

齒車診斷技術의 現狀

The Situation of Diagnosis Techniques for Gears

吳 在 應*, 李 正 徹**
J. E. Oh, J. C. Lee

1. 서 론

자동차 동력전달계통의 중요부분을 이루고 있는 齒車장치는 고장의 영향도가 대단히 높은 장치일 뿐만 아니라 점검과 劣化, 손상검지가 곤란한 장치이다.

지금까지, 齒車診斷技術의 연구는, 歐美에서는 성행하고 있음에도 불구하고, 국내에서는 그다지 되고있지 않다.

이와 같은 상황을 근거로 하여, 본 연구실에서는 齒車診斷技術의 연구개발에 착수하여, 그 첫번째 단계로서, 현상의 기술 및 연구내용을 조사하였다. 그들중에서 중요하다고 생각되는 것을 여기에 소개한다.

치차장치의 내부에 異常이 생기면, 진동과 異音이 생기기도 하고 속도변동 등을 일으킨다. 또, 윤활유 중의 金屬粉이 증가하거나, 온도가 상승하기도 한다.

이와같은 異常의 정보를 포함하는 것을 징후 parameter 라고 말한다. 이들 몇개인가의 parameter 중, 치차결합의 검출은, 진동과 음이 가장 좋은 parameter 라고 생각되고 있다. 따라서 진단기술의 연구는, 거의 대개가 치차로부터 나오는 진동과 음의 발생기구와 신호처리에 관한 것이다.

前者로는

(1) 치차의 마모모델과 발생진동수

(2) 각종 결함과 발생진동수

後者로는

(3) 시간평균화처리

(4) Cepstrum

(5) fluctuation 分析

등이 있다. 以下, 이들을 순차적으로 기술하면 다음과 같다.

2. 해석방법

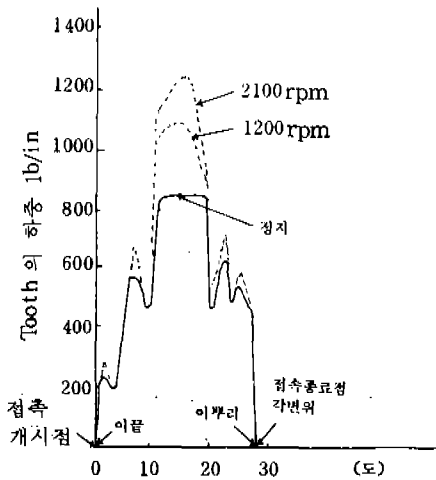
2.1 치차의 마모모델과 발생진동수⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

치차장치의 가장 중요한 결함은 마모이며, 이것은 회피할 수 없는 문제이기도 하다. 이것에 대하여, 치차의 응력과 그것에 수반하는 마모량을 모델화하여, 그 모델과 진동과의 관계를 명확하게 하는 것에 의하여 마모량과 수명의 추정을 도모하려고 하는 것이 행하여지고 있다.

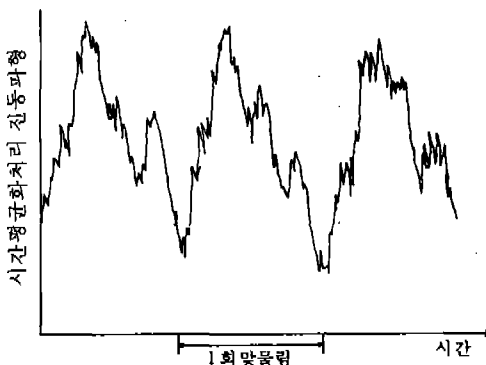
우선, 치차가 맞물려, 거기에 힘이 전달되어 가는데, 그 때의 齒에 발생하는 응력파형을 스트레인 게이지를 齒에 붙여 구하여, 그와 동시에 베어링에서 진동을 측정하고, 그것과의 관계를 나타내면 그림 1과 같이 된다.

