

A Study on the Improvement of Wear Resistance of Roller Tappet Assembly using Finite Element Analysis

Hun-Kee Lee*, Hui-Sun Ahn**, Myeong-Chul Park***

*Professor, Dept. of Mechanical System Engineering, Republic of Korea Naval Academy, Changwon, Korea

**General Manager, Technology Solution Center, STX engine Co. Ltd, Changwon, Korea

***Professor, Dept. of Avionics Engineering, Kyungwoon University, Gumi, Korea

[Abstract]

This study is on the improvement of wear resistance of roller tappet assembly which is applied to V-956 engine. Although the TBO(Time Between Overhauls) of the engine and roller tappet assembly is more than 9,000 engine operating hours, about 60% engines which were operated within TBO suffered severe wear on roller tappet assembly and failed to operated normally. To find out the cause of wear of these roller tappet assembly, finite element analysis was performed using ABAQUS based on the investigation into roller tapper assembly and the operating conditions of V-956 engine. As a result, it was found that wear occurred due to the low hardness value of the roller surface under certain operating conditions, and based on the analysis results, we proposed the optimal hardness value for improving wear resistance on the surface of the roller tappet assembly. The results of this study were applied to the mass production of the corresponding roller tappet assembly and are currently in use.

▶ **Key words:** Roller tappet, Wear Resistance, Hardness, Finite Element Analysis, ABAQUS

[요 약]

본 연구는 해군 함정에 사용되는 V-956 엔진에 적용된 롤러 타펫 조립체의 내마모성 개선에 대한 연구이다. 해당 엔진 및 롤러 타펫 조립체의 창정비 주기는 엔진 가동시간으로 9천 시간 이상으로 규정되어 있음에도 불구하고, 창정비 주기 내 다수(약 60%)의 엔진에서 롤러 타펫 조립체의 극심한 마모 및 이로 인한 엔진 정상 작동 곤란 현상이 발생되었다. 이러한 롤러 타펫 조립체의 마모 원인을 규명하기 위하여 롤러 타펫 조립체 및 V-956 엔진의 운용 환경에 대한 분석을 바탕으로 ABAQUS를 활용하여 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석 결과 특정한 운용 조건에서 롤러 표면의 낮은 경도값으로 인하여 마모가 발생함을 밝혀내었으며, 해석 결과에 기반하여 롤러 타펫 조립체 표면의 내마모성 개선을 위한 최적의 경도값을 제안하였다. 본 연구 결과는 해당 롤러 타펫 조립체의 국산화 개발로 이어져 양산에 적용 중에 있다.

▶ **주제어:** 롤러 타펫, 내마모성, 경도, 유한요소해석, 아바쿠스

-
- First Author: Hun-Kee Lee, Corresponding Author: Myeong-Chul Park
 - *Hun-Kee Lee (leehunkee@navy.ac.kr), Dept. of Mechanical System Engineering, Republic of Korea Naval Academy
 - **Hui-Sun Ahn (skimans@stxengine.co.kr), Technology Solution Center, STX engine Co. Ltd
 - ***Myeong-Chul Park (africa@ikw.ac.kr), Dept. of Avionics Engineering, Kyungwoon University
 - Received: 2024. 10. 29, Revised: 2024. 11. 14, Accepted: 2024. 11. 21.

I. Introduction

본 연구는 V-956 엔진에 탑재된 롤러 타펫 조립체(Roller Tappet Assembly)의 내마모성 개선에 관한 연구이다. V-956 엔진은 엔진 내의 기통(Engine Cylinder) 수에 따라 12V-956, 16V-956, 20V-956 엔진 등으로 구분되며 국내에서는 K○○, F○○, K○○ 등 해군 내 주요 함정의 엔진으로 적용되고 있는 엔진이다. V-956 엔진 및 롤러 타펫 조립체의 창정비(Overhaul) 주기는 12V-956, 16V-956, 20V-956 엔진 등 엔진 모델에 따라 조금씩 상이하지만, 그중 최소 창정비 주기는 엔진 가동시간 기준으로 9,000시간 이상으로 규정되어 있다.

그러나 창정비 주기 내 다수 엔진(전체 엔진의 약 60%)에서 롤러 타펫 조립체 롤러 표면의 이상 마모 및 이로 인한 엔진 작동 곤란 현상이 발생되었으며 이로 인하여 사용군으로부터 지속적으로 불만 사항이 제기되었다. 그럼에도 불구하고 롤러 타펫 조립체에 대한 개선 및 개발이 전혀 진행된 적이 없어 해당 부품의 정비에 필요한 부품들을 해외에서 전량 수입하여 운용 중이었으며 약 10개월이라는 조달기간으로 인하여 과도한 재고를 항상 비축하여야 하는 문제점 등을 가지고 있었다.

