

승강기용 웜기어의 결함에 따른 진동 특성 Vibration Characteristics of Worm Gear Faults for Elevators

이수종 · 양보석 · 이선순 · 박승태 · 손종덕

S. J. Lee, B. S. Yang, S. S. Lee, S. T. Park and J. D. Son

Key Words : Worm Gear(웜기어), Vibration Analysis(진동분석), Fault(결함), Elevator(승강기)

Abstract : According to the survey, abnormal condition of the system is the main source for interrupting an elevator service, especially faults in worm gears used for the traction machine. Worm gear is popularly used in traction machine for middle and low speed elevators. Elevators need high reliability and stability, because they are closely related to human life. Usually, traction machine is applied to drive the elevators that have height about 35 m and it is an important mechanical unit for riding quality in elevators. There are some research results about types of vibration fault for worm gear in International Association Elevator Engineers (IAEE). But this study concerns with diagnosis of various faults in elevator worm gear using vibration signal. The analysis of fault characteristics is compared with previous researches in traction machine.

1. 서 론

우리나라는 60년대 이후 도시 집중화 및 건물의 고층화가 급속히 이루어져 최근 국내 승강기의 등록 대수는 약 30만대로 세계 9위 수준이며, 향후에도 지속적으로 보급이 증가될 것으로 예상된다. 특히 아파트용 승강기는 전체 승강기의 약 2/3를 차지하고, 노인, 어린이, 주부 등의 취약한 계층이 많이 이용하고 있으나, 업무용 승강기와는 달리 유지 보수가 열악한 실정이다.

승강기는 이용자의 일상생활에 보편화된 다중 이용 시설로서, 이용자의 편익을 증진시켜 주는 반면, 고장 발생 시에 인명 사고 등 안전에 중대한 문제를 야기할 수 있는 설비이므로, 높은 안전성과 신뢰성을 확보하는 것이 무엇보다 필수적이다⁽¹⁾.

승강기의 보급 증가에 따라 이로 인한 사고가 매년 증가하는 추세에 있고, 사고로 인한 사망률은 2만 3500여 대당 1명으로 선진국에 비해 10배에 이르며, 자동차 사고율의 20배에 이르는 것으로 최근 보고되고 있다. 이러한 사고의 최대 원인은 보수 및 점검 부실이 40%를 상회하고 있고, 전형적인 후진

국형 사고의 전형을 나타내고 있다. 따라서 산업자원부는 승강기의 안전성을 확보하기 위해 2005년 7월부터 설계, 제조단계에서부터 인증 제도를 도입하고 검사 기준을 대폭 강화하도록 하고 있다.

승강기의 보수 관리 목표는 발생한 고장의 수리가 아니고, 적절한 시간에 정상적인 점검, 정비작업 등의 업무를 수행함으로써 고장과 사고를 미연에 방지할 수 있도록 하는 것이다. 따라서 철저한 정비 프로그램에 따른 비용 대비 효과적인 예방정비가 이루어져야 하나, 국내실정은 군소업체의 난립으로, 덩핑으로 인한 보수비용이 낮고, 예방정비에 대한 투자를 하지 않아 기술축적이 되지 않으며, 주로 고장 후 수리를 하는 사후정비가 실시되고 있는 실정이다⁽¹⁾.

따라서 이러한 원인으로 사용자나 관리 주체는 고장에 따른 불만만 고조되고 있으며, 특히 권상기 내에 있는 웜기어에서 발생하는 결함 토크 맥동을 일으키면, 승강기에 탑승하는 공간(car)에 큰 상하 진동이 발생하게 되어 이용자에게 불안감을 제공하며 열화 손상의 원인이 된다.

그러나 실제로 현장 점검자들은 웜기어의 결함을 파악하기가 쉽지 않고, 진동 분석기를 이용하여 분석이 가능하도록 하기 위해 웜기어의 결함주파수 유형이 2004년 IAEE에서 발표된바 있으나, 이는 실험을 통한 데이터가 아닌 IRD 책자나 다른 논문에서 발표된 평기어나 헬리컬 기어의 진동 결함주파수가

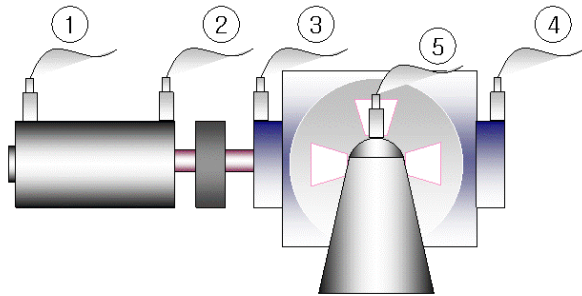
접수일 : 2007년 7월 23일, 채택확정 : 2007년 9월 12일
이수종(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : sjlee@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1594
양보석, 손종덕 : 부경대학교 기계공학부
이선순, 박승태 : 한국승강기안전기술원

워기어에도 동일하게 나타날 것이라는 추측에 의해 작성된 것으로 판단된다^(2~5).

