

◆특집◆ 기어

## 궤도차량 변속기 구동용 베벨기어의 개선설계

정재웅<sup>\*,#</sup>, 김광필<sup>\*\*</sup>, 지현철<sup>\*\*</sup>, 문태상<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>국방기술품질원 창원센터, <sup>\*\*</sup>(주)S&T 중공업

### Design Improvement of the Driving Bevel Gear in Transmissions of a Tracked Vehicle

Jae-Woong Jung<sup>\*,#</sup>, Kwang-Pil Kim<sup>\*\*</sup>, Hyun-Chul Ji<sup>\*\*</sup>, Tae-Sang Moon<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Changwon Center, DTaQ, <sup>\*\*</sup>S&T Dynamics Co., Ltd.

(Received 5 December 2015; received in revised form 9 December 2015; accepted 11 December 2015)

#### ABSTRACT

Transmission of a tracked vehicle designed for multiple functions such as steering, gear-shifting, and braking is a core component of heavy vehicle to which the power is transferred based on combined technology of various gears, bearing, and fluid machineries. Robustness and durability of transmission, however, have been issued due to a large number of driving units and sub-components inside its body. The bevel gears are major components for the transmission of power in a transmission. Increasing the tooth surface roughness and chamfering of the bevel gears, especially, we aim to improve the quality of transmission. In this study, design structural evaluation is conducted on bevel gears of transmission for tracked vehicle using the ROMAX-DESIGNER program. By doing so, design safety of the bevel gears has been evaluated based on the gear strength theory of ANSI/AGMA 2003 B97 standard.

**Key Words** : Bevel Gear(베벨기어), Tracked Vehicle Transmission(궤도차량 변속기), Strength Analysis(강도해석), Bending Stress(굽힘응력), Contact Stress(접촉응력)

#### 1. 서 론

궤도차량의 변속기는 조향, 변속 및 제동 등의 복합적인 기능을 발휘하도록 설계되어 졌으며, 고중량의 차량을 구동하기 위한 다양한 기어와 베어링 및 각종 기기의 조합으로 동력이 전달되는 품목으로써, 많은 운동부와 단품 수로 인해 구조적인 안

정성과 내구수명에 대한 문제가 제기되어 왔다.

특히, 기어는 동력을 전달할 때의 속도비가 정확하고 전달 효율이 좋으므로 거의 모든 분야의 기계 장치나 기계 구조물에서 오래 전부터 광범위하게 사용되고 있으며, 그 성능을 높이기 위한 연구 또한 기어나 기어 시스템의 구성과 형상, 변형이나 하중 및 응력 분포의 문제, 동력 전달시 야기되는 진동과 소음 문제 등의 많은 분야에서 예로부터 지금까지 활발히 연구되고 있다.

최근에는 기술과 공업의 발달에 따라 고부하, 고속화, 경량화, 저소음화가 요구됨으로써, 더 정확한

# Corresponding Author : jjw1148@naver.com  
Tel: +82-55-279-4128, Fax: +82-55-287-4780

해석과 신뢰성 있는 설계가 필요하게 되었다.<sup>[1]</sup>

본 연구에서는 기어 해석 상용 프로그램인 ROMAX Designer(Romax Technology, England)<sup>[2]</sup>를 사용하여 설계 개선된 퀘도차량 변속기 베벨기어의 굽힘 응력 및 접촉 응력 해석을 수행하고, 국내외에서 가장 널리 사용되고 있고 타당성을 인정받고 있는 ANSI/AGMA 2003 B97 규격과 비교하여 변속기 구동기어인 베벨기어의 강도를 분석하여 설계 안전성을 검토하고자 한다.

## 2. 베벨기어 개선설계

본 연구의 베벨기어는 퀘도차량 변속기의 발전기 구동용 베벨기어로서 엔진에 의해 구동되고 엔진이 가동할 때 회전한다. 베벨기어 개선설계는 현재의 베벨기어의 치합 상태 및 외관 (치 표면조도 등)의 품질문제가 지속적으로 발생되어 품질 개선 및 품질 안정화를 위하여 주요사양을 수정 보완하여 수행되었다. 즉, 치면 조도 및 치절 후 끝단부 면취량 증대에 중점을 두어 수행하였다.

