

## 공작기계 주축용 베어링 결함검출

(The Detection of Main Spindle Bearing Defect for Machine Tool)

오석영\*, 정의식\*\*, 임영호\*\*\*

\* 숭실대학교 대학원 기계공학과

\*\* 대전산업대학교 기계설계공학과

\*\*\* 숭실대학교 기계공학과

### 1. 서론

최근의 프로세스 공업에 있어서 생산Line의 장치나 기계류는 점차 대형화, 고속화, 연속화, 복잡화되고 있다. 또한, 기계가공공업, 자동차공업, 기계, 전자부품의 가공조립등의 생산설비는 각설비가 고도로 자동화되고 있는 실정으로 공장 전체의 유기체적인 제어 및 감독을 필요로 하고 있다. 마찬가지로 기계부품제작산업도 CNC, FMS등으로 점차 조직화, 자동화됨에 따라 공작기계 장치나 기계류등의 이상이나 고장으로 생산 및 품질에 미치는 영향도 종래와 비교할 수 없을 정도로 중요시되고 있는 실정이다.

이와같이 설비의 안정성을 도모하고 고신뢰도를 부여하기 위해서는 기계설비의 이상 및 고장진단이 필수적이며, 공장 자동화와 함께 공작기계 자체의 고장 및 이상진단을 실시하고, 검출된 신호의 크기등으로 고장상태를 판정해야만 한다. 공작기계에서 동적인 회전시스템을 이루는 주축용베어링의 손상은 제작하고자하는 제품의 정밀도 표면거칠기등의 저하뿐만 아니라 시스템전체의 기능까지도 떨어뜨리는 요인이 될 수 있으므로 베어링상태를 진단하여 손상유무를 판단하는 것은 필수적이라 생각된다.

Gustafsson 가 Tallian등에 의해 제안된 베어링 손상검출 연구는 1970년 이후 꾸준히 진행 되어왔다. Smith는 원통로울러베어링 및 보울베어링에 Crest Factor를 이용한 결함 분석을 실시하였으며, Darlow<sup>[1]-[3]</sup> 등은 공진 피크부근의 가속도신호만을 통과시키는 고주파수공진기법(HFRP: High Frequency resonance Technique)이라는 결함검출기법을 이용하여 속도 및 하중은 베어링결함 신호의 크기에 영향을 미치지 않는다고 하였고, Dyer 와 Stewart는<sup>[4]</sup> 하중과 속도에 무관한 파형(Wave Shape)을 측정하는 Kurtosis라는 결함진단 신호처리방법을 적용하여 정상상태의 taper Roller Bearing의 경우 속도 및 하중변화에 따라서 피크치는 65%, RMS 65%, Kurtosis는 8%만큼 변화한다고 주장하였다. 1987년 Kim<sup>[5]</sup>은 베어링결함검출에 직각복조(Quadrature Demodulation)법을 적용한 반복충격응답신호의 용이성을 제시하고, Kurtosis는 Sampling크기 및 Sampling간격에 극히 민감하다고 제시하였다. 그러나, 이들이 연구한 베어링은 외륜(Outer Race)과 전동체(Rolling Element)가 접촉을 하는 소형의 보울베어링을 중심으로한 연구만이 진행되어 왔다. 따라서 본연구에서는 공작기계가 점차 산업의 고도화 진분화로 인해 대형화되고 있는 실정에 비추어 외륜(Outer

Race)과 전동체(Rolling Element)가 Loading Zone을 지나면서 접촉을 하는 주축용베어링으로 실제 사용되고 있는 테이퍼로울러베어링(#32017)의 손상검출을 실험을 통하여 결함크기 및 샘플링영역별 특성을 시간영역기법(Time Domain Techniques)을 통하여 결함의 특징추출을 하고자 한다.

