

<論 文>

하이포이드 기어의 진동 스펙트럼 분석†

김 영 배* · 이 종 원**

(1982년 6월 18일 접수)

Spectral Analysis of Hypoid Gear Vibration

Young Bae Kim and Chong Won Lee

Abstract

The vibration characteristics of hypoid gears are experimentally investigated with backlash and tooth mesh frequency varied.

Experiments are performed with two types of gear sets; well-machined and over-lapped gears. Through the experimental works, a constant torque 0.8kg·m is applied to the gears and a pulse type of trigger signal synchronizing tooth contact is used to measure the tooth mesh frequency and to average the gear vibration signal in the time domain. The time averaged vibration signals are frequency analyzed by a digital signal analyzer.

The experimental results show that the vibration characteristics of the two different types of gears in relation to backlash amount and mesh frequency variations are well differentiated by harmonic amplitudes and their ratios, and peak-to-peak amplitude of the gear vibration.

1. 서 론

자동차의 차동장치(differential gear assembly)에 많이 사용되는 하이포이드 기어(hypoid gear)는 기어의 복잡한 기하학적 형태와 치합상태 뿐 아니라 피니언과 기어의 치절 공정 및 이(tooth)의 외형 곡선에 영향을 미치는 많은 변수와 인자들을 갖고 있으므로 기어의 실제 제작 및 품질검사가 어렵다. 그러나 하이포이드 기어는 스파이럴 베벨 기어(spiral bevel gear)보다 물림율이 좋고 구동 상태가 부드럽고 경속하기 때문에

제조 과정이 까다롭고 가격이 비싸지만 널리 사용되고 있다. 현재 자동차에 사용되는 하이포이드 기어는 제조 칫수에 상한선을 설정해 놓고 이 상한선의 범위를 넘어서는 기어를 불량품으로 판정할 뿐 아니라, 기어의 진동 특성을 분석하여 불량품 판정에 적용하고 있다.^{1,2)} 미국의 Gleason 회사에서는 하이포이드 기어의 불량품을 판정하는 513 하이포이드 기어시험기(Hypoid Gear Tester)를 개발하여 실제 이용 및 보급하고 있는데, 불량 판정법으로는 시험할 한쌍의 피니언 및 기어를 시험기에서 회전시키고 이때의 진동신호의 특정주파수 성분이 미리 설정된 한계치 이상일 때 불량으로 간주하고 있으나 불량원인(가공상태, 운전조건) 등에 대한 분석은 할 수 없다. 513 하이포이드 기어시험기는 3개의 고정된 아나로그필터(중심 주파수 200, 400, 600Hz)를 사용하고 있으므로 특정한 메시 주파수(tooth mesh frequency)에서의 특정주파수 성

† 1982년도 대한기계학회 춘계학술대회(82. 5. 22)에서 발표

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과, 현재 삼성중공업

**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

분단을 얻도록 제한되어 있다.

본 논문에서는 각 1쌍의 가공이 잘된 기어와 오우버 레핑(over-lapping)된 기어를 가지고 실험하였으며, 각 기어들은 메시주파수와 백래시를 변화시키면서 이들의 변화에 대한 기어의 진동 특성을 분석하였다. 하이포이드 기어의 진동에서 발생한 신호는 디지털 신호 분석기(Digital Signal Analyzer)로 분석하였으며, 시간영역(time domain)과 주파수 영역(frequency domain)에서 이들의 진동특성을 분석하였다. 기어의 회전은 반시계 방향으로 국한하였다.