Fig. 1과 Fig. 2는 베벨기어의 형상을 나타낸 것이고, Table 1에 개선 사항을 나타내었다. 표와 같이 치 표면에 공구 가공결을 제거하기 위해 공구 교환주기를 단축하였고 치절 공정을 1 Step cutting에서 2 Step cutting으로 변경하여 조도를 개선하였다. 또한, 치 끝단이 날카로워 찍힘 현상이 자주 발생하여 면취량을 0.1mm에서 0.5mm까지 증대하였다.



Fig. 1 Driving Bevel Gear



Fig. 2 Mating Bevel Gear

Table 1 Design improvement of bevel gear

Before Improvement	After Improvement

Table 2 Bevel gear data

	Driving Bevel Gear	Mating Bevel Gear
Number of teeth	33	21
Pitch diameter (mm)	107.983	62.550
Type of teeth	Gleason Bevel Gear	
Transverse pressure angle	20°	
Angle of shaft axes	90°	
Helix angle	35° LH	35° RH

Table 2는 구동 베벨기어와 피동 베벨기어의 형상에 관한 자료이고, Table 3은 베벨기어의 기계적 성질을 나타내었다.

**Table 3 Material properties**

Material properties	SNCM220
Tensile Strength (Ultimate) (MPa)	850
Tensile Strength (Yield) (MPa)	560
Tooth Hardness core (HRC)	20
Tooth Hardness side (HRC)	60
Allowable Bending Stress (MPa)	360
Allowable Contact Stress (MPa)	1700
Young's Modulus (GPa)	205
Poison's Ratio	0.29

### 3. 기어 적용 규격

AGMA는 미국의 기어 및 감속기, 가속기 제조업자들이 주축이 되어 1916년 설립되었으며 공업용 기어의 용어, 재료, 설계, 검사 등에 관한 표준 제정을 목적으로 활동하고 있다. 미국, 캐나다, 멕시코 등 기어 제작에 관련하는 전 세계 30여 국의 400여 기업 및 기관 회원이 등록되어 있다. 미국 표준원(ANSI)으로부터 미국표준 개발기구로 지정되어 있으며, 국제표준화기구(ISO) 내에 기어관련 표준을 제정하는 기술위원회(TC60)에서 주체적인 역할을 맡고 있다.

AGMA 표준은 약 80여 종 제정되어 있으며 분류번호(세 자리 수)와 세부식별번호(두 자리 수)의 조합으로 표시되지만 최근에는 ANSI표준으로 채택된 경우, 네자리 수의 숫자만 표시하는 것으로 변경되었다.

#### 3.1 굽힘 강도 이론<sup>[3][4]</sup>

이뿌리 부분의 굽힘 강도 계산을 위해 처음 제안

된 루이스 식은 기어의 이를 외팔보로 모형화 하여 치저부에서 발생하는 굽힘 모멘트에 의한 강도를 계산하는 식이다. 이 식은 치저 부분이 고정된 것으로 가정하고 정적 굽힘 응력만을 고려 한 경우로 안전한 설계식이라고 할 수 있다.

굽힘 강도는 이 두께에 따라 많은 영향을 받으므로 전위계수와 깊은 관계가 있다. 따라서, 기어 치수 결정 시 전위계수 선정에 주의해야 한다. 굽힘 강도의 기본 계산식은 앞서 설명한 루이스 식 (Lewis equation)을 기본으로 하고, 여기에 여러 가지 수정 계수를 첨가한 것이 ANSI/AGMA 2003 B97 굽힘 강도 계산식이다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$S_{wt} = \frac{S_{at} K_L}{S_F K_T K_R} \tag{1}$$