* 한양대 정밀기계공학과

** 한양대 대학원 정밀기계공학과



(a) 치면접촉하중 $P^{(2)}$



(b) 시간평균화처리된 진동파형⁽²⁾

그림 1 齒의 접촉하중과 진동파형⁽²⁾

이것에 의하여, 우리들이 진동을 측정하는 것은, 齒의 전달력을 구하는 것과 같다고 말할 수 있다.

그것을 기초로 하여, G-E社의 R·A·Thompson은, 진동측정에 의해 마모량의 평가가 가능하고, 게다가 마모가 진행하면 맞물림 진동수(齒數×rpm)의 3차 高調波성분이 현저하게 되는 것을 모델에 의해 나타내어, 1972년 ASME에 발표하였다. 약간 오래되었지만 그것을 요약하면 다음과 같이 된다.

마모 W 는

$$\frac{\alpha W}{\alpha N} = CPV, \dots\dots\dots(1)$$

로 표현되며, 여기서

$$\frac{\alpha W}{\alpha N} : \text{맞물림마다의 마모율}$$

$$P : \text{齒車접촉하중} (\text{lb/in})$$

$$V_s : \text{齒間미끄럼속도} (\text{in/sec})$$

로 된다. 더구나, 齒面접촉하중 P 및 齒間미끄럼속도는, 각각 그림 1의(a), 그림 2에, 또 그積 PV_s 는 그림 3에 표시된다.

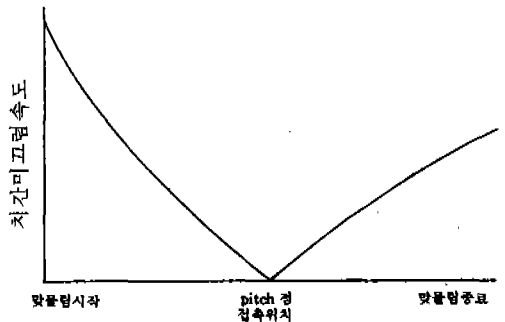


그림 2 齒間미끄럼속도 $V_s^{(2)}$

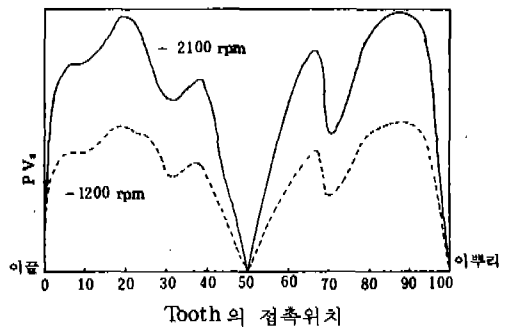


그림 3 $P_s V_s$ 파형⁽²⁾

그런데, 마모가 진척되면 齒形이 변화하여 그것에 따라 動荷重이 변화한다. 이것을 고려하면 P 는

$$P = P_o(T + P_a) \dots\dots\dots(2)$$

로 표현되고, 여기서

$$P_o : \text{전달하중계수}$$

$$P_a : \text{마모에 의한 동하중} (\text{lb/in})$$

$$T : \text{torque} \quad (\text{lb/in})$$

로 표시되어, 최종적으로 마모모델은, 다음식

과 같이 정리된다.

$$\frac{\alpha W}{\alpha N} = CP_0 V_s (T + P_d) \dots\dots\dots (3)$$

$$P_d = \frac{2 I_R I_r r_o^2 \omega^2}{I_R r_o^2 + I_r R_o^2} \cdot \frac{\alpha^2 W}{\alpha X^2} \dots\dots\dots (4)$$

단, 각 기호는 그림 4에 표시되는 것으로 한다.