이에 본 논문에서는 롤러 타펫 조립체의 마모 발생 원인 및 내마모성 개선을 목표로 연구가 진행되었다. 일반적인 마모 발생 메카니즘은 식 (1)에 나타난 Archard 모델로 설명할 수 있다[1]. 초기 Archard 모델은 응착마모(Adhesive Wear) 상태를 가정하고 개발되었으나, 모델의 물리적인 의미가 총 마모량(Total Volume of Wear, W)가 접촉 압력(Contact Pressure, P) 및 상대 미끄러짐 속도(Relative Sliding Velocity, v)에 비례하고 경도(Hardness, H)에 반비례한다는 것이므로 연삭마모(Abrasive wear)와 피로마모(Fatigue wear) 등에도 그 의미가 적용 가능성이 밝혀져 있다[2-4].

$$W = \int K \frac{P^a v^b}{H^c} dt \quad (1)$$

여기에서 K , a , b , c 는 재질, 마찰계수(Friction Coefficient) 등 접촉이 발생하는 부분의 조건에 따른 무차원 상수(Dimensionless Constant)이다.

식 (1)에서 알 수 있듯이 경도는 마모에 큰 영향을 미치는 인자로 알려져 있으며, 접촉이 발생하는 부품 형상이나 해당 부품의 사용 환경을 수정할 수 없는 경우 경도값을 증가시킴으로써 내마모성을 효과적으로 개선할 수 있는

있음이 여러 연구들에 의해 밝혀졌다. 하지만 Pointner 등의 연구자에 의해 마모가 발생하는 부품 표면의 경도 증가에 따라 해당 부품과 접촉하고 있는 상대 부품 표면에서의 마모 발생 가능성이 보고되었다[5].

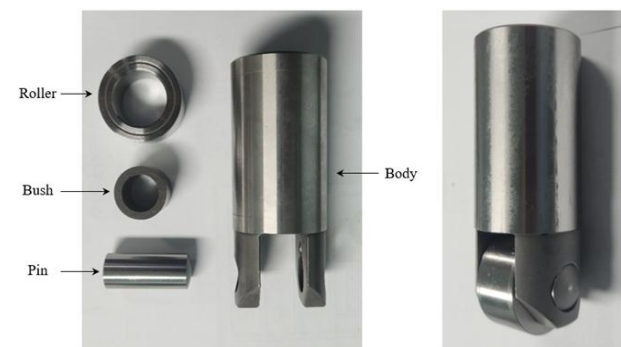
이에 따라 최근에는 접촉 표면 간 최적의 내마모성을 가지는 경도 비(Ratio)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며[6-9], 롤러 타펫 조립체와 같이 구름접촉 피로(RCF, Rolling Contact Fatigue)를 받는 표면의 경우 표면 간 경도 비가 0.91~0.97 사이일 때 최적의 내마모성이 나타남이 Petrakova 등의 연구에 의해 밝혀졌다[10-12].

본 연구에서는 롤러 타펫 조립체 롤러 표면에서의 이상 마모 현상에 대한 원인을 도출하고 내마모성을 개선하기 위하여 롤러 타펫 조립체 및 해당 부품의 운용 조건 등에 대한 분석을 바탕으로 유한요소해석(Finite Element Analysis)을 통하여 마모의 발생원인을 도출하고 마모를 최소화할 수 있도록 하는 최적 경도값을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 2장에서 롤러 타펫의 구조 및 마모 현상 등에 대해 살펴보고, 3장에서 ABAQUS를 이용하여 롤러 타펫 조립체에 발생하는 응력 분포 및 최대 응력 값 등에 대해 분석하였으며, 4장에는 분석결과를 바탕으로 내마모성 개선방안에 대해 도출하고 5장에 그 결론을 기술하였다. 본 연구 결과는 해당 제품의 국산화 개발로 이어져 해당 부품의 양산에 적용되고 있으며, 개선 이후 현재까지 롤러 표면의 이상 마모로 인한 어떠한 문제점도 제기되지 않고 있다.

II. Roller Tappet Assembly

1. Components & Function

Fig. 1.에서 볼 수 있듯이 롤러 타펫 조립체는 몸체(Body), 핀(Pin), 부시(Bush) 및 롤러(Roller)의 4개 부품으로 구성되어 있다.



(a) 4 Components (b) Assembly
Fig. 1. Roller Tappet Assembly

구동 중 몸체와 핀의 분리 및 핀의 회전 방지를 위하여 몸체와 핀은 강제 압입 방식으로 조립되며 롤러의 회전을 위하여 핀, 부시, 롤러 사이에는 일정 간격이 적용되어 있다.

롤러 타펫 조립체의 작동 메커니즘 및 엔진 내 장착 위치를 Fig. 2.에 나타내었다. 엔진 기통 내에서 연료와 공기의 폭발반응으로 인하여 피스톤(Piston)이 직선으로 운동하면, 이에 따라 크랭크 축(Crank Shaft)이 회전하게 되고 캠 축(Crank Shaft)은 크랭크 축과의 기어비(Gear Ratio)에 따라 크랭크 축 회전속도의 1/2 속도로 회전하게 된다.