### 2. 관련이론<sup>[6][7]</sup>

#### [2-1] 진동의 기본통계량에 의한 계산법

평균가속도( $\bar{x}$ )와 분산( $S^2$ )은 시간영역기법으로 사용된다. 평균값(Mean value)은 Raw time signal에서는 거의 0에 가까우므로 Raw signal을 포락선검파기(Envelop Detector)를 통과시켜 얻은 포락된 신호(Enveloped Signal)에서만 유효하다. 평균값은 관측치 혹은 data분포가 중앙부분에 집중되어 있는 정도를 판별하는 척도로서 원점에 대한 1차모멘트로 정의되고, 표준통계평균값(Standard statistical Mean Value)를 사용하며,

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

로 나타낼수 있다.

분산(Variance)은 관측자료치가 평균값주위에 분산하는 정도를 판별하는데 사용되는 값으로 확률밀도함수의 평균치에 관한 2차모멘트를 매개변수로 사용한다.

$$S^2 = \frac{1}{(N-1)} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

여기서, N대신에 (N-1)을 적용한 것은 data가 Sample의 평균치이므로 발생될수 있는 자유도(Degree of Freedom)의 손실을 고려해 주기 위함이다.

피크가속도는 신호중에서 부호와는 무관한 가장 큰가속도를 의미하지만 신호가 순간적으로 임의 발생될 수 있으므로 본 연구에서는 얻어진 신호Data를 1,000개씩으로 나눈 피크가속도를 구하였다. 파고율(Crest Factor)은 신호평균값이 급격히 변화하지 않은 경우 진동신호내의 결함현상의 집중적 발생(Defect Burst)을 감지하기 위해서 사용된다. 이 신호

는 포락선신호의 피크가속도와 평균가속도의 비로 나타낸다.

$$\text{Crest Factor} = \frac{\text{Peak Acceleration}}{\bar{x}}$$

첨도(Kurtosis)는 진폭에는 관계없는 파형의 형태(Shape of the waveform)를 측정하는 것으로 평균에 관한 4차 Moment와 표준편차와의 관계로서 아래와 같다.

$$\text{kurtosis} = \frac{\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{S^4} \quad (3)$$

손상되지 않은 정상메이링에서는 진폭의 가우스분포를 지닌 임의진동파형을 나타낸다.

### [2-2] 진동파형의 확률밀도함수에 의한 계산법

진동파형의 성질은 확률밀도함수  $p(x)$ 를 구해보면 더욱더 확실해진다. Fig.1과 같은 진동파형에서 진폭이  $x$ 와  $x + \Delta x$  사이에 존재할 확률을 고려해보면,

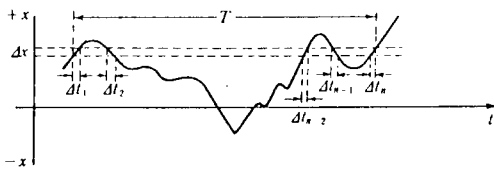


Fig.1 Definition of probability density function for vibrational wave-form

$$\frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_n}{T} \text{ 가 된다.} \quad (4)$$

이것을 時間率이라 한다. 정상진동의 경우 관측시간 T를 충분히 크게하고, 진폭간격  $\Delta x$ 를 작게 취하면 (4)식은 거의 일정하다는 것을 알 수있다. 결국,

$$p(x) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{T} \cdot \frac{1}{\Delta x} \quad (5)$$

로 정의할 수 있다.

식(5)의  $p(x)$ 를 진동파형의 확률밀도함수라 한다. 진동파형이 불규칙적이라면 확률밀도함수  $p(x)$ 는 Fig.2와 같은 정규분포를 이룬다.