2. 기어의 물림특성^{1,4,7)}

2.1. 이(齒) 물림 해석((Tooth Contact Analysis; TCA)

TCA는 기어 이의 형태로부터 발생하는 진동의 전달 특성을 연구하는 것이다. 맞물리는 두 개의 기어가 완전한 이 형상을 갖는 공액기어(conjugate gear)는 완전한 운전 조건에서만 무리없이 작동되기 때문에 실제 조건에서는 사용이 바람직하지 못하다. 기어를 장치할 때 발생하는 장치(alignment) 오차뿐 아니라 높은 하중 상태에서 연속적으로 기어를 작동시킬 때 마찰로 인하여 이의 형상이 변하여 자연 운전 조건이 변하기 때문이다. 따라서 기어의 모양을 실제 운전 조건에 맞게 변형시킬 필요가 있으며, 램프형, 브리지형 등의 여러 형태로 변형된 이의 형태를 사용하고 있다. 변형된 이를 가진 기어는 회전할 때 기구학적 전달 회전속도가 변하게 되며 결국 전체 시스템의 진동을 유발시킨다.³⁾ 따라서 이의 가공상태로부터 얻어진 자료로부터 TCA 곡선을 예측할 수 있으며, TCA 곡선이나 이로부터 유발되는 진동 특성을 연구하면, 기어 창성시 생기는 오차와 장치 오차, 기어의 마멸 정도를 알 수 있다.

2.2. 기어진동 스펙트럼 분석 방법

513 하이포이드 기어시험기에서는 기어의 속도를 210 Hz 메시 주파수에서 90Hz 메시주파수까지 연속적으로 변화시킬 때 발생하는 기어의 진동 신호가 200Hz, 400 Hz, 600Hz의 고정된 중심주파수(center frequency)를 갖는 narrow band pass filter를 통과하여 나타난 타임레코드차아트(time record chart)로부터 기어의 불량상을 판별하고 있다. 실제 가공이 잘된 기어 쌍에 대한 타임레코드 차아트를 Fig. 1에 보였는데 굵은 선은

200Hz 필터, 점선은 400Hz 필터, 일점쇄선은 600Hz 필터로부터 나온 각 중심 주파수성분이다. 200Hz의 필터를 통과한 신호는 200Hz 메시주파수에서 1st 하모닉 성분이 되고, 100Hz 메시 주파수에서는 2nd 하모닉 성분이 되는데 2nd 하모닉 성분은 200Hz 메시 주파수에서 400Hz 필터를 통과하는 신호에서도 나타나며, 3rd 하모닉 성분은 600Hz 필터를 통과한 신호의 200 Hz 메시 주파수에서 생기게 된다. 따라서 1st 하모닉 성분은 메시 주파수가 200Hz일 때, 2nd 하모닉 성분은 메시 주파수가 100, 200Hz일 때 3rd 하모닉 성분은 메시 주파수가 133, 200Hz일 때, 4th 하모닉 성분은 메시 주파수 100, 150Hz에서만 나타남을 알 수 있다. 디지털 신호 분석기(digital signal analyzer)를 이용하면 각 기어의 메시 주파수 별로 1st, 2nd, 3rd 등의 하모닉 성분을 모두 얻을 수 있게 될과 동시에 시간영역에서 기어이가 한 피치씩 진행함에 따라 변화하

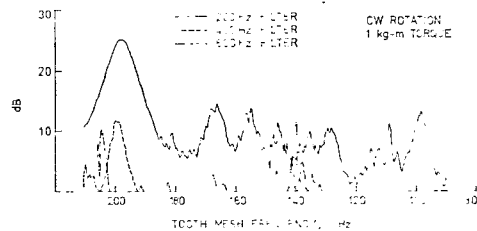


Fig. 1 Gleason No. 513 hypoid tester-test record

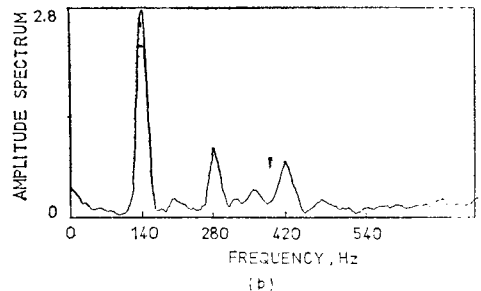
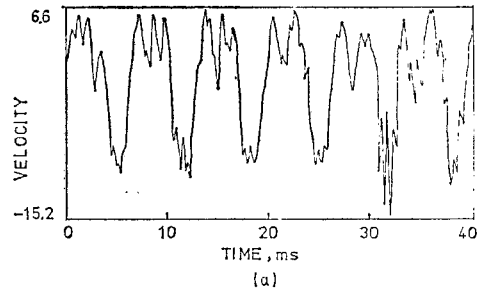


Fig. 2 (a) Averaged time record.
(b) Amplitude spectrum: well-machined gear; 0.20m/m backlash, 140Hz mesh frequency.