$$S_t = \frac{W^t}{F} P_d K_o K_v \frac{K_s K_m}{K_x J} \tag{2}$$

여기서 식 (1)에서의  $S_{wt}$ 는 재료의 특성 및 형상과 관련된 허용 굽힘응력이며, 식 (2)에서의  $S_t$ 는 이 뿌리에서 발생하는 굽힘응력이다.  $S_{at}$ 는 재료의 허용굽힘응력,  $K_L$ 는 굽힘응력을 위한 수명계수,  $S_F$ 는 굽힘안전계수,  $K_T$ 는 온도계수,  $K_R$ 는 굽힘응력을 위한 신뢰도계수,  $W^t$ 는 접선방향전달력,  $P_d$ 는 외부직경피치,  $F$ 는 치 폭,  $K_o$ 는 부하계수,  $K_v$ 는 굽힘응력을 위한 동하중계수,  $K_s$ 는 굽힘응력을 위한 크기계수,  $K_m$ 는 굽힘응력을 위한 하중분포계수,  $K_x$ 는 굽힘응력을 위한 길이곡률계수,  $J$ 는 굽힘응력을 위한 기하계수를 각각 의미한다.

#### 3.2 면압 강도 이론<sup>[3][4]</sup>

면압 강도는 두 개의 기어가 접촉할 때 기어의 표면이 수명시간 내에 견딜 수 있는 하중을 결정하기 위한 값이다. 따라서 면압 강도는 기어의 경도 및 조도, 재질의 종류와 열처리 방법과 기어 사용 시간등과 관련이 있다.

면압 강도의 기본 계산식은 곡선 형태를 가진

두 표면이 접촉할 때 발생하는 접촉응력을 계산하기 위한 헤르쯔(Hertz) 응력 계산식을 기본으로 한다. 여기에 여러 가지 수정 계수를 입력한 것이 ANSI/AGMA 2003 B97 면압 강도 계산식이다. 기어의 접촉면에 최대 접촉응력이 발생하며, 이 응력이 재료의 특성과 형상 등에 관련된 허용 접촉응력보다 같거나 작아야 한다. 이를 만족하지 못하면 기어의 접촉면에서 피로에 의한 파손이 발생한다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$S_{wc} = \frac{S_{sc} C_L C_H}{S_H K_T C_R} \quad (3)$$

$$S_c = C_p \sqrt{\frac{W^t}{F d_p I}} K_0 K_v K_m C_s C_{xc} \quad (4)$$

여기서 식 (3)에서의  $S_{wc}$ 는 재료의 특성 및 형상과 관련된 허용 접촉응력이며, 식 (4)에서의  $S_c$ 는 기어의 접촉면에서 발생하는 접촉응력,  $S_{sc}$ 는 재료의 허용접촉응력,  $C_L$ 는 접촉응력을 위한 수명계수,  $C_H$ 는 접촉응력을 위한 경도비 계수,  $S_H$ 는 접촉 안전계수,  $K_T$ 는 온도계수,  $C_R$ 는 접촉응력을 위한 신뢰도 계수,  $C_p$ 는 탄성계수,  $W^t$ 는 접선방향 전달력,  $F$ 는 치 폭,  $d_p$ 는 치(이)수/ 외부 횡지름 피치,  $I$ 는 면압강도를 위한 기하계수,  $K_0$ 는 부하계수,  $K_v$ 는 굽힘응력을 위한 동하중계수,  $K_m$ 는 굽힘응력을 위한 하중분포 계수,  $C_s$ 는 면압강도를 위한 크기계수,  $C_{xc}$ 는 면압강도를 위한 크라운잉(Crowning) 계수이다.

## 4. 베벨기어 강도평가

### 4.1 해석 모델링

구동 베벨기어는 그리슨 식 치형으로 33개의 잇수, 입력각 20도, 나선각 35도의 형상이고, 피동 베벨기어는 21개의 잇수를 가지고 있고 구동 베벨기어와 동일한 그리슨 식 치형, 입력각 20도, 나선각 35도의 형상이다. 모델링은 불필요한 부분은 제거하고 간략화 하여 ROMAX Designer 프로그램으로 수행하였다. 모델링 형상은 Fig. 3과 같다.

