

환경조건간 합동을 이용한 복합재료 허용치 생성 기법

이승윤^{1,†}

¹한국항공우주연구원 발사체구조팀

Pooling-Across-Environments Method for the Generation of Composite-Material Allowables

Seung Yun Rhee^{1,†}

¹Launcher Structures & Materials Team, Korea Aerospace Research Institute

Abstract : The properties of composite materials, when compared to those of metallic materials, are highly variable due to many factors including the batch-to-batch variability of raw materials, the prepreg manufacturing process, material handling, part-fabrication techniques, ply-stacking sequences, environmental conditions, and test procedures. It is therefore necessary to apply reliable statistical-analysis techniques to obtain the design allowables of composite materials. A new composite-material qualification process has been developed by the Advanced General Aviation Transport Experiments (AGATE) consortium to yield the lamina-design allowables of composite materials according to standardized coupon-level tests and statistical techniques; moreover, the generated allowables database can be shared among multiple users without a repeating of the full qualification procedure by each user. In 2005, NASA established the National Center for Advanced Materials Performance (NCAMP) with the purpose of refining and enhancing the AGATE process to a self-sustaining level to serve the entire aerospace industry. In this paper, the statistical techniques and procedures for the generation of the allowables of aerospace composite materials will be discussed with a focus on the pooling-across-environments method.

Key Words : Composite Materials, Material Allowable, Statistical Analysis, Pooling Method

1. 서 론

개별 항공기 제작업체가 상당한 시간 및 비용을 부담할 수밖에 없었던 전통적인 복합재 재료인증 체계를 개선하기 위해, 1995년 미국은 AGATE(Advanced General Aviation Transport Experiments) 프로그램을 통해 복합재 물성 데이터베이스 공유 프로세스를 개발하기 시작하였다. 2001년에 AGATE 프로그램이

종료된 이후, 2005년에 NASA는 CMH-17, FAA 및 SAE와의 협조 아래 AGATE 프로세스를 전체 항공우주산업계로 확대할 목적으로 NCAMP(National Center for Advanced Materials Performance)를 설립하였다. NCAMP의 목적은 범용 항공기, 수송급 항공기, 그리고 기타 항공기 제품의 인증에 공통적으로 적용할 수 있는 재료규격 및 기초 물성 데이터를 개발할 수 있는 수탁가능한 방법론을 만드는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해 NCAMP는 금속재와 같이 산업체 전반에 걸쳐 적용할 수 있는 비전매특허의 규격과 재료 허용치 생성 프로세스를 개발하였다[1-3].

섬유강화 복합재의 물성에는 금속재에 비해 본질적

으로 높은 변동성(variability)이 내재되어 있다. 이러한 변동성은 원재료 성분 뿐만 아니라 섬유와 레진의 비율, 섬유 방향, 프리프레그 제작공정, 재료 취급, 부품 제작기술, 적층순서, 환경조건, 그리고 시험방법 등 여러 가지 요인으로 인해 발생한다. 어떤 경우에는 상기한 요인들과 관련된 결함이나 흠집의 차이가 변동성을 발생시키는 외형상의 원인이 된다. 시험 절차와 관련된 변동성은 수년 간의 연구와 표준화 작업을 거쳐 최소화되었다. 그럼에도 불구하고 복합재의 직교이방성에 따른 추가 시험과 상대적으로 높은 시험 비용으로 인해 구축된 데이터베이스가 금속재에 비해 작은 것이 현실이다. 따라서, 복합재의 각 기계적 물성에 합리적인 설계 허용치를 할당하기 위해서는 이러한 변동성을 고려하여 엄격한 통계분석기법을 적용해야 한다.

본 논문에서는 재료 허용치 생성 프로세스 중 마지막 단계에 해당하는 통계분석 기법 중 환경조건간 합동 방법(pooling-across-environments method)의 적용 기법 및 기술 동향에 대해 논하고자 한다. 또한 복합재료 허용치 생성을 위해 통계분석기법을 적용할 때 유의할 점에 대해 기술하고자 한다. 특히 주의할 점은, 분석 과정에서 공학적 판단 또는 경험에 근거하여 통계적 진단 결과를 종합적으로 평가해야 한다는 것이다. 이러한 복합재 재료인증 프로세스에 사용되는 통계분석 방법들은 기본적으로 CMH-17[4]에서 수락한 방법들이다.