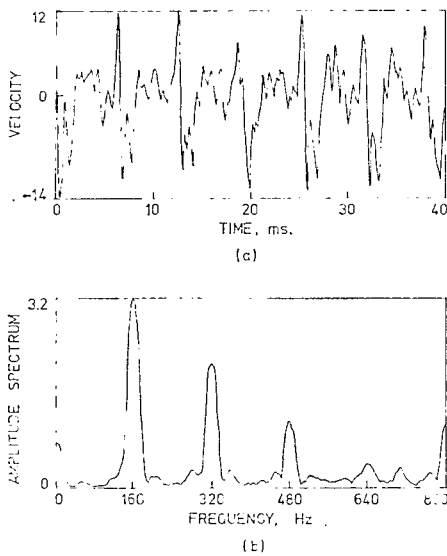


Fig. 3 (a) Averaged time record.
(b) Amplitude spectrum: over-lapped gear, 0.20m/m backlash, 160Hz mesh frequency.

는 진동 성분만을 구할 수도 있다. Fig. 2와 Fig. 3은 2개의 기어쌍을 회전시켜 나타난 진동을 디지털 신호분석기를 이용해서 구한 주파수 영역에서의 선형 스펙트럼과 시간 영역에서의 타임 레코드(time record)를 나타낸 그림이다. 주파수 영역에서의 선형 스펙트럼(linear spectrum)은 513 하이포이드 기어 시험기의 타임레코드 차아트와는 달리 모든 메시 주파수에서 스펙트럼을 얻을 수 있다.

일정한 메시주파수에서 스펙트럼을 구할 때, 메시주파수와 동일한 주파수를 갖는 트리거 신호를 이용하면 스펙트럼의 절대치(magnitude)와 위상(phase)을 얻을 수 있다. 따라서 이러한 진동 스펙트럼의 크기와 위상을 고려하여 각 기어의 여러 변수와의 상관 관계를 분석하면 기어의 특성을 규명할 수 있게 된다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1. 실험 장치

실험 장치의 구성 요소는 DC 모우터, V 벨트, 폴리, 베어링, 기어와 피니언 그리고 기어의 지지대 및 부하(load) 장치, photo-TR 장치 및 광원 장치로 구성되어지며 그 개요도를 Fig. 4에 도시했다.

DC 모우터에서 전달된 동력은 V 벨트를 통하여 피니언과 기어를 회전시키고 다시 부하장치를 통하게 되어 있으며 부하 장치에는 토크가 걸리게 되어 있다. 실

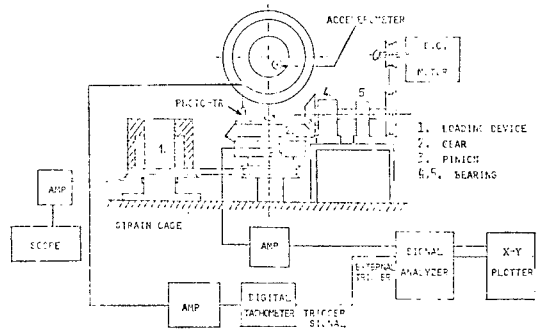


Fig. 4 Schematic diagram of experimental set-up.

험중 메시주파수가 변함에 따라 토크를 일정하게 하기 위하여 스트레인 게이지가 부착되어 있는 증폭축과 기어 회전축간 거리를 조정하여 기어 지지장치와 연결시켜주는 V 벨트의 장력을 변화시켜 마찰에 의한 토크의 전달을 조절하였다.

