

기어 그라인딩 장비 가공조건 최적화에 대한 실험적 연구

An Experimental Research for the Optimization of the Gear Grinding Machine's Operating Condition

이 현 구†·김 무 석*·강 구 태*

Hyun Ku Lee, Moo Suk Kim and Koo Tae Kang

(2010년 5월 20일 접수 ; 2010년 6월 16일 심사완료)

Key Words : Gear Noise(기어 소음), Grinding Machine(연삭가공장비), Feeding Speed(피딩 속도), Cutting Oil(절삭유), Worm Wheel(웜휠), Tooth Profile(치형)

ABSTRACT

To improve the gear noise quality, gear tooth grinding machine are widely used in automotive industry. While using the gear profile grinding machine to improve the gear tooth quality of the transmission, several defects such as chattering, tooth waves that cause the gear noise occasionally happened. But it is very difficult to solve that problem, because there is no one who knows the setting up the optimal grinding condition appropriately. The abnormal manufacturing conditions which make the gear noise make the engineer to spend a lot of time, effort, and money. Due to demands for solving the serious abnormal gear noise happened in the automatic transmission in the mass product stage, the vibration checking process in the worm wheel axis, work rotation and fixed axis of the grinding machine were adapted to find the root causes. As a result, gear profile wave are affected by the work rotation axis's unbalance which is caused by worm wheel feeding speed. And a primary and the secondary grinding feeding speed, cutting oil, work fixed forces are also proved as the important factors. After setting up the grinding condition reported in this paper, it was adapted successfully to the grinding machine to manufacture the new automatic transmissions' gear. The gear noise was dramatically disappeared and the process and the results will offer good guides to the engineers who manufacture the gear with the grinding machine.

1. 서 론

차량의 연비 개선과 동력성능을 좌우하는 변속기의 대표적인 구성 요소는 기어들이다. 기어는 동력을 전달하는 회전요소로 내구성, 저소음, 양산성 등의

성능을 갖추고 있어야 한다. 모든 자동차회사에서는 프로그램을 이용하여 최적화된 제원의 기어를 설계하려고 노력하고 있다. 그러나 우수한 제원의 기어가 설계되어도 고정도의 품질 유지는 절대적으로 필요하다.

일반적으로 고품질의 기어를 양산하기 위한 기어 마무리 가공방법에는 셰이빙(shaving), 호닝(honing), 그라인딩(grinding) 이라는 공법을 사용한다.

셰이빙은 커터와 기어 치면 간의 미끄럼에 의해 기어 치면을 소량 절삭하여 기어를 정밀 다듬질 하는 것으로 기어 피치나 기어의 치 형상과 리드 오차

† 교신저자 ; 정회원, 현대자동차
E-mail : hk-lee@hyundai-motor.com
Tel : (031)368-2380, Fax : (031)368-6095

* 현대자동차

이 논문 일부는 2010년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되어 우수논문으로 추천되었음.

등을 수정할 수 있다. 그러나 초기 기어치의 초별 정밀도가 나쁜 것을 완전히 수정할 수 없는 단점이 있다.

호닝은 소음의 발생 원인이 되는 흠집이나, 가공 과정에서 생긴 버(burr)를 짧은 시간에 제거하는 작업에 효과적이다. 기어의 치형이나 리드오차를 개선하는 효과는 기어연삭에 비해 적은 편이고, 열처리로 인하여 변형된 치형을 웨이빙 머신으로 가공한 정도까지 향상 시키는데 사용한다.

그라인딩은 정밀한 치형과 정도가 높은 치면을 얻기 위해 사용하는 것으로, 웨이빙, 호닝 등을 대체하는 공법으로 변속기 기어소음의 품질을 한 단계 높인 공법이다. 자동수치제어가 되는 그라인딩 머신에서는 기어의 이상치형인 인볼류트 치형을 원하는 임의의 지점에서 자유자재로 수정할 수 있다. 따라서 고정도의 기어 가공 공법 대부분은 열처리 후에 치면을 연마하는 그라인딩 공법을 사용하고 있다.

일반적으로 기어 가공품의 불량 여부 확인은 가공 후 치형 측정기를 통한 치형 형상 분석에 의해 이루어지고 있다. 채터링, 웨이브, 돌기 형상 등의 기어치형불량은 치면 연삭시 설정된 잘못된 가공 조건에 의해 만들어진다. 따라서 잘못 선정된 치면 연삭 조건은 기어소음 품질을 향상시키기 위해 적용한 치면연삭의 기본 목적과 위배된다.

