

# 기어손상에 따른 자동변속기의 결함 검출에 관한 연구

## A Study on the Fault Detection of Auto-transmission according to Gear Damage

박 기 호† · 정 상 진\* · 위 혁\*\* · 김 진 성\*\* · 한 관 수\*\* · 김 민 호\*\*\*

Ki-ho Park, Sang-jin Jung, Hyuk Wee, Jin-seong Kim, Kwan-su Han  
and Min-ho Kim

(2007년 10월 5일 접수 ; 2007년 12월 28일 심사완료)

**Key Words** : Fault Detection(결함 검출), Gear Nick(기어 찍힘), Vibration Characteristics(진동특성), Modulation(변조), Narrow Band(협대역), Crest Factor(용기인자), Envelope Detection(포락선 검출), Sideband(측대파)

### ABSTRACT

This paper presents a detecting technique for the improvement in quality by applying the various vibrational characteristics theory. The object of this study is to objectively point out faulty gear by developing the program which can be used to analyze and predict the vibrational characteristics caused by gear wear, deformation and nick of auto-transmission. The fault detection methods by vibrational signal analysis of gear have been progressed in the various fields of industry. These methods have the advantage of being easy to attach the accelerometer without discontinuance of the structure. But not all the methods are efficient for finding early faults. So in the thesis, we completed development of the inspection system of vibration by applying the most efficient detecting methods and verified the system's reliability through experiments.

### 1. 서 론

자동변속기의 주요 기능은 엔진에서 발생된 동력을 차량의 다양한 주행조건에 부응하기 위해서 적절한 회전력과 회전수로 변환시켜서 타이어로 구동력을 전달시켜주는 동력전달 장치이다. 자동변속기 회전 부품 중 기어, 베어링, 회전축 등에서 주요한 결함이 발생하는데, 특히 동력전달에 사용되는 기어의 결함이 많은 부분을 차지하고 있다. 기어는 가공단계에서의 오차, 운전단계에서의 마모, 변형, 깨짐 등

으로 인한 결함이 발생한다. 기어의 결함은 하중 및 연속적인 상대기어와의 충돌에 의해 진동 및 소음을 발생시켜 전체시스템의 내구성, 신뢰성을 저하시키는 중요한 요인이 된다<sup>(1,2)</sup>.

기어의 진동 신호의 분석에 의한 결함진단 방법은 신호 처리 기술의 진보에 따라 많은 연구가 진행되어 왔다. 이는 초기의 결함 추적이 가능하며, 구조물의 외부에 센서를 부착하므로 기계를 중단하거나 해체시킬 필요가 없는 이점에 의해 다양한 분야에서 연구되고 있다<sup>(3)</sup>.

기어의 결함을 검출하는 방법은 신호 처리 기술에 따라 몇 가지 방법으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 시간 영역에서는 시간동기화평균(time synchronous averaging)<sup>(4)</sup>을 이용하는 방법, Kurtosis<sup>(5)</sup>를 이용하는 방법이 있다. 두 번째는 주파수 영역에서 스펙트

† 교신저자: 정희원, 현대파워텍 기술연구소  
E-mail: vibman@hyundai-powertech.co.kr  
Tel: (031)369-5281, Fax: (031)369-5222

\* 정희원, 현대파워텍 기술연구소

\*\* 현대파워텍 기술연구소

\*\*\* (주)나다에스앤브이

럼 해석(spectral analysis)<sup>(6)</sup>를 이용하여 진단하는 방법이 고안되었다. 협대역(narrow band)에서 zoom이나 window 분석기술을 적용하여, 결합에 의해 변조(modulation)된 측대파(sideband)의 크기를 이 맞물림 주파수(gear mesh frequency)의 크기와 비교함으로써 결합여부를 판단하는 방법이다. 세 번째는 큐프렌시 영역에서 캡스트럼 해석(cepstral spectrum)<sup>(7-9)</sup>을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 네 번째는 시간-주파수 해석방법(time-frequency analysis)에서는 이동 창문(moving window) 해석에 기초한 STFT(short time fourier transformation)<sup>(10)</sup>에 의한 방법, 짧은 시간에 대해 주파수 특성을 파악할 수 있어 초기결합의 검출 방법에 웨이블릿(wavelet) 방법이 응용되고 있다. 다섯 번째로, 대역통과(band-pass) 또는 저역통과(low-pass) 필터를 사용하여 포락(envelope)<sup>(11,12)</sup>을 이용하여 검출하는 방법이 제안되어 왔다. 기어의 결합 검출을 위한 다양한 신호처리 기술이 있지만, 모든 방법이 조기 결함을 검출하는데 효과적인 것은 아니며 각각의 영역에서의 분석방법은 장단점을 갖고 있다. 이 연구에서는 기어의 결함을 효과적으로 검출하는 방법들을 적용하여 전체 시스템 개발을 완료했으며, 인위적으로 조각한 결합에 의해 발생하는 신호를 측정하여 검출 결과의 신뢰성을 검증하였다.

