

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(5), 335-341(2013)
 DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.5.335>

실험설계법 기반 풍동시험 시스템 오차 검출 실험연구

오세윤*, 박승오**, 안승기*

Experimental Investigations of Systematic Errors
 in Wind Tunnel Testing Using Design of Experiments

Se-Yoon Oh*, Seung-O Park** and Seung-Ki Ahn*

Agency for Defense Development*, Korea Advanced Institute of Science and Technology**

ABSTRACT

The variation of systematic bias errors in the wind tunnel testing has been studied. A Design of Experiments(DOE) approach to an experimental study of fuselage drag and stability characteristics of a helicopter configuration was applied. When forces and moments measured in one time block differ significantly from measurements made in another time block under assumption that sample observations can be expected to yield same results within permissible measuring errors. The practical implication of this paper is that the systematic error can not be assumed not to exist. The those error reduction could be achieved through the process of randomization, blocking, and replication of the data points.

초 록

풍동시험 중에 발생하는 시스템오차의 변동에 관한 연구를 수행하였다. 회전익 항공기의 기체 공력특성 측정실험에 실험설계 방법론이 적용되었다. 풍동시험 중에 발생하는 시스템오차의 변동에 관한 연구를 수행하였다. 허용 실험오차 내에서 항상 동일한 결과를 얻어야 하는 전제조건에도 불구하고 한 개의 실험시간 블록에서 측정된 힘과 모멘트가 다른 시간블록에서 측정된 것과 상당량 다르게 측정되었다. 실험관련 시스템오차는 존재하지 않는다고 임의로 간주해서는 안되며 이러한 오차의 감소는 랜덤화, 블록화 및 반복화 등의 실험설계원리의 적용을 통해 가능하다.

Key Words : Design of Experiments, DOE(실험설계법), Systematic Error(시스템 오차), Block Effect(블록효과), ANOVA(분산분석), Wind Tunnel Testing(풍동시험)

1. 서 론

실험설계법(Design of Experiments; DOE)[1]이란 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행

하고 데이터를 어떻게 취하며 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하게 되면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것으로 국내에서는 실험계획법이라고도 불린다.

DOE는 1850년대 영국에서 농업 생산성 향상

† Received: March 8, 2013 Accepted: April 25, 2013

* Corresponding author, E-mail : syoh@add.re.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

을 위한 농업실험에서부터 출발하여 1932년에 R. A. Fisher가 실험의 배치방법을 창안하고 실험데이터의 해석방법으로 분산분석법(analysis of variance ; ANOVA)을 사용함으로써 비로소 하나의 학문으로 출발하게 된 분야이다. 그 후 이론과 실질적인 측면에서 많은 연구가 이루어지고 발전되어 오늘날에 와서는 강건설계(다구치방법)와 더불어 농업과 산업분야의 실험뿐 아니라 여러 분야의 공학실험에 적용되어 많은 성과를 올리고 있는 통계학 기반의 학문분야이다.

실험설계에 사용되는 기본원리[1]로는 크게 다음의 세 가지를 들 수 있으며, 이러한 원리들을 염두에 두고 실험계획을 한다면 높은 정밀도와 분석이 용이한 실험계획을 구상할 수 있다. 이중 블록화(blocking) 원리는 실험환경을 될 수 있는 한 균질한 부분으로 나누어 블록(block)으로 만든 후에 블록 내에서 각 인자(요인)의 영향을 조사하는 것을 말한다. 실험전체를 시간적 혹은 공간적으로 분할하여 블록을 만들어 주게 되면 각 블록 내에서는 실험환경이 균질하게 되어 높은 정밀도의 결과를 얻을 수 있다. 즉 블록화에서는 블록을 하나의 인자로 하여 그 효과를 별도로 분리시키게 되므로 총 변동 중에서 블록간의 변동을 제외시키고 남는 것은 다른 요인들의 균질한 블록내의 변동뿐이다.

