh) 파일을 얻을 수 있다⁽²¹⁾.



Fig. 4. 시편의 불완전성 계측에 사용된 3D 스캐너와 스캔 된 시편의 형상

ATOS 시스템을 사용하여 스캔된 이미지는 GOM[®] Inspect 프로그램을 사용하여 분석되었다. 스캔 된 원통형 구조물로부터 완벽한 원통형 구조물(Best-fit Shell) 사이즈를 도출하였다. 제작된 복합재 원통형 구조물의 기하학적 불완전성은 실제 제작된 원통형 구조물과 완벽한 원통형 구조물 사이의 차이(Deviation)를 가리킨다(그림 5). 분석결과로부터 원주 방향(Circumferential)과 축 방향(Axial)에서의 축심 방향 변위(Radial Displacement)를 얻을 수 있다.

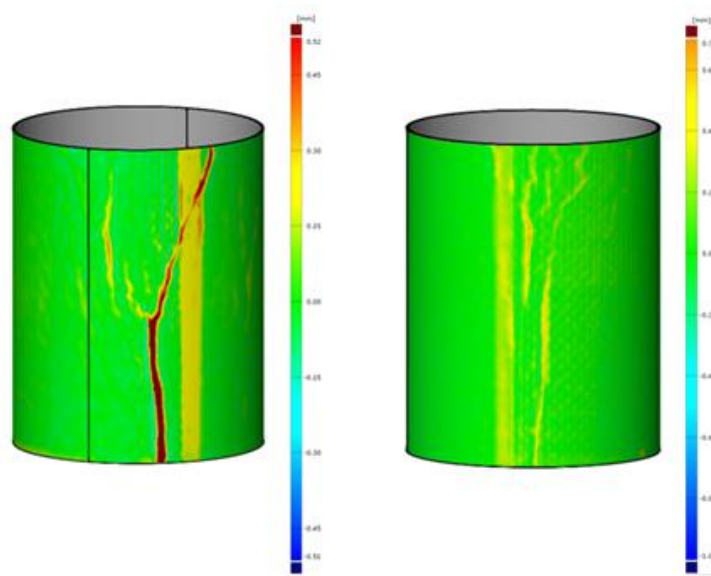


Fig. 5. 3D 스캐너를 사용하여 얻은 시편의 기하학적 불완전성

계측된 기하학적 불완전성을 표현하기 위해 많은 시도가 이루어졌으며 가장 많이 사용된 방법은 이차원 푸리에 급수(Double Fourier Series)를 사용하여 원통형 구조물 전체의 기하학적 불완전성을 표현하는 방법이다⁽²²⁻²⁵⁾. 원통형 구조물의 기하학적 불완전성은 2차원 영역에 무작위로 분포된(Two-dimensional Random Field)것으로 볼 수 있으며 이는 식 (1)로 표현할 수 있다. 2차원 푸리에 급수는 푸리에가 열방적식을 풀기 위해 도입한 것이며 2차원 영역에서의 무작위로 분포된 영역에 대한 접근(Approximation)으로 사용할 수 있다⁽²⁶⁾. 그림 6과 같이 축심 바깥 방향을 +방향으로 정했다. x축은 원통형 구조물의 축 방향이고 y축은 원주 방향을 가리킨다.

$$w(x,y) = 2t \sum_{k=0}^{n_1} \sum_{l=0}^{n_2} \cos \frac{k\pi x}{L} (A_{kl} \cos \frac{ly}{R} + B_{kl} \sin \frac{ly}{R}) \tag{1}$$

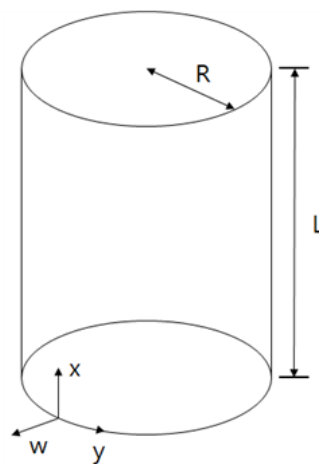


Fig. 6. 기하학적 불완전성의 표현

본 연구에서는 MATLAB[®] 프로그램을 사용하여 ATOS 시스템으로 측정된 원통형 구조물의 기하학적 불완전성을 푸리에 급수와 로 표현하는 프로그램을 구현하였다. 원통형 구조물의 높이, 반지름, 두께와 측정된 기하학적 불완전성 매트릭스를 입력하면 푸리에 급수를 얻을 수 있다.

Wagner 등은 Python[®] 프로그램을 사용하여 계산된 푸리에 급수를 사용하여 기하학적 불완전성이 포함된 유한요소해석 모델을 생성하는 방법을 제시하였다⁽¹¹⁾. MATLAB[®] 프로그램을 사용하여 계산된 복합재 원통형 구조물의 기하학적 불완전성 푸리에 급수를 입력하면 입력된 푸리에 급수가 적용된 원통형 구조물 유한요소해석 모델을 얻을 수 있다. 그림 7과 8은 측정된 복합재 원통형 구조물의 기하학적 불완전성 푸리에 급수를 사용하여 표현된 2차원 랜덤 필드(Random Field)이다. 두 이미지를 비교해보면 측정된 원통형 구조물의 기하학적 불완전성과 푸리에 급수를 사용하여 표현된 기하학적 불완전성이 매우 일치하다는 것을 알 수 있으며 푸리에 급수를 사용하여 원통형 구조물의 기하학적 불완전성을 표현하는 방법은 정확성이 높다는 것을 알 수 있다.