## 2. 기어결합 검출 방법

기어의 결합 검출을 위한 많은 이론 중에, 검출에 가장 효과적인 방법을 선정하기 위해서 기어의 미세한 치 찍힘 및 깨짐 등과 같은 결합 검출을 위해 일정 시간영역에서의 용기인자(crest factor)를 적용하였다. 그리고 기어의 편심(eccentricity), 축 정렬(alignment)의 불량, 기어의 찍힘이나 파손을 효과적으로 검출하기 위해 포락선 검출(envelope detection) 방법을 응용하여 적용하였다.

### 2.1 용기인자(Crest Factor)

일정 시간 영역에서 진동신호의 충격세기(impulse intension)를 분석하는 기법이다. 기어의 미세한 찍힘이나, 깨짐과 같은 결합 발생 시 매 회전 당 같은 위치에서 중복되어 충격이 발생하므로 주파수 분석만으로는 파손된 기어의 진동신호를 검출하기는 힘

들며, 시간영역에서의 매우 섬세한 신호처리 기술이 필요하다. 따라서 용기인자(crest factor)는 주어진 시간 간격 내 진동 신호의 피크(peak)값과 RMS (root mean square)값의 비로 정의된다.

$$\text{crest factor} = \frac{\text{신호의 피크(peak)값}}{\text{신호의 RMS값}} \quad (1)$$

일반 정상상태에서의 기어의 랜덤(random) 진동 신호는 보통 RMS값의 3배 정도의 피크 값이 요구되며, 정상상태기어에서 발생하는 진동신호와 인위적으로 찍힘을 조각한 결합기어에서 발생한 진동신호를 측정하여 비교 분석 하였다.

### 2.2 Envelope Detection (포락선 검출)

기어는 구동하는 축에서 다른 회전축으로 동력을 전달 시 결합을 가진 기어는 특별한 진동 신호를 유발한다.

$$f_m = f_s \times Z \quad (2)$$

$$f_{sb} = f_m \pm n f_{sl}, \quad 2f_m \pm n f_{sl} \quad (3)$$

( $f_m$  : 맞물림 주파수(Hz),  $f_{sb}$  : 측대파(Hz),

$f_s$  : 축 회전주파수(Hz),  $Z$  : 기어의 잇수,  $n$  : 정수)

기어의 진동특성은 식 (2)과 같이 맞물림 주파수 성분과 밀접한 연관을 가지며, 기어의 결함을 검출하는 방법으로 널리 사용하고 있다. 측정된 진동신호의 진폭이 일정치 않고 주기적인 왜곡(변조)이 발생할 때 그 변조진폭의 주기 및 크기를 측대파 성분이라 한다. 기어의 맞물림 주파수 또는 하모닉 성분( $2f_m, 3f_m \dots$ ) 근처에도 기어와 맞물려 있는 축의 회전속도 값의 측대파를 가지며 식 (3)과 같이 계산할 수 있다. 측대파의 간격은 결합을 갖는 기어의 회전 속도와 일치하며, 측대파 주파수 성분으로 기어의 편심, 축 정렬의 불량, 기어의 찍힘이나 파손과 같은 결합이 있음을 예측 할 수 있다. 즉, 포락선 검출이란 진폭 변조된 신호 데이터에서 측대파의 주파수 성분을 검출하는 기법이다.

Fig. 1의 변조 파형은 기어의 손상 및 충격 등에 의한 시간영역에서 주기적으로 발생하는 파형이다. FFT(fast Fourier transform)을 통한 주파수 영역에서는 Fig. 2와 같이 맞물림 주파수를 중심으로 측

대파 성분과 배수 성분이 이 발생하는 것을 알 수 있다. 측대파 성분을 포락부 스펙트럼(envelope spectrum)으로 나타내면 Fig. 3과 같다. 명확한 신호처리 및 FFT 분석을 위해 Fig. 4와 같이 측정된 포락부 형태의 양의 진동신호만을 이용하여 밀도를 높이고, 변조된 대역만을 통과시키는 기법을 사용하였다.

