

유한요소해석을 통한 특수차량용 선회베어링의 구조 안전성 평가

서현수^{1*}, 이호준¹, 안태수²
¹국방기술품질원, ²원진엠엔티

Structural Stability Evaluation for Special Vehicle Slewing Bearing using Finite Element Analysis

Hyun-Soo Seo^{1*}, Ho-Jun Lee¹, Tae-Su An²
¹Defence Agency for Technology and Quality,
²Wonjin Machine & Technology

요약 저고도 비행으로 접근하는 적 비행 체계를 신속한 대응 사격으로 제압하는 대공화기용 특수 차량에 차체와 포탑의 회전동력 전달에 선회 베어링이 적용되고 있다. 특수 차량의 전투 임무 수행 과정에서 포탑 하중과 사격 시 발생하는 충격 하중 등이 복합적으로 작용할 때 구조적 안정성이 확보되어야 성공적인 기능 발휘가 가능하다. 선회 베어링의 구성품 중 링기어, 롤러 및 와이어 레이스의 형상과 소재 특성을 고려하여 차량의 포탑 구동과 사격에 의해 작용하는 복합 하중에 대한 구성품의 안정성을 평가하고자 하였다. 안정성 평가를 위한 연구 방법으로는 공학 이론을 바탕으로 구성품의 강도 특성을 수치적 계산을 통해 살펴보고, 다음으로 상용 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 구성 부품들에 대한 유한 요소 해석을 수행하였다. 이론적 해석과 유한 요소 해석 결과의 상호 비교 결과 매우 유사함을 확인할 수 있었다. 해석 중심으로 수행된 선회 베어링에 대한 구조 안정성 평가 결과로 보아 국산화 개발초기 예비 설계 단계에서 결정한 선회 베어링의 설계 강도가 충분함을 확인하였다.

Abstract Slewing bearing is applied to the transmission of rotational power of the body and turret in a special vehicle for anti-aircraft weapons that overcomes the enemy flight system approaching at low altitudes with rapid response fire. When the turret load and impact load generated when shooting are combined in performing the combat mission of a special vehicle, structural stability must be secured to achieve a successful function. Among the components of the slewing bearing, the stability of the components against the complex loads acting by the turret drive and shooting was evaluated by considering the shape and material characteristics of the ring-gear, roller, and wire-race. As a research method for stability evaluation, based on engineering theory, the strength characteristics of the components were examined by numerical calculations. Finite element analysis was performed on components using the ANSYS analysis program. The results of theoretical analysis and the results of finite element analysis were very similar. A structural stability evaluation for the slewing bearing, which was performed mainly on the analysis, confirmed that the design strength of the slewing bearing determined in the preliminary design in the early stage of localization development was sufficient.

Keywords : Slewing Bearing, Stability Evaluation, Finite Element Analysis, Wire Race, Special Vehicle

본 논문은 국방기술품질원의 선회베어링 부품국산화개발 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Hyun Soo Seo(Defence Agency for Technology and Quality)

email: hyunsoo@dtqa.re.kr

Received September 7, 2020

Accepted January 8, 2021

Revised October 15, 2020

Published January 31, 2021

1. 서론

일반적으로 선회베어링이란 회전하는 기계장치의 축을 일정한 위치에 고정하고 지지하면서 축을 회전시키는 기능을 하는 기계요소부품으로 현재 우리 군에서 운용되고 전차, 장갑차, 자주포 등 차체와 포탑으로 구성되는 특수차량류에 널리 적용되고 있는 기계요소이다.

특히 대공화기용 특수차량의 경우 저고도로 비행하여 접근하는 적 비행체계에 대해 신속히 반응하여 대응사격을 함으로써 제압하는 방공임무를 수행한다. 이러한 대공방어 임무수행을 위한 작동과정에서 대증량의 포탑 하중과 발포사격 시 발생하는 충격하중이 차량 구조물에 가해지게 되는데 이를 지지하며 포탑을 원활하게 회전하게 하는 기계요소가 선회베어링이다. 이같이 선회베어링은 특수차량의 포탑 하중과 발포사격에 따른 충격하중을 복합적으로 지지해야 하기 때문에 복합하중에 대해 구조적으로 충분한 안정성이 확보되어야 만 전투상황 시 부여된 임무를 성공적으로 수행할 수 있는 것이다. 이러한 복합하중을 받는 선회베어링은 군사용 특수 차량 뿐만 아니라 건설기계, 중장비, 크레인 등 다양한 차량과 장비에 있어서 주요 기능부품으로 널리 사용되고 있다. 최근까지 선회베어링에 대해 주로 이루어진 연구내용을 살펴보면 베어링의 접촉응력분포에 관한 연구[1], 볼베어링과 와이어 레이스의 예비하중 결정에 관한 연구[2,3], 선회베어링의 강성에 대한 이론 및 실험적 방법에 관한연구[4] 베어링 하중에 따른 베어링 변형파손 및 수명에 관한연구[5~7], 굴삭기용 선회시스템의 저소음화를 위한 기어 최적설계에 관한 연구[8] 등이 진행되었으나, 베어링, 롤러 그리고 와이어레이스로 구성된 선회베어링의 구조적인 안정성 측면에 대한 연구는 드문 실정이다.

