



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2022년 2월
석사학위 논문

고분자 기어의 치형 설계와
표면처리에 따른 트라이볼로지적
특성에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

김강민

고분자 기어의 치형 설계와
표면처리에 따른 트라이볼로지적
특성에 관한 연구

**A study on the tribological characteristics of polymer
gears according to tooth design and surface treatment**

2022년 2월 25일

조선대학교 대학원
기계공학과
김강민

고분자 기어의 치형 설계와
표면처리에 따른 트라이볼로지적
특성에 관한 연구

지도교수 김 창 래

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2021 년 10 월


조선대학교 대학원


기계공학과

김 강 민

김 강 민의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 박 정 수 

위 원 조선대학교 교수 이 정 원 

위 원 조선대학교 교수 김 창 래 

2021 년 12 월

조 선 대 학 교 대 학 원

목 차

LIST OF TABLES	V
LIST OF FIGURES	V
NOMENCLATURES	VIII
ABSTRACT	X
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구 배경 및 관련 연구	1
1. 연구 배경	1
2. 관련 연구	3
제 2 절 연구 목적 및 방법	6
1. 연구 목적	6
2. 연구 방법	7
제 2 장 이론적 배경	9
제 1 절 트라이볼로지 이론 및 기어 이론	9
1. 트라이볼로지	9
2. Hertzian contact theory	10

3. 마모 이론 및 메커니즘	11
가. 응착마모	12
나. 연삭마모	12
다. 피로마모	13
라. 부식마모	13
4. Gear	14
제 2 절 고분자 재료 표면 특성 개질	16
1. 표면 연마 이론	16
2. 표면 코팅 이론	17
제 3 절 유한요소해석	18
제 3 장 고분자 기어 치형에 따른 신뢰성 평가	19
제 1 절 실험 시편 준비 및 평가	19
1. 시편 준비 및 실험 장비 구축	19
2. 기어 치형에 따른 신뢰성 평가 및 결과	22
제 2 절 유한요소해석 모델 도출 및 결과 해석	30
1. 실험 조건 기입 및 해석 과정	30

2. 기어 치면 접촉압력 분석 및 결과	31
3. 기어 치아 내부 응력 분석 및 결과	34
제 4 장 표면처리에 따른 고분자 평기어의 트라이볼로지 특성 평가	36
제 1 절 실험 시편 준비 및 트라이볼로지 특성 평가	36
1. 시편 준비 및 실험 장비 구축	36
2. 표면 특성 및 마찰·마모계수 측정 및 결과	41
가. 표면특성 측정 및 비교	41
(1) 표면 접촉각, 표면에너지 측정 및 비교	41
(2) 표면 형상, 표면 거칠기 측정 및 비교	44
나. 표면 마찰계수 측정 및 비교	47
다. 마모율 측정 및 비교	50
제 2 절 표면처리 기법에 따른 고분자 기어 평가 및 비교 분석	53
1. 표면처리에 따른 기어 신뢰성 평가 및 결과	53
2. 기어 신뢰성 평가 비교 분석 및 결론	58
가. 1.2Nm 토크 구동환경	59
나. 3.6Nm 토크 구동환경	61

다. 12.0Nm 토크 구동환경	63
라. 기어 신뢰성 평가 결론 I	65
마. 기어 신뢰성 평가 결론 II	67
제 5 장 결론	68
제 1 절 연구 결론	68
제 2 절 향후 과제	71
Reference	72

LIST OF TABLES

Table. 1 Wear volume & rate values of each teeth design polymer gear pairs	25
Table. 2 Wear volume & rate values of cycloid teeth design polymer gear pairs	28
Table. 3 Max gear contact pressure equation meanings, symbols, and values	31
Table. 4 Mechanical properties of four kinds of polymer specimens	36
Table. 5 Contact angle & surface energy of each polymer specimens	43
Table. 6 Hertzian contact analysis of four kinds of polymer specimens	47
Table. 7 Wear volume & rate values of 3D printed PA cycloid gears	57
Table. 8 Wear volume & rate values of machining PA & Surface treated 3D printed PA	65

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Polymer gears uses in various industry	2
Fig. 2 Failure modes of polymer gears	2
Fig. 3 Flowchart for selection of test specimes	8
Fig. 4 Contact of an elastic sphere with an elastic plane	10
Fig. 5 Adhesive wear mechanism	12
Fig. 6 Abrasive wear mechanism	12
Fig. 7 Fatigue wear mechanism	13
Fig. 8 Corossive wear mechanism	14
Fig. 9 Example of Dynamic FEM analysis	18
Fig. 10 Gear teeth profile drawing in CATIA V5	19
Fig. 11 Each gear specimens of different gear tooth shape	19
Fig. 12 Polymer gear durability test machine	20
Fig. 13 Non contact infrared temperature camera (left), Actual gear experiment screen (right)	20

Fig. 14 Schematic diagram of polymer gear durability experiment 21

Fig. 15 Measuring weight loss after gear durability test for calculate wear rate 21

Fig. 16 Variations in the gear torque efficiency of each gear teeth design according to rotational cycles 22

Fig. 17 Variations in the gear flash temperature of each gear teeth design according to rotational cycles 23

Fig. 18 Failure modes of each polymer gear pairs 24

Fig. 19 Variations in the gear torque efficiency of Cycloid gear at different output torque value according to rotation cycles 26

Fig. 20 Variations in the gear flash temperature of Cycloid gear at different output torque value according to rotation cycles 27

Fig. 21 Failure modes of cycloid teeth design polymer gear pairs 28

Fig. 22 ABAQUS mesh structure of each gear model; Involute 14.5°(a), Involute 20.0°(b), Cycloid (C) 30

Fig. 23 Contact behavior of the involute spur gear and distribution of the contact force along the line of action (a), Contact behavior of cycloid spur gear(b) 32

Fig. 24 Contact pressure distribution along the rotation angle of each gear models 33

Fig. 25 Von Mises stress distribution of the each gear model pairs; involute 14.5°(a), involute 20.0°(b), Cycloid gear(c) 34

Fig. 26 Four types of 3D printing materials manufactured for evaluate tribology characteristics 36

Fig. 27 Acetone fumigator for surface polishing 37

Fig. 28 Schematic diagram of 3D printed specimen surface acetone fumigation process 37

Fig. 29 Dip coating machine for surface CNT coating (left), Actual polymer gear CNT coating (right) 38

Fig. 30 Reciprocating machine for measure friction coefficient 40

Fig. 31 Laser scanning confocal microscope for measure surface & wear 41

Fig. 32 Water Contact angle of 3D printed four kinds of polymer materials under different surface treatment 42

Fig. 33 Surface roughness of 3D printed four kinds of polymer materials under different surface treatment 44

Fig. 34 2D profile laser scanning confocal microscope surface images of four kinds of 3D printed polymer materials under different surface treatment (ABS, PE, PP, PA) 46

Fig. 35 Variation in the friction coefficient of 3D printed four kinds of polymer materials under different surface treatment according to Sliding Cycles 48

Fig. 36 Average friction coefficient of 3D printed four kinds of polymer materials under different surface treatment 48

Fig. 37 Wear rate of four kinds of 3D printed polymer materials under different surface treatment 50

Fig. 38 2D profile laser scanning confocal microscope surface images of four kinds of 3D printed polymer materials under different surface treatment (ABS, PE, PP, PA) 51

Fig. 39 3D printed cycloid PA12 polymer gear pure (left), surface treated (right) 53

Fig. 40 Variations in the Gear torque efficiency of Pure 3D printed PA gear (a), Surface treated PA gear (b) 54

Fig. 41 Variations in the Gear Flash temperature of Pure 3D printed PA gear (a), Surface treated PA gear (b) 55

Fig. 42 Gear teeth surface images of after experiment at different torque environment .. 56

Fig. 43 PA12 polymer gear machining involute gear (left), CNT coated 3D printed cycloid polymer gear (right) 58

Fig. 44 Variations in the Gear torque(1.2Nm) efficiency of machining PA gear, Surface treatment 3D printed PA gear 59

Fig. 45 Variations in the Gear Flash temperature of machining PA gear, Surface treatment 3D printed PA gear in torque(1.2Nm) environment 59

Fig. 46 Variations in the Gear torque(3.6Nm) efficiency of machining PA gear, Surface treatment 3D printed PA gear 61

Fig. 47 Variations in the Gear Flash temperature of machining PA gear, Surface treatment 3D printed PA gear in torque(3.6Nm) environment 61

Fig. 48 Variations in the Gear torque(12.0Nm) efficiency of machining PA gear, Surface treatment 3D printed PA gear 63

Fig. 49 Variations in the Gear Flash temperature of machining PA gear, Surface treatment 3D printed PA gear in torque(12.0Nm) environment 63

Fig. 50 Gear teeth surface images of after experiment at different torque environment .. 65

NOMENCLATURES

Hertzian contact theory

E^* , E_1 , E_2 = Contact modulus, young's modulus (N/mm²)

ν_1 , ν_2 = Poisson ratio

a = Contact area of radius (mm)

D = Total deformation (mm)

P_{\max} = Max contact stress (N/mm²)

Wear rate equation

$W.R.$ = Wear rate (mm³/N • mm)

V = Wear volume (mm³)

N = Normal force (N)

L = Sliding distance (mm)

Gear torque equation

η = Gear torque efficiency

γ_a = Max rotational speed (RPM)

Gear wear rate equation

α = Gear pressure angle (°)

W_s = Gear wear rate (mm/rev)

z = Number of gear teeth

m = Gear Module (mm)

b = Gear Face width (mm)

N_T = Total cycle (rev)

W_v = Gear Wear Volume (mm³)

AGMA standard

σ_H = Max contact stress (MPa)

Z_E = composite modulus (\sqrt{MPa})

F_t = Transmitted tangential load (N)

K_0 = Overload factor

K_v = Dynamic factor

K_s = Size factor

K_H = Load distribution factor

d_{w1} = pinion pitch diameter (mm)

Z_R = surface condition factor

Z_I = surface strength geometry factor

Gear contact ratio equation

ϵ = Contact ratio

l = Line of action (mm)

P_b = normal pitch (mm)

Young-Dupre equation

γ = Liquid surface tension energy (mJm^{-2})

θ = Water droplet angle (°)

W = Solid surface tension energy (mJm^{-2})

ABSTRACT

A study on the tribological characteristics of polymer gears according to tooth design and surface treatment

Kim Gang Min

Advisor : Prof. Kim Chang-Lae, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

Gears have been used as a means of power transmission for a long time as a part of various mechanical devices. In the past, gears made of metal have been mainly used, but now the use of polymer gears is increasing. Polymer gears are lighter in weight than metal gears, have superior operating performance, generate less noise and vibrations, and can be driving no-lubrication, which has numerous mechanical and environmental advantages over metal gears. However, polymer gears have disadvantages in that they have weak mechanical properties and are very weak to heat. Also, polymer gears tend to be easily fractured by frictional heat due to their low thermal conductivity. For this reason, polymer gears are not applied to heavy machine such as automobiles or aircraft, but are used in light-load machine such as office equipment or home appliances. Therefore, there is a need for research to improve the reliability of polymer gears for application to a wide range of industries. The goal of this study is to improve the reliability of polymer gears through tooth shape modification and surface treatment. In this study, a gear was manufactured using 3D printing, and the driving characteristics of the gear according to the tooth shape of the polymer gear were analyzed. And the tribology characteristics according to various materials and surface treatment were analyzed, and the material and surface treatment with the best tribology characteristics were applied to the polymer gear. The tooth shape design of polymer gears was analyzed for involute gear and cycloid gear, which had not been studies in the polymer gear. Tribology characterization was tested on ABS, PE, PP, and

PA materials, and the surface was treated with surface chemical polishing and CNT coating. As a result of the experiment, the cycloid tooth reduced frictional heat by up to 32% compared to the involute tooth. And the efficiency was also the best with the cycloid tooth shape. The material and surface treatment with the best tribology properties are those that are PA material and surface chemical polishing and CNT coating. In a comparison experiment with typical gears, the gears manufactured through this study(Cycloid tooth shape PA material, surface chemical polishing and surface CNT coating) reduced frictional heat by up to 70%, and the wear rate by 60%, and the efficiency increased by up to 10%. This study showed that cycloidal teeth of polymer gears have better operating performance than involute teeth. And materials with good tribological properties also have good gear operating performance, which can be further improved through surface treatment such as surface polishing or CNT coating.

제 1 장 서론

제 1절 연구 배경 및 관련 연구

1. 연구 배경

기어는 톱니바퀴의 형상을 가진 기계 부품의 일종으로, 한 쌍의 기어를 연결하여 동력을 전달하거나 변속 혹은 축의 운동 방향을 바꾸는 등의 역할을 하여, 기원전부터 현대까지 없어서는 안 될 부품의 하나로 사용이 되어왔다. 기어를 이용한 동력전달과 변속은 1차 산업혁명 증기기관 기반의 기계화 혁명이 시작된 이후 주로 이용이 되기 시작하였으며, 최근에는 자동차와 증기기관차 및 공작기계와 같은 큰 기계 장치부터 가전기기 및 자전거, 시계와 같은 작은 기계 장치까지 모든 산업에 이용이 되고 있다. 그리고 현대에 들어서는 더욱 정밀한 기어의 생산이 가능해짐과 동시에 로봇과 같은 첨단 기기에 들어가는 등의 역할을 하고 있다.

과거부터 현재까지 산업에서 주로 쓰이는 기어는 금속 재질의 기어이다. 금속 재질의 기어는 가동 시 큰 소음이 날 뿐 아니라 진동이 수반되어 윤활제가 필수적으로 필요하며, 금속의 무게에 의해 기계가 무거워져 단위 연료당 기계의 효율이 떨어지는 단점이 있다. 금속 기어의 이러한 특성은 윤활유로 인한 환경오염 및 자원 낭비를 야기할 뿐만 아니라 최근 이슈가 되고 있는 소형·경량화를 통한 친환경 사업에 맞지 않는 문제점이 있다. 많은 연구자가 이러한 문제를 해결하기 위해 친환경적인 윤활유 개발 [1] 또는 기어 표면 코팅을 통한 경량화 및 효율 증진과 마모 개선 등의 노력을 행해왔으나[2], 이러한 노력에도 불구하고 금속 기어 자체의 문제점을 상쇄시키지는 못하는 실정이다.

고분자 기어는 금속 기어를 대체할 기어 재료로 유망한 재료이다. 고분자 기어는 금속 기어와 달리 생산단가가 더 저렴하고 성형이 비교적 간단하며, 동일 부피 대비 가벼움 및 내부식성 특성과 윤활제가 필요 없는 무 윤활 특성을 가졌다. 또한, 추가로 내부 댐핑 효과와 낮은 관성의 특성을 가지고 있어 NVH(Noise, Vibration, Harshness) 성능을 향상시킨다는 장점이 있다.[3,4] 각종 산업에서는 이러한 고분자 기어의 특성을 이용하여 점차 금속기어를 고분자 기어로 대체하고 있으며, 각종 사무용기기, 펌

프, 섬유 및 식품공장 또는 자동차 산업에 변속기 혹은 동력전달 용도로 이용이 되고 있다.(Fig. 1 [5-9]) 하지만 고분자 기어는 금속 기어에 비해 약한 기계적 강도와 낮은 열전도성에 의해 높은 하중의 구동 환경에서 (Fig. 2)와 같이 쉽게 마모 또는 파손되는 문제점이 존재한다.[10-12] 앞선 변속기내 기어의 마모 또는 파손은 변속기의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 소음과 진동을 일으켜 기계 동작에 치명적인 오류를 일으킬 수 있으며, 기계 장치 유지·보수 비용을 증가시킬 뿐만 아니라 장비의 신뢰성에도 큰 악영향을 끼칠 수 있다. 고로 이러한 이유 때문에 산업의 발전을 위해서는 고분자 기어의 단점을 해결하고 폭넓은 산업에서의 적용을 위한 연구가 필요한 실정이다.

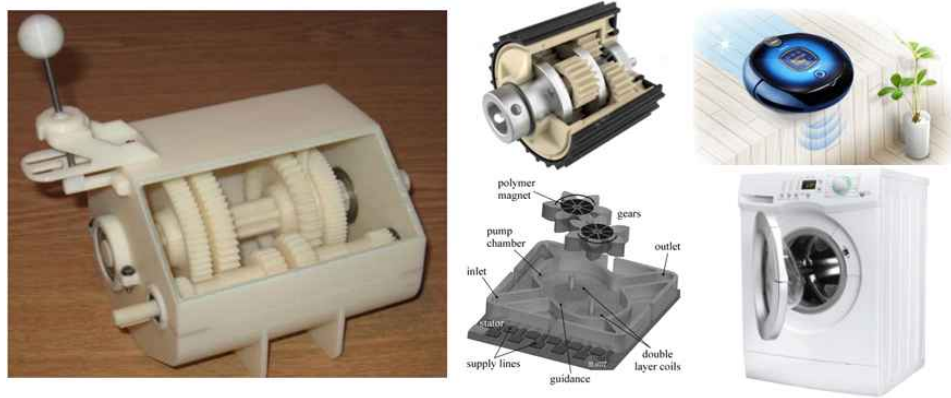


Figure. 1 Polymer gears uses in various industry (Gear box, Pump, home application) [5-9]

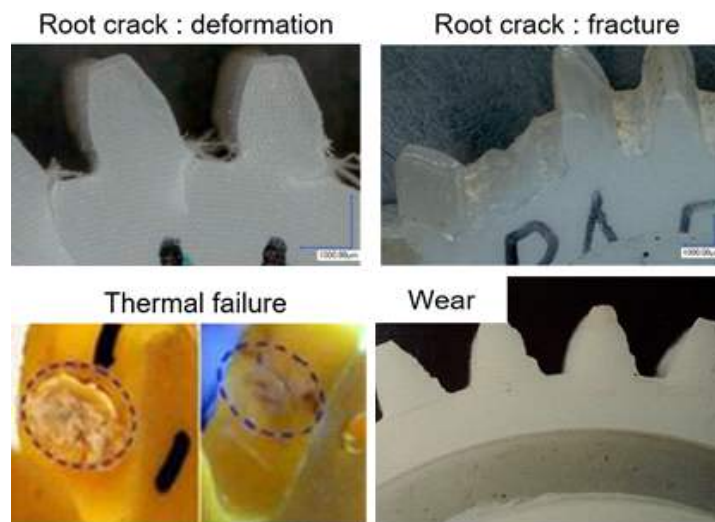


Figure. 2 Failure modes of polymer gears [10-12]

2. 관련 연구

고분자 기어의 고하중에서 쉬운 파손에 대한 문제 분석 및 이를 해결하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 관련 연구는 학술적 연구와 산업의 적용에 대한 단락으로 나뉜다.

본 단에서는 고분자 기어의 문제점을 학문적으로 파악하기 위해 고분자 기어의 가동에 따른 특성 분석에 관한 연구로, 해당 관련 연구는 다음과 같다.

2017년 Kalin은 대기중 온도에 따른 고분자 기어의 특성을 분석하고자 가열 챔버내에서 고분자 기어 구동 실험을 하였으며 온도범위는 30°, 50°, 70° 와 같이 설정하였다. 실험 결과 대기 온도가 높은 70° 의 환경에서는 동일한 토크 환경임에도 효율이 감소할 뿐만 아니라 쉽게 파손이 되었으며, 실제 기어 구동을 위해서는 주변 온도를 제어함이 필요하다고 주장하였다.[13]

2019년 Singh는 세 종류의 기어 구동 시 각 재료의 효율과 표면 온도를 측정하였으며 실험 환경에 따른 특성의 변화를 측정하였다. 해당 연구에서는 고분자 기어의 효율 변화는 기어의 속도보다 토크에 더욱 영향을 받으며 기어의 재료에 따라 효율과 마찰열이 각각 다른 결과값을 보였다. 또한 마찰열이 증가할수록 효율이 감소하는 특성이 있음을 보였다.[14]

2020년 Lu는 고분자 재료의 온도에 따른 기계적 특성에 대해 연구하고 고분자 기어에 홈을 내어 홈의 직경에 따른 예상 수명에 대해 실험하였다. 해당 연구에서는 플라스틱 고분자 재료는 낮은 온도에서는 본래의 기계적 강도를 보이거나 온도가 상승할 시 기계적 강도가 선형적으로 크게 감소함을 보였으며 기어 내부 홈에 따른 기어의 예상 수명을 예측 또는 실험적으로 증명하였다.[15]

2016년 Koffi는 고분자 기어 치 상단과 좌측 등 여러 방향에 구멍을 내어 고분자 기어의 작동 간 열 발생에 대하여 연구하였으며, cooling hole 효과를 통해 단위 면적당 기어 치아에 발생하는 온도를 감소시켰을 뿐만 아니라 이를 통해 발생하는 응력을 감소시켰다.[16]

2021년 Kumar 또한 고분자 기어에 타공을 하여 고분자 기어에 발생하는 온도를 감소시켰으며 해석을 통해 이를 수치적으로 증명하였다.[17]

2009년 Imrek는 고분자 기어 치면을 확장시켜 단위 면적당 기어 치아에 발생하는 온도를 분산시키기 위한 연구를 진행하였으며, 이를 통해 기어 표면에 발생하는 온도를 10~15° C 감소시켰다. 또한 표준 기어에서는 피치 점에서 기어의 마모가 나타났으나

디자인이 변경된 기어의 경우 피치 점에서의 마모는 나타나지 않고 이뿌리에서 마모가 나타났다. 이러한 마모의 양상은 온도를 분산함으로써 나타나는 마모의 형상으로, 이를 통해 디자인이 변경된 기어의 수명이 늘어났다고 주장한다.[18]

각 연구를 통해 고분자 기어 구동 시 마찰열이 효율과 마멸에 큰 영향을 끼치는 주요 인자이며, 주변 온도 제어 혹은 기어 형상 변경이 마찰열을 감소시키는 방안이 될 수 있음을 보였다. 그러나 기어의 형상설계를 통한 연구는 고분자 기어에 타공을 하여 기어의 온도를 낮추는 방식이 주로 애용되고 있으며 치형을 변경하는 연구는 치면을 확장시킨 연구인 2009년 Imrek의 연구 만이 유일한 실정이다. 또한, 기어 타공 시 온도를 감소시키는 효과는 있으나 높은 하중이 가해졌을 때 집중 응력에 의해 파손의 위험성이 존재한다는 단점이 생성된다. 이를 통해 고분자 기어의 마찰열을 감소시키기 위한 형상설계에 있어 타공 뿐만이 아닌 다른 방식의 설계를 통해 기존에 존재하던 기어의 단점을 해결하기 위한 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 고분자 기어의 형상설계를 통한 신뢰성 향상을 위해 기존 금속 기어에서의 이론을 차용하여 동력전달 효율이 좋은 인볼류트 곡선 치형의 기어와 높은 내마모성을 가진 사이클로이드 곡선 치형의 기어를 각각 고분자 기어로 제작하여 특성 분석을 한 후, 고분자 기어으로써 가장 우수한 치형의 기어를 선정하였다.

본 단은 고분자 기어의 쉬운 파손에 대한 문제를 해결하고 효율을 상승시켜 산업에서의 응용이 될 수 있는 연구에 대한 것으로, 해당 관련 연구는 다음과 같다.

2019년 Mao와 Singh는 고분자 기어에 유리섬유를 첨가하여 28%의 효율 향상과 50% 하중 용량을 증가시키는 효과를 내었다. 그러나 유리섬유를 첨가한 고분자 기어는 시간이 지날수록 그 효능을 잃어갔으며 일부 기어가 파손될 시 유리섬유 또한 같이 파손되고 또한 마찰열에 의해 연쇄적인 파단이 일어나는 문제가 발생하였다.[19,20]

2012년 Dearn은 PTFE 코팅을 통해 표면 저마찰을 이용하여 고분자 기어의 마찰을 최소화하는 방법을 사용하였다. 이러한 방법은 가동 온도를 300° 가량 감소시키고 비코팅 대비 마모를 90% 이상 감소시켰으나 상대적으로 단단한 표면 맞닿을 시 코팅이 쉽게 마모된다는 단점이 있다.[21]

2016년 Johnney은 고분자 기어에 CNT를 첨가하여 기계적 강도 증가 및 우수한 열전도 효과를 기대하였으며 해당 연구에서는 기존 순수 고분자 기어 대비 3~80% 낮은 마모율을 보였으며 1~1.5% 효율 증대 및 5~10 C° 의 열 감소 효과가 있었다.[22]

2012년 kirupasankar는 Polyamide 기어 내부 나노 Clay를 첨가하여 기어 특성을 강

화시켰으며 해당 연구에서는 나노 Clay 첨가를 통해 기계적 특성이 증가하고 표면이 경해졌을 뿐만 아니라 효율이 상승하고 마찰열이 감소하는 효과가 있었다.[23]

각 연구를 통해 고분자 기어 외부 코팅 혹은 내부 첨가제를 주입 함으로써 고분자 기어의 쉬운 파손이라는 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 효율 또한 증가시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 딥코팅 이라는 손쉽고 경제적인 코팅 방법을 이용하여 고분자 기어 표면 CNT 코팅을 통해 표면에 발생하는 마찰열을 감소시키고 효율을 증가시켜 고분자 기어의 신뢰성을 향상시켰다.