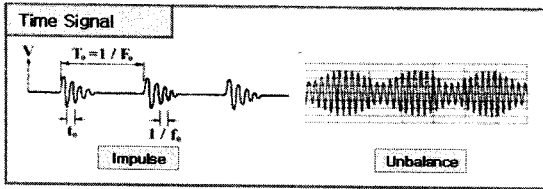


Fig. 1 The amplitude modulation by impulse wave

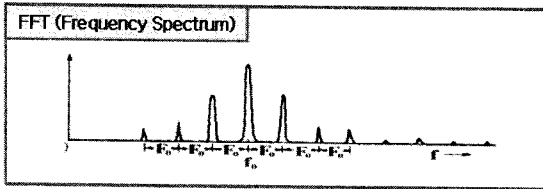


Fig. 2 The spectrum analysis

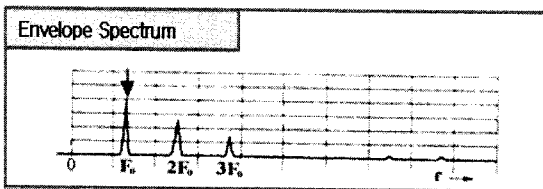


Fig. 3 The envelope spectrum

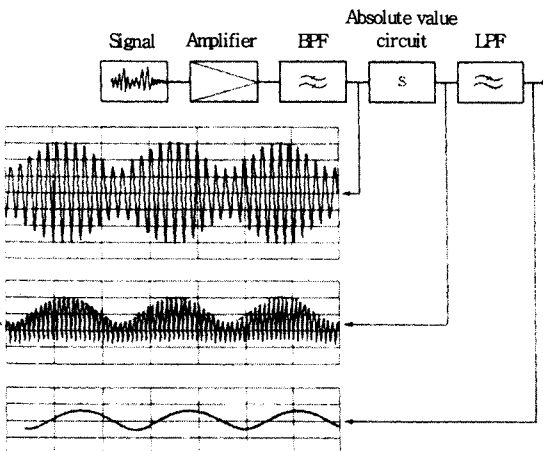


Fig. 4 Signal processing of modulation signal

### 3. 전체 시스템 구성

#### 3.1 시스템 구성도

이 시스템은 QMS(quality management system), DB server 및 소음진동 측정/분석 장비를 이용하여 IN-Line 소음검사 시스템(EOL, end of line)을 구성하였다. 자동변속기 기종, 시험패턴, 시리얼 번호, 기어 변속단, rpm 신호등을 PLC(programmable logic controller) 프로그램을 통해 전송 받고, 3축 가속도계를 이용하여 진동신호를 취득하였다. Fig. 5와 같이 측정된 진동신호를 정밀 분석하여 제품의 출하 여부를 결정하는 시스템으로 구성하였다.

#### 3.2 시스템 Flow Chart

##### (1) 측정모드 Diagram

제품의 모델에 따라 해당 공정의 스텝들을 수행하고, 제품의 품질을 평가하는 모듈이다. Fig. 6과 같이 공정의 각 스텝에서 설정된 각 측정변수들을 측정하고, 취득된 진동신호와 판정방법을 토대로 제품의 NG 혹은 OK를 판정하는 모듈이다. 또한 측정된 데이터와 판정결과를 DB server에 저장하는 기능도 수행한다.

##### (2) 설정모드 Diagram

제품의 진동신호를 측정하고, 품질을 평가하기 위한 준비단계인 다양한 변수를 설정하는 모듈이다. Fig. 7과 같이 제품의 모델관리와 공정관리, 스텝관리, 측정명 관리, 측정변수 관리, 판정방법 관리를 수행하는 모듈이다.

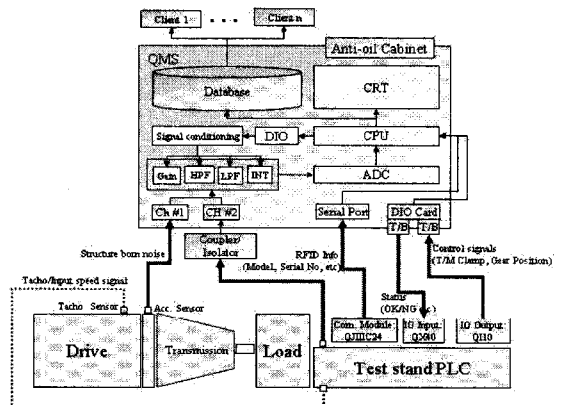


Fig. 5 The system structure



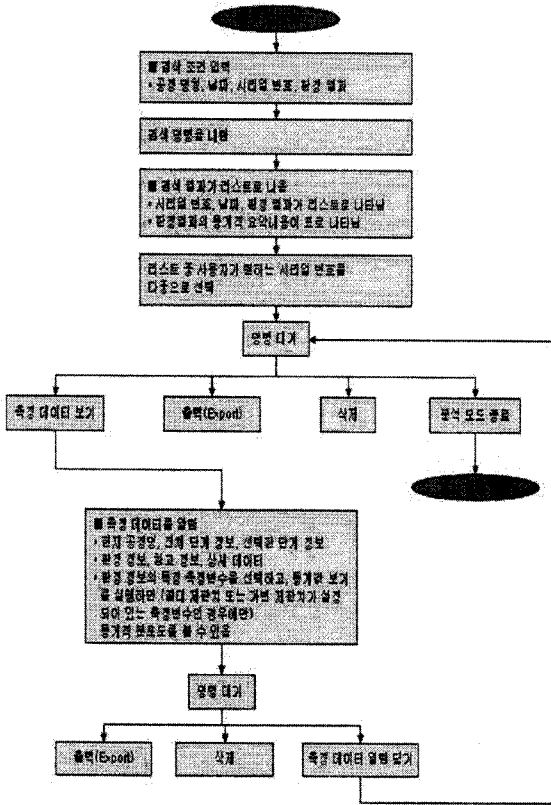


Fig. 8 The diagram of analyzing mode

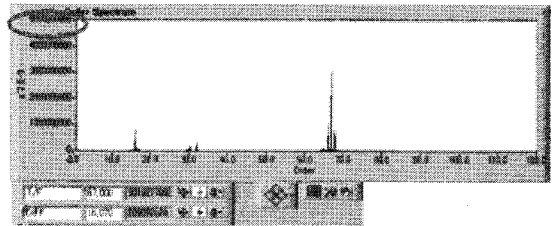
(3) 분석모드 Diagram

Fig. 8과 같이 측정된 데이터와 판정결과를 DB에서 다운로드하여 상세한 분석을 수행하는 모듈이다. 다양한 검색 옵션을 제공하여 원하는 데이터를 필터링 하여 볼 수 있다. 또한 측정 중에는 볼 수 없는 결함주파수 정보도 상세하게 분석이 가능하다.

