

통계적 기법을 이용한 유압구동 부재의 최적 작동조건의 선정

류을현[†] · 배효준 · 서영백* · 박흥식**[‡]

동아대학교 대학원, *대한상공회의소 부산인력개발원, **동아대학교 기계산업시스템공학부

Selection of the Optimum Working Condition for Hydraulic Actuator Parts using Statistical Techniques

Ul-Hyun Ryu[†], Hyo-Jun Bae, Young-Beak Seo* and Heung-Sik Park**[‡]

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

*Korea Chamber of Commerce and Industry, Busan Human Resources Development Institute

**Division of Mechanical & Industrial system Engineering, Dong-A University

Abstract – The average frictional coefficient was used generally to analyze the working process of the lubricated machine parts. But it is difficult of taking the correct frictional coefficient because the average frictional coefficient of it is progressed always unstably with a large amplitude on working condition. If the correct analysis of frictional coefficient on working condition for the lubricated machine parts can be possible, it can be effect on condition diagnosis of lubricated machine system. This study was carried out to get the optimum working condition of the hydraulic actuator parts using statistical techniques. From this result, it has the lowest friction coefficient in case of applied load of 3 kg and sliding speed of 120 mm/sec.

Key words – statistical techniques, friction coefficient, working condition, hydraulic actuator parts.

1. 서 론

최근 유압피스톤 모터의 개발동향이 소형경량화, 고풍력 및 고밀도화됨에 따라 유압피스톤 모터를 구성하는 핵심부품인 슬리퍼 패드와 스와쉬 플레이트(swash plate), 밸브 플레이트(valve plate)와 실린더 블록(cylinder block) 그리고 피스톤(piston)과 실린더 블록 보어(cylinder block bore)의 3가지 요소는 회전구동기의 개발에 핵심적인 요소기술로서 큰 관심을 모으고 있다.

일반적으로 유압피스톤 모터를 구성하는 구동 부재들은 상호 끊임없이 마찰운동하면서 작동되지만 만약 이들 부재의 마찰상태가 불안정하게 되면 작동 중 이 상소음과 진동의 발생으로 예기치 못한 고장이 발생하게 된다. 이처럼 유압피스톤 모터의 원활한 작동상태를 유지하기 위해서는 각 부재 사이에는 항상 최적의

마찰상태가 유지되어야 한다.

그러나 유압구동 부재의 작동상태는 직접 눈으로 관찰하기 어렵고, 또한 작동 중 미끄럼속도, 작용하중, 작동유의 산화변질, 작동시간 등의 다양한 마찰인자가 상호 복잡하게 작용하기 때문에 그들 각각의 인자가 마찰특성에 어느 정도 기여하는가를 정확하게 기술한다는 것은 상당히 어렵다.

따라서 유압구동 부재의 마찰특성을 정량적으로 정확히 분석하기 위해서는 마찰계수를 측정하여 분석하는 것이 지배적으로 사용되고 있지만, 마찰계수는 작동조건에 따라 매우 불규칙하게 변화하는 경우가 많기 때문에 마찰계수의 측정은 통상적으로 그 평균값을 취하여 측정하는 것이 일반적이다. 평균값에 의한 마찰계수 측정은 보다 정확한 유압구동 부재의 마찰특성을 알기 어렵고 또한 마찰계수가 최소값을 가지는 작동조건을 찾기는 더욱 어렵다.

이를 위하여 선진국을 중심으로 1980년 초부터 최적의 마찰상태를 찾고 이를 통하여 구동시스템의 작동

[†]주저자 : hyehnew@lycos.co.kr

[‡]책임저자 : parkhs@daunt.donga.ac.kr

상태를 예지하고 진단하고자 하는 연구가 진행되고 있지만, 이러한 기술은 정밀한 신호처리 기법의 도입 및 전문적인 기술인력이 필요하다는 문제점이 있다[1-3]. 이와 함께 현재까지 마찰에 관련된 어떠한 인자가 마찰계수에 가장 영향을 미치는가에 대한 정량적인 data를 제시한 연구는 거의 진행되고 있지 않고 있다.

이러한 문제점을 해소하기 위해서는 마찰실험 조건에 따른 마찰계수에 대한 정량적인 분석을 통하여 최소의 실험횟수로 최적의 마찰조건에 대한 정보를 얻을 수 있는 통계적 분석의 적용이 필요하게 된다.