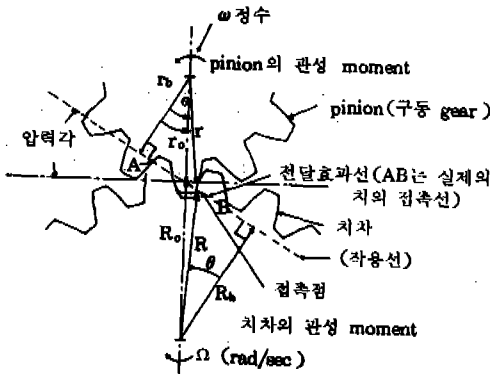


그림 4 齒의 맞물림圖⁽³⁾

여기에서, (3), (4)식의 근사해를 구하는 방법으로 우선 $\alpha^2 W / \alpha X^2 = 0$ 으로 하면

$$\frac{\alpha W}{\alpha N} = CP_0 V_s T \dots\dots\dots (5)$$

로 되며, 이 (5)식과 (4)식에 의해 동하중을 구하는 것이 가능하다. 이것을 $P_d \ell$ 로 하면 (3)식은

$$\frac{\alpha W}{\alpha N} = CP_0 V_s [T + P_d \ell] \dots\dots\dots (6)$$

표시할 수 있다. 이것에 의해 근사적인 마모량을 구하는 것이 가능하다.

여기에서, (3)식에서 표시되는 $P_0 V_s T$ 를 그림 3이라고 생각하면, (4)식에 의해 마모에 의한 동하중 P_d 를 구하는 것이 그림 5이다.

지금, 마모가 없는 齒面접촉하중과 마모에 의한 동하중의 합으로 표현되는 맞물림하중을 고려한다.

그림 6은, 마모가 없는 齒面접촉하중 (마모가 없는 맞물림하중)이다. 여기서, 25%, 50% 마모한 때의 동하중의 최대치를 맞물림하중의 최대치의 1/4, 1/2이라고 가정하면,

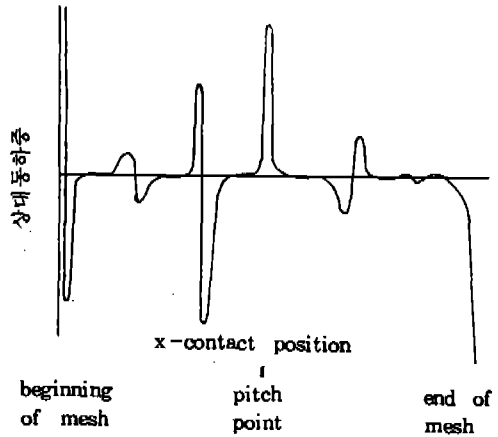


그림 5 마모에 의한 동하중 P_d ⁽²⁾

그림 6에 그것들의 크기로 환산한 그림 5를 보태는 것에 의해, 25%, 50% 마모의 맞물림하중이 얻어진다. 이것이 그림 7, 그림 8이다.

그림 6, 7, 8의 파형을 Fourier 변환하여 주파수분석하여, 맞물림진동수 f_m 과 3차까지의 고주파의 RMS 값을 구하면, 그림 9와 같이 된다.

또, (고주파의 RMS 값)/(맞물림진동수의 RMS 값)을 구하는 것이 그림 10이다.

여기에서, (4 f_m 의 RMS 값)/(f_m 의 RMS 값)은 마모의 증가에 대해 직선적으로 증가하고, 그 증가의 비율도 다른 그것보다도 크다. 즉, 맞물림하중과 같은 파형인 진동의(4 f_m 의 RMS 값)/(f_m RMS 값)의 변화를 구하는 것에 의해 마모량을 추측하는 것이 가능하다고 생각된다.

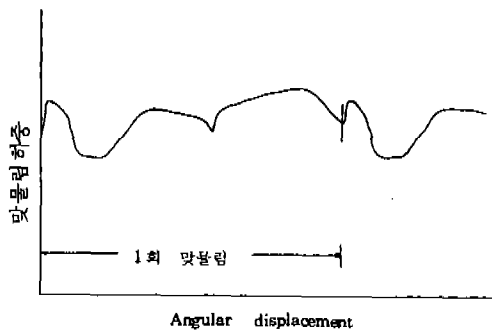


그림 6 마모가 없는 齒面접촉하중⁽³⁾
(=마모가 없는 맞물림하중)