또한 선회베어링과는 구조적으로 다소 차이는 있겠지만 동력전달장치로 널리 사용되는 기계요소인 기어에 대해 Karaveer[9,10] 등은 스피어 기어의 접촉응력에 대해 Hertz equation과 상용해석프로그램인 ANSYS 14.5를 이용한 유한요소해석을 통해 기어의 파손과 마모에 작용하는 응력연구를 실시한 바 있다. 이와 같은 접근 방법을 참조하여 군사용 특수차량의 선회베어링에 대한 구조적 안정성 평가에 관한 연구가 필요하게 되었다.

본 연구는 현재 군수품 분야의 부품국산화 과제로 개발 중인 대공화기용 특수차량에 적용된 선회베어링의 주요 부품들 중 링기어, 롤러 및 와이어 레이스의 형상과 소재 특성을 고려하여 포탑의 구동과 사격 시 작용하는 복합하중에 대한 구성품의 안정성을 평가하고자 하였다.

먼저 공학이론을 바탕으로 구성품의 강도특성을 수치적 계산을 통해 살펴보고, 다음으로 상용 해석프로그램인 ANSYS를 이용하여 구성부품에 대한 유한요소해석을 수행한 후 이론적인 계산결과와 상호 비교분석을 통해 구조적 안정성을 평가하고자 한다.

2. 본론

2.1 선회베어링의 구조 및 경계조건

2.1.1 선회베어링의 구조와 작동원리

본 연구의 대상인 선회베어링은 직경이 2m가 넘는 대형 구조물로서 그 형상과 내부 구조는 Fig. 1과 같다. 외부 구조물인 링기어(Ring Gear), 외측링(Outer Ring), 내측링(Inner Ring)이 상대 물체에 구속되어 지지되며, 내부의 와이어 레이스(Wire Race)와 롤러(Roller)가 구속물체 간에 생기는 접촉마찰을 최소화 함으로써 차량 포탑의 미끄럼 회전운동이 가능하도록 한다.

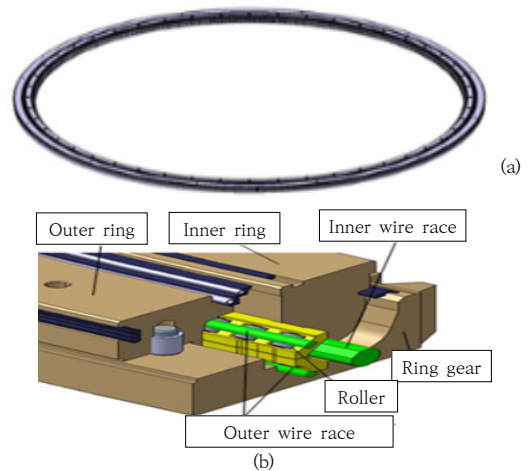


Fig. 1. Slewing bearing
(a) Appearance of slewing bearing (b) Internal structure

이때 와이어 레이스 간 마주보는 면에 경사를 주어 복합적으로 발생하는 하중을 분산시키며, 그 사이에 다수의 롤러를 삽입시켜 고하중에서도 회전운동이 가능하다. 그리고 기타 구성품으로는 외부의 이물질 유입을 막기 위한 시일류, 롤러의 간격을 유지하기 위한 간격유지기, 체결을 위한 볼트와 핀 그리고 시임 등으로 구성된다.

2.1.2 경계조건

선회베어링의 구조적 안정성 평가는 내·외부 구성품 중 Fig. 1 (b)와 같이 부품간의 접촉을 통해 하중 지지와 회전구동력의 전달을 수행하는 와이어 레이스, 롤러 그리고 링기어에 적합한 공학이론식인 Hertz 접촉 이론과 Lewis equation을 이용한 이론적 해석, 상용 해석 프로그램인 ANSYS(R18.2)를 이용하여 3.5 GHz CPU, 32.0 GB RAM, 64 bit WORKSTATION 환경에서 구조해석을 수행하였다.

선회베어링의 구조 안정성 평가를 위한 해석의 경계조건은 군사보안 관계를 고려하여 하중조건만 Table 1에 나타내었다. Table 1은 외부하중에 대한 경계조건으로 차량의 상부 구조물인 포탑의 축방향 하중과 사격에 따른 포신방향의 충격력 그리고 포탑 회전 시 발생하는 링기어의 구동토크로 분류하였다.