따라서 본 연구에서는 유압구동계를 모의한 윤활 마찰실험을 통하여 작동조건에 따라 불안정하게 진행되는 마찰계수에 영향을 미치는 마찰인자를 통계적 기법을 통하여 이를 분석함으로써 유압구동 부재의 최적 작동조건을 선정하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험 방법

2-1. 윤활 마찰실험

윤활 마찰실험을 위하여 ball on disk형 마찰시험기를 사용하였으며[4], 윤활실험에 사용된 볼 시험편은 직경 4.76 mm의 순도 99.7%인 알루미늄 세라믹(Al_2O_3)이며, 디스크 시험편은 Fig. 1의 유압피스톤 모터의 구동부품인 슬리퍼패드(slipper-pad)와 피스톤 볼(piston ball)로 사용되는 청동주물 LBC 3와 침탄처리한 크롬-몰리브덴강 SCM440을 사용하였다.

그리고 실험에 사용한 윤활유는 기유(base oil)인 무첨가 파라핀계 광유(8.2cSt@40°C)를 사용하였으며 윤활 장치부에는 시험편 접촉점 하부에 oil bath를 설치하고 윤활유 공급은 순환펌프로써 실리콘 관을 통하여

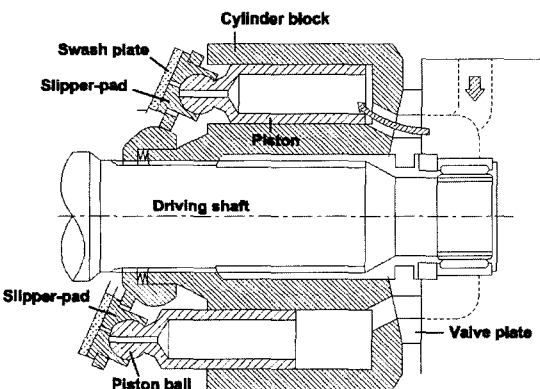


Fig. 1. Schematic diagram of hydraulic piston pump.

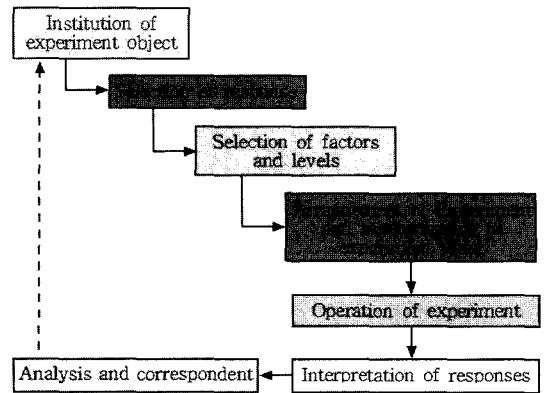


Fig. 2. Flow chart for experiment design.

시험편 접촉점에 분사시켰다. 실험 중 마찰계수의 측정을 위하여 볼 시험편 홀더부에 스트레인 게이지(strain gauge)를 설치하여 이때 발생하는 마찰력 신호를 증폭기와 AD converter를 통하여 PC로 저장한 후 자체 구축한 마찰계수 측정 알고리즘을 사용하여 이를 구하였다.

2-2. 통계적 기법

본 연구에서는 통계적 분석기법을 위하여 실험계획법을 사용하였으며, 이의 실험순서는 Fig. 2와 같다. 먼저 윤활 마찰실험에 있어서 특성치라 할 수 있는 마찰계수에 가장 많은 영향을 미치는 작동조건 즉, 마찰인자를 선정해야 한다. 따라서 윤활 마찰실험에 있어서 마찰계수에 미치는 마찰인자로는 유압구동 부재, 작용하중, 미끄럼속도, 미끄럼거리 및 윤활유 등 여러 가지 인자들이 있으며[4], 본 실험에서는 유압구동 부재, 작용하중, 미끄럼속도를 마찰인자로 선정하였다.