2. 통계분석기법 개요

통계분석으로 재료 허용치(allowable) 혹은 기저값(basis value)을 구하기 위한 주요 전제 조건 중 하나는 ASTM이나 SACMA와 같은 일반적으로 널리 사용되고 있는 시험표준에 따라 적절하게 계획된 시험 프로그램을 통해 요구되는 물성을 얻는 것이다. 이러한 조건이 만족되지 않으면 어떠한 통계분석 기법도 의미 있는 결과를 도출하기에 충분하지 않다. 특히 강도 물성 시험에 있어 시편별 파단모드(failure mode)의 일관성과 적절성을 평가하는 것이 상당히 중요하다.

복합재 기저값을 계산하는 통계분석 방법은 획득된 데이터의 분포 특성에 따라 크게 합동 방법(pooling method)과 점추정 방법(single-point method)으로 나

눌 수 있다. 가능하다면 합동 방법을 적용하는 것이 통계적으로 보다 안정적인 결과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 합동 방법에 대해서만 중점적으로 다루고 있으며, 이에 대한 순서도가 Fig. 1에 주어져 있다.

2.1 기저값의 정의

n개의 시편들이 같은 확률분포를 따르는 강도값을 가진다는 가정 하에, n이 충분히 크다면 n개 시편의 강도값 막대그래프는 어떤 분포에 가까워진다. 이러한 확률분포를 모집단(population)이라고 하며, n개의 강도값은 이 모집단의 임의표본(random sample)이다. 이렇게 크기가 n인 임의표본을 개념적인 사고실험(thought experiment)을 통해 모집단으로부터 여러 번 추출한 후 각 표본으로부터 “B-기저값”을 계산한다면, 계산값이 10번째 백분위수(percentile)보다 작은 확률은 95%가 된다. “A-기저값”은 B-기저값의 정의에서 10번째 백분위수를 첫 번째 백분위수로 바꾸어 정의된다. 통계적인 어법으로 말하자면, 기저값은 해당 백분위수에 대한 95% 신뢰하한(lower confidence limit)이며, 허용한계(tolerance limit)라고도 한다.

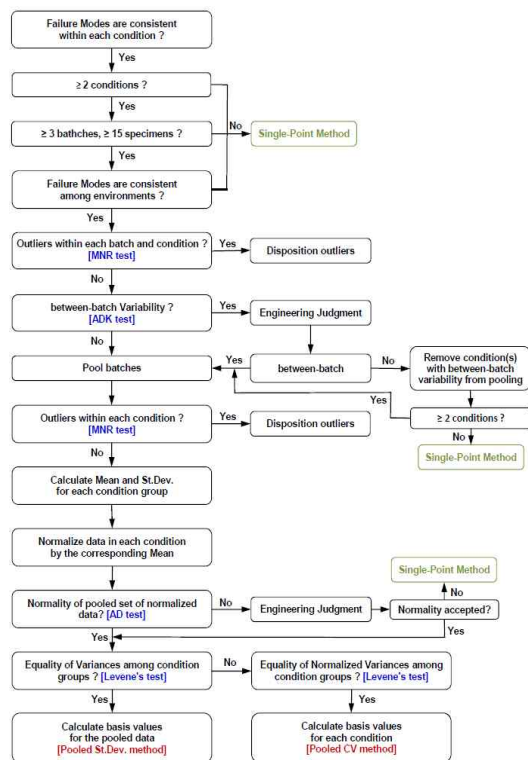


Fig. 1. Flowchart of pooling method

2.2 섬유 의존성 물성의 정규화

섬유 의존성(fiber-dominated) 물성의 변동성을 줄이고 시험 결과들을 직접 비교하기 위해, 미가공 시험 데이터를 특정 섬유체적을 기준으로 조정하는 정규화(normalization)를 수행한다. 아래 물성에 대해서는 정규화된 데이터를 이용하여 통계분석을 수행한다.