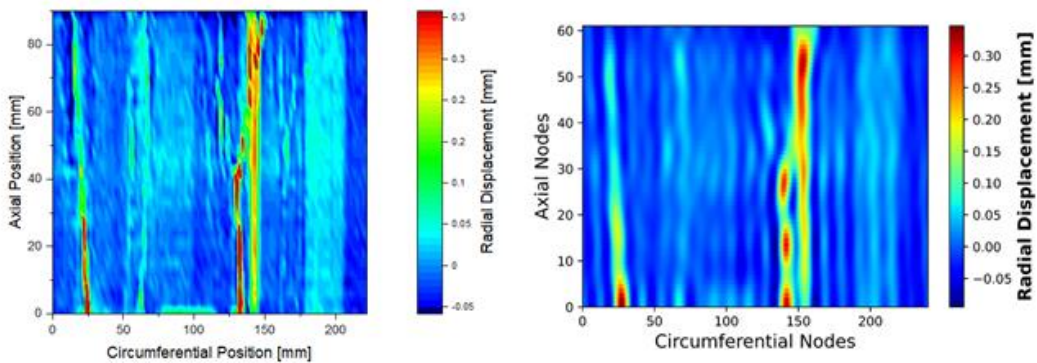


Fig. 7. W0-11 시편의 측정된 기하학적 불완전성과 푸리에 급수로 표현된 기하학적 불완전성

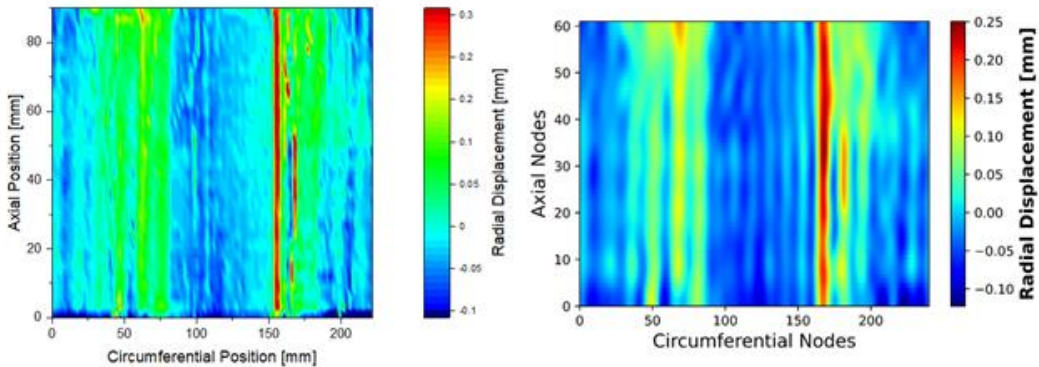


Fig. 8. W0-12 시편의 측정된 기하학적 불완전성과 푸리에 급수로 표현된 기하학적 불완전성

복합재 원통형 구조물은 제작된 뒤 사포지를 사용하여 원통형 구조물의 가장자리를 평탄화(Flattening) 시키는 작업을 거쳤다. 하지만 수작업으로 이루어진 평탄화 작업은 오차가 생기기 마련이다. 평탄하지 않은 원통형 구조물이 평탄한 플레이트의 압축을 받을 때 그림 9와 같이 압축(Compression) 하중과 굽힘(Bending) 하중의 복합 하중을 받게 된다. 이는 원통형 구조물에 응력집중(Stress Concentration)형상이 생기게 되며 이는 하중 불완전성>Loading Imperfection)으로 볼 수 있다.

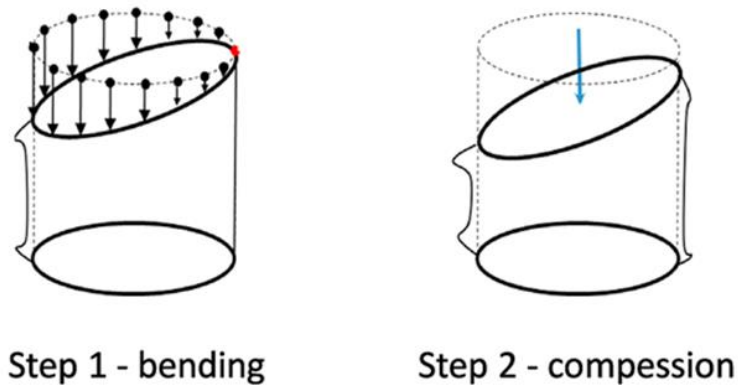


Fig. 9. 하중 불안전성의 정의

본 연구에서는 ARAMIS[®] 프로그램을 사용하여 이러한 하중 불안전성을 계측하였다. 그림 10에서 하늘색 평면(Plane 1)은 전역 좌표계의 XZ 평면을 평행이동 시킨 것이며 녹색 평면(Plane 2)은 복합재 원통형 구조물의 가장자리의 세 개의 점으로 이루어진 평면(3-point Plane)이다. 이 두 평면 사이의 각도를 측정하여 경계면 섭동 각도(Boundary Perturbation Angle)를 측정하였다. W0-11 복합재 원통형 구조물의 하중 불안전성 각도는 0.27°이고 W0-12 복합재 원통형 구조물의 하중 불안전성 각도는 0.4°이다. 이러한 하중 불안전성도 함께 고려하여 후술할 유한요소해석에 적용시켜 더욱 정확한 해석을 진행하였다.

