대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 B pp. 635~640 KSME 01S263

기어 백래쉬(Backlash) 변화에 의한 소형감속기의 소음특성에 관한 연구

김주한* · 성하경** · 정중기***

An investigation on noise quality of the small gear reductioner through change of gear backlash

Joo Han Kim, Ha kyeong Sung and Jung Kee Chung

Key Words: Gear Reductioner(기어 감속기), Gear Backlash(기어 백래쉬), Rattle Noise(래틀소음), Gear Design Parameters(기어설계변수), Gear Reductioner Assembling(감속기조립)

Abstract

The small gear reductioner noise is caused by gear accuracy, assembling errors, and gear backlash. This main study is an investigation on noise quality of the small gear reductioner through the change of gear backlash. In this study included Gear design parameters related the small gear reductioner, the knowledge of rattle noise related gear backlash, and the experimentation results of the small reductioner noise through change of gear backlash. At last, this study propose the least method of the small gear reductioner noise that is caused by suitable existence of gear backlash.

1. 서 론

동력전달장치로서의 주요 기계요소에 속하는 기어는, 자동차, 산업기계, 건설기계, 농업기계, 철도, 선박, 항공기 계측기기 및 각종 자동화 장치의 구동 및 동력전달장치에 사용되고 있다. 최근의 기어는 기계류의 일반적인 경향인 고속, 고부하, 경량화 추세에 부응하여, 고속화, 고강력화, 소형화 및 저소음, 저진동화 되고 있다. 특히 소형 감속기 시장에서의 기어는, 소음, 진동사항이 크게 좌우되고 있는 실정이다.

* 전자부품연구원 메카트로닉스센터
** 전자부품연구원 메카트로닉스센터
*** 전자부품연구원 메카트로닉스센터

기어의 진동 및 소음연구동향은 특히 문제가 되는 고정도, 고속의 기어에서의 회전 속도와 소음과의 관계, 치의 강성, 형상오차, 백래쉬와 소음과의 관계 소음과 진동을 감소시키기 위한 기어상자의 형태 및 마운팅 방법등이 연구 되었다. 대부분 이에 대한 연구는 주로 자동차용 대형 기어를 대상으로 수행되고 있다.

본 연구에서는 그 동안 연구활동이 별로 없었던 소형 감속기에 대한 소음 연구를 하고자 한다. 먼저 감속기 소음에 대한 발생요인을 알아보고, 기어설계시의 저 소음화와 관련된 설계변수와관계(물림율, 모듈, 잇수, 치폭, 압력각, 백래쉬, 직경)를 알아보고, 기어의 백래쉬 소음과 관련된 래틀 소음에 대하여 알아본다. 기어 백래쉬량과 관련된 실제 소형감속기의 소음량을 실험측정 비교해 보고, 소형감속기에서의 백래쉬 영향을 분석하였다.

2. 소형 감속기의 소음요인 및 기어설

계 변수와의 관계

2.1 소형 감속기의 소음요인

소형 감속기에서 소음원인을 살펴보면 크게 세 기지로 나누어 살펴 볼 수 있다.