제 2 절 연구 목적 및 방법

1. 연구 목적

고분자 기어는 금속보다 성형이 매우 간단한 재료이며 기어 제작 시 고회전을 이용하여 절삭하는 방식으로 제작되는 금속과는 다르게 성형 몰드, 와이어 커팅, 3D 프린팅 등 제작 공정이 다양하고 쉬운 편에 속한다. 때문에 고분자 기어는 도면을 작성할 수만 있다면 누구든지 원하는 형상의 기어를 제작할 수 있다. 이러한 고분자 기어의 특성을 통해 단순히 고분자 내부 충전제 및 표면처리 방법에 국한되지 않고 공학적인 형상 디자인에 따른 고분자 기어의 문제점을 해결할 수 있으며 이를 연구할 필요성이 있다.[24]

적층 제조공정(AM)이라 불리는 3D 프린팅은 현재 떠오르고 있는 제조업 방법 중의 하나이며, 3D 프린팅은 기존 생산 공정인 절삭 혹은 원료를 제품으로 변환하는 압출 공정과는 다르게 재료를 한층 한층 얇게 쌓아 올려 제품을 제작하는 제작기법 중의 하나이다.[25] 그리고 3D 프린팅은 3차원 디지털 모델링을 통해 손쉽게 제작이 가능하고 어떠한 형상이든지 만들어 낼 수 있어 전 세계적으로 각광받고 있는 기술 중에 하나이다. 3D프린팅 공정을 통한 플라스틱 제품 생산은 시제품 생산 및 제품 소량 생산에 특화되어 있으며 기존의 플라스틱 제품 제조 방법인 injection moulding보다 비용 절감의 효과를 가지고 있다.[26]

최근 3D 프린팅을 이용한 고분자 기어 생산에 대한 연구가 지속되고 있다. 2020년 Zhang은 3D 프린팅 기술을 이용한 기어 생산을 위해 프린팅 변수와 프린팅 알고리즘에 따른 기어의 정밀도의 영향에 대하여 연구하였다. 연구 결과 변수에 따른 고분자 기어 제작의 변수 조건과 알고리즘에 대한 기초 데이터를 제공하는 결과를 제시하였다.[27] 2018년 Dunnigan은 SL 방식을 통해 고분자 기어를 제작할 시 레진의 종류에 따른 기어의 기계적 특성의 변화에 대하여 연구를 하였다.[28] 2019년 Zhang은 3D 프린팅을 통해 다섯 가지의 다른 고분자 재료에 대한 기어 동작의 파손과 마모율에 대한 연구 데이터를 선보였다.[29] 2018년 Kotkar 또한 3D 프린팅을 통해 제작한 고분자 기어들의 기계적 특성을 분석하였으며, 3D 프린팅한 기어 재료에 따른 기계적 특성을 측정하였다.[30] 이렇듯 3D 프린팅을 이용한 고분자 기어 생산에 관한 연구가 지속됨에 따라 추후 3D 프린팅 기술이 발전과 함께 3D 프린팅을 이용한 고분자 기어의 생산 및 활용을 기대할 수 있다.

본 연구의 목적은 어떠한 형상이든 3차원 모델링 도면만 있다면 따라 만들어 낼 수 있는 3D 프린팅 기술을 이용하여 고분자 기어의 치형 형상에 따른 트라이볼로지 특성과 구동 효율 측정 및 예상 수명에 대해 실험을 통한 분석을 하고자 한다. 그리고 이에 더해 고분자 종류에 따른 트라이볼로지 특성을 분석하고 표면 화학 연마와 코팅을 통해 표면처리 공정에 따른 트라이볼로지 특성을 추가로 분석한다. 그리고 이를 기어에 적용하였을 때 고분자 기어의 효율과 예상 수명을 실험적으로 측정하고 가장 우수한 고분자 기어 재료와 형상, 그리고 표면처리 기법을 선정하고자 한다. 본 연구의 결과는 3D 프린팅 뿐만 아니라 다른 생산 방법으로 제작된 고분자 기어에도 적용이 가능함을 제시하며 고분자 기어의 폭넓은 산업 적용과 표면처리와 관련된 연구의 기초 자료로써 활용될 것으로 기대된다.

2 . 연구 방법

제3장은 고분자 기어 형상에 따른 기어 신뢰성 실험이다. 기어의 디자인은 기어의 가장 대표적인 형상인 평 기어를 만들도록 한다. 그리고 기어의 디자인은 가장 대표적인 기어의 치형인 인벌류트 기어와 사이클로이드 기어를 선정하였으며, 인벌류트 기어의 치형은 산업에서 주로 쓰이는 인벌류트 치형의 압력각인 14.5° 와 20.0° 를 선정하였다. 사이클로이드 기어는 고정된 압력각이 존재하지 않는 특징이 있어 인벌류트 기어와 같은 외경 및 두께, 모듈과 같은 공통 제원으로 제작하였다. 고분자 기어의 재료로는 범용 플라스틱인 ABS를 사용한다. 기어의 제원은 지름 48mm, 내경 15mm, 모듈 1.5mm, 잇수 30개로 통일하였다. 기어 신뢰성 테스트 장비는 자체 제작 기어 신뢰성 테스트 장비를 이용하였으며, 하나의 모터와 브레이크 파우더 디스크로 동작을 제어하고 두 개의 토크 센서를 통해 기어가 구동할 시 발생하는 토크를 측정한다. 실험조건은 고분자의 약한 기계적 강도를 고려하여 600RPM의 속도와 1.2 Nm의 토크로 250,000 Cycle 동안 실험을 진행한다. 기어에 작용하는 토크 값은 랩뷰를 이용하여 측정하고, 실험이 진행되는 동안 기어 쌍의 마찰열을 실시간으로 측정하기 위해 열화상 카메라를 설치한다. 본 실험을 통해 같은 재료의 기어에서 가장 효율이 높으며 예상 수명이 긴 기어의 치형을 선정한다. 추가로, 제 3장에서 실험 조건을 유한요소해석(FEM) 프로그램인 아바쿠스(ABAQUS)를 이용하여 기어 형상에 따른 내부 응력 값과 접촉 압력 값을 분석한다. 그리고 해석 결과값을 통해 제3장에서 기어의 형상에 따른 효율과 예상 수명 값이 특정된 이유를 응력 분석을 통해 메커니즘을 규명한다.

제4장에서는 각기 다른 3D printed 고분자의 표면 트라이볼로지 특성을 비교하여 가장 우수한 시편을 선정하여 기어로 제작 후 실제 산업에 쓰이는 기어와 비교 분석한다. Fig. 3은 제4장 실험의 flowchart이다. 실험에 쓰이는 재료는 ABS, PE, PP, PA 12이며 2x2x1 mm 큐브 형태로 제작한다. 시편의 개수는 표면처리에 따른 트라이볼로지 특성 분석을 위해 각 재료마다 네 가지 큐브를 제작한다. 표면처리 기법은 아세톤 훈증을 통한 표면 화학연마와 딥코팅을 이용한 CNT 표면코팅을 한다. 이후 각각 표면처리에 따른 트라이볼로지 특성 분석을 통해 가장 우수한 재료 및 표면처리를 공정을 선정하여 고분자 기어로 제작 및 실험 후, 실제 산업에 쓰이는 기어와 비교 분석한다.

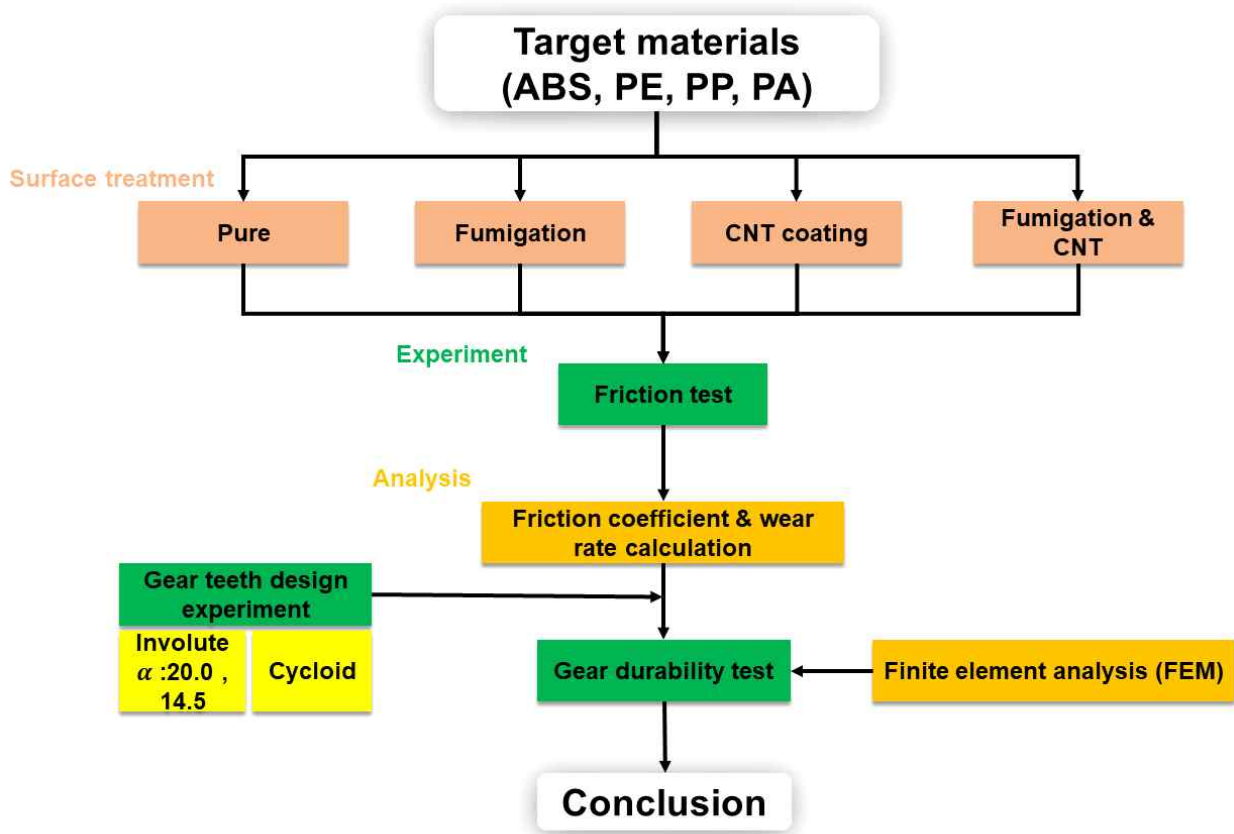


Figure. 3 Flowchart for selection of test specimens

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 트라이볼로지 이론 및 기어 이론

1. 트라이볼로지

마찰은 상대운동 하는 서로 다른 물체들의 표면이 접촉함으로써 일어나는 현상 중에 하나로, 운동 방향에 반대로 작용하는 반작용힘을 마찰력이라 부른다. 트라이볼로지는 이러한 마찰 현상에 대해 연구하는 학문으로, 마찰을 뜻하는 그리스어 ‘tribos’ 에서 유래되었다. 1966년 Jost의 연구논문에서는 마찰에 의해 발생하는 마모와 윤활을 섞어 마찰·마모·윤활을 한데 묶어 tribology라 명명하였다. 마모는 상호작용하는 두 물체 사이의 돌기 및 표면 접착력에 의해 물체 표면이 뜯어져 나가는 현상을 뜻한다. 그리고 윤활은 마찰계수를 낮추고 마모를 방지하는 역할을 하기에 마찰학인 tribology와 같이 연구되고 있다. 이러한 마찰과 마모, 그리고 윤활은 단순 기계장치뿐만 아니라 자연 생태계에도 발생하는 자연법칙으로 이를 최소화하기 위해 관련 연구의 필요성이 강조되고 있다.

최근 트라이볼로지 학문은 환경 문제가 주목을 받기 시작하며 연구의 필요성이 강조되고 있다. 모든 기계는 마찰에 의해 효율성이 달라지며 또한 마찰에 의한 마모로 기계가 파손된다. 기계의 효율은 기계를 가동하는데 소요되는 연료를 좌우한다고 할 수 있다. 고로, 낮은 효율을 보이는 기계는 보다 많은 연료를 사용하게 되며 이러한 현상은 인류에 닥친 환경문제와 매우 밀접한 연관성이 있다. 또한 효율을 올리기 위해 사용되는 윤활제는 효율을 상승시키지만, 윤활제 폐기에 의한 환경문제를 야기할 수 있다. 추가로 현재 보고에 따르면, 폐기되는 기계 중 70%는 마모로 인하여 폐기된다는 조사 보고가 있다. 트라이볼로지는 이러한 환경오염을 막고 자원 낭비를 감소시키기 위해 필수적으로 필요한 학문으로, 점차 엄격해지는 환경규제와 관련하여 없어서는 안 될 학문으로 자리 잡고 있다. 이러한 연유로 트라이볼로지 학문은 자원 낭비를 줄이는 방향으로 마찰 및 마모 저감, 그리고 친환경 윤활유 사용을 목표로 연구가 진행되고 있다. [31-33]

2. Hertzian contact theory

뉴턴 제3 법칙 : 작용 반작용의 법칙은 한 물체에서 발생하는 힘으로 맞붙는 다른 물체는 힘이 가해지는 반대 방향으로 동일한 힘을 가한다는 물리 법칙이다. 이는 접촉하는 두 물체 사이에서도 적용이 되는 법칙으로, 서로 접촉하는 두 물체는 접촉지점에서 서로 반대 방향의 같은 힘이 작용한다. 접촉하는 두 물체 사이의 작용 반작용에 의해 물체 내부에 응력이 발생하게 되는데, 이를 접촉응력(Contact stress)이라 부른다. 독일의 물리학자 헤르츠(Hertz, 1857~1894)는 접촉하는 두 물체의 작용 반작용에 의해 발생하는 접촉응력과 접촉면의 변형 및 접촉면적을 수치적으로 계산할 수 있는 이론을 최초로 제시하였으며, 실제 설계에 반영이 되고 있는 접촉 이론 중에 하나이다.[34]

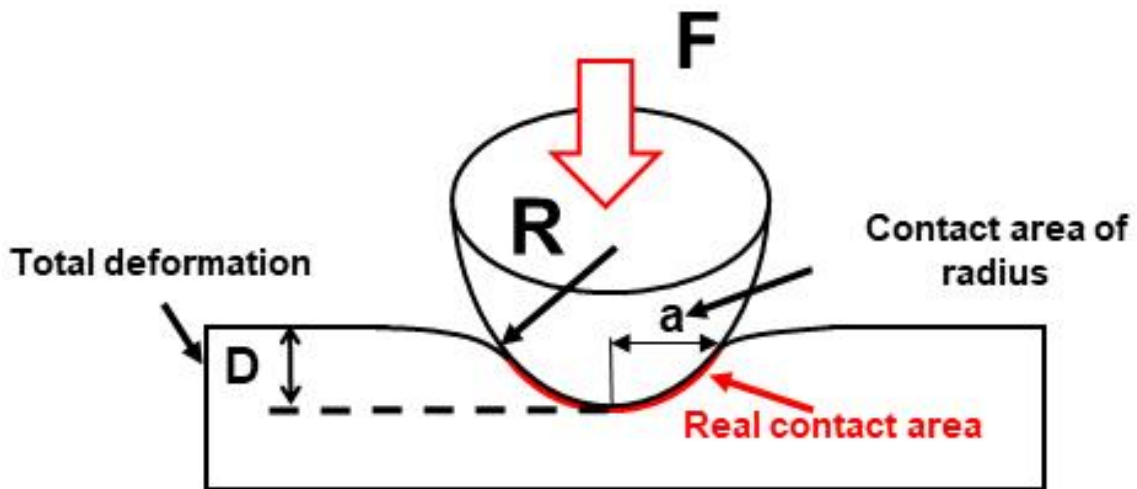


Figure. 4 Contact of an elastic sphere with an elastic Plane

Fig. 4는 Hertz 접촉 이론중 하나인, Sphere(구)-plane(면) 접촉의 예시이다. 구-면 접촉 시의 Hertz 접촉 공식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (1)$$

식 (1)은 각각 접촉물체의 탄성적 성질을 고려한 복합 탄성계수로, 최대 접촉 응력(P_{max})과 수직 변형량(D)을 구하기 위한 식에 이용된다.

$$D = \sqrt[3]{\left[\frac{3F}{4E^*} R^{\frac{1}{2}} \right]^2} \quad (2)$$

식 (2)는 접촉 상대면 (plane)의 수직 변형량(D)을 뜻하며, 수직하중에 비례하고

탄성계수와 접촉구의 반지름과 반비례한다.

$$P_{\max} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{6FE^*}{R^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

식 (3)의 P_{\max} 는 접촉지점 중앙의 최대 응력을 뜻하며, 수직 하중과 탄성계수에 비례하고, 접촉구의 반지름과 반비례한다.

$$a = \sqrt{Rd} = \sqrt[3]{\frac{3FR}{4E^*}} \quad (4)$$

식 (4)의 a 는 접촉면적의 반지름을 뜻하며, 이를 통해 접촉면적을 유추할 수 있다.

본 연구에서는 마찰 현상 또는 마모 메커니즘 규명을 위해 Hertzian contact theory 공식에 의거하여 실제 접촉면적과 수직 변형량 및 최대 접촉 응력 등을 계산하였다.

3. 마모 이론 및 메커니즘

마모는 서로 상대운동을 하는 두 개의 물체가 서로 접촉하여 미세한 입자가 접촉면으로부터 이탈되는 현상으로, 모든 기계제품에 필연적으로 발생할 수밖에 없으며 마모에 의해 기계장치가 파손 및 폐기되는 손실이 생긴다. 트라이볼로지 학문에서는 이러한 마모를 계산할 수 있는 정량화한 식을 이용하여 기계의 예상 수명 및 제품의 표면 트라이볼로지 특성에 대하여 분석한다.

$$W.R. = \frac{V}{NL} \quad (mm^2/N \cdot mm) \quad (5)$$

여기서 $W.R.$ 은 마모율을 뜻하며 V , N , L 은 각각 마모 부피, 수직하중, 이동거리로 계산이 된다.[35]

마모는 기계적인 마찰에 의한 한가지 요인뿐만이 아니라 기계적, 화학적 현상이 복합적으로 작용하여 표면에 나타나는 현상으로, 관련 작용에 따라 마모의 형상이 천차만별로 나타난다. 학계에서는 주로 일어나는 마모 현상 네 가지(응착마모, 연삭마모, 피로마모, 부식마모)를 표면에서 일어나는 주된 마모 현상이라 정리하였다.

가 : 응착마모 (Adhesive wear)

응착마모란 두 개의 표면이 계면력에 의해 결합된 상태로, 서로 다른 표면이 응착되어 있는 상태에서 접선력이 발생하였을 때 상대적으로 약한 부분의 일부분이 전단으로 인해 뜯겨져 나가는 형태이다. 이러한 마모는 화학적, 기계적 힘 모두 작용이 되는 마모로 상대적으로 마멸량이 적으며 분자스케일 혹은 나노, 마이크로 스케일에서 주로 일어난다.[36] (Fig. 5)

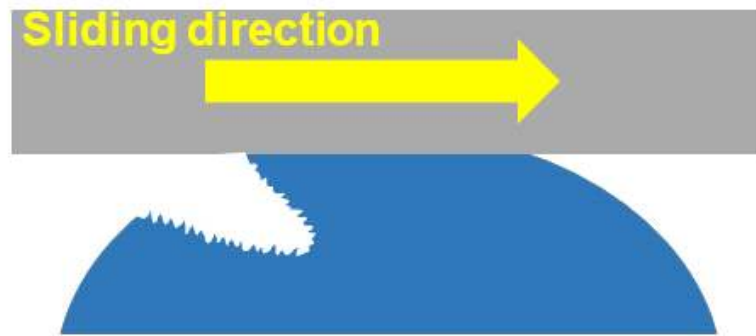


Figure. 5 Adhesive wear mechanism

나 : 연삭마모

연삭 마모란 단단한 입자 또는 표면 돌기가 상대적으로 연한 표면에 힘이 가해질 때 연한 표면이 절삭 효과에 의해 깎이는 형태로, 가장 일반적으로 많이 볼 수 있는 형태의 마모이다. 또한 서로 상대운동 하는 단단한 표면 사이에 입자가 침투하여 각각 단단한 표면을 절삭·제거 시키는 유형 또한 연삭 마모로 불린다. 각각의 마모 형태는 연한 재료에서는 주로 소성변형을 통해 재료 표면이 변형하고, 취성이 있는 재료에 연삭 마모가 일어날 시 재료표면 파단이 일어난다. 각 연삭 마모 유형은 Fig. 6에 나타내었다.[36]

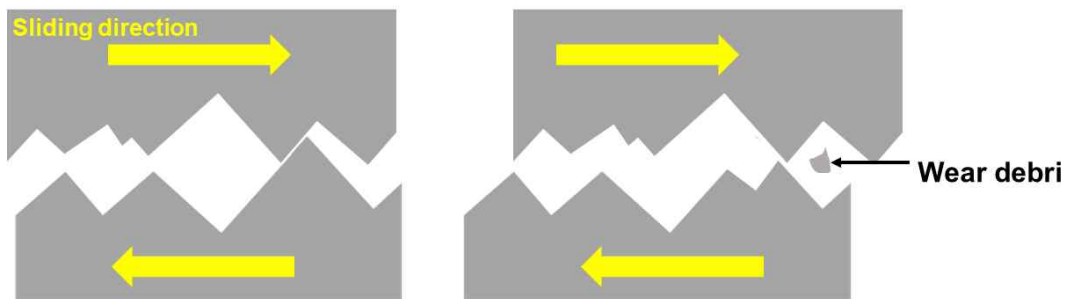


Figure. 6 Abrasive wear mechanism

다 : 피로마모

피로 마모는 재료 표면에 반복된 하중이 가해질 시 생기는 마모의 형태로, 반복된 하중에 의한 표면 파괴 또는 반복된 접촉과 마찰에 의한 산화 마모로 분류된다. 반복된 하중에 의한 피로 마모는 표면 혹은 표면 내부에 지속적인 열응력이 가해져 생긴 크랙에 의해 마멸이 커져 나가는 형태로 지속적인 반복 시 재료 일부가 떨어져 나가는 현상이다. 반복된 접촉과 마찰에 의한 산화 피로 마모는 재료의 일부가 나노~마이크로 스케일로 상대 면으로 부착되어 떨어져 나갈 때 재료의 일부분이 공기 중에 노출되어 노출된 재료의 계면이 산화 혹은 부식되어 일어나는 마모 현상이다. 각각 마모 현상은 Fig. 7에 나타내었다.[37]

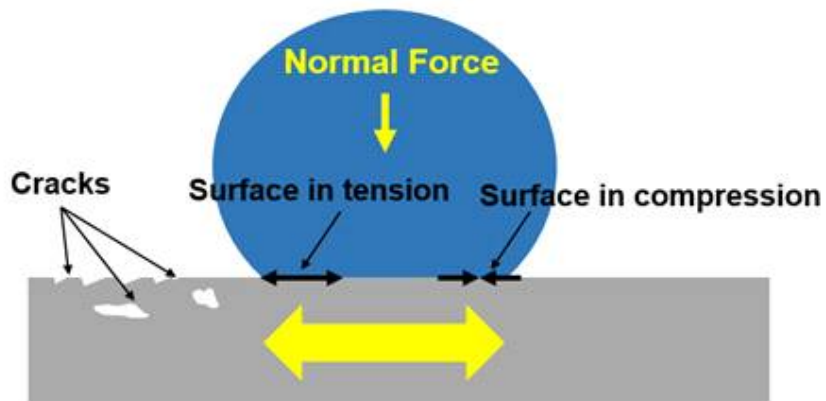


Figure. 7 Fatigue wear mechanism

라 : 부식마모

부식마모는 모든 마찰 및 마모에서 보일 수 있는 현상으로, 마모에 의해 떨어져 나간 재료의 계면에서 화학반응이 일어나 부식이 되고, 부식에 의해 재료 표면의 경도 혹은 기계적 특성을 저하시킴으로써 일어나는 마모이다. 부식이 진행된 재료에 반복된 하중 혹은 연삭 마모 발생 시 일반적인 마모보다 마멸량이 더욱 커지게 된다. 부식마모는 모든 기계제품에서 일어나는 현상임에 따라 이를 막기 위한 표면코팅 혹은 윤활제의 선택이 중요시되고 있다.[38] (Fig. 8)

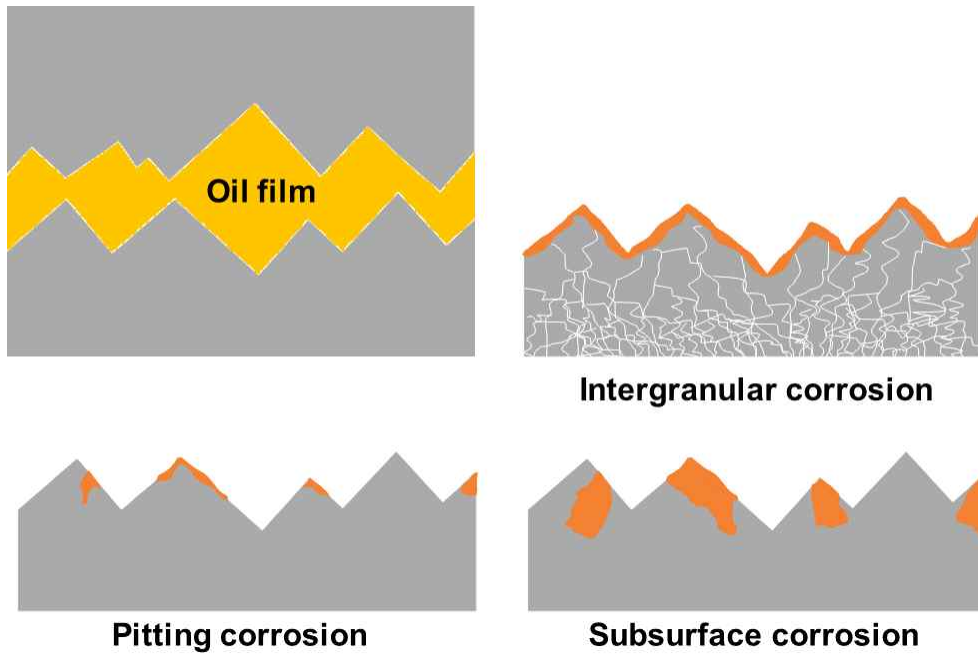


Figure. 8 Corrosive wear mechanism

4. Gear

기어는 기원전부터 사용이 되어온 톱니바퀴 형상의 기계 부품으로, 톱니바퀴의 이빨끼리의 맞물림을 통해 서로 다른 회전축에 동력을 전달하거나 동력전달 방향을 바꾸는 역할을 한다. 기어는 오랜 기간의 연구 끝에 사용 용도에 맞게 디자인이 되어왔으며, 기본형상인 평 기어를 제외하고 헬리컬기어, 베벨기어, 웜기어 등으로 제작되어 산업에 이용되고 있다. 그리고 평 기어의 경우 치형의 디자인에 따라 사용 용도가 다른 특징이 있는데, 가장 대표적인 치형은 인벌류트 치형의 기어로 인벌류트 곡선을 따라 작동된 기어를 뜻하며 동력전달 효율이 좋고 성형이 간편하여 현재 산업에서 가장 널리 쓰이고 있는 치형이다. 사이클로이드 치형은 사이클로이드 곡선을 따라 작동하는 기어의 대표적인 치형 중 하나로, 높은 동력전달 효율과 내마모성 등의 장점이 있으나 성형성이 좋지 않아 특수한 경우에만 제작되어 사용이 되고 있다.