대부분의 자동제어 머신의 불량에 대한 검출 모니터링 방식은 주축의 과부하를 검출하는 방식을 사용한다. 그러나 기어인 워크(work)가 장착된 연삭 가공 중 발생하는 채터링, 웨이브, 돌기 형상과 같은 표면 불량은 가공시, 장비의 진동에 의해서 발생되기 때문에 전류 신호를 이용해 이를 검출해 내는 것은 쉽지 않다⁽¹⁾. 국내에서는 공구의 진동을 이용하여 치면 연삭 가공품질을 모니터링 하는 시스템에 대한 연구가 있었다⁽²⁾. 여러 가지 상황을 고려할 때, 치면연삭기 제작업체에서 선정해주는 연삭조건에 대한 기본적인 기준과 이에 대한 평가는 기본 목표 값이 없기 때문에 가공에 의한 문제가 발생하여도 수정하기까지는 상당한 어려움이 있다. 따라서 치면연삭에 의해 가공된 기어가 문제가 있음에도 무엇 때문에 문제가 발생하는지, 어떻게 하면 개선이 되는지에 대하여 안을 제시할 수 없다.

이 연구에서는 자동변속기를 개발하면서 실제 차량

에서 발생한 기어 소음이 모델이 되었다. 문제가 된 기어 소음의 원인을 조사하여 기어의 이상치면이 발생 원인임을 파악하였다. 그리고 그라인딩 장비의 임펄스, 워크고정축, 회전축 등에 진동센서를 설치하여 여러 가공 조건에서 실험을 실시하였다. 각각의 장비와 가공조건에 따른 진동특성과 치형데이터 분석을 통하여 발생한 원인과 해결방안, 그리고 최적화에 대한 연구가 진행되었으며, 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 연삭기 워크 회전축의 언밸런스(unbalance)가 문제 치형 웨이브를 만든 원인이다.
- (2) 발생한 문제를 최소화 하기 위하여, 치면 연삭의 초별가공과 정밀가공인 재별가공 조건을 최적화 하였다.
- (3) 동일 모델의 치면 연삭기라도 각각의 최적 가공조건은 서로 상이함을 확인하였으며,
- (4) 가공시 워크를 고정하는 워크 압입력과 절삭유에 따른 영향성을 파악하여 최적화하였다.

2. 본 론

2.1 기어 소음 발생

Fig. 1은 자동변속기가 탑재된 차량의 실내소음

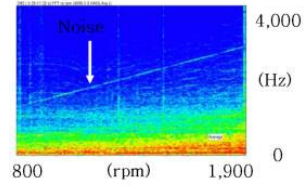


Fig. 1 Vehicle interior noise

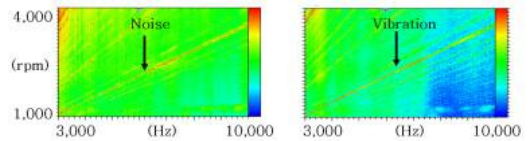


Fig. 2 Noise and vibration data in the anechoic test cell

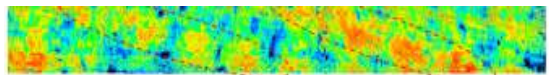


Fig. 3 3D tooth profile of the output gear

데이터이다. 개발 당시 차량 주행 중 약 1 kHz에서부터 3 kHz까지 전 주행 영역에서 화인성소음이 지속적으로 감지된 것으로 차량의 감성품질을 상당히 저하시켰다. Fig. 2에서와 같이, 무향실에서 문제 변속기의 평가를 진행하였다. 그리고 특정 기어에 의하여 발생된 것이라는 결과를 확인한 뒤, 해당 기어에 대한 정밀 측정 조사를 실시하였다.

