

## 국산 복합재료 시험데이터 처리지침 수립을 위한 제언

서장원<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>한국항공우주연구원

### A Suggestion to Establish Statistical Treatment Guideline for Aircraft Manufacturer

Jangwon Suh<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Korea Aerospace Research Institute

**Abstract** : This paper examines the statistical process that should be performed with caution in the composite material qualification and equivalency process, and describes statistically significant considerations on outlier finding and handling process, data pooling through normalization process, review for data distributions and design allowables determination process for structural analysis. Based on these considerations, the need for guidance on statistical process for aircraft manufacturers who use the composite material properties database are proposed.

**Key Words** : Composite material, Outlier, Normalization, Data distribution, Design allowables, Database, Statistical process

#### 1. 서 론

항공기에 사용되는 복합재료 구조물을 개발하기 위해서는 항공기 개발의 초기 단계에 다양한 복합 소재 종류 중에서 기체 구조물의 제작에 사용할 복합재료를 선정하여야 하며, 선정된 복합재료를 구조물의 제작에 사용하기 위해서는 제작공정에 따른 물리적, 화학적 특성의 변화를 고려한 설계허용치가 구조물의 형상에 대하여 정의된 데이터베이스로서 제공되어야 한다.

이러한 데이터베이스는 항공기 인증 기술기준을 만족시키는 복합재료 제조공정 및 복합재 구조물 제조공정을 통하여 생산된 시편의 시험을 통하여 구축되어야 한다.

국토교통부는 “소형항공기용 국산 복합재료 데이터베이스 구축 및 공유시스템 개발”사업을 통하여 소형항공기의 구조에 사용가능한 인증용 복합재료 특성 데이터

베이스 구축 및 공유시스템 개발을 수행하고 있다. 구축된 데이터베이스와 공유시스템은 항공기용 복합재료의 신뢰성을 확보하여, 소형항공기 제작사들이 제작에 사용되는 복합재료에 대한 인증을 개별적으로 수행하지 않도록 하여 항공기 개발시 국산 복합재료를 사용하는 것을 용이하게 할 것이다.

항공기 제작사가 복합재료 데이터베이스를 사용할 때, 구조물의 제작을 위한 제작공정은 복합재료 생산자가 수립한 제작공정과 동등하여야 하며, 이러한 동등성은 참고문헌 [1], [2], [3] 등으로 제시되는 국토교통부의 지침에 따라 시편시험을 통하여 입증되어야 한다. 수행된 시편시험 결과에 대하여 통계적인 처리를 수행하고, 처리된 결과를 기존의 데이터베이스의 값과 비교하여 항공기 제작사의 구조물에 사용된 재료와 공정이 항공기 인증 기술기준을 만족시키는 복합재료와 동등하다는 유의미한 결과를 보임으로서 동등함이 입증되는 것이다.

본 논문은 동등성 입증 과정에서 주의를 기울여 수행

Received: Marc 15,2014 Revised: July 11,2014 Accepted: December 10,2014  
† Corresponding Author  
Tel: +82-42-860-2508, E-mail: jwsuh@kari.re.kr  
Copyright © The Society for Aerospace System Engineering

하여야 하는 통계적 처리 과정을 간략하게 살펴보고 향후 복합재료 물성치 데이터베이스를 사용하는 항공기 제작자를 위한 통계적 처리 과정에 대한 지침의 필요성을 제안하고자 한다.

## 2. 통계적 처리 과정

금속재료와 비교했을 때, 복합재료는 높은 수준의 재료 물성치 가변성을 보여준다. 이러한 가변성은 시험 데이터로부터 원자재 생산자, Prepreg 제작공정, 재료취급방법, 부품제작 혹은 조립방법, 적층순서, 환경조건, 시험기술, Batch, Panel, 시편수량 등의 여러 요인을 고려한 타당한 복합재 설계허용치를 결정하기 위해서는 필수적으로 통계적 기술을 사용하도록 한다.

대한 개별적인 세부적인 사항은 참고문헌 [4], [5], [6] 및 [7]을 참고한다.

통계적 처리는 다음과 같은 단계로 진행된다.