기어에서 발생하는 마찰은 첨단 기술산업에서 매우 중요한 관심사 중에 하나로 떠오르고 있다. 기어는 치아끼리의 마찰계수에 따라 동력전달 효율이 달라지며 극심한 마찰이 일어날 경우 치아에서의 마찰열과 접촉 응력에 의한 마모로 인해 기어가 파손으로 이어지는 문제가 있다.[39] 이러한 기어의 마찰에 따른 효율과 마모율은 기어 트라이볼로지 이론을 통해 산출이 가능하다.[40,41]

$$\eta = \frac{Torque_{Driven}}{Torque_{Driver}} \quad (6)$$

$$\eta = 1 - \left(\frac{\gamma_{a1}^2 + \gamma_{r1}^2}{\gamma_{a1} + \gamma_{r1}} \right) \frac{\mu}{2\cos\alpha} \quad (7)$$

공식 (2)는 토크 측정을 통한 기어의 효율 공식이며, (3)은 마찰계수에 따른 평기어의 효율에 관한 기어 트라이볼로지 공식으로, η 은 기어의 효율, i 는 기어비, μ 는 마찰계수, γ 은 최대 동작 속도, α 는 기어의 압력각이다.

$$W_s = \frac{W_v}{z2mbN_T} \quad (8)$$

공식 (5)는 기어의 마모율에 관한 공식으로, W_v 은 마모부피, z 는 잇수, m 은 기어의 모듈, b 는 기어 치면 폭, N_T 는 기어 구동간 총 사이클이다.[42]

제 2 절 고분자 재료 표면 특성 개질

1. 표면 연마 이론

표면 연마의 목적은 주로 재료의 표면에 돌출된 돌기 및 입자를 제거하여 재료의 표면 거칠기를 낮추고 광택을 내는 등의 목적이 있다. 재료의 표면 거칠기는 상호작용하는 두 재료의 마찰에 큰 영향을 주고, 주로 높은 표면 거칠기를 지닌 재료는 연삭 마모가 잘 일어나고 마찰이 크다는 문제점이 있어 제품의 완성도와 신뢰도를 위해 표면 연마 공정은 재료 생산 공정에서 가장 중요한 공정 중의 하나로 볼 수 있다.

재료의 표면 연마 공법은 Grinding을 이용한 기계적인 연마와 증기를 이용한 화학적인 연마 또는 grit blasting 혹은 laser polishing 등 연마 상대재와 특성에 따라 다양한 기법의 연마 방법이 존재한다. Grinding을 이용한 연마는 금속의 표면을 고속회전하는 머시닝 기계를 이용하여 표면을 가공하고자 하는 재료를 연삭을 통한 소성변형을 통해 재료의 표면을 개질하는 가장 일반적인 연마 방법 중 하나이다. 증기를 이용한 연마는 최근 3D 프린팅 제품이 주목을 받기 시작하며 널리 알려진 표면처리 방법중에 하나로, 아세톤 혹은 MEK 등을 증발 시켜 사포 및 grinding 등의 연삭 작용으로 작업할 수 없는 복잡한 형상의 제품의 표면을 연마하는 데 주로 이용이 된다.[43,44] Grit blasting은 연마 입자를 제품 상대재에 분사 시켜 제품의 오염 물질 제거 및 표면 조도를 조절하는 연마 방법 중의 하나로, 상대 연마 금속 재질에 따라 연마제를 달리하여 표면의 특성을 달리하는 기법중에 하나이다. Laser polishing은 복잡한 형상의 3D 표면의 금속의 표면을 연마하기 위해 고안된 최신식 연마 방법으로, 기존의 기계적 연마법보다 속도와 성능이 우월하다는 장점이 있다.[45]

본 연구에서는 3D 프린팅 출력에 의해 상대적으로 높은 표면 거칠기를 지닌 제품의 표면을 연마하기 위해 형상과 장비에 구매를 받지 않는 acetone 화학 증기 연마를 이용하여 고분자 기어의 표면을 연마하여 보다 매끄러운 표면을 제작하고자 한다.

2. 표면 코팅 이론

표면 코팅은 기존 재료에 새로운 다른 재료를 위에 덮어 색을 입히거나 표면을 보호하며 또는 표면 마찰계수 감소 및 전극의 생산 등 고부가 가치사업에 빠질 수 없는 제품 생산 공정 중에 하나로 꼽히고 있다. 트라이볼로지 관점에서 표면 코팅의 목적은 주로 재료의 표면을 마찰 혹은 부식으로부터 보호하고 마모를 줄이는 것 혹은 고체 윤활을 목적으로 표면코팅을 사용한다. 표면코팅 기술은 크게 습식 코팅과 건식 코팅 두 가지 종류로 분류할 수 있다. 습식 코팅은 코팅하고자 하는 물질을 액상 형태로 재료 표면에 도포, 건조 또는 경화하는 방법으로 spray coating, dip coating, lithography coating 등 고분자 화합물 등을 액으로써 분사하여 재료 표면을 덮어 표면을 보호 혹은 특성 개질과 열 경화 혹은 UV 경화를 통해 표면을 강화하는 방법 등이 있다. 건식 코팅은 코팅하고자 하는 재료를 표면에 증착시키는 방법으로 주로 DLC 나 CNT 혹은 TiN과 같은 나노 물질들을 PVD, CVD 또는 스퍼터링을 통해 표면에 증착 시켜 표면 개질 혹은 경화하는 방법 등이 있다.[46-48]

본 연구에서는 다양한 코팅 방법 중 복잡한 형상에도 구애받지 않으며 증착 두께가 일정한 코팅 기법중에 하나인 Dip coating 기법을 이용하여 고분자 기어 표면에 CNT를 증착하여 고분자 기어의 표면 열 전도성을 높여 기어 치아에 생성되는 flash temperature를 줄이고 CNT의 강한 내구성을 기반으로 치면의 압력을 분산 혹은 압력 흡수의 용도로 표면을 코팅하였다.

제 3 절 유한요소 해석

유한요소해석(Finite element analysis)은 유한요소해석법(FEM)이라 불리는 수치해석 기법을 이용하여 공학을 비롯하여 열, 유체, 전자기의 수치 해석 시뮬레이션을 통해 가상 부품에 대한 여러 가지 실험을 진행하고, 가상의 재료에 가해지는 힘에 대해 실험을 하지 않고 결과를 예측할 수 있는 해석 방법중에 하나이다. 유한요소 해석은 3D로 설계된 모델의 여러 가지 시뮬레이션을 통해 가상 부품의 요구 특성을 명확히 알 수 있어 연구·개발 기간 단축 및 생산성 향상 등의 장점이 있다. 유한요소해석법은 현재 중공업 분야에서 동적 시뮬레이션을 활용하여 차량의 충돌 및 공기저항 등의 분야에 사용이 되고 있다.(Fig. 9)

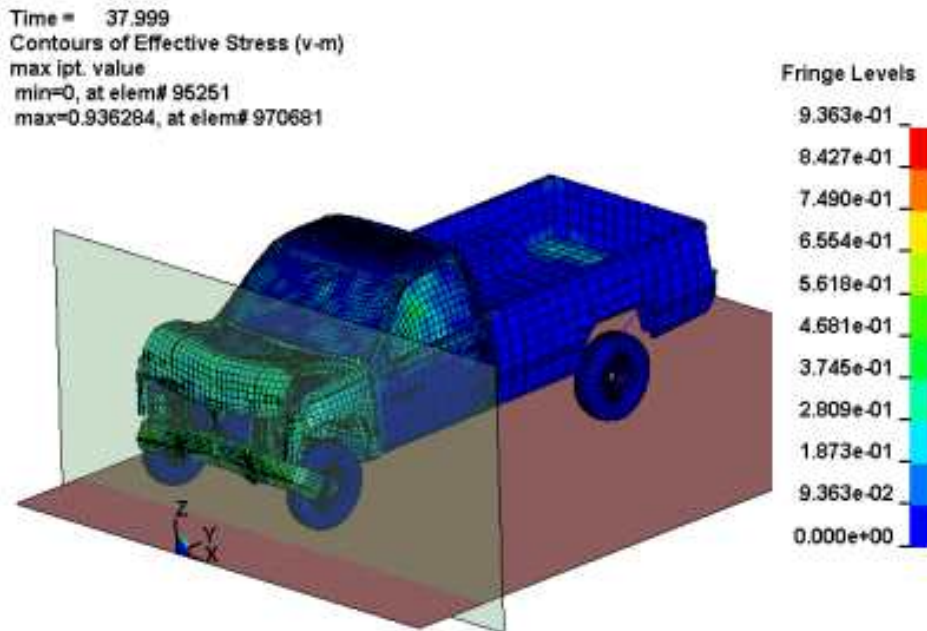


Figure. 9 Example of Dynamic FEM analysis[49]

본 연구에서는 고분자 기어의 치형에 따른 구동 시 기어 치면에 발생하는 접촉 압력과 기어 이빨에 발생하는 응력을 계산하여 해석 값과 실제 실험과의 인과관계를 정립하고 치형에 따른 고분자 기어 사용의 기초자료로써 활용하기 위해 해석을 진행하였다.

제 3 장 고분자 기어의 치형에 따른 신뢰성 평가

제 1 절 실험 시편 준비 및 평가

1. 시편 준비 및 실험 장비 구축

본 연구 장에서는 고분자 평 기어의 치형에 따른 신뢰성 평가를 위해 범용 플라스틱인 ABS 재료를 이용하였으며, 기어 도면을 작도하여 3D 프린팅하였다. 기어의 작도는 2D 설계프로그램인 AUTOCAD와 3D 설계프로그램인 CATIA V5를 이용하여 작도하였다.(Fig.10) 설계 제작에 사용된 3D 프린팅 기법은 출력물의 표면 조도와 치수 정밀도가 매우 우수한 SLA(Stereo Lithography Apparatus)의 기법을 사용하여 도면상의 치수와 유사하게 출력 후 UV 경화를 통해 표면을 굳혔다. 고분자 기어의 치형은 산업에서 가장 일반적으로 쓰이는 인볼류트 기어 두 종류(압력각 $\alpha: 14.5^\circ$, $\alpha: 20.0^\circ$)와 가공이 비교적 어려워 산업에서 쓰임이 적은 사이클로이드 기어 한 종류를 제작하였다(Fig. 11).



Figure. 10 Gear teeth profile drawing in Catia V5



Figure. 11 Each gear specimens of different gear tooth shape

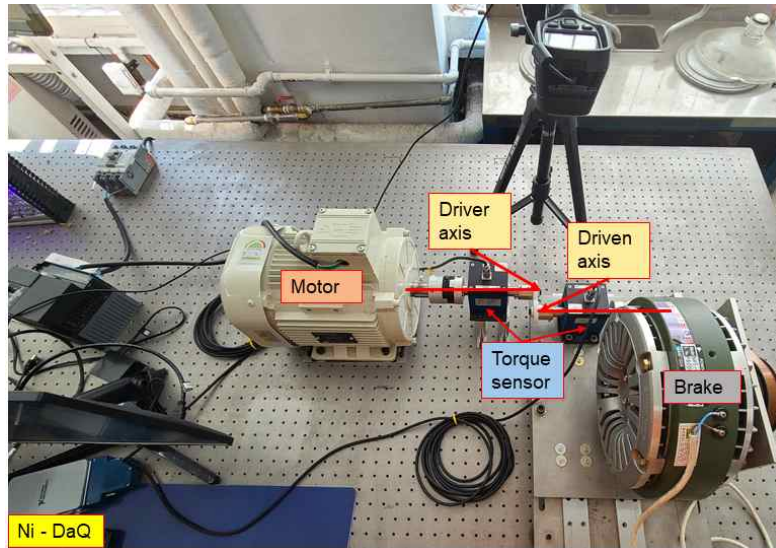


Figure. 12 Polymer gear durability test machine

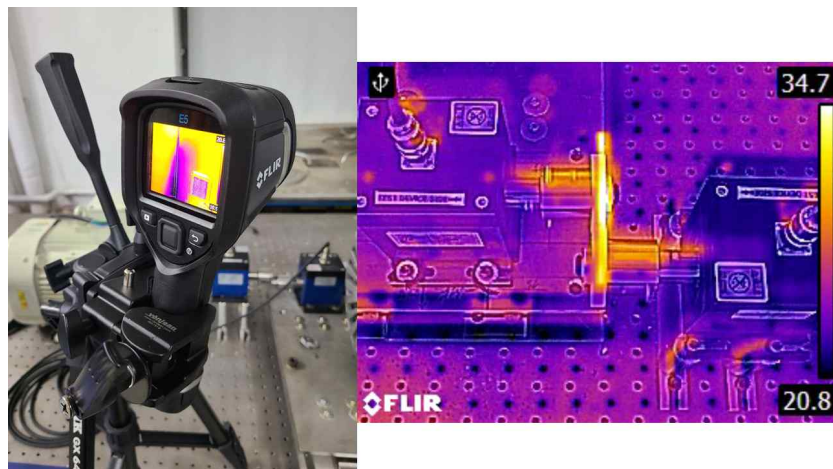


Figure. 13 Non contact infrared temperature camera(left), Actual gear experiment screen (right)

고분자 기어의 신뢰성 실험은 Fig. 12의 자체 제작 기어 신뢰성 장비를 사용하였다. 그리고 실험 간 고분자 기어 표면에 발생하는 온도를 측정하기 위해 비접촉식 적외선 온도계 열화상 카메라 (Fig. 13)를 이용하였다. 고분자 기어의 효율 측정을 위한 데이터 수집은 NI-DAQ를 이용하여 raw 데이터를 수집하고 토크 데이터를 그래프 화 하였다. 추가로, 기어의 예상 수명 측정을 위한 마모 부피 계산은 형상의 복잡성에 의해 마모부피 산정이 어려워 실험 전과 후 정밀저울을 이용하여 고분자 기어의 무게를 측정 후 비중에 따른 마모 부피를 측정하여 예상 수명을 판별하였다.

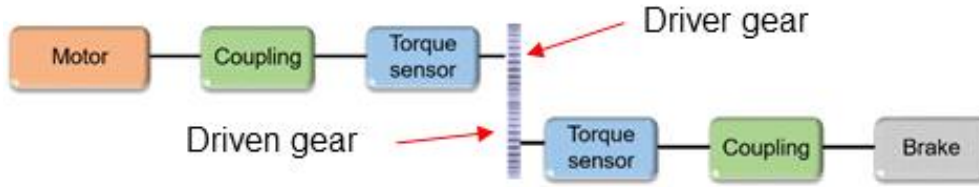


Figure. 14 Schematic diagram of polymer gear durability experiment

Fig. 14는 기어 신뢰성 장비의 구동 메커니즘으로, 모터와 연결된 기어는 구동기어, 파우더 브레이크와 연결된 기어는 피동 기어로 설정하였다. 구동 기어는 일종의 입력축에 해당하며 피동 기어는 출력축에 해당한다. 기어의 토크는 파우더 브레이크의 토크 조절을 통해 출력 토크 값을 정하고, 입력축에서는 RPM을 조정한다. 장비 가동 시 입력축과 출력축은 파우더 브레이크에 걸린 토크와 같은 토크를 발생시키고, 회전속도는 모터에 입력된 회전속도로 가동이 된다. 이러한 과정에서 토크 센서는 기어에 걸리는 토크를 측정하고 사용자에게 토크 데이터를 전달한다.



Figure. 15 Measuring weight loss after gear durability test for calculate wear rate

기어 신뢰성 실험의 조건은 고분자 기어의 비교적 낮은 기계적 특성을 고려하여 1.2 Nm의 토크를 가하였으며, 600RPM의 회전속도로 250,000 Cycle 동안 가동하였다. 구동간 기어 이빨에 생성되는 온도의 측정은 매 10,000 Cycle마다 측정하였다. 기어의 내구성 분석을 위한 마모부피 산정은 고분자 기어의 무게 비중을 통해 부피를 측정하여 마모율을 도출하였다.(Fig. 15)

2. 기어 치형에 따른 신뢰성 평가 및 결과

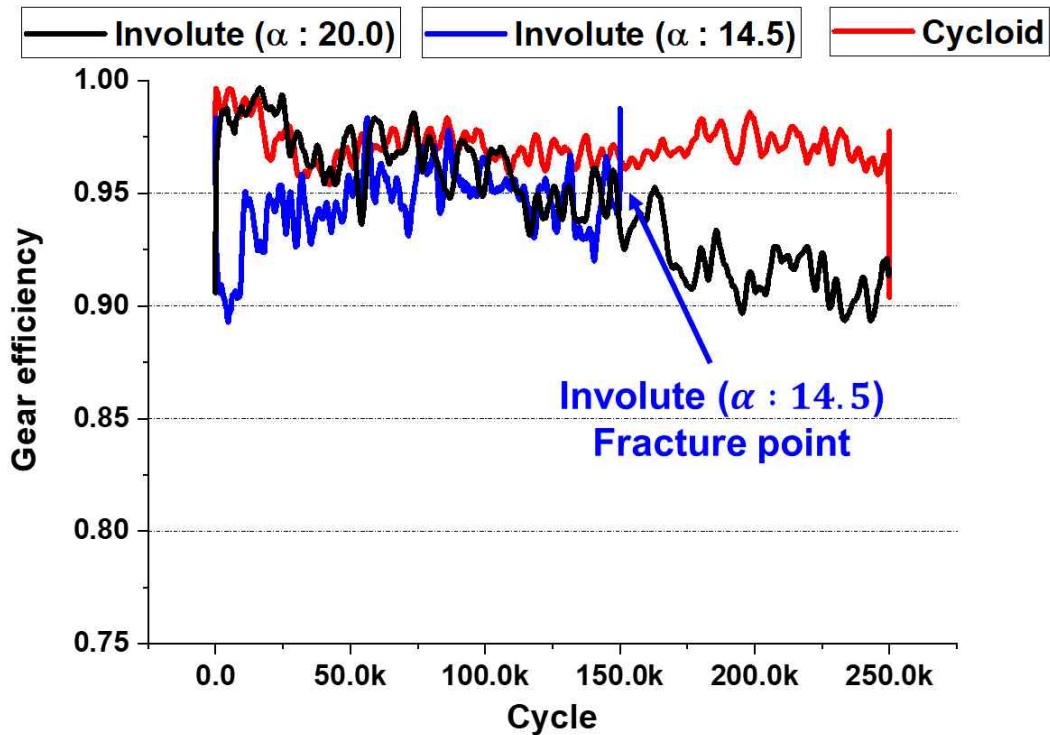


Figure. 16 Variations in the Gear torque efficiency of each gear teeth design according to rotational cycles

Fig. 16은 치형에 따른 기어 효율 그래프이다. 사이클로이드 기어의 경우 평균 토크 전달 효율은 97%로 가장 높았으며, 인볼류트 기어 두 종류는 각각 94.5%로 동일한 값을 보였다. 사이클로이드 기어는 실험이 진행되는 동안 일정한 효율 값을 보이며 안정적인 운동을 하였으나, 압력각이 20.0° 의 인볼류트 기어의 경우 기어 운동간 마모가 일어나 효율이 점차 감소하여 97%→90%까지 감소하는 경향을 보였다. 추가로, 압력각이 14.5° 의 인볼류트 기어는 기어 운동초기 낮은 효율을 보였으나 점차 증가하는 양상을 보였다. 그러나 압력각 14.5° 인볼류트 기어는 150,000 cycle에서 파손이 되는 문제를 보여준다.

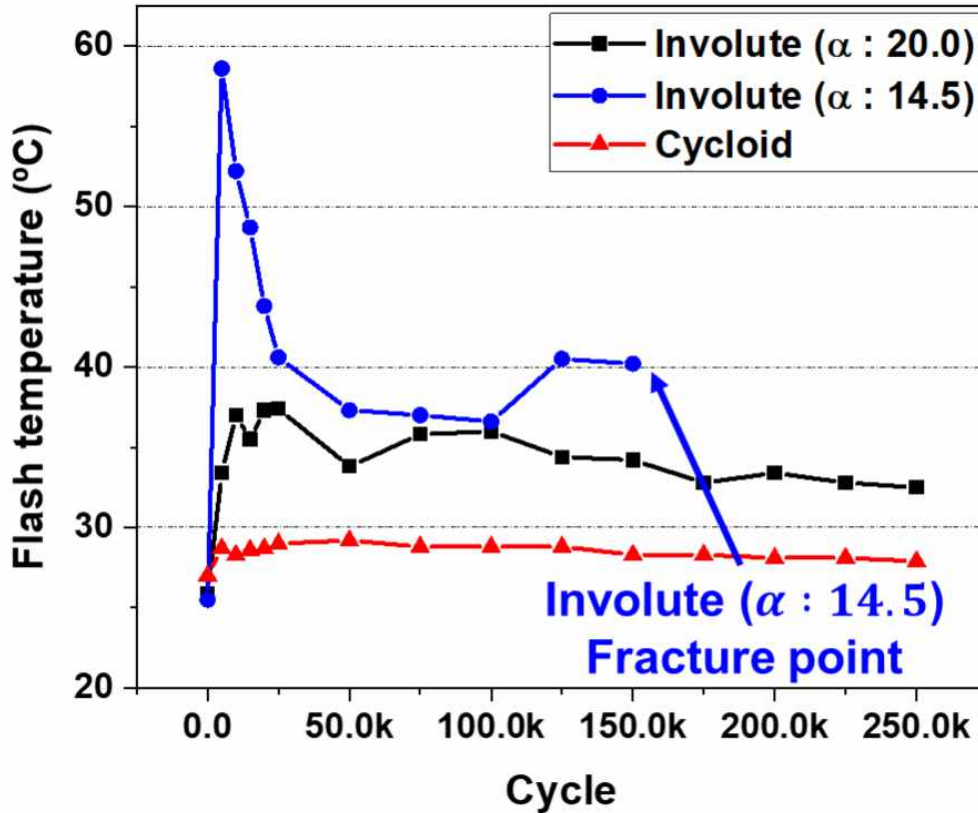


Figure. 17 Variations in the Gear flash temperature of each gear teeth design according to rotational cycles

Fig. 17은 기어 운동 시 치아에서 발생하는 마찰열 그래프이다. 사이클로이드 치형의 고분자 기어의 경우 기어 치면 온도가 상온(25.0° C)보다 1~2° C 높은 온도를 보이는 반면, 인볼류트 치형의 고분자 기어의 경우 압력각 14.5° 는 초기 운전 시 상온보다 최대 35° C 높은 온도인 60° C의 온도를 보인 후 점차 감소하여 40° C 온도 값을 보이고 150,000 Cycle에서 파손이 일어났다. 추가로, 인볼류트 치형의 압력각 20.0° 의 기어의 경우 초기부터 상온보다 약 10° C가량 높은 치면 온도를 보였으며 실험 말기까지 동일한 온도값을 보였다. 이러한 치면 온도 그래프는 Fig. 16의 기어 효율 그래프와 반비례하는 양상을 보였으며, 고분자 기어 운전 시 마찰열에 의한 온도상승과 기어의 효율이 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

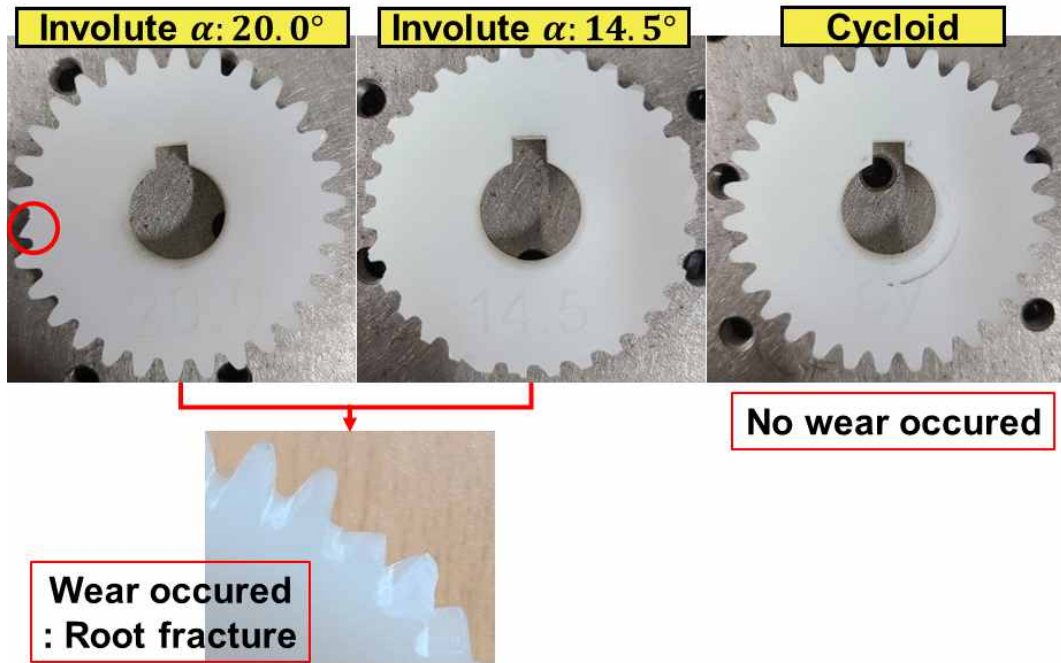


Figure. 18 Failure modes of each polymer gear pairs

Fig. 18은 기어 신뢰성 실험 결과 고분자 기어의 파손 및 마모 양상 사진으로, 실험 간 고분자 기어의 파손과 마모를 보인다. 고분자 기어 파손 분석 결과, 압력각 20.0° 의 인볼류트 기어 치형은 일부 기어 이가 파손되어 부서진 형상을 보이며, 이러한 파손은 Fig. 16 효율 그래프에서 효율이 감소하는 시점인 100,000 cycle에서 기어 이가 파손되었다고 유추할 수 있다. 압력각 14.5° 의 인볼류트 기어 치형은 모든 이가 파손되었음을 알 수 있고, 압력각 20.0° 와 비교하였을 때 일반적인 파손을 넘어 치형 profile이 살짝 기울어짐을 보인다. 이는 Fig. 17의 그래프에서 알 수 있듯이 14.5° 의 압력각 기어는 다른 치형의 고분자 기어보다 운전 시 높은 마찰열이 발생하여 치아가 열에 의해 변형하여 생긴 결과로 알 수 있다. 또한 모든 이가 파손된 기어는 구동 기어에서 피동기어로 동력전달이 이루어지지 않아 150,000 cycle이후 14.5° 의 고분자 기어는 사용이 불가능하다는 것을 알 수 있다. 앞선 인볼류트 기어는 Fig.16-18을 통해 1.2 Nm, 600RPM의 구동환경에서 지속된 기어 운전 시 신뢰성이 떨어진다는 것을 알 수 있다. 이에 반해 사이클로이드 치형의 기어는 구동 간 마모가 발생하지 않았으며, 본 마모 양상 그림과 Fig. 16의 효율 그래프, 그리고 Fig. 17의 온도변화 그래프를 통해 사이클로이드 기어는 토크 1.2 Nm, 600RPM의 구동 환경에서 다른 두 치형보다 더욱 안정적인 운전이 가능하다는 것을 알 수 있다.

