

기어장치의 소음진동에 관한 고찰(2)

박노길*

(부산대학교 기계공학부)

이번 강좌에서는 비평행축 기어의 소음진동의 주요 원인과 실무 대책을 소개하고자 한다.

1. 비평행축 기어에 사용되는 기어 치형

기어장치에는 기하학적으로 매우 복잡한 형태의 여러 치형이 사용되는데 기어박스의 소음진동에 가장 큰 영향을 주는 것은 기어의 치형이다. 따라서 각 기어박스의 소음진동을 파악하는데 있어서 기어의 치형으로 인한 기어장치의 기하학적/기구학적 특성을 잘 이해하여야 한다. 기어장치는 회전축의 형태에 따라 평행축과 비평행축으로 나눈다. 비평행축은 다시 교차축과 비교차축으로 세분된다. 교차축을 연결하는 기어에는 베벨기어, 그리고 비교차축을 연결하는 기어에는 워기어와 하이포이드기어가 사용된다.

베벨기어에는 옥토이달 치형과 구형 인볼류트 치형이 있다. 옥토이달 치형은 피치원추와 접하면서 회전하는 가상의 크라운 랙으로 창성되는 베벨기어 치형으로서, 절삭면이 평면이다. 구형 인볼류트 치형은 옥토이달 치형과 같이 가상의 크라운 랙으로 창성되지만 절삭면이 곡면을 형성한다. 이 치형은 원통형 인볼류트 치형과 같은 범주에 속하여 축각 오차를 흡수할 수 있는 특성을 가지고 있다. 실제로 사용되는 베벨기어는 대

부분 옥토이달 치형에 속하며 미국의 그리슨사와 독일의 클리겐베르그사에 의해 만들어진 전용기로 생산되고 있다. 구형 인볼류트 치형은 현재 전용기가 없고 일부에서 단조공법이 개발되어 제작되고 있다.

하이포이드기어는 헤드 커터(head cutter)로 면 밀링(face milling)하는 방식으로 만들어지고 있다. 이 때 치형은 각 회사가 고안한 전용기에 따라 정의되기 때문에 정형화된 치형이 별도로 존재하지 않는다. 다만 절삭면이 평면을 구성하고 적당한 압력각을 형성하는 것으로 보아 베벨기어의 옥토이달 치형과 같은 범주에 속한다고 볼 수 있다. 적당한 압력각에 의해 형성된 평면 절삭



그림 1 하이포이드기어 가공(출처-www.eirsa.com)

* E-mail : parkng@pusan.ac.kr / Tel : (051) 510-2325

기초강좌

면으로 기어를 창성하는 방식에 있어서는 두 기어가 동일하다. 대신 베벨기어가 크라운 랙이 회전운동하면서 기어를 깎는 것이라면 하이포이드 기어는 헤드커터가 특수하게 설계된 곡면운동을 하면서 깎는 것에 차이가 있다. 현재 하이포이드 기어도 베벨기어처럼 그리슨사(Gleason)와 클리겐베르그사(Kligenberg)가 제작한 전용기로 만들어진다.

웜기어 치형은 원통형(cylindrical)과 장구형(globoidal)으로 나누어진다. ANSI-AGMA 6022-C93에 따르면 원통형 웜기어의 치형은 ZA, ZN, ZK, ZI형 4가지가 있다.