따라서 본 논문에서는 워기어 형의 권상기에 임의로 결함들을 발생시켜 진동을 측정 및 분석을 하였고, 향후에는 금번 실험에서 획득된 결함 진단 데이터를 이용하여 자동 결함 진단이 가능하도록 권상기 결함진단 시스템을 구축하고자 한다.

2. 실험 방법

측정 장비는 RTfocus (Dactron 사)를 사용하였으며, 진동신호를 측정하였다. 최대 측정주파수는 3,200 Hz이며, B&K사의 가속도 센서(감도 : 100 mV/g)를 사용하였다. 권상기 및 감속기의 진동 측정위치는 Fig. 1과 같으며, 측정방향은 Fig. 2와 같이 수직, 수평 및 축 방향을 측정하였다. 측정조건으로는 승강기를 상승 및 하강 운동을 하면서 각 결함별로 진동가속도를 측정하였다⁽⁶⁾.



번호	측정 위치
1	전동기 반부하(NDE)
2	전동기 부하(DE)
3	감속기 부하(DE)
4	감속기 반부하(NDE)
5	권상기 출력축

Fig. 1 Vibration measurement position

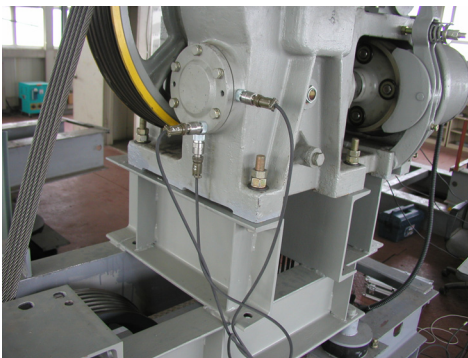


Fig. 2 Vibration measurement for traction machine

Table 1은 실험에 사용된 권상기의 주요 사양이며, 사용된 워기어는 2줄 나사이다. 실험 시료는 Table 2와 같은 조건에 의거하여 제작하였다. 일반적으로 가장 발생하기 쉬운 결함형태인 정렬불량은 전동기 축의 연결부에 심(shim)을 삽입하여 측정하였고, 백래시(backlash)와 취합 위치는 일반적으로 조립 시 오차가 발생하여 진동 결함을 발생시키기 용이하였으며, 기어 이 절단과 마모(wear)는 사용 중에 발생할 수 있는 결함이기 때문에 제작을 하여 실험을 실시하였다.

Table 1 Specification of traction machine

전동기	
용량	15 kW
교류주파수	50 Hz
전압	340 V
극수	4 P
정격(Rating)	2/53
전류	33.4 A
회전속도	1450 rpm (24.2 Hz)

Table 2 Fault conditions

순번	구분	조건
1	정상	Alignment 정상
		Backlash 정상
		취합 위치 정상
2	전동기 측정렬불량	5/100
3	Backlash (기준: 0.2mm)	+ 방향 (0.5 mm)
- 방향 (0.05 mm)		
5	치합 위치	쏠림
6	이 절단	1개소
7	마모(wear)	40%

Fig. 3은 백래시를 조절하기 위하여 다이얼게이지를 이용하여 간격을 맞추는 장면이며, Fig. 4는 마모 실험을 하기 위하여 워 휠의 이를 호빙머신을 이용하여 가공함으로써 워 휠의 이가 마모되어 얇아진 형태를 보여주고 있고, Fig. 5는 기어 이 1개가 절단된 것을 나타낸다.