Fig. 3은 문제기어의 3차원 치형 측정 데이터다. 대각선 방향으로 약 10여개의 가공흔적이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

2.2 치면 연삭기(그라인딩 장비) 가공특성

치면 연삭기는 공구의 회전에 의해 가공물이 가공되는 장비로써 공구의 회전 속도를 조절하여 가공 속도를 제어할 수 있다. 이 연구에 사용된 장비는 'R'사에서 제작된 'RZ'모델 장비로 공구의 직경, 그리고 공구의 구조와 워크인 기어의 재원을 고려하여 회전 속도를 결정하는 방식을 채택하고 있다. 공구의 회전 수와 기어의 회전수는 다음 식 (1), (2)와 같다.

$$\text{공구 회전속도(rpm)} = \frac{\text{Grinding 선속도(m/s)} \times 60}{\text{공구의 직경(m)} \times \pi} \quad (1)$$

$$\text{기어회전속도(rpm)} = \frac{\text{공구 회전속도(rpm)} \times \text{공구 줄수}}{\text{기어의 잇수}} \quad (2)$$

위의 식 (1)과 (2)에 의해 결정된 공구의 회전 속도에 맞추어서 워크의 회전이 이루어지고 그 회전과 연동되어 워휠이 이동하면서 기어를 연삭한다.

2.3 치면연삭기와 소음

치면연삭기의 가공시 발생하는 문제점을 확인하기 위하여 워휠축, 워크고정축, 워크회전축에 진동 센서를 부착하여 워크를 가공하면서 발생하는 진동을 측정하였다. Fig. 4는 그 예를 보인 것이고 Fig. 5는 그 결과를 보인 것이다. Fig. 5에서 보여진 것과 같이 슯돌이 있는 휠축보다는 기어가 장착되어 회전하는 고정축과 회전축에서 진동의 크기가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 가공되는 워크가 가장 영향을 많이 받는다는 것을 의미한다.

(1) 가공조건과 진동특성과 치형

Table 1은 치형의 문제가 발생하는 가공 조건과 치형이 개선되도록 조절한 가공조건에 대한 표를 보인 것이다. 'a'는 임의의 값을 의미한다. 두 조건의 기본적인 차이는 가공시간으로 문제품이 약 20 초 정도인 반면, 치형상이 개선되는 조건은 약 100 초로 약 5배 정도의 가공시간이 차이가 난다.

일반적으로 초벌가공시에는 약 260 um 이상의 치면 가공이 이루어지고, 재벌가공 시에는 20~30 um 정도의 치면 가공이 이루어진다. 따라서 회전당 피딩 속도를 상승시키면 기어가 연삭되는 동안 목표 연삭량을 맞추기 위해 무리한 가공이 되고, 이것이 기어 치형에 직접적인 영향을 미치게 되는 것이다.

Fig. 6은 Table 1에서 보인 가공 조건에 따른 회전축

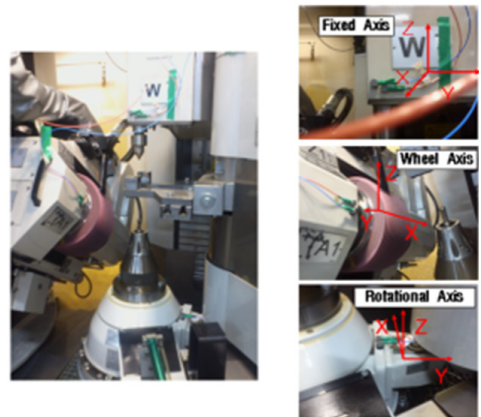


Fig. 4 Vibration acquisition position

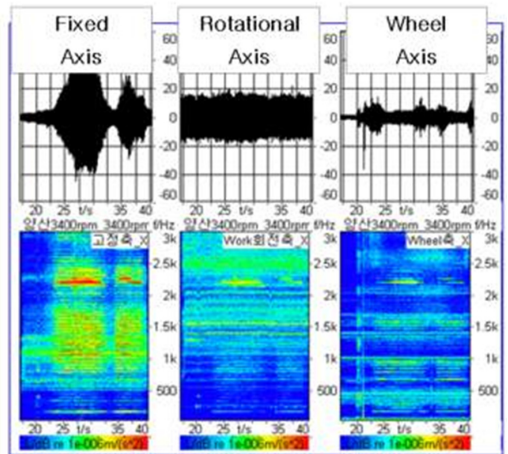


Fig. 5 Vibration data of the axes

Table 1 Manufacturing conditions of the bad and good results

No.	Feeding speed (mm/rpm)		Wheel	Work (rpm)	Manufacturing condition
	Rough	Fine			
1	a+0.6	a+1.1	3.400	600	Bad
2	a+0.2	a	3.400	600	Good