웜기어는 웜(혹은 웜샤프트)과 웜기어(혹은 웜휠)을 각각 다른 방법으로 깎는다. 공통적으로 웜휠은 웜샤프트와 동일한 형상으로 제작하여 래디얼 혹은 탄젠셜 피딩(radial or tangential feeding)으로 공액 치면(conjugate tooth surface)을 만들어 사용한다. 혹은 커터의 피치원을 웜샤프트보다 더 크게 제작하여 웜휠을 깎는 경우도 있다. 이 때는 공액치면이 아니고 점 접촉하는 웜기어쌍

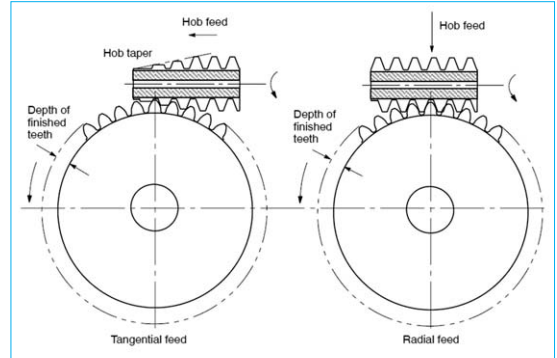


그림 3 탄젠셜 피드(좌)와 래디얼 피드(우)를 이용한 웜휠 가공(출처-AGMA 6022-C93)

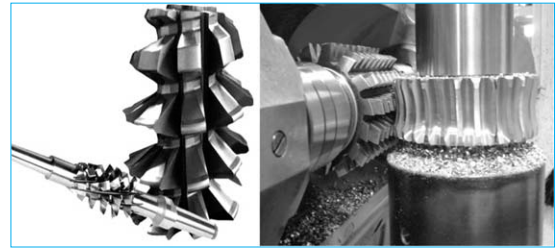


그림 4 탄젠셜 호브(좌, 출처-canadatool.ca) 및 래디얼 피드 가공(우, 출처-www.iwasa-tech.com)

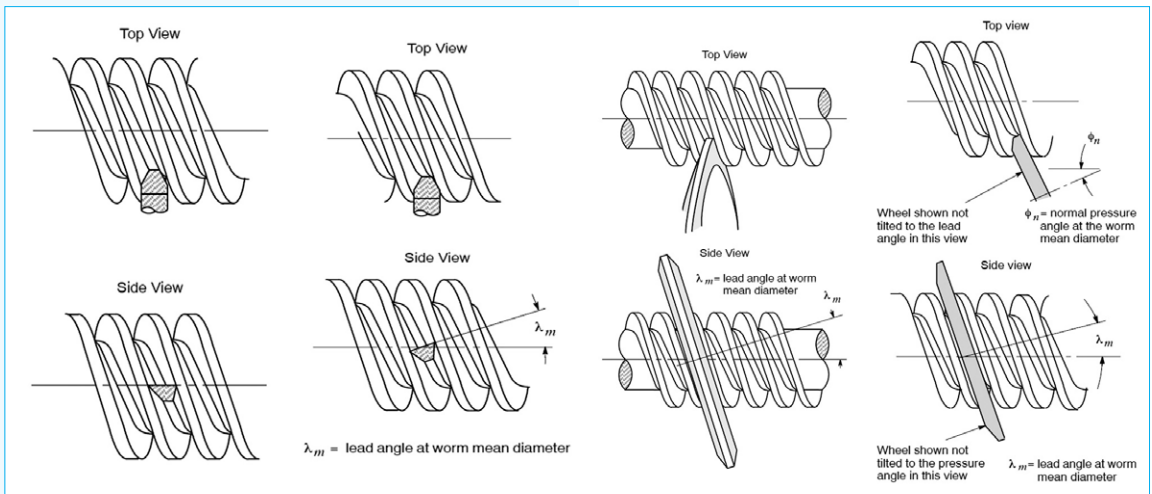


그림 2 원통형 웜기어(좌측부터, ZA ZN ZK ZI ; 출처-AGMA 6022-C93)

이 된다.