확률밀도함수  $p(x)$ 를 사용해서 진동파형의 특징을 통계적으로 나타낼 수 있다. 또한, 정규분포를 이루는 진동파형  $X(t)$ 의 확률밀도함수  $P(x)$ 는

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (6)$$

단,  $\sigma$ : 표준편차(혹은 rms),  $\bar{x}$ : 평균치

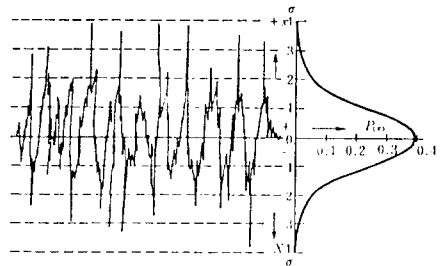


Fig.2 Wave-form of abnormal signal and probability density function(theory)

로 쓸 수 있다. 식(6)의 확률밀도함수  $P(x)$ 를 사용하여 통계기본량을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\text{평균치(Mean Value)} \quad \bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} xP(x)dx$$

$$\text{유효치(Root mean Square)} \quad x_{rms} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} x^2 P(x)dx}$$

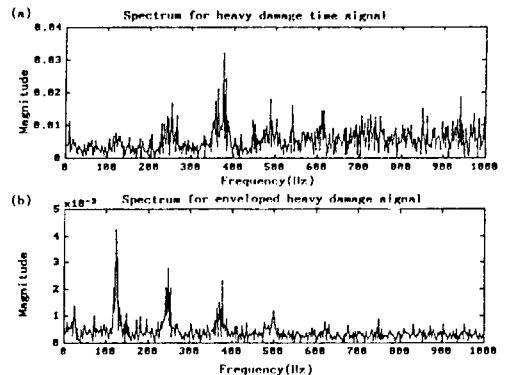
$$\text{왜도(Skewness)} \quad \beta_1 = \frac{|\int_{-\infty}^{\infty} (x-\bar{x})^3 P(x)dx|^2}{\left\{ \int_{-\infty}^{\infty} x^2 P(x)dx \right\}^3}$$

$$\text{첨도(Kurtosis)} \quad \beta_2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x-\bar{x})^4 P(x)dx}{\left\{ \int_{-\infty}^{\infty} x^2 P(x)dx \right\}^2}$$

$$\text{파고율(Crest-Factor)} \quad C = \frac{\text{Peak Value}}{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} x(t)^2 P(x)dx \right]^{1/2}}$$

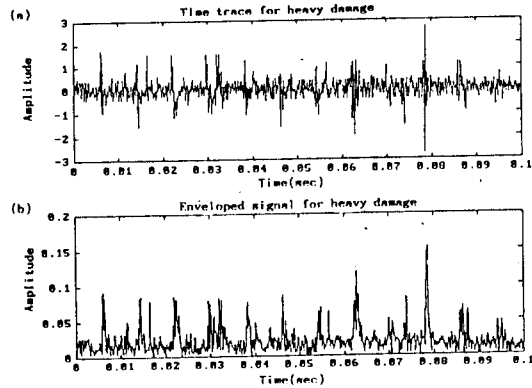
### [2-3] 包絡線處理

메이링이나 치차장치에 이상이 발생되면 높은 주파수 성분을 중심으로하는 진동이 주기적으로 나타난다. 진단에 필요한 정보는 반복되는 주파수이지만 FFT를 적용시킨 주파수 분석을 하여도 반복주파수는 얻을 수 없다.



(a) Raw signal (b) Enveloped signal

Fig.3 Spectrum for roller heavy damage



(a) Raw signal (b) Enveloped signal  
Fig.4 Time trace for roller heavy damage

이와같은 경우에 Fig.3(a) 와 Fig.4(a)의 負側성분을 반전시키는 절대치처리를 하면 Fig.3(b)와 Fig.4(b)와 같이 신호가 주기성을 지니는 주파수성분을 나타내게 된다. 이와같은 절대치처리를 포락선처리라 한다.

### 3. 실험방법 및 신호처리

본실험에 사용된 실험장치는 Bearing Housing내에 모터와 연결된 주축대를 2개의 베어링이 Bearing Housing내에서 지지하며, 사용된 주축대 지지용 베어링은 #32014 (Support Bearing)과 #32017(Test Bearing)Taper Roller Bearing으로 베어링간 거리는 180mm인 납선정공 NSL 400×750S를 Model로 제작했으며, Test Bearing에 인접된 베어링하우징 상단에 Accelerometer Sensor를 설치하여 각신호들을 감지했으며, 실험장치 개요를 Fig.5에 나타내었다.

