<응용논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.5.537 ISSN 1226-4873

감속기 내부 기어의 가공정밀도와 구동간 소음의 연관특성에 관한 연구§

박성필* · 김우형* · 정진태*†
* 한양대학교 기계공학과

Analysis of the Relation Between Machining Accuracy of Internal Gear and Noise in Reduction Gears

Sung Pil Park*, Woo Hyung Kim* and Jin Tai Chung*†
* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,

(Received January 8, 2010; Revised March 15, 2012; Accepted March 15, 2012)

Key Words: Gear Machining Accuracy(기어가공정밀도), Reduction Gear Noise(감속기소음), Run-Out Deviation(런아웃 오차), Gear Mesh Frequency(기어물림주파수)

초록: 본 연구는 운전조건 하에서 감속기 내부기어의 가공정밀도와 소음의 연관 특성에 관한 실험적 연구이다. 이를 위하여 유성기어열로 이루어진 감속기를 제작하였으며, 내부 기어는 정밀도를 다르게 가공한 기어로서 4 세트를 제작하여 비교 실험하였다. 감속기에 대한 소음 및 진동 신호는 신호분석법에 의해 채집되었으며, 정지상태로부터 운전 가능 최고 속도까지 균등하게 증속하며 신호를 채집하였다. 또한 소음 레벨은 소음계를 이용하여 측정하여 비교하였다. 기어의 가공정밀도에 대한 평가는 한국 산업기술시험원(ktl)에 의뢰하여 일본공업규격(JIS)에 준하여 객관적으로 평가되었으며, 이를 소음, 진동 신호와 함께 비교 분석하였다.

Abstract: In this study, we experimentally investigate a noise mechanism related to the machining accuracy of the reducer in the driving state. We fabricate a planetary reducer and four types of gears for use in the planetary reducer. We use signal analysis to determine the noise and vibration of the reducer at different motor speeds; the motor speed is increased from 0 rpm to the maximum speed in a stepwise manner. In addition, we obtain the sound level by using a sound level meter. The machining accuracy of gears is evaluated by public organizations, Korea Testing Laboratory (KTL), on the basis of the Japanese Industrial Standard (JIS). We analyze and compare the results with the noise and vibration of the reducer.

- 기호설명 -

ω : 모터 회전 속도 (rpm)
ω_s : Sun-gear 의 회전 속도(rpm)
ω_c : Carrier 의 회전 속도(rpm)
ω_p : Planet-gear 의 회전 속도(rpm)
ω_r : Ring-gear 의 회전 속도(rpm)
N_s : Sun-gear 의 잇 수(개)
N_p : Planet-gear 의 잇 수(개)
N_r : Ring-gear 의 잇 수(개)
GMF : 기어물림주파수(Hz)

§ 이 논문은 대한기계학회 2009 년도 추계학술대회(2009. 11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임
† Corresponding Author, jchung@hanyang.ac.kr
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

본 연구는 기어가공정밀도가 감속기 구동 소음에 미치는 영향에 대한 분석을 목적으로 한다. 감속기는 둘 이상으로 이루어진 기어열로서 모터로부터의 회전력을 전달하면서 회전속도를 감속시키고 회전 토크를 증대시키는 장치이다. 오늘날 감속기는 산업용으로서 가솔린· 디젤 자동차, 산업용 로봇, 자동화 장비, 농업기계, 철도, 선박 등 전

반적인 분야에 많이 사용 된다. 또한 감속기는 전 세계적으로 환경 보호를 위해 집중적으로 개발되는 전기자동차 또는 하이브리드자동차의 모터와 직접적으로 연결되어 모터의 동력을 전달하는 중요한 기계 요소로서 사용된다. 뿐만 아니라, 프린터 등과 같은 저소음 저진동이 요구되는 실생활에 근접해 있는 기계류에도 널리 사용된다.

근래에는 고정밀, 고부하 그리고 고감속비를 구현함과 동시에 저진동 저소음을 발생하는 감속기의 개발이 많이 이루어지고 있다. 감속기는 원하는 출력을 얻기 위하여 모터로부터 고속의 회전을 전달 받는다. 그러므로 감속기 역시 고속회전을 하게 되며, 이에 따라 감속기 내부 기어열에서 큰 진동과 소음이 유발된다. 감속기에서 발생하는 진동과 소음은 산업적 관점으로 볼 때 구동 성능 및 내구성 저하에 큰 영향을 주게 되며, 가정용과 같은 실생활 관점으로 보면 제품의 안락함과 정숙성에 주된 영향을 주게 된다. 따라서 산업적 측면과 함께 실용적으로도 저진동 저소음 감속기의 개발이 절실하다.