ZA웜의 웜샤프트는 직선 프로파일의 선반 틀을 피삭재의 회전축과 일치시킨 후 선반 가공하여 깎은 치형이다. 비교적 쉽게 가공할 수 있으나 치면 정밀도가 떨어진다. 연삭가공을 위해서는 곡면 절삭인선을 갖는 연삭숫돌이 필요하다. 대신 제품의 치면검사가 쉽다. ZN웜은 ZA웜과 유사하다. 선반 틀을 리드각 만큼 기울인 상태에서 선반작업을 하여 웜샤프트를 깎는다. 마찬가지로 연삭가공을 위해서는 곡면 절삭인선을 갖는 연삭숫돌이 필요하다. ZK웜의 웜샤프트는 원판형 밀링커터를 리드각 만큼 기울인 상태에서 피삭재 회전축 방향으로 이송시키면서 절삭하는 방식으로 비교적 쉽게 가공할 수 있다. ZI웜의 웜샤프트는 평면의 절삭면이 피삭재의 회전축으로 따라 이송하면서 만들어진 치형이다. 헬리컬각이 크고 잇수가 1~3개인 특수한 제원의 인볼류트 헬리컬기어에 속한다. ZK웜샤프트에 비해 가



그림 5 웜 밀링(좌, 출처-gleason.com)과 그라인딩(우, 출처-expo21xx.com)



그림 6 더블인벨로핑 웜기어(출처-www.conedrive.com)

공이 복잡하지만 인볼류트 헬리컬기어와 같이 축간 거리오차를 흡수할 수 있어서 소음진동에 유리하다. 이에 짝하는 웜휠은 인볼류트 헬리컬기어를 그대로 사용할 수 있다. 그러나 면압강도가 약해지는 단점이 있다. 장구형 웜기어에는 더블 인벨로핑 웜기어가 있는데 면압강도면에서 매우 효과적인 웜기어로 알려져 있다. 그 치형의 가공은 별도의 전용기에 의해 제작되기 때문에 그 치형에 관한 이론적인 분석이 매우 제한되어 있다.

이상으로 기어는 그 종류에 따라 다양한 치형을 가지고 있으며 그 치형을 가공하는 방법에 의존하기 때문에 소음진동을 관리하기 위해서는 절삭가공 공정과 그 때의 공구 형상까지 검토해야 한다.

2. 기어장치에서의 소음진동 원인

기어의 소음진동에 영향을 주는 요인은 축정렬 오차(shaft misalignments)와 치형 변형이다. 축정렬 오차가 발생하면 완전한 공액 치면의 기구학적 조건이 깨지면서 일차적으로 치접촉부에 치간섭(teeth interference)이 발생한다. 그 이유는 치간격이 축정렬 오차의 이전 상태처럼 등간격으로 유지되지 못하고 변동되기 때문이다. 즉, 치접촉시 기어 이 사이의 간격이 변하면 먼저 물렸던

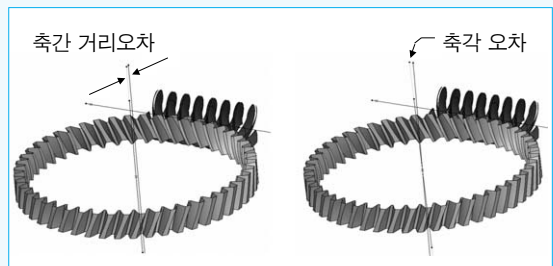


그림 7 축간 거리오차(좌)와 축각 오차(우)

기초강좌

기어가 물림에서 벗어나는 과정 혹은 새로운 기어 물림이 시작되는 시점에서 삽입되는 기어의 모서리가 상대 기어의 치면에 부딪히는 일이 발생한다. 또 인접한 기어의 치접촉부가 분리되고 다시 붙는 거동이 반복되면서 치면이 충돌되면서 치접촉부에 소음진동이 발생한다. 이러한 치간섭으로 인한 기어 소음을 래틀노이즈(rattle noise)라 하는데 날카로운 소리를 내기 때문에 귀에 거슬리는 음이다. 축정렬 오차로 인하여 치접촉부의 기구학적 물림 조건이 깨지면 속도비가 변하는데 이를 치합전달오차(transmission error of gear mesh)라 한다. 치합전달오차는 회전체에 고주파 회전속도의 변화로 인한 관성토크에 의하여 화인노이즈(whine noise)를 발생시킨다.