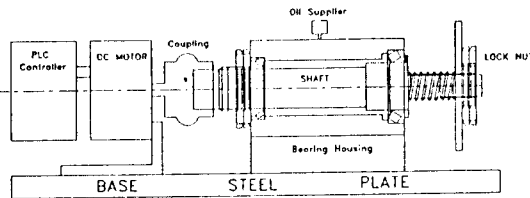


Fig.5 Schematic diagram of bearing test rig.

실험은 Table.1과 같은 조건으로 행하면서 PLC Board에 연결된 모터의 회전속도를 800,900,1000,1100rpm의 4Step으로 변화시키면서 Roller결함 및 외륜결함 특성실험을 정상상태, Light, Medium, Heavy Damage등의 결함크기로 구분하여 실험을 실시하였다.

각 실험조건별로 검지된 진동신호는 Charge Amplifier에서 증폭시킨후 Data recorder에 저장함과동시에 포락검파기 혹은 직접 오실로스코프로 Monitoring 하면서 A/D Converter를 통해서 본실험을 위해 개발된 ADDA프로그램에서 Sampling Data를 수집하여 computer에 저장하였으며, 시스템의 Hardware구성을 Fig.6에 나타냈다.

Table.1 Experimental condition for defect detection

Damage Type	Roller	* Undamage * Light Damage * Medium Damage * Heavy Damage
	Outer Race	* Undamage * Light Damage * medium Damage * Heavy Damage
Speed of Motor(rpm)	800, 900, 1000, 1100	
Preload(kgf)	Axial Preload: 30	
number of Sampling(ea/sec)	10,000	
Sampling Frequency(Hz)	10,000	

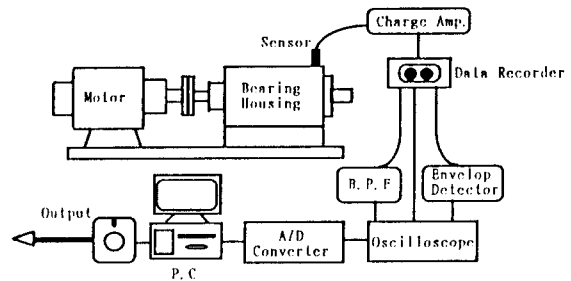


Fig.6 Hardware system for signal analysis.

### 4. 특징추출(Feature Extraction)

#### [4-1] 속도에 따른 결함특성

Table.1의 실험조건과 Fig.5 과 Fig.6에 나타난 실험장치로 정상베어링과 외륜 및 모놀러의 결함크기에 따른 베어링의 진동결함특성을 얻고자 실험장치의 주축대 회전수를 800,900,1000,1100rpm으로 변화시키면서 Roller(Light Damage, Medium Damage, Heavy Damage) 및 Outer Race(Light Damage, Medium Damage, Heavy Damage)실험을 가속도센서에 의해서 얻은 Raw Signal 와 Raw Signal을 포락처리한 신호(Enveloped Signal)들을 자체개발한 ADDA프로그램을 이용하여 10,000개의 데이터들 샘플링 수집한후, 각 Data의 진동 기본통계량및 확률밀도함수를 이용한 통계모우멘트치인 Mean Value(평균값), Peak Value(피크값), Crest Factor(파고율), Skewness(왜도), Kurtosis(첨도), Standard Deviation(std.:표준편차), Root Mean Square(rms: 유효치), Variance(분산)등의 속도에 따른 결함특성을 알아 보았으며, 속도별 민화수이중에서 rms결과에 대해서 Fig.7 - Fig.10에 나타내었다.

Fig.7- Fig.10과 같이 주축대의 회전속도변화에 따른 Raw signal 과 Enveloped Signal의 Peak,rms는 회전속도가 증가함에 따라서 대체적으로 증가하나 1,000rpm이상에서는 큰 변화가 없이 일정하다는것을 알 수 있다.