감속기에서 유발되는 진동 및 소음의 원인으로서 치의 물림강성, 형상오차, 또는 백래쉬 등에 관한 학술적인 연구가 주로 이루어졌다.[1] 본 연구에서는 학문적인 연구가 아닌 실제 현장 실무자들이나 실사용자들이 기어를 직접 가공 의뢰하였을 때, 기어와 함께 수령하는 기어가공성적서에 명시되는 기준 등급에 대하여 소음과 비교 분석하였다. 가공성적서는 JIS(일본공업규격)나 ISO(국제표준규격) 등에서 제시한 기어가공오차에 대한 규격을 기준으로 하여 각종 오차값과 그에 따른 등급을 표기하고 있다.[2] 본 연구는 이들 가공오차들이 구동 간 발생하는 소음에 미치는 연관 특성을 분석하고 또한 주된 원인이 되는 오차를 찾는 것을 목적으로 한다.

Table 1 Specification of the internal gears

The Number of teeth	Sun-gear	15
	1st Planet-gear	21
	2nd Planet-gear	15
	Ring-gear	90
Reduction ratio		9.4:1
Tooth profile		Involute

2. 감속기 설계 및 제작

2.1 감속기 설계

본 연구의 목적을 달성하기 위해서, 실험 대상이 되는 감속기를 설계하고 일반기어가공업체에 기어 가공을 의뢰하였다. 실험대상 감속기는 산업용 로봇 등과 같은 고정밀용으로서 널리 사용되는 2 단 유성기어감속기를 설계하였다.

설계된 감속기의 내부 개념도와 실제 제작을 위한 3D CAD Tool 로서 감속기를 형상화한 것을 Fig. 1 과 Fig. 2 에 각각 나타내었다. 감속기의 링 기어(Ring-gear)는 하우징에 고정되며, 입력축(Input-shaft)은 모터와 커플링으로서 연결되어 회전력을 전달받는다. 또한 태양기어(Sun-gear)는 입력축에 고정되어 동일한 회전속도를 가지며 감속기 내부로 동력을 전달한다. 모터로부터 발생하는 회전속도는 태양기어와 1 단 유성기어(Planet-gear)로 이루어진 1 단 감속부를 통해 1 차 감속이 이루어지며, 이후 2 단 유성기어와 링기어로 이루어진 2 단 감속부를 통하며 추가 감속이 이루어진다. 이러한 감속과정을 거치면서 증대된 회전 토크는 2 단 유성기어와 연결된 캐리어(Carrier)를 통해 출력축(Output Shaft)로 전달된다. 내부기어의 치형은 가장 대표적으로 사용되는 인벌류트 치형을 사용하였으며, 내부 기어에 대한 상세 제원은 Table 1 에

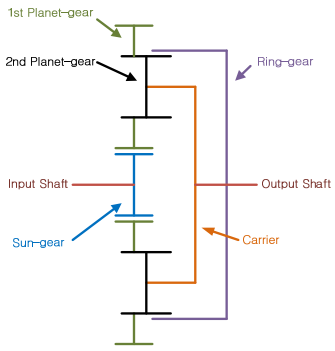

Fig. 1 Schematic diagram of the internal gears

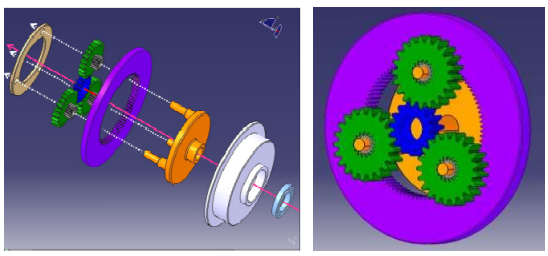

Fig. 2 Designed reduction-gear set by using the 3D CAD modeling program

Fig. 3 Made-to-measure reduction-gear set

나타내었다. 또한 실제 제작된 감속기의 내부모습은 Fig. 3 과 같다.