축정렬 오차는 축간 거리오차(shaft distance error)와 축각 오차(shaft angle error)로 구분한다. 축간 거리오차란 두 축 사이의 간격이 변하는 경우이다. 축각 오차는 두 기어의 회전축 사이의 축각이 변하는 경우이다.

평행축 기어에 사용되는 인볼류트 치형은 축간 거리오차는 완벽하게 흡수할 수 있는 특성을 가지고 있다. 반면에 축각 오차는 흡수할 수 없기 때문에 리드(lead)방향 치형수정(tooth modification)을 하여 모서리부의 치간섭을 방지해야 한다. 그런데 비평행축 기어에 사용되는 치형은 대부분 축간 거리오차와 축각 오차를 모두 흡수하지 못

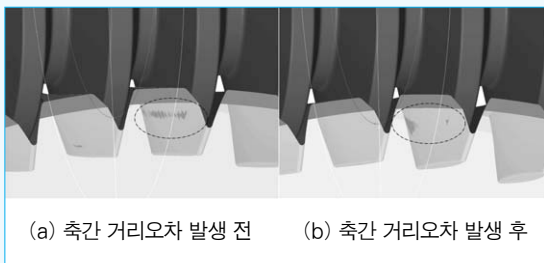


그림 8 축간 거리오차에 의한 ZI웜기어의 치접촉 상태

한다. 그러나 웜기어장치에서 ZI웜과 인볼류트 워휠의 결합의 경우는 인볼류트 헬리컬기어 결합과 같이 축간 거리오차를 흡수할 수 있다. 그림 8은 ZI웜과 ZI웜의 공역 워휠(비 인볼류트)의 물림에서 중심거리가 0.4% 변화하였을 때 치접촉이 모서리쪽으로 치우치는 현상을 보여준다.

표 1은 축정렬 오차 흡수 능력을 정리한 표이다. 현재 산업분야에 보급되어 사용되고 있는 기어는 대부분 축정렬 오차를 흡수하지 못한다. 그 중에 인볼류트 스퍼/헬리컬기어만 축간 거리오차를 흡수할 수 있다. 구형 인볼류트 베벨기어는 축각 오차를 흡수할 수 있지만 절삭방법이 개발되지 않아서 이론에만 그치고 있다. 웜기어에서는 ZI웜과 인볼류트 헬리컬기어가 결합했을 경우에만 축간 거리오차를 흡수할 수 있다. 결론적으로 대부분의 비평행축 기어는 축간 거리오차와 축각 오차 모두를 흡수할 수 없다. 따라서 축정렬 오차 관리를 위해서 인볼류트 헬리컬기어에서의 노력에 약 5배 이상을 기울여야만 인볼류트 헬리컬기어와 같은 수준의 소음진동의 성능을 유지할 수 있다.

기어장치에 축정렬 오차가 없어도 치형이 변형

표 1 기어의 축정렬 오차 흡수 능력

기어의 종류	축간 거리오차	축각 오차
인볼류트 스퍼 및 헬리컬기어	o	x
구형 인볼류트 베벨기어	x	o
옥도이달형 베벨기어	x	x
하이포이드기어	x	x
웜기어	ZA	x
	ZN	x
	ZK	x
	ZI	△

되면 기어는 원활하게 물리지 못하고 소음진동을 유발시킨다. 기어의 치형은 공구관리의 미흡으로 인한 가공 오류, 하중에 의한 탄성변형, 그리고 치형 수정에 의해 이론적인 치형으로부터 벗어나게 되는데 이에 따라 치접촉부는 기구학적 물림 조건이 깨지게 된다. 이 경우도 치간섭과 치합전달오차가 모두 발생할 수 있다. 그러나 치형의 변형이 심하지 않는 경우는 치간섭보다는 치합전달오차가 더 크게 나타난다.