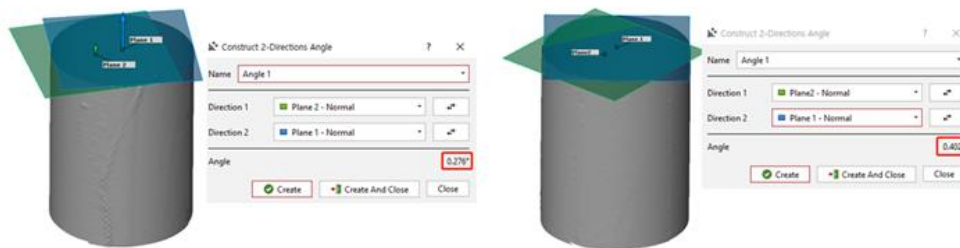


Fig. 10. 계측된 하중 불안전성

2. 탄소섬유 복합재 원통형 구조물의 축 방향 압축 시험

2.1. 시험장치 설치 및 시험방법

본 시험에 사용되는 시험 장치는 그림 11과 같이 만능인장시험기(Universal Testing Machine), 다중 DIC 시스템 그리고 제어용 컴퓨터이다. 만능인장시험기는 MTDI[™]사의 MINOS-100 모델을 사용하였으며 만능인장시험기가 줄 수 있는 최대 하중은 10,000 kgf이다. 다중 DIC 시스템은 4개의 3D DIC 시스템으로 구성되어 있으며 8대의 FLIR[™]사의 Blackfly S USB3 카메라가 사용되었다. 해당 카메라는 2448×2048픽셀의 해상도를 가지고 있으며 정밀한 계측이 필요한 본 실험의 요구에 부합된다. 비교적 큰 계측 영역을 위해 25mm의 렌즈 길이를 가진 렌즈를 사용하였다.

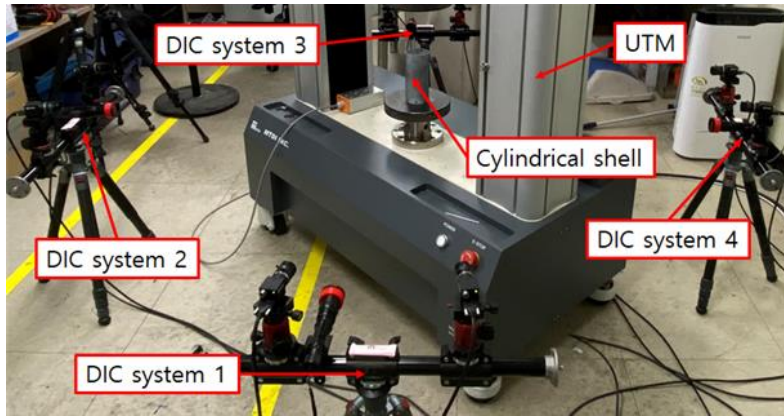


Fig. 11. 원통형 구조물의 축방향 압축 시험 장치

DIC 시스템을 사용하여 복합재 원통형 구조물의 변형을 계측하기 위해 시편의 표면에는 흰색 및 검은색의 스페클 패턴(Speckle Pattern)이 도포 되었다. 이론값에 의하면 스페클 패턴의 사이즈는 0.53 mm보다 작아야 한다⁽²⁷⁾. 그림 12는 스페클 패턴이 도포된 복합재 원통형 구조물이며 그림에서 알 수 있듯이 스페클 패턴이 균일하게 도포되어 있다는 것을 알 수 있다.



Fig. 12. 스페클 패턴을 도포한 복합재 원통형 구조물 시편

시험 준비를 마친 뒤 복합재 원통형 구조물을 만능인장시험기의 플레이트의 중심에 놓고 압축 시험을 진행하였다. 만능인장시험기는 제어용 컴퓨터를 사용해 제어되었다. 준 정적(Quasi-static) 하중을 주기 위해 0.1mm/min의 변위 제어 방법으로 하중을 주었다.

실험이 시작되는 동시에 다중 DIC 시스템을 사용하여 복합재 원통형 구조물의 변형 이미지를 기록하였다. 다중 DIC 시스템은 제어용 컴퓨터의 LabVIEW™ 프로그램을 사용하여 1초 간격으로 변형 이미지를 얻도록 설정되었다(그림 13). 실험이 끝난 뒤 복합재 원통형 구조물의 변형 이미지는 ARAMIS® 프로그램을 사용하여 분석되었다.