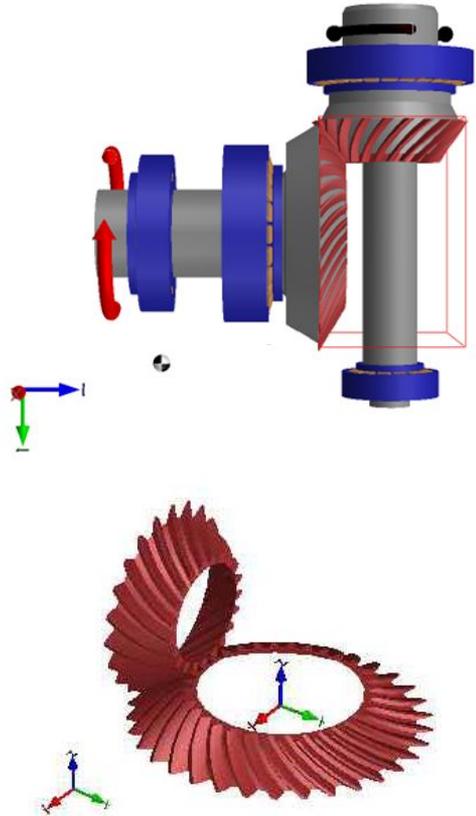


Fig. 3 ROMAX designer modeling of driving and dating bevel gear

### 4.2 해석 경계조건 및 하중조건

케도차량 변속기의 기어는 고강도의 기어가 요구된다. 따라서, 본 연구의 케도차량 변속기 베벨기어에 사용하는 재료는 기계 구조용 합금강인 SNCM220을 사용하였다. SNCM220은 침탄표면처리가 가능한 소재로 Ni-Cr강에서 Ni의 양을 줄이고 Mo를 첨가한 강이다. 기계적 성질이 우수하고, 내마멸성 증대, 고온강도가 크며, 담금질 성능향상, 우수한 용접성 등의 장점을 가지고 있으며, 각종 차축, 기어, 강력 볼트, 암, 레버 등에 쓰이는 재료이다.

**Table 4 Boundary and load conditions**

Preconditions	Conditions
Temperature (°C)	70
Speed (RPM)	3000
Maximum power (kW)	76
Operating Time (hr)	330

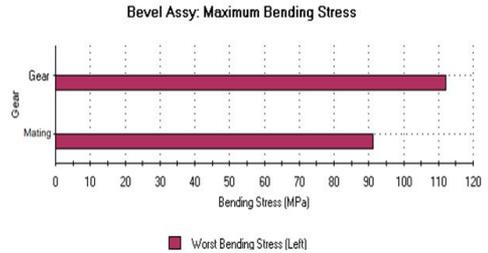
베벨기어에 적용되는 동력 입력 조건은 엔진 최대 3000rpm에서 최대 76kW이고, 작동시간은 최대 입력동력 조건으로 변속기 내구도 10,000km 주행거리를 산정한 330 시간으로 하였다. 또한, 궤도차량 변속기 내부 평균온도는 70 °C로 가정하였다. 해석 입력조건은 Table 4에 나타내었다.

### 4.3 해석 결과

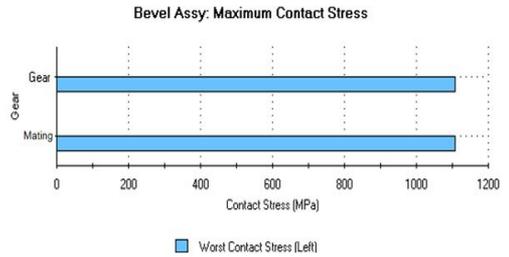
기어의 치저부 응력은 치가 접촉을 시작 할 때 발생하여 치가 분리되면 소멸된다. 이는 구동기어와 피동기어의 접촉면에서 작용 및 반작용의 원리에 의해 접촉면에 수직한 힘을 주고받기 때문이다.<sup>[5]</sup>

본 연구에서는 ROMAX Designer 프로그램으로 궤도차량 변속기의 베벨기어 강도해석을 위해 재료의 물성치, 해석 입력조건을 각각 입력하여 강도 해석을 수행하였다.

