

첨단 복합재 항공기 설계시 확률적 접근을 통한 미시역학적 설계 강도기준 정립

1. 서론

대부분의 복합재 구조물에 대한 설계 과정에서 정적 강도 예측에는 최대 응력 및 변형률 이론과 Tsai에 의한 이론 등의 거시역학적 파손 이론이 사용되고 있다. 하지만 최근에는 복합재료의 섬유 또는 기지에 대한 미시적 수준의 파손을 예측하기 위해 Hashin과 Sun, Gosse 등에 의해 미시역학적 파손 이론이 제시되었으며, 특히 Gosse에 의해 제시된 Strain Invariant Failure Theory (SIFT)의 경우는 실제로 Boeing사에서 복합재료의 파손 예측 기법으로 적용하는 단계에 있다[11,12].

SIFT에서는 변형률 증폭계수(strain amplification factor)가 매우 중요한 파라미터로 사용된다. 변형률 증폭계수는 복합재료의 미시역학 개념으로의 도입을 위해 사용되는 파라미터로, 복합재 플라이에 대한 거시적 수준의 변형률을 섬유 혹은 기지에 대한 미시적 수준의 변형률로 변환해주는 도구이다. 변형률 증폭계수를 얻기 위해서는 복합재료의 섬유 및 기지에 대한 미시적 수준의 유한요소 모델링 및 해석이 필요하다. 모델링 단계에서는 사각(square), 육각(hexagonal), 다이아몬드(diamond)와 같은 3가지의 이상적인 섬유배열 형태가 가정된다. 하지만 실제 단일방향 복합재 플라이의 단면형상의 경우 무작위(random)의 섬유배열 형태를 갖기 때문에 이상적인 섬유배열 형태로의 가정은 실제 복합재료에 대한 미시적 수준의 해석에서 불확실성을 포함할 수밖에 없다. 이에 따라 본 논문에서는 미시역학적 파손 해석에 있어서 실제 섬유배열 형태를 고려하기 위한 확률적인 접근방법을 제시하고자 한다. 복합재 원공 시편 모델에 대하여 Multi-scale 해석 기법을 기반을 둔 미시적 파손해석이 수행되었으며, 파손이론으로는 Gosse에 의해 제시된 SIFT가 사용되었다. 확률분포해석을 위해 세 가지 종류의 이상적 배열 형태에 따른 미시적 수준의 유한요소 모델링이 수행되었으며, 각 모델에 대한 변형률 증폭계수가 산출되었다. 또한 섬유배열 형태에 따른 미시적 파손지수들이 산출되었으며, 각 데이터에 대한 확률분포 특성을 바탕으로 전체 배열 형태의 조합으로 고려된 단 하나의 미시적 파손지수를 정의하였다.

2. Strain Invariant Failure Theory (SIFT)

최근에는 보다 정확한 파손 예측을 위해 거시역학(macro-mechanics) 개념에서 미시역학(micro-mechanics) 개념으로의 연구가 진행되고 있다. Gosse와 Christensen[2001]은 복합재료의 3차원 파손 이론인 Strain Invariant Failure Theory를 제시하였다.

SIFT는 미시역학 개념에서 복합재 구조물의 섬유와 기지에 대한 각기 파손 기준식을 정의하며, 두 종류의 변형률 불변량 값을 통하여 파손을 예측한다. 하나는 체적 변형률(volumetric strain)으로 정의되고, 다른 하나는 von-Mises 변형률 또는 등가 변형률(equivalent strain)로 정의된다. 각각의 변형률 불변량 값은 복합재료의 거시적-미시적 관계

를 나타내는 변형률 증폭 계수(strain amplification factor)를 통하여 미시역학적 값인 유효 변형률 불변량(effective strain invariant)으로 수정되고 파손 기준식에 적용된다. SIFT의 복합재 파손 기준식은 섬유 또는 기지 상에 따라서 다음 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_1^i \geq J_{1-crit}^i \quad \text{or} \quad \varepsilon_{eq}^i \geq \varepsilon_{eq-crit}^i \quad (18)$$

여기서, i 는 f (fiber) 또는 m (matrix)를 나타내며, $-crit$ 는 해당 변형률 불변량의 임계값을 의미하며, 두 기준 중 하나를 만족 시 파손으로 정의된다.