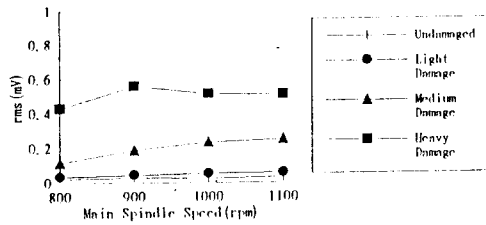


Fig.7 rms value of enveloped signal in outer race defect by rotational speed.

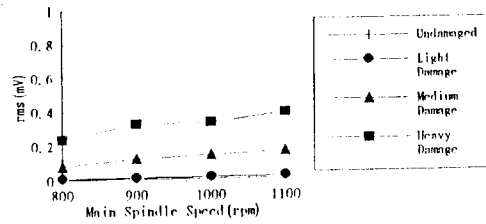


Fig.8 rms value of raw signal in outer race defect by rotational speed.

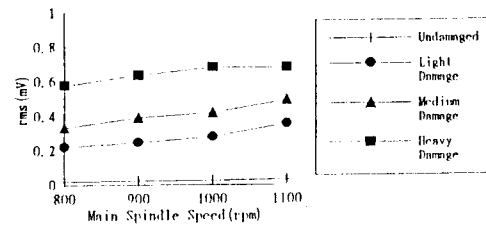


Fig.9 rms value of enveloped signal in roller defect by rotational speed.

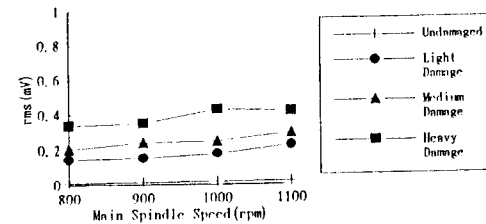


Fig.10 rms value of raw signal in roller defect by rotational speed.

#### [4-2] 결함크기에 따른 특성

실험조건중 회전속도를 900rpm으로 일정하게 하고, sampling된 10,000개의 Data를 1,000개씩 10 Block으로 나눈후 베어링결함상태를 판정하는데 지료가 될 수 있는 특징들 즉, 주신호(Raw signal)에서는 최대값(Peak), 분산(Variance), 첨도(Kurtosis), 유효값(rms)에 대하여, 또한 포락리파신호에서는 평균값(Mean), 최대값(Peak), 피고율(Crest Factor), 분산(Variance), 유효값(rms)에 대한 평균값  $\bar{x}$ 와 표준편차

S를 구한후 정상과 결함을 지닌 베어링의 특징추출을 위해

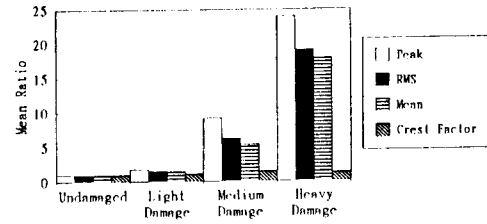


Fig.11 Feature of enveloped signal by defect size of outer race

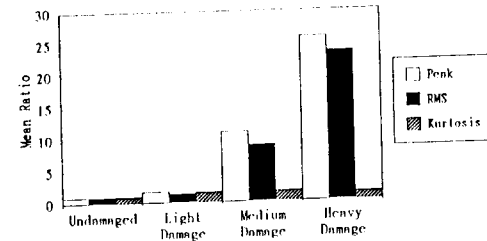


Fig.12 Feature of raw signal by defect size of outer race

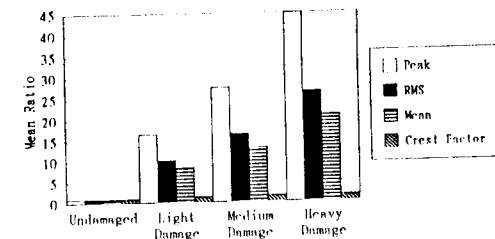


Fig.13 Feature of enveloped signal by defect size of roller.