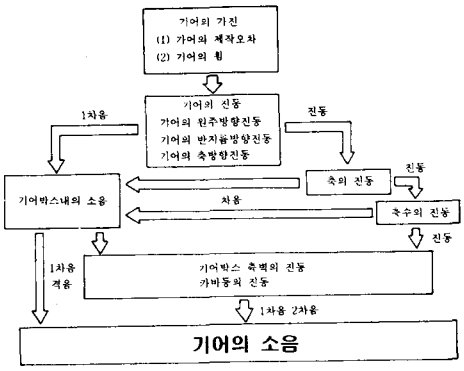

Fig. 1 Gear noise transmission

먼저 기어에 대한 오차 때문에 생기는 소음이다. 기어에 대한 소음 발생기구를 먼저 알아보면, 기어의 소음은 기어 치와 치의 물림으로 인해 원주방향으로 타격되지만, 이것이 반경방향으로 가진력으로 변화되어서 소음이 된다. 변환 과정은 한쪽물림 결합이나 리드 오차에 의해 치폭 중앙에서 조금이라도 벗어난 곳에 원주방향 가진력이 가해지면 치에 비틀림 모멘트로서 작용하여 기어 본체까지도 비틀어 지고 말며, 나중에는 축방향의 진동으로 변환되고 만다. 즉 기어 소음이라는 것은 기어 치와 치의 물림충격으로 인해 기어의 축방향으로 고유진동이 유발되어 여러 가지 경로를 거쳐 사람 귀에 도달하는 것이다. 그럼 치와 치의 물림에 있어서 진동기진력이 생기는 이유는 크게 두가지로 나눌수 있다. 먼저 기어에 피치오차나 치형오차와 같은 제작 오차가 있고, 그 부분에서 급격히 가속이나 감속이 되어 큰 힘으로 치가 부딪치는 현상이 원인인 경우이다. 이런 소음을 기어화인소음(gear whine noise)이라고 한다. 다음으로는 기어 치의 휨으로 인한 소음이다. 부하가 걸린 기어의 물림에 있어서는 전혀 제작오차가 없는 기어에 있어서도 기어의 물림 진행에 따라 동시 물림 치수가 변화하기 때문에 치의 휨량이 변화하여 진동을 유발함과 동시에 휨에 의해 생긴 치형의 이상 때문에 구동기어의 치원에 종동기어의 치선이 격돌하여 큰 진동을 발생시키는 것이다. 이 현상은 주로 전달하중이 클때에 보다 많이 발생하고 이때는 제작오차보다도 치의 휨 오차의 쪽이 큰 것이 보통이다.

두 번째 이유로는 기어 치아와 축의 조립상태, 케이스와의 조립상태의 오차로 기어가 불균형 상태로 되어 소음, 진동이 발생하는 것이다. 이 경우는 소형감속기와 같이 치수가 작고, 공간이 아주 한정된 감속기에서의 소음에 큰 영향을 미치는 인자이다.

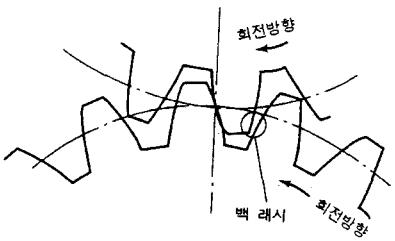

Fig. 2 Backlash

세 번째 이유로는 백래쉬(backlash)에 의한 소음이다. 백래쉬는 기어가 맞물림 상태에서 기어면 사이에 이루어지는 간격을 말하며, 기어의 결합, 그리스의 윤활, 기어의 팽창에 의한 변형 흡수등에 절대적으로 필요하다. 백래쉬량은 기어의 적용용도에 따라 달라진다. 동력전달이 큰 기어의 경우는 비교적 관대한 백래쉬량을 요한다. 이러한 경우의 백래쉬량은 기어의 치형오차, 온도변화, 기어간의 중심거리 오차등을 보상하기 위한 충분한 백래쉬량을 필요로 한다. 정확한 제어 컨트롤을 필요로하는 기어에서는 최소량의 백래쉬량을 필요로 한다. 이러한 경우는 백래쉬에 의한 동적손실량을 최소로 하기 위함이다. 기어 백래쉬와 관련된 소음을 래틀소음(rattle noise)라고 한다.

2.2 기어 설계변수와의 소음 관계

2.2.1 물림율

많은 기어 치로 하중을 분담하면, 치의 휨은 적어지고 소음도 감소가 될 것이다. 물림율이 1.1에서 1.9사이의 소음의 크기변화가 없고, 2이상시에 소음이 감소한다는 보고가 있다. 물림률이 증가하면 기어 가공시에도 기어 커트날과의 맞물림율이 증

가하여 치형의 정밀도가 좋게된다. 물림율을 증가시키는 방법으로는, 기어의 전위계수 조정법과, 기어의 표준 압력각 20° 이외의 압력각을 사용하는 것과, 헬리컬 기어을 사용하여, 치의 일단으로부터 치줄에 따라 점차 물려 들어가기 때문에 미끄럽게 회전을 전달하는 방법이 있다.

2.2.2 모듈

치의 굽힘강도는 모듈에 비례하므로, 모듈을 크게 하여 치를 강하게 하는 것이 치의 휨을 적게하여 소음을 작게하는 방법이다. 그러나 이 방법은 확실히 부하가 걸린 기어에만 유효하다. 치의 휨에 관계가 없는 무부하 운전시의 소음에 대하여는 별 효과가 없기 때문이다. 무부하 운전시는 휨보다는 도리어 제조의 폭이 우선되기 때문이다. 소음에 많이 관련되는 치형오차의 경우는 모듈이 작을수록 치형오차가 작아지므로, 이런 경우에는 모듈이 작으면 효과가 있다.