Table 1. Load boundary conditions

Launch angle		0°	-10°	45°	85°
Axial load of turret(kN)		67.0	67.0	67.0	67.0
Shooting shock(kN)	Axial	0	-3.1	12.5	17.6
	Radial	17.6	17.4	12.5	1.5
Bearing drive torque(kN·m)		13.98			

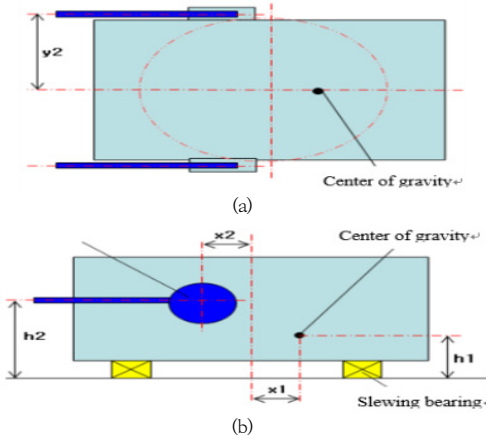


Fig. 2. Location boundary condition (a) Top view (b) Side view

Fig. 2는 포탑에 대한 좌표 경계조건으로서 베어링의 회전축 및 바닥면을 기준으로 포탑의 무게중심과 포신의 회전중심 좌표로 나타내었으나, 상세치수는 군사보안 관계상 명기하지 않았다. 공학이론식의 적용을 위해 주어진 경계조건으로부터 포탑의 축방향 하중, 경방향 하중 및

모멘트 하중 등의 복합하중을 구할 수 있으며, 포신의 발사 각도에 따른 사격 충격력과 링기어의 구동토크 및 소재(A7075-T6)의 항복응력값 등을 고려하여 해석을 수행하였다. 여기서 와이어 레이스와 롤러의 경우는 군사용 부품으로 보안관계상 적용소재는 명기하지 않고 물성치만 사용하였다.

2.2 이론적 안정성 해석

2.2.1 구조 안정성 해석

선회베어링 장치는 링기어 구조물과 와이어 레이스 그리고 롤러에서 하중을 모두 지지하고 있으며, 접촉면적이 작은 와이어 레이스와 롤러의 접촉면에서 집중하중이 발생하게 된다. 와이어 레이스와 롤러간의 구름접촉에 의해 접촉면에 가해지는 힘은 Hertz 접촉이론 모델을 Fig. 3과 같이 롤러의 기울기를 45°로 하중 경계조건을 적용하여 Eq. (1) ~ Eq. (5)에 따라 계산하였다.

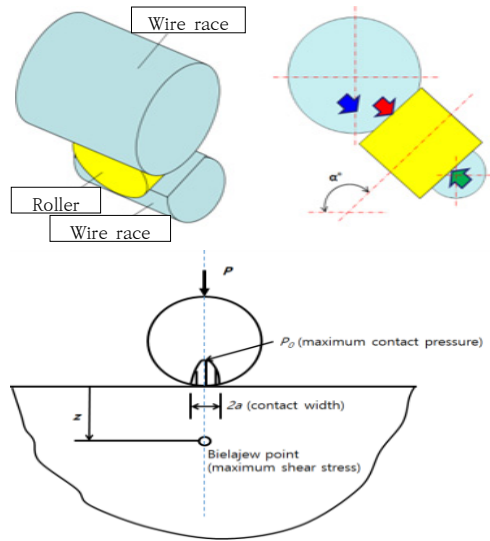


Fig. 3. Hertz contact analysis model

여기서 Eq. (1)의 E*는 등가탄성계수로 와이어레이스 탄성계수 E1과 롤러 탄성계수 E2를 사용하여 계산하였으며, Eq. (2)의 α는 와이어 레이스와 롤러가 접촉에 의해 발생하는 면의 폭으로서 포탑의 하중, 사격 충격력 및 모멘트 등에 의해 작용하는 복합하중 P와 롤러 반경 R에 의해 결정된다. 그리고 와이어 레이스의 접촉면에 발생하는 접촉압력 P0는 Eq. (3)에 의해 구하였다. 접촉압력으로 인해 발생하는 전단력과 전단력이 작용하는 깊이 z는

Eq. (4)와 Eq. (5)에 따라 구할 수 있다.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu^2}{E_1} + \frac{1-\nu^2}{E_2} \quad (1)$$

$$\alpha^2 = \frac{4PR}{\pi E^*} \quad (2)$$

$$P_0 = \frac{2P}{\pi a} = \sqrt{\frac{PE^*}{\pi R}} \quad (3)$$

$$(\tau_{xy})_{\max} = 0.3P_0 \quad (4)$$

$$z = 0.78a \quad (5)$$

구조 안정성의 이론적 해석결과는 Table 2와 같으며, 포신이 0° 상태에서 사격 시 와이어 레이스와 롤러 사이에 발생하는 접촉압력이 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 사격 충격에 대한 안전율은 Eq. (6)에 의해 와이어 레이스의 소재 항복응력값(959 MPa)과 롤러의 소재 항복응력값(1,280 MPa)을 적용하여 계산한 결과값이 1보다 크게 나타났다. 와이어 레이스와 롤러는 모든 발사각도에서 안전율이 5 이상으로서 충분히 안전하다고 판단할 수 있다.