각 마찰인자에 대한 수준은 Table 1에 나타내었으며 요인배치법(factorial design)[5]을 이용하여 실험계획을 수립하여 마찰실험을 수행하였다. 요인 설계는 여러 가 공인자들이 마찰계수 즉, 특성치에 어떠한 영향을 미치는가를 결정하여 준다. 실험을 수행할 때, 동시에 여러 마찰인자 수준들을 변화시키는 것은 한 번에 하

Table 1. Experimental conditions

Factors	Level			
	1	2	3	4
Materials	LBC3	SCM440		
Applied Load (kg)	3	5	7	
Sliding speed (mm/sec)	40	80	120	160

나의 인자 수준을 변화시키는 것에 비하여 시간과 비용적인 면에서 효율적일 뿐만 아니라, 인자들 간의 상호작용에 대한 연구도 가능하게 해 줄 수 있다. 먼저 각 인자에 대한 삼원배치법에 의한 분산분석(Analysis of variance)[6-8]을 통하여 각 인자에 대한 주 효과를 분석하고자 한다. 분산분석은 특성치의 산포를 제곱합(Sum of squares)으로 나타내고 이를 작동조건과 관련된 인자마다의 제곱합으로 분해하여 확률밀도함수인 표준정규분포에 의한 검정과 오차에 비하여 특히 많은 영향을 주고 있는 인자가 무엇인가를 정량적으로 분석하는 방법이라고 할 수 있다.

2.3. 마찰계수 분석

유압구동 부재의 윤활 마찰실험에서의 특성치인 마찰계수는 일정한 변화를 나타내고 있으며 마찰인자, 즉 구동부재, 작용하중 및 미끄럼속도에 따라 변하는 마찰계수에 영향을 미치는 인자를 분산분석을 통해 분석하였다. 또한 각 인자의 변화에 따른 마찰계수의 진폭 변화에 대한 분석을 식 (1)과 같은 표준편차(STDEV)를 이용하여 분석하였다.

$$STDEV = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

여기서 x_i 는 각 실험에 따른 특성치, \bar{x} 는 특성치의 평균, n 은 실험횟수를 나타낸다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 미끄럼속도에 따른 마찰계수

Fig. 3은 미끄럼속도에 따른 총 미끄럼거리에서의 마찰계수 평균값의 변화를 나타내었다. 그림에서 평균 마찰계수는 LBC3에 비해 SCM440이 대체로 작은 값을 나타내며, 작용하중이 5 kg와 7 kg에 비하여 3 kg일 때가 마찰계수가 가장 낮은 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 3의 평균 마찰계수는 각 미끄럼속도에서 미끄럼거리에 따른 불안정한 마찰계수의 평균값을 사용한 것으로 보다 정확한 마찰계수를 나타내고 있지 않고 있다. 즉, 평균 마찰계수는 미끄럼거리의 증가에 따라 마찰계수의 불안정성과 이의 진폭변화가 크게 작용한 결과로 각 미끄럼속도에서 일정한 경향성을 찾기가 어렵기 때문에 표준편차를 사용하여 마찰계수를 나타낼 필요가 있다.

Fig. 4는 미끄럼속도에 따른 마찰계수의 표준편차는

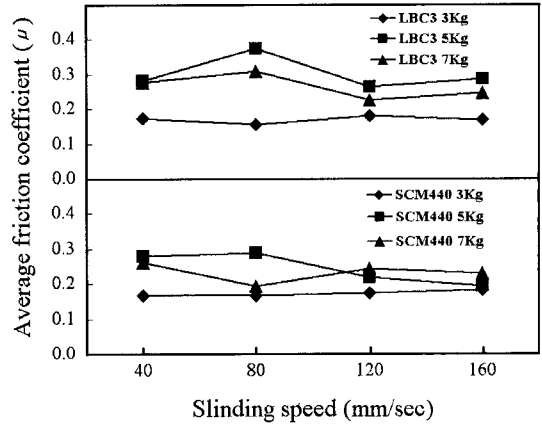


Fig. 3. Relation between average friction coefficient and sliding speed.

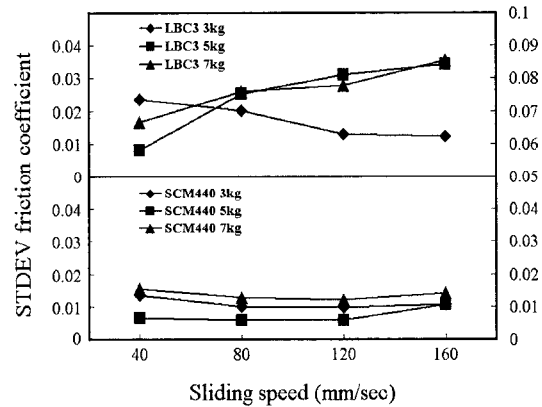


Fig. 4. Relation between STDEV of friction coefficient and sliding speed.