- 0° (경사) 인장 강도와 탄성계수 (직물 및 일방향)
- 90° (위사) 인장 강도와 탄성계수 (직물)
- 0° (경사) 압축 강도와 탄성계수 (직물 및 일방향)
- 90° (위사) 압축 강도와 탄성계수 (직물)

이러한 데이터 정규화는 하중의 대부분이 섬유에 의해 지지된다는 사실에 근거하며, 상세한 정규화 절차는 DOT/FAA/AR-03/19[5]의 5.2절을 참조한다. 정규화 이후 데이터의 산란도는 감소하거나 변화가 없는 것이 일반적이다. 하지만, 정규화 후 데이터 산란도가 심각하게 증가한다면 그 원인을 조사해야 한다.

2.3 이상치 식별

본격적인 통계분석 전에 각 बै치 데이터 내에서 이상치(outlier)를 식별하여 제거해야 한다. 이상치란 데이터 집합 내의 대부분의 다른 값보다 매우 높거나 매우 낮은 값으로, 기저값 산출시 쓸데없는 통계적인 불이익을 야기할 수 있다. 이러한 이상치는 단순한 오기인 경우도 있으며, 시험장비의 결함, 시험 중 환경조건의 잘못된 설정, 또는 관리한계를 벗어난 열악한 시험 제작 등의 오류에 기인하는 경우가 많다. 이상치를 완벽하게 찾아낼 수 있는 통계적 절차는 없기 때문에, 이상치에 대한 정량적 선별 과정인 MNR(maximum normed residual) 방법에 추가하여 시각적으로도 조사해야 한다. MNR 방법을 적용하기 위한 상세 절차는 CMH-17-1G[4]의 8.3.3.1절에 주어져 있다.

이상치로 식별된 모든 값들은 그 원인에 대해 조사를 해야 한다. 원인이 밝혀진 값들은 가능하다면 수정되어야 하고, 그렇지 않으면 폐기되어야 한다. 데이터 수집이나 기록에서 실수가 발견되었다면, 유사한 실수가 발생했는지 모든 데이터를 조사해야 한다. 이러한 값들은 수정되거나 폐기되어야 한다. 이상치에 대해 원인을 밝힐 수 없다면 그 이상치는 데이터 집합에 남겨두어야 한다. 이상치가 명백하게 잘못되었다면 충분

한 검토 후에 제거될 수 있으며 값을 제거한 주관적인 결정은 데이터 분석의 한 과정으로 기록되어야 한다. 어떤 측정값이 수정되거나 폐기되고 나면, 이상치에 대한 통계적 선별 검사와 시각적 검사를 모두 다시 수행해야 한다.

3. 합동 방법

3.1 개요

합동 방법이란, 서로 다른 환경조건의 데이터 집합을 서로 결합하여 보다 큰 데이터 집합을 구성하여 각 환경조건에 대한 허용치를 계산하는 방법이다. 합동 방법을 적용하기 위해서는 우선 환경조건이 2개 이상이 되어야 하고 3개 이상의 बै치에서 제작된 15개 이상의 시편에 대한 유효한 시험결과가 있어야 하며, 정규성 및 분산동질성 조건을 만족하는지 그리고 각 환경조건 데이터 집합의 बै치 간 변동성이 무시할 수 있을 정도로 작은지 확인해야 한다. 참고로, बै치 간 변동성이 큰 환경조건에 대해서는 점추정 방법 중 하나인 ANOVA(analysis of variance) 방법을 적용해야 한다.