1. 이상점 처리
2. 데이터 노멀라이제이션을 통한 통합
3. 통합데이터 분포도 검토
4. 구조해석을 위한 설계허용값 결정

### 2.1 이상점 처리

개별적인 시험조건에서 강도 데이터가 산출되면, 그 데이터는 이상점(Outlier)에 대한 검토를 해야 하는데, 이상점들이 통계적인 분석에 실제적인 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 환경에 의해 실제 분류된 데이터뿐 아니라 Normalize하여 합산한 데이터 세트 모두에 대하여 이상점을 확인해야한다.

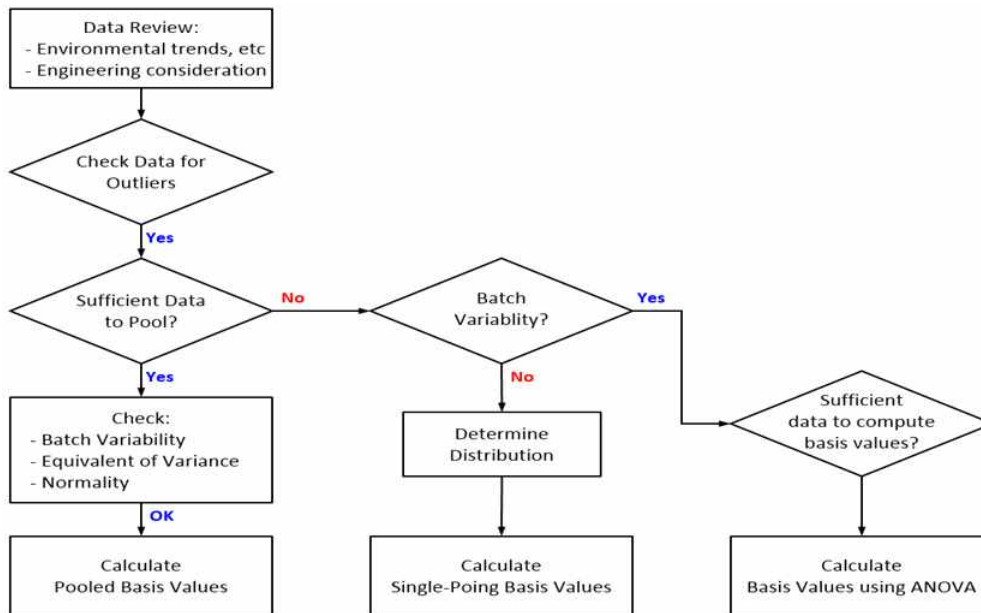


Fig. 1 Statistical process

이 방법은 유효한 설계허용값을 만들기 위해 몇 가지 근본적인 가정을 요구하는데, 1) 모아진 데이터 세트에 따라 환경에 따른 분산도는 비슷해야 하고, 2) 각 환경에 대한 파괴모드는 많이 변해서는 안 된다는 것이다.

복합재료 제작공정과 복합재료의 인증, 복합재 구조물 제작공정 동등성 인증 등과 관련된 통계적 처리과정에

이상점의 발견에는 Maximum Normed Residual (MNR) 방법이 이용된다. MNR 방법은 Unstructured 데이터 세트 내의 이상점을 검출하는 정량적인 방법으로서, 데이터를 하위그룹단위로 결합하여 상위그룹에 대하여 개별적으로 이상점 검출을 수행하는데, 샘플 표준편차와 비교했을 때 우연히 그렇게 되기에는 너무

큰 샘플 평균으로부터 얻은 절대편차를 가지고 있는 경우가 이상점이 된다. 하나의 이상점을 발견하면 그 이상점은 처리되고, 다른 이상점을 찾기 위해 다시 분석을 시작한다. 발견된 이상점은 Engineering judgment 등을 통한 검토를 통하여 데이터 세트에 남겨지기도 하고 제거되기도 한다.

발견된 이상점은 다음과 같은 검토를 통하여 데이터 세트에 남겨질 것인지 제거될 것인지를 판정한다.