식 (1)을 이용하여 나타낸 것이다. 여기서 마찰계수의 표준편차는 마찰의 진행과정에서 발생하는 마찰계수의 진폭 범위를 나타낸다. LBC3의 경우 작용하중 5 kg과 7 kg에서는 미끄럼속도의 증가에 따라 대체로 증가하고 있으며, 3 kg의 경우는 오히려 감소하고 있다는 것을 볼 수 있다. 그리고 SCM440은 작용하중에 관계없이 대체로 일정한 표준편차를 나타내고 있다.

이것은 Fig. 3의 LBC3와 SCM440의 마찰실험에서 각 작용하중과 미끄럼속도에서 미끄럼거리의 증가에 따라 마찰계수의 진폭변화가 마찰조건에 따라 다르게 나타난 결과라고 생각된다. 특히 LBC3의 경우 작용하중이 5 kg과 7 kg의 경우는 각 미끄럼속도에서 마찰계수의 진폭변화가 미끄럼거리의 증가에 따라 매우 크고 불규칙하게 변화하였지만 3 kg의 경우는 오히려 진폭

Table 2. ANOVA for average friction coefficient

Factors	<i>S</i>	\varnothing	<i>V</i>	<i>F</i> ₀	<i>P</i>
Materials	0.003121	1	0.003121	2.76	0.115
Applied Load	0.041307	2	0.020654	18.29	0.000
Sliding speed	0.005446	3	0.001815	1.61	0.225
Error	0.019196	17	0.001129		
Total	0.069070	23			

Where

- S* : sum of squares
- \varnothing : degree of freedom
- V* : mean square
- F*₀ : ratio of mean square

의 크기도 작고 안정되게 실험시간 동안 진행되었다. 그리고 SCM440의 경우는 LBC3보다 작용하중에 관계없이 각 미끄럼속도에서 미끄럼거리의 증가에 따른 마찰계수의 진폭변화가 대체로 크지 않았다. LBC3의 경우 작용하중이 고하중인 5 kg과 7 kg 경우는 미끄럼속도의 증가와 함께 접촉부의 온도상승으로 실험재료의 연화가 진행되어 미끄럼거리의 증가에 따라 볼 시험편이 LBC3의 마찰 신생면을 반복적으로 마찰하게 되어 마찰계수의 진폭변화가 크게 나타난 것으로 생각된다.

따라서 Fig. 3의 미끄럼속도에 따른 평균값의 마찰계수로는 보다 정확한 마찰계수의 측정값에 대한 신뢰성이 없기 때문에 Fig. 4의 표준편차를 이용하게 되면 보다 명확하게 마찰계수의 분석이 가능해 질 수 있다고 생각된다.

3.2. 마찰계수의 분산분석

Table 2는 마찰인자에 대한 평균 마찰계수의 분산분석한 것이다. 여기서 *P* 검정은 특성치인 마찰계수의 분포상태를 표준정규분포로 나타낼 때 이를 95% 신뢰구간으로 선정하여 *P* 검정값이 0.05 이하의 값을 가지는 마찰인자가 평균 마찰계수에 많은 영향을 미치게 된다. 이를 통하여 검정한 결과 마찰인자 중 작용하중이 평균 마찰계수에 가장 많은 영향을 미친다. 그러나 유압구동 부재와 미끄럼속도는 마찰계수에 미치는 영향이 미소하다는 것을 알 수 있다. 작용하중이 평균 마찰계수에 가장 많은 영향을 미치는 것은 마찰면의 접촉압력의 변화와 마찰면 온도상승에 따른 유압구동 부재의 연화와 마찰계면의 산화물의 형성에 작용하중의 역할이 크기 때문으로 생각된다.