국외의 경우 미국 NASA Langley 연구센터를 중심으로 1998년부터 DOE 적용 풍동시험에 관한 연구[2-7]를 꾸준히 진행하고 있다. Richard DeLoach의 참고문헌 [2]는 DOE를 풍동시험분야에 적용한 초기의 논문으로 블록효과의 제거를 통한 정밀도 향상에 대해 연구하였으며, 참고문헌 [3]에서는 풍동시험의 재현성(reproducibility) 측면에서의 시스템오차 영향을 다루었고 참고문헌 [4]에서는 시간의 경과에 따라 발생하는 시스템오차의 영향을 실험설계법의 블록화 원리를 이용해 제거할 수 있다는 논거를 제시하고 있다. 2005년경에 이르러서는 여러 대학과의 공동연구를 통해 자동차[5]와 항공기[6,7] 등에 관한 풍동시험 연구결과가 NASA Langley 연구센터 이외의 기관에서도 발표되고 있다. 그러나 국내외를 막론하고 공기역학 관련 각종 설계와 실험분야에서는 관습적으로 기존의 전통적인 연구개발방식을 주로 고수하여왔으며, 범용 기술분야의 하나인 통계적 실험설계방안에 대한 관심과 연구의 부족으로 항공관련 전문기술분야에 이를 적극적으로 활용하지 못하고 있는 실정이다. 특히 풍동시험중에 시간의 경과에 따라 발생할 수 있는 시스템오차의 영향에 대한 이해와 관련 연구가 부

족하므로 이에 대한 연구의 필요성이 절실하다고 판단된다.

전통적 풍동시험분야에 DOE를 적용하여 실험을 보다 효과적이고 최적화될 수 있도록 하기 위해서는 먼저 실험설계 방법론에 대한 고찰이 선행되어야 하고 더불어 실제 풍동시험분야에서의 적용연구를 필요로 한다. 이에 본 연구에서는 실험설계 방법론을 적용한 연구의 일환으로 풍동시험시간 경과에 따른 공력계수 측정값 평균의 변동 즉, 시스템오차(systematic error or bias error)의 변화여부를 검출하도록 하여 풍동시험 중에 항상 수반되는 블록효과(block effect)[1-4]의 존재를 규명하고자 하였다. 또한 검출된 실험오차를 순수오차(pure error) 성분과 각 발생원인별 성분으로 분해하도록 하여 궁극적으로는 향후 보다 신뢰성 있는 실험결과를 추출이 가능하도록 하였다.

II. 실험설계와 블록효과

2.1 블록효과

만약 측정시스템을 충분히 안정화시키고 실험환경이 통제된 상황에서 적절히 교정된 장비를 사용하여 실험을 수행하게 되면 측정 시스템의 시스템오차는 일정 값으로 고정되어 변동되지 않는다는 것이 일반적인 생각이다. 그러나 Fig. 1에서와 같이 한 개의 실험시간(Block 1)에서 측정된 특성치(Y, 힘과 모멘트)가 허용 실험오차 즉 랜덤오차(random error) 내에서 항상 동일한 결과를 얻어야 함에도 불구하고 다른 시간블록(Block 2)에서 측정된 것과 상당량 다른 경우가 발생한다면 이는 시간에 따라 변동하는 여러 측정관련 장애요소들(nuisance factors)[1]로 인한 시스템오차의 변동(bias shift)에서 기인한다고 추정할 수 있다. 이러한 블록에 따른 효과는 측정시의 확률적인 랜덤오차로 인한 변동이 아닌 측정값 평균의 이동 즉 시스템오차의 이동[3,4]을

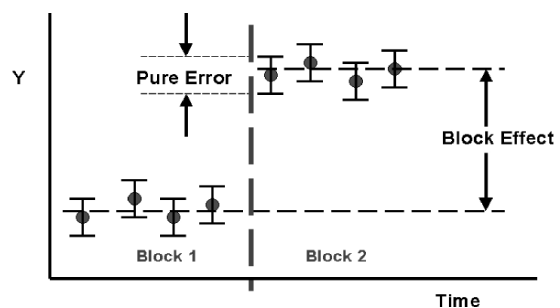


Fig. 1. A block effect as a function of time[4]

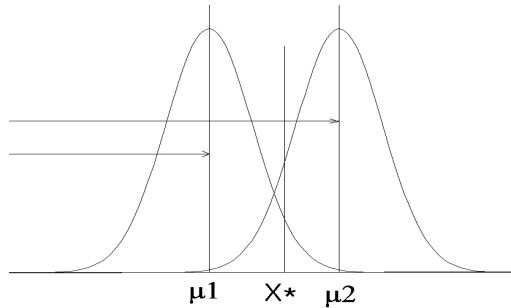


Fig. 2. Distribution of mean effects

의미한다. 물론 이러한 변동을 허용 실험오차가 매우 큰 경우의 변동으로 생각할 수도 있으나 Fig 1과 같이 총 변동에 비해 상대적으로 좁은 폭의 변동특성을 갖는 여러 그룹형태로 분리된 랜덤오차 특성의 경우에는 관련 분석을 통해 이러한 변동이 측정시의 확실적인 랜덤오차로 인한 변동인지 아닌지를 판단할 수 있다.