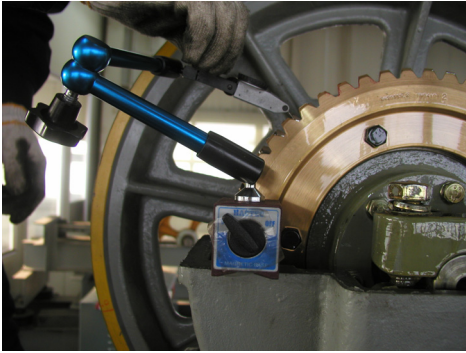


Fig. 3 Adjustment of backlash

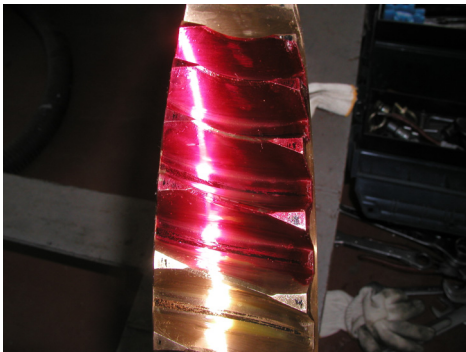


Fig. 4 Gear tooth wear



Fig. 5 Broken gear teeth

3. 기어결합 주파수 유형

결합 분석에 앞서 기존 자료(IAEE, 2004)에 제시되어 있는 기어의 결합 패턴에 대해 요약하여 정리한다. 먼저 기어의 결합주파수를 구하기 위해서 진동 분석 시에 사용되는 결합주파수를 구하는 공식을 먼저 알아보면, 기어는 기어 축의 회전속도와 기어 이의 개수에 의하여 기어의 결합주파수를 대표하는 기어 맞물림 주파수(GMF, gear mesh frequency)를 식 (1)과 같이 구할 수 있다. 따라서 기어 맞물림 주파수를 구하는 식은 일반적인 평 기어나 헬리컬 기어의 경우에도 동일하게 적용할 수

있다.

$$GMF = f_r \times N_g \text{ (Hz)} \quad (1)$$

여기서 f_r 은 회전주파수(Hz), N_g 는 기어 이수로 2줄 나사의 경우에는 워 축의 이수는 2개가 된다.

또한 일반적으로 기어에서 발생할 수 있는 결합 종류에 따라 나타나는 결합주파수는 Fig. 6과 같은 형태의 주파수 패턴을 가지는 것으로 알려져 있다.

3.1 정상 상태

기어가 정상 상태일 때는 Fig. 6(a)와 같이, 피니언과 기어의 운전주파수(1X)와 이의 조화성분(2X, 3X 등) 그리고 GMF와 그 주변에 회전주파수의 측대파(sideband) 성분이 발생하며, 이들 주파수 성분의 진폭은 비교적 작고, 기어의 고유진동수 성분은 발생하지 않는다.

3.2 기어 편심과 백래시

중중 GMF뿐만 아니라 고유진동수(f_n) 주위에서도 높은 진폭의 측대파 성분들이 발생하며, 이는 기어 편심, 백래시 또는 비평형 축의 증상을 나타낸다.

3.3 기어 이 부하 증가

정상상태와 유사한 증상을 보이나 GMF의 진폭이 부하증가와 함께 증가하며, 일반적으로 GMF는 부하에 민감하다. 특히 측대파의 크기가 작고 기어의 공진주파수가 가진되지 않으면서 단지 GMF 진폭이 높은 경우는 문제의 발생을 의미하는 것은 아니다.

3.4 기어 이 파손

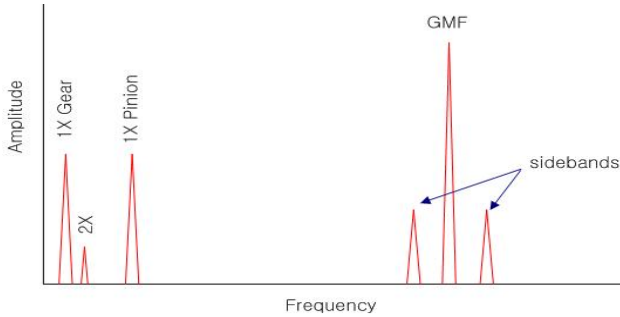
시간과형에서 가장 잘 관측되며, 부러진 이가 충돌하면서 발생하는 충격파형이 나타난다. 충격파형 사이의 시간은 $\{1/(\text{문제를 가진 기어의 속도})\}$ 로 나타난다. 기어의 상태가 좋지 않은 경우에는 기어의 1X성분에서 높은 진동이 발생한다. 기어 공진주파수가 발생하며 회전속도가 측대파로 발생한다.