3. 진동저감 대책

비평행축 기어에서 발생하는 소음진동은 평행축 기어에서 발생하는 경우보다 더 심하고 저감 대책 또한 어렵다. 그 근본적인 이유는 대부분의 비평행축 기어에 사용되는 치형이 축간 거리와 축각 오차 모두에 대하여 매우 민감하게 반응하기 때문이다. 평행축 기어인 원통형 인블류트 치형은 축간 거리오차는 흡수되기 때문에 베어링 유격과 백래시의 여유 공간 내에서 치간섭과 치합전달오차가 가장 적은 방향으로 스스로 자리를 잡게 된다. 따라서 비교적 손쉽게 소음진동을 잡을 수 있다. 그러나 비평행축 기어에서는 축간 거리오차와 축각 오차 모두에 대하여 치간섭과

치합전달오차를 피할 수 없게 된다. 현장 기술자들이 평행축 기어에서 겪은 경험을 그대로 워기어나 하이포이드기어에도 같은 결과를 기대하는 경우가 있다. 그러나 워기어 및 하이포이드기어 모두 축간 거리오차를 허용하지 않기 때문에 백래시 조절로 해결되지 않는다. 유일한 방법은 철저한 측정렬 오차 관리와 치형 관리뿐이다.

(1) 측정렬 오차 관리

베벨기어장치에는 이론적인 꼭지점이 있다. 베벨기어에서의 측정렬 오차 관리는 이 꼭지점이 설계 위치에서 이탈되지 않도록 하고 축각을 90°로 유지시키는 것을 의미한다. 따라서 축간 거리오차 최소화를 위해서 추력베어링의 유격을 가능한 한 적게 되도록 베어링 지지부를 설계해야 하고 축각 오차 최소화를 위해서는 항상 90°가 유지되도록 케이스의 베어링 홀을 정밀하게 가공한다.

워기어는 치형의 종류가 다양하기 때문에 워사프트와 워휠이 어떤 형의 워기어인지를 확인하여 공액 치면과의 결합이 이루어지도록 치형 관리를 우선적으로 실시해야 한다. 지금까지 워기어는 크게 정밀을 요구하는 장치에는 사용되지 않았다. 따라서 비 공액 치면을 결합하는 경우에

