

## 마모유형 천이에 따른 입자크기분포의 정량적 특성

공호성 · 권오관

한국과학기술원 기계공학부

(1986년 3월 19일 접수)

### Quantitative characteristics of particle size distribution by the wear mode transition

Ho Sung Kong and Oh Kwan Kwon

*Division of Mech. Eng., Korea Advanced Institute of  
Science and Technology, Seoul, Korea.*

(Received March 19, 1986)

Wear simulation test have been conducted in mild, severe and transient wear regions by a four-ball wear tester.

Wear particles are separatively deposited by the RPD technique, and quantitatively analysed in terms of wear particles size distribution.

Characteristics of the wear particle size distribution are compare to the results of wear tests through both weibull parameters and center moment method of the weibull distribution function.

#### 1. 서론

Tribology의 한 영역인 Machine Health Monitoring 기술은 기계요소, 부품의 파괴 및 심각한 마모발생을 조기에 검사하여 사고를 미연에 방지시키는 기계요소 및 시스템의 안전관리기법으로써, 현대에 들어서 기계류의 정밀화, 고급화 및 중량화 등의 추세에 부응하여 상기 기술개발에 관하여 세계적인 연구관심 속에 많은 분야에 걸쳐 연구되고 있다<sup>(1,7)</sup>. 상기 기술로써 요구되는 것은 신뢰성 및 신속한 측정결과와 제시를 할 수 있어야 한다는 것과 경제성 등이 있다. 따라서 상기 기술의 개발 및 적용은 적용 대상인 기계요소 및 시스템의 피로파괴 특성의 정확한 이해가 선행되어야 할 것이다.

일반적으로 기계요소의 피로파괴특성은 기계요소의 상대적 접촉운동의 특성에 따라 구별되

는데, 마모발생의 진행에 따라 기계성능이 점진적으로 떨어지는 경우(Progressive Performance Deterioration)와 누적된 피로현상에 의해 catastrophic failure가 발생하여 기계성능이 갑작스럽게 떨어지는 경우(Cumulative Performance Deterioration)로 크게 분류된다<sup>(2)</sup>. 전자는 미끄럼운동 하에 면접촉을 하는 기계요소 부위들, 예를 들어 실린더 라이너 부위 및 밸브류, 플레인 베어링, 브레이크-클러치 등의 경우로써 그림 1(a)와 같은 성능저하 특성을 나타내나, 반면에 구름베어링류, 기어류 및 캠기구 등과 같이 Hertzian 접촉응력을 받는 부위의 기계요소는 재질의 특성에 따라 일정기간 후에 피로현상이 발생하여 갑자기 파괴되는 그림 1(b)와 같은 대표적 특성으로 나타난다. 따라서 후자의 경우는 적용하는 안전관리기법이 무엇보다도 신속하게 측정, 판단을 하게하여 피

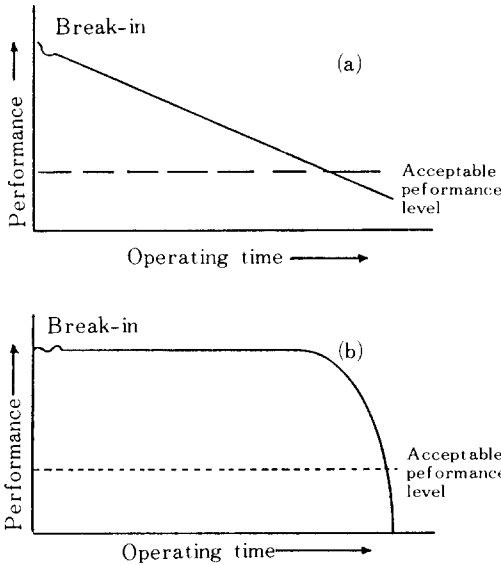


그림 1. Progressive Performance Deterioration (a)와 Cumulative Performance Deterioration의 비교 특성

로 파괴발생을 조기에 경보할 수 있어야 한다. 그러나 이와 같이 피로파괴현상을 조기에 감지하기 위하여는 기계성능과 가장 밀접한 관계를 갖고 민감하게 변화하는 측정변수를 사전에 선정하고 상기량의 변화에 따른 안전기준을 설정하여야 할 것이다(그림 1 (a), (b)).

현재까지 보편적으로 사용되고 있는 측정변수는 다음과 같은 것들이 대표적이다<sup>(1)</sup>.