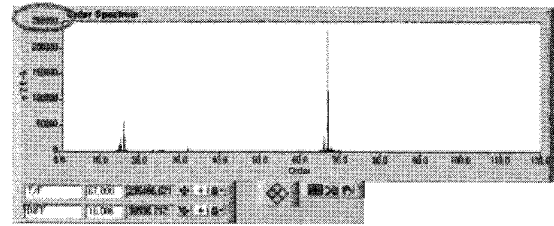
4. 실험 개요

4.1 측정 방법

자동변속기에 직접 부착하는 방식은 진동신호는 뚜렷하나, Table 1과 같이 다양한 기종 및 설계변경시에 어려움이 예상된다. Fig. 9와 같이 가속계를 flange에 부착하는 간접 부착식의 진동 레벨은 직접 부착하는 방식에 비해 낮지만, 진동특성을 명확하게 가지고 있다. 따라서 이 시스템에서는 3축 가속도계를 Fig. 10과 같이 플랜지에 설치하였으며, 3방향 신호 중 가장 뚜렷하고 건전한 축 방향 신호를 취득하였다.



(a) The direct attachment



(b) The indirect attachment(flange)

Fig. 9 The test result by attachment methods of accelerometer

Table 1 The methods of vibration pick-up

Content	Direct attachment	Indirect attachment
Vibration pick-up method		
Advantage	The definiteness of vibration characteristic	A few change of the vibration characteristic and amplitude from various case shapes
Fault	Many change of the vibration characteristic and amplitude from various case shapes The difficulty of selection for optimal pick-up position	A few vibration amplitude

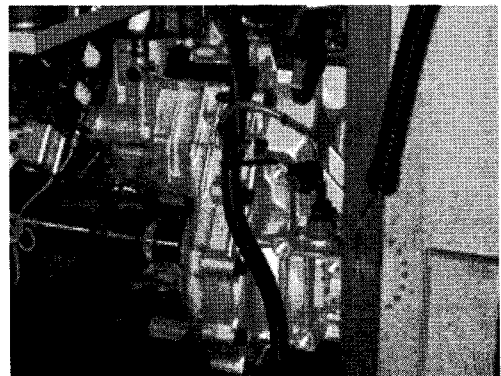


Fig. 10 The position of 3-axial accelerometer

기어단은 4단, 5단 그리고 R단에서 2500 rpm 고정으로 측정하였으며, 가/감속(1000~4000 rpm) 시험 패턴에서는 4단으로 측정하였다. 입력모터는 속도 제어를 출력모터는 토크제어 방식으로 구성하였다.


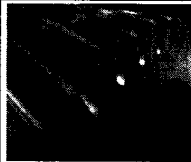
4.2 실험 대상

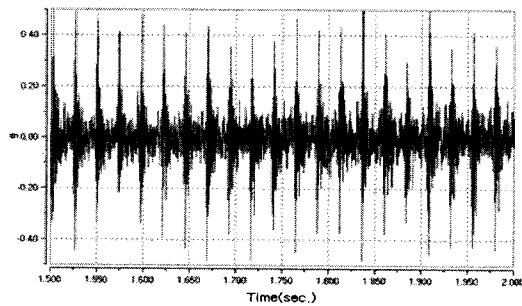
실험 대상 기어는 정상상태기어에 인위적으로 결함(찍힘)을 조각한 불량기어로 Table 2와 같이 선정하였다. 또한, 차량에서의 청감 평가를 통해 소음 발생을 확인하였다.

4.3 실험 결과

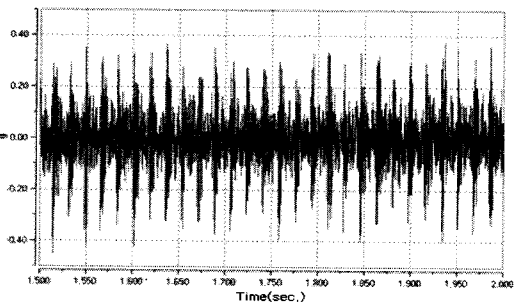
(1) Sample 기어#1(T/F Drive 기어 찍힘)  
T/F Drive(transfer drive; input shaft의 동력을