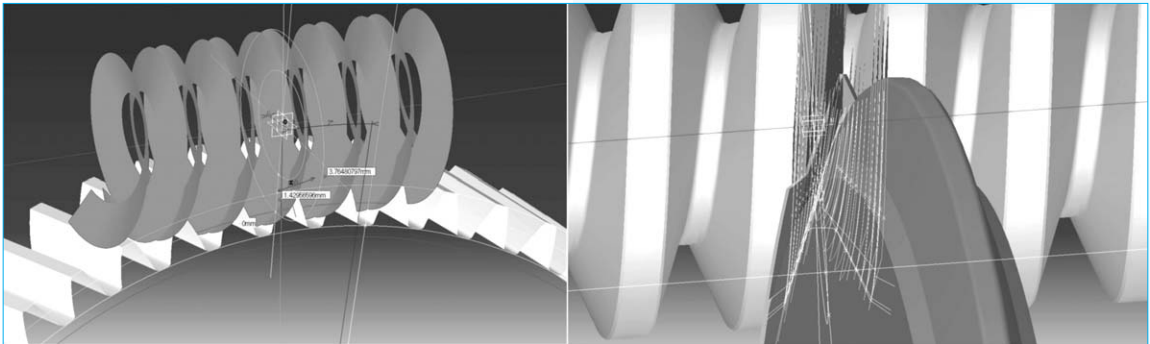


그림 9 CATIA를 이용한 CVVL용 워기어 치형 설계

기초강좌

도 큰 문제없이 허용될 수 있었다. 그러나 정밀 기계에서는 원칙을 지키지 않으면 근본적인 진동 문제는 해결되지 않고 따라서 우수한 성능을 기대할 수 없다. 워기어는 축각을 90° 로 유지시키고 일정한 축간 거리를 유지해야 한다. 엔지니어들이 워기어를 취급할 때 종종 헬리컬기어처럼 생각하여 축간 거리 관리에 소홀히 하는 경우가 있다. 그러나 워기어에서는 헬리컬기어장치와 달리 축간 거리도 항상 일정하게 유지시켜 줘야 한다. 다만 표 1에서 ZI워와 헬리컬기어의 결합의 경우는 축간 거리를 조절할 수 있다. 최근 자동차 엔진의 연비 제고를 위한 수단으로 CVVL(continuous variable valve lift) 혹은 VCR(variable compression ratio)기구의 제어용으로 워기어 장치가 적용되는 경향이 있다.

적어도 엔진 부품으로 사용될 경우는 일반 산업용 감속기에 사용되는 정밀도보다는 더 엄격한 수준을 요구하기 때문에 상기와 같은 소음진동 문제에 노출되지 않기 위해서는 축정렬 오차 관리를 철저히 해야 한다.

T자형 동력전달용 기어요소에 과거에는 베벨

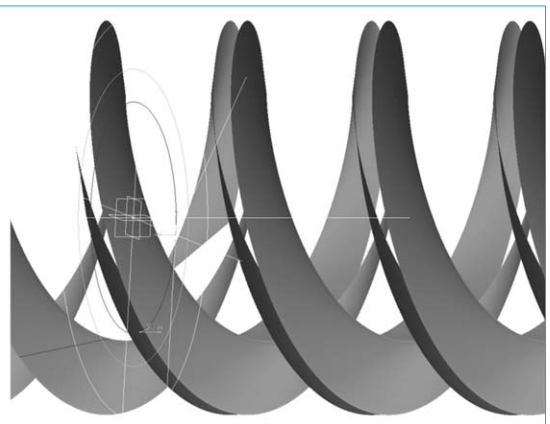
기어가 주로 사용되었지만 점차 하이포이드기어가 늘어나고 있다. 실 예로 최근 저상 액슬이 승/상용차에 적용되는 추세이다. 하이포이드기어는 철저히 그리슨사의 전용기에 의존되어 있어서 설계/가공/검사/유지 관리 모든 면에서 그 회사의 엔지니어링에 의존되어 있다. 그래서 치면 형상이 어떤 기구학적 특성을 가지고 있는지에 대한 자료가 부족하고 소음진동이 발생할 경우 대응할 수 있는 방안도 많지 않다. 그렇지만 하이포이드기어의 치형은 전용기 가공 공정에 의해 정해지는 치형이기 때문에 축정렬 오차에 매우 민감하다는 사실은 자명하므로 축정렬 오차 관리를 철저히 하는 것이 최선의 방안이다. 즉 하이포이드기어를 설치하고자 하는 케이스와 베어링 홀의 정밀도를 높여서 축정렬 오차를 최소화해야 한다.

(2) 치형 관리

대부분 기어가공용 공구 제작은 외국에 의뢰한다. 그런데 공구를 잘못 제작하여 도면상의 기어 대신에 잘못된 기어를 깎음으로써 발생하는



(a) Profile error 측정



(b) Profile error를 고려한 3D 치면 모델링

그림 10 공구관리 및 측정장치 CAD화

소음진동 문제도 많이 발생한다. 따라서 공구가 제대로 된 것인지를 확인하는 과정이 반드시 필요하다. 이를 위해서는 각 기어가 어떤 방식으로 절삭되는지에 대하여 알고 있어야 하며 의뢰한 공구의 치면 형상을 3D CAD파일로 자체적으로 확보해 놓아야 하고 마스터 기어가 준비되어 있어야 한다. 또한 공구를 검사할 수 있는 측정장치가 구비되어야 한다. 이러한 공구 관리의 혼선은 평행축 기어에서는 거의 발생되지 않는다. 그러나 비평행축 기어, 특히 워기어에 대하여 국내에서는 빈번하게 발생되고 있는 것이 사실이다. 그래서 워기어를 가공할 때는 치형의 종류와 그에 대한 가공 대책에 일관성을 가지고 관리되어

야 한다.