가. 진동, 소음, 응력측정에 의한 동적해석 (Dynamic methods)

나. Leak testing 등의 비파괴검사

다. 마모입자 정성, 정량적 분석에 의한 Contaminant Inspection Methods

라. 온도, 압력, 속도측정 등의 Trend Analysis

상기 방법 등은 측정부위와 목적 등에 따라 각기 선택될 수 있으나 본 연구에서는 윤활조건 하의 기계시스템에의 적용을 목적으로 하여 마모입자 분석방법을 채택하였다. Contaminant Inspection Methods는 기계동작중 발생된 윤활유 내의 마모입자의 성분, 함량, 농도 및 크기분포 등을 측정함으로써 기계의 성능을 판단

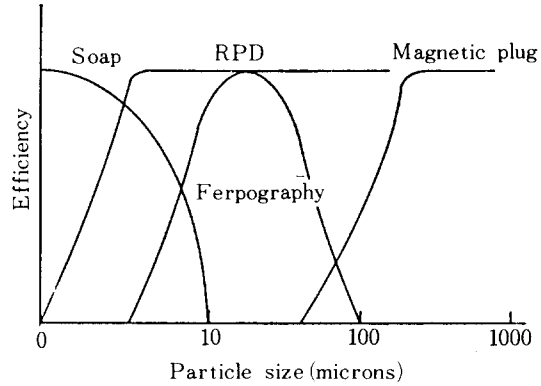


그림 2. Efficiency of Various Sensors as a function of particle size

하는 방법으로 윤활유 내의 마모입자를 추출 혹은 분석하는 기술의 차이에 따라 다음과 같은 기술 등이 개발되어 있다<sup>(3)</sup>.

가. Particle retrieval (Magnetic plug Inspection)

나. Spectrographic oil analysis (SOAP)

다. Ferrography

라. Rotary Particle Depositor (RPD)

상기 기술들은 각기 장단점을 가지고 있으나, 발생된 마모입자의 정확한 정량적, 정성적 분석을 위하여는 RPD 기법이 가장 효과적인 기술이다. 그림 2는 상기 기술별로 분석이 가능한 마모입자의 크기 범위를 나타낸 것으로 RPD의 경우는 마모입자 크기의 제한없이 측정 분석이 가장 폭넓게 가능한 장점을 보여주고 있다.

## 2. 본론

### 2-1. Four-Ball 마모시험

Four-Ball 마모시험기는 그림 3에서와 같이 일정한 하중 하에 3개의 고정되는 볼 위에 회전하는 1개의 볼로써 기본적인 구성이 되어 있으며, 매우 큰 상호압력 하에 상하 볼 사이에 미끄럼운동을 하는 마모발생기구로써 하중, 회전속도 및 시험기간 등 여러가지 작동조건을 변화시킴으로써 각 조건 하에서의 마모특성을 재연시킬 수 있는 시스템이다. 이른바 점 접촉, 미끄럼기구로 분류되는 이 시스템에서의 마모특

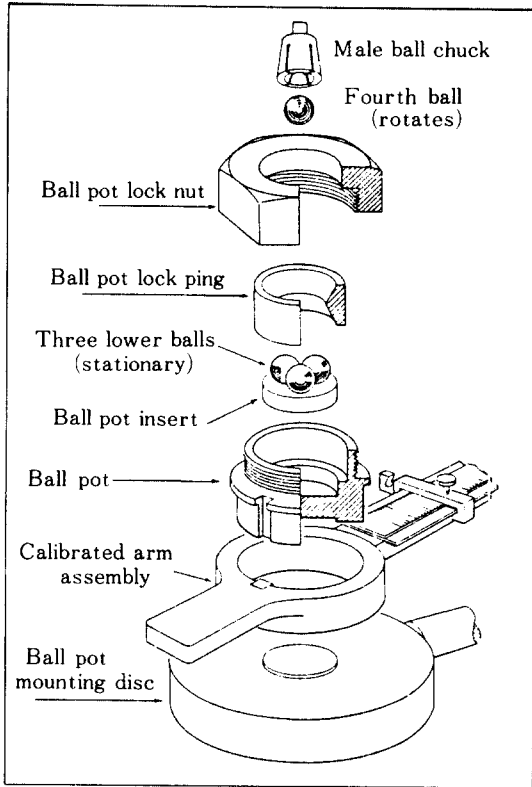


그림 3. Four-Ball wear tester의 주요 구성

성은 실제적으로 작동조건이 혹심한 기어류의 윤활, 메탈 커팅, 메탈 롤링 등에서의 접촉형태 및 발생하는 마모특성과 유사해서 이와 같은 마모기구의 특성을 실험적으로 단시간 내에 경제적으로 재연할 수 있기 때문에 마모기구의 특성연구에 많이 응용되고 있다(그림 3).