Fig. 13. LabVIEW™ 프로그램을 사용하여 다중 DIC 시스템 제어

2.2. 다중 DIC 시스템을 사용한 360도 전영역 변형 계측

다중 DIC 시스템에서 각각 얻은 이미지들은 서로 다른 각도에서 얻은 이미지들이기에 360도 전영역 계측을 위해서 이들을 같은 좌표계(Coordinate)에서 같이 분석을 진행할 필요가 있다. 이들을 하나의 좌표계로 통합시키기 위해서 변형이 생기지 않는 하나의 강체(Rigid Body)를 참조물로 설정하고 여러 각도에서 얻은 이미지들을 참조물을 기준으로 배치하는 방법을 사용하였다. 본 실험에서는 복합재 원통형 구조물을 지지하는 만능인장시험기의 플레이트를 강체로 선택하였다. 참조물에 참조점(Reference Point)을 부착하고 변형 이미지를 촬영하면 ARAMIS® 소프트웨어에서 이 참조점들을 사용하여 강체 포인트 클라우드(Rigid Point Cloud)를 생성할 수 있다. 이 강체 포인트 클라우드를 참조로 여러 각도에서 촬영된 이미지들을 같은 좌표계로 배치할 수 있다. 그림 14는 여러 각도에서 얻은 복합재 원통형 구조물의 이미지를 하나의 분석결과로 접합시키는 방법을 나타내었다. 만능인장시험기의 플레이트에 참조점들을 부착하고 구조물의 변형 이미지를 얻는다. 그리고 이 참조점들을 사용하여 강체 포인트 클라우드를 생성하고 이를 기준으로 여러 각도에서 촬영된 이미지들을 하나의 좌표계로 병합시켜 복합재 원통형 구조물의 360도 전영역 변형을 계측할 수 있게 하였다.

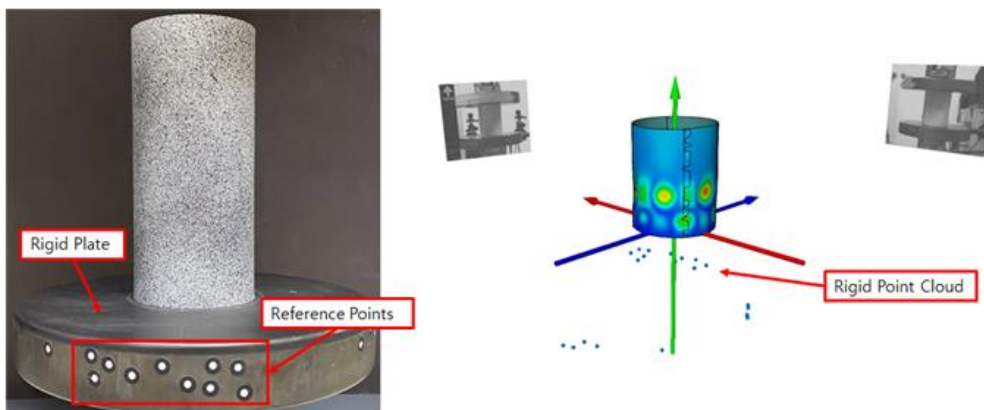


Fig. 14. 다중 DIC 시스템을 사용한 원통형 구조물의 전 영역 변형 계측

3. 유한요소해석

3.1. 선형 좌굴 해석

복합재 원통형 구조물의 압축 시험에 대한 유한요소해석을 진행하기 위해 ABAQUS CAE/Standard 프로그램이 사용되었다. 원통형 구조물은 3D 쉘 요소인 S4R 요소(Element)를 사용하여 모델링 되었으며 구조물의 크기는 표 2-2에 표시된 실제 원통형 구조물의 크기와 같게 모델링 되었다. 원통형 구조물 모델의 메쉬(Mesh) 사이즈는 보다 작은 1.5 mm를 사용함으로써 해석 정확도를 향상시키고 계산 시간을 줄였다⁽²⁸⁾. 유한요소해석에 적용된 탄소섬유 프리프레그의 물성값은 앞서 측정한 물성값을 적용하였다. 그림 15와 같이 선형 좌굴 해석 모델을 구축하고 해석을 진행하였다.