기어에 하중이 걸리면 치 변형이 생겨서 치간섭이 발생할 수 있다. 이와 같이 하중 변형에 의한 치간섭을 회피는 것으로 치형수정이 사용된다. 기어 치의 하중 변형은 피할 수 없기 때문에 치형수정은 공통적으로 적용되는 수단이다. 이것은 측정열 오차 관리와 치형 관리의 모든 수단이 검토된 후 최종적으로 검토되어야 할 단계이다. 특히 고동력의 동력장치에 사용되는 기어 장치에서 치형수정은 매우 중요한 진동저감 수단이 된다. 치형수정은 평행축 및 비평행축 기어장치 전 분야에 적용되는 사항이다.

치형 수정에는 리드수정과 프로파일 수정으로

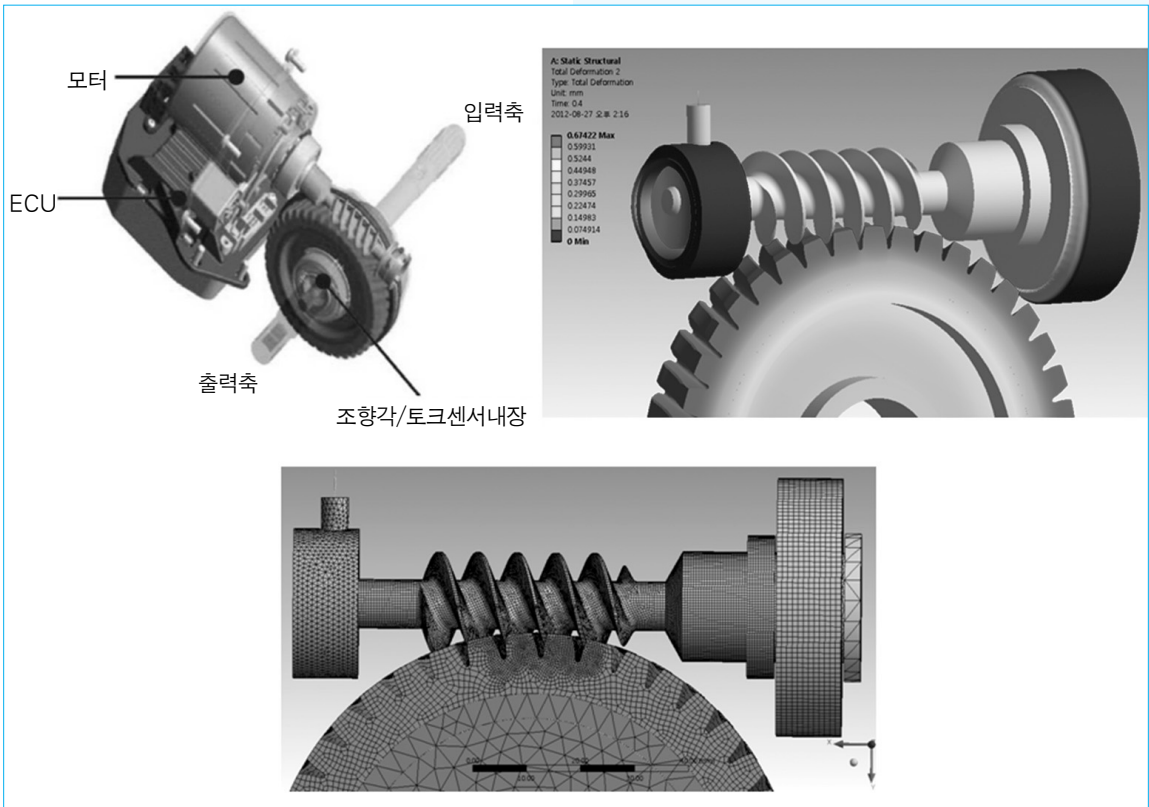


그림 11 승용차 조향장치용 MDPS(출처-<http://carInc.com/>)