표 1. 4-BALL WEAR TEST 조건

사용윤활유	SAE 10	
Speed	1,500 rev/min	
시험기간	10 seconds	
유 온도	실온 (18°C)	
ball	직 경 (d)	0.5 ± 0.000025 in
	경 도	Rockwell hardness C scale (HRC No. ; 64 - 66) AISI 42100 (EN31)
	표면조도	AFBMA Grade 25

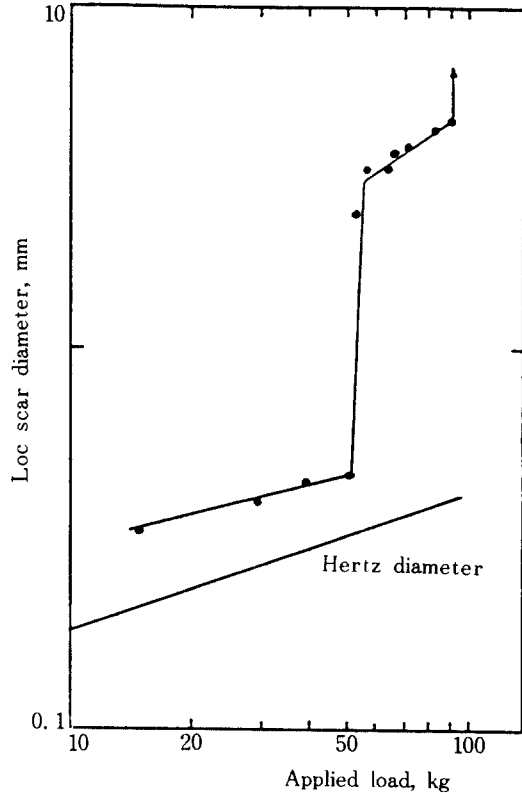


그림 4. Wear scar diameter VS Applied load.

본 시험에서의 시험조건 및 시험결과는 각각 표 1 과 그림 4 와 같다.

그림 4 는 시험하중 범위에 따라 각각 mild, transition, severe wear mode 로써 분류되어 지는데, 하중 55~60 Kg 사이에서 발생한 천이 마모영역의 주된 마모기구는 scuffing failure 로써 알려져 있다(4).

Scuffing 현상은 주로 sliding EHD 접촉에서 발생하는 것으로서 실제적으로 기어류 및 실린더 라이너 등의 마모기구에서 발생 예를 찾아 볼 수 있는 failure 현상이며, 정상적 상태의 마모인 mild wear 로 부터 갑작스런 마모량의 증가 및 접촉온도의 증가 등의 현상을 동반하여 기계요소의 수명 및 성능을 급격하게 악화시킨다. 따라서 실제 대부분의 기계요소에서 접하게 되는 EHD 접촉 하의 마모기구에서 상기와 같은 천이마모 발생을 방지하고 아울러 현상들 조기에 예측하는 것은 매우 중요한 일이다.

### 2 - 2. 마모입자의 정량적 분석

베어링 피로수명 및 신뢰도 등의 통계처리에 서 일반적으로 적용되는 Weibull 분포함수는 현재까지 제기된 분포함수 중 마모입자크기의 분포에 관한 가장 적절한 함수로 알려져 있다. 이 함수는 3 개의 변수를 가지는 지수함수의 수정된 형태로서 Weibull parameters인 변수의 변화에 따라 분포함수의 범위 및 형태를 달리한다<sup>(5)</sup>.