Table 2 The nick position & picture

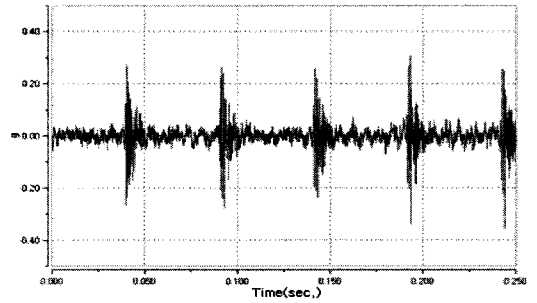
		Sample#1	Sample#2
1	Gear name	T/F Drive gear	Differential drive gear
2	Nick-position		



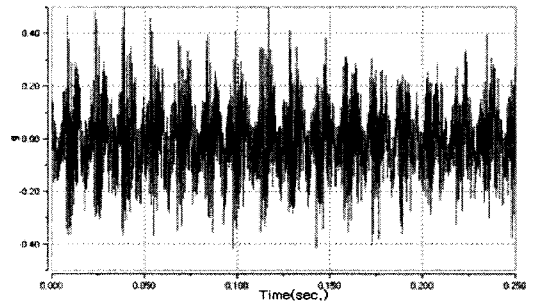
(a) 4 shift, 2500 rpm



(b) 5 shift, 2500 rpm

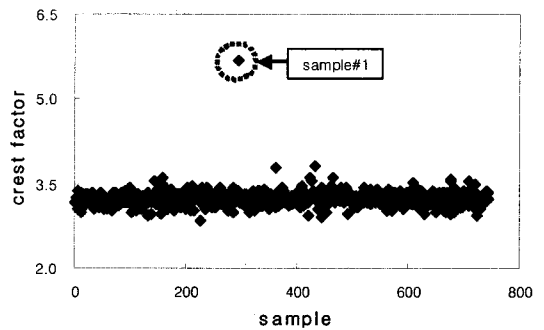


(c) 4 shift, acceleration

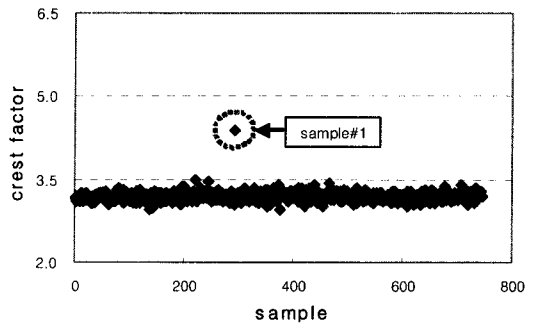


(d) 4 shift, deceleration

Fig. 11 The test result of damaged gear sample #1(time domain)



(a) 4 shift, 2500 rpm



(b) 5 shift, 2500 rpm

Fig. 12 The test results of mass production for crest factor

output shaft에 전달)기어 가 한번 회전 할 때 마다 진동 peak값이 시간영역에서 주기적으로 발생하는 것을 Fig. 11에서 확인 할 수 있다. Fig. 12와 같이 일반 양산품 745대와 비교 분석한 결과 crest factor 값이 4단 5.7, 5단 4.4로 일반 양산품 대비 매우 높게 나오는 것을 알 수 있다. 또한, 기어 짝힘의 경우 2500rpm 고정 속도와 가/감속 시험 패턴 모두 데이터 신뢰성이 높게 나타나, 양산라인의 시간제약이 많은 가/감속 시험 패턴보다는 2~3초 동안의 정속 패턴 측정만으로도 양호품/불량품 판정이 가능함을 알 수 있다.

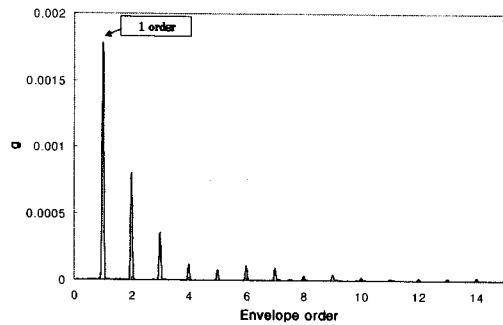
**Table 3** The sideband of main gears through theoretical analysis & experimental result

	Gear name	4 shift	5 shift	Remark
1	T/F Drive gear	1	1.373	1. unit : order 2. sideband 1st order value
2	C gear	0.892	1.224	
3	D gear	0.302	0.415	
4	Experiment value	1.003	1.377	

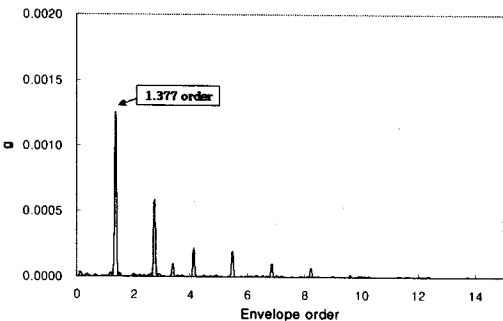
손상된 기어에 의해 발생된 주파수 성분을 회전속도와 동기화된 포락부 오더 스펙트럼(envelope order spectrum)으로 나타내면 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다. 측정된 측대와 1차 성분은 4단 1.003 order, 5단 1.377order에서 변조된 진동신호가 발생함을 알 수 있다. 이것은 Table 3과 같이 주요 기어들 중에 이론적으로 계산된 T/F Drive 기어의 측대와 1차 성분과 일치함으로써, T/F Drive 기어에 의해 발생한 진동신호라는 것을 알 수 있다. Fig. 14에서 측대와 성분의  $\pm 0.03$  밴드 내의 1차 성분과 하모닉 성분(2X~10X)값을 합산한 결과 일반양산품과 확연하게 차이가 나는 것을 확인 할 수 있다.