3.2 बै치 간 변동성

배치 데이터 간에 변동성이 무시할만큼 작은지 조사하기 위해 ADK(k-sample Anderson-Darling) 검정 [6]을 수행한다. ADK 검정은 두 개 이상의 데이터 그룹이 동일한 모집단에서 추출되었다는 가정을 검정하기 위한 비모수적(non-parametric) 통계 절차이다. 모든 데이터 그룹을 취합한 후 개별 값을 오름차순으로 정렬하여, $z_{(1)}, z_{(2)}, \dots, z_{(L)}$ 로 표기한다. 이 때 동일한 수치의 데이터가 있다면 L 은 전체 데이터 개수 n 보다 작을 것이다. 이러한 순위는 ADK 검정통계량 계산에 사용된다. ADK 검정통계량은 다음과 같다.

$$ADK = \frac{n-1}{n^2(k-1)} \sum_{i=1}^k \left[\frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^L \frac{h_j(nF_{ij} - n_i H_j)^2}{H_j(n - H_j) - nh_j/4} \right] \quad (1)$$

여기서, n_i 는 각 배치의 시편 개수, $n = \sum_{i=1}^k n_i$, h_j 는 취합된 표본 중 $z_{(j)}$ 와 동일한 값의 개수, H_j 는 취합된 표본 중 $z_{(j)}$ 보다 작은 값의 개수와 $z_{(j)}$ 와 동일한 값의 개수의 1/2의 합, F_{ij} 는 i 번째 그룹 중 $z_{(j)}$ 보다 작은 값

의 개수와 $z_{(j)}$ 와 동일한 값의 개수의 $\frac{1}{2}$ 의 합이다.

ADK 검정통계량이 다음 식으로 계산되는 임계값(ADC)보다 크다면, α 의 오차확률로 각 데이터 그룹이 서로 다른 모집단에서 추출되었다고 결론내릴 수 있다. 반대의 경우에는 각 그룹이 동일 모집단에서 추출되었다는 가정이 성립하며, 뱃치 간 변동성이 무시할 만하다고 결론내릴 수 있다.

$$ADC(\alpha) = 1 + \sigma_n \left(b_0 + \frac{b_1}{\sqrt{k-1}} + \frac{b_2}{k-1} \right) \quad (2)$$

여기서, 상수 b_0, b_1, b_2 는 α 에 따라 다르며, 예를 들어 다음과 같다.

Table 1 Interpolation Coefficients

α	b_0	b_1	b_2
0.250	0.675	-0.245	-0.105
0.100	1.281	0.250	-0.305
0.050	1.645	0.678	-0.362
0.025	1.960	1.149	-0.391
0.010	2.326	1.822	-0.396

3.3 정규성 검정

합동 방법을 적용하기 위해서는 합동된 데이터집합이 정규분포를 이루어야 하며, 정규성(normality)을 확인하기 위해 Anderson Darling 검정을 수행한다. 정규분포에 대한 적합도(goodness-of-fit)를 평가하기 위해, 데이터에 가장 적합한 정규 누적분포함수와 데이터의 실제 누적분포함수를 비교한다. $z_{(i)}$ 를 다음과 같이 정의하면,

$$z_{(i)} = \frac{x_{(i)} - \bar{x}}{s}, \quad \text{for } i=1, \dots, n \quad (3)$$

여기서, $x_{(i)}$ 는 i 번째 표본값이며, \bar{x} 는 표본평균, s 는 표본표준편차이다.

Anderson Darling 검정통계량은 다음과 같다.

$$AD = \sum_{i=1}^n \frac{1-2i}{n} \left[\ln\{F_0(z_{(i)})\} + \ln\{1-F_0(z_{(n+1-i)})\} \right] - n \quad (4)$$

여기서 F_0 는 표준정규분포의 누적분포함수이며, 관측 유의수준(observed significance level, OSL)은 다음과 같다.

$$OSL = \frac{1}{1 + \exp[-0.48 + 0.78 \ln(AD^*) + 4.58 AD^*]} \quad (5)$$

여기서, $AD^* = \left(1 + \frac{4}{n} - \frac{25}{n^2}\right) AD$ 이다.

$OSL \leq 0.05$ 라면, 5%의 오차확률로 모집단이 정규 분포를 이루지 않는다고 결론내릴 수 있다. $OSL > 0.05$ 라면, 모집단이 정규분포를 이룬다는 가설은 성립된다.