마모입자 적용의 경우 Weibull 분포함수는 식(1)과 같이 표시된다.

$$P(d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d-d'}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

for  $d > d'$ ,  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$

where,  $P(d)$  : Cumulative distribution function

$\alpha$  : Scale parameter

$\beta$  : Slope of distribution (Shape parameter)

$d$  : Particle size (PP)

$d'$  : Lower limit of particle size (1 PP)

식(1)의 함수는  $\beta > 1$  일 경우는 bell-shaped 형태를 지니며,  $0 < \beta \leq 1$  일 경우는 d의 증가에 따라 함수가 감소하는 J-shaped 형태가 된다. 또한 식(1)의 분포함수의 moment를 구하면 자체적으로 마모현상에 관한 몇가지 중요한 의미를 찾을 수 있는데, Mean, Variance, Skewness, Kurtosis 등의 통계적 변수가 바로 그것이며 다음과 같이 구해진다.

$$\text{Mean value, } \bar{d} = \sum_{i=1}^N d_i p(d_i) \quad (2)$$

$$\text{where, } d_i = \frac{d_j + d_{j-1}}{2} \quad (j < i < j-1)$$

$$p(d_i) = \left( \frac{d_j \text{와 } d_{j-1} \text{ 사이의 크기를 갖는 마모입자의 수}}{\text{총 마모입자의 수}} \right)$$

$$\text{Variance, } V = \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2 p(d_i) \quad (3)$$

$$\text{Skewness, } S = \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^3 p(d_i) \quad (4)$$

$$\text{Kurtosis, } K = \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^4 p(d_i) \quad (5)$$

$$\text{Relative skewness} = \frac{S}{V^{3/2}} \quad (6)$$

$$\text{Relative kurtosis} = \frac{S}{V^2} \quad (7)$$

### 2 - 3. RPD의 적용 및 정량분석 결과

Four-Ball 마모시험으로 발생된 오일 샘플들을 RPD를 사용하여 오일 내의 마모입자들을 분리한 후 각 시험조건 하에서의 마모특성을 살펴보기 위하여 상분석시스템 (Image Analyzer)을 이용하여 입자크기 별로 정량적 분석을 하였다. 마모입자 분석의 정량분석 계통도는 표 2와 같다.

표 2. 마모입자 분석의 정량분석 계통도

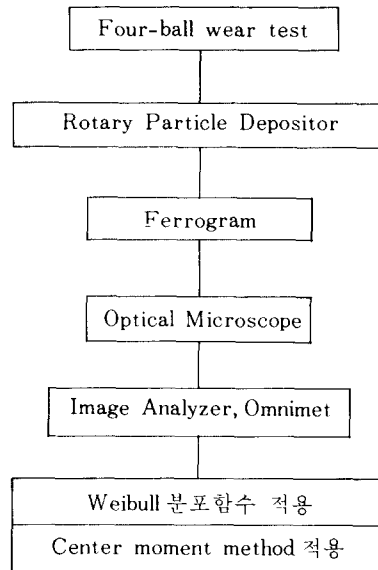


표 3 은 하중 60 Kg에서의 마모입자 분석결과 의 한 예이며, 이 때 1PP는 1.36  $\mu\text{m}$  로 환산 된다.

또한 표 4 는 Four-Ball 마모시험 결과에 따 른 각 마모입자들에 대한 Weibull 분포함수의 적용결과와 Center moment methods 의 결과 치를 보인 것이다.

표 3. 하중 60kg에서의 마모입자 분석결과

Slide No. : \_\_\_\_\_ Load: \_\_\_\_\_ Speed: \_\_\_\_\_ Date: \_\_\_\_\_  
 Test Type: Type 4 Magnet Material: \_\_\_\_\_ Lighting: Transmitted  
 Objective: \_\_\_\_\_ Condenser: \_\_\_\_\_ Magn: 78.75 X  
 1 p · p · eq. to 1.36 u

Area	No. of Particle Count															Remark
	> 1	> 2	> 3	> 4	> 5	> 6	> 7	> 8	> 9	> 10	> 11	> 12	> 13	> 14	> 15	
171924	245	216	189	163	140	119	106	98	88	78	75	72	69	64	58	
	> 16	> 17	> 18	> 19	> 20	> 21	> 22	> 23	> 24	> 25	> 26	> 27	> 28	> 29	> 30	
	50	48	47	46	45		44		42		40		37		35	
	> 31	> 32	> 33	> 34	> 35	> 36	> 37	> 38	> 39	> 40	> 41	> 42	> 43	> 44	> 45	
										25						
	> 46	> 47	> 48	> 49	> 50	> 51	> 52	> 53	> 54	> 55	> 56	> 57	> 58	> 59	> 60	
	17														14	
	> 70	> 80	> 90	> 100	> 120	> 140	> 157	> 204	> 330							
	10	7	6	5	4	3	2	1	0							

2 - 4. 시험결과 해석 및 고찰

그림 4의 Four-Ball 마모시험 결과와 시험 조건에 따라 발생된 마모입자들의 정량적 해석 결과에 의해 하중의 변화에 따라 각기 발생된 마모의 특성을 단계적으로 유추하면 다음과 같이 제시할 수 있다.