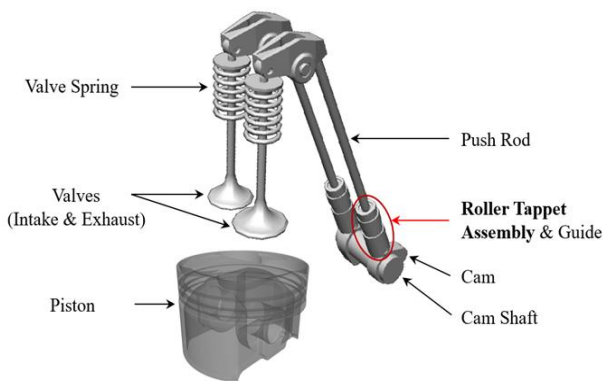


Fig. 2. Position of Roller Tappet Assembly

이때 롤러 타펫 조립체는 캠 축과 결합된 캠의 회전운동에 따라 상·하로 운동하며 푸시 로드(Push Rod)를 이동시킴으로써 흡·배기 밸브를 개폐하는 역할을 하며, 각 기통마다 흡·배기 밸브 작동을 위한 2개의 롤러 타펫 조립체가 장착되어 있다.

2. Wear Phenomena

기술교범 등의 기술자료묶음(TDP, Technical Data Package)에는 엔진 및 롤러 타펫 조립체를 포함한 엔진 구성품의 창정비 주기가 규정되어 있으며, 창정비 주기 내 모든 엔진 및 부품은 정상 작동하고 소성변형 및 이상 마모 또는 파손 등이 발생하지 않아야 한다.

그러나 Fig 3.에서 보이는 바와 같이 창정비 주기 이내의 롤러 타펫 조립체의 이상 마모현상이 지속적으로 보고되었다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 롤러 타펫 조립체의 이상 마모(Abnormal wear)는 롤러 표면에서 발생되며, 엔진 가동시간으로 〇〇〇시간 사용된 Fig. 3.의 롤러 타펫 조립체의 롤러 표면의 경우 규정된 롤러의 표면 조도(Surface Roughness) 최대 값의 3배 이상의 표면 조도값을 가지고 있는 것으로 측정되었다.

Moon 등의 연구에 따르면 구름접촉 피로가 발생하는 표면에서의 주요 손상 상태는 피팅(Pitting) 및 스커핑

(Scuffing)으로 보고되었으며[13], Fig. 3.에서 보이는 바와 같이 롤러 표면에서의 마모 형태도 피팅 및 스커핑으로 인한 손상임을 확인할 수 있다.

이때 1개의 롤러 표면에서 이상 마모가 발생하게 되면 그로 인한 편심하중(Eccentric Load)이 흡·배기 밸브 및 캠에 작용하게 되어, 엔진 내 장착된 다른 롤러 타펫 조립체 롤러 표면에서의 마모 발생으로 이어지며 마모가 심해질 경우 엔진 작동이 불가하게 되는 것으로 추정된다.

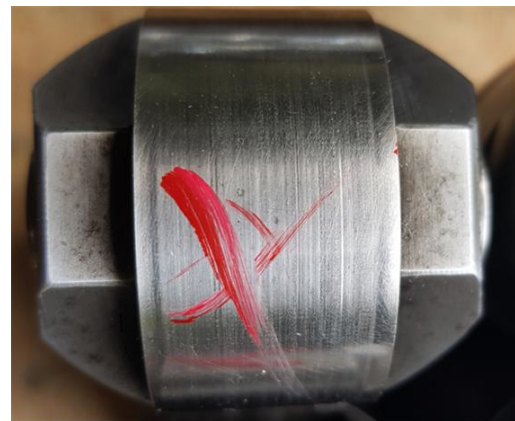


Fig. 3. Scuffing and Pitting on Roller Surface

3. RCF & Fatigue Limit

Fig. 2.에서와 같이 롤러는 캠과 반복적인 구름접촉을 하고 있으며 접촉면 사이에는 밸브 스프링으로 인한 수직응력(Normal Stress)과 마찰로 인한 전단응력(Shear Stress)이 동시에 작용한다. 이때 롤러 표면에 작용하는 전체 응력의 등가응력(Equivalent Stress)이 롤러 표면의 피로 한계(Fatigue Limit) 이상이 되면 표면에 점진적인 소성변형 및 소성 유동층 가공경화 현상이 발생되며 이에 따라 미세 균열(Crack)이 형성되어 표면에 마모가 진행하게 된다.

롤러 타펫 조립체를 구성하는 4개의 구성품 표면의 피로 한계(Fatigue Limit)를 파악하기 위하여 각 부품 표면 경도에 대한 설계 데이터를 바탕으로 M. Fujita 등이 제시한 항복 강도(Yield Stress)-비커스(HV) 경도 환산식 (2) 및 ISO - 18265에 따른 비커스 경도-로크웰 경도(HRC) 환산표를 활용하여 정리하였으며 그 결과를 Table 1.에 나타내었다[14].

$$Yield\ Stress = 2.736\ HV - 70.5 \quad (2)$$

구름접촉 피로에 영향을 주는 인자는 표면 경도, 접촉 압력, 상대 미끄럼 속도, 윤활 조건(Lubricant Condition), 형상(Shape) 등이 있으며 이 인자를 변경함

으로써 내마모성을 개선할 수 있다.