Figure 2와 같이 어떤 측정값 X^* 는 주어진 유의수준(significance level)과 제1종/제2종 과오(type I, II error)를 사용한 가설의 검정(hypotheses test)

[1,8] 결과에 따라 μ_1 에 속한 표본인지 아니면 평균이 이동된 μ_2 에 속한 표본인지를 판단할 수 있다. 만약 t-검정이나 분산분석[1,8]을 이용한 가설의 검정 과정을 통해 측정값 평균의 이동이 검출된다면 평균값을 중심으로 변동하는 랜덤오차와는 달리 일정한 값으로 고정되어 불변한다고 간주한 시스템오차(바이어스 오차)가 시간경과에 따라 μ_1 에서 μ_2 로 이동된 것이며 Fig. 1의 블록 효과[3,4]가 나타난 것으로 판단할 수 있다. 이러한 시스템오차의 변동은 전통적인 실험방식을 통해서도 검출이 어렵지만 DOE와 같은 통계적 실험설계 방법론을 사용하게 되면 이들에 대한 검출과 제거가 가능하다.

2.2 블록효과 검출 풍동시험

풍동시험모형에 작용하는 6성분 힘과 모멘트가 같은 조건하에서 풍동시험시간의 경과에 따라 항상 동일하지를 분석하였다. 만약 시간경과에 따른 시스템오차의 변동이 매우 적거나 없다면 동일한 측정점에 대한 결과는 특정 평균값을 중심으로 랜덤오차의 특성을 갖으며 평균의 변동이 없다는 검정결과가 나타나야한다. 실험의 반응 특성치는 Fig. 3의 모형[9]에 작용하는 항력계수 및 양력계수 등의 6성분 힘과 모멘트계수였으며 동일조건 풍동시험(점)간의 시간간격을 실험설계의 제어인자[1]로 사용하였다. 제어인자의 수준은



Fig. 3. Fuselage drag-stability model[9]

수일단위(days/hours) 7개의 긴 시간간격(long-term)과 수분(minutes)단위의 8개의 짧은 시간간격(short-term)을 사용하였다.

수일단위의 시간경과에 따라 Fig. 2에서와 같은 측정 평균값의 변동이 발생한다면 셋 이상의 독립된 표본들의 평균이 같다고 할 수 있는지를 검증하는데 사용되는 통계해석법의 하나인 일원 분산분석(One-Way ANOVA)을 통해 긴 시간간격 측정자료 간 차이의 유의성(significance)을 검출할 수 있으며, 이를 Table 1의 풍동시험 명목 허용오차[10]와의 비교를 통해 시스템오차의 변동을 평가할 수 있을 것이다. 또한 긴/짧은 시간간격간의 변동의 차이와 이들 간의 상호작용(교호작용)을 이원 분산분석(Two-Way ANOVA)을 통해 평가할 수 있다.

약 30일 간의 풍동시험기간 동안에 총 7회의 동일한 실험을 반복하면서 각 1회의 실험마다 8번씩 동일조건의 반복실험(replication)을 수행하였으며, 이때의 각 측정점에는 50개의 반복(repetition) 측정된 평균값들이 사용되었다. 풍동시험을 통해 총 56회(7회×8반복)의 반복측정점에 대한 자료를 획득하였으며, 8번의 반복실험시 4번 반복(약 10분)마다 약 10분간의 시간 간격을 두고 총 336개 실험점(56회×6성분)에 대한 측정 평균값의 변동을 분석하였다. 풍동시험을 통해

Table 1. Permissible measuring errors in wind tunnel testing[10]