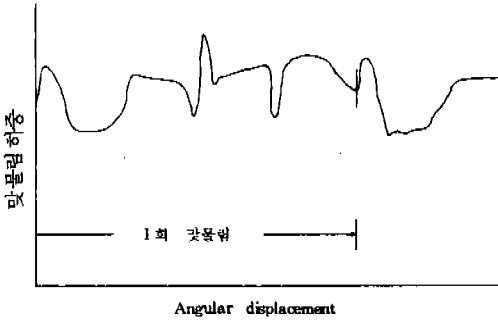


그림 7 25%마모의 맞물림하중⁽³⁾

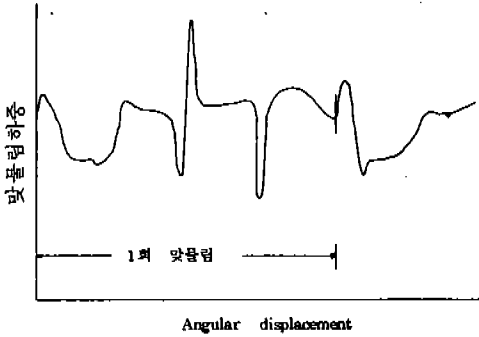


그림 8 50%마모의 맞물림하중⁽³⁾

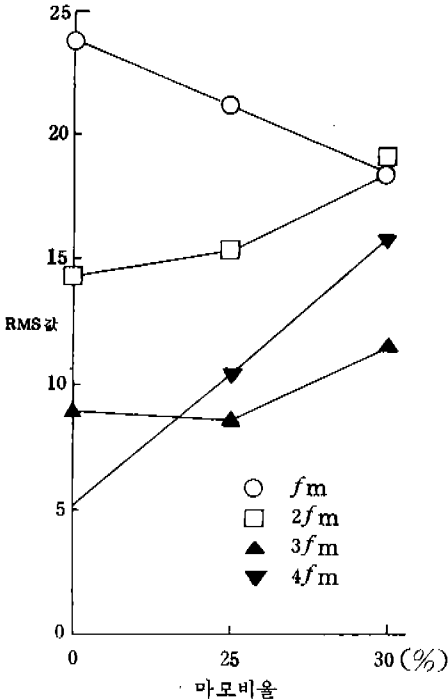


그림 9 마모에 대한 RMS 값⁽³⁾

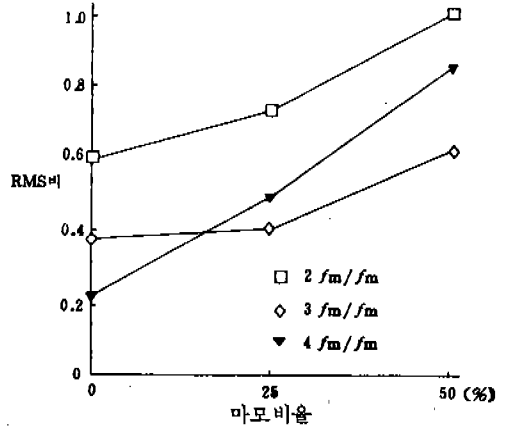


그림 10 마모에 대한 RMS 비⁽³⁾

2.2 Spectrum 해석⁽⁴⁾⁽⁵⁾

(1)에서 기술한 바와 같이齣의 전달응력과 마모는, 진동으로서 검출된다. 그것은 맞물림의 진동수와 그것의 고차성분에 착안하면 좋다. 따라서, 주파수분석을 하는 것이 기본으로 된다.

영국 Southampton 대학에서는 齒車에 관한 연구가 성행되고 있지만, 이 연구보고서에 쓰여져 있는 "Spectrum 해석에 의한 齒車診斷"의 block diagram, 齒車診斷의 알고리즘을 각각 그림 11, 그림 12에 나타낸다.

그림 12에 의하면, 齒車의 맞물림이 정상이며, 齒面 등에도 異常이 없는 경우의 맞물림 파형은, 정현파에 가깝고, 그 spectrum은 맞물림주파수 f_m 의 線 Spectrum으로 된다.

치차의 mis-alignment가 존재하면, 1회전 중에 맞물림응력이 增減하고, 진동의 파형은 회전주파수 f_r 에서 진폭변조되며, spectrum은 $f_m \pm f_r$ 의 Side band 파를 발생한다.