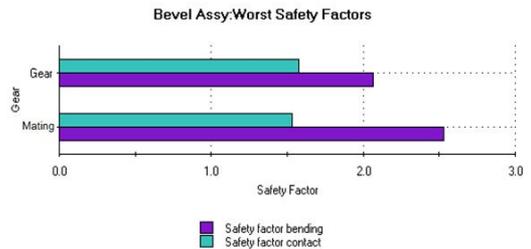
Fig. 4는 굽힘 응력의 해석 결과를 그래프로 나타낸 것이고, Fig. 5는 접촉 응력의 크기를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프를 분석해 보면 구동 베벨기어에서 약 112 MPa의 굽힘 응력이 발생하고, 피동 베벨기어에서 약 91 MPa의 굽힘 응력이 발생한다. 또한, 접촉 응력을 분석하여 보면 양 베벨기어에서 약 1109 MPa이 발생한다는 것을 알 수 있었다. Fig. 6은 ROMAX Designer 프로그램을 이용하여 해석결과 값을 토대로 양 베벨기어의 안전율을 나타낸 그래프이다. 결과 값을 분석해 보면 구동기어는 굽힘 응력에



**Fig. 4 Bending stress analysis of bevel gears**



**Fig. 5 Contact stress analysis of bevel gears**



**Fig. 6 Safety factors analysis of bevel gears**

대해 약 2.1, 접촉 응력에 대해 약 1.6의 안전율을 가지고, 피동기어는 굽힘응력에 대해 약 2.5, 접촉 응력에 대해 약 1.6의 안전율을 가지는 것을 알 수 있었다. 안전율은 AGMA 2003의 기준에 의하여 산출되었고, ISO 10300<sup>[6]</sup>에 나타나 있는 최소 접촉응력의 안전율 1.0, 굽힘응력 1.3 이상을 유지하고 있기 때문에 베벨기어의 강도 안전성은 확보되었다고 할 수 있다. 각 베벨기어의 해석 결과들을 Table 5와 같이 정리하였다.

**Table 5 Strength analysis results**

		Driving Bevel Gear	Mating Bevel Gear
Bending stress		112	91
Contact stress		1109	1109
Safty factor	Bending	2.1	2.5
	Contact	1.6	1.6

## REFERENCES

1. Park S. J. "The embodiment technique of involute gear tooth profile" DTaQ, 2007.
2. ROMAX technology, 2003, "ROMAX Designer Training for Transmission Engineering"
3. ANSI/AGMA 2005-C96, "Design Manual for Bevel Gears"
4. ANSI/AGMA 2003-B97, "Rating the Pitting Resistance and Bending Strength of Generated Straight Bevel, Zerol Bevel and Spiral Bevel Gear Teeth"
5. Hong,J.P, 2007, " Machine design", pp 633~738.
6. ISO 10300, "Calculation of load capacity of bevel gears"

## 5. 결 론

케도차량용 변속기 베벨기어의 굽힘 응력 및 접촉 응력 해석을 ROMAX Designer를 사용하여 강도 평가를 수행하였고, ANSI/AGMA 2003 B97 Standard를 이용하여 허용응력을 검토하면서 설계개선에 대한 검증을 수행하였다. 이를 통해 다음의 내용을 확인 할 수 있었다.

1. 베벨기어의 설계개선 내용은 치 표면에 공구 가공결을 제거하여 조도를 개선하였고, 치 끝단이 날카로워 찍힘 현상이 자주 발생하여 면취량을 증대하였다.
2. 해석결과, 구동 베벨기어에서 약 112 MPa의 굽힘 응력이 발생하고, 피동 베벨기어에서 약 91 MPa의 굽힘 응력이 발생하였다. 안전율은 구동 베벨기어에서 약 2.1, 피동 베벨기어에서 약 2.5 이었다.
3. 접촉 응력을 분석하여 보면 양 베벨기어에서 약 1109 MPa이 발생하였고, 안전율은 약 1.6 이었다.
4. 안전율 1 이상을 유지하고 있지 때문에 개선된 베벨기어는 강도설계의 안전성을 만족하고 있다고 판단된다.