3.4 변동계수 동질성 검정

Levene 검정을 이용하여, 서로 다른 데이터 그룹의 변동계수(coefficient of variations, CV) 간의 동질성(equality)을 조사해야 한다. 이 검정은 k 개 그룹에 대한 표본 CV 사이에 두드러진 차이가 있는지 결정하며, 이는 환경조건 간 합동을 적용하기 위해 반드시 확인해야 하는 중요한 가정이다.

Levene 검정은 각 데이터 그룹의 중간값(median) \tilde{x}_i 로부터의 절대편차에 대해 ANOVA를 수행한다. 중간값으로부터의 절대편차 $w_{ij} = |x_{ij} - \tilde{x}_i|$ 은 각 데이터 값에 대해 계산된다. 그런 다음, 변환된 데이터 값에 대해 다음과 같이 F-검정이 수행된다.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (\bar{w}_i - \bar{w})^2 / (k-1)}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} n_i (w_{ij} - \bar{w}_i)^2 / (n-k)} \quad (6)$$

여기서, \bar{w}_i 는 i 번째 그룹 내 n_i 개 데이터의 평균이며, \bar{w} 는 모든 n 개 데이터(즉, 합동된 데이터 전체)의 평균이며, k 는 데이터 그룹의 개수이다.

만약 계산된 F 통계량이 $1-\alpha$ 신뢰도에서 $k-1$ 분자 자유도와 $n-k$ 분모 자유도를 갖는 F-분포의 임계값보다 작은 경우, 데이터의 변동계수가 서로 상이하진 것으로 간주한다.

3.5 데이터 간 합동 방법

이상치를 처리하고 뱃치간 변동성을 평가하고 나면, 데이터 수량이 합동 방법을 계속 적용할 수 있을 정도가 되는지 확인한 후 실제 합동 과정에 착수한다. 또한, 합동되는 환경조건들은 시험 온도 범위에 걸쳐 연속적이어야 하며 RTA(Room Temperature Ambient) 조건을 포함해야 한다. 이러한 요건에 대한 상세한 논의는 CMH-17-1G[4]의 8.3.9절에 주어지 있다.

환경조건 간에 데이터를 합동하는 방법은, 합동 변동계수를 계산하는 방법과 합동 표준편차를 계산하는

방법 두 가지가 있다. 이러한 합동 수치(합동 변동계수 또는 합동 표준편차)는 합동된 각 환경조건 의 기저값을 계산할 때 사용된다. 두 방법의 차이는 대부분의 경우 근소하나, 각 환경조건 데이터의 평균값 중 최대값과 최소값의 차이에 따라 증가한다.

표본 크기가 모든 환경조건에 대해 동일하다면, 합동 변동계수 방법을 이용한 기저값은 각 환경조건 평균값의 일정한 비율로 계산되는 반면 합동 표준편차 방법을 이용한 기저값은 각 환경조건 평균값에서 일정값을 뺀 값으로 계산된다. 따라서, 평균값이 가장 낮은 환경조건에 대해 합동 표준편차 방법이 좀 더 보수적인 기저값을 계산한다.

각 데이터 집합 내의 변동성이 합동이 가능할 정도로 충분히 유사하다는 것을 검증하기 위해 Levene 검정을 수행할 때, 검정 대상이 되는 값들은 선택한 방법에 부합해야 한다. (1) 합동 표준편차 방법을 사용하는 경우 환경조건 간 데이터의 변동성이 합동이 가능할 정도로 충분히 유사하다는 것을 검증하기 위해서는, 변환되지 않은 원래 데이터에 대해 Levene 검정을 수행한다. (2) 합동 변동계수 방법을 사용하는 경우에는, Levene 검정을 수행하기 전에 평균값이 1이 되도록 각 환경조건 데이터를 변환한다. 이렇게 변환하고 나면 각 환경조건 내에서 데이터의 변동계수와 분산이 서로 같아진다. 서로 다른 환경조건 데이터의 변동계수가 충분히 유사하다는 것을 검증하기 위해 Levene 검정을 사용할 수 있다.