Table 1. Estimated Fatigue Limit of Each Parts

Part	Estimated Fatigue Limit(MPa)
Body, Pin	1,926.8
Bush	1,571.1
Roller	1,680.5

하지만 상기 인자들과 관련하여 롤러 타펫 조립체의 경우 표면 경도를 제외한 다른 관련 인자들의 변경은 쉽지 않다. 함정의 혼련 방안 및 작전 상황 등에 따라 크랭크 축의 회전 속도, 엔진 운용 시간 등은 수시로 변화하며 이에 따라 롤러 표면의 접촉 압력, 상대 미끄럼 속도 및 윤활 조건 등도 시시각각 변화하기 때문이다. 형상 변경의 경우도 엔진 타 부품과의 결합성 및 체계 영향성을 고려하여 본 연구에서는 제외되었다. 그렇기에 본 연구에서는 V-956 엔진의 실제 엔진 운용 조건을 전산모사(Computer Simulation)함으로써 롤러 표면에 작용하는 최대 응력값을 바탕으로 내마모성 개선을 위한 롤러 표면의 경도값을 제시하고자 하였다.

III. Finite Element Analysis

1. Mechanical Properties & Mesh

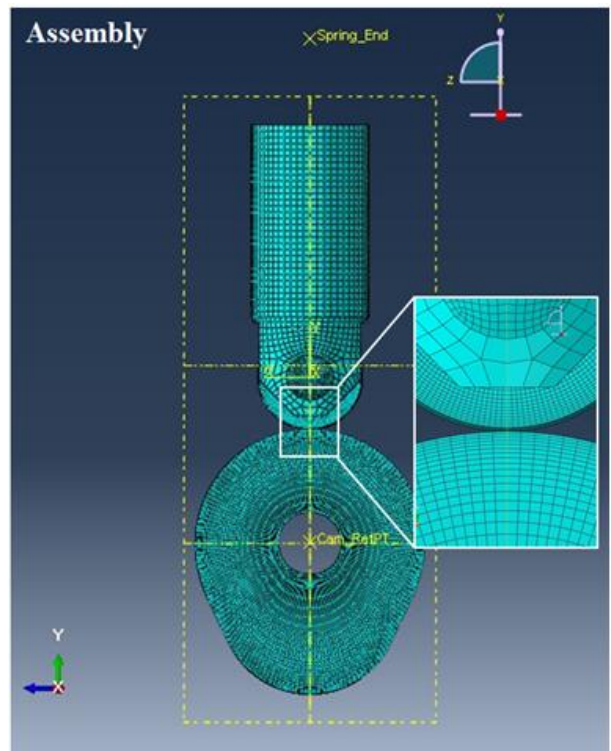
엔진 운용 시 롤러 타펫 조립체 롤러 표면에 발생하는 응력 분포 및 최대 접촉 응력 값에 대한 분석을 실시하고자 ABAQUS를 이용하여 구조해석 모델을 개발하였다.

롤러 타펫 조립체를 구성하고 있는 4개의 부품은 변형체(Deformable Body), 롤러 타펫 조립체의 구동을 위한 캠은 그 형상을 고려하여 강체(Discrete Rigid Body)로 모델링하였다. 롤러 타펫 조립체 각 구성품 표면에서의 피로 한계는 Table 1.과 같으며 탄성계수(Elastic Constant)와 포아송 비(Poisson's Ratio)는 각각 205 GPa, 0.3으로 가정하고 3차원 구름접촉에 대한 해석을 위하여, 전단응력 성분을 고려하여 미세 크기의 8절점(Node) 솔리드 요소(C3D8I, 8-Node Linear Hexagonal Solid Elements with Incompatible Modes)를 사용하였다.

이때 Fig. 4.에서 볼 수 있듯이 롤러 표면에서의 마모 현상을 고려하여 롤러와 캠 2개 부품의 요소(Element) 크기를 타 부품의 요소 크기 대비 작게 구현하고 특히 2개 부품의 접촉면 부위 요소는 다른 영역 대비 더욱 조밀하게 함으로써 롤러 표면에서 작용하는 응력의 분포를 정확히 파악할 수 있도록 하였다.



(a) Mesh for each Part



(b) Mesh for Assembly

Fig. 4. Mesh for Finite Element Analysis

요소 크기에 따른 유한요소해석 결과의 수렴성을 확인하는 작업을 통하여 최종적으로 본 모델링에 사용된 전체 요소의 수는 235,355개이며 절점의 수는 259,097개이다. Table 2.에 본 해석에 사용된 메쉬 정보를 정리하였다.