3.5 정렬불량

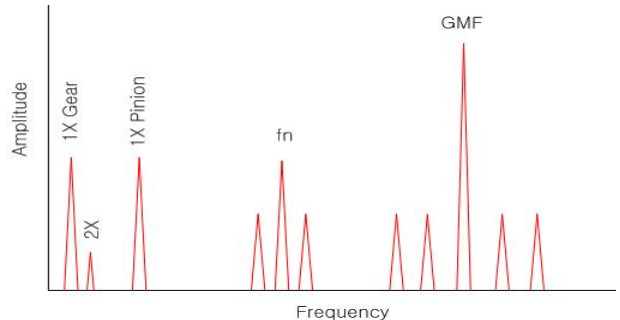
GMF의 2차 또는 고차 조화성분이 발생하며, 그 주위에 회전주파수가 측대파로 발생한다. 보통 1차 GMF보다 2차 및 3차 GMF의 진폭이 더욱 크다.

3.6 기어 이 마모

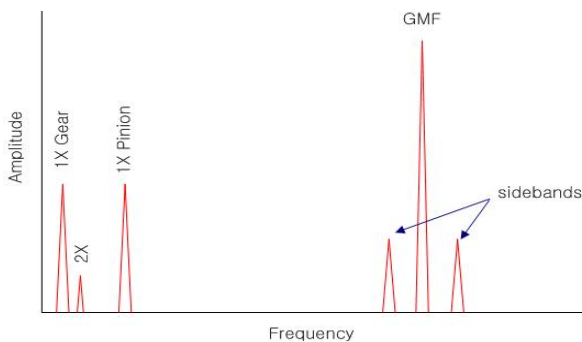
이 문제의 주요한 특징은 기어 고유진동수 성분의 발생이며, 상태가 좋지 않은 기어의 회전주파수가 측대파로 발생한다. 마모가 눈으로 확인이 가능하고, GMF 주위의 높은 측대파의 진폭이 발생할지라도 GMF의 진폭은 변하지 않을 수도 있다.



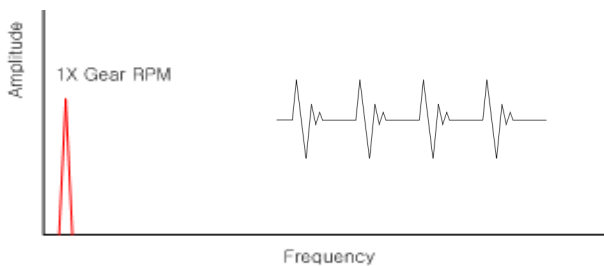
(a) Normal condition



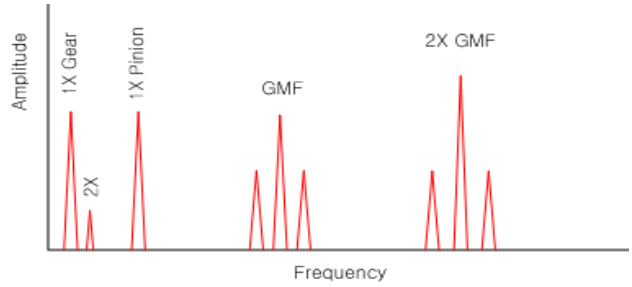
(b) Backlash and eccentricity



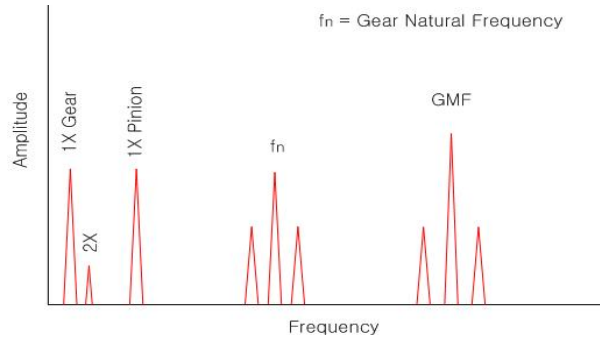
(c) Tooth load



(d) Broken gear tooth



(e) Misalignment



(f) Gear tooth wear

Fig. 6 Symptom frequency for each fault condition

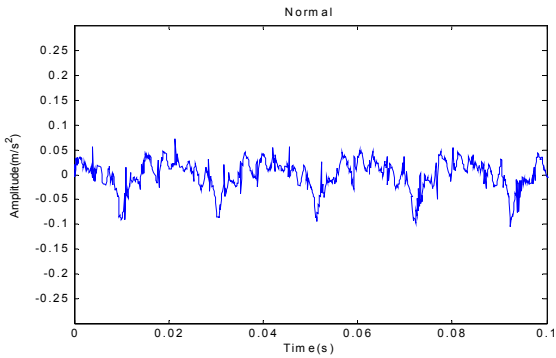
4. 실험 결과 및 고찰

워 기어는 승강기의 성능(속도 및 출력)에 대응하여 1줄, 2줄 및 3줄 나사가 일반적으로 사용되며, 아파트용 승강기나 중층형 승강기에는 일반적으로 2줄 나사가 많이 사용된다.