	Low AOA	High AOA
Drag	$C_D = \pm 0.0001$	$C_D = \pm 0.0020$
Side Force	$C_Y = \pm 0.0010$	$C_Y = \pm 0.0020$
Lift	$C_L = \pm 0.0010$	$C_L = \pm 0.0020$
Rolling Moment	$C_l = \pm 0.0010$	$C_l = \pm 0.0020$
Pitching Moment	$C_m = \pm 0.0010$	$C_m = \pm 0.0020$
Yawing Moment	$C_n = \pm 0.0001$	$C_n = \pm 0.0010$
	or 0.1% FS	or 0.25% FS

측정된 실험자료는 받음각(Angle of Attack ; AOA) 8°, 속도 75 m/s에서 실험모형에 작용하는 6성분 힘과 모멘트계수로 Table 1의 낮은 받음각 (Low AOA)에 해당한다.

III. 실험결과 및 검토

3.1 블록효과 검출결과

Table 2는 회전익기 기체공력측정 풍동시험[9]으로부터 획득된 6성분 공력계수 중 동일조건 양력계수(C_L)의 56회 반복측정 결과이다. 서로 다른 시간블록에서 측정된 결과들과 비교할 때 각 실험시간(블록)에서 측정된 양력계수는 Table 1의 허용 실험오차를 초과하여 많은 차이가 발생하였다. 또한 Fig. 4에서와 같이 실험단위를 동질적인 쌍으로 묶은 다음 각 쌍에서의 반응값 차이를 이용하여 모평균간의 차이를 비교하는 다중 대응비교(multiple paired comparison)[1,8]에서도 시간경과에 따른 측정값의 평균에서 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 예를 들어 Day 2의 경우 Day 5~7과 유의수준 1%(0.01)조건에서 서로 크게 차이가 남을 알 수 있다. 이러한 변동의 원인들은 주로 명확하게 설명할 수 없는 원인들(온도, 습도, 측정기기의 드리프트, 모형의 변형 등)[1-4]로 간주되곤 하는데, 본 연구의 경우에는 형상조합 시험을 위해 회전익기 모형[9]이 다수의 모듈구조로 제작된 것이 측정값의 차이에 영향을 준 것으로 여겨진다.

3.2 시스템오차 변동 분석결과

본 연구에서는 고정되었다고 간주한 시스템오차의 시간경과에 따른 변동으로 인한 공력계수측

Table 2. 7 groups of 8 lift coefficient replicates

		Long-term variation (days/hours) ⇒					
Short-term variation (30 min) ⇒	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6	Day 7
	Run 15	Run 19	Run 36	Run 43	Run 76	Run188	Run190
	0.5078	0.5010	0.4949	0.4996	0.4915	0.5008	0.4678
	0.5036	0.4996	0.4916	0.4981	0.4877	0.4685	0.4860
	0.5049	0.4975	0.4897	0.4981	0.4824	0.4654	0.4865
	0.5011	0.4978	0.4865	0.4980	0.4802	0.4936	0.4851
	10분 경과	10분 경과	10분 경과	10분 경과	10분 경과	10분 경과	10분 경과
	0.5032	0.5017	0.4960	0.4941	0.4800	0.4911	0.4831
	0.5028	0.5009	0.4947	0.4947	0.4766	0.4908	0.4831
	0.5042	0.5009	0.4986	0.4936	0.4811	0.4906	0.4839
0.5045	0.5023	0.4958	0.4928	0.4807	0.4915	0.4843	

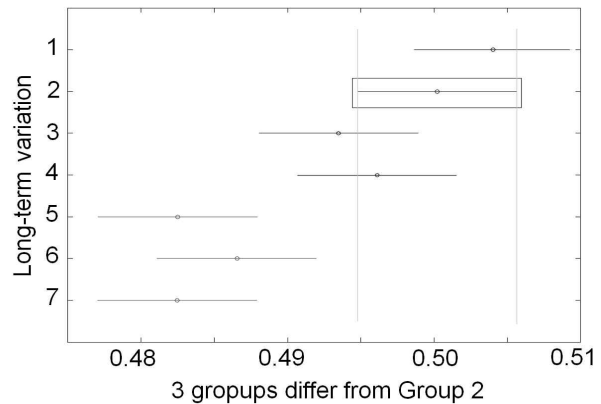


Fig. 4. Multiple paired comparison of C_L @ 1% level

Table 3. One-way ANOVA table for C_L

Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
Long-term effect	0.00353	6	0.00059	16.71	2.2e-10
Error	0.00172	49	0.00004		
Total	0.00525	55			