2.2.3 치폭

치폭은 치의 휨에 반 비례한다. 즉 치폭이 크면 강성도 커지므로 동일하중을 전달시 단위 치폭당 하중이 감소하여 치의 뒤틀림도 적고, 고유 진동수도 높게 되므로, 소음적인 측면에서는 유리하나, 맞물림 충격이 기어 본체로부터 축 베어링에 전해지기 쉽기 때문에 진동적인 측면에는 불리하다.

2.2.4 압력각

압력각을 작게하면, 물림률이 커지고, 물림 시작할 때 충격이 가해질때의 강성이 작게 되므로 소음이 작아진다.

2.2.5 백래쉬

과도한 백래쉬는 치의 간극으로 인한 진동의 지속 및 부하의 변동으로 인한 치면의 충격 맞물림율의 저하등으로 소음이 발생하고, 백래쉬가 너무 작으면 맞물림에서 간섭을 일으켜 높은 주파수의 소음을 발생하기 쉽다. 백래쉬는 기어의 정밀도와 부하 및 속도의 조건에 따라 약간 크게 하는 것이 좋은 소음 효과일수가 있다.

2.2.6 잇수

잇수는 서로 맞닿는 기어 잇수비를 정수로 하는 것 보다, 서로 소가 되는 것이 좋다. 이것은 피니언의 이빨이 작은 회수의 회전 후에 기어의 같은 이와 맞물리는 것을 피하기 때문이다. 잇수비가 정수이면, 기어의 회전 오차가 주기적으로 분포하기 때문에 진동과 소음이 커진다.

2.2.7 직경

기어의 소음의 크기는 진동원의 에너지로 결정되는 것이 아니고, 그 방사면이 크기로 결정이 된다. 따라서 소음을 작게 하기 위해서는 방사면은 될 수록 작게하도록 배려한다. 방사면의 제일 큰 축방향 면적을 줄이기 위하여 직경은 될 수록 작게 잡아야 한다.

3.기어의 래틀소음(rattle noise)과 기어백래쉬량과 감속기 소음과의 관계실험

3.1 기어 래틀소음(rattele noise)

3.1.1 기어 래틀소음

기어 래틀소음은 기어의 백래쉬를 크게 했을 때, 치차가 돌 때 헐거워짐으로 인한 마찰음을 내게 되는 소음이다. 특기 이 소음은 자동차의 수동변속기에서의 주요 소음으로 국내 및 국외에서 많은 연구가 행해졌었다. 기어 사이의 백래쉬 때문에 구동 토크 변동이나, 비틀림 진동에 의해 발생하는 내부 자유기어 이들의 충돌 현상으로 많은 진동과 소음을 야기 시킨다.

3.1.2 기어 래틀소음 해석 운동방정식

기어 래틀소음을 해석할 수 있는 운동방정식은 각 맞닿는 기어쌍을 각각의 스프링상수(k), 와 댐퍼상수(c)로 두어 해석 하였다.

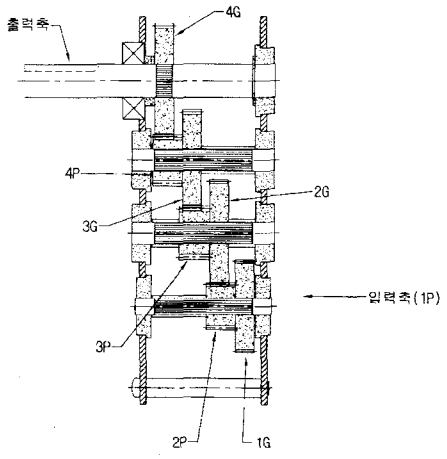

Fig. 3 4-steps gear reductioner

먼저 각 기어쌍에 대한 운동방정식을 구하면 다음

과같다.

$$J_{iG}\ \ddot{\theta}_{iG}+C_i(\ \dot{\theta}_{iG}-\ \dot{\theta}_{iP})+K_i(\theta_{iG}-\theta_{iP})=T_{iG(\theta)}$$
$$J_{iP}\ \ddot{\theta}_{iP}+C_i(\ \dot{\theta}_{iP}-\ \dot{\theta}_{iG})+K_i(\theta_{iP}-\theta_{iG})=T_{iP(\theta)} \quad (1)$$

여기서 각 토오크(T)는 입력축의 모터 토오크(T)로부터 구할수 있다.