기어가 회전할 때 메시 주파수와 트리거 신호를 얻기 위하여 광원(light source)과 photo-TR을 사용하였으며, photo-TR의 신호를 증폭하기 위해 증폭기(amplifier)를 제작하여 사용하였고 메시 주파수를 측정하기 위해 디지털 회전속도계(digital tachometer)를 제작하여 사용 하였다.⁹⁾

검출 신호로는 기어 지지대의 상하 방향 진동 속도 성분을 측정하였다. 속도측정용 가속도계는 BBN 사 508B(3Hz~15KHz, 100mv/g)를 사용했으며, 증폭용 charge amplifier(BBN 820M형, 0.01~9.99cm/sec)에 연결했다. 가속도계, photo-TR 및 광원의 부착위치 는 Fig. 5에 보였다. 검출된 신호는 dual channel 디지털 신호 분석기(hewlett-packard 5420A)를 통하여 시간 영역과 주파수 영역에서 분석하였으며 X-Y plotter(hewlett-packard 1717형)에 연결시켜 기록하였다.

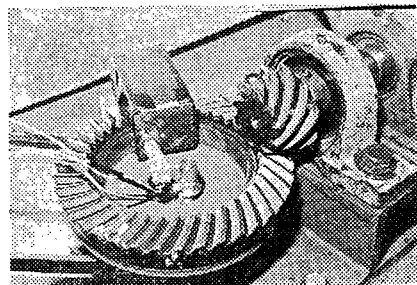


Fig. 5 Sensor mountings.

부하장치에 걸리는 토크를 측정하기 위하여 4개의 스트레인 게이지(Kyowa KFW-5-D16형)을 이용했으며, 스트레인 증폭기(Vishay Instrument BAM-1형)

에 연결해서 출력은 오실로스코프로 관찰하였다. 메시주파수의 변화는 DC 모터의 속도 변환 단자를 단계적으로 변화시킴으로서 수행하였다.

3.2. 실험 방법

진동실험은 2쌍의 기어와 피니언을 가지고 시행하였다. 기어 No.1은 가공이 잘된 기어, 기어 No.2는 오우버 래핑된 기어이다. 진동 실험을 하기 전 기어와 피니언의 접촉상태를 확인하기 위해 marking compound를 기어 접촉면에 발라서 시험해 보았으며, 접촉상태가 양호하도록^{4,6)} 기어와 피니언의 장착위치를 조정하였다. 기어와 피니언의 표준 배치도를 Fig. 6에, marking compound를 이용한 기어 이의 접촉 상태를 Fig. 7에 보였다. 실험은 각 기어의 백래시를 3단계(0.10m/m, 0.15m/m, 0.20m/m)로 변화시키면서 동시에 메시주파수를 7단계(80Hz, 100Hz, 120Hz, 140 Hz, 160Hz, 190Hz) 변화시켜 수행하였다. 백래시의 측정은 다이알 게이지(dial gage)를 이용하였으며, 부하는 0.8kg-의 일정한 토크를 걸어 주었다.

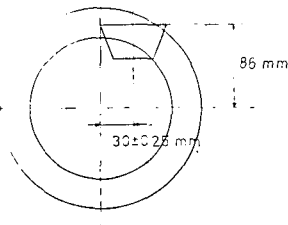


Fig. 6 Gear and pinion alignment.

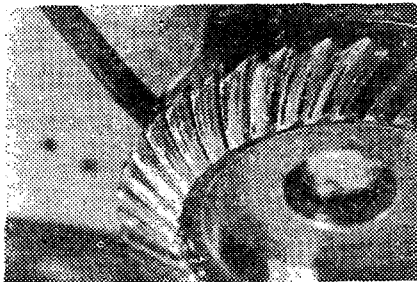


Fig. 7 Tooth contact.

4. 결과 및 고찰

4.1. 진동의 Peak-to-Peak 값 비교

시간 영역에서의 진동의 peak-to-peak 값은 Figs. 2(a), 3(a)에 보인 바와 같은, 시간 평균된 진동 신호로부터 구했으며 기어 No. 1, 2에 대한 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 도시했다.