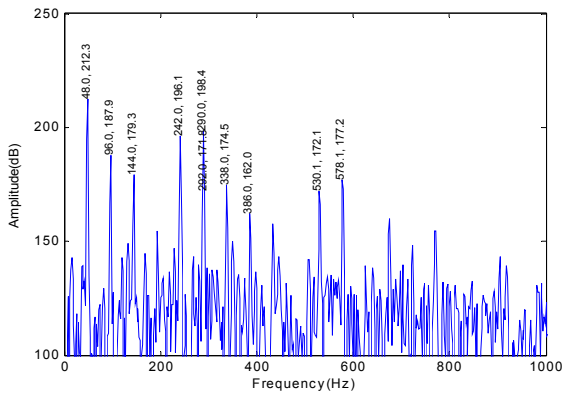
그러나 2줄 나사 워기어의 사용으로 인해 케이지에서 공진이 발생하는 현상이 가장 많이 발생한다. 따라서 공진 발생 시 기어의 결함에 의해 그 영향이 더욱 증폭될 수 있기 때문에, 각 결함에 대해 측정된 진동가속도의 시간응답파형과 이의 주파수 분석을 통한 주파수 스펙트럼을 이용한 다음의 진동분석⁶⁾을 통해 기어 결함에 따른 실질적인 진동 결함 패턴을 파악하고자 한다.

4.1 정상 상태

승강기 상승 시의 가속도 응답을 Fig. 7에 보인다. 그림 (a)의 시간파형은 0.02 s의 주기성을 보이고 있으나, 정확하게 그 특성을 파악하기 어렵다. 그러나 이를 주파수 분석한 스펙트럼인 그림 (b)를 보면, 탁월성분으로 GMF 성분인 48.3 Hz(= 1450/60×2)와 2차 및 3차 조화성분인 96 Hz와 144 Hz들이 발생하고 있으나, 2차 GMF성분은 상대적으로 작게 나타나고 있으며, 진동 값 또한 전체적으로 작다.

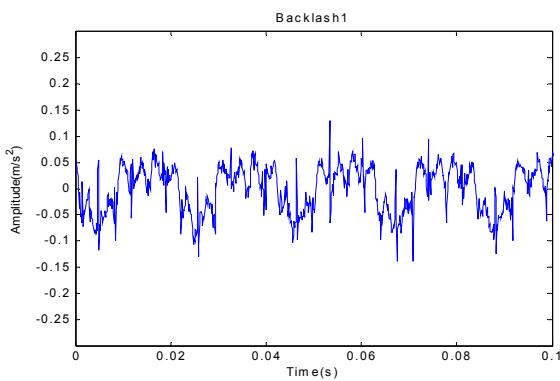


(a) Time waveform

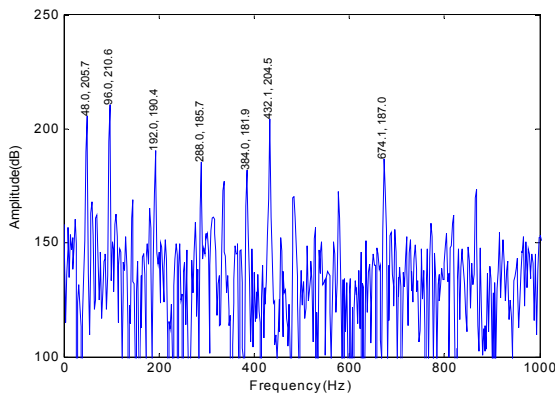


(b) Frequency spectrum

Fig. 7 Normal condition (Speed-up)



(a) Time waveform



(b) Frequency spectrum

Fig. 8 Gear backlash (speed-up)

4.2 백래시 (+ 0.5 mm)