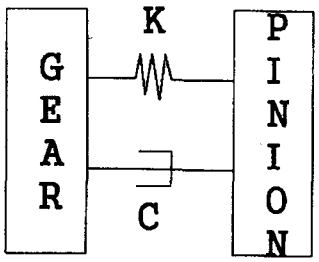

Fig. 4 Model of gear pairs

밑의 Fig. 5는 백래쉬가 T(θ)량의 영향을 나타낸 그래프이다.

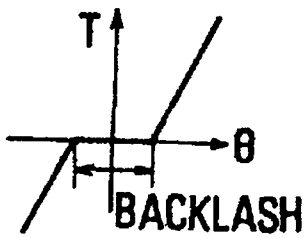

Fig. 5 T(torque) and θ relation

소음 진동 정도를 측정하기 위한 관계식을 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$Noise(Vibration)\ level=10\log\int_0^{\tau}\frac{(\ddot{\theta})^2dt}{(\ddot{\theta}^2\tau)ref} \quad (2)$$

$\ddot{\theta}$: angular acceleration of gears

τ : period of acceleration pattern

3.1.3 기어 백래쉬의 래틀소음의 영향

위의 식들을 이용해서 시뮬레이션 해 보면 백래쉬가 작으면 래틀소음이 작아지고, 백래쉬가 커지면 래틀 소음이 커진다. 이 결과는 국내 및 국외의 연구결과로 발표 되어있다. 하지만 그 결과는 중, 대형 감속기 및 변속기에서만 실험적으로 증명되었다.

3.2 기어 백래쉬량과 감속기 소음과의 관계실험

3.2.1 실험 방법

소형 감속기의 소음을 측정하기 위하여, 구동 90w용 AC Indution motor을 구동원으로 하였다. 각 단별 기어 Spec은 Fig. 6과 같다. 아래 기어와 똑같은 기어의 Spec으로 같은 가공방법, 같은 재료, 같은 조립방법등 모든 소음의 원인이 될 수 있는 조건을 동일하게 만들고, 백래쉬량만 서로 다르게 조정하여 실험 하였다. 백래쉬량은 아래식을 적용하였는데, 아래식에서 백래쉬량을 결정하는 여러 factor들 중에, 가장 손쉽게 조절 할 수 있는 중심거리 규정치에 대한 오차를 이용하여 조절 하였다.

$$C_o=\frac{2\ \Delta a\ \sin\alpha_b-\Delta S1-\Delta S2}{\cos\alpha} \quad (3)$$

Δa : 중심거리 규정치에 대한 오차

$\Delta S1$, $\Delta S2$: 이두께 규정치에 대한 오차

α_b : 물림 압력각

여기서 중심거리 규정치에 대한 오차를 백래쉬량으로 가정하고 실험을 실행 했다. 즉, 중심거리 오차만을 변경하여 실험을 행했다.

소음 측정은 무향실에서 실시 하였고, weighting type은 A type으로 측정 하였다. 마이크로폰에서 나온 소음은 소음계(NA-10 RION사)를 걸쳐서, FFT analyzer(SA-76 RION사)를 사용해서 주파수 영역의 스펙트럼 조사와, 주파수대별 1/3 옥타브를 잡았다.

마이크로 폰과 모터 감속기와의 거리는 100mm로 하였고, 감속기 출력축과 마이크로 폰을 수평으로 놓고 실험을 하였다.

3.2.2 실험 결과 및 고찰

실험은 3가지 경우를 가지고 실험을 하였다. 백래쉬(중심거리 오차)를 다음과 같이 조절해서 실험을 행하였다. Fig. 7은 감속기의 각 단별 백래쉬가 0.04-0.07정도로 하여 측정한 소음데이타 값이다.

Fig. 8은 각 단별 백래쉬를 0.1-0.12로 하여 측정한 값이다. Fig. 9은 각 단별 백래쉬를 0.14-0.17정도로 하여 측정한 데이타이다.