Table 3은 마찰인자에 대한 마찰계수의 표준편차를 분산분석한 결과로서, 구동부재에 따른 마찰계수의 편

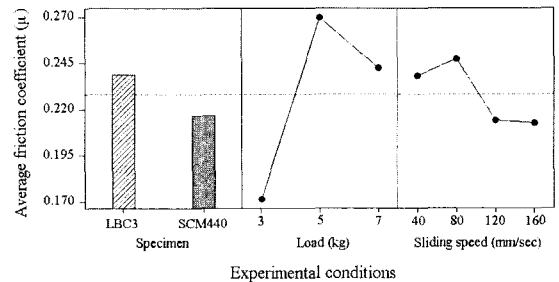
Table 3. ANOVA for STDEV of friction coefficient

Factors	<i>S</i>	\varnothing	<i>V</i>	<i>F</i> ₀	<i>P</i>
Materials	0.0009003	1	0.0009003	20.68	0.000
Applied Load	0.0001478	2	0.0000739	1.70	0.213
Sliding speed	0.0000954	3	0.0000318	0.73	0.548
Error	0.0007401	17	0.0000435		
Total	0.0018836	23			

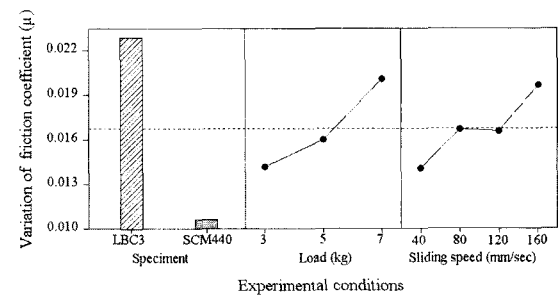
차가 가장 많이 발생하고 있다. 그러나 작용하중과 미끄럼속도 변화에 따른 마찰계수의 표준편차는 미소하다는 것을 알 수 있다. 이것은 마찰계수의 편차는 LBC3와 SCM440의 전단강도 차에 의한 영향이라 생각된다. 따라서 미끄럼속도 변화에 따른 평균 마찰계수에 있어서는 마찰인자인 작용하중이 가장 영향을 많이 미치며, 마찰계수의 편차에 있어서는 유압구동 부재가 많은 영향을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

3.3. 마찰계수에 대한 주 효과

Fig. 5는 각 마찰인자와 수준변화에 대한 평균 마찰계수를 (a)에, 마찰계수의 표준편차를 (b)에 나타내었다. Fig. 5의 (a)에서 평균 마찰계수의 영향은 마찰인자의 수준변화에 따라 작용하중, 미끄럼속도, 유압구동 부재의 순으로 나타나고 있다. 따라서 마찰인자 중에



(a) Main effect for average friction coefficient



(b) Main effect for variation of friction coefficient

Fig. 5. Variation of friction coefficient with level.

서 구동부재는 SCM440, 작용하중 3 kg, 미끄럼속도 160 mm/sec일 때가 평균 마찰계수가 가장 낮게 나타나고 있다. 그리고 (b)의 마찰계수의 표준편차에 미치고 있는 마찰인자는 유압구동 부재, 작용하중, 미끄럼속도의 순으로 나타나고 있다. 마찰인자 중에서는 SCM440, 작용하중과 미끄럼속도는 작을수록 평균 마찰계수가 가장 낮게 나타나고 있다. 이것은 유압구동 부재가 SCM440일 때와 작용하중은 적을수록 미끄럼속도가 빠를수록 볼 시험편의 접촉면적이 적고, 안정적인 산화흡착층을 형성하기 때문이라 생각되어진다.

따라서 Fig. 5의 (a)와 (b)를 통하여 유압구동 부재의 마찰특성에 있어서 마찰재료는 SCM440, 작용하중 3 kg일 때가 가장 안정적인 마찰을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

그리고 미끄럼속도의 변화에 따른 평균 마찰계수 Fig. 5의 (a)에 있어서는 미끄럼속도 120 mm/sec까지는 마찰계수의 변화가 크게 발생되고 그 이상에서는 미소한 변화를 보이고 있다. 그러나 마찰계수 편차인 Fig. 5의 (b)에 있어서는 120 mm/sec 이상에서 큰 변화를 보이고 있다. 따라서 평균 마찰계수와 마찰계수 편차가 적게 나타나는 120 mm/sec일 때가 최적의 마찰조건이라고 생각된다.