Table 2. Results of theoretic structural safety analysis

Launch angle	0°	-10°	45°	85°
Max contact stress (MPa)	186.62	169.39	182.31	169.26
Max shear stress(MPa)	55.99	50.82	54.69	50.78
Safety factor(S)	5.13	5.66	5.26	5.66

$$S_f (\text{Safety factor}) = \frac{\text{Yield strength}}{\text{Obtained stress}} \quad (6)$$

2.2.2 기어강도 해석

선회베어링에 적용된 링기어의 재원 및 Lewis 식 적용을 위한 재원과 형상은 Table 3과 Fig. 4에 나타내었다.

Table 3. Characteristic of ring gear

Division	Value
Module	6
Pressure angle	20
Number of teeth	352 EA
Tooth width(b)	40 mm
Tooth thick(s)	12.78 mm
Tooth length(l)	13.5 mm
Pitch diameter	2,112 mm
Precision	DIN 3962, 3968, Q8

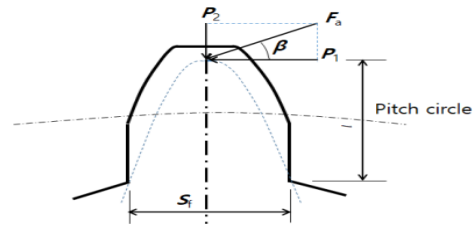


Fig. 4. Ring gear appearance

동력전달용 기계요소인 기어의 강도설계에 중요한 요소는 기어에 작용하는 굽힘응력과 접촉응력을 계산하여 안전하게 작동될 수 있도록 설계하는 것으로 기어치의 파손이나 마모에 의한 품질문제는 소재의 피로한도를 초과하는 굽힘응력과 접촉응력이 지속하여 작용하는 구조에 원인이 있다. 기어의 굽힘응력 계산은 기어를 균일강도의 외팔보로 가정하고, Lewis 식을 적용하였으며, 굽힘응력(σb)은 Eq. (7), 압축응력(σc)은 Eq. (8), 전단력(τ)은 Eq. (9)을 이용해 각각 구할 수 있다. 이는 기어의 접선방향의 전달력이 이부리에서 굽힘응력을 발생시키며, 반경방향의 전달력과 응력집중 효과는 무시한 상태에서 굽힘응력과 압축응력의 합성인장력은 Eq. (10)에 따라, 합성응력(σt)은 모어의 응력원을 이용하여 Eq. (11)에 따라 할 수 있고 그 결과는 Table 4와 같다. 여기서 Fn은 접선방향 하중으로 구동모터에 의한 기어구동토크(13,980 Nm)와 Table 1에 나타난 사격 시 발생하는 충격력에 의한 토크 영향을 모두 고려한 값인 27,333 Nm를 링기어 강도계산에 적용하였다.

$$\sigma_b = \frac{6F_n l \cos \beta}{bs_f^2} \quad (7)$$

$$\sigma_c = \frac{F_n \sin \beta}{bs_f} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{F_n \cos \beta}{bs_f} \quad (9)$$

$$\sigma = \sigma_b + \sigma_c \quad (10)$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (11)$$

Table 4. Results of theoretic ring gear stress analysis

Parts	Max Stress (MPa)	Yield strength (MPa)	Safety factor	note
Ring Gear	344.07	501	1.5	stable
Pinion	305.85	689	2.3	stable

기어궤합 합성응력은 Table 4와 같이 피니언 보다 링 기어 측에 많은 응력이 발생하며, 링기어에 발생하는 응력은 344.08 MPa로 링기어의 소재 항복응력 501 MPa 대비 안전률 1.5로 충분히 안전함을 알 수 있다. 항복응력 적용 시 피로강도가 아닌 인장강도를 적용한 사유로는 특수차량의 선회베어링이 창정비 기간까지 작동 회전수가 11,000회 정도 예상이 되므로 인장항복강도를 적용하여도 무리가 없을 것으로 판단하였다.

2.3 유한요소해석

2.3.1 선회베어링 구조 해석

2.3.1.1 유한요소 모델 및 해석조건

유한요소해석을 위한 모델은 대칭형 원형구조로서 1/2모델을 구현하여 해석을 실시하였다. Fig. 5는 해석을 위한 유한요소 모델과 메쉬 형상을 나타내고 있으며, 노드 및 엘레먼트 수는 각각 1,494,437개, 405,791개로 하여 해석을 수행하였다. 해석은 발사 각도 0°, -10°, 45° 그리고 85°에 대하여 수행하고 결과를 도출하였으며, 하중조건은 Table 1을 적용하였다. Fig. 6은 유한요소해석 모델에 적용한 경계조건 상태를 보여주고 있다.