기초강좌



그림 12 케이스 변형을 고려한 풍력발전기용 기어박스 치형수정

나누어진다. 리드 수정은 축각 오차로 인하여 기어의 측면 모서리 부가 치면과 맞닿는 것을 방지하기 위한 수단이다. 프로파일 수정은 치가 굽힘 변형으로 인하여 이웃하는 상대 치면에 부딪히는 것을 완화시키기 위해 모서리를 쳐 내는 것이다. 치형 수정을 하므로써 치간섭을 회피할 수 있는데 치형수정량은 특별히 정해지지 않고 설계자의 판단에 의존한다. 그러나 최근 설계 단계에서 기어박스 변형해석을 통하여 최적의 치형수정량을 산출하여 정하는 경우도 있다. 치간섭을 피하기 위해서 치형수정이 필요하지만 또한 치

형 오차를 가져오므로 치합전달오차가 추가된다. 따라서 모순적인 관계를 적절히 설계함으로써 실무에 적용하는 것이 가장 적절한 진동저감 방안이라 할 수 있다.

4. 맺음말

비평행축 기어장치에서 축정렬 오차는 소음 진동에 매우 민감하게 작용함을 알 수 있다. 기술자들이 종종 혼선을 빚는 것은 인블루트 헬리컬 기어에서 적용하던 기술(축간 거리 변경이 허

용됨)이 비평행축 기어에도 통용된다고 생각하는 것이다. 그러나 비평행축 기어의 거의 대부분이 축간 거리오차를 흡수할 수 없기 때문에 그대로 적용될 수 없다. 또한 공구관리 측면에서도 많은 문제를 안고 있다. 공구 제작은 거의 외국 업체에 의뢰하고 있는데 그 공구가 제대로 제작되었는지에 대한 의뢰자 측의 검사기술이 미흡한 실정이다. 평행축 기어장치에 대한 검사 관리는 거의 문제가 없다. 그러나 비평행축 기어장치에 대한 경우는 열악하기 때문에 종종 잘못된 공구를 사용하는 경우가 있다. 그러므로 기존 기어 측정장치를 활용하고 컴퓨터 그래픽 툴을 이용한 대응 방안이 자체적으로 개발될 필요가 있다.

이번 강좌가 비평행축 기어의 소음진동에 관한 문제 해결에 작은 도움이 되었기를 바란다. **KSNVE**

참고 문헌

- (1) Dudas, I., 2000, The Theory and Practice of Worm Gear Drives, PENTON PRESS, LONDON.
- (2) Crosher, W. P., 2002, Design And Application Of The Worm Gear, NEW YORK ASME PRESS.
- (3) AGMA 929-A06, Calculation of Bevel Gear Top Land and Guidance on Cutter Edge Gears.
- (4) AGMA 932-A05, Rating the Pitting Resistance & Bending Strength of Hypoid Gears.
- (5) ANSI/AGMA 2003-B97, Rating the Pitting Resistance and Bending Strength of Generated Straight Bevel, ZEROL Bevel and Spiral Bevel Gear Teeth.
- (6) ANSI/AGMA 2008-C01, Assembling Bevel Gears.
- (7) ANSI/AGMA 2009-B01, Bevel Gear Classification, Tolerances and Measuring Methods.
- (8) ANSI/AGMA 6034-B92, Practice for Enclosed Cylindrical Wormgear Speed Reducers and Gearmotors.
- (9) ANSI-AGMA 6135-A02, Design, Rating and Application of Industrial Globoidal Wormgearing (Metric Edition).