(2) Sample 기어#2(Diff. Dive 기어 짝힘)

정속 시험 패턴으로 측정한 crest factor값은 4단 4.2, 5단 3.3, R단 6.5로 4단, R단에서는 일반 양산품(1396대) 대비 높은 진동 peak값을 나타내지만, 5단에서는 일반 양산품과 동등한 수준임을 Fig. 15~16에서 알 수 있다. 기어 비 변경에 따른 부하 조건의 차이에 의한 결과라고 판단된다. 또한, 가속보다는 감속에서 기어 짝힘에 의한 진동 peak값이 높다. 이 결과는 sample#2 기어의 감속 기어 접촉면의

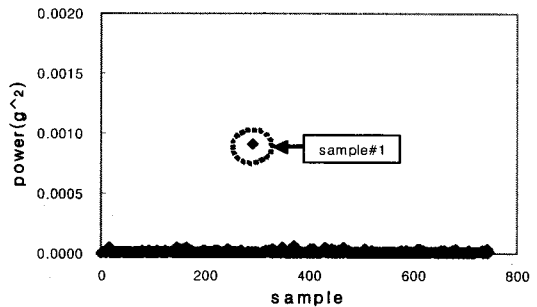


(a) 4 shift, 2500 rpm

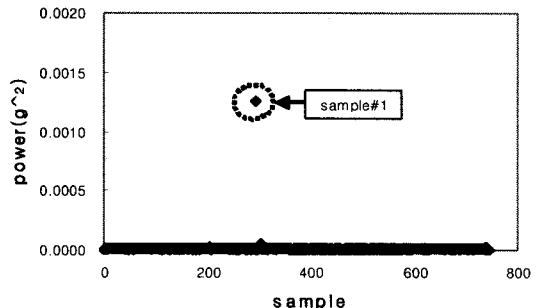


(b) 5 shift, 2500 rpm

**Fig. 13** The test result of damaged gear sample#1 (envelope order spectrum)



(a) 4 shift, 2500 rpm



(b) 5 shift, 2500 rpm

**Fig. 14** The test results of mass production for envelope order of T/F drive gear

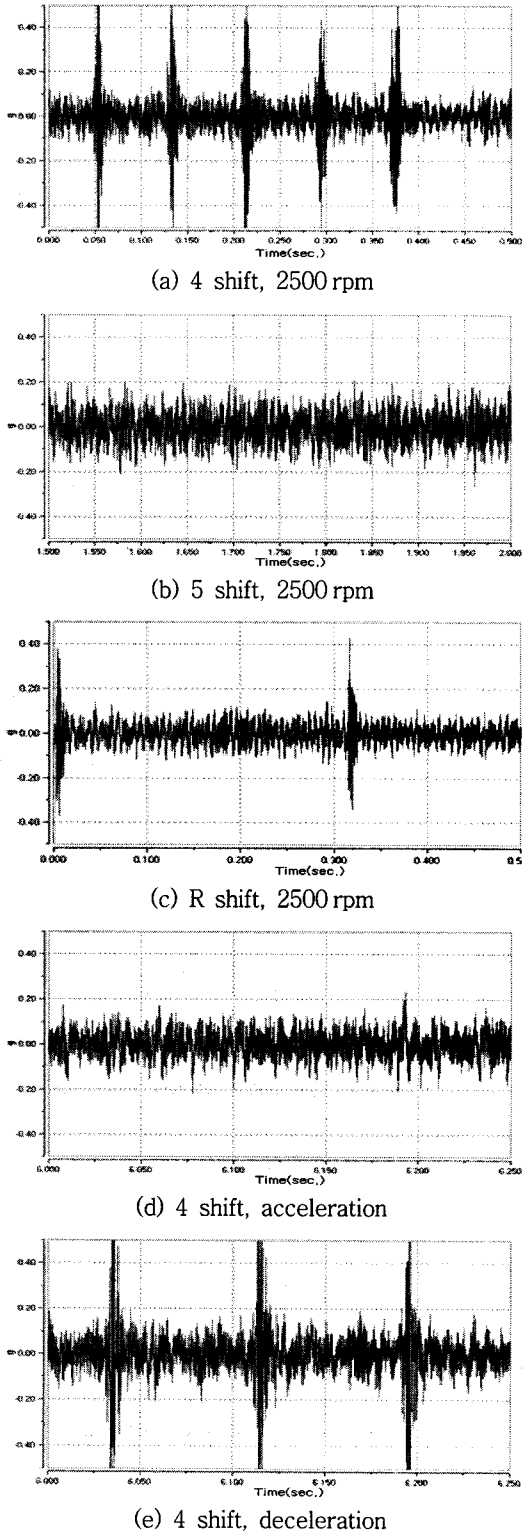


Fig. 15 The test result of damaged gear sample#2 (time domain)

찍힘이 가속 기어 접촉면보다 상대적으로 커서 나타나는 현상으로 판단된다. 감속 시와 R단의 기어 접촉면은 동일한 면으로, Fig. 16(c)와 같이 R단의 측정 결과만으로도 양호품/불량품에 대한 판정이 가능하다는 것을 알 수 있다.