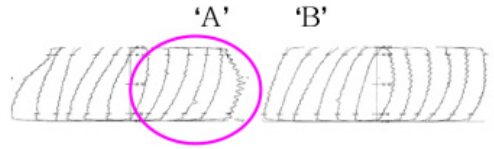
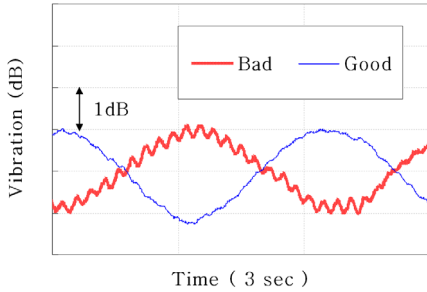
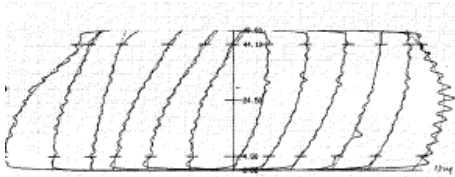


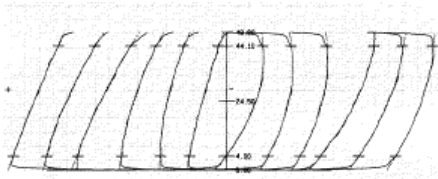
Fig. 7 A comparing of the gear profiles in the same conditions of the 'A' and 'B' grinding machines



(a) Vibration data of the WORK rotation Axis



(b) Tooth profile in bad condition



(c) Tooth profile in good condition

Fig. 6 Vibration data and tooth profile data

상의 진동데이터와 그 결과물인 기어의 치형 데이터를 각각 보인 것이다. Fig. 6의 진동데이터를 통하여 문제가 발생하는 조건에서 워크가 600 rpm으로 회전하는 동안 1회전에 약 10회 정도의 웨이브 진동이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 영향으로 치형 형상에 웨이브 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

(2) 가공조건에 따른 장비 특성

Fig. 7은 Table 1에서 언급된 (a+0.6) mm/rpm의 초벌 피딩 조건과 (a+1.1) mm/rpm의 재벌 피딩 조건

으로 동일 모델의 'A', 'B' 두 장비에서 가공한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보인 것과 같이 동일한 가공조건에서도 상이한 치형상 결과를 보인 것을 알 수 있으며, 'B'장비가 상대적으로 'A'장비 대비 가공 안정성이 우수하다는 것을 확인할 수 있다.

(3) 워크 압입력의 영향

각각의 장비에서 워크 압입력을 (P)N에서 (P+300)N까지 100 N간격으로 상승하면서 실험을 실시하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 'A', 'B'장비를 각각의 가공조건에서 연삭을 하면서, 워크 압입력에 따른 회전축 상에서 측정된 진동차이를 보인 것이다.

Fig. 8에서 보인 것과 같이 'A'장비는 초벌과 재벌의 피딩속도를 (a+0.3) mm/rpm으로 동일하게 하고 압입력만을 (P+300)N에서 (P+200)N으로 축소 시, 초벌구간에서 2 dB의 진동이 개선되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 'B'장비로 가공한 것으로, 워크압입력을 (P+200)N에서 (P+300)N으로 상승시키고 재벌구간 피딩속도를 (a+0.4) mm/rpm에서 (a+0.3) mm/rpm으로 변경했을 때, 재벌구간에서 3 dB의 진동이 개선되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 8과 Fig. 9에서 언급된 각각의 가공조건에 따른 기어 가공품의 치형성적서를 나타낸 것이다. 진동 수준이 낮은 조건에서 가공한 기어의 치형 웨이브 형상이 상대적으로 개선됨을 확인할 수 있다.

(4) 절삭유의 영향

절삭유는 기어를 가공하는 중요한 조건 중 하나이다. 일반적으로 절삭유의 선정은 재료의 종류, 운전조건, 공구재종, 절삭속도, 절삭깊이, 가공조도, 방청성 등을 고려하여 선정하며, 가공에 가장 적합한 절삭유는 조건에 따라 달라질 수 있다.