Table 1. Wear volume & rate values of each teeth design gear pairs

Specimen (ABS - 1.13g/cm ³) [50]		Wear volume (mm ³)	Wear rate (mm/rev)
Involute ($\alpha : 20.0$)	Driver	4.96×10^{-5}	2.76×10^{-13}
	Driven	2.39×10^{-5}	1.33×10^{-13}
Involute ($\alpha : 14.5$)	Driver	6.26×10^{-4}	5.80×10^{-12}
	Driven	2.23×10^{-4}	2.06×10^{-12}
Cycloid	Driver	1.77×10^{-5}	9.83×10^{-14}
	Driven	1.86×10^{-5}	1.03×10^{-13}

Table. 1은 각 기어의 마모량과 마모율을 나타낸 표로, Fig. 15의 정밀저울과 공식 (8)을 통해 각 결과값을 도출하였다. Table.1 결과표 분석 결과, 기어의 마모량과 마모율은 주로 구동 기어에서 많은 마모가 발생하며 사이클로이드 기어의 마모가 가장 적게 발생하고, 인벌류트 치형 압력각 20.0° , 14.5° 순으로 마모가 발생함을 알 수 있다.

각 기어의 마모량은 압력각 20.0° 의 인벌류트 치형의 기어의 경우 구동 기어가 피동 기어보다 $4.96 \times 10^{-5}(\text{mm}^3)$ 에서 $2.39 \times 10^{-5}(\text{mm}^3)$ 로 약 2배 정도 더 마모됨을 보이며, 압력각 14.5° 의 경우 $6.26 \times 10^{-4}(\text{mm}^3)$ 에서 $2.23 \times 10^{-4}(\text{mm}^3)$ 로 약 3배 마모되었다. 반면 사이클로이드 기어의 경우 구동 기어가 피동 기어에 비해 마모가 더 발생하였으나 그 차이가 미묘하며 다른 두 치형의 기어의 마모보다 월등히 낮음을 보인다.

마모율의 경우, 압력각 14.5° 피동기어의 마모량과 압력각 20.0° 의 피동기어의 마모량은 차이가 보이지 않으나, 250,000 cycle의 회전을 한 압력각 20.0° 와 달리 압력각 14.5° 인벌류트 기어는 150,000 cycle에서 파손이 되어 회전수당 마모율의 차이가 발생하였다. 이러한 결과로 인해 두 기어의 마모율은 압력각 14.5° (2.06×10^{-12} {mm/rev})에서 압력각 20.0° (1.33×10^{-13} {mm/rev}) 로 약 9배 이상 차이가 남을 보인다. 추가로, 사이클로이드 치형의 기어는 마모량과 마찬가지로 다른 치형의 기어보다 월등히 낮은 마모율을 보인다.

고분자 기어의 치형에 따른 기어의 신뢰성 평가 결과 사이클로이드 치형의 기어는 압력각 20.0° , 14.5° 의 인벌류트 치형의 기어보다 효율 및 마찰열 발생정도 그리고 마모량 모두 우수한 것을 알 수 있다. 그리고 인벌류트 치형의 경우 압력각 14.5° 가 가장 낮은 효율을 보였으며 높은 마찰열에 의해 쉽게 파손이 됨을 알 수 있으며 압력

각 20.0° 의 고분자 기어는 사이클로이드 기어와 압력각 14.5° 의 기어의 중간정도의 성능을 보였다. 이를 통해 3D printed ABS 고분자 기어 이용 시 사이클로이드 치형의 기어의 신뢰성이 더욱 높음을 알 수 있으며, 3D프린팅 뿐만 아니라 성형, 몰드, 절삭을 통해 제작된 ABS 기어의 경우도 본 연구가 적용이 가능할 것이라 보인다.

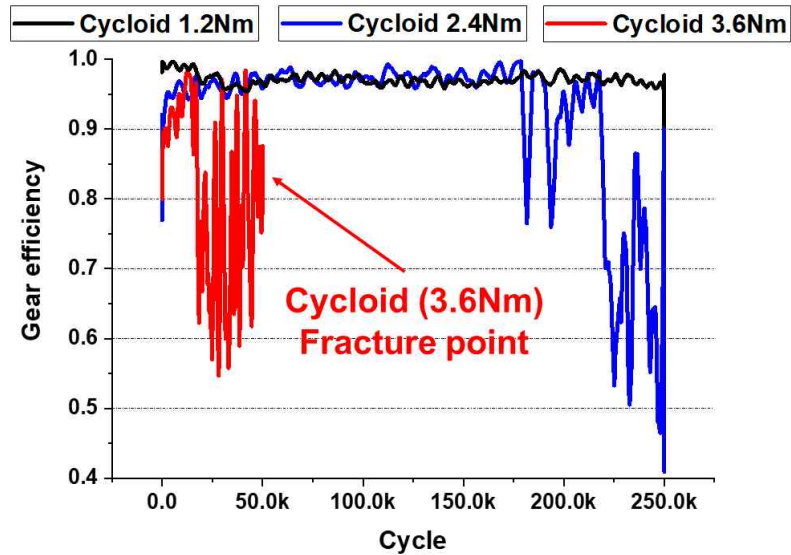


Figure. 19 Variations in the gear torque efficiency of Cycloid gear at different output torque value according to rotation cycles

Fig. 19는 치형에 따른 고분자 기어의 신뢰성 실험 결과 가장 우수한 특성을 보였던 사이클로이드 기어의 output 토크에 따른 효율 변동 그래프이다. 본 실험은 앞선 치형에 따른 실험환경과 동일하게 실험이 진행되었으며, 기어에 작용하는 토크만을 변수로 하여 실험을 진행하였다. Fig. 19 분석 결과, 1.2 Nm의 토크에서는 사이클로이드 기어의 효율은 실험 초기부터 말기까지 일정한 효율 값을 보인다. 그러나 2.4 Nm의 토크의 환경에서는 약 175,000 cycle에서 기어의 효율 값이 급감하기 시작하였으며, 250,000 cycle에서는 약 40%까지 효율이 급감함을 보였다. 그리고 3.6 Nm의 토크 환경에서는 실험 초기부터 기어의 효율이 90%에서 60%까지 급감과 급상승 반복 후 50,000 cycle에서 파손이 일어남을 보인다. 이러한 토크 2.4 Nm와 3.6 Nm의 효율이 급감과 급상승하는 이유는 높은 하중에서 기어의 파손에 의한 언더컷에 의해 헛도는 현상과 정상 운전이 반복됨에 따라 발생하는 결과이며, 본 연구에 사용된 사이클로이드 치형 고분자 재료의 기어는 운전 시 2.4 Nm를 넘어섰을 경우 효율에 관한 신뢰성의 문제가 있다는 것을 알 수 있다.

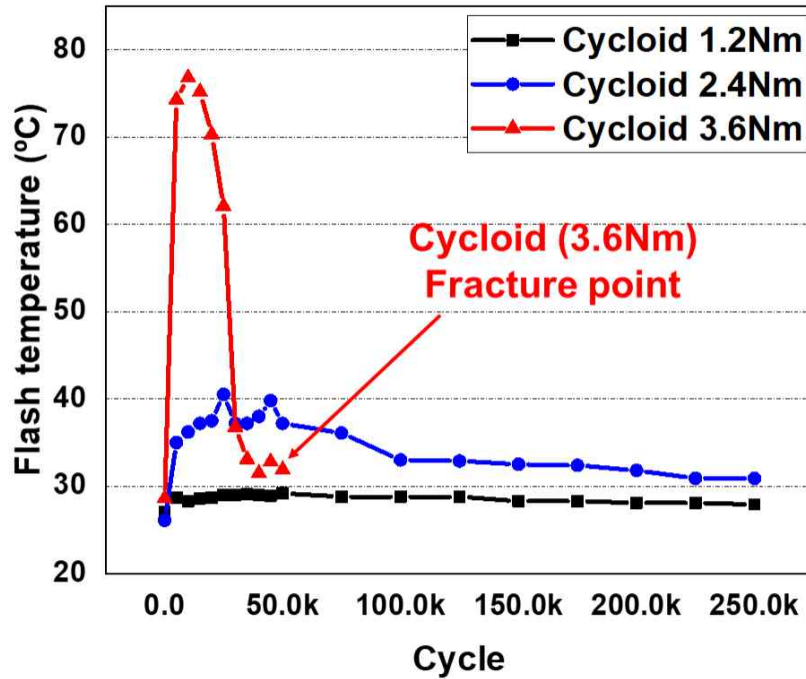


Figure. 20 Variations in the gear flash temperature of Cycloid gear at different output torque value according to rotation cycles

Fig. 20은 Fig. 19의 사이클로이드 기어의 output 토크에 따른 표면 마찰열 그래프이다. Fig. 20 분석 결과, 3.6 Nm의 토크를 가한 고분자 기어의 경우 실험 초기부터 상온보다 약 50° C 높은 76.8° C의 표면 마찰열을 보였으며 이러한 마찰열에 의해 고분자 기어가 쉽게 손상이 되어 50,000 cycle에서 파손에 의한 운전 정지가 됨을 알 수 있다. 그리고 2.4 Nm 토크를 가한 고분자 기어의 경우 실험 초기에는 1.2 Nm의 토크보다 비교적 높은 40.5C 의 표면 마찰열을 보였으나 Fig. 21과 같이 일부 기어의 치아가 파손 후 마찰열이 천천히 식는 양상을 보였다. 또한, 기어 치아의 일부 파손에 의해 Fig. 19 그래프의 기어 동력 전달 효율이 급감과 급증을 반복하는 형태로 보아 기어 치아가 파손될 경우 효율에 대한 신뢰성이 하락할 것으로 보인다.

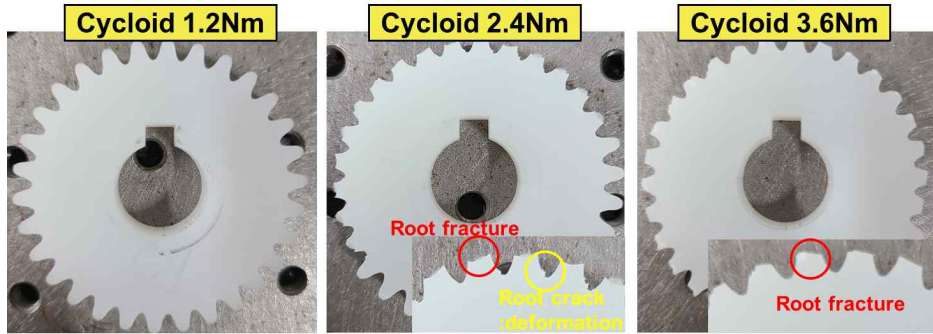


Figure. 21 Failure modes of cycloid teeth design polymer gear pairs

Fig. 21은 사이클로이드 기어의 output 토크에 따른 실험 결과 이미지 이다. 사이클로이드 기어 신뢰성 실험 결과, 2.4 Nm의 구동 토크 환경에서는 기어 치아 중 절반이 파손이 되었으며, 3.6 Nm의 구동 토크 환경에서는 모든 이가 파손이 되었다. 그리고 2.4 Nm의 토크환경에서는 3.6 Nm에서 볼 수 없는 마모 형태가 추가로 보인다. 이는 열과 토크 힘에 의해 발생하는 이뿌리에서 발생하는 마모로, 이와 같은 지속적인 마모에 의해 기어의 치아가 파손되었음을 알 수 있다. 반면 3.6 Nm의 토크 환경에서는 이뿌리 변형 마모가 보이지 않으며 오로지 파손만이 보이는데, 이는 고분자 재료가 버틸 수 있는 최대하중을 넘어서 순간적으로 파손이 일어난 것으로 보인다.

Table 2. Wear volume & rate values of cycloid teeth design polymer gear pairs

Specimen		Wear volume (mm^3)	Wear rate (mm/rev)
Cycloid 1.2Nm	Driver	1.77×10^{-5}	9.83×10^{-14}
	Driven	1.86×10^{-5}	1.03×10^{-13}
Cycloid 2.4Nm	Driver	2.73×10^{-4}	1.52×10^{-12}
	Driven	2.65×10^{-6}	1.47×10^{-14}
Cycloid 3.6Nm	Driver	8.57×10^{-4}	2.38×10^{-11}
	Driven	7.66×10^{-4}	2.12×10^{-11}

Table. 2는 사이클로이드 기어의 Output 토크에 따른 마모량과 마모율을 나타낸 표이다. Table.2에서 사이클로이드의 마모량은 Output 토크가 증가함에 따라 비례하여 증가하였으며, 가장 많은 마모량을 보인 기어는 Cycloid 3.6 Nm (구동기어)로 $2.73 \times 10^{-4}(mm^3)$ 으로 비교분인 Cycloid 1.2 Nm (구동기어)의 마모량인 $1.77 \times 10^{-5}(mm^3)$ 보다 약 10배 이상 많은 마모가 이루어짐을 보인다. Cycloid 2.4 Nm 기어 시편의 경우

구동기어는 2.73×10^{-4} (mm^3)의 마모량을 보이거나 피동기어는 2.65×10^{-6} (mm^3)의 마모량을 보이며 모든 기어 시편 중 가장 마모량이 적었다. 이는 실험초기 높은 하중과 마찰열에 의해 구동 기어가 빠르게 파손되어 피동 기어에 동력전달이 원활하게 이루어지지 않아 발생한 현상으로, 동력전달 장애로 인해 피동 기어의 손상이 가장 적음을 보인다.

사이클로이드 치형의 고분자 기어 Output 토크에 따른 기어의 신뢰성 분석 결과, ABS Cycloid 기어는 1.2 Nm의 구동 토크 환경에서는 250,000 Cycle의 기어 구동 간 97% 이상의 효율을 보이며 치아의 손상이 거의 없음을 보여 해당 구동 환경에서는 높은 신뢰성 및 예상 수명을 기대할 수 있다. 그러나 토크가 올라갈수록 효율과 기어의 예상 수명이 감소하기 시작하였으며, 2.4 Nm의 구동 토크 환경에서는 1.2 Nm의 구동 환경에서보다 실험 초기 높은 마찰열을 보여 구동 기어의 치아 절반이 파손되고 150,000 Cycle 이상 구동 시 언더컷에 의해 기어가 헛돌아 기어의 효율 신뢰성이 떨어졌다. 그리고 3.6Nm의 구동 토크 환경에서는 실험 초기 76.8°C 이상의 마찰열에 의해 구동 기어와 피동 기어 모두 극심한 파손이 되었으며 효율 또한 신뢰성이 감소한다. 이를 통해 3D-printed ABS 고분자 기어의 사이클로이드 치형 이용 시 1.2 Nm, 600RPM의 구동 환경이 가장 신뢰성이 있는 환경이며, 다른 공법으로 제작된 ABS 기어의 경우도 이와 비슷할 것으로 기대된다.

본 장에서는 고분자 기어의 우수한 성형성의 장점을 기반으로, 기어의 치형을 변경하여 일반적으로 산업에서 사용되는 기어와 변경된 치형의 기어를 제작 및 평가하였다. 연구에 사용된 기어의 재료는 ABS이고, 치형은 인볼류트 기어 두 종류와 사이클로이드 기어 한 종류로 선정을 하였다. 기어 신뢰성 평가 실험 조건은 1.2 Nm의 토크 환경과 600RPM의 운전속도로 250,000 Cycles 동안 실험을 진행하였다. 실험 결과, 사이클로이드 기어의 효율과 마모율이 인볼류트 기어 두 종류보다 우수함을 보였으며, 인볼류트 기어 중 압력각이 20.0° 인 치형이 14.5° 의 치형보다 더욱 우수함을 알 수 있으며, 동일 하중조건에서는 인볼류트 기어보다 사이클로이드 치형의 기어가 더욱 우수하다는 결과가 도출되었다.

여기에 더해, 본 장에서는 사이클로이드 기어의 한계 및 예상 수명 데이터를 얻기 위해 1.2 Nm보다 높은 토크 환경인 2.4 Nm 와 3.6 Nm에서 사이클로이드 기어 실험을 진행하였고, 실험 결과 2.4 Nm의 토크 환경에서는 구동 기어의 치아가 절반 이상 파손이 되어 효율에 대한 신뢰성이 떨어졌고, 3.6 Nm의 토크 환경에서는 모든 치아가 파손되어 고하중에서는 ABS 사이클로이드 기어의 적용이 불가능함을 알 수 있다.

제 2 절 유한요소해석 모델 도출 및 결과 해석

1. 실험 조건 기입 및 해석 과정

고분자 기어의 치형에 따른 치면 접촉 압력과 기어 치에 발생하는 응력을 해석하기 위해 유한요소 해석 프로그램 중 하나인 (ABAQUS, version 6.13)을 이용하였다. 해석을 위한 기어의 도면은 인벌류트 기어 두종류 (pressure angle α : 20.0°, 14.5° ; Module m : 1.5mm; Diameter : 48mm)와 사이클로이드 기어(Module m : 1.5mm; Diameter : 48mm)를 작도하였다. (Fig. 22) 본 해석에서는 해석 시간을 줄이기 위해 다섯 개 이빨의 물림만을 고려하였으며 실험조건과 재료는 3장의 실험조건과 동일하게 회전 속도 : 600 RPM, 토크 : 1.2Nm로 설정하였으며 물성치 값은 3D solution에서 제공한 3D printed ABS의 값을 이용하였다.

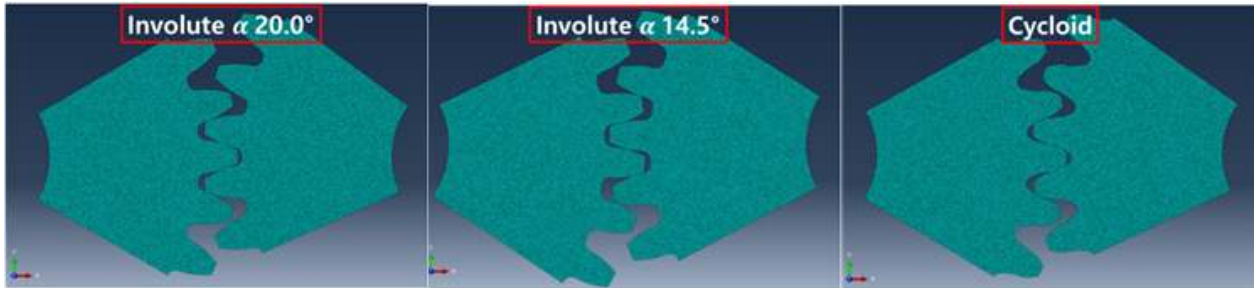


Figure. 22 ABAQUS mesh structure of each gear model; Involute 20.0°, Involute 14.5°, Cycloid gear

유한요소해석을 위한 메쉬 타입은 해석 간 댐핑효과를 제외하고자 2D profile로 제작한 후 “CPE40”의 메쉬 타입을 이용하였다. 마찰계수는 실험값을 통해 얻은 마찰계수 값인 0.55 값을 기입하였으며 접촉 조건은 “General contact - hard contact”로 설정하여 상시 접촉하며 메쉬가 서로 침투하지 않은 상태로 해석하였다. 기어의 경계 조건은 다음과 같은 순서로 설정하였다.

(1) 접촉 상태 Step : 0.1초 동안 피동 기어(좌)를 고정시킨 후 구동 기어(우)에 반시계 방향으로 1° 가량 움직여 한 쌍의 기어를 접촉시켰다.

(2) 하중 입력 step : 0.1초 동안 피동 기어(좌)에 반시계 방향으로 1.2Nm의 토크를 가하고 구동 기어(우)를 고정시켜 하중을 준 상태를 유지하였다.

(3) 기어 가동 step : 0.5초 동안 (2)의 상태에서 구동 기어(우)에 반시계 방향으로 600RPM의 회전 속도를 기입하여 실제 실험 상황과 동일하게 해석하였다.

2. 기어 치면 접촉압력 분석 및 결과

일반적으로 스퍼기어의 설계를 위한 강도 규격은 ISO와 AGMA standard에 기인하여 설계한다. AGMA standard에서 기어의 최대 접촉 압력 공식에 의하면 기어 치면의 최대 접촉 압력은 다음과 같다.[51]

$$\sigma_H = Z_E \sqrt{F_t K_0 K_v K_s \frac{K_H}{d_{w1} b} \frac{Z_R}{Z_I}} \quad (9)$$

여기서 σ_H 는 최대 접촉 압력으로, 각 계수들의 명칭과 해당 실험에서 사용된 계산 값은 Table. 3에 명시하였다.

Table. 3 Max gear contact pressure equation meanings, symbols, and values

Meaning	Symbol	Value
composite modulus (\sqrt{MPa})	Z_E	14.92
Transmitted tangential load (N)	F_t	52.29
Overload factor	K_0	1
Dynamic factor	K_v	1
Size factor	K_s	1
Load distribution factor	K_H	1
pinion pitch diameter (mm)	d_{w1}	45
Face width (mm)	b	8
surface condition factor	Z_R	1
surface strength geometry factor	Z_I	0.08 while $\alpha : 20.0^\circ$ 0.06 while $\alpha : 14.5^\circ$
Max contact stress (MPa)	σ_H	20.10 while $\alpha : 20.0^\circ$ 23.21 while $\alpha : 14.5^\circ$

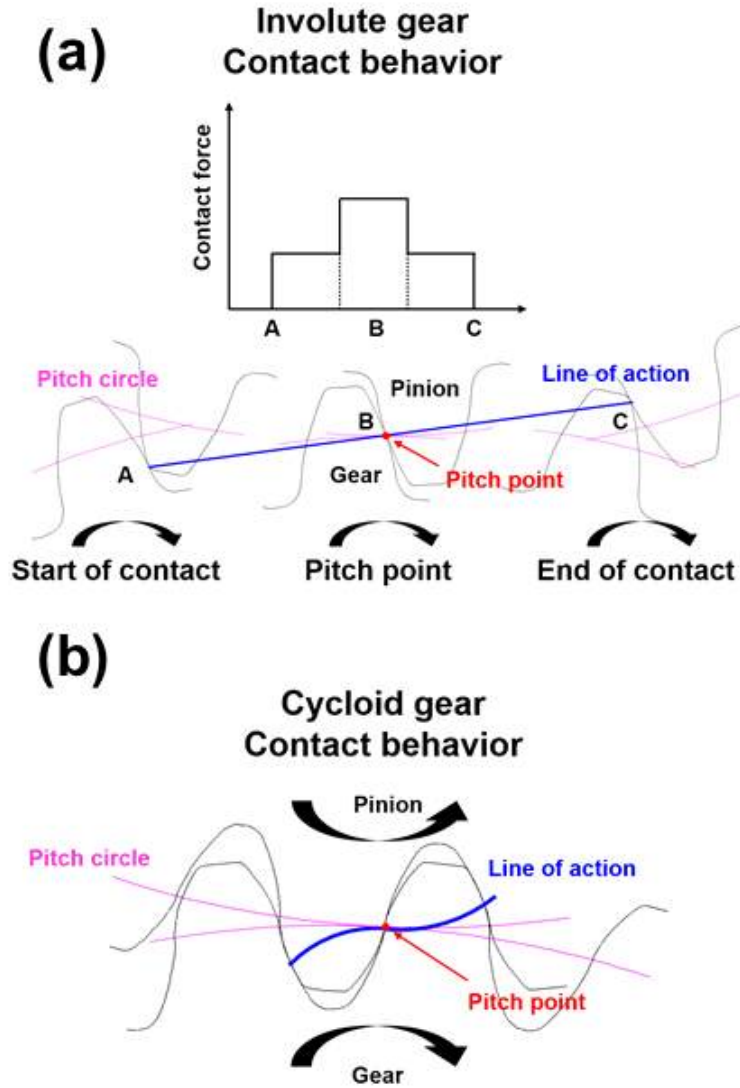


Figure. 23 Contact behavior of the involute spur gear and distribution of the contact force along the line of action (a), Contact behavior of cycloid spur gear(b)

Fig. 23은 평기어의 접촉 힘과 접촉 메커니즘을 나타내었다. 인벌류트 기어의 경우 공식상 기어의 치형 설계에 따라 압력각이 일정하며 Pitch point에서는 접촉 힘이 최대가 되는 것을 알 수 있다. 그러나 사이클로이드 기어는 압력각이 일정하지 않으며 Pitch point에서는 압력각이 0° 가 됨을 보인다. 이러한 차이로 인해 각 치형 간 추력과 미끄럼률, 그리고 굽힘강도의 차이가 발생하게 된다. 본 연구에서는 치형에 따른 접촉각의 차이점을 유한요소해석을 통해 측정하였다.