Table 2. Number of Elements and nodes

Parts	Number of Elements	Number of Nodes
Body	6,491	9,244
Pin	8,640	9,805
Bush	10,400	12,960
Roller	106,240	115,038
Cam	103,584	112,050

2. Load and Boundary Conditions

몸체과 핀의 강제 압입을 Tie 조건을 활용하여 구속하고 롤러 tappet 조립체를 구성하는 4개의 부품을 조립한 후 캠 힐(Cam Heel) 부위를 롤러 표면과 접촉시키고, 푸시로드를 통해 작용하는 밸브 스프링의 초기 하중과 대시포트 계수(Dashpot coefficient)는 ABAQUS Interaction Module을 활용하여 모델링함으로써 롤러 tappet 조립체의 실제 운용 환경을 구현하였다. 이 때, 조립체 내에서 접촉이 발생하는 모든 표면은 General Contact 조건을 이용하여 면-대-면(Surface to Surface) 접촉이 발생하는 것으로 설정하였다.

롤러 표면에서 마모가 최대 발생시키는 운용 조건을 모사하기 위하여 마찰계수(Friction Coefficient)와 엔진 운용속도에 대해 분석하였다. Barszcz 등에 따르면 엔진 내 접촉면에서의 마찰계수는 해당 엔진에서 사용되는 오일의 등급, 엔진 내 온도 및 접촉면에서의 상대 속도와 관계되어 있다.

본 연구에서는 마모가 최대 발생 될 수 있는 조건을 모사하기 위하여 실제 V-956 엔진 운용 시 사용되는 오일 등급 및 엔진 운용 온도 범위를 고려하여 엔진 운용 환경 내 마찰계수 최고 값인 0.13을 접촉면에서의 마찰계수로 하였으며[15, 16], 엔진의 운용 속도에 따른 롤러 표면의 응력 분포를 확인하기 위하여 캠 축의 회전속도를 각각 250 RPM(Revolutions Per Minute), 500 RPM, 750 RPM(V-956 엔진 정격속도)으로 하여 유한요소해석을 수행하였다.

이때, 캠의 회전에 따라 롤러 tappet 조립체의 몸체는 상하 운동만 가능하도록 구속하였으며, Fig. 5에 본 연구에 사용된 롤러 tappet 조립체 및 캠에 대한 경계조건(Boundary Conditions)을 나타내었다.

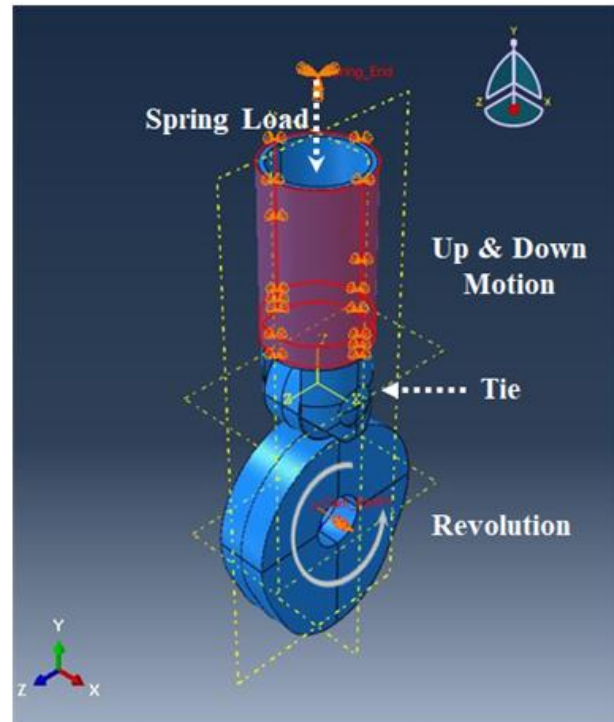


Fig. 5. Load and Boundary Conditions for FEA

3. Results

ABAQUS Dynamic Explicit Solver를 사용하여 회전속도에 따른 롤러 tappet 조립체 구성품 4개의 응력 상태를 폰미세스 응력(Von Mises Stress) 값을 사용하여 분석하였다. 이때, 회전 속도와 관계없이 캠의 회전 위치에 따른 구성품의 응력 상태를 확인할 수 있도록 캠이 $1^\circ(180/\pi \text{ rad})$ 회전할 때마다 1개의 결과값을 산출할 수 있도록 하였다.

캠 축의 회전 속도가 각각 250, 500 RPM일 경우 캠의 회전 위치에 관계없이 롤러 tappet 조립체를 구성하는 몸체, 핀, 부시, 롤러에 작용하는 최대 응력값은 Table 1에 나타난 각 구성품의 피로 한계보다 낮은 것으로 확인되었다.

Fig. 6.에 캠 축의 회전속도가 750 RPM일 경우 롤러 tappet 조립체를 구성하는 4개의 구성품에 작용하는 최대 응력 값 및 롤러 표면에서 최대 응력이 발생할 때의 캠의 회전 위치를 나타내었다. 캠 축의 회전속도가 750 RPM일 경우에도 몸체, 핀, 부시에 작용하는 최대 응력은 각각 76.97 MPa, 670.6 MPa, 1437 MPa로 해당 부품의 피로 한계보다 낮은 응력이 작용하는 것으로 확인되었으나, 캠 피치점(Pitch point)에서 롤러와 접촉할 경우 롤러 표면에 피로 한계보다 약 40 MPa 높은 1721 MPa의 최대 응력이 작용함을 확인하였다. 몸체의 경우 다른 3개 부품에 비해 상대적으로 적은 응력이 작용하였는데, 이는 몸체와 접촉하는 가이드가 모델링에서 제외되었기 때문으로 추정된다.