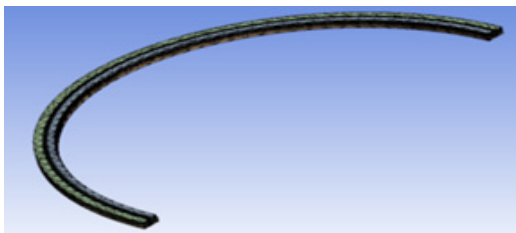


Fig. 5. Structural analysis model of slewing bearing

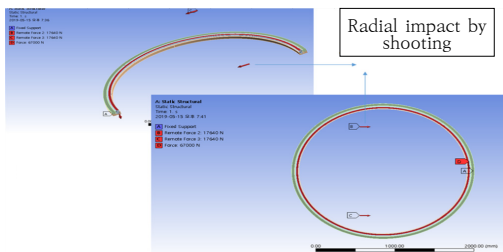


Fig. 6. Boundary conditions

구조해석에 대한 절차는 Fig. 7와 같으며, 해석 후 안정성을 확인하여 최적화를 실시하였다.

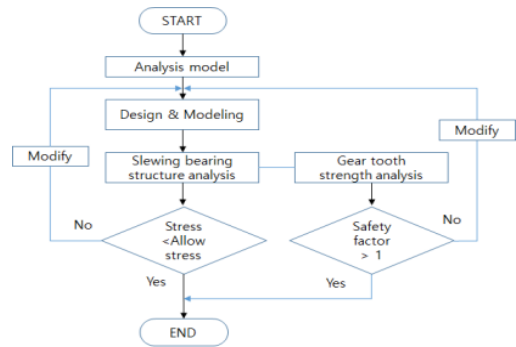
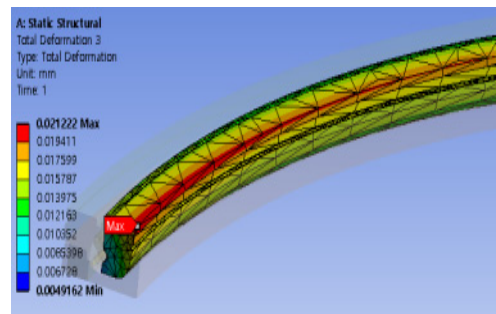


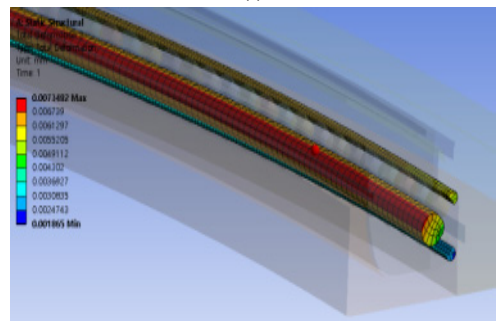
Fig. 7. Analysis flowchart

2.3.1.2 구조해석 결과

선회베어링의 변형과 응력을 확인하기 위하여 구조물 지지부품 중에서 가장 많은 힘을 받는 내·외측링과 와이어 레이스, 롤러에 대해 해석하였다. 여기서 롤러는 구조가 단순하고 경도가 가장 높아 변형에 영향이 없을 것으로 판단된다. Fig. 8은 0° 사격 시 내측링과 와이어 레이스의 변형량 해석 결과이며, -10°, 45° 및 85° 방향 사격 시 변형량 결과는 Table 5에 나타내었다. 강도가 가장 약한 내측링의 경우 최대 변형량이 0.025 mm로 베어링 요구의 최소 변형량(축방향) 0.25 mm 대비 1/10로서 변형에 의한 기어 성능에 미치는 영향은 없는 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 8. Analysis results of deformation (mm)
(a) Inner ring (b) Wire race

Table 5. Results of FEM slewing bearing strain analysis

Launch angle		0°	-10°	45°	85°
Strain(mm)	Outer ring	0.021	0.021	0.023	0.025
	Wire race	0.007	0.007	0.009	0.010

내측링, 와이어레이스 및 롤러에 작용하는 최대응력분포에 대한 해석결과를 Fig. 9에 나타내었다. 링 구조물과 와이어 레이스 접촉부에서는 발사각도 45°에서 26.978 MPa의 최대응력 작용으로 링 구조물과 와이어 레이스의 접촉면은 외부 하중에 대해 충분히 안전하다고 할 수 있다. 또한 와이어 레이스와 롤러의 선접촉에 의해 발생하는 최대응력은 와이어 레이스에서 205.59 MPa, 롤러에서 109.38 MPa로 롤러보다 와이어 레이스에서 약 2배임을 알 수 있다.