1. 원인 확인: 원인확인이 가능한 경우 수정, 그렇지 못한 경우 제거.
2. 데이터/기록의 오류 발견시, 모든 데이터/기록에 대한 유사 오류 검사: 오류가 있는 경우, 수정 or 제거.
3. 원인 미확인 값: 데이터 세트에 남김.
4. 명백하게 잘못된 값: 제거될 수 있으나, 판단결과를 데이터 분석결과의 일부로서 문서화
5. 수정/제거된 값이 있을 경우, 통계적 검정 & 육안 검사 반복.

다음은 발견된 이상점을 제거하여야 하는 물리적 원인의 예이다.

1. 규격 불일치
  - 재료 또는 구성성분
  - 시편 사전준비(preconditioning) 과정
  - 시험시편 결함 및 장착
  - 시험장비/시험치구 셋업
2. 규정된 공차범위를 벗어나는 경우
  - 하나 이상의 패널 또는 시편 가공 파라미터
  - 시험시편의 치수 또는 방향
  - 컨디셔닝 파라미터
  - 시험파라미터 (속도, 시험온도 등)
3. 시험오류
  - 시험중 시편이 그림에서 미끌어짐
  - 시편 파괴모드가 해당 시험의 파괴모드와 다름
4. 기타
  - 이상점 발생 조건의 확인을 위해 시험을 수행
  - 부적절한 데이터 노멀라이즈.