2.2 감속기 제작

기어의 가공정밀도에 따른 소음 특성을 분석하기 위해서는 둘 이상의 가공정밀도를 달리한 내부 기어열이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 가공업체 내에서 측정되는 가공등급에 따라 4 종의 기어열을 제작하였다. 이외의 기계 요소인 베어링, 하우징, 캐리어 등은 모두 동일 조건으로 하며 오직 내부 기어열만을 달리하여 제작 시험하였다.

2.3 기어물림주파수 분석

본 연구는 감속기 가공정밀도와 구동 간의 소음의 연관특성에 대한 연구가 목적이기 때문에 감속기 자체의 구조적 공진은 본 연구의 방해 요소가 될 것이다. 따라서 이러한 감속기 공진에 대해 회피 조건하에서 실험이 이루어져야 할 것이다. 감속기의 공진은 구조물의 고유진동수와 축의 회전성분 및 각 감속부의 기어물림주파수와 중첩으로 이루어 질 수 있다. 공진 회피 조건을 얻기 위해 먼저 각 축의 회전 성분 및 각 감속부의 기어물림주파수를 이론적으로 분석하였다. 먼저 축의 회전성분 주파수가 다음의 널리 알려진 계산식[3]에 의해서 계산되었다.

$$\omega_c = \frac{\omega_s + \left(\frac{N_r}{N_s}\right)\omega_r}{1+\frac{N_r}{N_s}} \tag{1}$$

$$\omega_p = \left(1+\frac{N_s}{N_p}\right)\omega_c - \left(\frac{N_s}{N_p}\right)\omega_s \tag{2}$$

링기어는 고정이며, 태양기어는 모터의 회전 속도와 같은 속도를 가지게 된다. 이를 식 (1)과 식 (2)에 대입하여 캐리어와 각 유성기어의 회전속도를 계산하였다. 이후 1 단 및 2 단 감속부의 기어물림주파수는 각 기어 및 캐리어의 회전 속도를 다음의 식 (3)에 대입하여 계산되었다. 그 결과는 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 rotating speed of each shaft and gear-mesh frequency of each reduction part

Element.		Rotating speed	GMF
Motor(input)		ω	-
1st reduction part	Sun-gear	ω	13.4 ω
	1st Planet-gear	0.5 ω	
2nd reduction part	2nd Planet-gear	0.5 ω	9.6 ω
	Ring-gear	0	
Carrier(output)		ω /9.4	-

Fig. 4 Reduction-gear and motor setup for experiment

$$GMF = \left|\left(\omega_p - \omega_c\right)\right| N_p \tag{3}$$

이렇게 계산된 결과는 실험으로 측정된 감속기 고유진동수와의 중첩여부가 검토 되었다.

3. 감속기 진동 소음 실험 및 결과 고찰

3.1 실험방법

감속기의 진동 소음 측정은 무부하 조건으로서 이루어졌으며, 자유단의 조건으로 지면에 스펀지를 놓고 그 위에 감속기와 모터를 올린 상태로 이루어졌다. 감속기는 외부 하우징을 제작하여 내부 기어열을 보호하도록 하였다. 아래의 Fig. 4 는 감속기의 설치 모습를 보여준다.

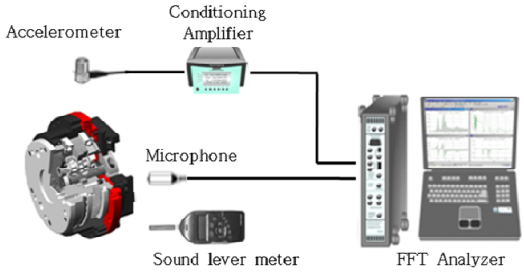

Fig. 5 Experimental setup for vibration and noise signal analysis

측정되는 실험값은 감속기의 진동 소음 신호 및 발생하는 소음에 대한 레벨값이며, 모터의 정지 상태에서 최고 속도까지 0~5000 rpm 까지 200 rpm 간격으로 증속하며 2 회에 걸쳐 반복실험을 수행하였다. 측정 장비로서 진동신호의 채집은 모터와 감속기에 가속도계(B&K 4383)를 부착하여 측정하였으며 소음신호 채집은 마이크로폰(B&K 4190)을 감속기로부터 1m 떨어진 위치에 설치하여 측정하였다. 소음 레벨은 마이크로폰과 같은 위치에 소음계(Larson Davis)를 이용하였으며, A-weighting 을 사용하여 dBA 값을 측정하였다. 진동 소음 신호에 대한 주파수 분석은 주파수분석기(B&K 3190)를 이용하여 6400Hz 까지 분석하였다. 위의 Fig. 5 는 실험장치의 구성을 보여준다.