$F_{critical}(1\%, 6, 49) = 3.2$

정값 평균의 변동에 대한 유의성을 판단하고, 풍동시험 측정결과에서 평균의 차이를 발생시키고 시간의 경과에 따라 변화하는 시스템오차(bias shift)를 검출하였다. 검출된 이러한 평균값의 변동은 DOE에서 다루는 블록설계(block design)의 대상인 블록효과[1-4]에 해당하는데 이는 실험수행자가 시간에 따른 시스템오차의 영향을 매우 작다거나 또는 존재하지 않는다고 임의대로 간주하는 것이 틀릴 수도 있다는 점을 입증하는 결과라고 볼 수 있다. 이러한 측정결과의 평균 차이에 대한 평가는 항공기 형상에 대한 유사 연구결과[3]에서도 검출된 바가 있다.

Table 3은 양력계수 측정결과에 대한 일원 분산분석결과로, 분산(산포)의 비율을 이용한 F-검정(F test)[1,8] 결과를 통해 긴 시간간격(블록)의 분산변동(long-term variation)이 오차의 분산변동에 비해 약 16배 정도 크다는 것을 알 수 있다. 이는 표본의 자유도와 유의수준 1%를 기준한 F 임계값($F_{critical}$) 3.2를 크게 상회하므로 신뢰수준(confidence level) 99%로 풍동시험모형에 작용하는 양력이 풍동시험시간의 경과에 따라 항상 동일하지 않으며 시간간격(블록)에 따른 평균의 차이 즉 시스템오차의 변동이 존재한다고 판단할 수 있다. 여기서 분석에 따른 오차항은 정규분포 $N(o, \sigma^2)$ 로부터 확률추출(random sampling)된 것

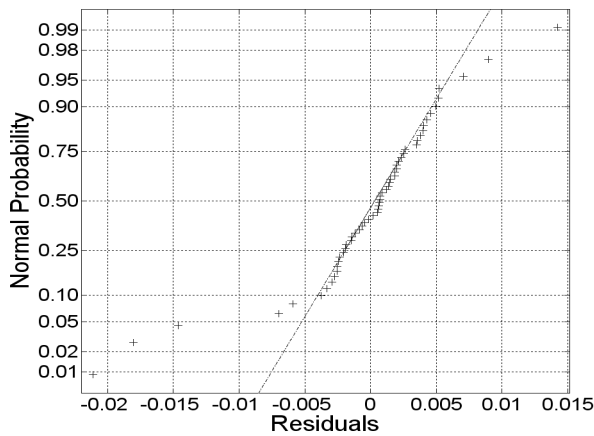


Fig. 5. Normal probability plot for C_L residuals

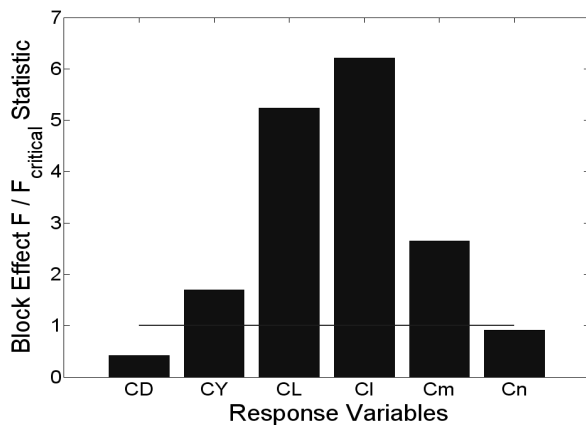


Fig. 6. Block effect F Statistic @1% level

이라고 가정하는데, 이러한 오차항에 대한 가정은 Fig. 5에서와 같은 정규확률지(normal probability plot)[1,8]를 이용한 잔차분석을 통해 확인할 수 있으며 그림을 통해 정규분포 가정에 큰 위배사항이 없음을 알 수 있다. Fig. 6에는 이

Table 4. Two-way ANOVA table for C_m

Source	Sum Sq.	d.f.	Mean Sq.	F	Prob>F
Long	0.00009	6	1.52e-05	21.1	0
Short	0.00005	1	4.59e-05	63.7	0
Long*Short Interaction	0.00001	6	2.00e-06	2.78	0.0227
Error	0.00003	42	7.21e-07		
Total	0.00018	55			
C _m : One-Way ANOVA, Long. F = 8.45					

러한 분산분석을 6분력 모두에 대해 수행하고 임계값 $F_{critical}$ 의 비율로 나타난 F-검정결과가 나와 있다. 그림으로부터 항력계수(C_D)와 요잉모멘트 계수(C_n)를 제외한 나머지 4분력에서는 평균의 차이(블록효과)가 존재함을 알 수 있다.