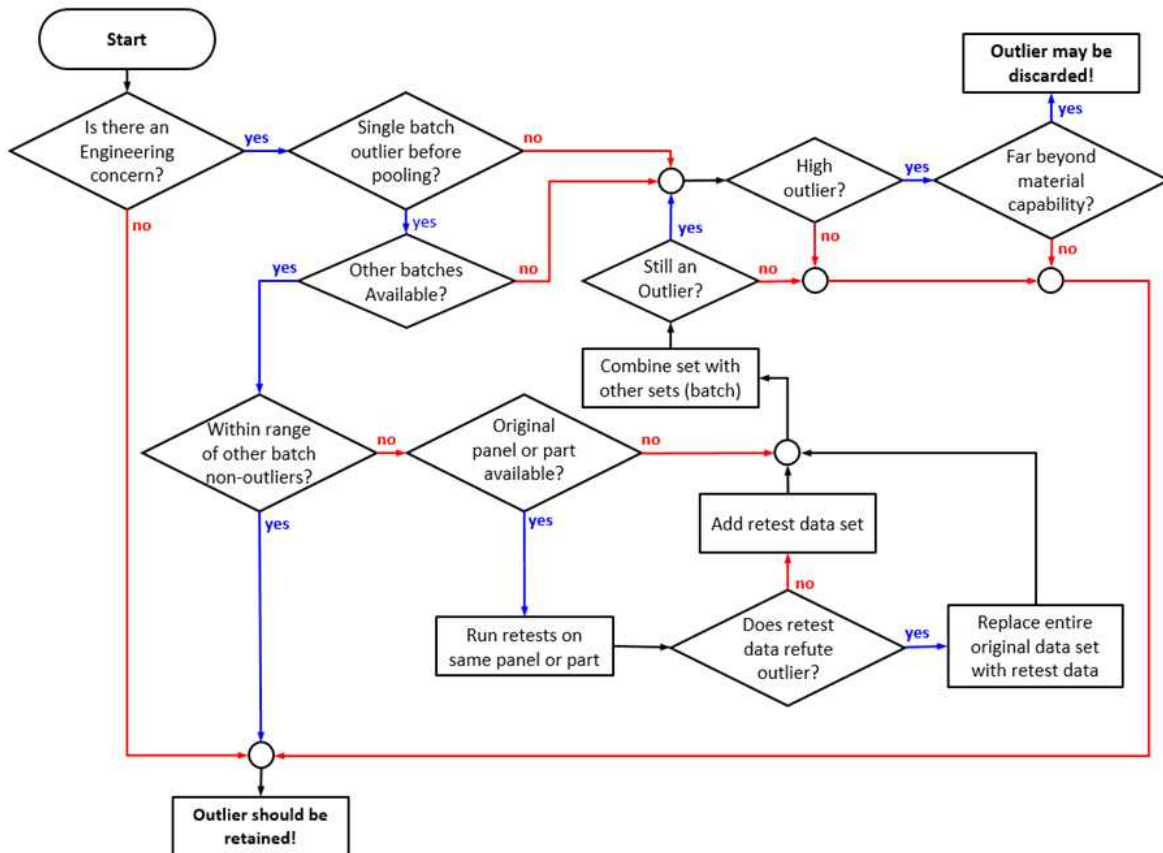


Fig. 2 Outlier handling flow

물리적 원인을 확인하지 못하였을 경우, Engineering Judgment를 수행하여 이상점의 원인이 예상 못한 변동성(재료, 공정 또는 시험의 예상한 변동들 이외의 다른 것에 의하여 발생하는 잘못된 변동성)임을 확인할 수 있는 정보를 확인하여야 한다. Engineering Judgement 과정은 원인의 명확한 확인 또는 의심스러운 데이터의 검증과정은 아니며, 이때 발생한 데이터 삭제에 대하여 그 이유를 완전하게 문서화 하여야 한다.

## 2.2 데이터 노멀라이제이션을 통한 통합

Normalization은 재료/배치/패널 또는 시편을 비교하는 데이터 분석을 수행하기 위하여 시험에서 얻어진 Fiber 지배적인 물성치 값을 특정한 단일 Fiber volume content의 값으로 조정하는 절차로서, 이러한 조정이 수행되지 않을 경우, 추가적인 변동성의 원인이 데이터에 포함되어 잘못된 결론을 도출할 가능성이 높아진다.

Normalization은 명기된 Fiber volume content에 실제 시험 값을 대비시키는 기계적 시험 결과들의 직접 비교로 수행된다. Data normalization은 Fiber가 대부분의 하중을 지탱한다는 것을 기반으로 하여, Fiber에 의해 결정되는 특성에 대한 변이성을 낮추기 위해 시도하는 것이다.

일반적으로 Fiber volume은 각 시험 샘플에 대해 모두 측정하지 않으므로, Fiber volume fraction과 Laminate cured ply 두께 사이의 관계를 이용하여 각각의 시험 시편들 간의 Fiber volume variation을 Normalize 한다.

데이터의 통합을 위해서 k-표본 앤더슨-달링 검정을 Type I error(배치들이 동일 모집단에서 추출된 표본임에도 검정이 서로 다른 모집단이라는 결론을 얻을 확률)를 2.5%로 설정하고 검증을 수행한다. (재료 Batch 간의 변동성 검증 또는 배치들의 통합 가능성 검증이라고도 한다.) 여러 Batch들로부터 나온 기계적 특성 자료가 동일한 모집단에서의 독립인 확률표본이라는 가정을 검정하는데 사용된다.

다음과 같은 경우, 데이터들은 통합될 수 있다.

1. 배치평균은 매우 유사하나 배치들의 변동이 다른 경우에 배치 데이터 범위의 거의 전체가 중복되나, 중복영역을 벗어난 산포도가 높은 소수의 데이터

들이 있는 경우

2. 통합된 배치 데이터에 대한 검정 결과가 배치들이 상이할 수 있음을 나타낸다 하더라도 통합된 변동계수들이 유사하게 낮은 경우
3. 배치들의 데이터를 통합한 이후 변동계수가 시험 방법이 갖는 정밀도보다 작은 경우
4. 배치 통합에 실패한 환경들에 대한 변동계수들이 검정이 배치들이 유사함을 나타내는 변동계수와 비슷한 경우

그러나, 한 배치의 평균이 대부분의 환경에서 일관되게 낮거나 높은 뚜렷한 경향이 있다면 해당 배치는 통합될 수 없다.

## 2.3 통합 데이터 분포도 검토

통합된 데이터의 분포도를 결정하기 위하여 각 분포에 대하여 관측유의수준(Observed Significance Level, OSL)을 정규분포, Weibull 분포 그리고 로그정규(Lognormal) 분포에 대하여 산출한다.

산출된 OSL은 데이터의 분포가 정규분포, Weibull 분포 그리고 로그정규(Lognormal) 분포 중에 유사한 분포를 나타내는 일반적인 지표를 제공한다. 산출된 OSL의 검토를 통하여 설계허용값 결정에 사용할 시험 데이터 분포를 가정한다.