3.2 실험 결과 및 고찰

Fig. 6 과 Fig. 7 은 측정된 진동 및 소음 신호를 구동 속도와 함께 나타낸 결과이다. 진동 신호는 살펴보면, 모터에서의 입력 회전 속도 성분에 의한 진동량을 가장 큰 값을 가지고 있으며 또한 1 단 감속부의 기어물림주파수가 비교적 크게 나타났다. 상대적으로 회전 속도가 느린 2 단 감속부의 기어물림주파수는 진동 및 소음이 적어 두드러지게 나타나지 않았다. 또한 3800Hz 부근에서 감속기의 고유진동수로 보이는 진동 성분이 나타나고 있음을 알 수 있으나, 기어물림주파수와 고유진동수는 감속기 구동 조건인 0~5000 rpm 하에서는 두 성분이 중첩되지 않는 결과를 나타내었다. 따라서 대상 감속기는 본 연구에 목적에 알맞다고 할 수 있다. 또한 소음 신호를 살펴 보았을 때 역시 두 성분의 중첩에 의한 소음량의 증가는 나타나지 않아 공진으로 인한 소음 증가는 없는 것을 알 수 있다. 두 그림에서 살펴볼 수 있듯이, 감속기에서 나타나는 진동 및 소음은 감속기의 회전성분과 1 단 감속부의 기어물림주파수가 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있다.

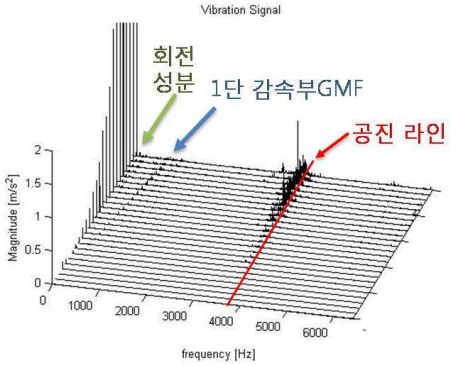

Fig. 6 Waterfall plot of the vibration signal

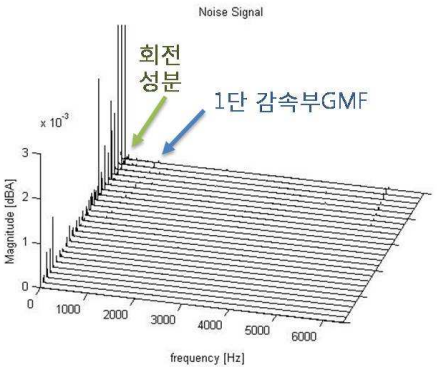

Fig. 7 Waterfall plot of the noise signal

4. 기어 가공정밀도와 측정

4.1 기어 가공정밀 오차

감속기 소음에 대한 기어 가공 정밀도의 영향을 분석하기 위해서 기어의 가공 오차에 대한 분석이 필요하다. 기어의 가공 정밀도로서 측정되는 가공 오차는 다음 4 가지가 대표적이다.[4]

① 치형 오차(Profile deviation)

기어의 설계 치형이 인벌류트 치형일 경우, 가공된 기어의 치형 곡선이 설계상의 이상적인 인벌류트 치형 곡선으로부터 얼마나 벗어 낫는지에 대한 오차로써 치뿌리부에서 치끝까지의 곡선을 측정하여 결과를 얻는다.

② 잇줄 오차(Helix deviation)

평기어의 경우, 기어의 잇줄이 기어 축과 평행한 방향을 가지게 설계 된다. 하지만 실제 가공된 기어는 축과 평행하지 못하여 평기어가 헬리컬 기어와 같이 비스듬하게 놓이게 된다. 이것에 대한 측정은 기어 치에서 피치원이 지나가는 부분으로 생각되는 치의 중간부분에서 측정되며, 설계상의 잇줄과 실제 치의 잇줄과의 차이를 측정하여 그 오차값을 얻는다.