3. 복합재료의 거시적-미시적 해석

SIFT와 같은 미시역학적 파손 해석 기법은 복합재료의 거시적-미시적 관계를 사용하여 적층판 또는 플라이의 macro-scale의 거동을 바탕으로 섬유 또는 기지에 대한 micro-scale 단계의 거동을 예측하고 이를 파손 해석에 적용하게 된다. 본 논문에서는 가장 이상적이고 간단하게 섬유와 기지를 나타낼 수 있는 RVE (representative volume element)를 미시역학 모델로 사용하였다. RVE는 섬유의 배열 형태에 따라 사각(square), 육각(hexagonal), 다이아몬드(diamond) 배열 형태로 정의할 수 있다[12,13].

변형률 증폭계수는 세 가지 종류의 RVE 모델의 유한요소 해석을 통해 얻어진다. 유한요소 모델링과 해석은 상용 프로그램인 MSC.Patran/Nastran을 사용하였으며 사각 섬유배열에 대한 RVE의 유한요소 해석 결과는 Fig. 1과 같다. 이때 사용된 복합재료는 카본-에폭시 계열의 IM7/K3B 이다.

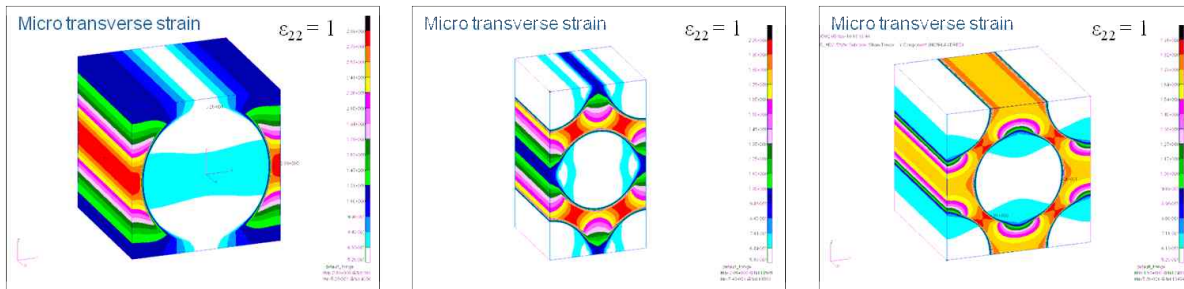


Fig. 1 섬유배열 형태에 따른 RVE의 유한요소 해석 결과

변형률 증폭계수는 섬유배열 형태에 따라 다르게 나타나며 특히 하중 방향에 따라 서로 다른 정도의 차이가 달라지는 것을 확인할 수 있다. 섬유배열 형태에 따라 변형률 증폭계수가 상이하게 나타나면 미시적 변형률에 따른 파손해석 결과 역시 다른 경향을 나타낼 수 있다. 이와 같은 섬유배열에 따른 불확실성을 고려하기 위해서는 실제 배열형상을 구현하는 방법이 필요하지만 해석시간 및 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 확률적 접근을 통하여 전체 섬유배열 형태의 경향성을 고려하는 기법을 제안하고자 한다.

4. SIFT 기반의 복합재 파손 해석에 관한 확률적 접근 방법

4.1 해석 모델

본 논문에서는 해석 모델로 원공이 있는 복합재 인장 시편 모델이 사용되었다. 해석에 사용된 복합재료는 탄소-에폭시 계열의 IM7/K3B이며, 적층 순서는 $[45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ]_s$ 이다. 복합재 원공 시편 모델에 대한 유한요소 모델링 결과는 Fig. 2와 같으며, 90° 적층각을 갖는 layer 2에 대한 변형률 분포 결과는 Fig. 3과 같다.