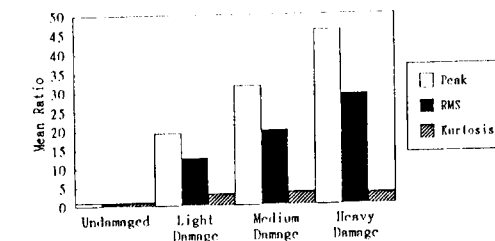


Fig.14 Feature of raw signal by defect size of roller.

정상베어링의 기본통계량 평균값과 결함을 지닌 베어링의 기본통계량 평균값과의 평균비(Mean Ratio)를 Fig.11-Fig.14에 나타내었다. Fig.11-14에서와 같이 Raw Signal에서는 로울리 및 외륜결함에 Peak, rms,의 Mean Ratio가 뚜렷한 경향을 보여주어 정상베어링과 쉽게 식별이 가능하며, Enveloped Signal에서는 결함특징에는 Peak, rms, Mean

value 가 유효함을 보여주고 있다.

Fig11-14의 결과로부터 Peak, rms, Mean의 순으로 베어링결함에 대한 민감도(Sensitivity)가 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 Peak,rms,Mean등이 베어링결함에 유효하다는 것을 나타낸다. 특히, 주신호에서는 결함특징을 볼수 없었던 평균값이 포락신호에서는 특징을 지니고 있음을 알 수 있다.

본실험에서 베어링결함진단을 실시하는데 있어서 신호처리방법에 따른 기본통계량값들의 결함특성유무를 종합하여 Table.2에 나타내었다.

Table2. Characteristic of various signal by bearing defect

	Signal	Mean	Variance	Kurtosis	Peak	Crest fa.	rms
Roller	Raw Signal	-	△	○	○	-	○
	Envelop Signal	○	△	-	○	×	○
Outer Race	Raw Signal	-	△	○	○	-	○
	Envelop Signal	○	△	-	○	×	○

(Remark) ○ : Correct trending  
 × : Incorrect trending  
 △ : Correct trending if signal is amplified

[4-3] 결함 특징추출

Table2에서와 같이 주신호에서는 peak, rms가 포락신호에서는 peak, rms, mean이 베어링의 결함을 감지하는데 유효하며 민감도가 높은 이들 기본통계량들을 사용하여 결함특징을 추출하기 위해서 식(7)과 같이 외륜결함시 포락신호를

$$90\% \text{ 정규곡선의 범위} = \bar{x} \pm 1.645 \cdot S \quad (7)$$

주축대 회전수 1000rpm으로 하였을때의 기본통계량인 peak, rms,mean,crest factor에 관해서 90%정규곡선을 적용하여 구한결과를 Fig.15-18에 나타냈다.

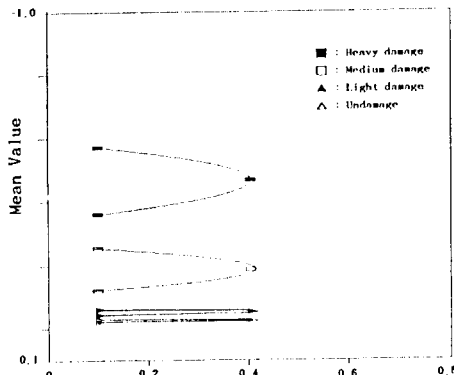


Fig.15 90% Normal curve range of mean value in outer race defect(1000rpm)

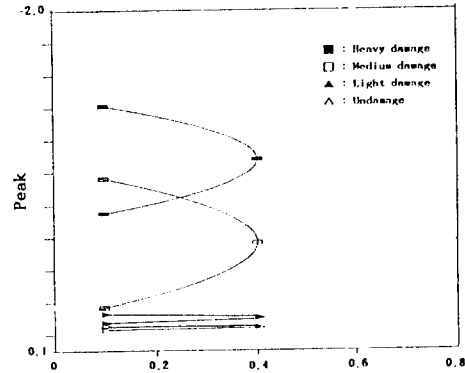


Fig.16 90% Normal curve range of peak in outer race defect(1000rpm)