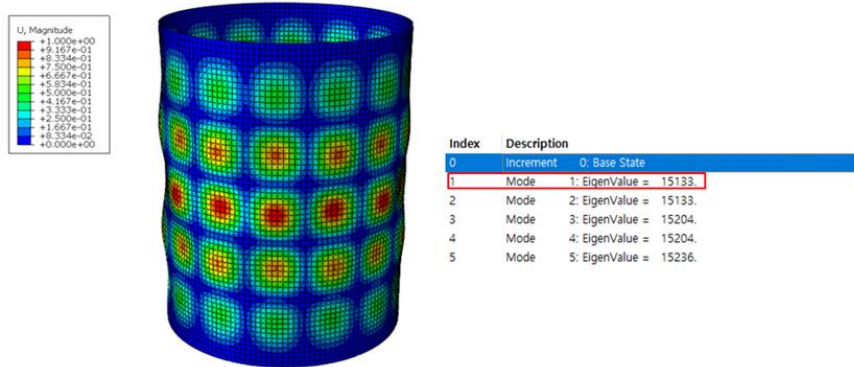


Fig. 15. 복합재 원통형 구조물의 선형 좌굴 해석

3.2. 기하학적 불완전성이 적용된 비선형 해석 모델

ATOS 시스템을 사용하여 측정된 복합재 원통형 구조물의 푸리에 급수와 Wagner 등이 개발한 Python[®] 스크립트를 사용하여 실제 계측된 기하학적 불완전성이 적용된 유한요소해석 모델을 얻었다. 그림 16은 기하학적 불완전성이 적용된 유한요소해석 모델이며 예시를 위해 기하학적 불완전성을 50배로 적용하였다. 기하학적 불완전성이 적용된 원통형 구조물은 축방향으로 61, 원주 방향으로 240 도합 14640개의 요소(Element)로 이루어졌다. 만능인장시험기의 상하 플레이트는 100×100 mm² 크기의 3D 강체 쉘 요소인 R3D4 요소를 사용하여 모델링 되었다. 강체 플레이트는 유한요소해석에 큰 영향을 주지 않으므로 10mm로 메쉬 되었다. 적용된 탄소섬유 프리프레그 복합재의 물성값은 선형 해석에서 사용된 값과 같은 값을 적용하였다. 0.01 스텝 타임(Step Time)동안 1.5mm 압축 되도록 하였다. 상단 플레이트의 중심점을 참조점(Reference Point)으로 지정하고 해석이 진행되는 동안 변위와 하중 데이터를 모니터링하였다.

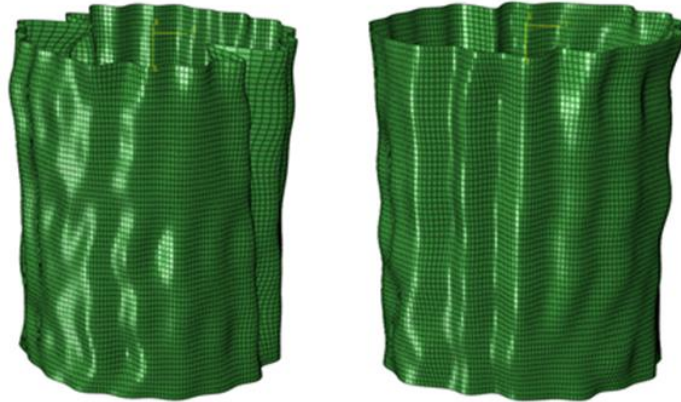


Fig. 16. 기하학적 불완전성이 적용된 비선형 유한요소해석모델

3.3. 하중 불완전성이 적용된 비선형 해석 모델

완벽한 원통형 구조물에 하중 불완전성을 적용하기 위해 다음과 같은 방법이 사용되었다. 원통형 구조물의 가장자리 부분은 그림 17과 같은 모습으로 커팅(Cutting)되어 가장자리 부분이 평탄하지 않은 유한요소해석모델을 모델링 하였다. 하중 불완전성을 제외한 다른 부분들은 모두 3.2와 같이 적용해 비선형 유한요소해석을 진행하였다.

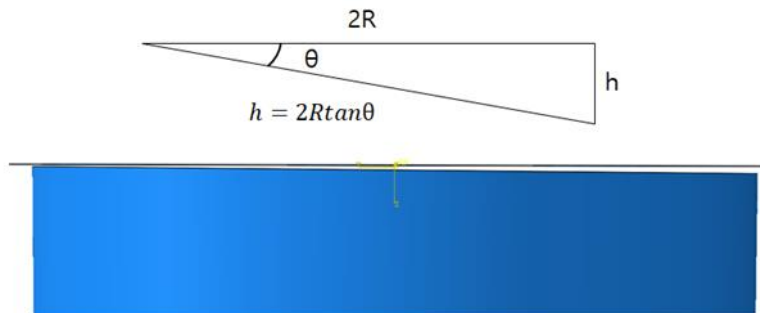


Fig. 17. 하중 불완전성이 적용된 비선형 유한요소해석모델

3.4. 복합적(combined) 불완전성이 적용된 비선형 해석 모델

기하학적 불완전성이 적용된 유한요소 모델의 파트(Part)는 Python® 스크립트로 생성이 될 때 메쉬(Mesh)가 되어서 생성되기에 (Orphan Mesh) 3.3과 같이 가장자리 부분을 제거하는 방법으로 하중 불완전성을 적용할 수 없기에 노드(Node) 파일을 수정하여 복합 불완전성을 적용했다(그림 18).