③ 피치 오차(Pitch deviation)

기어 가공에 있어서 치 가공은 호브를 이용하여 미리 가공된 원판을 회전시키면서 절삭하여 가공된다. 즉 회전을 반복하면서 호브를 이용해 가공한다. 호브반이라 불리는 절삭기의 가공상의 오차로 인해 원판을 정확히 회전시키지 않으면 치의 두께가 두꺼워지거나 때로는 얇게 가공이 된다. 피치 오차는 설계상의 치 두께와 실제 가공된 치 두께의 오차를 측정하며 잇줄 오차와 마찬가지고 치의 중간부분에서 각각의 이를 측정한다.

④ 런아웃 오차(Run-out deviation)

기어는 하나의 축을 가지고 회전을 하며 다른 기어와 맞물려서 회전을 하며 동력을 전달한다. 그리고 각 기어는 한 점을 기준으로 하여 동심원을 이루게 되어 있다. 하지만 실제 가공된 기어는 중심점에 대하여 이상적인 동심원을 가지지 못하여 각각의 기어마다 형상이 미묘하게 다르게 된다. 런아웃 오차는 실제기어가 이론상의 동심원으로부터 벗어난 정도에 대하여 측정한 값으로 설계상의 중심점으로부터 치 끝까지의 거리를 각각 측정하여 결과를 얻게 된다.

4.2 기어 가공정밀 측정

측정되는 기어 가공 오차는 하나의 등급으로 분류되지 않으며 오차의 종류마다 각각의 등급으로 나누어진다.[3] 그러나 기어가공업체에서 발부하는 성적서는 가공업체 자체적인 측정 장비로서 오차값을 측정하며, 이를 바탕으로 기어마다 하나의 등급으로 판정하여 발부 한다. 따라서 가공업체에서 발부하는 성적서는 객관적 측면에 있어 부족함이 있으므로, 본 연구에서는 기어 정밀도등급과 오차값에 대한 객관적인 측정을 위해 한국산업기술시험원(ktl)의 기어 정밀도 시험 장비를 활용하여 측정하였다. 측정된 결과는 일본공업규격(JIS)에 따라 각 기어마다의 성적서가 발부 되었으며 이에 대한 가공 오차값의 결과는 Fig. 8 에 나타내었다. 치형 오차, 잇줄 오차 그리고 피치 오차는 치의 좌우를 모두 측정하며 실선은 좌측, 점선은 우측의 결과값을 나타낸다. Fig. 8 에 표기한 가공등급은 런아웃 오차를 기준으로 표기한 등급이다.