## 2.4 구조해석을 위한 설계허용값 결정

가정된 시험 데이터 분포로부터 설계에 적용할 설계허용값을 구체적으로 정의한다. 구조부품에 따라 A-Basis, 또는 B-Basis 설계허용값이 정해져야 하며, 항공기 기술기준에 의하여 사용되는 재료설계허용값은 다음과 같이 분류된다.

- A-Basis: 측정값들의 지정된 모집단의 제 1백분위수에 관한 95% 신뢰한계이다. 즉, 지정된 모집단의 상위 99%에 대한 95% 공차한계. 적용된 하중이 하나의 요소를 통해 부품에 전달되는 경우로서 그 부품의 파괴가 부품의 구조 완전성의 손실을 초래할 경우이다.
- B-Basis: 측정값들의 지정된 모집단의 제 1백분위수에 관한 95% 신뢰한계이다. 즉, 지정된 모집단의 상위 90%에 대한 95% 공차한계. 각 요소의 파괴로 인한 적용 하중이 다른 하중 전달 요소에 안전하게

배분되는 다중화 구조에 대하여 사용.

### 3. 통계적 처리 지침의 필요성

통계적 처리 과정을 살펴보았을 때, 통계적 처리 단계는 매우 복잡하며, 세심한 Engineering judgment를 요구하는 검토들로 이루어져 있음을 알 수 있다.

시험 데이터와 통계결과에 대한 검토와 검증결과의 판정은 엔지니어의 경험 등에 근거한 공학적 판단을 통하여 수행되는데, 많은 경우, 통계로 구해진 값을 그대로 사용하기도 하나 때로는 통계로 구해진 값을 경험과 공학적 판단을 기준으로 통계로 구해진 값 대신에 다른 값을 사용하거나 수정할 수 있다.

해외 항공업계와 비교하여 항공기의 개발과 복합재료 구조물의 설계에 익숙하지 않은 국내 항공기 제작사가 항공기 구조설계의 안전성을 증명하는 기본이 되는 설계 허용치 결정을 위한 처리과정에 문제가 있을 경우 항공 안전에 치명적인 결과를 초래할 수 있다.

따라서, 데이터 통합 가부에 대한 판정을 하는 경우, 데이터 통합 결과에 대한 사용여부를 판정하는 경우, 설계허용값을 통계로 구해진 값을 수정하여 사용하거나 다른 값으로 결정하는 경우 등과 같이 통계적 처리 단계에서 경험과 공학적 판단을 근거로 판정하여야 하는 경우에 대한 일반적인 지침을 수립한다면, 설계 및 인증 과정 중에서 잠재적인 구조물의 안전성 문제를 해소할 수 있을 것이다. 또한, 구축된 데이터베이스와 공유시스템의 활용도를 높이고 국내산 복합재료의 사용을 용이하게 할 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] 국토교통부, 2013, “복합재료 인증체계 안내서”, 항공기술과 기술안내서 제12호.
- [2] 국토교통부, 2013, “프리프레그 공정관리문서 작성 및 관리 지침서”, 항공기술과 기술지침서 제04호.
- [3] 국토교통부, 2009, “항공기용 복합재 구조물 제작을 위한 품질관리 안내서”, 항공기술과 기술안내서 제 06호.
- [4] Published by SAE International, "CMH-17G Composite Materials Handbook", March 2012
- [5] McCarvill, W., Ward, S., Bogucki, G., and Tomblin, J., 2007, “Guidelines and Recommended Criteria for the Development of a Material Specification for Carbon Fiber/Epoxy Unidirectional Prepregs Update”, FAA report DOT/FAA/AR-07/3.
- [6] Ward, S., McCarvill, W., and Tomblin, J., 2007, “Guidelines and Recommended Criteria for the Development of a Material Specification for Carbon Fiber/Epoxy Fabric Prepregs”, FAA report DOT/FAA/AR-06/10.
- [7] Tomblin, J., Ng, Y., and Raju, K., 2003, “Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material”, FAA report DOT/FAA/AR-03/19.

### 저 자 소 개



서 장 원

1988년 한국항공대 항공기계공학과 졸업. 1994년 동 대학원 석사. 2005년~현재 한국항공우주연구원. 관심분야는 인증, 품질보증, 공력소음.