STEP 1 : 하중이 50 Kg으로 증가하면서 평균마모입자의 크기(Mean)가 증가함에 따라 Scale parameter가 증가하나 작은 마모입자가 상대적으로 증가하는 것이 특징이다. 이러한 현

상은 Mild wear 영역에서 주로 발생하는 Abrasive wear에 의한 마모량이 하중 증가에 따라 증가한 것으로 판단된다.

STEP 2 : 하중이 55 Kg에서는 Mean의 증가와 함께 Shape parameter의 급격한 감소에 따라 큰 마모입자 생성의 빈도수가 급격히 증가함을 보이며, 이에 따라 분포함수의 Variance 및 Skewness량의 변화가 현저해진다.

STEP 3 : STEP 2에 비해 Mean은 다소 감소하나 작은 입자 생성이 줄어들며 매우 큰 입

표 4. 하중 60kg에서의 마모입자분포의 정량분석 결과

Load	Weibull Parameter			Method of Moment					
	Scale Parameter	Shape Parameter	Regression coef.	Mean	Variance	Skewness	Kurtosis	rel. skewness	rel. kurtosis
50	5.73	0.73	0.965	7.59	99.3	3747	2.04E+05	3.78	20.7
52	8.39	0.86	0.994	9.93	102.2	2515	1.04E+05	2.43	9.9
55	12.67	0.72	0.963	15.99	562.5	53100	7.97E+06	3.98	25.1
60	9.94	0.59	0.971	15.64	812.2	110500	2.21E+07	4.77	33.5
70	7.70	0.58	0.997	12.25	348.2	20790	1.85E+06	3.19	15.2
75	9.94	0.56	0.944	16.40	1432.0	302600	7.79E+07	5.58	37.9
90	5.27	0.58	0.968	8.85	250.1	26270	4.16E+06	6.64	66.5

자가 생성될 확률이 증가하였다. 아울러 Variance 및 Skewness의 변화는 첫번째 정점에 도달한다.

STEP 4 : STEP 3와 마모형태가 유사하나 상대적으로 작은 입자 및 큰 입자 생성의 분포 확률이 각각 감소하여 평균입자 크기의 주위에 편중되는 현상을 보이며 따라서 Variance 및 Skewness는 급격히 감소한다.

STEP 5 : 하중이 75 Kg으로 증가함에 따라 Mean이 커지며 STEP4에 비해 상대적으로 큰 입자생성의 확률이 증가함으로써 Variance 및 Skewness가 급격히 증가하여 2차 정점에 도달한다.

STEP 6 : 평균 마모입자 크기가 급격히 감소하나 작은 입자의 분포 확률 또한 감소함으로써 마모입자 크기가 Mean 주위로 편중된다. 따라서 Variance 및 Skewness는 급격하게 감소한다.

이상과 같이 설정 제시된 마모해석 결과는 Partially EHD 접촉 하의 마모기구에서 관찰되는 실제 마모특성 및 'Thermally activated wear theory' 등의 최근의 마모현상 규명에 관한 이론결과와 합치됨을 알 수 있다.