합동 변동계수 방법은 합동 표준편차 방법만큼 이론적으로 뒷받침되지는 아니지만, 복합재의 물리적 특성에는 보다 더 적합할 수 있다. 어떤 방법이 적합할지 결정하기 위해서는 우선 Levene 검정을 수행하여 분산동질성(equality of variances)을 확인해야 한다. 데이터가 이 검정을 통과하면 합동 표준편차 방법을 사용한다. 만약 통과하지 못하면 변동계수를 비교하는 Levene 검정을 수행해야 한다. 데이터가 이러한 진단 검정을 모두 통과하지 못한다면, 합동은 적절하지 않다. 합동 방법으로 기저값을 계산하는 상세 절차가 CMH-17-1G[4]의 8.3.5.5.1절과 8.3.5.5.2절에 주어져 있으며, 최종적인 B-기저값 계산식은 다음과 같다.

$$(B-basis)_j = \bar{x}_j - (k_B)_j S_p \quad (7)$$

여기서, \bar{x}_j 는 환경조건 j 의 표본평균, S_p 는 합동 표준

편차이며, $(k_B)_j$ 는 환경조건 j 에 대한 허용계수(tolerance factor)이다. $(k_B)_j$ 는 환경조건 j 의 데이터 개수, 합동된 데이터집합의 총 데이터 개수, 그리고 합동되는 환경조건 의 개수에 따라 결정된다.

앞서 언급했듯이, 합동된 데이터집합은 정규성을 가져야 한다. 하지만, 합동된 데이터집합이 정규성 검정에 실패한다 해도, 개별 환경조건 데이터가 각각 정규성 검정을 통과했다면, 합동 표준편차 방법을 적용할 수 있다.

4. 수정 변동계수 방법

새로운 재료의 인증(qualification)에서 피하기 힘든 공통적인 문제점 중 하나는, 인증 초기에 제작되는 시편들은 오래 기간에 걸쳐 많은 양의 재료가 생산될 때 나타날 수 있는 모든 변동성을 갖고 있지 않는다는 것이다. 즉, 인증 프로그램에서 측정된 변동성은 다음과 같은 원인들로 인해 실제 변동성보다 낮게 나타나는 경우가 많다. 인증 프로그램에 사용되는 재료는 양산 재료를 대표할 수 없을 정도의 짧은 기간(보통 2~3주 정도) 내에 제작된다. 다중 배치의 인증용 재료를 제작하는 데에 사용된 일부 원자재가 실제로는 동일 배치에서 제작되거나 짧은 기간 내에 제작되는 경우도 많다. 따라서 다중 배치 재료가 진정한 다중 배치 재료가 아닐 수 있으므로 실제 양산 재료의 변동성을 대표하지 않는다. 이로 인해 기저값이 비현실적으로 높아지는 결과가 나올 수 있으며, 인증 이후에 생산되는 후속 재료가 최초로 수립된 기저값을 만족하지 못해 불합격 처리되는 경우가 많이 발생할 수 있다. 따라서 예상되는 변동성만큼 최초의 기저값을 낮추기 위한 방법이 요구된다.

일반적으로 복합재료는 적어도 6%의 변동계수를 갖는 것으로 알려져 있다[4,7]. 수정 변동계수 방법은 이러한 경험적 사실을 바탕으로, 측정된 변동계수가 8% 이하인 경우 다음과 같이 변동계수를 높게 조정한다. 변동계수가 높아지면 기저값과 규격한계가 낮아져 더 보수적인 결과를 얻는다.

$$CV^* = \begin{cases} 0.06 & \text{if } CV < 0.04 \\ CV/2 + 0.04 & \text{if } 0.04 \leq CV < 0.08 \\ CV & \text{if } CV \geq 0.08 \end{cases} \quad (8)$$

위의 수정 변동계수 변환식은 경험에 기반하여 정의되었으며, 이는 최소한의 데이터만이 획득가능한 기간 동안 임시적으로 사용하도록 고안된 것이다. 따라서 충분한 개수의 양산 배치(약 8~15개)를 생산하여 시험하는 경우에는 측정된 변동계수를 그대로 사용하며, 이로 인해 기저값과 규격한계가 높게 조정될 수 있다.