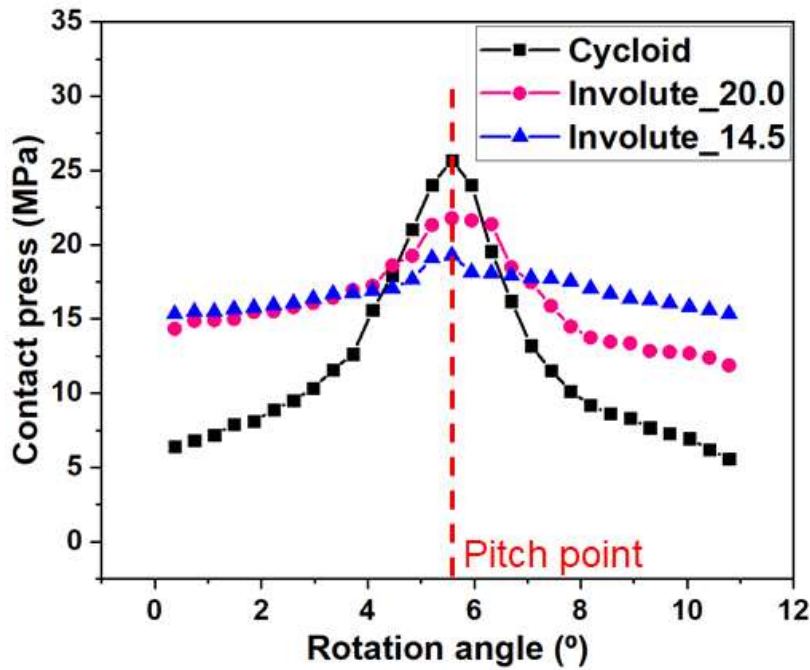


Figure. 24 Contact pressure distribution along the rotation angle of each gear models

Fig. 24는 유한요소해석법에 따라 측정된 치면 압력 값 결과 그래프이다. 실험 결과 사이클로이드 기어의 최대 접촉 압력 값은 25.6918 MPa, 인벌류트 기어($\alpha:20.0^\circ$)는 21.7814 MPa, 인벌류트 기어($\alpha:14.5^\circ$)의 압력 값은 19.2829 MPa으로 사이클로이드 기어의 최대 접촉 압력이 가장 높았으며 인벌류트 기어($\alpha:20.0^\circ$)는 AGMA 규격과 8% 차이를 보이는 비슷한 결과값을 보였다. 그러나 인벌류트 기어($\alpha:14.5^\circ$)의 압력값은 AGMA 규격과 17% 정도 차이가 발생하였는데, 이러한 결과는 물림률에 의한 것으로 보인다. 물림률, ϵ 공식은 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{l}{P_b} \quad (10)$$

여기서 물림률 ϵ 는 물림 길이 l 을 법선 피치 P_b 로 나눈 값으로, 실험적 계산에 의하면 각각 인벌류트 기어($\alpha:14.5^\circ$)의 물림률은 1.95, 인벌류트 기어($\alpha:20.0^\circ$)의 물림률은 1.65, 사이클로이드 기어의 물림률은 1로 기어가 돌아가는데 필요한 최소한의 물림률인 1인 사이클로이드 기어를 제외하고 인벌류트 기어의 물림률은 약 1.5 와 2.0 을 육박한다. 이러한 물림률 결과에 의하면 물림률이 1인 사이클로이드 기어의 최대 접촉 압력이 다른 치형의 기어보다 더 큰 것을 보아 물림률과 접촉 압력 값은 반비례함을 알 수 있다. 또한, 물림률이 높은 기어일수록 첫 물림 지점 A부터 마지막 물림 지점 B까지 최소 압력 값이 더 높음을 알 수 있다. 이러한 결과로 인해 제3장에서

기어 신뢰도 결과에서 보이듯 14.5° 의 압력각을 가진 인벌류트 기어는 일정하게 높은 압력을 받아 같은 실험조건에서 쉽게 파손이 일어났으며, 20.0° 의 압력각을 가진 인벌류트 기어, 사이클로이드 기어의 순서대로 파손이 일어남을 알 수 있다.

3. 기어 치아 내부 응력 분석 및 결과

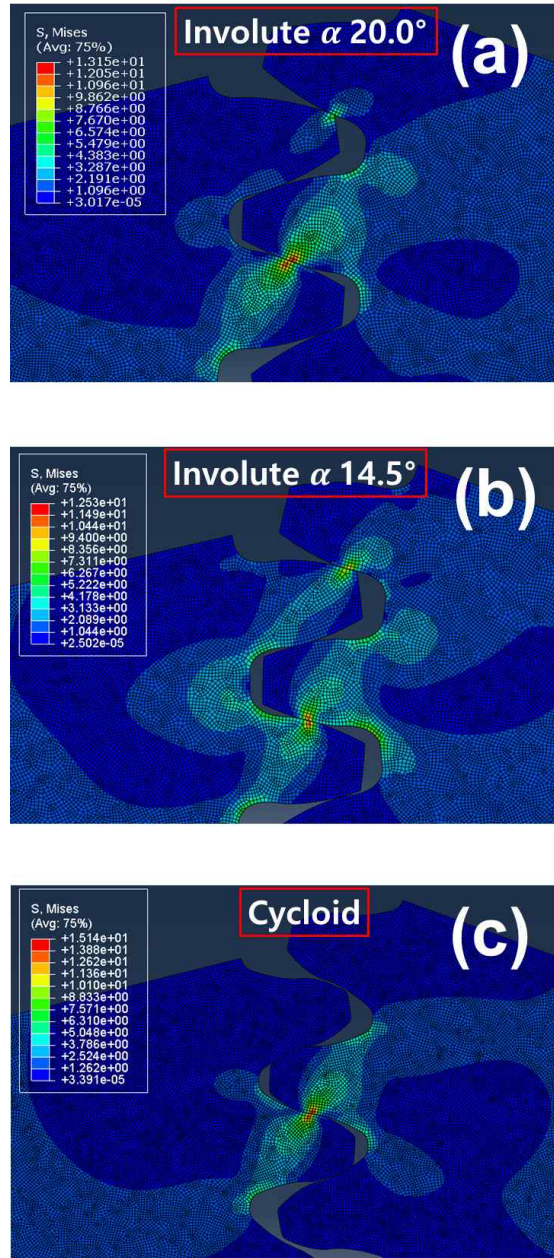


Figure. 25 Von Mises stress distribution of the each gear model pairs; involute 20.0° (a), involute 14.5° (b), Cycloid gear(c)

Fig. 25는 각 기어 치형의 피치 포인트에서의 Von.mises.stress 값이다. 각 치형의 Von.mises.stress 값은 접촉 압력 값과 유사하게 물림률이 가장 높은 인벌류트 기어 ($\alpha:14.5^\circ$)가 12.53 MPa로 가장 낮았으며 순서대로 인벌류트 기어($\alpha:20.0^\circ$) : 13.15 MPa, 사이클로이드 기어 : 15.14 MPa로 높았다. 각 이빨에서 발생하는 응력 측정 분석 결과 사이클로이드 기어에서 발생하는 응력이 가장 높게 측정이 되었다. 그러나 사이클로이드 기어의 경우 이 두께가 가장 두꺼운 피치점에서만이 응력이 높게 측정이 될 뿐 기어 치아의 하부에 걸리는 응력은 다른 치형에 비해 적은 범위에 압력이 가해짐을 보여준다. 이와 반대로 피치 지점에서 가장 낮은 응력값을 보인 인벌류트 기어($\alpha:14.5^\circ$)의 경우 피치점에서의 응력은 낮게 측정이 되었으나 전체적인 기어 이에 걸리는 응력이 사이클로이드와 인벌류트 기어($\alpha:20.0^\circ$)보다 높은 값을 보여준다. 그리고 인벌류트 기어($\alpha:20.0^\circ$)는 사이클로이드 기어와 인벌류트 기어($\alpha:14.5^\circ$)의 응력 결과값의 중간값을 보여준다. 이러한 결과는 물림률이 높은 인벌류트 기어($\alpha:14.5^\circ$)의 기어의 경우 높은 물림률에 의해 접촉 압력값과 유사하게 피치점에서의 응력은 낮은 값을 보이거나 지속적인 응력이 넓은 범위에 작용하여 피로 마모에 의해 쉽게 파손이 됨을 알 수 있고 사이클로이드 기어는 피치점에서의 응력은 높게 측정이 되나 기어 하부에 작용하는 응력은 매우 미미한 수준을 보여 타 치형보다 파손이 다소 적음을 알 수 있다.

제 4 장 표면처리에 따른 고분자 평기어의 트라이볼로지 특성 평가

제 1 절 실험 시편 준비 및 트라이볼로지 특성 평가

1. 시편 준비 및 실험 장비 구축

본 연구장에서는 네 가지 종류의 3D printed 고분자 재료의 표면 트라이볼로지 특성을 측정하고, 가장 우수한 트라이볼로지 특성을 보인 재료의 기어 제작 시 트라이볼로지 특성에 따른 기어 신뢰성 실험의 변화에 대해 실험하였다. 본 연구에 사용된 재료는 ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene), PE(Polyethylene), PP(Polypropylene), PA12(Polyamide) 재료를 선정하였으며, PA12 재료는 SLS 프린팅을 이용하였고, ABS와 PE 그리고 PP는 SLA 프린팅 방식을 이용하여 제작되었다. 각 시편은 표면 트라이볼로지 특성 평가 분석을 위해 2×2×1 mm 큐브 형태로 각 고분자 종류당 4개씩 제작하였다. 시편은 표면처리에 따른 트라이볼로지 특성 평가를 위해 기준 시편과 표면 연마 시편, 표면코팅 시편, 그리고 표면연마와 코팅이 된 시편으로 나누어 각각 실험을 진행한다. Table.4과 Fig. 26은 각 시편의 이미지와 기계적 물성치 값이다.

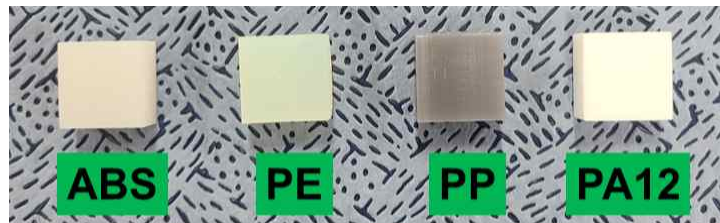


Figure. 26 Four types of 3D printing materials manufactured for evaluate tribology characteristics

Table 4. Mechanical properties of four kinds of polymer specimens [50,52]

Specimen	Young's modulus	Tensile strength
ABS	1227 MPa	30 MPa
PE	1000 MPa	28 MPa
PP	1500 MPa	33 MPa
PA	1700 MPa	48 MPa



Figure. 27 Acetone fumigator for surface polishing

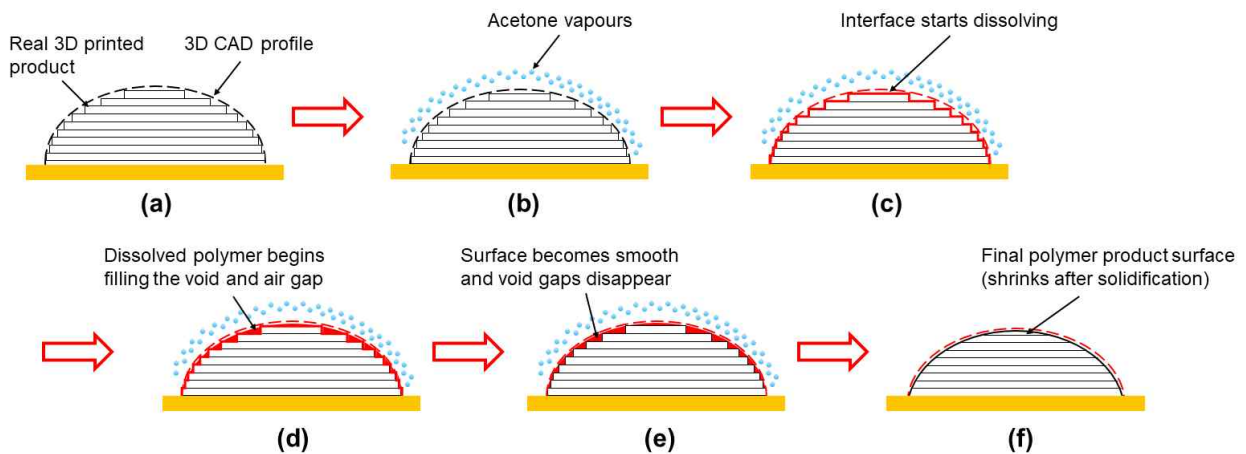


Figure. 28 Schematic diagram of 3D printed specimen surface acetone fumigation process [53]

Fig. 27은 시편의 표면을 연마하기 위해 설치한 간이 훈증기로, 원형 스틸 통 내부에 천을 붙이고 아세톤을 부어 적신 후 천천히 증발 시키며 아세톤이 증발하는 과정에서 시편의 표면을 서서히 녹여 표면을 매끄럽게 하는 장치이다. Fig. 28은 이러한 훈증 과정을 시각화한 보충자료이다. 해당 장치는 연마의 진행속도가 느리다는 단점이 있으나 시편의 내구성에 큰 영향을 끼치지 않으며, 사포나 공작기계로 가공하기 쉽지 않은 복잡한 형상도 쉽게 연마를 할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 통 내부에 아세톤을 채운 후 시편을 배치하고 약 30° 온도에서 한 시간 가량 증발시켰다. 그 후 아세톤이 표면에 남지 않도록 두 시간 가량 실온에서 추가 증발 시켜 표면을 연마하였다.

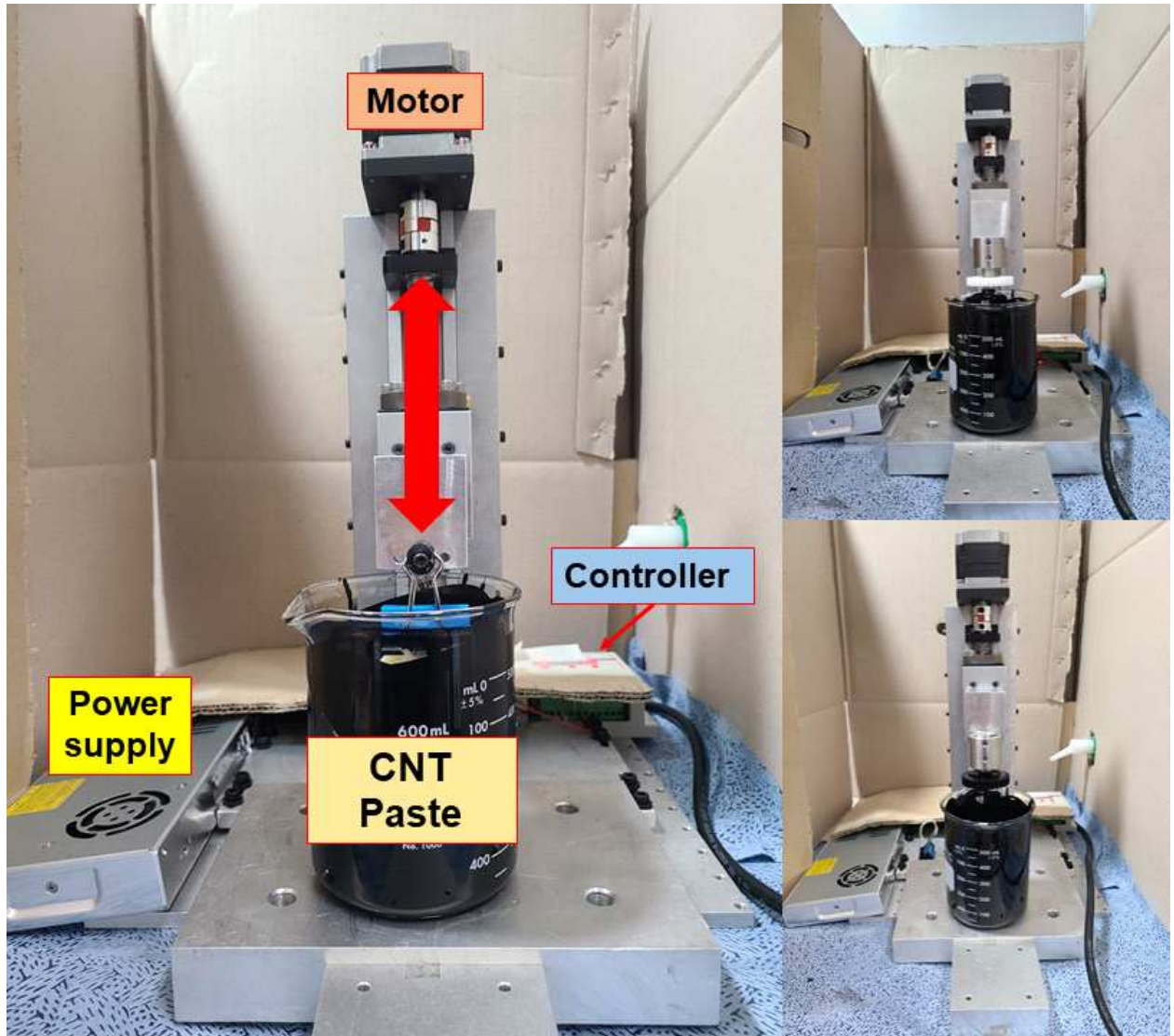


Figure. 29 Dip coating machine for surface CNT coating (left), Actual polymer gear CNT coating (right)

Fig. 29는 표면코팅을 위해 제작된 장비로, 모터의 회전에 따라 볼 스크류를 움직여 고정된 지그를 직선운동 시키는 장비이다. 본 연구에서는 해당 장비를 이용하여 시편 표면 딥코팅 공법을 이용하였다. 딥코팅 공법은 지그에 부착된 시편을 상하로 왕복운동을 하여 일정한 속도로 하부에 설치한 코팅액에 침지시킨 후 다시 일정 시간 후에 코팅액에서 퇴거하고, 퇴거한 시편 표면에 잔류하는 코팅액을 증발시켜 시편에 나노 입자를 코팅하는 공법이다. 딥코팅 공법은 비교적 코팅이 균일하게 될 뿐만 아니라 형태에 구애를 받지 않으며 코팅액의 소실이 적어 센서 및 태양전지 등의 제작에 이용이 되고 있다. [54,55]

본 연구에서 딥코팅 코팅액으로 사용된 재료는 CNT는 원기둥 모양의 나노구조를 가진 탄소 동소체로, 높은 열전도율과 기계적(Young's modulus : 270-950GPa, Tensile strength 63GPa), 전기적 특성이 있어 표면 코팅 및 첨가제로 주로 이용이 되는 물질 중 하나이다. 본 연구에서는 고분자 기어의 문제점 중에 하나인 낮은 열전도율을 보완하고 또한 기어 물림 시에 충격을 완화하고자 CNT 코팅을 사용하였다.

딥코팅 기법은 침지 시간과 침지 속도 및 퇴거 속도에 따라 표면 코팅의 두께가 천차만별로 바뀌는 특성이 있다.[56-58] 그리고 플라스틱 고분자는 IPA와 같은 알코올과 접촉 시 알코올을 흡수하여 접촉 시간에 따라 고분자의 기계적 강도가 약해진다는 특성이 있어 오랜 시간동안의 코팅액과 접촉은 피해야할 사항이다.[59] 따라서 고분자 기어의 기계적 특성을 고려하며 우수한 트라이볼로지 특성을 갖춘 딥코팅 조건을 찾기 위해, 최적의 immersion time과 withdrawal speed를 탐색하여야 한다.

내마모성이 가장 우수한 최적의 딥코팅 조건을 탐색하기 위해 자체적인 기초 실험을 수행하였다. 코팅에 사용된 재료는 Polyamide plastic을 사용하였으며, 재료 표면 CNT 코팅은 플라스틱 고분자의 특징 중 하나인 알코올 성분을 흡수하는 특성을 이용하여 별도의 Binder 없이 IPA(isopropyl alcohol)에 분산된 CNT 용액을 코팅액으로써 이용하였다.[51] 최적의 딥코팅 조건을 탐색하기 위한 변수로는 immersion time과 withdrawal speed를 각각 time : (2,4,6,8,10,30min) time 변수 시 withdrawal speed : 1mm/s , speed : (1,5,10,15,20,30 mm/s) speed 변수 시 immersion time : 30 sec로 설정하여 트라이볼로지 특성을 측정하였으며, 트라이볼로지 특성이 가장 우수한 조건을 선별하였다. 딥코팅 조건 선별 실험 결과, immersion time 2~30 min시 코팅 두께는 2 μ m~8 μ m였으며 withdrawal speed 1~30 mm/s시 코팅 두께는 2 μ m~1.5 μ m로 immersion time이 증가할수록 코팅 두께가 증가하였으며 withdrawal speed가 증가할수록 코팅 두께가 감소하였다. 표면 거칠기 값은 경향성이 없었으며 대체적으로 일정한 표면거칠기 값을 보였다. 트라이볼로지 특성은 2min의 immersion time과 15mm/s의 withdrawal speed 조건이 각각의 변수 중에서 가장 우수하였으며, 위 두가지 조건을 합친 2min의 immersion time, 15mm/s의 withdrawal speed의 딥코팅 조건에서의 트라이볼로지 특성은 이보다 더욱 우수한 특성을 보였다. 또한, 이때의 CNT 코팅 두께는 1.9 μ m로 측정되었다. 본 연구에서는 이러한 기초 연구를 통해 트라이볼로지 특성이 가장 우수한 딥코팅 조건을 선별하여 본 연구 장에 이러한 조건을 적용하였다.

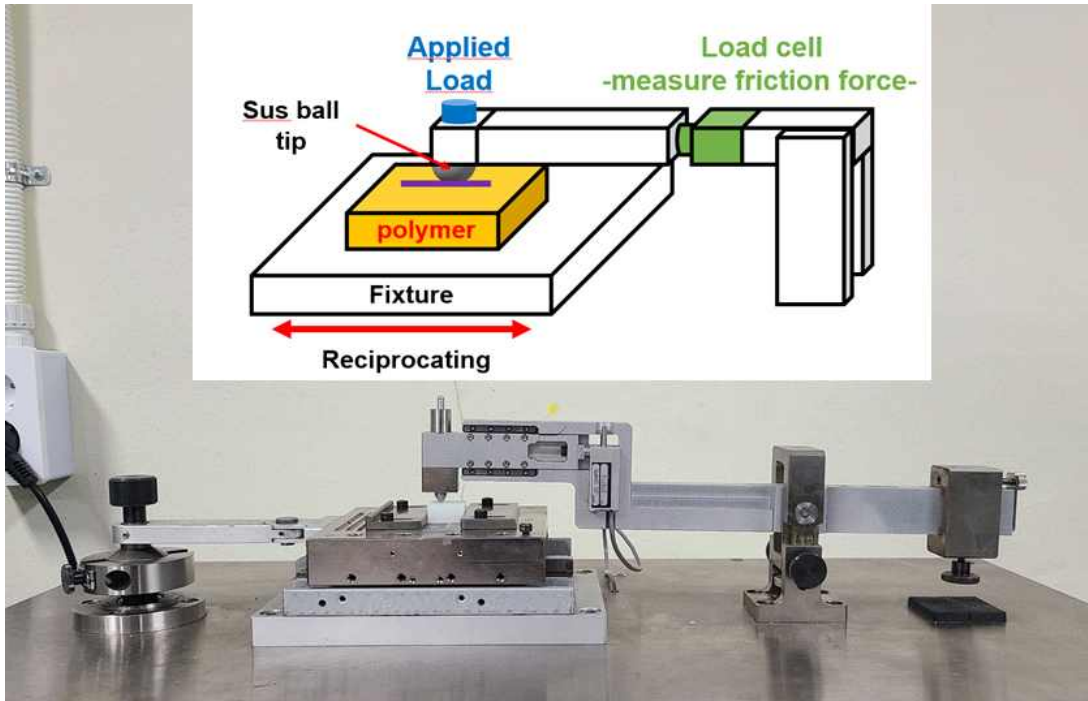


Figure. 30 Reciprocating machine for measure Coefficient of friction

Fig. 30은 표면 트라이볼로지 특성 분석을 위해 사용한 직선왕복형 마찰시험기이다. 해당 장비는 시편이 고정된 stage를 모터와 캠을 이용하여 직선왕복형 으로 움직이게 설계 후 시편과 맞닿은 jig에 로드셀을 부착하여 시편과 지그에 부착된 스틸볼을 마찰시킬 때 생기는 마찰력을 측정하여 마찰계수를 산정한다. 본 연구에 사용된 마찰시험기의 실험조건은 상대재로 지름 1mm 스틸볼을 사용하였으며, 수직하중 1N, 왕복속도 : 4Hz, 왕복횟수 : 10,000 Cycle로 실험을 진행하여 마찰계수를 측정하였다. 마찰실험은 윤활제가 없는 건식환경에서 진행이 되었으며, 데이터 신뢰성을 위해 최소 3회 이상 실험을 반복하였다.



Figure. 31 Laser scanning confocal microscope for measure surface & wear

Fig. 31은 공초점 현미경(Confocal microscopy)으로, 레이저 반사를 이용하여 광학 현미경에서 알 수 없는 시료의 높이차를 알 수 있는 현미경의 종류 중 하나로, 본 연구에서는 공초점 현미경을 이용하여 시편의 표면 형상과 표면 거칠기, 그리고 마모량을 측정하였다.

2. 표면 특성 및 마찰·마모계수 측정 및 결과

가. 표면특성 측정 및 비교

(1) 표면 접촉각, 표면에너지 측정 및 비교

각 재료의 표면 에너지 특성은 물 접촉각 측정을 통해 유추할 수 있다. 재료의 표면 접촉각 측정을 위해 사용된 도구는 마이크로 피펫으로, 모든 재료에 동일한 용량의 물 방울이 형성될 수 있도록 물의 양을 조절한다. 본 연구의 조건은 Di water $10\mu\text{l}$ 이며 마이크로 피펫으로 물방울을 형성한 후 휴대용 전자 현미경을 통해 이미지를 캡처한 Image J 프로그램을 이용해 접촉각을 측정하였다. Fig. 32는 본 연구에 사용된 시편의 접촉각 데이터이다.