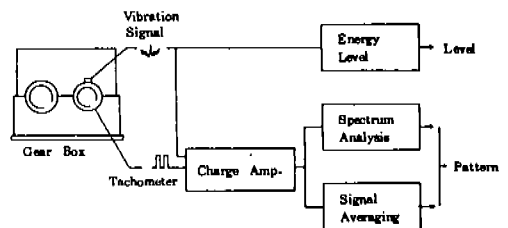


그림 11 Spectrum 해석의 block diagram⁽⁵⁾

치차의 상태	시간 영역	주파수 영역
정상		$P(f_r)$ and $P(f_m)$ peaks at f_r and f_m
치차 속 misalignment		$P(f_m)$, $P(f_m+f_r)$, $P(f_m-f_r)$ peaks at f_r , f_m-f_r , f_m+f_r
편심		$P(f_r)$ and $P(f_m)$ peaks at f_r and f_m
극소 이상		$P(f_r)$, $P(2f_r)$, $P(3f_r)$, $P(f_m)$ peaks at f_r , $2f_r$, $3f_r$, f_m
마모		$P(f_m)$, $P(2f_m)$, $P(3f_m)$ peaks at f_m , $2f_m$, $3f_m$
pitch 오차	 Amp. Mod. + Freq - Mod.	$P(f_m)$, $P(2f_m)$ peaks at f_r and $2f_m$

f_m : 맞물림주파수, f_r : 회전주파수

그림 12 Spectrum 해석의 진단알고리즘 (4)(5)

또, 齒面의 마모가 진척되면, 맞물림齒形은 정현파에서 서서히 굽어지기 때문에, 맞물림주파수 f_m 의 高調波 성분 $n f_m$ 이 나타난다.

이상, 기본적인 이론에 의해, Spectrum 해석에 의한 齒車診斷方法을 나타내었다. 단 齒車의 진동에서는, 갑자기 주파수 분석을 하지 않고, 다음에 기술하는 시간평균화처리 후의 진동신호를 Spectrum 해석하는 것이 일반적이다.

3. 시간평균화처리

신호를 뽑아내고자 하는 주기신호의 주기 또는 주기의 整數倍의 간격으로 나누어, 그들을 합하여 평균화하는 것에 의해, 불규칙성분을 없애고, 주기성을 강조하는 수법이다.

지금, 입력신호 $f(t)$, 주기신호의 주기를 T 로 하면, $f(t)$ 의 주기 T 에 의한 시간평균화

처리 $F(\tau)$ 는,

$$F(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f[\tau - (n-1)T] \quad 0 \leq \tau < T_s \quad (6)$$

여기에서, N 는 분할갯수이고, 이 작업은 그림 13과 같이 표현된다.

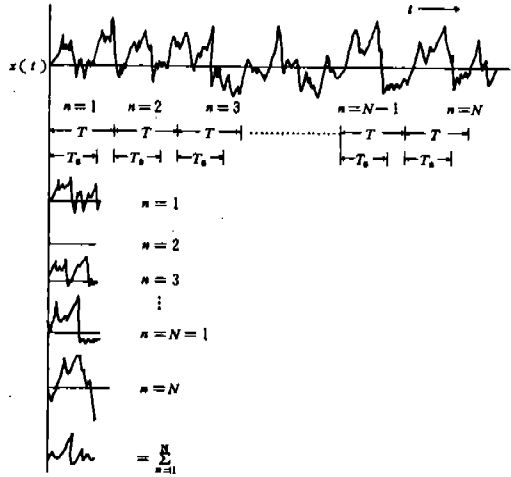
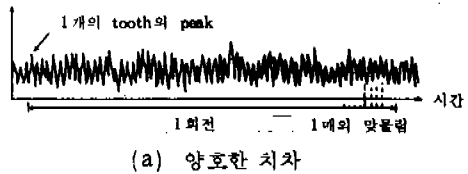
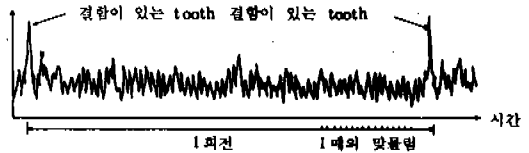