Table 4는 피칭모멘트계수(C_m) 추정결과에 대한 이원 분산분석 결과로 이전의 긴 시간간격의 블록효과와 더불어 짧은 시간간격에 대한 시스템 오차의 변동(분산변동)을 평가할 수 있다. 분석 결과로부터 긴 시간간격과 짧은 시간간격의 변동이 오차의 분산변동에 비해 약 21~63배 정도 크다는 것을 알 수 있었으므로 이들 시간간격(블록)에 따른 평균의 차이가 존재한다고 판단할 수 있으며 이들 간의 상호작용은 상대적으로 작음을 알 수 있었다. 이러한 짧은 시간간격의 변동은 약 10분(1회 풍동시험시간) 동안의 짧은 시간경과에서 발생한 시스템 변동(DC shift or bias shift)의 영향[3,4]을 말한다.

Figure 7은 각 6성분 분력 실험자료의 총 변동에 대한 긴 시간간격의 변동(제곱합, sum of square)의 기여도를 나타낸 그림이다. 이와 같은

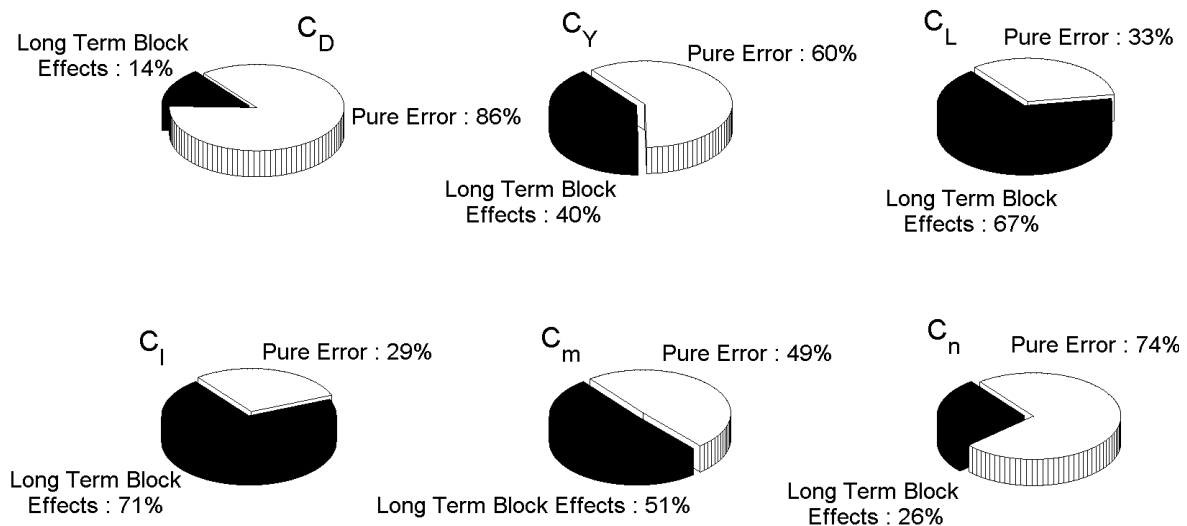


Fig. 7. Long-term block effect contribution

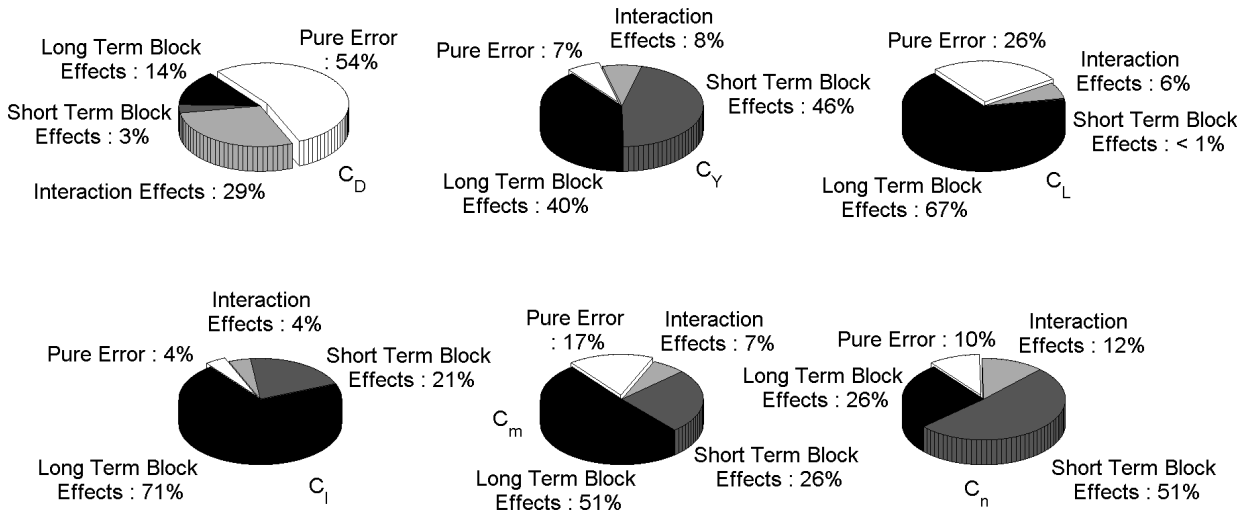


Fig. 8. Short-term block effect contribution

분석을 통해 전체 실험오차를 순수오차와 긴 시간간격의 변동으로 설명되는 시스템오차변동 즉 블록효과로 분해할 수 있다. 긴 시간간격에 대한 이원 분산분석과 일원 분산분석 결과의 비교로부터 약 10분 정도의 짧은 시간 경과에 대한 블록화 실험설계를 통해 C_m 의 경우 약 2.5배 (21.1/8.45)의 검출력(power of test) 증가를 얻을 수 있었으며, 이는 설명할 수 없는(unexplained) 순수오차로 분류되었던 전체오차가 블록화를 통해 Fig. 8과 같이 발생원인별로 분할되어질 수 있음을 의미한다. F 검정분석은 데이터의 개수에 반비례하는 오차의 제곱합의 비율을 사용하므로 동등한 검출력을 기준으로 할 때 블록화를 통해 획득할 자료의 양을 감소시켜도 됨을 의미하므로 최소입력(풍동시험)으로 최대출력(공력계수)을 얻는 최적화개념의 문제로 귀결시키게 된다. 이러한 블록화 방식은 상대적으로 매우 적은 양의 획득자료로도 기존의 전통적인 실험방식에 상응하는 정밀도를 얻을 수 있는 실험설계 접근방식의 하나에 해당한다.