기어 No. 1의 경우 peak-to-peak 값은 메시주파수의 증가에 따라 대체로 증가하는 반면 기어 No. 2의 경우는 불규칙하게 변하는 경향을 보이며 메시주파수

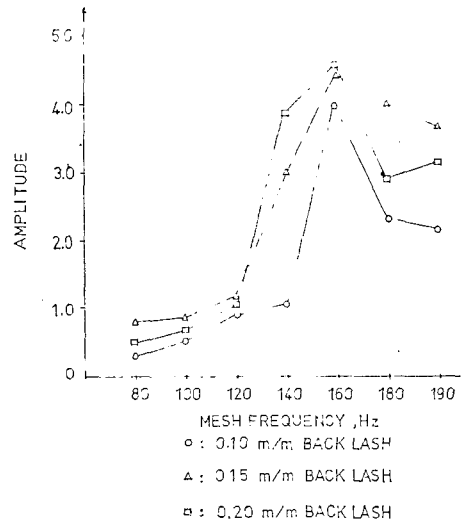


Fig. 8 Peak-to-peak vibration amplitude : well-machined gear.

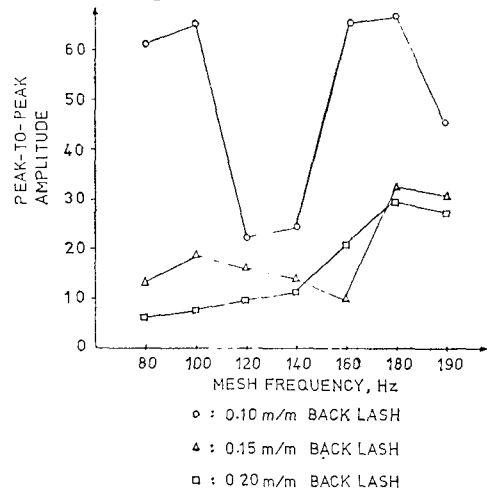


Fig. 9 Peak-to-peak vibration amplitude: overlapped gear.

에 관계없이 백래시 0.10m/m에서 기어 No. 1의 경우 최소치를 기어 No. 2의 경우 최대치를 갖음을 알 수 있다. 또한 백래시 0.10m/m에서 기어 No. 1의 경우 ~100Hz 메시주파수에서 최소값을, ~160Hz 메시주파수에서 최대값을 가지며 기어 No. 2의 경우 ~100Hz와 ~160Hz에서 최대값, ~130Hz에서 최소값을 갖는다. 따라서 메시주파수 ~100Hz, 백래시 0.10m/m에서 No. 1과 No. 2 기어의 peak-to-peak 값에 가장 현저한 차이가 생긴다.

4.2. 1st 하모닉 성분의 비교

Fig. 2(b)와 Fig. 3(b)에 보인 바와 같은 진동의 스

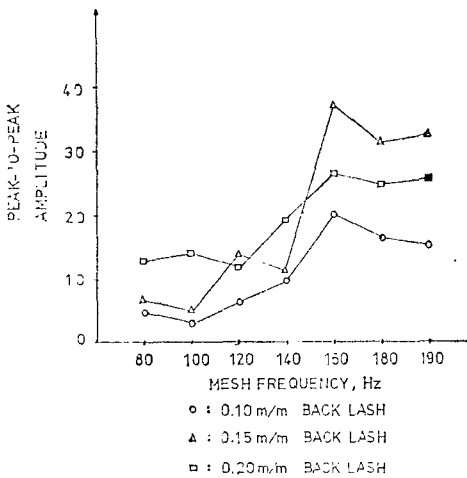


Fig. 10 1st harmonic amplitude : well-machined gear.