Fig. 3.에서 볼 수 있는 롤러의 마모와 관련지어 볼 때, 엔진 내 온도가 엔진 오일의 최대 마찰계수가 되는 온도일 경우 V-956 엔진이 정격속도로 운용되면 표면에서 피로 한계 이상의 응력이 작용하여 피팅 현상이 국부적으로 발생되고 이후 지속적인 엔진의 운용으로 스커핑 현상이 발생하는 것으로 추정하였다.

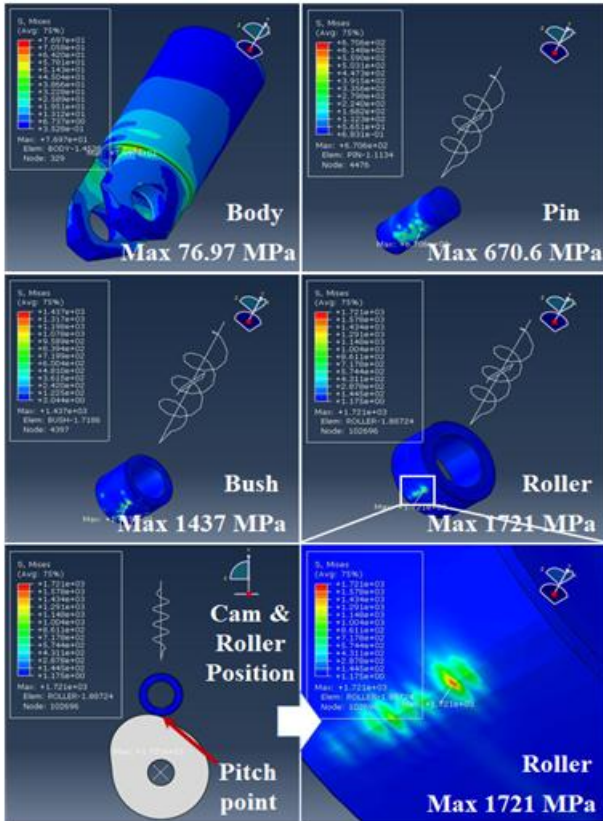


Fig. 6. Max Stress Values and Cam Position

IV. Improvement of Wear Resistance

1. Proposal for Optimum Hardness Value

롤러 타펫 조립체의 마모 형태는 캠과의 구름접촉 피로에 의한 롤러 표면의 피팅 및 스커핑 현상이며, 이런 문제의 해결을 위하여 롤러 표면 경도값의 증가를 제안하였다.

그러나 롤러 표면 경도값의 무조건적인 증가는 롤러와 접촉하는 캠 표면의 마모를 발생시킬 수 있으므로 롤러의 마모를 최소화 시킬 수 있도록 하는 최적의 롤러 표면의 경도값의 도출이 필요하였다.

구름 접촉 피로에 따른 마모를 최소화시킬 수 있는 접촉 부품간의 경도 비에 대한 연구는 철도-레일 연구분야에서 활발히 진행되었다[5-12]. Steele 등은 H_w (휠의 경도) /

H_r (레일의 경도) > 1일 경우 H_r 을 증가시키면 레일의 마모는 선형적으로 감소하고 휠의 마모가 선형적으로 증가하며, $H_w / H_r < 1$ 일 경우 H_r 을 증가시키면 레일의 마모는 선형적으로 감소하지만 휠은 마모에 변화가 없음을 밝혀내었다[17]. Steele 등의 모델에 따라 초기 철도-레일 분야에서는 구름 접촉 피로를 받는 부품 간의 내마모성 개선을 위하여 일반적으로 H_w 를 H_r 보다 일부 낮은 값으로 사용하였다. 이후 Petrakova 등에 의해 H_w / H_r 의 비가 0.91~0.97 사이의 값을 가질 때 휠, 레일 모두에서 최적의 내마모성이 나타남이 확인되었다[10-12]. 본 연구에서는 Petrakova 등의 모델을 바탕으로 롤러 표면에서의 최대 응력 상태 및 롤러 재질 특성을 고려하여 H_c (캠 표면의 경도) / H_R (롤러 표면의 경도) 값을 비커스 경도값을 기준으로 0.97로 제시하고 양산을 위하여 공차(Tolerance)를 두고 롤러 표면의 HV 값을 제안하였으며, ISO - 18265 경도 환산표 및 식 (2)를 활용하여 로크웰 경도 값 및 표면 피로 한계를 Table 3.에 정리하였다.