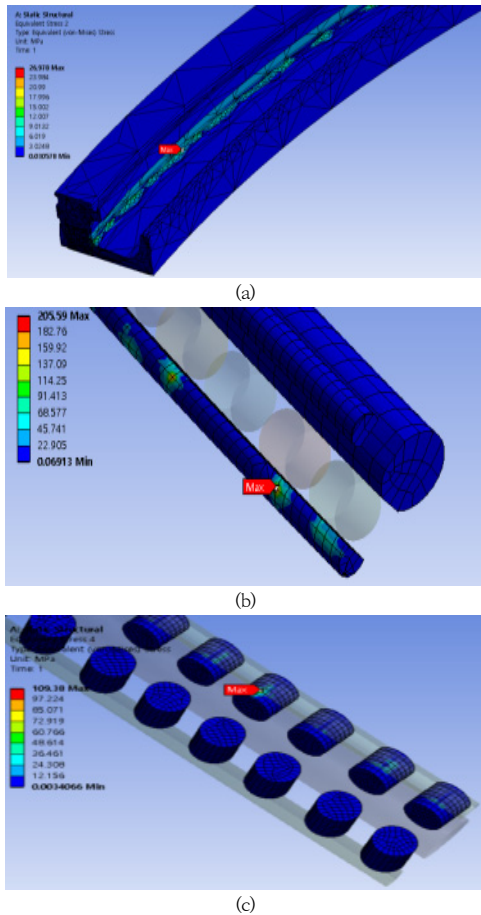


Fig. 9. Analysis result of stress (MPa)
 (a) Inner ring (launching angle 45°)
 (b) Wire race (launching angle 0°)
 (c) Roller (launching angle 85°)

Table 6에서와 같이 접촉으로 인한 최대 응력을 발사 각도 별로 보면 0°에서 가장 높게 나타났으며, 부품들 중 와이어 레이스에서 작용하는 응력이 가장 높음을 확인할 수 있다.

Table 6. Results of FEM slewing bearing stress analysis

Launch angle		0°	-10°	45°	85°
Max contact stress(MPa)	Outer ring	24.861	24.098	26.978	26.462
	Wire race	205.59	203.06	204.93	189.24
	Roller	67.387	65.184	91.994	109.38
Wire race safety factor(sf)		4.7	4.7	4.7	5.1

발사각도에 따른 응력해석 결과를 고찰해보면 각도에 관계없이 모두 와이어 레이스에서 최대 응력이 발생하였다. 와이어 레이스의 안전율은 최소 4.6로서 안정성은 충분히 확보한 것으로 판단되며, 이같이 유한요소해석 모델의 최대 응력값은 Table 2에 나타난 이론값 보다 10~15% 높게 나타났으나, 전체적으로 이론적 해석 결과와 잘 일치함을 확인하였다.

2.3.2 링기어 강도 해석

2.3.2.1 유한요소 모델 및 해석조건

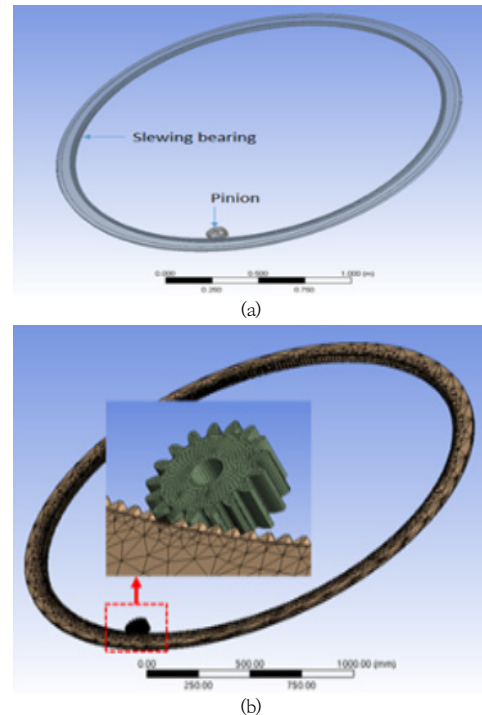


Fig. 10. Gear strength analysis model
 (a) Modeling (b) FE model(mesh shape)

Fig. 10과 같이 링기어와 피니언에 대한 유한요소 해석모델을 생성하였다. 피니언의 메쉬 크기는 1 mm, 피니언과 접촉하는 링기어 이빨의 메쉬 크기는 0.7 mm로 하여 해석하였다. 접촉조건은 'No Separation' 조건으로서 Fig. 11과 같이 피니언을 고정하여 링기어를 구동하는 경계조건을 적용하였다.