그림 13 시간평균화처리 (1)



(a) 양호한 치차



(b) 결합 tooth 1개의 치차

그림 14 齒車진동의 시간평균화처리 (2)

그림 14는 齒數 70의 齒車의 주기 1회전에 대한 진동의 시간평균화처리의 결과이다. 이 결과에서는 1회전중에 齒數에 대응한 70개의 맞물림 peak가 보이며, (b)의 결합齒의 맞물림 peak는 극단적으로 크게 되어있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 하여 결합齒를 찾는 것이 가능하다.

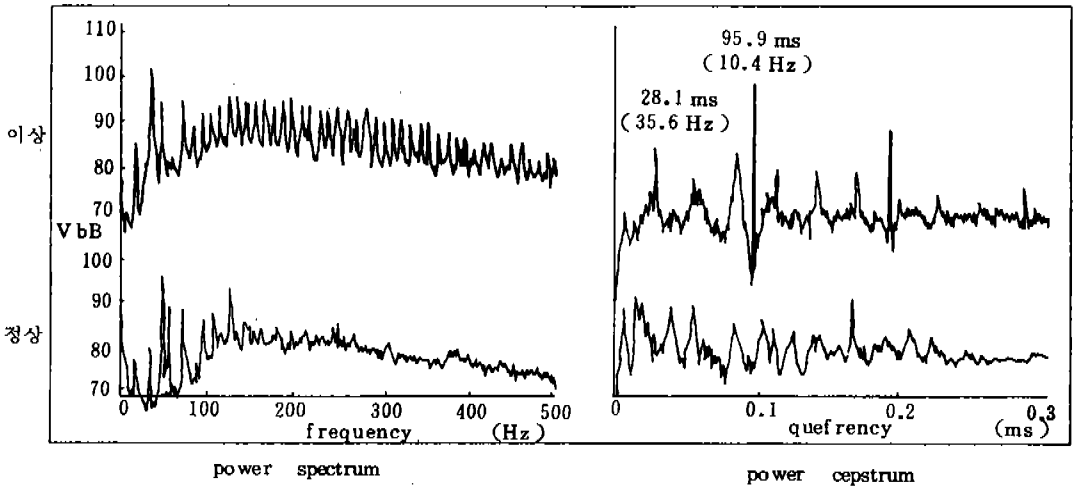


그림 15 정상치차의 power spectrum 및 power cepstrum²⁾

4. Cepstrum 해석⁽³⁾

power cepstrum은, “power spectrum의 對數의 power spectrum”으로 정의되며, (7)식과 같이 표현된다.

$$C_x(\tau) = |F \{ \log [F_{xx}(f)] \}|^2 \dots\dots\dots(7)$$

$C_x(\tau)$: power cepstrum

$F_{xx}(f)$: power spectrum

$F\{A\}$: A의 Fourier 변환

진동해석으로서 power cepstrum의 유효한 점을 나타내면 다음과 같이 된다.

(1) spectrum 중에서 주기성을 갖는 신호를 검출할 수 있다. 즉, 齒車결함에 의해 나타나는 高調波와 side band 파를 하나의 peak에 집중시키는 것이 가능하고, 그들의 변화를 한 눈에 관찰 가능하다.

(2) 신호의 전달경로에 의해 변화하지 않는다. 즉, 동일한 齒車상자의 다른 측정점에서 도, 거의 동일한 power cepstrum을 얻는 것이 가능하다.

그림 15는 正常 異常齒車의 power spectrum과 power cepstrum이다. 異常齒車의 power cepstrum은 회전주파수와 맞물림주파수에 해당하는 95.9ms와 28.1ms의 quefrequency에서 peak를 갖고 있다. 이것에 의해 異常을 檢知할 수 있다.

5. 주파수의 fluctuation 분석

주파수의 fluctuation은 주파수값의 변동, 요동이며, 이것을 이용하여 齒車손상을 검출하는 방법 (6), (7)을 소개한다.