Table 3. Proposed Mechanical Value of Roller Surface

Mechanical Value	Proposed Value
Hardness(HV)	730 ± 30
Hardness(HRC)	61.4 ± 1.5
Estimated Fatigue Limit(MPa)	1,926.8 ± 82.1

2. Heat Treatment and Test

침탄처리는 표면층에 탄소를 침투, 확산시킴으로써 표면의 경도를 높이는 방법으로, Q-T(Quenching-Tempering) 처리를 통하여 표면의 내마모성을 증가시킬 뿐 아니라 심부의 내충격성을 유지할 수 있도록 하는 열처리 방법 중 하나라 다른 열처리 기법에 비해 표면 개질층의 깊이를 깊게 할 수 있는 장점을 가지고 있다[18-20].

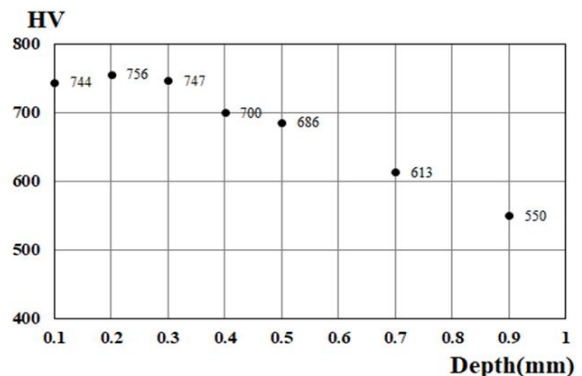


Fig. 7. HV Values according to Depth

본 연구에서는 Table 3에 제시한 경도값을 얻기 위하여 롤러를 900°C에서 390분 동안 가스침탄(Gas Carburizing)하고 이후 Q-T 처리였으며, 깊이에 따른 경도값을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7.에서 볼 수 있듯이 표면에서 약 0.4mm까지 비커스 경도값으로 700을 유지하는 것으로 확인되었으며, 해당 열처리 공정을 이용하여 롤러의 표면 경도를 증가시킨 롤러 타펫 조립체 시제품을 제작하고 V-956 엔진에 장착하여 국방규격 KDS 2815-1309-1에 따른 성능시험을 진행함으로써 본 연구에서 제안한 롤러 표면 경도값에 대한 신뢰성을 검증하였다.

V. Conclusions

본 연구에서는 V-956 엔진의 흡·배기 밸브를 개폐시키는 롤러 타펫 조립체 내의 롤러 표면의 내마모성을 개선하기 위하여 ABAQUS를 이용하여 롤러 표면 마모의 원인을 분석함과 아울러 마모를 방지할 수 있는 최적의 표면 경도값을 제안하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 롤러 타펫 조립체 롤러 표면의 마모 현상에 대하여 분석하고, 롤러 표면의 마모 현상은 구름접촉 피로에 의한 피팅 및 스커핑 현상임을 밝혀내었다.
- 특정 조건(속도, 온도)에서 롤러 표면에 작용하는 최고 응력이 롤러 표면의 피로 한계를 넘어서는 응력 값을 확인하였으며, 해당 응력의 반복적인 작용으로 인하여 롤러 표면 마모가 발생됨을 추론하였다.
- 롤러 표면의 마모를 개선하기 위하여 구름접촉 피로 연구 분야에서 활용되는 접촉면에서의 최적 경도 비를 활용하여 롤러 표면 마모를 최소화할 수 있는 최적 경도값을 제안하였다.
- 제안된 경도값을 바탕으로 롤러 타펫 조립체 시제품을 제작하고 엔진 성능시험 및 실제 체계 장비에의 적용을 통하여 제안된 경도값의 신뢰성을 검증하였다.

본 연구의 결과를 기반으로 하여 해당 롤러 타펫 조립체의 국산화 개발이 완료되어 현재 롤러 타펫 조립체의 양산에 활용되고 있으며, 국산화 개발품의 V-956 엔진 적용 이후 해당 롤러 타펫 조립체의 창정비 주기 내 이상 마모로 인한 교체는 발생하지 않고 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was conducted with support of the research fund from the academic research project of the Republic of Korea Naval Academy's Ocean Research Institute in 2024.