4단에서 측정된 측대파 1차 성분은 0.3 order로서 Table 4와 같이 이론적으로 계산된 differential drive 기어의 측대파 성분과 일치함을 Fig. 17(a)에 서 알 수 있다. 또한, 1차 성분과 하모닉 성분 (2X~10X)

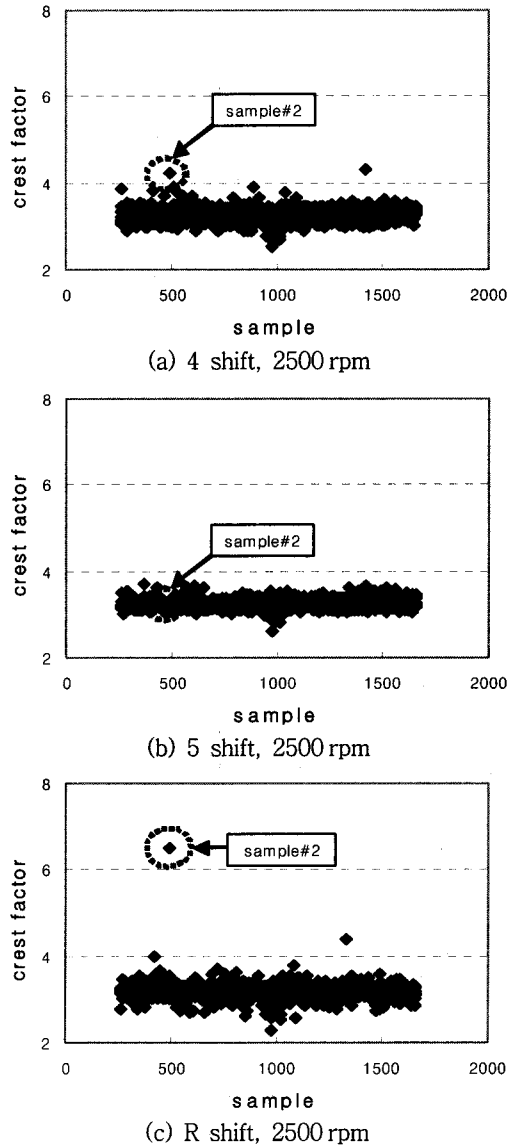
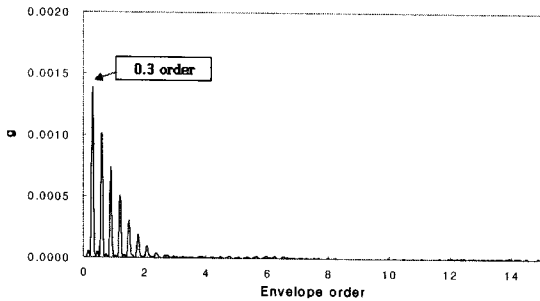


Fig. 16 The test results of mass production for crest factor

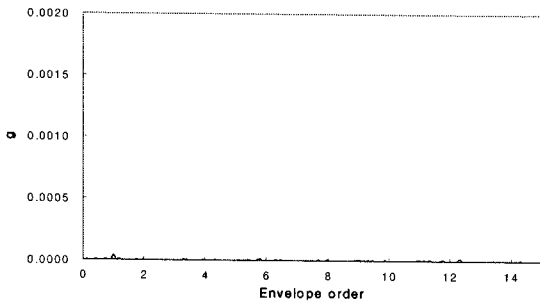


**Table 4** The sideband of main gears through theoretical analysis & experimental result

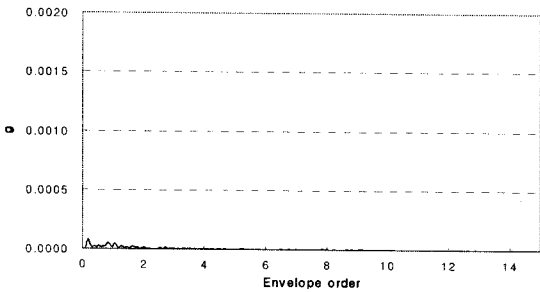
	Gear name	4 shift	5 shift	R shift	Remark
1	E gear	1	1.373	0.373	1. unit : order 2. sideband 1st order value
2	F gear	0.843	1.157	0.314	
3	Differential drive gear	0.3	0.412	0.079	
4	Experiment value	0.3	-	0.073	