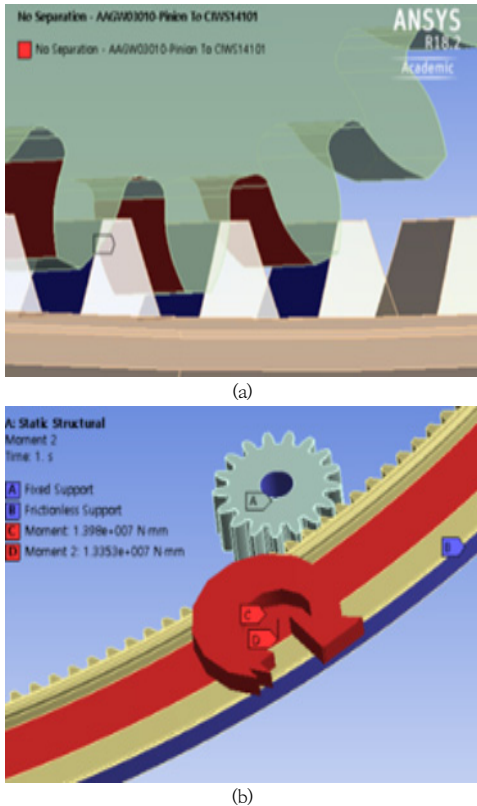


Fig. 11. Strength analysis boundary condition
 (a) Gear tooth contact condition
 (b) Ring gear & pinion boundary condition

2.3.2.2 구조해석 결과

Fig. 12와 Table 7은 기어 구동토크와 사격충격에 의한 토크의 경계조건을 적용한 링기어와 피니언의 응력해석 결과를 나타내고 있다. 링기어 이빨에 발생한 최대응력은 325.2 MPa이며, 피니언 최대응력 280.2 MPa로 피니언 보다 링기어 이빨에서 최대응력이 발생하였으며, 이는 이론적인 해석 결과와 비교해 볼 때 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

안전율 측면의 해석결과는 Fig. 13에 나타난 것과 같이 안전계수가 1.5로 링기어 치의 안정성은 충분히 안전하다고 판단할 수 있다. 이같이 유한요소해석 모델의 최

대응력값은 Table 4에 나타난 이론적 해석 결과와 비교해보면 5 % 이내 오차 범위의 정확한 결과 값으로서 전체적으로 이론적 해석 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

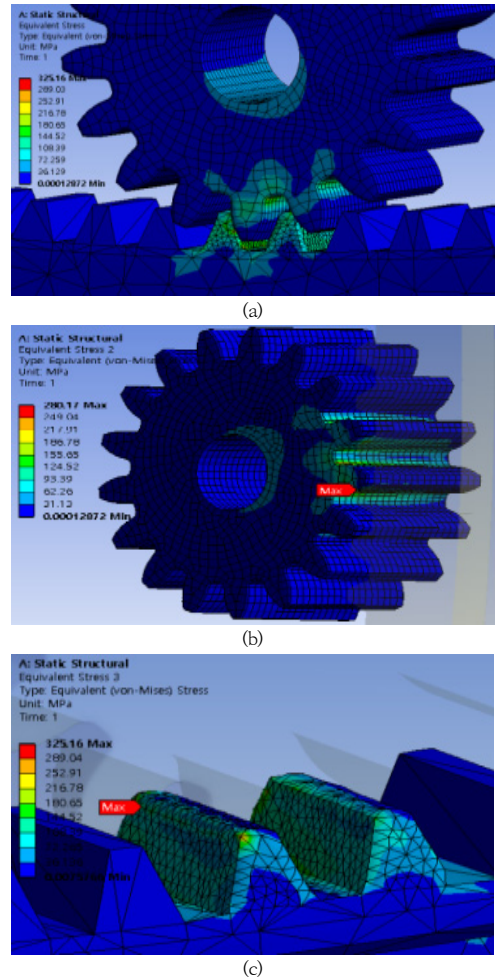


Fig. 12. Gear strength analysis
 (a) Ring gear & pinion contact stress
 (b) Pinion contact stress
 (c) Ring gear contact stress

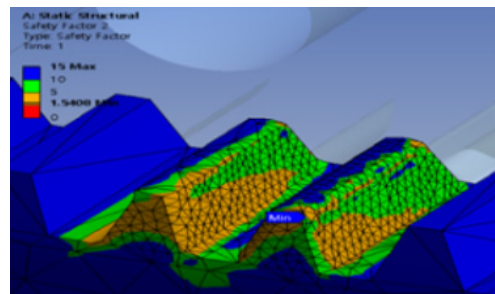


Fig. 13. Safety factor of gear

Table 7. Results of FEM ring gear stress analysis

Parts	Max. Stress (MPa)	Yield strength (MPa)	Safety factor	Note
Ring Gear	325.2	501	1.5	stable
Pinion	280.2	689	2.5	stable

3. 결론

본 연구는 군사목적용 특수차량에 적용되는 선회베어링에 대해 Hertz 접촉이론과 Lewis Equation을 바탕으로 한 이론적 해석과 ANSYS 해석소프트웨어를 이용한 유한요소해석 결과를 바탕으로 선회베어링의 구조 안정성을 평가한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

포신의 발사각도에 따른 접촉압력 해석결과, 하중을 지지하는 롤러와 와이어 레이스 간의 접촉부에서 최대 접촉압력이 발생하며, 롤러보다 강도가 약한 와이어 레이스에서 보다 크게 발생하였다.