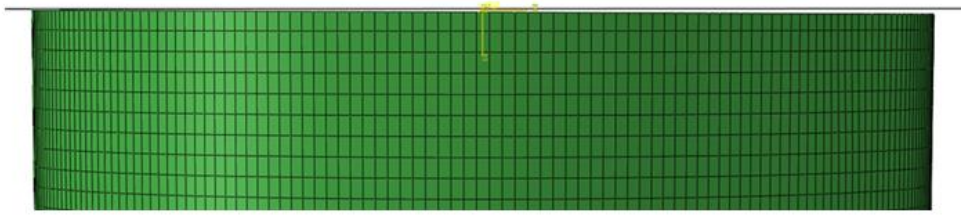


Fig. 18. 복합적 불안전성이 적용된 비선형 유한요소해석모델

4. 결과 및 분석

4.1. 유한요소해석 결과 및 실험결과와의 비교 분석

기하학적 불안전성이 좌굴 하중에 주는 영향을 분석하기 위해 그림 19와 같이 선형 해석 결과(파란색 점선)와 기하학적 불안전성이 적용된 구조물의 해석결과(빨간색 점선), 그리고 실험결과(파란색 실선)를 비교 분석하였다. 그림 19에서 알 수 있듯이 기하학적 불안전성은 구조물의 좌굴 하중에 큰 영향을 준다. 그림 19(a)에서 복합재 원통형 구조물에 대한 선형 좌굴 해석 결과는 15.1 kN이고 기하학적 불안전성이 포함된 원통형 구조물의 좌굴 하중은 13.8 kN이다(8.7% 감소). 그림 19(b)에서 기하학적 불안전성이 포함된 원통형 구조물의 좌굴 하중은 14 kN이다(7.3% 감소).

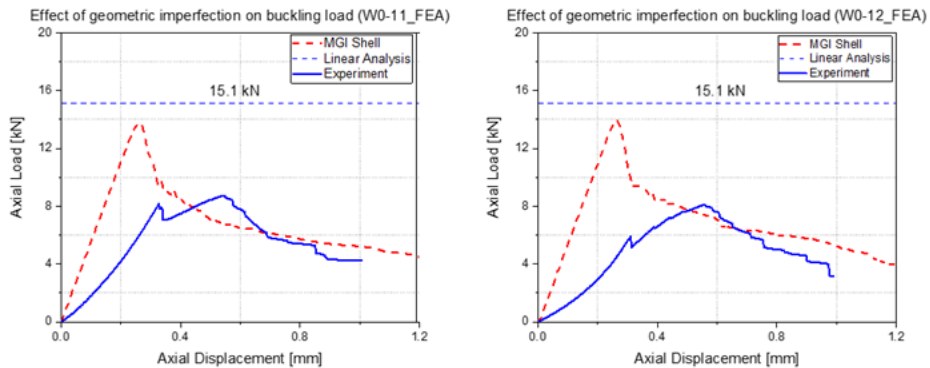


Fig. 19. 실험 결과와 유한요소해석 결과 비교 (기하학적 불안전성을 포함한 해석)

하중 불안전성이 좌굴 하중에 주는 영향을 분석하기 위해 그림 20과 같이 비교 분석을 진행하였다. 선형 해석 결과 (파란색 점선)와 하중 불안전성이 적용된 완벽한 구조물의 해석결과(빨간색 점선), 그리고 실험결과 (파란색 실선)를 비교 분석하였다. 그림 20(a)에서 하중 불안전성이 포함된 원통형 구조물의 좌굴 하중은 10.4 kN이다 (선형 해석 결과 대비 31.1% 감소). 그림 20(b)에서 하중 불안전성이 포함된 원통형 구조물의 좌굴 하중은 6.6 kN이다(선형 해석 결과 대비 56.3% 감소). 그림에서 알 수 있듯이 하중 불안전성은 구조물의 좌굴 하중뿐만 아니라 구조물의 축방향 변형 특성(Axial Displacement Signature)에도 영향을 준다는 것을 알 수 있으며 또한, 국부 좌굴 현상이 계측되었다. 이는 하중 불안전성의 복합 하중이 구조물의 한쪽에 응력 집중 현상을 일으키게 하였으며 이는 좌굴 하중의 감소뿐만 아니라 구조물의 변형 특성에도 영향을 주었다고 분석할 수 있다. 또한, 그림 20(b)의 강성 감소 현상이 20(a)보다 더 심하다는 것을 알 수 있으며 이는 하중 불안전성 각도가 커짐에 따라 변형 특성에 더 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

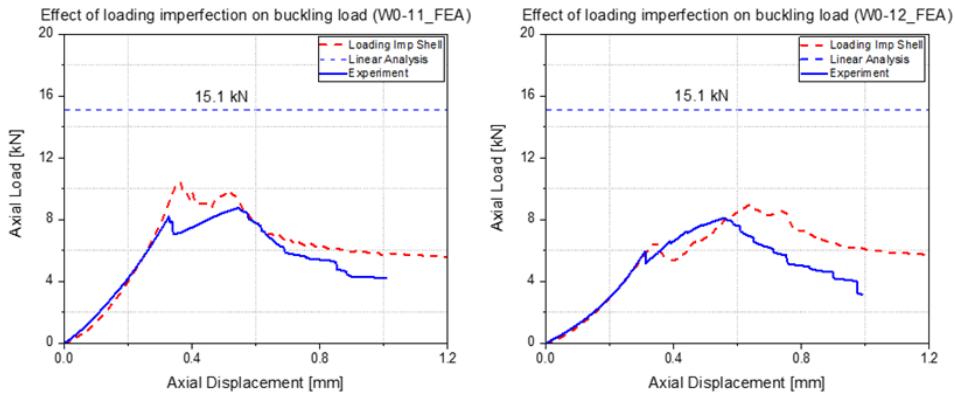


Fig. 20. 실험 결과와 유한요소해석 결과 비교 (하중 불완전성을 포함한 해석)

기하학적 불완전성과 하중 불완전성이 동시에 구조물에 주는 영향을 분석하기 위해 그림 21과 같이 비교 분석을 진행하였다. W0-11 원통형 구조물의 경우 선형 해석 결과 대비 좌굴 하중은 51% 감소하였으며 실험결과와 매우 일치한 변형 그래프를 보여준다. W0-12 원통형 구조물의 경우 선형 해석 결과 대비 좌굴 하중은 58.3% 감소하였으며 실험결과와 일치한 변형 그래프를 보여준다.