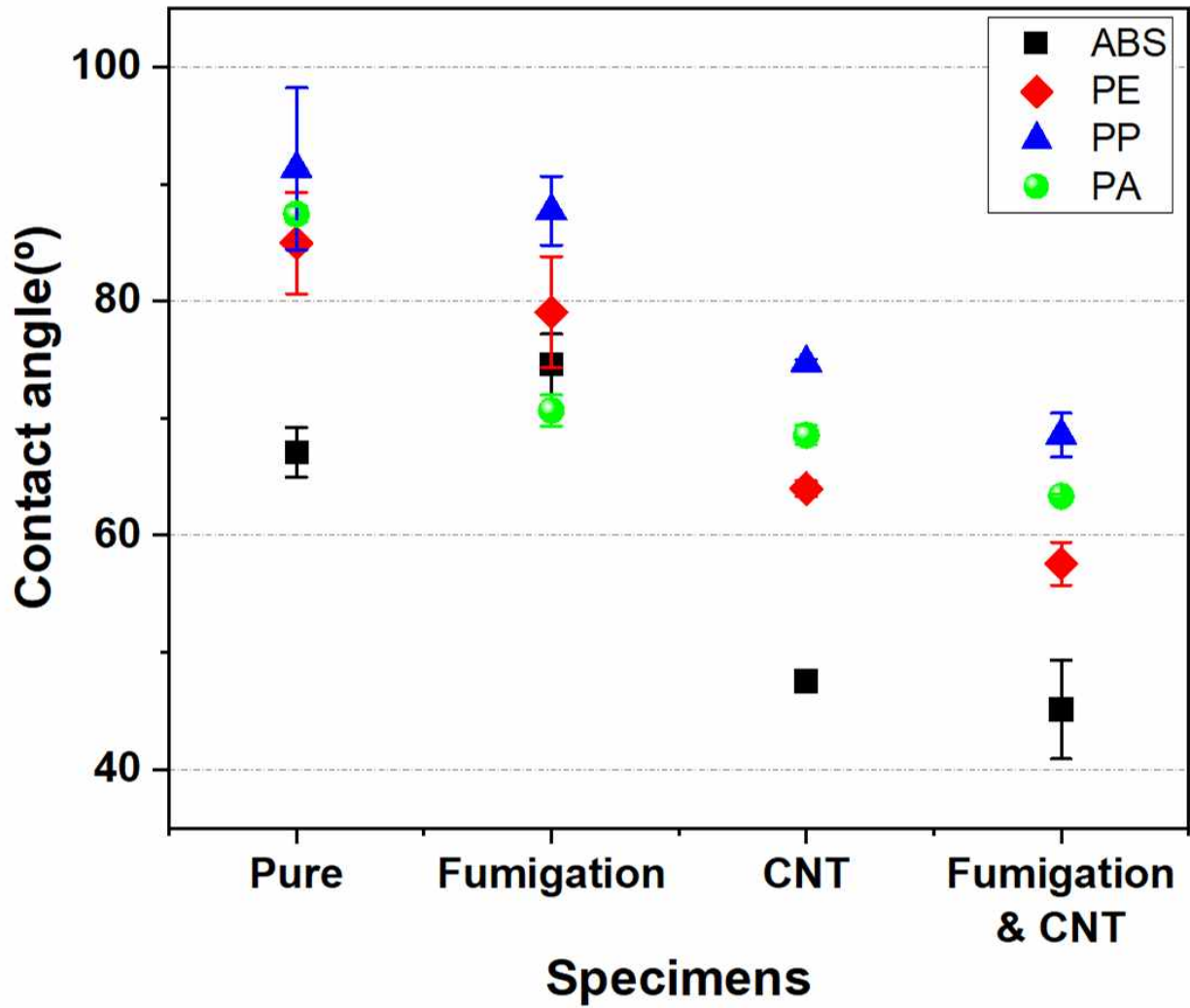


Figure. 32 Water Contact angle of 3D printed four kinds of polymer materials under different surface treatment

각 시편의 표면 에너지 값은 Young-Dupre equation을 이용하여 표면에너지 값을 구하였다.[60]

$$\gamma(1 + \cos\theta) = W \quad (11)$$

공식 (11)은 물방울 접촉각을 통한 표면에너지 도출 공식으로, γ 는 액체의 표면 장력($\text{Di water} = 72 \text{ mJm}^{-2}$), θ 는 고체와 액체간의 표면 접촉각, W 는 표면에너지 (mJm^{-2})이다. 각 시편의 표면에너지 값은 Table. 5에 나타내었다.

Table 5. Contact angle & surface energy of each polymer specimens

	Specimen	Pure	Fumigation	CNT	Fumigation & CNT
ABS	Contact angle (°)	67.082	74.593	47.534	45.126
	Surface energy (mJm^{-2})	100.037	91.128	120.610	122.798
PE	Contact angle (°)	84.956	79.072	69.988	57.584
	Surface energy (mJm^{-2})	78.331	85.649	103.576	110.596
PP	Contact angle (°)	91.305	87.706	74.729	68.545
	Surface energy (mJm^{-2})	70.359	74.882	90.963	98.335
PA	Contact angle (°)	87.424	70.669	68.553	63.347
	Surface energy (mJm^{-2})	75.236	95.834	98.326	104.298

물방울 접촉각 측정을 통한 표면 에너지 분석 결과, ABS를 제외한 시편의 경우 아세톤 훈증을 통한 표면처리 시 원자 간의 결합력이 상승하여 표면 에너지가 증가함을 알 수 있다. 그리고 CNT 코팅이 가해질 시 모든 시편의 표면 에너지가 증가하였으며, 훈증과 코팅이 같이 행해진 시편의 표면 에너지는 눈에 띄는 표면에너지 감소를 보여준다. 이를 통해 훈증과 CNT 코팅이 표면에 가해질 시 원자 간 결합력 상승과 표면 보호를 통해 고분자 기어의 표면이 강해짐을 유추할 수 있다.

(2) 표면 형상, 표면 거칠기 측정 및 비교

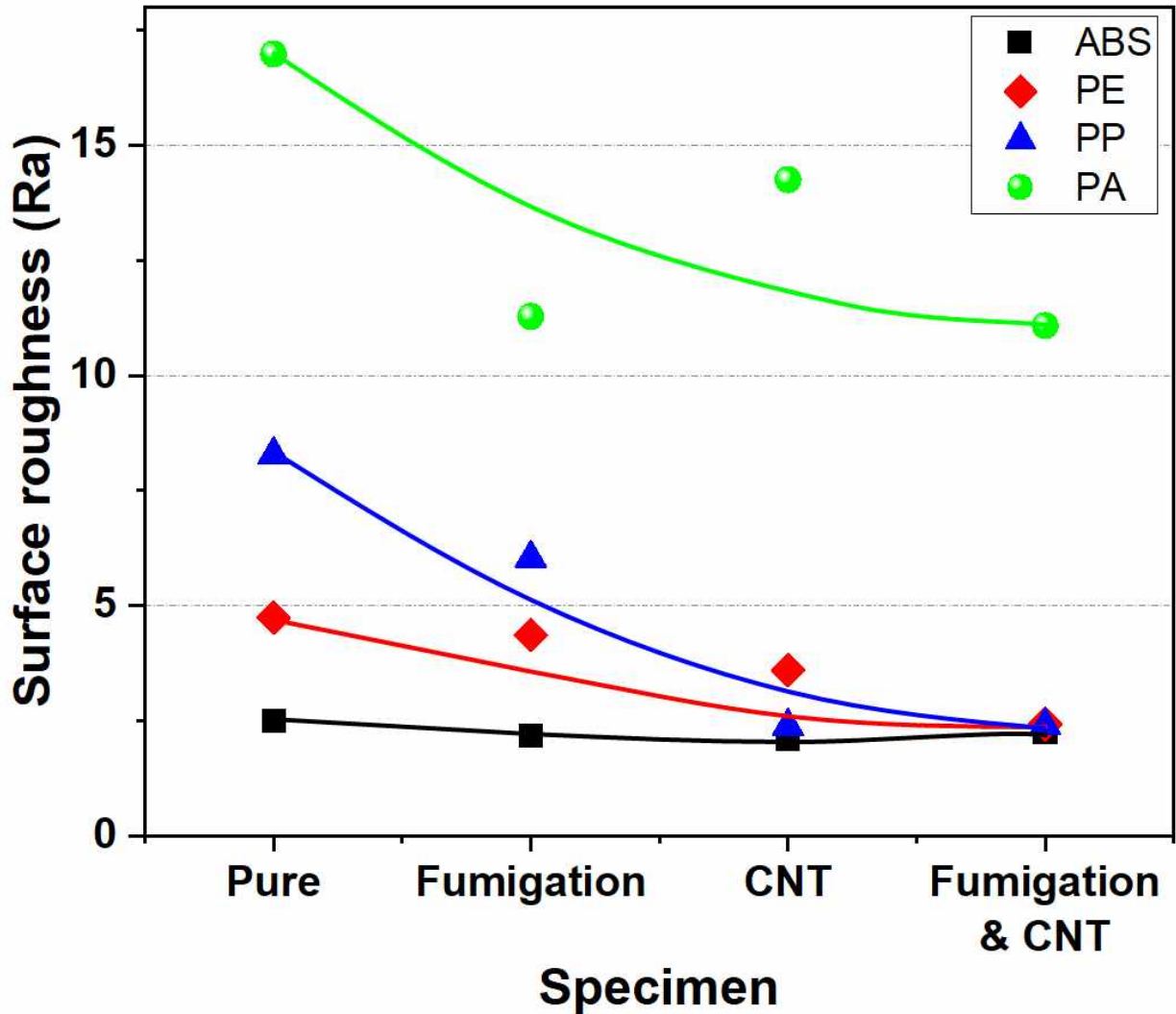


Figure. 33 Surface roughness of 3D printed four kinds of polymer materials under different surface treatment

Fig. 33은 네 가지 3D 프린팅 고분자 소재의 표면처리에 따른 표면 거칠기 그래프이다. 표면 거칠기값 비교 분석 결과, 네 가지 시편 모두 표면처리를 거치지 않은 순수한 상태(Pure)에서의 거칠기 값은 표면처리를 거친 상태보다 높은 값을 보인다. 순수한 상태에서의 거칠기 값은 ABS가 (2.5 μm)로 가장 낮고 PE (4.74 μm)와 PP (8.28 μm) 그리고 PA (16.98 μm)가 순서대로 높은 값을 보인다. 이러한 거칠기 값을 보이는 이유는 PA는 다른 재료의 프린팅 방식인 액체 레진을 적층하는 광조형 방식(SLA)이 아닌 분말을 녹여 적층 하는 선택적 레이저 소결 (SLS) 프린팅 방식에 의해 제작되었기 때문에

거칠기가 다소 높게 측정이 되었다.

아세톤 훈증을 통한 표면 화학연마가 된 시편은 대체로 표면 거칠기가 다소 낮아짐을 보인다. 특히, 거칠기 값이 높았던 시편의 거칠기 값이 큰 폭으로 감소하였는데, PA의 경우 거칠기 값이 35% 감소하였으며, PP는 27%, PE 8%, ABS 14% 감소하였다. PA는 SLS 방식에 의해 표면에 분말형태가 존재하여 분말이 아세톤에 의해 녹으며 표면 거칠기 값이 큰 폭으로 감소하였고, PP는 적층 결이 다른 두 시편보다 더욱 완화되어 거칠기 값이 감소하였다. PE와 ABS의 경우는 순수 상태에서 낮은 표면 거칠기값을 보유하고 있어 훈증의 효과가 적은 것으로 보인다.

표면 CNT 딥코팅 처리가 이루어진 시편의 경우 모든 시편의 거칠기 값이 감소하였다. 이는 CNT 코팅이 표면에 존재하던 적층 결의 빈 공간을 CNT가 채워 넣어 결에 의한 높이 차이를 감소시키는 역할을 하여 표면 거칠기 값을 감소시킨 것으로 보인다. 추가로, CNT 코팅층의 두께는 평균 약 $2\mu\text{m}$ 의 두께를 보였다.

표면화학연마와 CNT 코팅 처리가 이루어진 시편의 경우 ABS와 PA는 표면 연마값과 비슷한 결과값을 보였으나, PP와 PE는 표면 거칠기가 매우 감소함을 보였다. 이는 훈증에 의해 완화된 적층 결에 CNT가 빈 공간을 채워 넣으며 높이차를 감소시켜 두 표면 처리에 의해 표면 높이가 일정해짐으로 인해 표면이 완만해진 것을 알 수 있다. 추가로, 화학연마와 CNT 코팅 처리가 혼합된 시편의 CNT 코팅층의 두께 또한 약 $2\mu\text{m}$ 의 두께를 보였다.

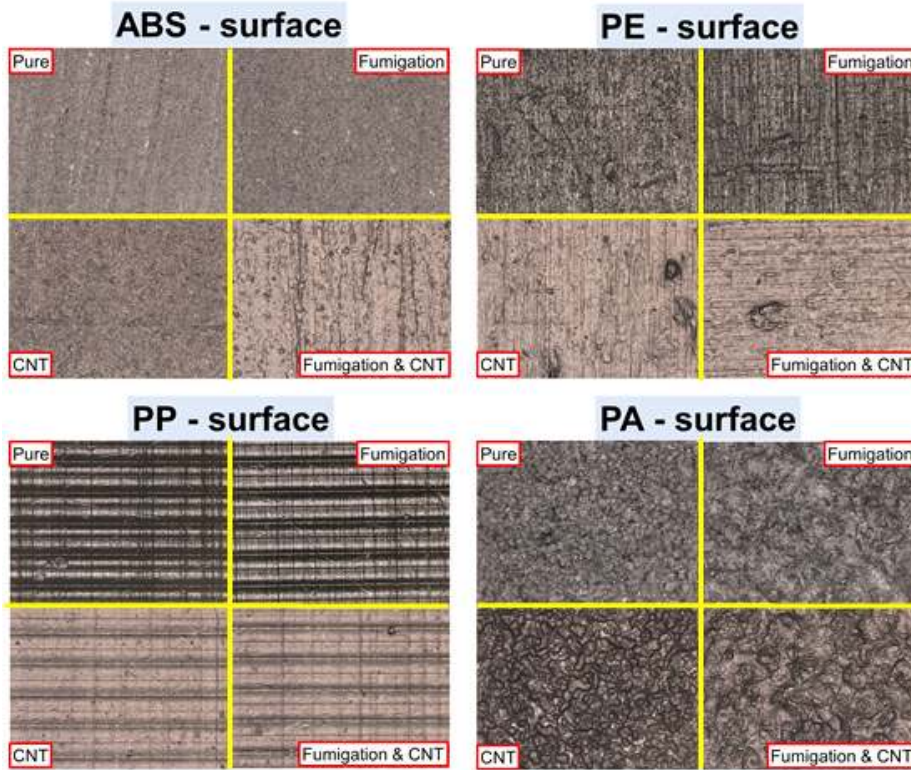


Figure. 34 2D profile laser scanning confocal microscope surface images of four kinds of 3D printed polymer materials under different surface treatment (ABS, PE, PP, PA)

Fig. 34는 공초점 현미경을 이용하여 촬영한 시편의 표면 이미지이다. 측정 결과, 표면 거칠기가 낮은 값을 보였던 ABS와 PE는 표면처리에 따른 표면 형상의 변화가 보이지 않는다. 반면 PP와 PA의 경우 표면처리에 따른 표면 형상의 변화가 눈에 띄는 결과를 보여주는데, 순수한 PP는 적층 결에 의해 표면 거칠기가 매우 거친 형상을 보이며, 표면 화학연마가 이루어진 PP의 경우 시편의 표면이 아세톤에 의해 녹아내려 적층 결이 다소 완화됨을 보이고, CNT 코팅 처리를 한 PP는 적층 결의 골(valley)에 CNT입자가 채워져 적층 결이 완화되었다. 그리고 표면화학연마와 CNT 코팅 처리가 혼합된 PP의 표면은 앞선 효과들이 중첩되어 표면 거칠기가 매우 낮아짐을 알 수 있다. PA는 순수 표면 형상이 분말형태가 표면에 잔류하여 표면이 매우 거침을 알 수 있으며, CNT 코팅 처리가 된 PA의 경우 분말의 잔류 정도가 더욱 선명하게 나타난다. 그러나 표면 화학연마 처리가 된 PA는 분말 입자가 녹아내려 분말이 표면에 녹아내린 형상을 보여 거칠기가 다소 감소함을 알 수 있고, 표면화학연마와 CNT 코팅 처리가 혼합된 PA의 표면 또한 동일한 형상을 보인다.

나. 표면 마찰계수 측정 및 비교

각 재료의 마찰특성 분석을 위해 Hertzian contact theory 공식을 사용하였다. Table. 6은 본 연구의 마찰시험 조건에서의 각 재료의 최대 접촉 압력과 변형량, 그리고 접촉지점 반지름 값을 의미한다.

Table 6. Hertzian contact analysis of four kinds of polymer specimens

Specimen	Max contact stress	Vertical deformation	Contact area of radius
ABS	53.08 MPa	0.0018 mm	0.0299 mm
PE	45.24 MPa	0.0021 mm	0.0325 mm
PP	57.18 MPa	0.0017 mm	0.0289 mm
PA	67.37 MPa	0.0014 mm	0.0266 mm

Hertzian contact theory에 따르면, 접촉면적이 가장 높을 것으로 예측되는 재료는 PE이다. 그리고 ABS와 PP는 비슷한 접촉면적을 보이며, PA는 PE대비 약 30%가량 변형이 적다. 이를 통해 마찰 운동 시 표면 거칠기가 동일하다는 가정하에, 마찰계수 및 마모가 가장 높을 것으로 예상되는 재료는 PE이며, 반대로 PA는 마찰계수 및 마모량이 가장 적을 것으로 예상된다. 그리고, ABS와 PP는 PE와 PA의 중간값을 나타낼 것으로 예측된다.

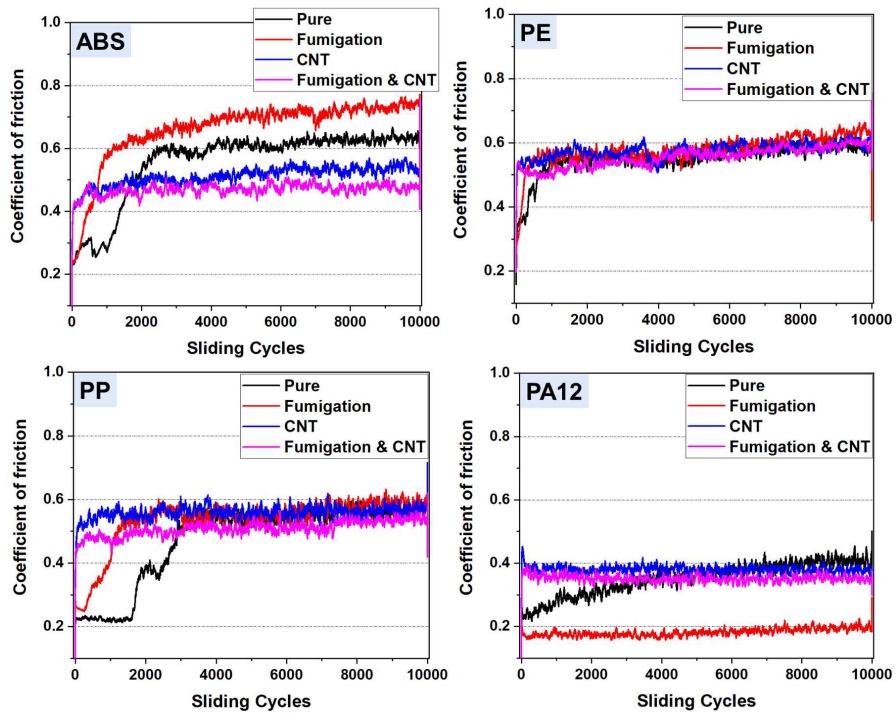


Figure. 35 Variation in the coefficient of friction 3D printed four kinds of polymer materials under different surface treatment according to Sliding Cycles

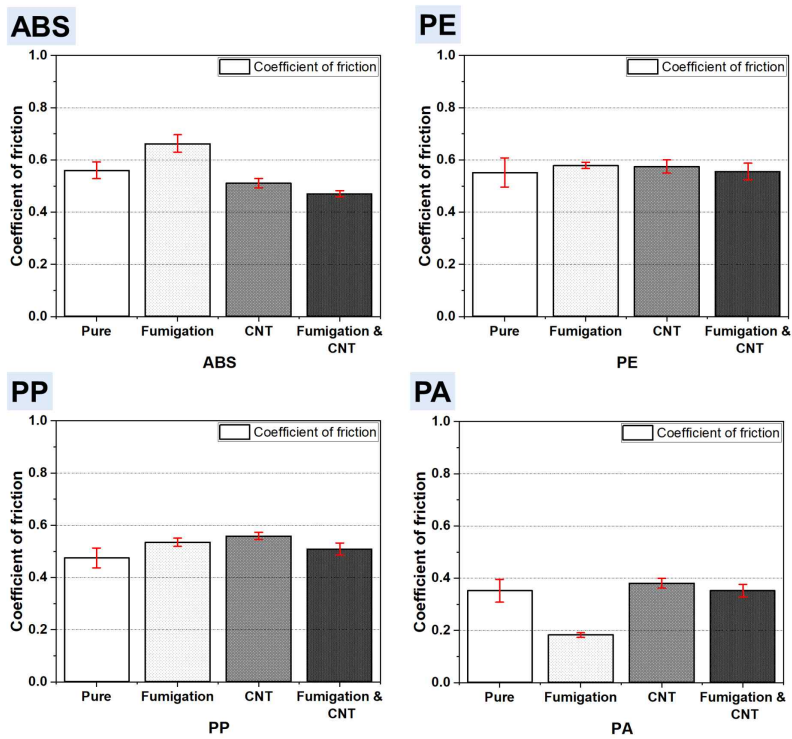


Figure. 36 Average coefficient of friction 3D printed four kinds of polymer materials under different surface treatment

면화학연마 처리가 된 PA는 모든 시편 중 가장 낮은 마찰계수 값인 0.18의 값을 보이는데, 이는 표면 분말 입자가 녹아내림에 의해 표면 거칠기가 큰 폭으로 감소하여 원활한 마찰에 의해 발생한 결과이다. CNT 코팅 처리가 된 PA는 순수 PA의 마찰계수 값과 동일한 값을 보이는데, 이는 분말 입자 사이에 CNT가 채워져 분말에 의한 초기 접촉면적 감소 효과가 사라짐에 의한 결과로 보인다. CNT 코팅 처리와 표면 화학연마가 혼합된 PA는 표면 거칠기 감소효과에 의해 코팅 처리만 된 PA에 비해 낮은 마찰계수 값을 보이나 표면화학처리만 된 PA보다 다소 높은 마찰계수 값을 보인다. 이는 CNT자체의 마찰계수에 의한 것으로, PA의 강한 기계적 강도에 의해 타 시편 대비 접촉면적이 적어 0.35의 마찰계수만을 보인다.

다. 마모율 측정 및 비교

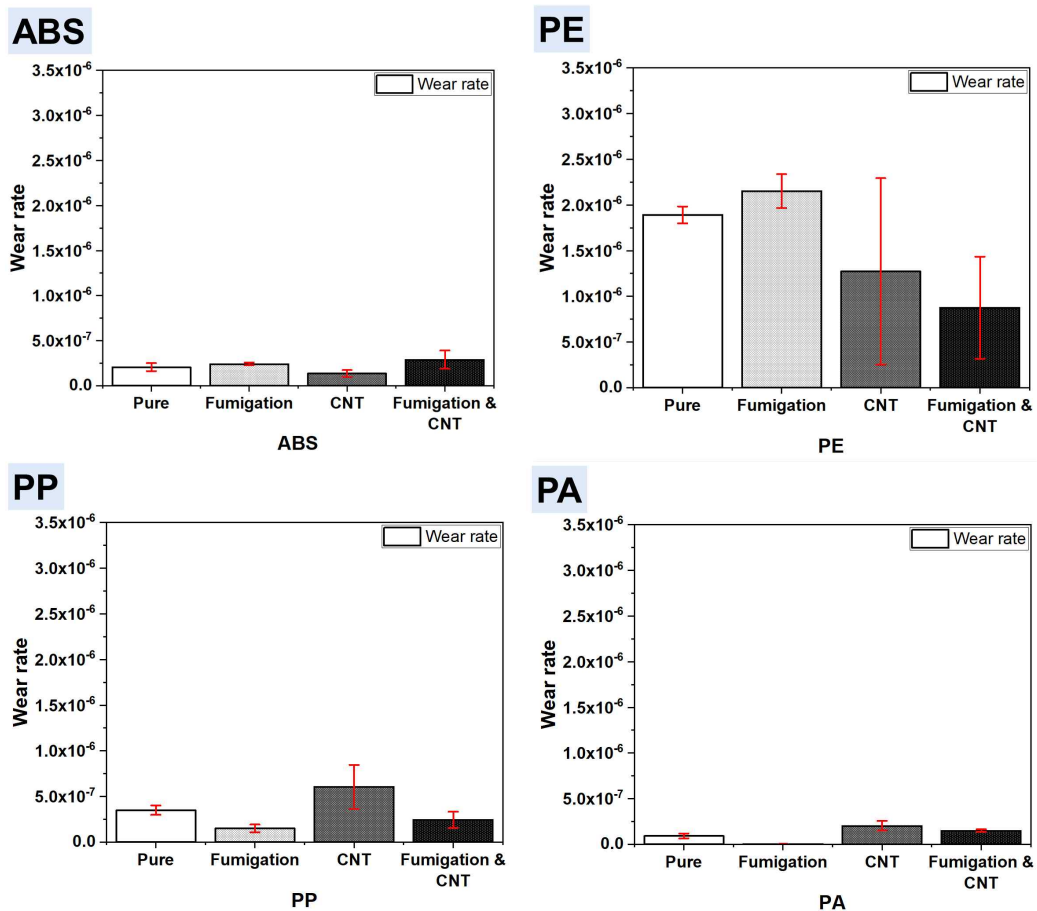


Figure. 37 Wear rate of four kinds of 3D printed polymer materials under different surface treatment

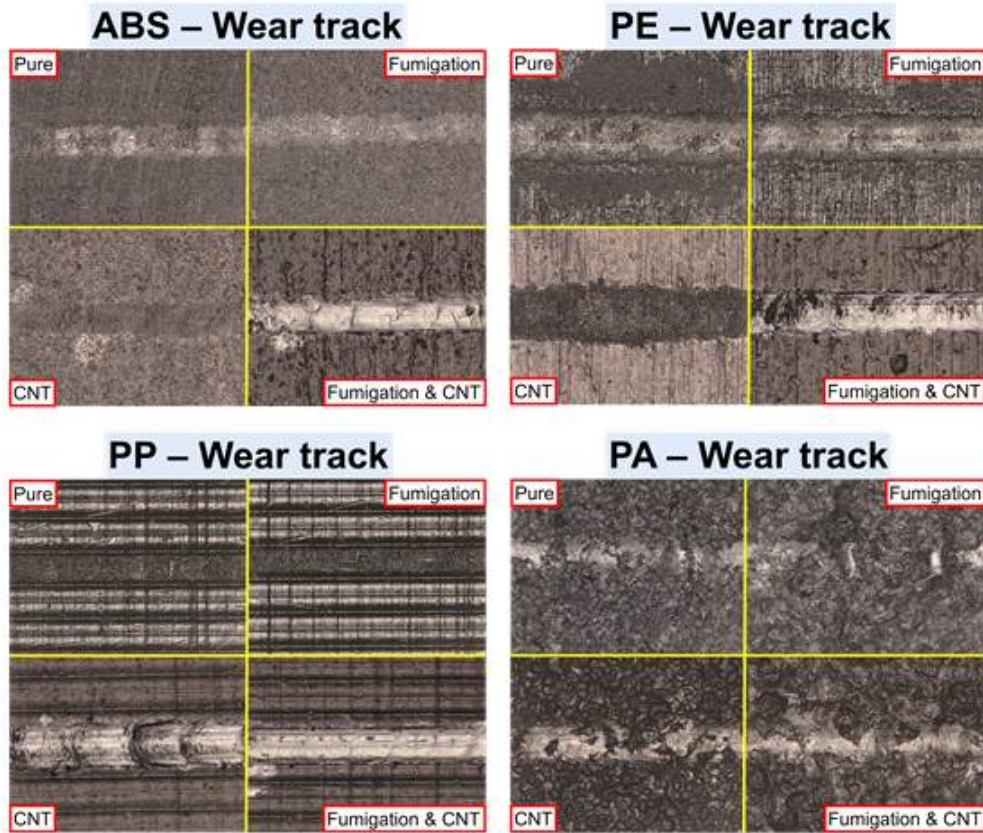


Figure. 38 2D profile laser scanning confocal microscope surface images of four kinds of 3D printed polymer materials under different surface treatment (ABS, PE, PP, PA)

Fig. 37과 Fig. 38은 마찰 실험 결과 각 시편의 마모율을 도식화한 그래프와 마모 트랙 이미지이다. 시편의 마모 분석 결과, ABS와 PP, PE는 모든 처리과정에서 비슷한 마찰계수를 보였으나 마모율이 각기 다를 수 있다.