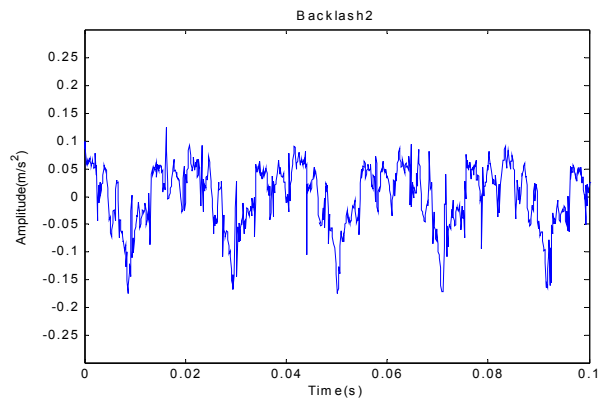
백래시가 비교적 큰 경우인 Fig. 8를 보면, GMF와 조화성분들이 발생하고 있으나, 정상상태에 비해 3차 조화 성분의 진폭이 11 dB 감소하고, GMF 1차 성분이 정상상태에 비해서는 작지만 3차 조화 성분과 비교해볼 때 상대적으로 1차 성분이 증가하고 있다. 백래시의 증가에 따라 기어 이에 작용하는 부하가 증가하는 것에 기인되는 것으로 판단된다.

4.3 백래시 (+ 0.05mm)

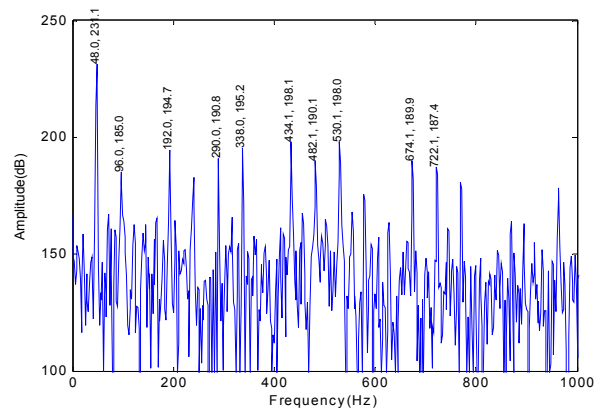
Fig. 9은 백래시가 +0.05 mm인 경우를 나타낸다. 백래시의 양이 미소하여 정상상태와 유사한 형태를 나타내지만, GMF의 2차 조화성분이 23 dB 증가하며, 정상상태와 치수 차이가 크지 않기 때문에 진동 결합 패턴이 거의 동일하다.

4.4 마모 및 전동기 정렬불량

Fig. 10은 기어 이에 마모와 전동기에 정렬불량이 동시에 있는 경우의 시간파형과 주파수 스펙트럼을 나타낸다. 정렬 불량에 따라서 GMF와 함께 2차는

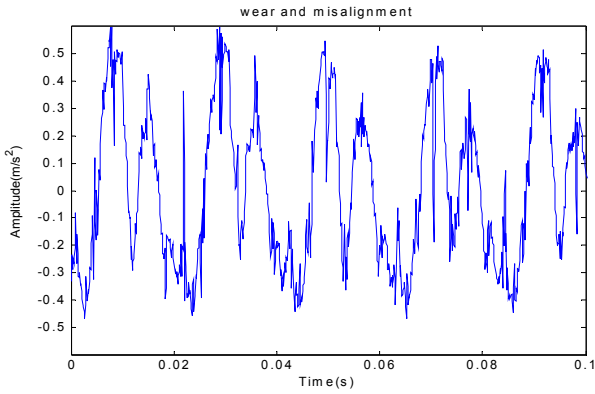


(a) Time waveform

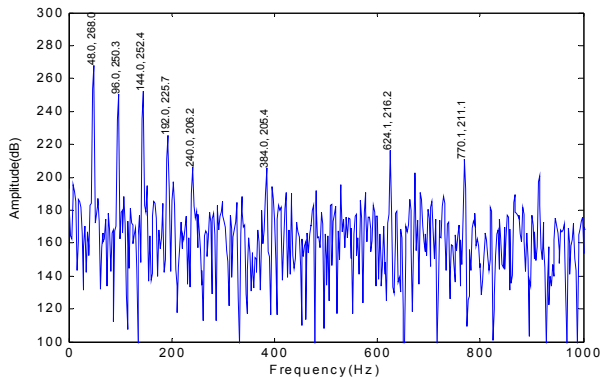


(b) Frequency spectrum

Fig. 9 Gear backlash 2 (speed-up)