접촉압력의 이론적 해석결과와 유한요소해석 결과의 오차는 약 10~15 % 차이를 보이나, 포신의 발사각도에 따른 결과 값이 동일한 경향임을 확인하였다. 또한 적용한 롤러와 와이어 레이스의 안정성 평가를 위해 소재의 항복강도와 발생한 최대 접촉압력을 비교한 결과 와이어 레이스 소재의 항복응력 959 MPa 대비 발생한 최대접촉압력은 186.62 MPa로 최소 4.6 이상의 안전율을 확인하였다. 이는 적용한 소재가 강도 면에서 충분히 안전함을 확인 할 수 있다.

기어강도 해석에서는 이론적 해석결과와 유한요소해석결과가 매우 잘 일치하는 것을 확인하였으며, 소재의 항복강도 501. MPa 대비 발생압력 344.07 MPa로서 안전율은 1.5이므로 A7075-T6 소재를 적용한 링기어의 설계강도는 동력전달에 있어 충분히 안전하다고 할 수 있다.

본 연구는 부품국산화개발 예비설계 과정에서 고가의 시제 제작비 소요, 기계가공 수준 등의 제한 요소를 고려하여 해석으로만 수행하였다. 적용한 링기어, 와이어 레이스 및 롤러에 대한 형상과 소재 선정 모두가 구조 안정성이 있음을 확인하였으며, 해석결과와 검증은 향후 결정된 설계사양에 따라 제작된 시제품에 대한 시험평가를 통하여 확인할 필요가 있겠다.

References

- [1] C. K. Kim, S. R. Lee, "Analysis of Contact Stress in Slewing Ring Bearings," *Journal of the KSTLE*, Vol. 11, No. 2, pp. 24-33, 1995.
- [2] X. Shan, T. Xie, and W. Chen, "A New Method for Determining the Preload in a Wire Race Ball Bearing," *Tribology Int.*, Vol. 40, pp. 869-875, 2007.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2006.09.003>
- [3] X. Shan, T. Xie, and W. Chen, "A Simple Approach for Determining the Preload of a Wire Race Ball Bearing," *Appl. Phys. & Eng.*, Vol. 11, No. 7, pp. 511-519, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1631/jzus.A0900583>
- [4] X. Shan, L. Wang, T. Xie, and W. Chen, "Mathematical Modeling and Experimental Verification of the Radial Stiffness for a Wire Race Ball Bearing," *Appl. Mech. & Mat.*, Vol. 120, pp. 343-348, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.120.343>
- [5] Robert Kunc, Ivan Prebil "Numerical determination of carrying capacity of large rolling bearings" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155-156, pp. 1696-1703, 2004.
- [6] Srečko Glodež, Rok Potočnik, Jože Flašker "Computational model for calculation of static capacity and lifetime of large slewing bearing's raceway" *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 47, pp.16-30, 2012.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.08.010>
- [7] Marek Krynke, Jacek Selejdak, Stanislaw Borkowski "The quality of materials applied for slewing bearing raceway - Technical Paper" *Materials Engineering - Materiálové inžinierstvo*, Vol. 19, pp. 157-163, 2012
- [8] M. S. Kim, J. S. Kim and D. H. Lim, "Gear Design Optimization for Low Noise Slewing System of Excavator," *Proceeding of KSNVE Conference*, pp. 733-736, 2016.
- [9] V. Karaveer, A. Mogrekar and T.P.R. Joseph, "Modeling and Finite Element Analysis of Spur Gear", *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol. 3, No. 5, pp. 2014-2107, 2013.
- [10] K. Sim, H. Moon, G. Choi, S. Koh and N. Jeon, "Bending Stress Analysis of the Transfer Case Helical Gear for the 3.5ton Commercial Vehicle," *Transactions of KSAE*, Vol. 25, No. 4, pp. 474-480, 2017.
DOI : <https://doi.org/10.7467/KSAE.2017.25.4.474>

서 현 수(Hyun-Soo Seo)

[정회원]



- 1992년 2월 : 부경대학교 일반대학원 기계공학과 (기계공학석사)
- 1995년 2월 : 부경대학교 일반대학원 기계공학과 (기계공학석사)
- 2011년 2월 : 부경대학교 일반대학원 기계공학과 (기계공학박사)
- 1993년 4월 ~ 현재 : 국방기술품질원 책임연구원

<관심분야>

기계, 국방품질경영, 서비스품질

이 호 준(Ho-Jun Lee)

[정회원]



- 2014년 8월 : 부산대학교 항공우주공학과 (항공우주공학사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 기동화력센터 연구원

<관심분야>

기계, 항공, 국방품질경영

안 태 수(Tae-Su An)

[정회원]



- 2008년 2월 : 동의대학교 일반대학원 기계공학 (기계공학석사)
- 2012년 8월 : 동의대학교 일반대학원 기계공학 (기계공학박사)
- 2012년 10월 ~ 2014년 3월 : 동의대 산업기술연구소
- 2017년 2월 ~ 현재 : 주식회사 원진엠앤티

<관심분야>

기계공학, 기계설계