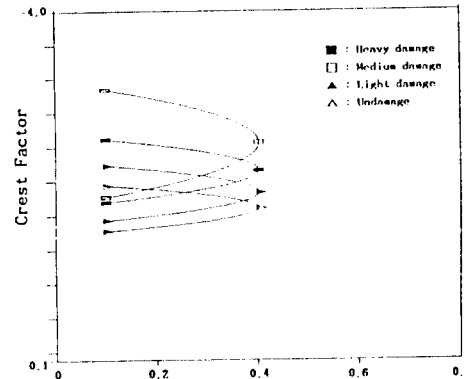


Fig.17 90% Normal curve range of crest factor in outer race defect(1000rpm)

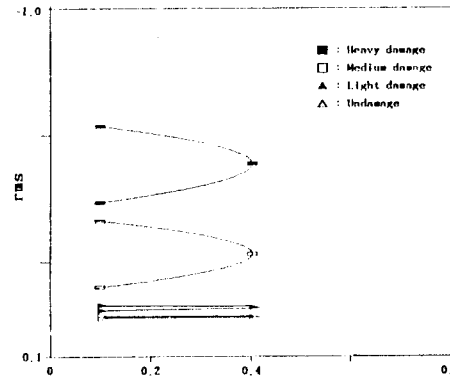


Fig.18 90% Normal curve range of rms in outer race defect(1000rpm)

그림에서와 같이 90%정규곡선 적용결과 결함에 민감한 peak,rms,mean의 신호치는 결함크기에 따라서 중첩(overlap)되지 않는 특징을 지니고 있으나, crest factor에서는 신호치가 overlap됨을 알 수 있다. 이외같은 결과로부터 peak,rms,mean은 결함크기에 따라서 일정 Level을 지니고 있으므로 결함크기를 산정하는 지표가 될 수 있다고

판단 된다.

## 5. 결론

주축용베어링(테이퍼 로울러베어링)의 결함을 진단하기 위한 로울러 및 외륜결함 실험 및 신호해석을 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 베어링결함검출에는 주신호해석 보다는 포락된 신호해석에서 더 많은 결함특성을 지니며, 속도를 증가시킴에 따라 신호값도 증가함을 볼수있다.
2. 베어링결함검출에는 여러가지의 기본통계량중에서 peak, rms, mean의 순으로 결함에 Sensitivity함을 알았다.
3. 베어링 결함 특징추출을 위해 peak, rms, mean에 적용시킨 90% Normal curve는 결함크기에 따라서 일정 Level을 지니며, 이들 Level들은 결함크기를 산정하는데 적용될 수 있다.

## 참고문헌

- [1] McFadden, P. D., and Smith, J. D., "Vibration Monitoring of Rolling Element Bearing by the High Frequency Resonance Technique-A Review", Tribology International, 3-10, 1984, pp3-10.
- [2] Darlow, M. S., and Badgley, R. H., "Application for Early Detection of Rolling Element Bearing Failure using the High Frequency Resonance Technique", ASME Paper No. 75-DET-46, 1975.
- [3] Drago, R. J., and Board, D. B., "High Frequency Vibration Monitoring Techniques for Gear/Bearing-System Failure Detection", AGMA paper No. 109, 36, Oct. 1975.
- [4] Dyer, D., and Stewart, R. M., "Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis", Trans. ASME, J. of Mech. Design, 100(2), 229-235, 1978.
- [5] Kim, Y.-H., kwak, Y. K., and Cheung, W. S., "Application of Quadrature Demodulation to Fault Detection of Rotating Machine", KSME/JSME Vibration Conference '87, Aug. 1987, pp. 388-397.
- [6] 豊田利夫, "回轉機械診断の進めば方", 日本プラトメンテナンス協會, 1991, pp. 97-101.
- [7] 윤종호, "회전기계 볼베어링의 자동진단시스템에 관한 연구", 서울대 박사학위논문, 1990, pp. 148-150.