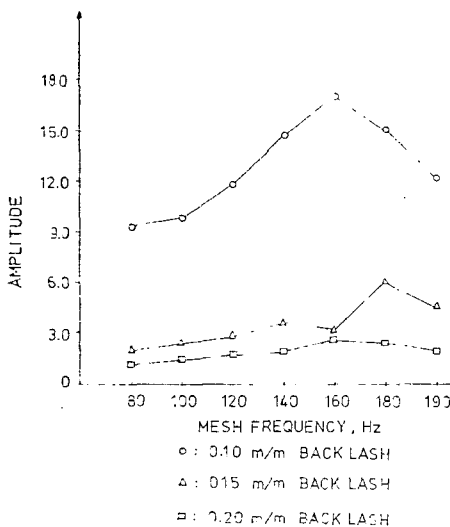


Fig. 11 1st harmonic amplitude: over-lapped gear.

펙트럼으로부터 각 하모닉 성분의 크기를 구할 수 있으며 1st 하모닉 성분의 크기를 Fig. 10과 11에 보였다. 1st 하모닉 성분은 메시주파수 160Hz 근처에서 최대값을 갖으며 메시주파수가 감소함에 따라 최소 값으로 접근함을 알 수 있다. 기어 No. 1의 경우는 백래시의 변화에 대해 1st 하모닉 성분의 크기가 크게 변하지 않고 메시주파수에 따른 경향이 백래시에 관계없이 일정한 반면 기어 No. 2의 경우 백래시가 0.15 및 0.20 m/m인 경우 백래시가 0.10m/m에 비해 20% 미만으

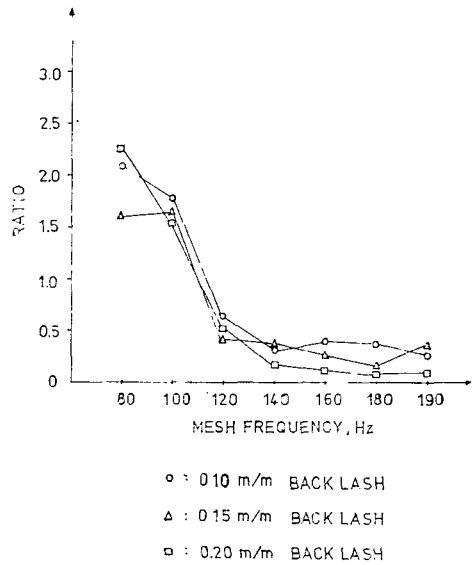


Fig. 12 1st and 2nd harmonic amplitude ratio : well-machined gear.

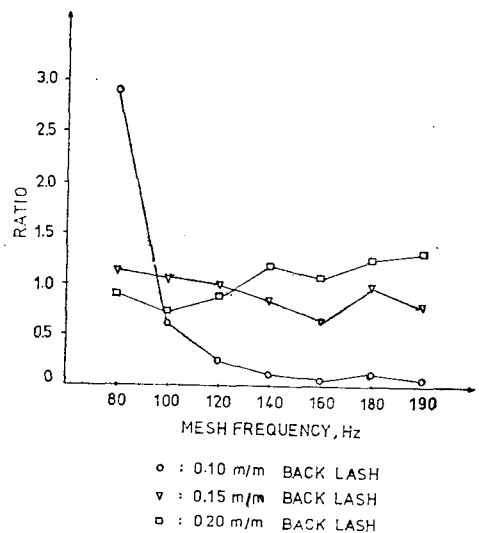


Fig. 13 1st and 2nd harmonic amplitude ratio : over-lapped gear.

로 감소함을 보인다. 이는 기어의 물림이 이의 가공형상에 직접 영향을 받고 이 특성은 1st 하모닉 성분에 직접적인 영향을 주는 것으로 판단되며 No. 2 기어의 경우 백래시가 적어짐에 따라 오우버 래핑에 의한 진동 특성이 현저하게 됨을 증명한다.