NCAMP는 통상 실제 측정 변동계수와 수정 변동계수를 사용하여 계산된 결과를 모두 제공하며 사용자는 이 둘 중에 선택할 수 있다. 수정 변동계수 방법이 적용가능한 경우 NCAMP는 수정 변동계수 결과값을 권장하고 있다.

데이터가 배치 간 변동성을 위한 ADK 검정에 실패하거나 정규성 검정에 실패하는 경우, 수정 변동계수 방법은 적절하지 못하므로 수정 변동계수 기저값은 계산하지 않는다.

NCAMP에서는 사용자가 측정 변동계수를 이용하여 기저값을 계산하기로 결정한다면 규격한계 및 관리한계 또한 측정 변동계수를 이용하여 계산할 것을 권장한다. 마찬가지로 사용자가 수정 변동계수로 계산한 기저값을 사용하기로 결정하는 경우에는 규격한계 및 관리한계 또한 수정 변동계수로 계산할 것을 권장한다. 이는 재료허용치, 규격한계, 그리고 관리한계 간의 연결고리를 유지하기 위한 것이다.

5. 결 언

지금까지 복합재 허용치 계산을 위한 통계분석 기법 중 환경조건간 합동 방법에 대해 살펴보았다. 앞서 언급한 것과 같이 합동 방법은 각각의 환경조건 데이터를 개별적으로 분석하여 허용치를 계산하는 점추정 방법에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 특히, 서로 다른 환경조건의 데이터집합을 서로 결합함으로써 보다 큰 데이터집합을 구성할 수 있기 때문에, 재료 허용치를 생성하는 원천 데이터가 풍부해짐으로써 통계적으로 보다 안정적인 허용치를 획득할 수 있다. 또한, 환경조건 별로 적용되는 분포함수 모델이 다르지 않기 때문에, 기저값과 평균값의 경향이 환경조건 별로 바뀌지 않으며, 복합재 구조 설계에 필요한 하중향상계수(load enhancement factor) 및 환경보정계수(environmental compensation factor)를 계산하기 용이하다.

하지만, 합동방법을 적용하기 위해서는 환경조건이 2개 이상이 있어야 하고 3개 이상의 배치에서 제작된 15개 이상의 시편에 대한 유효한 시험결과가 있어야 하며, 정규성 및 분산동질성 조건을 만족하는지 그리고 각 환경조건 데이터집합의 배치 간 변동성이 무시할 수 있을 정도로 작은지 등을 확인해야 한다. 이러한 데이터 개수나 분포 특성에 대한 요건을 만족하지 못하면 부득이 점추정 방법을 적용할 수밖에 없다.

통계분석 이전에 물성 데이터 획득 과정에서 주의해야 할 점이 있다. 시험 데이터를 분석하는 과정에서 이상치 유무를 판단할 때, 매우 낮은 데이터 값의 경우 다른 데이터와의 상대적인 차이를 고려한다면 명백한 이상치라고 판단되지만 그 원인을 판명하기가 쉽지 않은 경우가 자주 발생한다. CMH-17[4]은 그 원인을 판명할 수 없는 경우 그 데이터를 임의로 폐기하지 않을 것을 권장하고 있다. 이러한 불필요하게 낮은 데이터는 허용치를 급격하게 떨어트리는 요인이 된다. 이러한 불필요한 데이터의 개수를 줄이기 위해서는, 시험장치 설정 내역, 시험 조건, 시험 수행 중 얻게 되는 모든 데이터를 최대한 기록하여 이상치 판단시 활용할 필요가 있다.

시험을 거쳐 획득한 수많은 데이터집합이 완벽하게 이상적인 정규분포를 따를 가능성은 거의 없다고 해도 무방하다. 실제 복합재 시편 시험 결과를 살펴보면, 정규곡선(Normal curve)이나 정규점수(Normal scores)에 대한 r^2 값을 평가할 때 판정하기 모호한 경우가 자주 발생한다. 시험 데이터의 정규곡선이 기준 정규곡선에서 얼마나 벗어났는지, 정규점수 그래프가 얼마나 직선에 가까운지 등을 판단하는 것은 매우 주관적일 수밖에 없다.