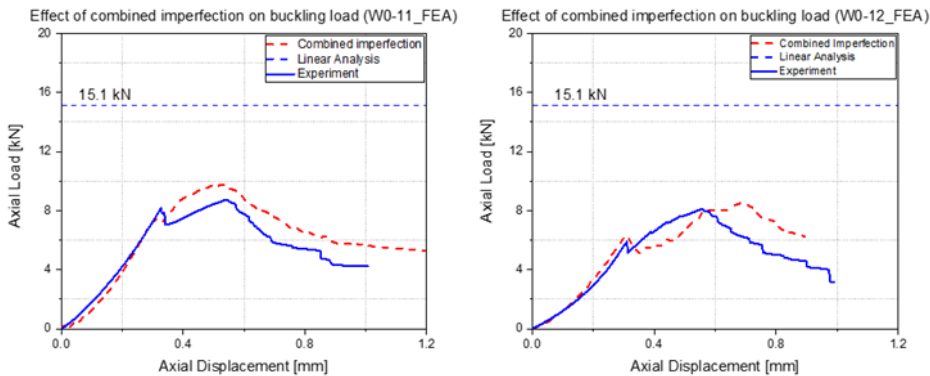


Fig. 21. 실험 결과와 유한요소해석 결과 비교 (복합적 불완전성을 포함한 해석)

결론

본 연구는 탄소섬유 프리프레그 복합재 원통형 구조물의 축 방향 압축 시험과 유한요소해석을 통해 복합재 원통형 구조물의 좌굴 하중을 도출하고 불완전성이 원통형 구조물에 주는 영향을 분석하였다. 실험실에서 제작된 복합재 원통형 구조물을 만능인장시험기를 사용하여 준 정적 압축 시험을 진행하였으며 다중 DIC 시스템을 사용하여 원통형 구조물의 360도 전영역 변형을 계측하고 분석하였다. 또한, 복합재 원통형 구조물의 압축 시험에 대해 유한요소해석을 진행하고 실험결과와 비교 분석을 진행하였다. 더욱 정확한 유한요소해석을 위해 실제 계측된 원통형 구조물의 기하학적 불완전성과 하중 불완전성을 유한요소해석에 적용해 더욱 정확한 해석을 진행하였으며 사용된 탄소섬유 프리프레그의 기계적 물성값도 실험을 통해 측정하고 유한요소해석에 적용되었다.

압축 시험 결과에서 볼 때 W0-11과 W0-12 원통형 구조물 모두 국부 좌굴 현상이 계측되었으며 유한요소해석 결과와 비교해 봤을 때 이것은 하중 불완전성 때문에 생긴 응력 집중 현상이라는 것을 알 수 있다. 유한요소해석 결과로부터 구조물의 기하학적 불완전성은 좌굴 하중에만 영향을 주고 구조물의 강성에는 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다. 하지만 구조물의 하중 불완전성은 구조물의 좌굴

하중뿐만 아니라 구조물의 강성에도 영향을 주며 국부 좌굴 현상까지 일으킨다는 것을 알 수 있다. 또한, 하중 불완전성의 크기(각도)가 매우 작았음에도 구조물에 주는 영향은 아주 심각하다. 이로써 하중 불완전성이 구조물에 주는 영향은 기하학적 불완전성보다 더욱 치명적이라는 것을 알 수 있다. 이러한 기하학적 불완전성과 하중 불완전성을 모두 적용한 유한요소해석 결과는 실험결과와 매우 유사한 결과를 보여주며 이로써 복합재 원통형 구조물에 대해 정확한 해석을 진행하였다는 것을 검증하였다.

본 연구에서 제시된 정확한 유한요소해석 방법은 실제 실험결과와 매우 일치한 결과를 보여 주었으며 다중 DIC 시스템을 사용한 원통형 구조물의 360도 전영역 계측은 축 하중을 받는 원통형 구조물의 국부 좌굴 변형을 정확히 계측하였다. 이로써 비행체의 설계 단계에서 구조물의 여러 가지 불완전성을 미리 측정할 수 있다면 정확한 유한요소해석을 통해 구조물의 좌굴 하중과 강성 및 국부 좌굴이 생기는 위치 등을 미리 판단할 수 있으며 최소한의 실험을 통해 이를 검증할 수 있으며 다중 DIC 시스템을 사용하여 구조물의 360도 전영역의 변형을 계측할 수 있다.