(a) Time waveform



(b) Frequency spectrum

Fig. 10 Wear and misalignment (speed-up)

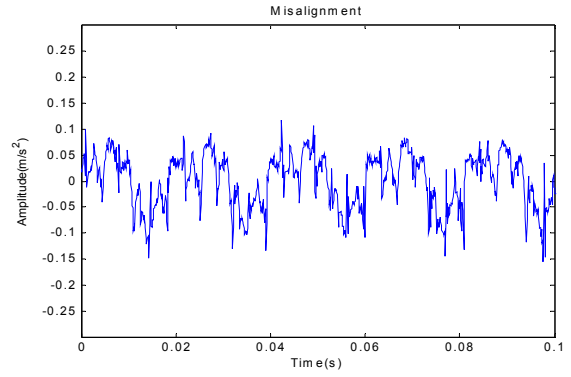
및 3차 조화성분의 진동이 각각 크게 62 dB, 72 dB 증가하고 있다.

4.5 취합위치 조정: 슐림현상(정렬불량 및 부하 증가)

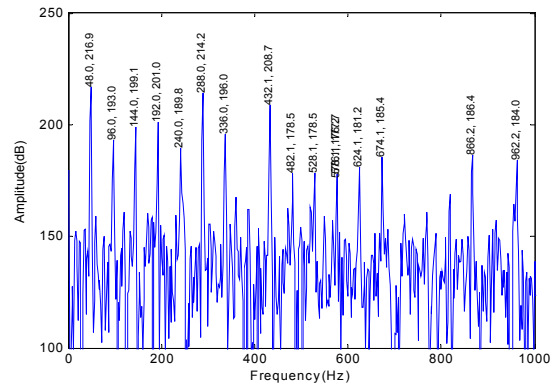
슐림으로 인하여 이에 작용하는 부하가 증가하여 GMF 성분의 진폭이 조화성분들에 비해서 상대적으로 크게 나타나고 있다. 취합 위치의 조정이 미치는 영향은 기어 이에 편향되게 부하를 가하는 역할을 할 뿐만 아니라, 정렬을 틀어지게 하는 정렬불량의 역할을 하게 되기 때문에 1, 2차 GMF가 각각 5 dB씩 증가하였다.

4.6 기어 이 1개 절손

Fig. 12은 1개의 기어 이가 절손되었을 때의 진동 특성을 나타낸다. 기어 이의 절손 역시 절손된 워휠에서 질량 불평형 진동을 일으키게 되며, 아울러 워축에 부하가 증가하게 되어 진동이 전반적으로 매우 커지도록 한다. 이에 따라 GMF와 이의 고차 조화성분들의 진폭이 크게 증가하는 현상을 보이고

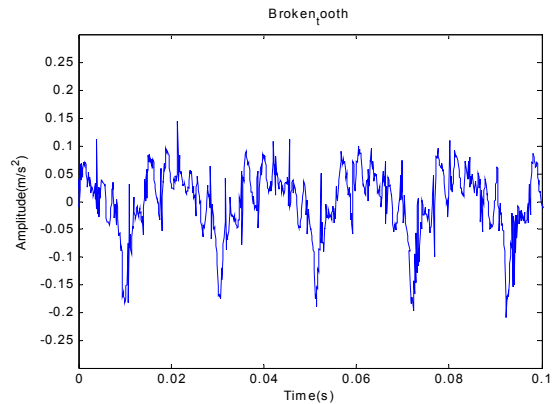


(a) Time waveform

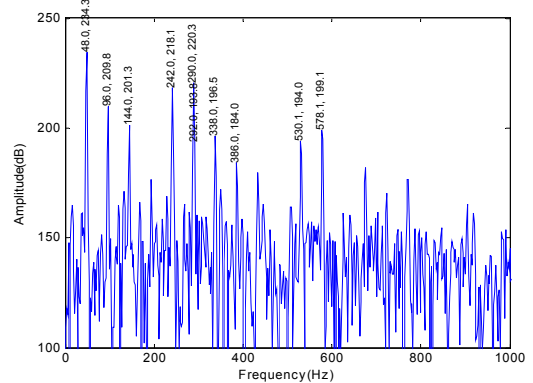


(b) Frequency spectrum

Fig. 11 Misalignment (speed-up)



(a) Time waveform



(b) Frequency spectrum

Fig. 12 Broken gear tooth

있다. 또한 진동은 증가하는 형태이나 다른 기어 결합유형에서 볼 수 있는 충격파에 의한 진동은 워기어 구조가 이가 맞물리기보다는 스쳐지나가는 형태이고, 워기어의 회전속도 자체가 아주 느리기 때문에 충격파의 영향이 적게 나타나는 것으로 생각된다.