ABS의 경우 마찰계수는 표면화학연마와 CNT 코팅 처리가 혼합된 시편의 마찰계수가 가장 낮았으나 마모율이 가장 높게 측정이 되었다. 이는 ABS의 표면 화학연마에 의한 표면 에너지 감소가 원인이며, 낮아진 표면 에너지로 인해 CNT와의 접착력이 떨어져 CNT 코팅층이 마찰에 의해 박리되어 마모율이 높아졌다.[61] 이와 반대로 순수 ABS에 CNT만을 코팅한 시편의 경우 마찰계수는 높았지만 ABS와 CNT 코팅의 접착력이 강해 CNT 코팅층의 마모가 비교적 적게 이루어져 마모율이 가장 낮게 측정이 되었다. 그리고 순수 ABS와 표면 화학연마가 된 ABS의 경우 마모율은 마찰계수와 비례한 결과값을 보인다.

PE시편은 PP시편과 마찰계수 추이는 비슷한 양상을 보였으나 마모율 결과값에서 상이한 차이를 보인다. PE는 타 시편 대비 낮은 기계적 물성 값을 가지고 있어, 동일한 마찰 환경에서 더욱 많은 마모를 보여준다. 그리고 표면화학연마 시 ABS와 동일하게 표면이 녹아내림으로 인해 연삭 효과가 증대하여 높은 마모율이 측정된 것으로 보인다. CNT 코팅과 코팅&연마가 된 시편 모두 CNT 코팅층의 보호 효과에 의해 순수 PE보다 낮은 마모율을 보이며 코팅&연마 처리가 된 PE의 화학연마에 의한 접착력 향상 효과에 의해 CNT 코팅 처리만 이루어진 PE보다 낮은 마모율을 보인다.

PP 시편은 순수한 상태에서 ABS보다 높은 마모를 보이나 표면 연마가 되었을 경우 더 낮은 마모율을 보인다. 이는 적층 결에 의한 결과로, 순수 PP는 적층 결에 의해 접촉면적이 넓어 넓은 범위에서 마모가 발생하였고, 연마가 된 PP의 경우 적층 결이 완화되어 이러한 현상이 적어 마모율이 높은 쪽으로 감소하였다. CNT 코팅 처리가 된 PP는 ABS 코팅 처리와 비교하였을 때 높은 마모율을 보인다. 이러한 결과가 보이는 이유는, 적층 결 골(valley)에 CNT입자가 채워 넣어지며 입자들이 응집되어 코팅층이 마찰에 의해 쉽게 박리가 된 것으로 보인다. 반면 코팅&연마 처리가 혼합된 시편의 경우 표면 에너지와 완화된 결의 영향에 의해 보다 낮은 마모율을 보인다.

PA 시편은 낮은 마찰계수와 강한 기계적 물성치에 의해 네 가지 시편 중 가장 낮은 마모율을 보인다. 그중 표면 화학연마 처리가 된 PA의 경우 마모가 0에 수렴하고, 순수 PA는 그보다 다소 높은 마모율을 보인다. 이는 순수 PA의 경우 표면에 잔류하는 PA 분말 입자의 이탈에 의한 마모에 의한 것으로 보이며, 표면이 연마된 PA는 표면에 분말 입자가 잔류하지 않아 본 마찰 환경에서는 마모가 되지 않은 것으로 보인다. CNT 코팅 처리가 된 PA는 순수 PA보다 높은 마모를 보이는데, 이는 PA에 도포된 CNT 코팅층의 박리에 의한 마모이며, 이 또한 연마 처리가 된 PA의 경우 표면 분말 입자가 녹아 거칠기가 낮아진 형태에 의해 적은 마모를 보인다.

본 절에서는 표면처리 기법에 따른 네 가지 종류의 고분자 재료의 표면 특성 및 트라이볼로지 특성을 평가 분석하였다. 네 종류 중 순수 재료의 트라이볼로지 특성이 가장 우수하였던 것은 PA 재료로, PA는 네 가지 시편 중 마찰계수와 마모율이 가장 낮은 값을 보였다. 또한, 표면처리 기법인 표면화학연마와 CNT딕코팅을 통해 앞선 표면처리 기법이 마찰계수를 낮추고, 재료 표면을 보호하는 역할을 함을 알 수 있다. 따라서, 이러한 실험을 통한 고분자 기어의 제작은 PA재료를 고분자 기어로 선정하였으며, 표면처리 또한 표면화학연마와 CNT 코팅 처리가 혼합된 기법을 이용하여 PA 기어에 적용, 그리고 기어 신뢰성 평가를 진행하고자 한다.

제 2 절 표면처리 기법에 따른 고분자 기어 평가 및 비교 분석

1. 표면처리에 따른 기어 신뢰성 평가 및 결과

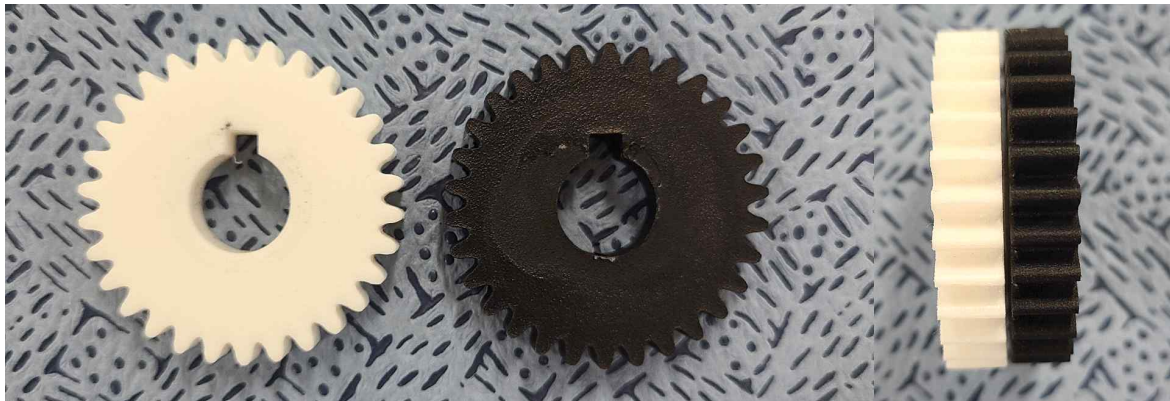
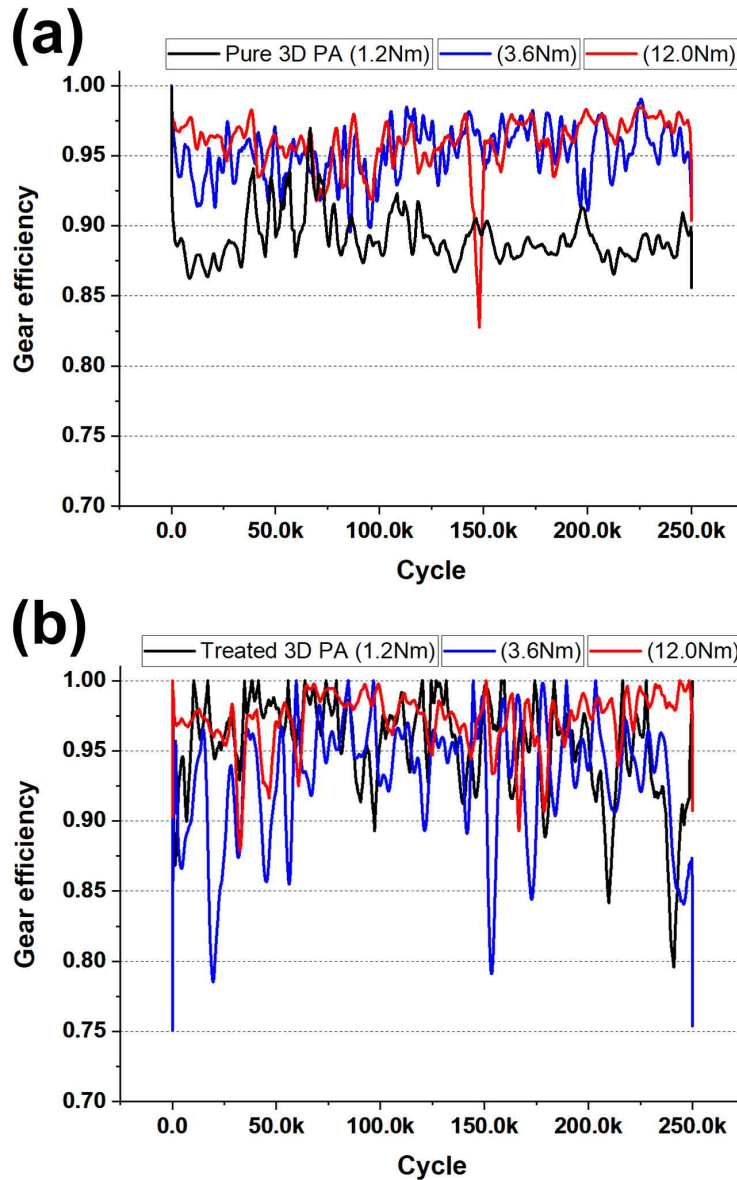


Figure. 39 3D printed cycloid PA12 polymer gear pure (left), Surface treated (right)

Fig. 39는 트라이볼로지 특성이 가장 우수하였던 PA12 재료의 사이클로이드 치형 기어 형상과 PA기어 표면 CNT 코팅 이미지이다. 순수 PA기어는 표면처리 PA의 비교군으로 설정하였으며, PA 기어는 다양한 토크 환경(1.2Nm, 3.6Nm, 12.0Nm)에서 실험하였다. 회전 속도와 Cycle 수는 본 연구의 이전 실험과 동일하게 600RPM, 250,000 Cycles 동안 진행하였다.

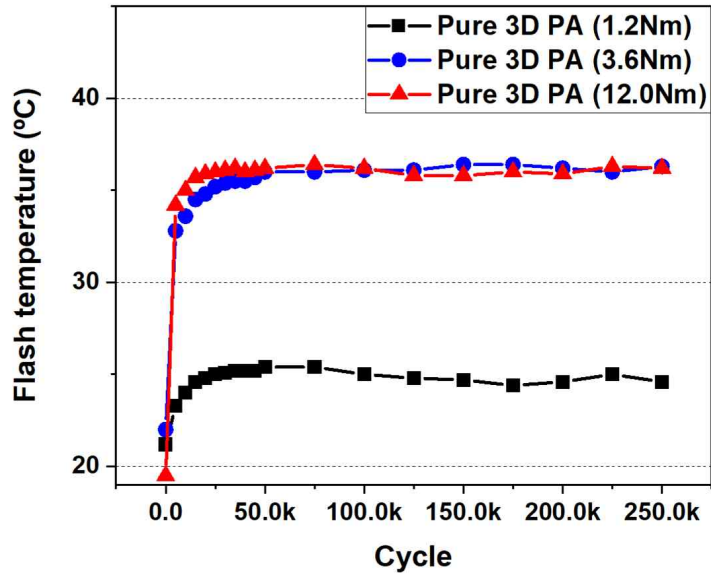


**Figure. 40 Variations in the Gear torque efficiency of Pure 3D printed PA gear (a),
Surface treated PA gear (b)**

Fig. 40은 토크 구동 환경에 따른 순수 3D printed PA gear와 표면 훈증처리 및 CNT 코팅 표면처리가 된 3D printed PA gear의 기어 효율 실험 결과이다. 실험 결과, 각 기어의 평균 효율은 각각 순수 PA 1.2Nm (89%), 3.6Nm (95%), 12.0Nm (95%)이고, 표면 처리 PA 1.2Nm (95%), 3.6Nm (93%), 12.0Nm (97%)이다. 두 기어의 평균 효율값은 90% 이상의 효율을 보이거나 순수 PA의 경우 효율값이 실험 Cycle에 따라 안정적인 반면, 표면처리가 된 PA의 경우 효율값의 변동이 큰 폭으로 바뀌는 것을 보여준다. 이러한 결과는 PA 표면에 증착된 CNT 코팅의 일부 이탈에 의해 CNT-CNT 마찰 운동에서 PA-CNT

마찰로 바뀌며 순간적으로 마찰계수가 달라짐에 의해 생기는 결과로 보인다. 그러나 이러한 현상은 평균 효율값이 1~2% 정도 차이가 나는 것을 보아, 일시적인 현상임을 알 수 있다.

(a)



(b)

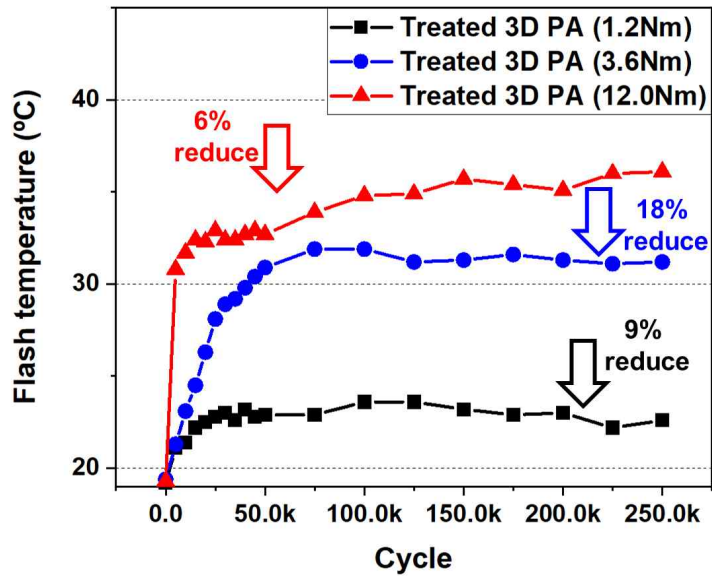


Figure. 41 Variations in the Gear Flash temperature of Pure 3D printed PA gear (a), Surface treated PA gear (b)

Fig. 41은 PA기어 신뢰성 실험 결과, 기어 치아에 발생하는 마찰열 변화 그래프이다. PA 기어는 앞선 ABS 재료보다 높은 하중에서도 비교적 낮은 마찰열을 보이는데, ABS의 경우 3.6Nm이상의 토크 환경에서 80° 에 육박하는 마찰열을 보인 후 파손이 된 반면, 순수 PA기어와 표면처리가 된 PA기어 모두 12.0Nm의 토크 환경에서도 40° 이하의 마찰열을 보이며 파손이 되지 않고 일정한 기어 운동을 하였다. 그리고 표면처리가 된 PA의 경우 열 전도성이 높은 표면 CNT 코팅에 의해 순수 PA보다 1.2Nm 환경에서 9%, 3.6Nm 환경에서 18%, 12.0Nm 환경에서 6% 마찰열 저감효과를 보였다.

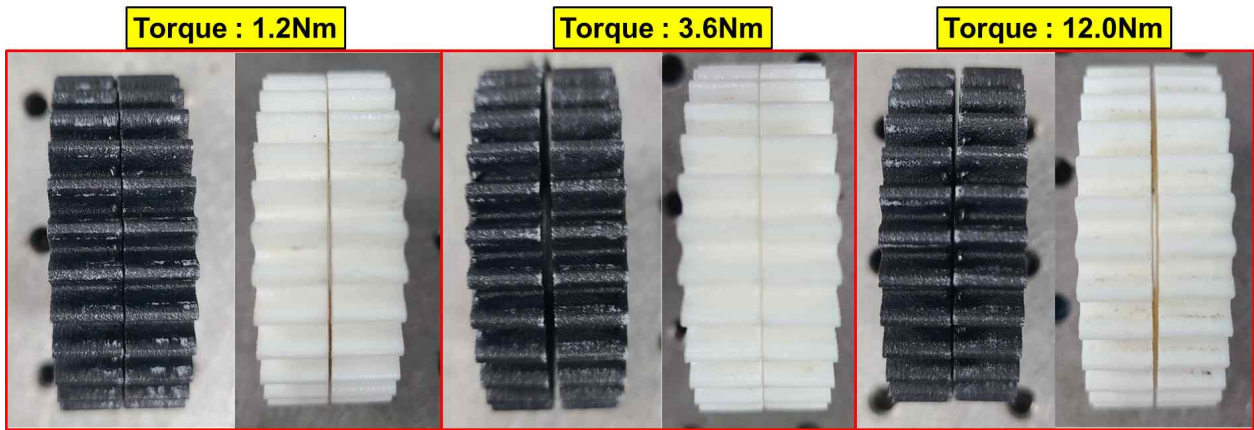


Figure. 42 Gear teeth surface images of after experiment at different torque environment

Fig. 42는 PA기어의 기어 신뢰성 실험 결과 기어 치아의 표면 이미지이다. 두 기어는 세 가지의 토크 환경에서 치아의 마모를 보이지 않았다. Pure 3D printed PA는 마찰에 의해 표면이 연마되어 매끈한 치아가 되었으며, 표면처리가 된 PA는 표면 CNT가 일부 이탈되었으나 전체적인 코팅의 이탈은 발생하지 않았다.

Table 7. Wear volume & rate values of 3D printed PA cycloid gears

Specimen	(PA : 0.93g/cm ³) [52]	Wear volume (mm ³)	Wear rate (mm/rev)
	(CNT : 1.71g/cm ³) [62]		
Pure PA 1.2Nm	Driver	-	-
	Driven	-	-
Pure PA 3.6Nm	Driver	-	-
	Driven	-	-
Pure PA 12.0Nm	Driver	7.53×10^{-6}	4.18×10^{-14}
	Driven	9.68×10^{-6}	5.38×10^{-14}
Treated PA 1.2Nm	Driver	2.14×10^{-6}	1.19×10^{-14}
	Driven	-	-
Treated PA 3.6Nm	Driver	1.71×10^{-6}	4.75×10^{-14}
	Driven	1.71×10^{-6}	4.75×10^{-14}
Treated PA 12.0Nm	Driver	2.29×10^{-6}	6.36×10^{-14}
	Driven	1.71×10^{-6}	4.75×10^{-14}

Table.7은 Pure 3D printed PA와 표면 처리된 PA의 토크에 따른 마모량과 마모율 표이다. Pure PA는 3.6Nm이하의 토크 환경에서 기어의 무게 변화가 없어 마모량 산출이 불가능하였다. 그러나 12.0Nm 이상의 구동 환경에서는 마모량 검출이 가능하였는데, 이 또한 ABS보다 약 0.5배가량 마모가 된 수치로 보이며, 마모율이 0에 수렴하였다.

표면처리가 된 PA는 Pure PA보다 낮은 하중에서도 마모가 검출되었다. 그러나 이 또한 마모량은 매우 경미한 수준을 보이며, 12.0Nm의 높은 구동 환경에서는 Pure PA보다 낮은 마모량과 마모율을 보인다. 이러한 결과는 Fig.42과 같이 표면 CNT 코팅층이 일부 이탈돼서 발생한 마모로 보이며, 높은 구동 환경에서는 오히려 낮은 마모량을 보이는 이유는 표면 CNT 코팅층의 표면 보호 역할과 마찰열 저감효과에 의해 PA 재료 자체의 마모는 이루어지지 않음으로 인한 결과로 보인다.

본 장에서는 Pure 3D printed PA 재료와 표면처리된 3D printed PA 재료의 사이클로이드 치형 기어 신뢰성 실험을 하였다. 실험 결과 두 재료는 앞선 실험 결과인 ABS보

다 높은 토크환경인 3.6Nm, 12.0Nm의 토크에서도 안정적인 효율을 보여주며, 마찰열 또한 최대 약80° C의 온도를 보인 ABS보다 월등히 낮은 온도인 최대 40° C를 보여준다. 또한, 표면 처리된 PA는 ABS와 비교하였을 때 더욱 큰 차이를 보여주며, Pure 3D printed PA와 비교하였을 때 뛰어난 열저감 효과와 내마모성을 보임과 동시에 더욱 높은 구동 환경에서 더욱 신뢰성이 높음을 알 수 있다. 이를 통해 고분자 기어 사용 시 ABS 재료보다 PA 재료의 성능이 월등함을 알 수 있고, 이러한 PA에 표면화학연마와 표면 CNT 코팅 시 더욱 우수한 기어가 됨을 알 수 있다.

2. 기어 신뢰성 평가 비교 분석 및 결론

본 항에서는 이전 실험을 통한 3D 프린팅을 통한 표면 치형 설계와 표면처리에 따른 고분자 기어의 신뢰성 입증을 위해 동일한 재료의 일반적인 생산방법인 절삭가공으로 제작된 고분자 기어(인벌류트 치형 압력각 $\alpha : 20.0^\circ$)와 비교분석하였다.(Fig. 43) 비교분석을 위한 변수로는 기어의 구동 효율과 마찰열 발생 정도 및 마모량을 비교분석하였으며, 세 가지의 토크 환경에 따른 각각 특성을 비교분석하였다.



Figure. 43 PA12 polymer gear machining involute gear (left), CNT coated 3D printed cycloid polymer gear (right)

가. 1.2Nm 토크 구동환경

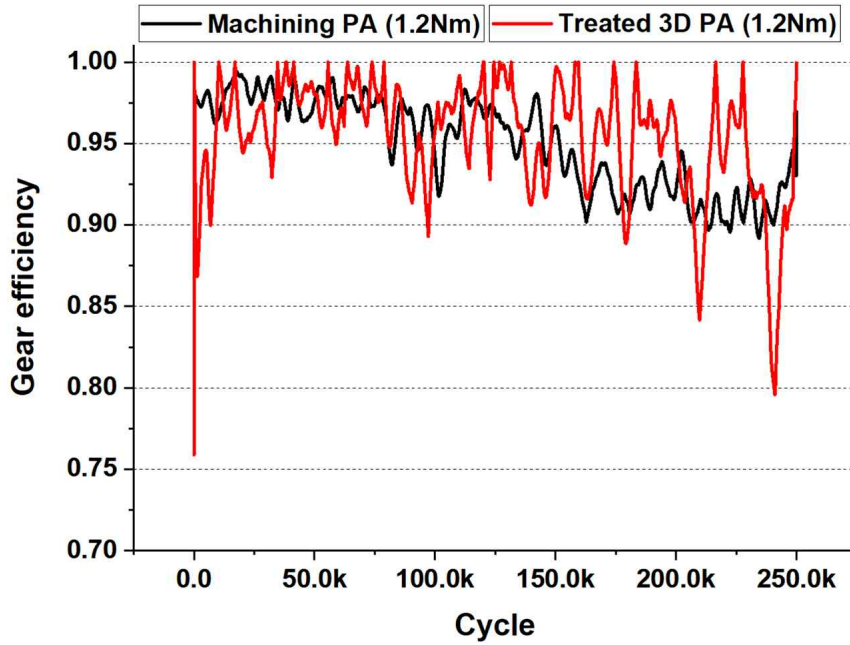


Figure. 44 Variations in the Gear torque(1.2Nm) efficiency of machining PA gear , Surface treatment 3D printed PA gear

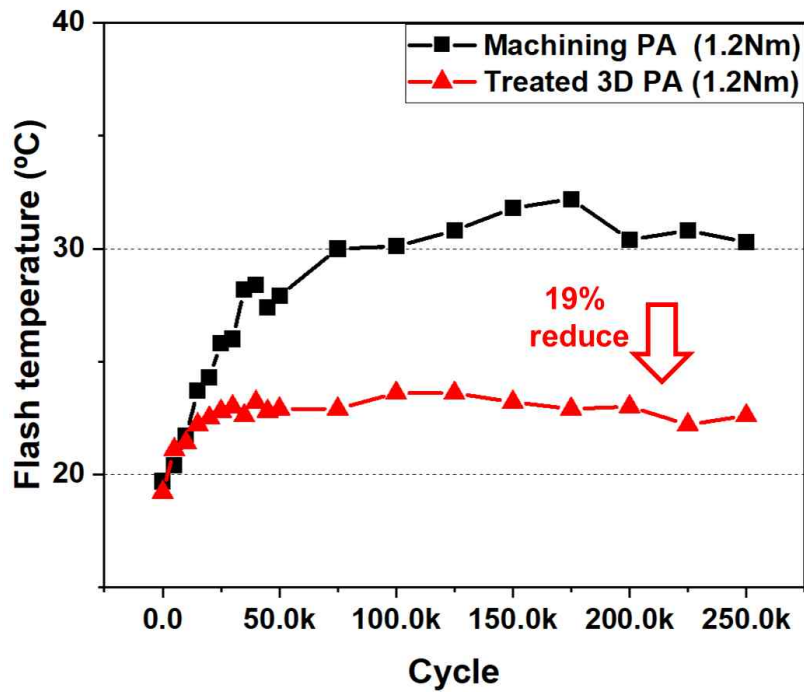


Figure. 45 Variations in the Gear Flash temperature of machining PA gear, Surface treatment 3D printed PA gear in torque(1.2Nm) environment

Fig. 44와 Fig. 45는 1.2Nm 토크의 기어 구동 환경에서 일반적인 생산공정 중 하나인 절삭가공으로 제작한 PA기어와 3D 프린팅을 통해 치형 설계와 표면처리를 한 PA의 기어의 신뢰성 실험 결과 효율 변화 그래프와 마찰열 변화 그래프이다. 실험 결과, 각 기어의 효율은 각각 95%로 동일한 효율을 보인다. 그러나 3D printing PA 기어는 효율의 변동이 절삭 PA보다 정도가 심함을 알 수 있는데, 이는 3D printing에 의한 거친 표면과 표면 CNT 코팅층의 부분 이탈에 의한 마찰계수의 변화가 원인이다. 하지만 이러한 변동은 전체적인 동력 전달 효율에 큰 지장을 주지 않으며, 오히려 실험이 진행될수록 효율의 측면은 3D 프린팅 PA가 높은 효율을 보인다.