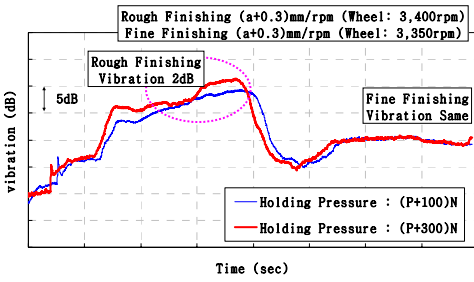


Fig. 8 A comparing of the vibration result in the work holding pressures of the ‘A’ grinding machines

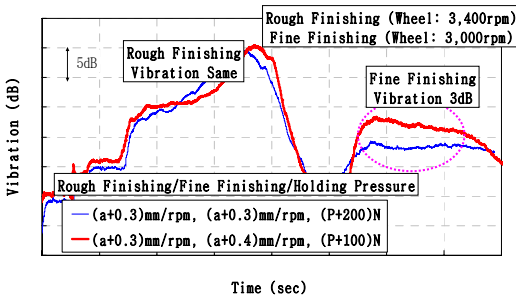
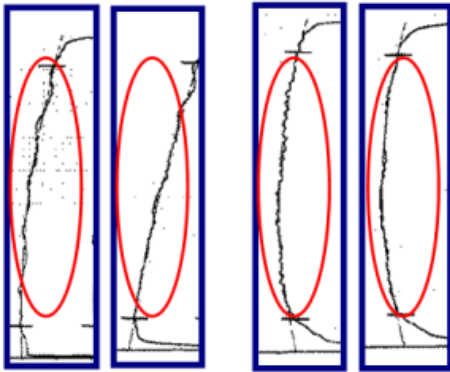


Fig. 9 A comparing of the vibration result in the work holding pressures of the ‘B’ grinding machines



(a) ‘A’: (P+300)N, (b) ‘A’: (P+200)N
(c) ‘B’: (P+200)N, (d) ‘B’: (P+300)N

Fig. 10 A comparing of the tooth profile of the ‘A’and ‘B’ grinding machines

Table 2는 이 연구에 사용된 합성유와 광유 두 가지 절삭유의 특성을 비교한 것이다.

Table 2 A specifics of the oil

Content	Compound	Mineral
Density	0.837(g/cm ³)	0.89(g/cm ³)
Viscosity	8.7 cST	12.9 cST

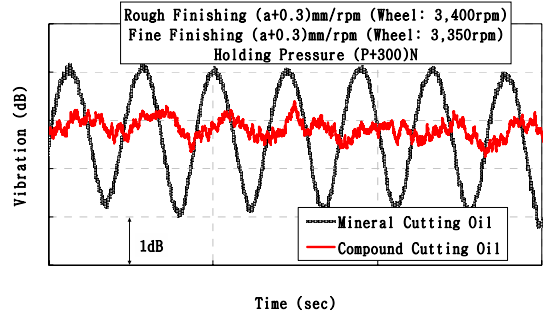


Fig. 11 A comparing of the vibration level of the compound and mineral cutting oil in the ‘A’ grinding machine

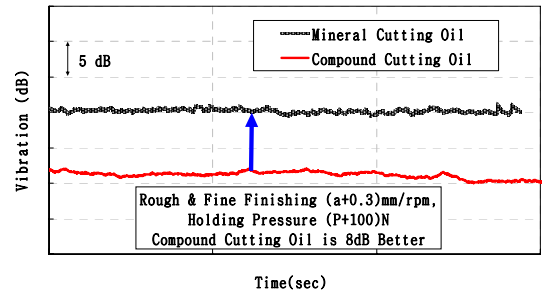


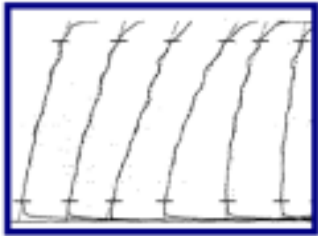
Fig. 12 A comparing of the vibration level of the compound and mineral cutting oil in the ‘B’ grinding machine

Fig. 11은 ‘A’장비에서 초벌 (a+0.3) mm/rpm, 재벌 (a+0.3) mm/rpm의 피딩 속도, 압입력 (P+300) N에서 치면연삭시 사용된 절삭유 사양에 따른 워크회전축 상의 진동 차이를 보인 것이다. 합성유가 광유 대비 전체적인 진동이 3 dB 유리한 것을 확인할 수 있다.

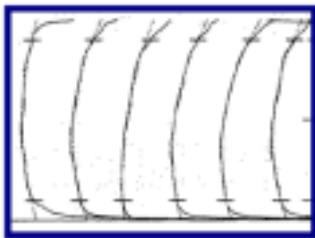
Fig. 12에서는 ‘B’장비에서 초벌과 재벌 모두 (a+0.3) mm/rpm의 피딩 속도, 압입력 (P+300) N에서 치면연삭시 워크회전축상의 진동차이를 보인 것으로 역시 합성유가 광유 대비 진동이 8 dB 유리한 것을 확인할 수 있다.