4.3. 1st와 2nd 하모닉 성분비의 변화

1st와 2nd 하모닉 성분비를 Fig. 12와 13에 보였다. No. 1 및 No. 2 기어 모두 메시 주파수가 ~130Hz 보다 클 경우 메시주파수에 관계없이 대체로 성분비가

변화하지 않음을 알 수 있고 80~100Hz 부근에서 No. 1 기어의 백래시 0.10m/m일 때의 No. 2 기어의 경우 메시주파수가 증가함에 따라 성분비가 급격하게 감소함을 알 수 있다. 즉, 이 경우는 2nd 하모닉 성분이 오히려 1st 하모닉 성분보다 크게 되며 메시주파수가 증가함에 따라 2nd 하모닉 성분이 1st 하모닉 성분의 25% 미만으로 감소하나 No. 2 기어의 경우 백래시가 0.15 및 0.20m/m인 경우는 메시주파수에 관계없이 1st 하모닉과 2nd 하모닉의 크기가 대체로 동일함을 알 수 있다.

4.4. 1st와 3rd 하모닉 성분비의 변화

Fig. 14와 Fig. 15에 보인 1st와 3rd 하모닉 성분비의 변화를 보면 No. 1 기어의 경우 ~80Hz 메시주파수를 제외한 메시 주파수 영역에서 성분비가 0~25% 미만으로 일정하게 유지되며 No. 2 기어의 경우 ~100Hz 메시주파수에서 피크를 보이며 ~130Hz 이상에서는 25~50% 정도로 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 백래시의 영향은 이 경우 크게 나타나지 않는 것이 특색이며 이 특성은 고차 하모닉의 성분비의 경우 더욱 두드러진다.⁹⁾ 이는 고차 하모닉 성분이 1st 하모닉 성분에 비해 현저하게 작아질 뿐 아니라 실험시 잡음의 영향이 고주파수 부근에서 현저하게 나타나기 때문이다.

4.5. 위상의 변화⁹⁾

시간 영역에서 트리거 시점을 기준으로 하여 각 하모닉 성분의 위상을 구할 수 있으며 실제 현저한 위상 변화를 관찰할 수 있으나⁹⁾, 정량화하는 때는 난점이 있다. 이는 위상이 유일(unique)하게 규정될 수 없기 때문이다. 따라서 각 하모닉 성분의 크기와 위상을 다루기보다는 각 하모닉 성분의 실수부와 허수부를 따로 고려하는 것이 바람직하며 효과적인 응용 방법은 연구 중이다.

5. 결론

디지털 신호분석기를 사용하여 하이포이드 기어의 진동을 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 정상기어에서 백래시 0.10m/m일 때가 백래시 0.15m/m나 0.20m/m일 때보다 진동이 적게 발생한다. 기어의 마모 현상을 고려하여 0.15m/m의 백래시를 실제로 주고 있으나 메시주파수가 높아지면 진동 현상이 크게 나타난다.

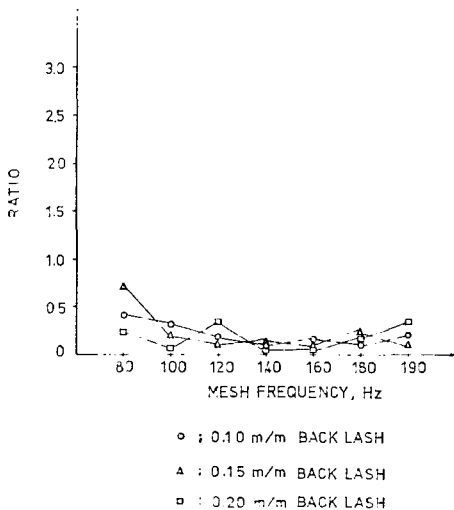


Fig. 14 1st and 3rd harmonic amplitude ratio : well-machined gear.