참고문헌

- [1] Guillow, S. R., G. Lu, and R. H. Grzebieta. "Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes." *International Journal of Mechanical Sciences* 43.9: 2103-2123. 2001.
- [2] Eyvazian, Arameh, et al. "Axial crushing behavior and energy absorption efficiency of corrugated tubes." *Materials & Design (1980-2015)* 54: 1028-1038. 2014.
- [3] Bardi, F. C., and S. Kyriakides. "Plastic buckling of circular tubes under axial compression—part I: experiments." *International journal of mechanical sciences* 48.8: 830-841. 2006.
- [4] Bardi, F. C., S. Kyriakides, and H. D. Yun. "Plastic buckling of circular tubes under axial compression—part II: analysis." *International journal of mechanical sciences* 48.8: 842-854. 2006.
- [5] Kalnins, Kaspars, et al. "Experimental nondestructive test for estimation of buckling load on unstiffened cylindrical shells using vibration correlation technique." *Shock and Vibration* 2015. 2015.
- [6] Arbocz, Johann, and C. D. Babcock Jr. "Experimental investigation of the effect of general imperfections on the buckling of cylindrical shells." 1968.
- [7] Wagner, H. N. R., C. Hühne, and M. Janssen. "Buckling of cylindrical shells under axial compression with loading imperfections: An experimental and numerical campaign on low knockdown factors." *Thin-Walled Structures* 151: 106764. 2020.
- [8] Wang, Bo, et al. "Experimental validation of cylindrical shells under axial compression for improved knockdown factors." *International Journal of Solids and Structures* 164: 37-51. 2019.
- [9] Lyssakow, P., et al. "Contactless geometric and thickness imperfection measurement system for thin-walled structures." *Measurement* 150: 107038. 2020.
- [10] Wagner, H. N. R., and Christian Hühne. "Robust knockdown factors for the design of cylindrical shells under axial compression: potentials, practical application and reliability analysis." *International Journal of Mechanical Sciences* 135: 410-430. 2018.
- [11] Wagner, H. N. R., et al. "Buckling analysis of an imperfection-insensitive hybrid composite cylinder under axial compression—numerical simulation, destructive and non-destructive experimental testing." *Composite Structures* 225: 111152. 2019.
- [12] Schultz, Marc R., et al. "Test and analysis of a buckling-critical large-scale sandwich composite cylinder." *AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. 2018.
- [13] Pan, Bing, et al. "Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review." *Measurement science and technology* 20.6: 062001. 2009.

- [14] Genovese, K., et al. "A 360-deg digital image correlation system for materials testing." *Optics and Lasers in Engineering* 82: 127–134. 2016.
- [15] Dufour, John-Eric, François Hild, and Stéphane Roux. "Shape, displacement and mechanical properties from isogeometric multiview stereocorrelation." *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 50.7: 470–487. 2015.
- [16] Heuer, Frank, Hendrik Schmidt, and Hans-Joachim Wilke. "The relation between intervertebral disc bulging and annular fiber associated strains for simple and complex loading." *Journal of biomechanics* 41.5: 1086–1094. 2008.
- [17] Asundi, Anand Krishna, Chi-Shing Chan, and Sajan R. Marokkey. "360-deg profilometry: new techniques for display and acquisition." *Optical Engineering* 33.8: 2760–2769. 1994.
- [18] Genovese, Katia, et al. "Digital image correlation-based point-wise inverse characterization of heterogeneous material properties of gallbladder in vitro." *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 470.2167: 20140152. 2014.
- [19] ASTM D3038–93(2018), Standard Test Method for Drop Shatter Test for Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org
- [20] Ning, Xin, and Sergio Pellegrino. "Experiments on imperfection insensitive axially loaded cylindrical shells." *International Journal of Solids and Structures* 115: 73–86. 2017.
- [21] Schillo, Conny, Dirk Röstermundt, and Dieter Krause. "Experimental and numerical study on the influence of imperfections on the buckling load of unstiffened CFRP shells." *Composite Structures* 131: 128–138. 2015.
- [22] Dancy, R., and D. Jacobs. "The initial imperfection data bank at the Delft University of Technology: Part II." Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, Report LR-559. 1988.
- [23] Arbocz, J., and J. M. A. M. Hol. "Collapse of axially compressed cylindrical shells with random imperfections." *Thin-walled structures* 23.1–4: 131–158. 1995.
- [24] Ding, Xiaoli, Richard Coleman, and J. Michael Rotter. "Technique for precise measurement of large-scale silos and tanks." *Journal of Surveying Engineering* 122.1: 14–25. 1996.
- [25] Brar, Gurinder Singh, Yogeshwar Hari, and Dennis K. Williams. "Axially compressed cylindrical shells containing asymmetric random imperfections: fourier series technique and ASME section VIII division 1 and 2 rules." *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Vol. 48777. 2008.
- [26] Kriegesmann, Benedikt. Probabilistic design of thin-walled fiber composite structures. Diss. Technische Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek Hannover (TIB), 2012.
- [27] Jin, Tailie(2013), "A study on measuring thermal deformation of metallic and composite material structures using digital image correlation technique", Ph.D dissertation, Konkuk University.
- [28] Wullschleger, L., and H-R. Meyer-Piening. "Buckling of geometrically imperfect cylindrical shells—definition of a buckling load." *International Journal of Non-Linear Mechanics* 37.4–5: 645–657. 2002.