Table 5는 본 연구의 회전익 항공기 공력계수 예측을 위한 반응표면분석법(response surface methodology, RSM)[1,13,14] 적용실험으로부터 획득한 블록효과(시스템오차의 변동)의 측정결과로, 블록설계 적용 반응표면실험[12]을 통해 약 4~60 counts (0.0004~0.0060) 만큼의 공력계수 정밀도를 향상시킬 수 있었다. 이러한 긴 시간경과에 따른 시스템오차의 변동을 블록화 적용 실험설계를 통해 감소시키고, 짧은 시간경과에 따른 변동은 측정순서의 랜덤화를 통한 시스템오차 특성의 평균화를 통해 오차성분을 상쇄함으로써 제반 시스템오차의 감소가 가능하였다.

Table 5. Block effect of response surface[12]

	C_D	C_Y	C_L	C_I	C_m	C_n
Block Effect	0.0022	0.0060	0.0028	0.0000	0.0018	0.0004
Error Budget[4]	0.0001	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0001

IV. 결론

본 연구의 풍동 블록효과 검출실험을 통해 실험시간 경과에 따라 나타나는 측정값 평균의 변동 즉 시스템오차의 변동을 검출할 수 있었으며, 이러한 시스템오차의 변동이 실험설계방법론의 적용에 의해 측정 데이터의 정밀도에 미치는 영향을 파악할 수 있었다. 또한 측정값들의 통계적인 분산변동의 분석을 통해 총 실험오차를 순수오차와 발생원인별 오차성분들로 분해함으로써 그간에 설명할 수 없었던 오차들이 랜덤오차가 아닌 시간경과에 따라 방향성을 갖고 변하는 시스템 오차임을 검출하였고 이를 통해 보다 신뢰성 있는 실험결과의 추출이 가능하도록 실험의 검출력을 증가시킬 수 있었다.