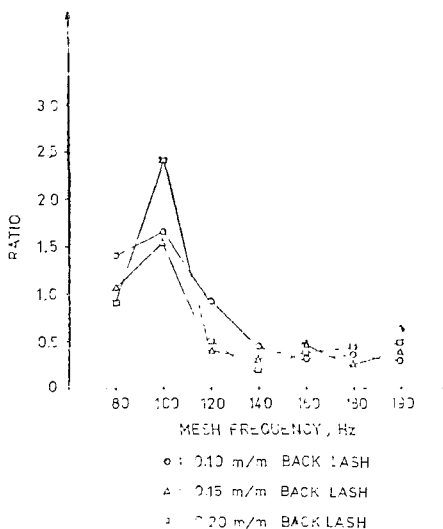


Fig. 15 1st and 3rd harmonic amplitude ratio : over-lapped gear.

2) 오우버 래핑 기어에서 백래시가 0.10m/m일 때가 백래시 0.15m/m나 0.20m/m일 때보다 진동이 크게 나타난다. 백래시가 0.10m/m일 때 $\sim 100\text{Hz}$ 와 $\sim 160\text{Hz}$ 메시주파수 부근에서 진동이 가장 크게 된다. 진폭에 의해 가공상태를 판정하기 위해서는 백래시 0.10m/m와 메시주파수 $\sim 100\text{Hz}$ 에서 기어 진동시험을 하는 것이 가장 좋다.

3) 각 메시 주파수 별로 스펙트럼상에서 1st 하모닉 성분의 크기들을 비교하여 볼 때 오우버 래핑 기어의 경우가 정상 기어의 경우에 비해 상당히 크고 백래시의 영향에 민감하나 메시주파수의 변화에는 덜 민감하게 변한다.

4) 1st와 2nd 하모닉 성분비는 메시주파수가 증가함에 따라 현저하게 감소하며 140Hz 메시주파수 이상 되면 백래시에 상관없이 0.3 미만이 된다. 단, 오우버 래핑 기어의 경우 백래시 0.15 및 0.20m/m일 때 메시주파수에 관계없이 1st 하모닉 성분과 2nd 하모닉 성분의 크기가 비슷해진다.

5) 정상 기어의 경우 메시주파수가 $\sim 100\text{Hz}$ 미만일 때 하모닉 성분의 크기가 2nd, 1st, 3rd 순으로 나타나며 메시주파수가 $\sim 110\text{Hz}$ 보다 클 때 1st 하모닉 성분만이 현저하게 나타난다. 오우버 래핑 기어의 경우 메시주파수가 $\sim 110\text{Hz}$ 미만일 때 3rd 하모닉 성분이 지배적이며 2nd 하모닉은 1st 하모닉 보다 크거나 같은 정도로 나타난다. 메시주파수 $\sim 100\text{Hz}$ 이상일 때 1st 하모닉이 지배적이며 2nd 하모닉은 1st 하모닉보다 작거나 같은 정도로 나타난다.

후 기

이 연구를 위해 기술적인 자문과 협조를 해주신 현대자동차 주식회사 기어부 한상준 부장과 박순관씨, 기어를 제공해 주신 현대자동차 주식회사에 감사의 말씀을 드립니다. 참고자료를 제공해 주신 명화 물산 기계부 이석태 부장에게도 사의를 포함합니다.

참 고 문 헌

- 1) Smith, E., "Understanding the 513 Bevel gear Test Machine," Research and Development Gleason Works
- 2) "The No. 513 Hypoid Test Machine Test Procedure and correlation analysis," Gleason Works
- 3) Lehmann, P. "A Seminar on Gear Quality Measurement," Application Test Center Gleason Works
- 4) "Understanding Tooth Contact Analysis," Gleason Works
- 5) Bendat, J.S. and Piersol, A.G., "Random Data ; analysis and measurement procedures," Wiley-international Science, 1971
- 6) Crandall, S.H. and Mark. W.P., "Random Vibration in Mechanical System," Academic Press, 1963
- 7) Han, G.J. "Geometrical Analysis and Dimensional Design of Hypoid Gears," KAIST, 1981
- 8) "Basic Geometry and Tooth Contact of Hypoid Gears," Gleason Works
- 9) 김영배, "하이포이드 기어의 진동분석," 석사학위 논문, 한국과학기술원 기계공학과, 1982.