Table 3 Optimized manufacturing condition of the grinding machine

Grinding machine	Condition, feeding speed(mm/rpm)		Wheel(rpm) rough/fine	Work(rpm) rough/fine	Holding pressure (N)
	Rough(260 um)	Fine(20~30 um)			
'A'	a+0.3	←	3.400/3.350	600/591	P+100
'B'			3.400/3.000	600/529	p+200



(a) 'A' grinding result



(a) 'B' grinding result

Fig. 13 The gear tooth profiles after using the 'A' and 'B' grinding machines

2.4 가공조건 최적화

Table 3은 각각의 가공조건에의 장비 진동과 가공 완료된 기어의 치형성적서를 통하여 치면 연삭의 초벌 가공과 재벌 가공 조건의 선정과 가공시 워크를 고정하는 압입력 등의 조건을 최적화하여 선정된 결과이다. Table 3에서 보인 것과 같이 초벌과 재벌 조건은 동일하게 (a+0.3) mm/rpm으로 선정이 되었으나, 각 장비의 특성을 고려하여 초벌과 재벌시 휠과 워크 회전수를 상이하게 설정하고 워크 압입력도 장비마다 상이하게 선정하였다. 전체 가공 시간도 40초 정도로 세팅되었다.

Fig. 13은 Table 3에서 언급된 가공조건으로 가공한 기어들의 치형 성적서이다. 기존의 웨이브 형상이 상당히 개선된 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 14는 이러한 가공 결과에 의해 조립된 기어의 대상 시험 결과를 보인 것이다. 개선후 대상에서 소음과 진동 측면에서 약 30~40 dB 정도의 개선효과를 볼 수 있다.

3. 결 론

그라인딩 장비로 워크를 가공할 때, 각각의 축에서 계측된 진동과 제작된 기어의 치형성적서 분석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 이상 기어 소음이 발생된 원인은 가공시 발생하는 치면연삭기의 워크 회전축의 언밸런스와 관련이 있다.
- (2) 발생된 문제를 개선하기 위하여, 치면 연삭의 초벌 가공과 재벌 가공 조건의 선정에 대하여 기준을 마련하였으며, 동일 모델이라도 치면 연삭기마다 최적의 가공조건이 상이함을 확인하였다.
- (3) 가공시 워크를 고정하는 압입력과 절삭유에 따라 그 결과가 변경된다는 것을 확인하였고, 최적의 조건을 선정하였다.
- (4) 기어 가공 최적 조건을 선정하여 문제소음과

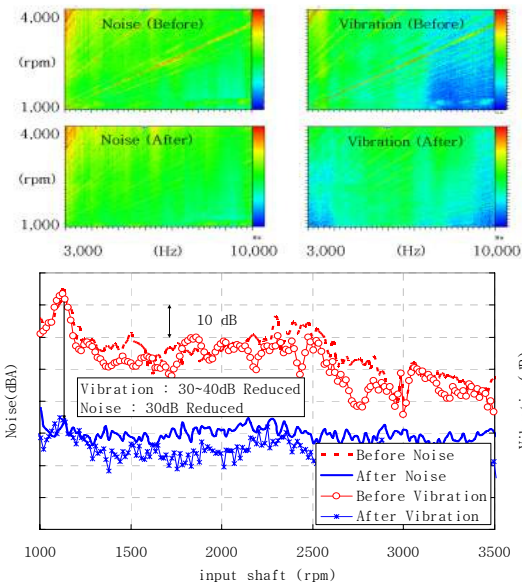


Fig. 14 Noise and vibration level after optimizing the manufacturing condition

진동을 각각 30 dB 이상 개선하였다.

이 연구의 진행 과정과 결론은 양산시 그라인딩 치면 연삭기를 설치할 경우, 최적화된 가공조건을 선택을 통하여 높은 품질의 기어를 양산할 수 있는 가이드가 될 것이다.

참 고 문 헌

(1) Altinas, Y. and Weck, M., 2004, "Chatter

Stability of Metal Cutting and Grinding," CIRP Annals Manufacturing Technology, Vol. 53, No. 2, pp. 619~642.

(2) Park, S. S., Min, B. K., Lee, S. J., Shin, S. J., Choi, H., 2008, "The Development of the Gear Profile Grinding Machining Quality Monitoring System Using Tool Vibration Signal," KSAE08-S0233, pp. 1406~1411.