REFERENCES

- [1] J.F. Archard, "Contact and Rubbing of Flat Surfaces," *Journal of Applied Physics*, Vol. 24, pp. 981-988, August, 1953. DOI: 10.1063/1.1721448
- [2] J. Williams, "Engineering Tribology, 2nd Edition," Cambridge University Press, Chap.5, pp.167, November, 2000.
- [3] K. Kitamura, "Wear of Tool," *Transactions of Materials Proceeding*, Vol. 16, No. 7, pp. 493-501, November, 2007.
- [4] S.M. Byon, "Experimental Study to Examine Wear Characteristics and Determine the Wear Coefficient of Ductile Cast Iron(DCI) Roll," *Journal of Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers*, Vol. 33, No. 3, pp. 98-105, June, 2017. DOI: 10.9725/kstle.2017.33.3.98
- [5] P. Pointner, "High strength rail steels-The importance of materia properties in contact mechanics problems," *Wear*, Vol. 265, pp. 1373-1379, October, 2008. DOI: 10.1016/j.wear.2008.03.015
- [6] P. Bolton, P. Clayton, "Rolling-sliding wear damage in rail and tyre steels," *Wear*, Vol. 93, pp. 145-165, January, 1984. DOI: 10.1016/0043-1648(84)90066-8
- [7] D. Markov, "Laboratory tests for wear of rail and wheels," *Wear*, Vol. 181-183, Part 2, pp. 678-686, March, 1995. DOI: 10.1016/0043-1648(95)90184-1
- [8] Y. Hu, L. Zhou, H.H. Ding, G.X. Tan, R. Lewis, Q.Y. Liu, J. Guo, W.J. Wang, "Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness and creepage conditions," *Tribology International*, Vol. 143, pp. 1-14., March, 2020. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.106091
- [9] T.P. Leso, C.W. Siyasiya, R. Mostert, J. Moema, "Effect of normal load on the wear and rolling contact fatigue behavior of AAR class B wheel against R350HT rail in a twin disc simulator," *MATEC Web of Conferences*, Vol. 388, pp. 1-8, December, 2023. DOI: 10.1051/mateconf/202338805008
- [10] A.G. Petrakova, "Optimization of material hardness of solid-rolled wheel of freight cars," *Journal of Friction and Wear*, Vol. 30, No. 1, pp. 41-45, May, 2009. DOI: 10.3103/S1068366609010073
- [11] A.A. Razhkovskiy, T.G. Bunkova, A.G. Petrakova, O.V. Gateluk, "Optimization of hardness ratio in rail-wheel friction pair," *Journal of Friction and Wear*, Vol. 36, No. 4, pp. 334-341, July, 2015. DOI: 10.3103/S1068366615040157

- [12] Z. hi, L. Nencioni, E. Meli, H. Ding, W. Wang, R. Andrea, "Effect of material hardness ratio on wear and rolling contact fatigue: Development and validation of new laws," *Wear*, Vol. 514-515, pp. 1-13, February, 2023. DOI: 10.1016/j.wear.2022.204561
- [13] H. Moon, G.W. Bang, "Factors and Test Methods Affecting Rolling Contact Fatigue," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 29, pp. 125-137, April, 1989
- [14] M. Fujita, K. Kuki, "An Evaluation of Mechanical Properties with the Hardness of Building Steel Structural Members for Reuse by NDT," *Metals*, Vol. 6, No. 247, October, 2016. DOI: 10.3390/met6100247
- [15] M. Barszcz, J. Jozwik, K. Dziedzic, K. Stec, "Evaluation of tribological properties of selected engine oils during operation of the friction pairs of steel-on-steel," *International Conference Energy, Environment and Material Systems*, Vol. 19, October, 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20171903027
- [16] W.F. Rohr, "Experimental and Theoretical Investigation of Lube Oil Performance and Engine Friction," *Doctoral Dissertations*, University of Tennessee, Knoxville, May, 2013.
- [17] R. Steele, R. Reiff, "Rail: Its behavior and relationship to total system wear," *Proceedings of 2nd conference on heavy Haul*, September, 1982.
- [18] J.W. Lee, S.H. Na, D.H. Yoon, S.H. Han, "Wear Characteristics of Carburized SCM415 Steel for Control Valve," *The Transaction of Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 40, No. 10, pp. 873-878, October, 2016. DOI: 10.3795/KSME-A.2016.40.10.873
- [19] G.P. Cavallaro, "Bending Fatigue and Contact Fatigue Characteristics of Carburized Gears," *Surface and Coating Technology*, Vol. 71, No. 2, pp. 182-192, 1995. DOI: 10.1016/0257-8972(94)01019-F
- [20] H.Y. Lee, "Effects of Carburizing Process on Sliding wear Behavior of Carburized SCM420H Steel," *Tribology and Lubricants*, Vol. 36, No. 1, pp. 18-26, February, 2020. DOI: 10.9725/kts.2020.36.1.18

Authors



Hun-Kee Lee received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Kyungpook National University in 2003, and M.S. and Ph.D. degree in Mechanical Engineering from POSTECH in 2006 and 2009 respectively.

And then, Dr. Lee worked for MIT (Department Science & Engineering) as a Postdoctoral researcher for two years. He is currently a Professor in the Department of Mechanical System Engineering, Republic of Korea Naval Academy. He is interested in Optimal Shape Design, Strength Evaluation and FEM analysis for Structures.



Hui-Sun Ahn received the B.S. degree in Mechanical Engineering from Chonbuk National University in 2008, He is currently a General Manager in the Technology Solution Center, STX engine co., Ltd.

He is interested in engine development and engine performance test.



Myeong-Chul Park received the B.S. degree in Computer Science from Korea National Open University in 1999, and the M.S. and Ph.D. degrees in Computer Science from Gyeongsang National University in 2002 and

2007 respectively. He is currently a Professor in the Department of Avionics Engineering, Kyungwoon University. He is interested in Simulation, Visualization, Education of Software and Parallel Programming.