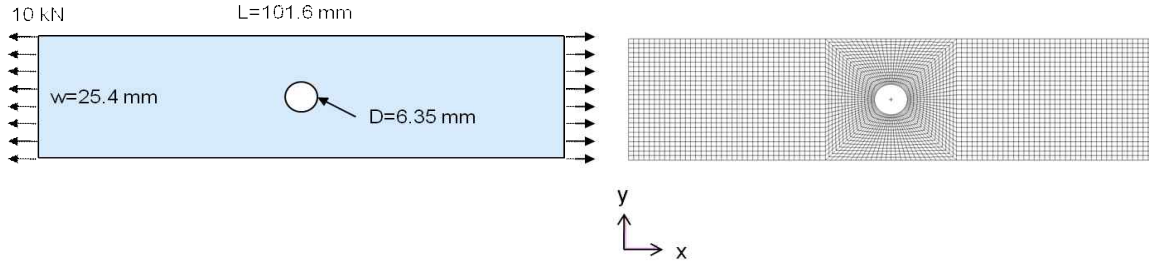


Fig. 2 원공이 있는 복합재 적층판의 유한요소 모델링 결과

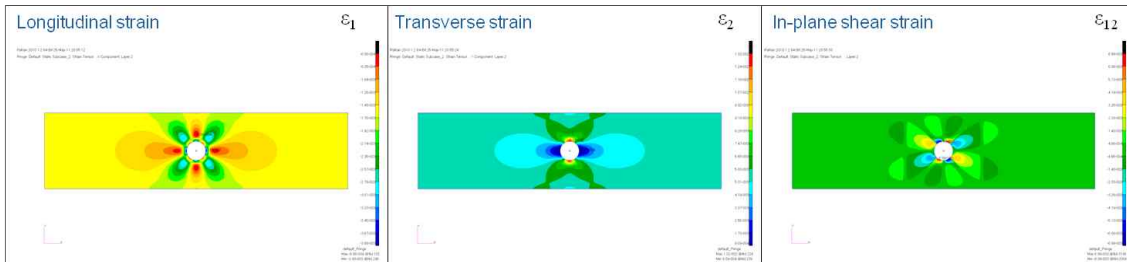


Fig. 3 복합재 원공 시편 모델의 layer 2에 대한 유한요소 해석 결과

4.2 확률적 접근을 통한 SIFT 기반 파손해석

본 논문에서는 실제 섬유가 무작위로 배열되는 것을 이상적인 배열 형태들의 조합으로 가정하고 이에 대한 확률적 접근을 통하여 무작위 배열 형태에 가까운 파손지수를 산출하는 기법을 제안하고자 한다. 확률적 접근 방법에 따른 파손해석 알고리즘에 관한 순서도는 다음 Fig. 4와 같다.

A-D 적합도 판정의 결과에 따라 정규, weibull, 극단치 분포에 대한 확률적 접근을 통하여 최종적인 파손지수를 산출하였다. 이때 섬유배열 형태에 따른 파손지수 분포에 대한 확률분포에서 90% 혹은 95% 상한값에 대한 파손지수를 확률적 접근에 의한 최종적인 파손지수로 산출하였다. 본 해석모델의 경우 모든 플라이에서 섬유의 파손지수는 0에 가까운 값으로 나타났으며 기지의 파손 가능성이 나타났다. Table 1에서와 같이 기지 파손 모드인 경우 최대 파손지수는 90° 적층방향을 갖는 layer 2에서 기지의 파손모드로 나타났으며 정규분포의 경우 95% 상한값에 대하여 1.3939로 가장 높게 나타났다.