TRANSMITTED POWER	[kW]	0.09	INPUT SHAFT SPEED	1800	rpm
	[HP]	0.122	TOTAL CEN. DIST.	99.9	mm
REDUCTION RATIO	REQUIRED	1/30	RED. RATIO ERROR	0	%
	ACTUAL	1/30	REQURED LIFE TIME	20000	hrs
Allow. Trans. Power	[kW]	0.045	Allow. Output Torque	0.726	Kg_m

STAGE	1	2	3	4	5	
GEAR TYPE	Single	Single	Single	Single		
QUALITY (JIS)	2	2	2	2		
NORMAL MODULE	0.8	1	1.5	1.5		mm
NUMBER OF TEETH [P]	10	16	11	12		
[GEAR]	36	32	22	25		
HELIX ANGLE	30	0	0	0		degree
MATERIAL [PINION]	S45C	S45C	SCM415	S45C		
[GEAR]	S45C	S45C	S45C	S45C		
ADD. HEIGHT RATIO	1	1	1	1		
BOTTOM CLEARANCE	0.25	0.25	0.25	0.25		
PRESSURE ANGLE	20	20	20	20		degree
REQ. CEN. DISTANCE	21.23	23.96	25.29	28.14		mm
CAL. CENTER DISTANCE	21.246	24	24.75	27.75		mm
REDUCTION RATIO	3.6	2	2	2.083		
GEAR SPEED	500	250	125	60		rpm
FACE WIDTH	7	6.5	8	13		mm
TOTAL MODIFICATION	-0.0206	-0.0397	0.3878	0.2732		

Fig. 6 Gears spec of 4-step gears reductioner

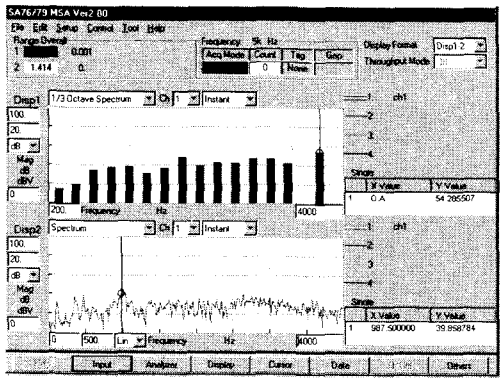

Fig. 7 FFT analyzer(case1)

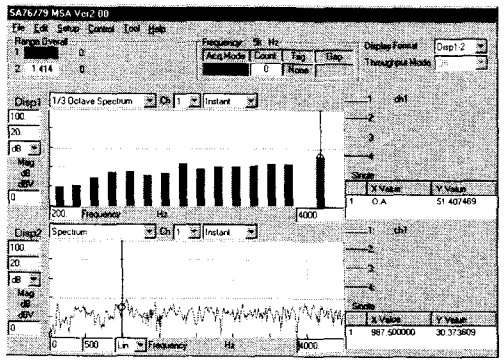

Fig. 8 FFT analyzer(case2)

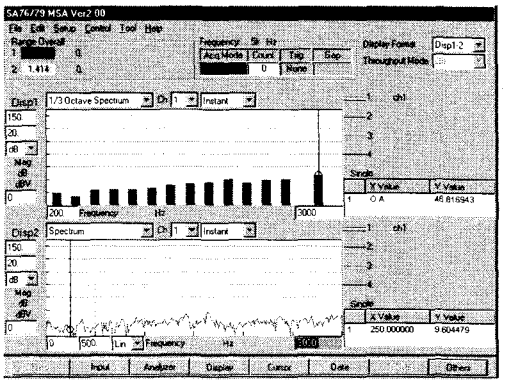

Fig. 9 FFT analyzer(case3)

Table1 Noise value of reductioner

백래쉬(중심거리오차)	소음값(dB)
CASE1(0.04-0.07)	54
CASE2(0.1-0.12)	51
CASE3(0.14-0.17)	47

위의 실험결과를 보면 백래쉬가 클수록 소음값이 감소함을 확인했다. 즉 case3일때가 가장 낮은 소음값을 가지고, case1일때가 가장 큰 소음값을 가짐을 확인 했다. 이결과는 중대형 감속기의 백래쉬와 관련 있는 래틀 소음에서, 백래쉬가 크면 래틀소음의 영향으로 소음이 증가한다는 결과값과 반대되는 결과이다. 이런 결과 값이 말해주는 것은, 앞에서 언급한 감속기 소음의 원인중, 중 대형 감속기의 경우는 감속기의 조립상태보다는 기어의 백래쉬 영향이 더 큰 영향을 미치고, 소형 감속기의 경우는 기어의 백래쉬 영향보다는 감속기의 조립상태가 더 큰 영향을 미치는 것을 알려 주는 것이다. 즉 소형 감속기의 조립시, 소형감속기와 같이 치수가 작고, 공간이 아주 한정된 감속기에서는 기어와 피니언 축과의 alignment문제, bearing alignment문제, 각종 misalignment로 인한 기어 충돌로 인한 기어 손상유발등이 감속기 소음을 증가시킨다. 이런 결과를 확인하기 위해서 case1의 진동실험을 수행하였다.