(a) 4 shift, 2500 rpm



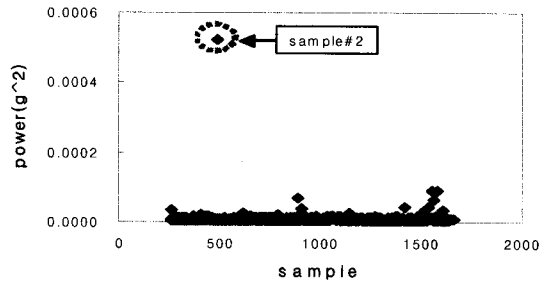
(b) 5 shift, 2500 rpm



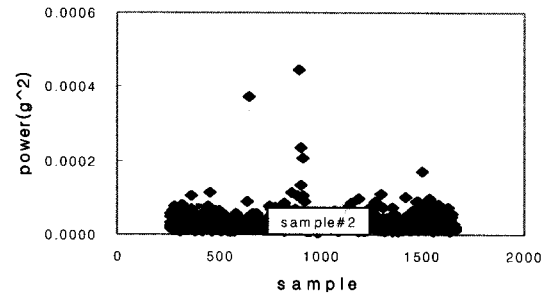
(c) R shift, 2500 rpm

**Fig. 17** The test result of damaged gear sample#2 (envelope order spectrum)

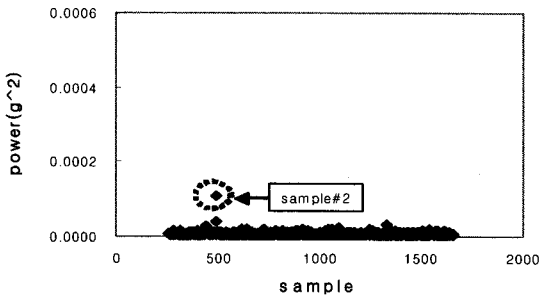
값을 합산한 결과는 crest factor 결과와 동일하게 4단, R단에서 일반양산품 대비 진동값이 매우 높은 것을 Fig. 18에서 알 수 있다.



(a) 4 shift, 2500 rpm



(b) 5 shift, 2500 rpm



(c) R shift, 2500 rpm

**Fig. 18** The test results of mass production for envelope order of Diff. drive gear

### 5. 결 론

이 연구에서는 자동변속기의 기어결합 검출을 위한 많은 이론 중에서 용기인자(crest factor) 및 포락선 검출(envelope detection) 기법을 적용하여, 자동변속기 IN-LINE 소음검사 시스템을 개발 완료하였다. 정상상태기어에 인위적으로 결함(찍힘)을 조각한 불량 기어와 일반 양호품의 비교 검증시험을 통해 시스템의 신뢰성을 검증하였다. 이 시스템은 가공단계에서의 기어의 오차, 운전단계에서의 마모, 변형, 깨짐 등으로 인한 결함 등을 효율적으로 관리하여 제품의 불량률을 줄이고 품질을 향상시키는 데 매우 효과적이며 활용 가치가 높을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- (1) Lee, J. E., Han, J. Y., Lyu, G. H., Chang, H. S. and 1997, "A Study on the Fault Detection of Gears", Institute of Technology and Science, Vol. 27, pp. 95~109.
- (2) Lee, J. H., Kook, J. C. and Lee, J. E., 1999, "A Study on the Failure Detection of Gear Trains", Institute of Technology and Science, Vol. 29, pp. 121~130.
- (3) Oguamanam, D. C. D., 1994, "Gear Damage Analysis and Processing Techniques", Thesis of University of Waterloo.
- (4) Braun, S., 1979, "On the Extraction and Filtering of Signals Acquired from Rotating Machines", Journal of Sound and Vibration, Vol. 65, No. 1, pp. 37~50.
- (5) Stewart, R. M., 1980, "The Specification and Development of a Standard for Gearbox Monitoring", 2nd Int. conf. on Vibration in Rotating Machinery, pp. 353~359.
- (6) Randall, R. B., 1982, "A New Method of Modeling Gear Faults", Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, Vol. 104, pp. 259~267.
- (7) Tribolet J. M., 1977, "A New Phase Unwrapping Algorithm", IEEE Transactions, Vol. ASSP-25, No. 2.
- (8) Lyon, R. H. and Ordubai A., 1982, "Use of Cepstra in Acoustical Signal Analysis", Journal of Mechanical Design, Vol. 104, pp. 303~306.
- (9) Randall, R. B., 1980, "Advance in the Application of Cepstrum Analysis to Gearbox Diagnosis", Int. Mechanical Engineer, C276.
- (10) Staszewski, W. J. and Tomlinson, G. R., 1994, "Application of the Wavelet Transform to fault Detection in a Spur Gear", Mechanical Systems and Signal Processing 8, pp. 289~307.
- (11) Rice, S. O., Selected Papers on Noise and Stochastic Processes(New York: Dover, 1954).
- (12) Park, C. S. and Kim, Y. H., 2005, "The Comparison Between Fault Detection Methods about Early Faults in a Ball Bearing", Proceedings of the KSAE Autumn Conference, pp. 200~203.