Fig. 6은 미끄럼속도와 작용하중의 변화에 따른 평균 마찰계수에 대한 등고선도를 나타내었다. 미끄럼속도가 80 mm/sec, 작용하중이 5 kg에서의 마찰계수는 다른 실험조건에 비하여 가장 높게 나타나고 있다는 것을 볼 수 있다. 이 등고선도로부터 유압구동 부재의 평균 마찰계수에 있어서는 작용하중이 3 kg, 미끄럼속도가 120 mm/sec 이상에서 낮은 분포상태를 가진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 미끄럼속도와 작용하중의 변화에 따른 마

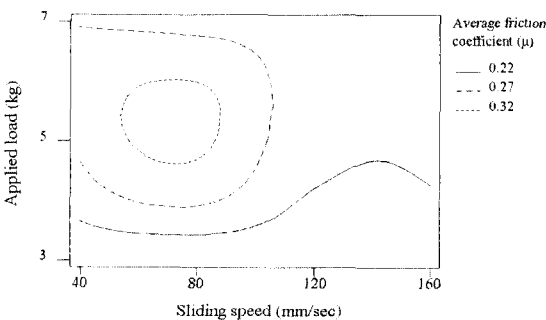


Fig. 6. Contour plot for variation of friction coefficient on applied load and sliding speed.

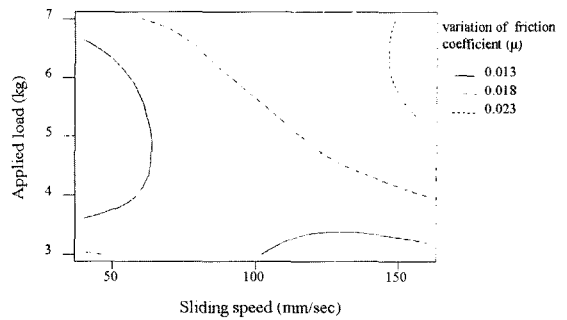


Fig. 7. Contour plot for STDEV of friction coefficient on applied load and sliding speed.

찰계수의 편차에 대한 등고선도를 나타내었다. 미끄럼속도가 40 mm/sec, 작용하중 5 kg과 미끄럼속도가 120 mm/sec 이상, 작용하중 3 kg일 때가 가장 마찰계수의 편차는 작게 발생하고 있다는 것을 알 수 있다.

이상의 연구결과를 종합하여 볼 때 최소의 마찰계수를 갖는 조건은 유압구동 부재는 SCM440, 작용하중 3 kg, 미끄럼속도 120 mm/sec 이상이라는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

유압구동 부재의 윤활 마찰실험을 통하여 각 마찰인자와 수준에 따른 마찰계수의 변화를 통계적 기법을 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 마찰인자와 각 인자의 수준변화에 따른 평균 마찰계수와 표준편차의 변화에 있어서 LBC3보다 SCM440이 낮게 나타난다.

(2) 유압구동 부재의 윤활 마찰실험에 있어서 평균 마찰계수는 작용하중 변화에 가장 많은 영향을 받고 있다.

(3) 마찰계수의 표준편차의 변화는 유압구동부재가 가장 많은 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있다.

(4) 윤활 마찰실험을 통하여 유압구동 부재의 마찰인자들은 SCM440, 작용하중 3 kg, 미끄럼속도 120 mm/sec일 때가 최적의 마찰조건이다.

참고 문헌

1. B. J. Roylance, I. A. Albidewi and M. S. Laghari, "Computer-Aided Vision Engineering (CAVE)-Quantification of Wear Particle Morphology," *Lubr. Eng.*

- 50, pp.111-116, 1993.
2. T. Sato, O. Ikeda, T. Hatsuzawa and M. Linzer, "Real Time Evaluation of Wear Particle Using Electro Forced Rotation and Laser Scattering," *Wear*, Vol. 15, pp. 273-285, 1987.
 3. T. M. Hunt, "Condition Monitoring of Mechanical and Plant," Chapman & Hall, pp. 48-53, 1995.
 4. R. E. Bechhofer and C. W. Dunnett., "Percentage points of multi-variate Student distributions," *Selected Tables in Mathematical Studies*, American Mathematical Society, Vol. 11, pp. 25 -56, 1988.
 5. W. G. Hunter, "Statistics for Experimenters, Introduction to Design, Data Analysis and Model Building," John Wiley & Sons Inc. New York, pp. 78-102, 1978.
 6. M. B. Brown and A. B. Forsythe., "Journal of the American Statistical Association," Vol. 69, pp. 364-367. 1974.
 7. H. L. Harter, "Order Statistics and Their Uses in Testing and Estimation, U. S. Government Printing Office, Washington," pp. 57-89, 1970.
 8. A. J. Hayter., "A proof of the conjecture that the Tukey-Kramer multiple comparisons procedure is conservative," *Annals of Statistics*, Vol. 12, pp. 61-75. 1984.