실험결과로, 다량의 misalignment와 기어 손상을 확인 할 수 있었다. Fig. 10은 case1의 shaft축 반경방향의 진동값을 FFT analyzer을 이용해, 시간파형 및 spectrum 파형값이다.

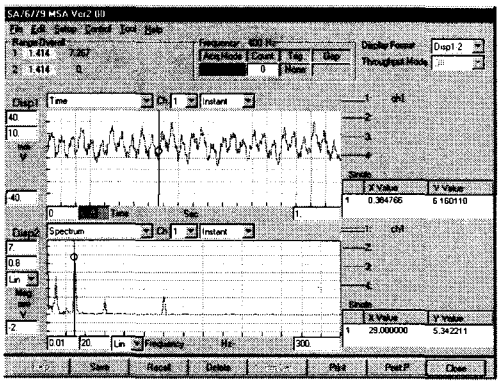

Fig. 10 FFT analyzer(case1:vibration)

시간파형의 경우는 주기적인 형태를 가지고, 스펙트럼파형을 분석해보면, 1x(30Hz)의 경우가 가장 크게 나타나고, 2x(60Hz), 4x(120Hz)가 띄고, 10Hz에서도 좀 크게 띄고, 미세하나마 20Hz에서도 약간 띄는 것을 확인 했다. 1x에서 값이 띄는 것은 shaft의 misalignment을 의미하는 것이고, 10Hz주위에서 띄는 것은 기어불량을 나타내는 것이다.

4. 결론

본 논문은 소형감속기의 소음원인 및 소음에 원인을 주는 기어 설계 변수를 알아 보았고, 기어 백래쉬가 소음 감속기소음에 어떤 영향을 끼치는지 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 감속기의 소음은, 중 대형 감속기의 경우는 감속기의 조립상태보다는 기어의 백래쉬 영향이 더 큰 영향을 미치고, 소형 감속기의 경우는 기어의 백래쉬 영향보다는 감속기의 조립상태가 더 큰 영향을 가지는 것을 알 수 있었다.

(2) 중,대형 감속기의 경우는 백래쉬의 최소화가 소음특성에 좋지만, 소형감속기는 백래쉬가 어느정도 존재함이 소음특성에 잇점이 있다.

(3) 진동실험을 통해 소형감속기의 조립상태가 감속기의 진동 및 소음에 미치는 영향을 확인하였다.

참고문헌

(1) Darle w. Dudley, 1984, "Handbook of Practical Gear Design", Chapter 8

(2) Toshimitu sakai, Yuhji Doi, 1981,"Theoretical and Experimental Analysis of Rattling Noise of Automotive Gearbox", Society of Automotive Engineers, No 810773

(3) Solfrank, Mechanik, 1990, "Modelling Gear Box Rattle Noise" VDI , pp 1074-1079

(4) 이금정, 박철희, 1998, "고주파 래틀링 소음의 기초 연구". 한국소음진동공학회, pp 88-93

(5) 안병민, 최은오, 1997, "변속기 진동 저감을 위한 파라미터 연구", 한국공작기계기술확회, pp 292-297

(6) Ishida, Fukui, 1981, "Effect of Gear Box on Noise Reduction of Gear Device", JSME, pp 13-18

(7) 과학기술처, 1992, "기어고급화를 위한 종합기술 개발", Tribology종합기술개발, pp 131-139

(8) Kato, 1985, "Analytical Procedure for Gear Tooth Surface Modification Reducing Gear Noise", SAE pp 852273

(9) 박찬일, 이장무, 1996, "치형오차를 가진 헬리컬 기어의 진동특성에 관한 연구". 대한기계학회 논문집, pp 1534-1542

(10) Fox. R. L, 1976, "Measurement and Analysis of Truck Powertrain Vibration", SAE 760844