5. 가공정밀도와 소음레벨의 연관특성

Fig. 9 와 Fig. 10 은 회전 속도에 따른 감속기의 진동 및 소음 신호의 평균제곱근값(RMS Value)를

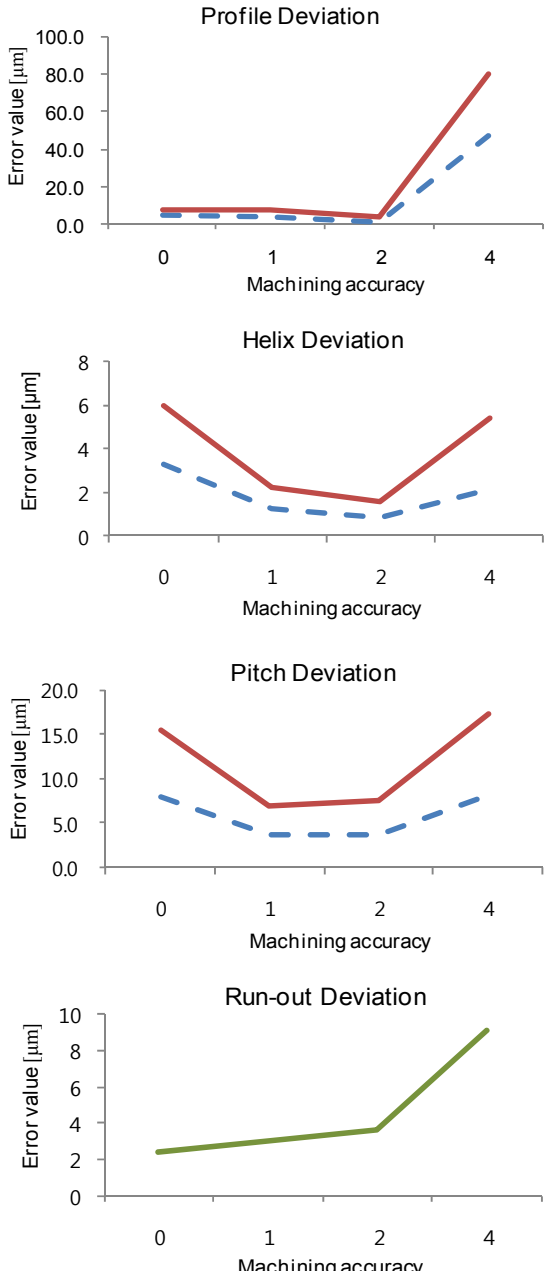

Fig. 8 Measured deviation value for machining accuracy

보여주고 있다. 두 그림을 살펴 보면, 회전 속도가 증가하면서 갑작스럽게 진폭이 증가하여 나타나는 피크점 (Peak point)은 보이지 않는다. 이는 앞서 Fig. 6 에서 두드러지게 나타난 고유진동수 3800 Hz 나 이외의 고유진동수와 중첩이 일어나지 않는 것을 의미한다. 따라서 이 감속기의 응답특성의 변화는 기어의 가공정밀도가 가장 큰 영향을 준다는 것을 추측할 수 있다. 또한 Fig. 9 의 진동신호 결과를 살펴보면, 1000 rpm 이후부터 4 급 기어의 감속기 진동이 눈에 띄게 증가되는 것을 볼 수 있다. 그리고 2 급 기어는 2000 rpm 부터 1 급 기어는

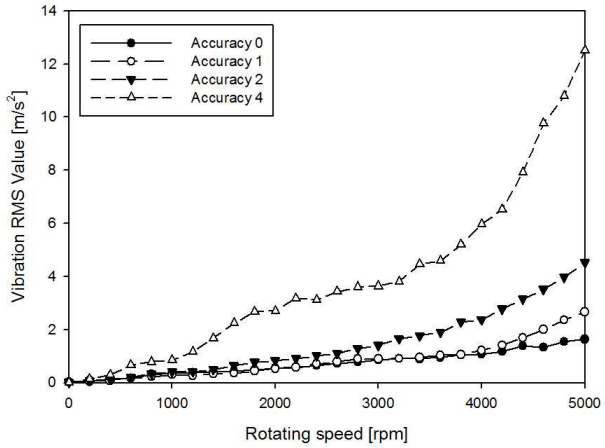

Fig. 9 RMS value of vibration signal

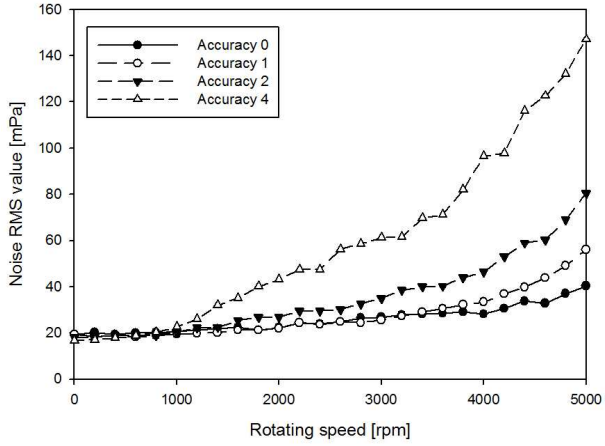

Fig. 10 RMS value of noise signal

4000 rpm 이후부터 그 응답이 0 급 기어와 확연히 틀려지고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 형태는 Fig. 10 의 소음신호에서도 동일하게 나타나고 있다. 또한 응답은 속도가 증가하면서 그 차이가 점점 더 크게 나타나게 되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 가공정밀도가 진동 및 소음에 미치는 영향은 구동속도가 고속이 될수록 그 중요성이 커진다고 볼 수 있다. 이렇게 정밀도에 따른 진동 및 소음의 크기 변화는 소음레벨의 변화를 가져오게 된다. Fig. 11 은 가공정밀도에 따라 감속기에서 발생하는 소음레벨을 모터의 회전속도 별(2000 rpm ~ 5000 rpm)로 나타낸 것이다. 구동속도 별로 결과를 확인해보면 가공정밀도가 낮아질수록 그 소음의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 정밀도에 따른 소음레벨의 증가량을 확인해 보면, 회전속도별로 다소 차이를 가지고는 있으나 0 급에서 2 급까지의 소음레벨의 변화는 다소 작다. 하지만 4 급 기어를 가진 감속기의 소음레벨은 그 크기의 변화가 앞서의 그것보다 많이 커지는 것을 확인할 수