또한, 배치 간 변동성을 평가할 때, ADK 검정 결과 배치들이 동일한 모집단에서 추출된 것이 아니라는 결론이 나더라도, 공학적 또는 현실적인 사항을 고려하여 계산된 통계 결과를 무시하고 배치 합동을 허용할 수도 있다. 예를 들어, 어떤 물성에 대해서는 ADK 검정 결과, 대부분의 환경조건에 대해 배치 데이터가 합동가능하지만 전체 환경조건에 대해 합동가능한 것은 아닌 경우가 있다. 배치 합동이 불가능한 환경조건의 변동계수가 배치 합동이 가능한 환경조건의 변동계수와 유사하다면, 해당 환경조건에 대해서도 합동가능한

것으로 간주할 수 있다. 이러한 경우에도 변동계수의 유사성에 대해서는 주관적인 판단을 해야 한다.

이러한 주관적인 판단의 가능성은 분산동질성을 판단하는 경우에도 자주 발생한다. 예를 들어, 권장 유의수준인 0.05보다 작은 유의수준(0.025 또는 0.01)에서 분산동질성 검정을 수행하여 동질성의 정도를 재평가할 수 있다. 감소된 유의수준에서 분산동질성 검정을 통과한다면, 분산은 증가라고 간주할 수 있다. 또한, 다양한 그룹의 변동계수가 모두 합리적인 수준이며 서로 수 % 이내의 범위에 들어온다면, 분산동질성 검정에는 실패하더라도 해당 그룹의 분산은 충분히 동등하다고 공학적으로 판단할 수 있다.

따라서 데이터집합의 통계적 특성을 검토할 때 많은 경험과 통계적 이론을 바탕으로 공학적 판단을 내려야 함을 주지해야 한다. 국내에서는 다수의 연구기관 및 복합재 제조업체가 복합재 물성 시험을 수행한 경험이 많이 있으나, 이러한 시험 데이터가 서로 공유하기 쉽지 않을 뿐 아니라 엄격한 통계분석 기법에 기반하여 데이터 분석을 수행한 경우도 많지 않다. 이러한 시험 데이터를 서로 공유하고 데이터베이스로 구축하기 위한 노력이 필요하다. 다행히 서론에서 언급한 바와 같이 미국 NCAMP는 복합재 시편 시험 데이터 뿐만 아니라 통계분석 보고서를 지속적으로 공개하고 있기 때문에 이를 참고하는 것도 많은 도움이 될 것으로 판단한다.

[4] CMH-17 Rev.G, “Composite Materials Handbook - Vol.1. Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials”, SAE International, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA 15096, 2012.

[5] J. Tomblin, Y. Ng, and K. Raju, “Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems: Updated Procedure,” FAA report DOT/FAA/AR-03/19, 2003.

[6] F. W. Scholz and M. A. Stephens, “K-Sample Anderson-Darling Tests of Fit,” *Journal of the American Statistical Association*, vol. 82, no. 399, pp. 918-924, Sep. 1987.

[7] Tutorials for Statistics and Qualification, CMH-17 Meeting, Mukilteo, WA, Apr. 2013.

저 자 소 개



이 승 윤

1999년 서울대 기계항공공학부 졸업.
2002년 동 대학원 석사. 2009년 동 대학원 박사. 2012년~현재 한국항공우주연구원 선임연구원. 관심분야는 복합재 구조물 설계/해석 및 물성 평가.

참 고 문 헌

[1] Y. Ng and J. Tomblin, “NCAMP Standard Operating Procedures (SOP),” NCAMP NSP 100, 2010.

[2] Jang Won Suh, Seung Yun Rhee, Young Dae Lee, “Requirements for Composite Material Property Sharing System to Korean Products,” *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol.7, No.1, pp. 32-38, March 2013.

[3] Seung Yun Rhee, “Development of Qualification System for Fiber-Reinforced Composite Materials,” *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol.8, No.3, pp. 55-61, Sep. 2014.