그림 4에서 나타난 바와 같은 천이마모영역에

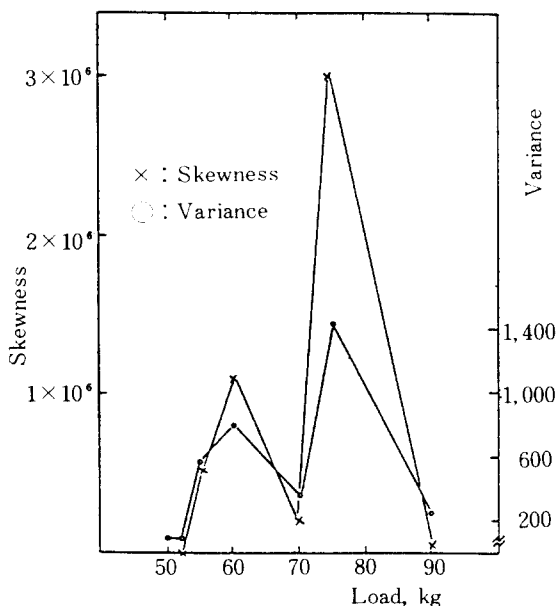


그림 5. RPD 적용 Skewness 및 variance 변화

서의 마모특성은 STEP 2와 STEP 3에서 나타난 Variance와 Skewness의 변화에 의해서 특징적으로 나타남을 보였다(그림 5). Variance와 Skewness의 변화는 상호 비슷한 경향을 보이고는 있으나, 3차 모멘트인 Skewness량이 2차 모멘트에 비해서 상대적으로 민감하게 변화하는 장점이 있다. 또한 2차 모멘트와, 4차 모멘트인 Kurtosis는 평균입자크기 좌우로 방향성이 없어서, 예를 들면 작은 입자들의 생성 확률이 증가할 경우에도 상대적으로 증가하기 때문에 기계요소의 파괴현상과 직접적으로 관련이 있는 큰 입자의 생성을 감지하는데 있어서는 상기량의 변화가 신뢰도를 떨어뜨릴 수 있는 단점이 있다.

STEP 5에서는 Severe wear 영역에서 발생하는 Scuffing 현상의 일반적인 마모특성과 일치하는 결과를 보인다. 또한 STEP 4와 STEP 6와 같이 Skewness가 급격한 감소를 나타내는 현상은 'Thermally-activated wear theory' 이론으로써 설명할 수 있는데, 이는 상기 이론의 타당성에 관한 중요한 근거를 가진다. 즉 Severe wear 영역에서 Asperities에 의한 접촉부위의 국부적인 마찰열이 급증하여 윤활유의 열화 및 분해결과로 수소가 발생되며 발생된 수소에 의해 금속성분의 접촉부위가 취성(Brittleness)를 가짐으로써 상호 접촉부위에서 발생하는 마모입자가 수소취성으로 인해 '작은 입자로 생성되는 실제 마모특성을 가장 잘 설명할 수 있기 때문이다.

### 3. 결 론

마모상사시험기구인 Four-Ball 마모시험기를 이용하여 마모류형 천이현상에 따른 발생 마모입자들의 정량적, 통계적 특성을 Weibull 분포함수 및 Center moment method에 적용 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. Weibull 분포함수의 Skewness량의 peak 현상은 마모진행에 따른 천이현상의 발생과 매우 밀접한 관계가 있다.

나. 기계요소 및 시스템의 성능 검지를 위한

condition monitoring maintenance방법의 일환으로써, 발생 마모입자 분포함수의 skewness량의 변수는 상기 기계요소의 피로파괴 혹은 갑작스런 파괴현상을 조기에 진단하는데 중요한 척도가 된다.

#### 참고문헌

1. Mervin H. Jones & Douglas scott, Industrial Tribology: The Practical aspects of friction, Lubrication and Wear, Tribology series 8, Chap. 18, pp. 427-445, Elsevier, New York, 1983.
2. Needelman, W.M., 'Fluid Contaminant Component Wear and Performance,' Fundamentals of Tribology, pp. 555-566, M.I.T. press.
3. 권오관, "A Study on the Basic and Applied R&D in Tribology (Phase 2)," 한국과학기술원 연구보고서, BS E614-2043-2, 1983.
4. Kwon, O.K., 'A Study of the Interaction of Chemical, Thermal and mechanical factors in a Lubricated Sliding Contact-Thermally Activated Wear theory,' Ph.D. Thesis, Univ. College of Swansea, 1981.
5. Weibull, Waloddi, "A Statistical Distribution of Wide Applicability," J. of Applied Mech, Vol. 18, pp. 293-297, 1951.
6. Barwell, F.T., Kwon, O.K., Roylance, B.J., "Interaction of Chemical, Thermal and Mechanical factors in the Lubrication of Machine Elements," 3rd International Tribology Congress, Sept., Euro trib., Warszawa, 1981.
7. Mervin H. Jones, Condition Monitoring '84, Proc. of International Conference on Condition Monitoring held at Univ. College of Swansea, 10th-13th April, pp. 1-780, 1984.