5. 결 론

워기어의 결합에 따른 진동특성은 일반적인 평기어와 조금 다른 패턴을 보여주고 있다. 주된 특징으로는 워 휠의 회전속도(약 1 Hz)가 매우 낮기 때문에 진폭의 크기가 크지 않으며, 분해능의 정도에 따라 측대파가 명확하게 표현이 되지 않는다. 따라서 백래시나 정렬불량 시에 발생하는 측대파의 영향이 거의 없는 것으로 판단된다.

각 결합 발생 시 진동패턴은 백래시가 좋지 않을 때는 전형적으로 일반적인 기계의 정렬불량 형태인 1차 GMF 성분이 증가하지만 전체 진동은 크게 증가하지 않는 양상을 보였으며, 그 외 마모, 기어 이의 쓸림 현상 및 정렬불량, 기어이 절손은 GMF 성분 자체가 커지면서 진동의 크기가 증가하는 형태가 나타나고 있다. 결국 백래시와 기어 쓸림현상은 기어의 기본적인 조립상태에 관련되며, 이의 접촉 위치와 관련되기 때문에 기본적인 맞물림의 영향으로 본 실험에서는 큰 진동의 영향을 주지는 않는다. 그 외의 결합은 기어 이의 부하가 증가하게 되어 진동을 증가시키는 원인으로 판단된다. 하지만 일반적인 승강기용 권상기에서 발생할 수 있는 진동은 백래시와 기어의 쓸림 현상이기 때문에 항상 기본적인 진동결합 성분으로 작용하게 되며, 이러한 성분에 의해 다른 결합으로 진행될 수 있고, 공진 시 승차감에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

향후 마모와 쓸림현상이 동시에 발생하였을 때의 진동 패턴에 대해서 조사할 예정이며, 카 내의 승차감 측정 시 미치는 영향에 대해서도 금번 실험 유형과 동일한 결합을 가지고 시험하여 승객에게 미치는 영향을 평가할 예정이다. 아울러 전동기 결합 및 베어링 결합에 대한 진동 데이터를 이용하여 권상기의 결합 상태를 자동으로 진단할 수 있는 권상기 결합진단 시스템을 연구하여 실제 승강기에 적용할 수 있는 시스템을 구축할 예정이다.

Table 2 Amplitudes of fault frequency

Frequency (Hz)	48 (1X)	96 (2X)	144 (3X)	192 (4X)	242 (5X)	290 (6X)	338 (7X)	432 (9X)	482 (10X)	
크기 (dB)	Normal	212.3	187	201.3	176.5	216.2	220.4	196.5	179.7	-
	Backlash 1	231.2	185	-	194.7	182.9	190.8	195.3	198.2	190.1
	Backlash 2	205.7	210.6	168.9	190.4	-	185.8	177	202.2	170.1
	Misalignment	217	193.1	199.2	201.1	189.8	214.3	196	205.4	178.5
	Wear and misalignment	268	250.3	252.4	225.7	206.3	-	205.5	-	-
	Broken gear tooth	234.3	209.9	196.6	-	218.1	220.4	196.5	179.7	-

사 사

이 논문은 2006학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 이선순, 송지태, 양보석, 2000, “엘리베이터용 유도전동기의 결합진단” 한국승강기공학회 학술대회논문집.
2. 牧修市 저, 양보석 역, 1999, “진동법에 의한 설비진단의 실제”.
3. Lorenzo Vila, et al. “Diagnosis of Vibration Problems in Elevator Worm Gears using Advanced Signal Processing Techniques”, Proceedings of ELEVCON. pp. 299~306
4. J.E. Berry, “Advanced Training Analysis I, II, III”, IRD
5. Vibration Consultants Inc., 1990, “The Vibration Analysis Handbook”, VCI.
6. 양보석, 2006, “기계설비의 진동상태감시 및 진단,” 인터뷰전.
7. 김용한, 하종룡, 이재갑, 김선화, 양보석, 2007, 영구자석형 직류전동기축계의 유한요소모델 개선과 진동해석, 한국동력기계공학회지, 11권 1호, pp. 20~27.