본 연구를 통해 수일동안의 긴 시간경과뿐 아니라 약 10분가량의 짧은 실험시간경과에서도 명목허용오차를 초과하는 매우 큰 시스템오차의 변동이 존재하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 변동 방향성을 갖는 시스템 오차들은 기존의 랜덤오차에서와 같이 더 많은 반복측정이나 지속적인 센서의 교정작업으로도 모두 해결할 수 없는 특징을 갖고 있다. 따라서 이러한 시스템 오차의 변동 즉 블록효과를 제거하고 보다 높은 정밀도의 데이터를 얻기 위해서는 실험수행자가 기존의

전통적인 실험방식만을 고수하지 말고 시험준비 단계에서부터 DOE와 같은 통계적인 방법론을 적극 활용하도록 하는 것이 효과적일 것으로 판단되며 이를 통해 좀 더 신뢰성 있는 실험데이터에 대한 불확도 평가가 이루어질 것으로 판단된다.

References

- 1) Montgomery D. C., "Design and Analysis of Experiments", 6th ed., John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- 2) DeLoach, Richard, "Application of modern experiment design to wind tunnel testing at NASA Langley research center", AIAA 98-0713, 1998.
- 3) DeLoach, R., "Tactical defenses against systematic variation in wind tunnel testing", AIAA 2002-0885, 2002.
- 4) DeLoach, R., "Blocking: a defense against long-period unexplained variance in aerospace ground testing", AIAA 2003-0650, 2003.
- 5) Landman, D., Simpson, J., and Sumner, T., "Use of Designed Experiments in Wind Tunnel Testing of Performance Automobiles", SAE International, 2002-01-33 13, 2002.
- 6) Landman, D., Simpson, J., Mariani, R., Oritz, F. and Britcher, C., "A High Performance Aircraft Wind tunnel Testing using Response Surface Methodologies", AIAA 2005-7602, 2005.
- 7) Landman, D., Simpson, J., Vicroy, D. and Parker, P., "Efficient Methods for Complex Aircraft Configuration Aerodynamic Characterization using Response Surface Methodologies", AIAA 2006-0922, 2006.
- 8) Do-Sun Bae et al., "Statistics : Teory and Application", Chungmungak, 2004.
- 9) Se-Yoon Oh, Keum-Yong Park, Jong-Geon Lee and Seung-Ki Ahn, "An Experimental Study of Fuselage Drag and Stability Characteristics of a Helicopter Configuration", (in Korean) Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Science, Vol. 33, No. 9, pp. 9~15, 2005. 9.
- 10) Barlow, J. B., Rae, William H. and Pope, Alan, "Low-Speed Wind Tunnel Testing", 3rd ed., Chapter 7., 1999.
- 11) Se-Yoon Oh, Seung-O Park and Seung-Ki Ahn, "Design of Experiments based Systematic Error Reduction Techniques in Wind Tunnel Testing", Proceeding of the 2007 KSAS Fall Conference, KSAS07-2121, 2007. 11.
- 12) Se-Yoon Oh, Seung-O Park and Seung-Ki Ahn, "Design of Experiments based Accuracy Improvement Techniques in Wind Tunnel Testing", Proceeding of the 2007 KSAS Fall Conference, KSAS07-2122, 2007. 11.
- 13) Se-Yoon Oh and Seung O. Park, "Optimal Aft End Distorted Fin Model Using Response Surface Method", AIAA Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.46 No. 3, 2009.5., pp. 592~598.
- 14) Se-Yoon Oh, Sung-Cheol Kim, Do-Kwan Lee, Sangho Kim and Seung-Ki Ahn, "Magnus and Spin-Damping Measurements of a Spinning Projectile Using Design of Experiments", AIAA, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 47, No. 6, Nov.-Dec. 2010, pp. 974~980.