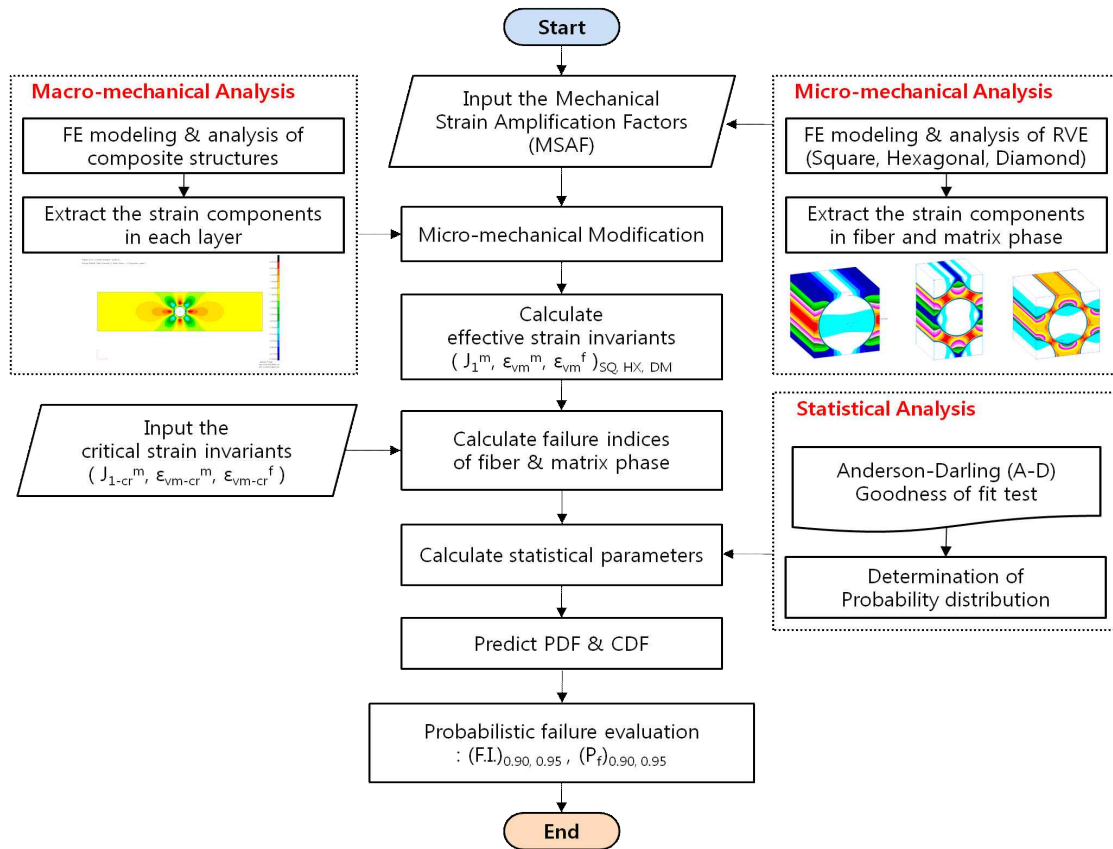


Fig. 4 확률적 접근 방법에 따른 파손해석 알고리즘에 관한 순서도

Ply	Normal Distribution		Extreme Value Distribution		Weibull Distribution	
	90% F.I.	95% F.I.	90% F.I.	95% F.I.	90% F.I.	95% F.I.
1	0.9011	0.9553	0.8569	0.8844	0.8369	0.8857
2	1.3125	1.3939	1.2423	1.2827	1.2178	1.2924
3	0.9011	0.9554	0.8569	0.8844	0.8369	0.8857
4	0.3342	0.3517	0.3240	0.3338	0.3118	0.3264

Table 1 90%, 95% 상한값에 대한 기지에서의 확률적 파손지수 결과

5. 결론

본 논문에서는 복합재료에 대한 미시적 수준의 모델링 과정에서 섬유배열 형태에 따라 존재할 수 있는 불확실성을 고려하기 위해 확률적 접근 방법을 도입하여 복합재 원공 시편 모델에 대한 SIFT 기반의 미시역학적 파손해석을 수행하였다. 이를 위해 사각, 육각, 다이아몬드 배열에 따른 RVE의 유한요소 모델링 및 해석이 수행되었으며, 각 섬유배열에 따른 변형률 증폭계수가 정의되었다. 또한 각 플라이의 섬유 및 기지에 대한 확률밀도 함수 및 누적분포함수를 기반으로 90% 및 95% 상한값에 대한 파손지수가 산출되었다. 이를 통하여 섬유배열 형태에 따른 불확실성을 고려하면서 SIFT에 근거한 미시적 수준의 파손지수를 산출하였으며, 섬유배열 형태의 가정에 대한 신뢰성을 높임과 동시에 복합재 구조물의 미시적 파손 여부를 평가하는데 있어 보다 효과적인 방법을 제시하였다.