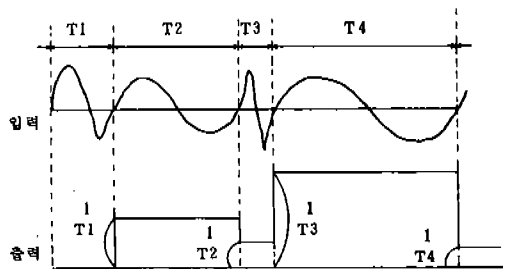


그림 16 F/V converter의 동작

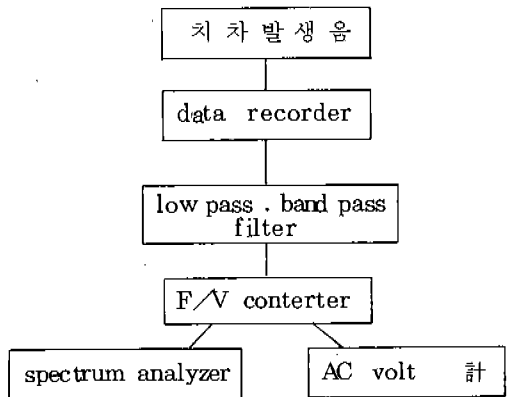


그림 17 해석 system

주파수의 fluctuation 을 검출하는 것으로서 F/V converter 를 사용한다. F/V converter 는, 입력신호의 1주기마다에 그 주기의 逆數, 즉 주파수에 대응한 전압을 발생하는 것으로, 그림 16 은 그 동작을 표시한 것이다.

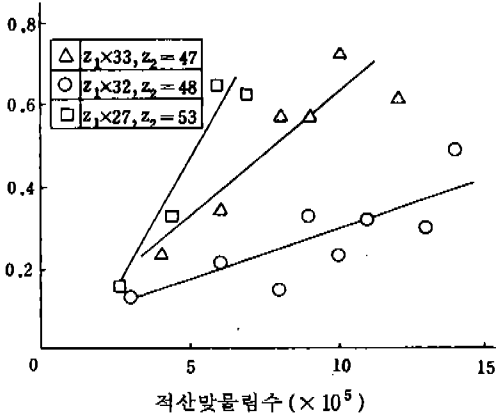


그림 18 積算 맞물림數의 증가에 따르는 F/V 변동 level의 변화⁽⁷⁾

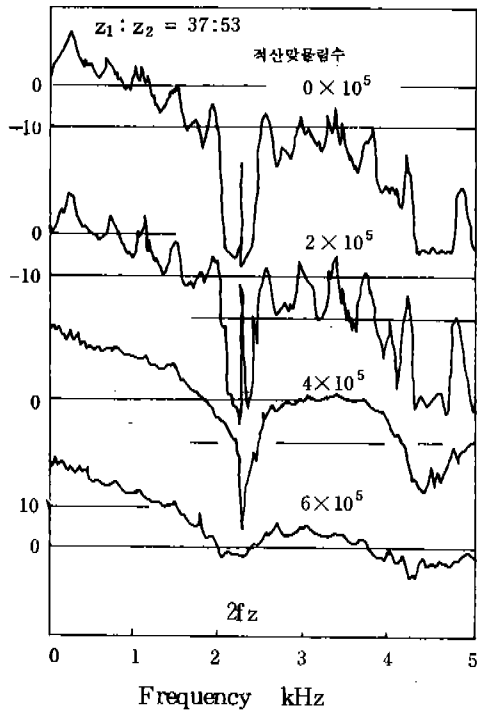


그림 19 F/V converter 의 출력 spectrum⁽⁷⁾
($2fz \pm 50$ Hz 의 band pass filter)

해석 block diagram 을 그림 17 에 나타내고, 결과를 다음에 나타낸다. 여기에서는, 積算한 맞물림數를 pitching 의 진행으로 생각하였다.

(1) pitching 의 진행과 F/V converter 의 출력전압변동 level 에 높은 상관관계가 있다.

(2) pitching 이 진행함에 따라 F/V 출력 spectrum 의 level 끝이, 주파수의 fluctuation 에 의해 파문된다.