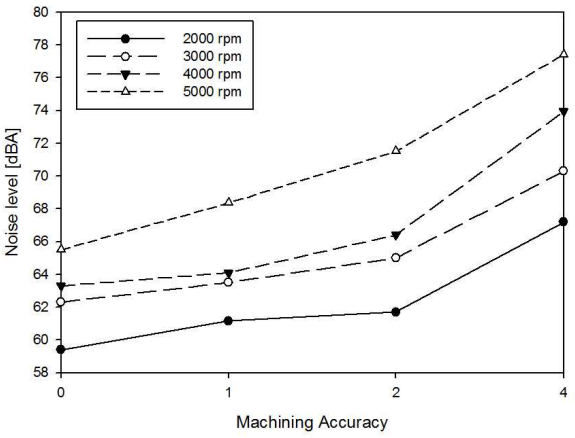

Fig. 11 Noise level of reduction gear

있다. 이 결과를 Fig. 8 의 오차 그래프들과 비교해 보면 이것은 치형 오차와 런아웃 오차의 그래프와 유사한 형태를 가지나 잇줄 오차 및 피치오차의 결과와는 다르다는 것을 확인할 수 있다. 또한 결과를 자세히 살펴보면 치형오차 그래프는 0 급에서 1 급으로 정밀도가 변화하면서 오차값이 동일하거나 작아지는 것을 알 수 있다. 하지만 런아웃 오차와 소음레벨을 보면 그 크기가 등급에 따라 꾸준히 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 런아웃 오차가 감속기의 구동 소음에 가장 큰 영향을 준다고 판단할 수 있다. 추측하여 볼 때, 기어의 런아웃 오차가 크다는 것은 기어가 동심원을 정확히 이루지 못하고 있다는 것을 의미하며, 이로 인하여 회전하면서 치와 치 사이에 충돌이 발생할 것으로 판단된다. 치 사이에 발생하는 충돌에 의한 진동이 바로 감속기의 소음을 발생시키는 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구는 감속기 내부 기어의 가공에 있어 제작정밀도에 따른 구동간 소음의 연관 관계에 대하여 분석을 하고자 하였다. 이를 위하여 정밀도 등급에 따른 4 종의 기어를 제작하고 이것을 감속기 내부에 조립하여 실험적으로 결과를 얻어내었다. 기어의 가공정밀도는 여러 가지의 기준에 따라 측정되고 그 등급을 가지지만 본 연구 결과를 살펴보면 기어의 동심원에 대한 정밀도를 의미하는 런아웃 오차가 감속기의 구동 소음에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 향후 유성기어 감속기 제작에 있어 내부 기어의 런아웃에 대한 정밀도를 높여, 오차값을 최소화함으로서 감속기의 소음 저감을 이룰 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

(1) Kim, J. H., Sung, H. K. and Chung, J. K., 2001, "An Investigation on Noise Quality of the Small Gear Reductioner Through Change of Gear Backlash," *Proceedings of the KSME 2001 Spring Annual Meeting*, Vol. B, pp 635~640.

(2) International Organization for Standardization, 1995, *Cylindrical Gears-ISO System of Accuracy-Part 1: Part 1: Definitions and Allowable Values of Deviations Relevant to Corresponding Flanks of Gear Teeth*, ISO 1328-1.

(3) Taylor, J. I., 2000, *The Gear Analysis Handbook: a Practical Guide for Solving Vibration Problems in Gears*, VCI, pp. 110~115.

(4) Korean Standards Association, 2005, *Cylindrical Gears-ISO System of Accuracy- Part 1: Definitions and Allowable Values of Deviations Relevant to Corresponding Flanks of Gear Teeth*, KS B ISO 1320-1.