(3) F/V 출력 spectrum 에 있어서, pitching 이 진행함에 따라 小齒車의 高調波가 peak 로서 나타난다.

그림 21 에 있어서, 0 dB 를 지나는 peak 數는 pitching 이 진행함에 따라 거의 직선적으로 증가하고 있다.

이상과 같은 3 점을 이용하여 齒車診斷을 행

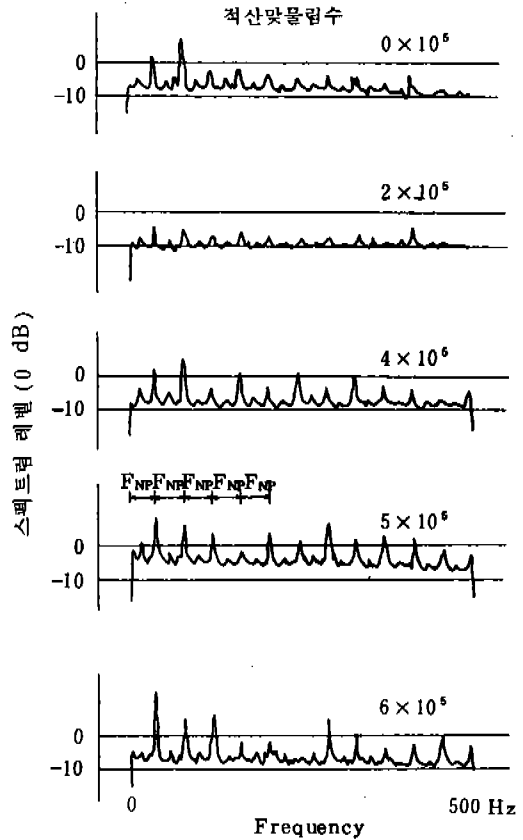


그림 20 pitching 시험의 발생음⁽⁷⁾
fluctuation 분석 결과(齒數 27:53
1270 rpm)

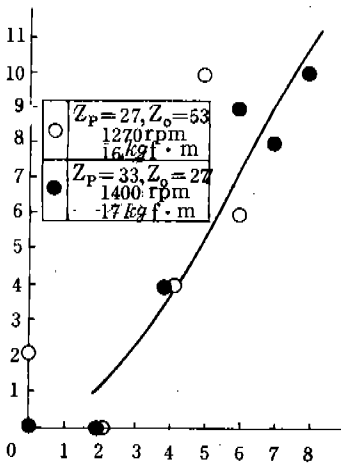


그림 21 O dB level 을 지나는 peak 數⁽⁸⁾

하는 것은 대단히 유효하다. 단, 搬送波 level 이 변화하면 F/V 출력변동 level 이, 주파수의 fluctuation 과 일치하지 않게 되어, 檢知가 곤란하게 되는 문제가 있다.

6. 결 론

이상 齒車診斷技術의 現狀으로서 國內外의 연구로 유효하다고 생각되는 것을 정리하였지만, 이들은 앞으로의 연구에 의존하는 바도

또한 크다. 현단계에서는, 이들을 개개의 case 에 따라 분별하여 쓰거나, 동시에 사용하거나 하여 진단하는 것이 좋다고 생각한다.

참 고 문 헌

1. 牧, 振動法による設備診斷の實際, 日本プラントメンテナンス協會, 1983.
2. R. A. Thompson, ASME Pub., 69-VBR-10
3. R. A. Thompson, ASME Pub., 72-PTG-24
4. 豊田, 設備診斷の進め方, 日本プラントメンテナンス協會, 1982.
5. R. M. Stewart, M. H. M. Group, University of Southampton, C303/80
6. R. B. Rondall, B & K, Marlborough, MA-01752
7. 梅澤·他 2 名, 日本機械學會論文集(C編) 49 卷 413 號 昭 58-7
8. 梅澤·他 3 名, 日本機械學會論文集(C編) 47 卷 421 號 昭 56-9
9. 윤의성, Cepstrum 해석법에 의한 베어링의 이상진단에 관한 연구, 한양대 석사학위논문, 1986.