기어 구동 간 발생하는 마찰열은 평균 약 5° C 정도의 차이를 보이며 3D 프린팅 PA의 마찰열이 절삭가공 PA보다 약 19% 낮은 마찰열을 보인다. 이러한 결과는 절삭가공 PA의 인벌류트 치형에 의한 Pitch point에서의 높은 마찰에 의한 발열과 표면에 CNT가 증착된 사이클로이드 치형의 3D 프린팅 PA의 마찰열 저감효과에 의한 마찰열의 차이에 의한 것으로 예상된다.

나. 3.6Nm 토크 구동환경

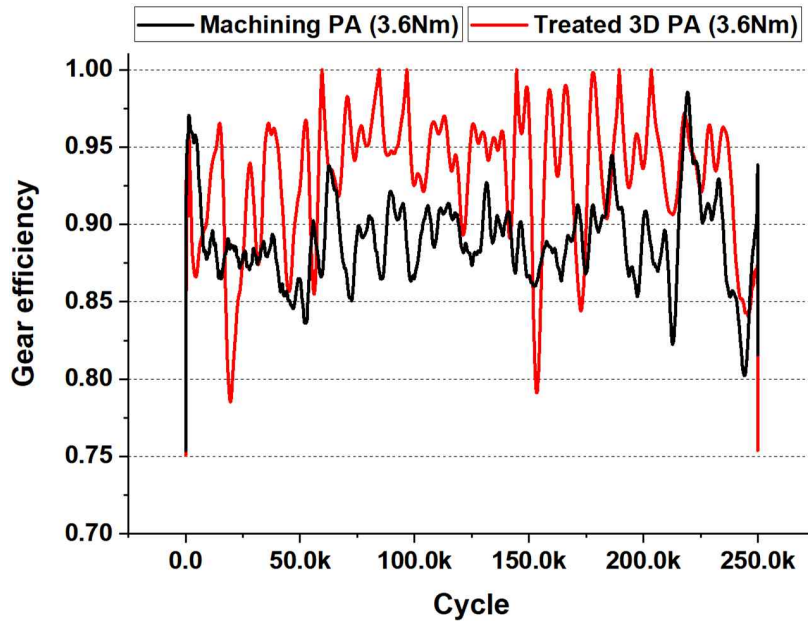


Figure. 46 Variations in the Gear torque(3.6Nm) efficiency of machining PA gear, Surface treatment 3D printed PA gear

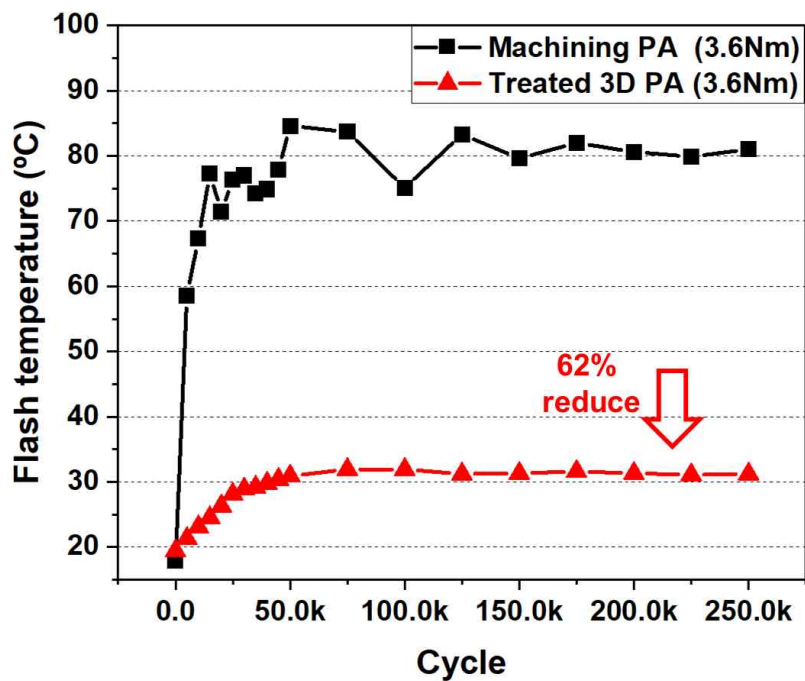


Figure. 47 Variations in the Gear Flash temperature of machining PA gear, Surface treatment 3D printed PA gear in torque(3.6Nm) environment

Fig. 46와 Fig. 47은 3.6Nm 토크의 기어 구동 환경에서 절삭가공 PA와 Surface treated 3D printing PA의 기어 신뢰성 실험 효율 변화 그래프와 온도 변화 그래프이다. 각 기어의 평균 효율은 각각 89%와 93%의 효율값을 보이며, 1.2Nm의 토크와 비교하였을 때 각각의 효율은 감소하였지만 보다 높은 토크에서 3D 프린팅 PA의 효율값이 절삭가공보다 더 높은 효율을 보임을 알 수 있다. 그리고 각 기어의 효율 변화는 1.2 Nm의 효율 변화 그래프와 동일하게 3D 프린팅 PA의 변동폭이 절삭가공 PA보다 더 크나, 이러한 변동 역시 1.2 Nm 토크 환경과 유사하게 전체적인 효율의 변화는 보이지 않는다.

각 기어의 온도 변화는 1.2Nm토크 환경과 다른 양상을 보이는데, 1.2Nm의 구동 환경에서의 기어 표면 마찰열 평균값은 27.78° C를 보이는 반면 3.6Nm의 구동 환경에서는 약 2.7배 상승한 76.93° C의 표면 온도를 보인다. 이러한 현상은 인볼류트 기어의 치형에 의한 것으로, Pitch point에서 높은 마찰과 하중에 의한 것으로 예상할 수 있다. 이러한 양상과 반대로, Surface treated 3D프린팅 PA는 사이클로이드 치형에 의해 보다 낮은 마찰열을 보일 뿐만 아니라, 표면 CNT 코팅에 의해 열 감소 효과가 증대된 탓에 절삭 가공 PA보다 평균 온도가 약 63%가량 낮은 수치를 보이며 이러한 감소는 1.2Nm 구동 환경의 19%보다 3배 이상 높은 수치를 보인다. 이러한 실험 결과는 고하중의 구동에서는 3D 프린팅 PA가 더욱 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

다. 12.0Nm 토크 구동환경

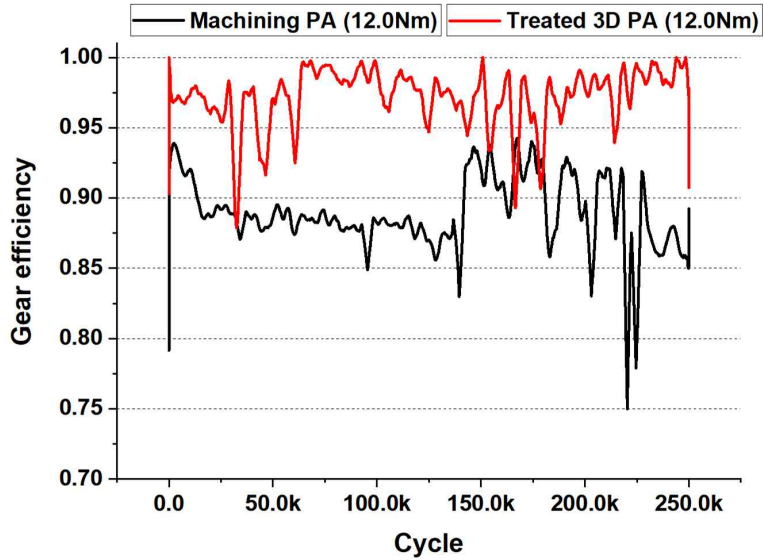


Figure. 48 Variations in the Gear torque(12.0Nm) efficiency of machining PA gear, Surface treatment 3D printed PA gear

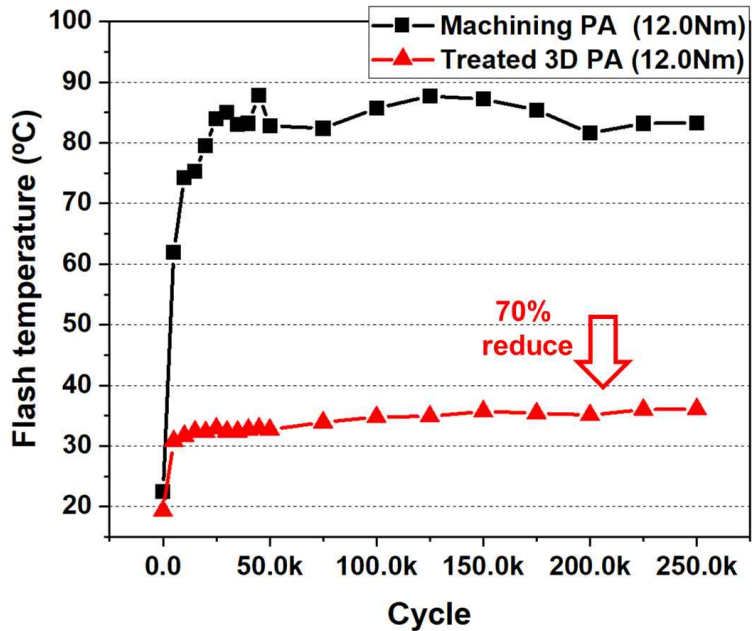


Figure. 49 Variations in the Gear Flash temperature of machining PA gear, Surface treatment 3D printed PA gear in torque(12.0Nm) environment

Fig. 48과 Fig. 49는 12.0Nm 토크의 기어 구동 환경에서 절삭가공 PA와 Surface treated 3D printing PA의 기어 신뢰성 실험 효율 변화 그래프와 온도 변화 그래프이

다. 각 기어의 평균 효율은 각각 89%와 97%의 효율값을 보이며, 다른 토크 구동 환경과 비교하였을 때 가장 큰 효율값 차이를 보인다. 또한, 이전 실험과 반대로, 높은 구동환경에서는 3D 프린팅 PA의 효율 변동이 절삭가공 PA보다 더 적은 양상을 보여 하중이 올라갈수록 3D 프린팅 PA의 신뢰성이 증가하는 것으로 예상된다.

두 기어의 온도 변화 그래프 또한 이전 실험과 유사한 양상을 보이거나 그 차이가 더 심해짐을 알 수 있다. Surface treated 3D 프린팅 기어와 절삭가공 PA의 평균 온도 값의 차이는 3.6Nm 구동 환경인 63%와 비교하였을 때 70%가량 평균 온도 값의 차이를 보였으며, 절삭가공 PA의 최대 온도는 물이 끓기 시작하는 100° C에 육박하였다. 이러한 결과는 이전 실험과 동일하게 절삭가공의 치형이 원인이며, 높은 구동 환경에서 이러한 양상이 더욱 심해짐을 알 수 있다. 반면 3D 프린팅 PA는 구동 환경에 영향을 받긴 하지만 절삭가공 PA에 비해 그 정도가 매우 경미하며, 온도 변화 측면에서 또한 효율값과 동일하게 높은 구동 환경에서는 Surface treated 3D printing PA 기어가 더욱 신뢰성이 있음을 알 수 있다.

라. 기어 신뢰성 평가 결론 I

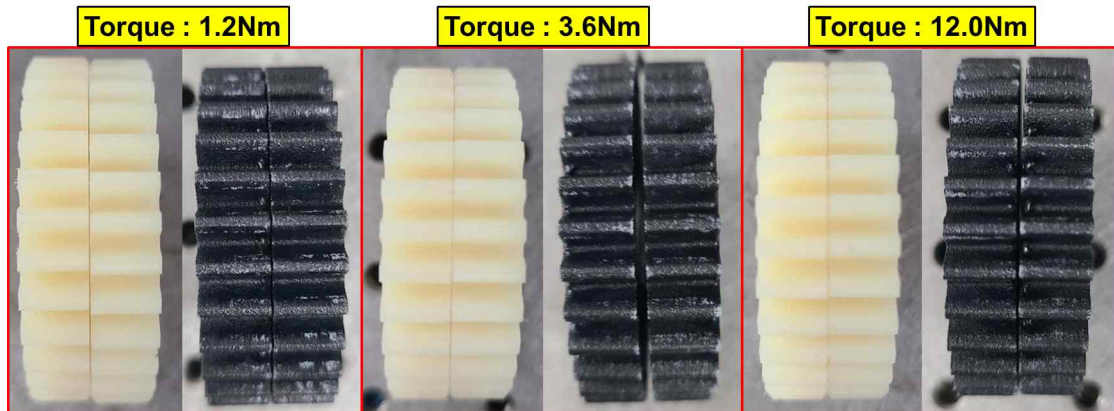


Figure. 50 Gear teeth surface images of after experiment at different torque environment

Table 8. Wear volume & rate values of machining PA & Surface treated 3D printed PA

Specimen	(CNT : 1.71g/cm ³) [62]	Wear volume (mm ³)	Wear rate (mm/rev)
	(PA {non 3DP} : 1.2g/cm ³) [63]		
Machining PA	Driver	8.77×10^{-7}	4.87×10^{-15}
1.2Nm	Driven	2.63×10^{-6}	1.46×10^{-14}
Machining PA	Driver	7.02×10^{-6}	3.9×10^{-14}
3.6Nm	Driven	9.65×10^{-6}	5.36×10^{-14}
Machining PA	Driver	8.77×10^{-6}	4.87×10^{-14}
12.0Nm	Driven	1.05×10^{-5}	5.83×10^{-14}
Treated PA	Driver	2.14×10^{-6}	1.19×10^{-14}
1.2Nm	Driven	-	-
Treated PA	Driver	1.71×10^{-6}	9.5×10^{-15}
3.6Nm	Driven	1.71×10^{-6}	9.5×10^{-15}
Treated PA	Driver	2.29×10^{-6}	1.27×10^{-14}
12.0Nm	Driven	1.71×10^{-6}	9.5×10^{-15}

Fig. 50과 Table. 8은 기어 신뢰성 실험 후 각 기어의 치아 표면 이미지와 마모량 및 마모율 데이터 표이다. 각 기어는 육안상으로 치아 마모는 보이지 않으나, 3D 프린팅 PA 치아에서는 마찰에 의해 코팅이 일부 이탈된 양상을 보인다. 그러나 Table.8 마

모량 데이터 표에 의하면, 1.2Nm의 경하중 조건을 제외하였을 때 절삭가공 PA의 마모량이 3D 프린팅 PA보다 더욱 많은 마모가 발생했음을 알 수 있다. 특히, 고하중 조건인 12.0Nm의 구동 환경에서는 최소 4배 ~ 최대 10배의 마모량의 차이를 보인다. 육안상으로 확인된 마모는 Cycloid teeth Surface treated 3D printing PA가 더욱 크나 실제 마모는 절삭가공 PA의 마모가 더욱 심하고, 이를 통해 마모의 측면에서 기어 신뢰성 평가 분석 결과 절삭가공 PA보다 Cycloid teeth Surface treated 3D printing PA가 더욱 우수하며 고하중 조건에서 더욱 신뢰성이 있음을 알 수 있다.

마. 기어 신뢰성 평가 결론 II

본 항에서는 3D 프린팅을 통한 표면 치형 설계와 표면처리에 따른 고분자 기어의 신뢰성 입증을 위해 동일한 재료의 일반적인 생산방법인 절삭가공으로 제작된 고분자 기어(인벌류트 치형, 압력각 $\alpha : 20.0^\circ$)와 비교분석하였다. 기어 신뢰성 평가 분석 결과, 비교적 경하중에서는 Involute 치형의 절삭가공 PA와 Cycloid Surface treated 3D printed PA의 효율과 마찰열에 변화는 두드러지지 않았다. 그러나 토크 하중이 높아지는 고하중 조건에서는 이러한 변화가 두드러지기 시작하였는데, 효율의 변화는 큰 차이점을 보이지 않으나 3D프린팅 PA의 경우 일정한 효율값을 보이는 반면 절삭가공 PA의 효율값은 고하중일수록 효율값이 떨어짐을 보였다. 두 기어간 가장 큰 차이를 보인 항목은 표면 마찰열의 구배 값의 변화이다. 표면 마찰열은 효율과 마찬가지로 경하중 조건에서는 두 기어 모두 큰 차이를 보이지 않았으나 고하중 조건일수록 3D 프린팅 PA는 온도 상승률이 48%로 매우 낮았으나 절삭가공 PA는 최대 294% 온도가 상승하는 양상을 보였다. 이를 통해 고분자 기어 이용 시 절삭가공보다 Cycloid 치형 설계와 동시에 표면처리가 이루어진 3D 프린팅 PA의 신뢰성이 더욱 우수하며 고하중 조건에서 더욱 큰 차이를 보임을 알 수 있다.

제 5 장 결론

제 1 절 연구 결론

본 연구에서는 고분자 기어의 내구성 및 신뢰성을 증대시키기 위해 기어 치형 설계와 표면화학연마, 표면 코팅이 수행되었다. 고분자 기어의 제작은 복잡한 형상의 도안을 쉽게 제작할 수 있는 3D 프린팅을 이용하여 제작하였으며, 치형 설계는 일반적으로 산업에서 쓰이는 인벌류트 기어 두 종류와 특수한 경우에만 사용이 되는 사이클로이드 기어 한 종류로 선정하였다. 표면화학연마는 형상에 구애를 받지 않는 아세톤 증기를 이용한 화학연마를 이용하여 표면을 연마하였으며, 표면 코팅은 강한 기계적 특성과 높은 열전도율을 가진 CNT 재료를 딥코팅하여 표면에 증착시켰다.

(1) 3D 프린팅을 이용한 ABS 재료의 인벌류트 기어 두 종류 (압력각 α : 20.0° , 14.5°)와 사이클로이드 기어 한종류의 기어 신뢰성 평가를 수행하였다. 치형에 따른 기어 신뢰성 평가 결과, 1.2Nm의 토크 구동환경에서 효율값의 차이는 보이지 않았으나 마찰열에 의한 치아 발열에 의해 인벌류트 기어 압력각 14.5° 의 기어는 실험 중 치아 파단이 일어났으며, 압력각 20.0° 기어 또한 일부 치아가 파손되었다. 반면 사이클로이드 기어는 두 기어보다 마찰열이 최소 17% ~ 최대 32% 감소된 값을 보이며 마모의 정도가 0에 수렴하였다.

(2) 세 기어 치형 중 가장 우수한 특성을 보인 ABS 재료의 사이클로이드 기어의 고하중에서의 기어 신뢰성 평가 결과, 1.2Nm이상의 토크 환경에서는 효율이 다소 감소하였다. 그리고 2.4Nm의 토크 환경에서는 마찰열이 22%가량 상승하여 치아의 일부가 파손되었으며 3.6Nm 토크 환경에서는 마찰열이 270% 상승하여 50,000 Cycle 시점에서 모든 치아가 파손되어, ABS 재료의 기어는 고하중 조건에서 신뢰성이 감소됨을 보였다.

(3) 기어 치형에 따른 효율 변화 및 마찰열의 변화를 해석하기 위해 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 기어의 접촉 압력은 AGMA standard equation을 통해 산출하여 해석의 정확도를 판별하였으며, 인벌류트 기어 두 종류와 사이클로이드 기어 한 종류의 기어 접촉 압력 및 내부 응력 선도를 해석하였다. 유한요소해석 결과, 사이클로이드 기어는 Pitch point에서 높은 접촉 압을 보였으나 전체적으로 낮은 접촉 압

력을 보였으며, 인벌류트 기어의 경우 상시 높은 접촉 압력 값을 보였다. 이러한 결과는 기어의 물림률에 의한 것으로, 물림률이 높을수록 평균 접촉 압력이 증가함을 알 수 있다. 또한, 기어의 내부 응력 선도 분석 결과 사이클로이드 기어의 내부 응력은 치아 뿌리에서 낮은 응력을 보이는 반면, 인벌류트 기어 두 종류 모두 치아 뿌리까지 높은 응력이 발생함을 보였다. 이러한 결과 통해 사이클로이드 기어는 인벌류트 기어보다 내구성이 높고 발열이 적었 것으로 예측된다.

(4) 고하중 조건에서 구동이 가능한 3D printing 고분자 기어 제작을 위해 ABS, PE, PP, PA12의 표면 트라이볼로지 특성 분석을 하였다. 그리고 각 재료의 표면 특성 개선을 위해 표면 화학연마와 표면 CNT 딥코팅 처리가 수행되었다. 표면 마찰특성 실험결과, PA12 재료의 트라이볼로지 특성이 가장 우수하였으며, 표면화학연마와 표면 CNT 딥코팅이 혼합된 표면처리 시 이러한 특성이 더욱 개선되었다.

(5) PA12 재료의 표면처리에 따른 기어 신뢰성 평가를 위해 순수한 3D printed PA12 cycloid gear teeth와 Surface treated 3D printed PA12 cycloid gear teeth를 제작하여 기어 신뢰성 분석을 수행하였다. 기어 신뢰성 실험 결과, 표면처리가 된 PA12와 순수 PA12의 평균 효율값은 비슷한 결과값을 보였으나, 기계적 특성과 열전도성이 높은 CNT가 증착된 PA12의 치아 표면 발열량이 순수 PA12와 대비하여 약 10%가량 감소하였다. 또한, PA12 고분자 기어는 3.6Nm의 토크 구동 환경에서도 90% 이상의 높은 효율값을 보였으며 12.0Nm의 가혹한 토크 환경에서 또한 최대 35° C의 낮은 발열량을 보이며 높은 효율을 보였다. 이를 통해 Cycloid 치형의 3D printed PA12 기어는 ABS 재료와 달리 고하중 조건에서도 높은 신뢰성을 보임을 알 수 있고, 이러한 기어에 표면화학연마와 표면 CNT 코팅 처리 시 이러한 성능이 더욱 개선되는 결과를 보였다.

(6) 표면 처리된 3D printed PA12의 신뢰성 평가를 위해 일반적인 고분자 기어 생산 방법인 절삭가공을 이용한 인벌류트 치형의 PA12 기어와 기어 신뢰성 비교 분석을 하였다. 절삭가공 PA12와 3D 프린팅 PA12 기어 신뢰성 실험 결과, 저하중에서의 효율의 차이는 나타나지 않았으나 고하중일수록 효율과 마찰열 발생의 정도의 차이가 남을 보였다. 절삭가공 PA12의 경우 고하중에서 치아에 발생하는 마찰열이 최대 90° C 이상 증가하여 3D 프린팅 PA12보다 2.4배 이상 높은 발열을 보였으며 효율 또한 고하중 조건에서 감소함을 보였다. 이를 통해 일반적인 고분자 생산 방법으로 제작된 PA12 기어보다 본 연구에서 제작한 Surface treated 3D printed PA12 cycloid gear가 더욱 우수한 신뢰성을 가진다는 결과를 얻었다.

본 연구는 고분자 기어의 고하중 조건에서 신뢰성 개선을 위해 치형 설계와 표면처리를 수행하였으며, 실험 결과 기어의 치형은 인볼류트기어와 사이클로이드 기어 중 사이클로이드 치형이 가장 우수하였으며, ABS, PE, PP, PA12 네 가지 종류의 고분자 중 PA12 재료의 트라이볼로지 특성이 가장 우수하였으며 표면처리 시 트라이볼로지 특성 및 기어 신뢰성 특성 모두 개선되며 트라이볼로지 특성이 우수할 경우 기어 신뢰성 또한 우수하다는 결론이 도출 되었다.

제 2 절 향후 과제

본 연구에서의 실험 결과에 따른 향후 과제는 다음과 같다.

(1) 기어의 제작 방식을 3D 프린팅에 국한되지 않고 다양화할 필요가 있다. 일반적으로 3D 프린팅을 이용한 제품 제작시, 같은 재료임에도 3D 프린팅을 통해 제작된 재료의 기계적 특성은 순수 재료보다 약해지는 단점이 있으며 본 연구에서의 기어 또한 그러하다. 이에 따라 현재 3D 프린팅으로 제작된 제품은 시제품의 형태로 많이 애용된다. 따라서 후속 연구에서는 만들고자 하는 기어의 모델을 제작하여 사출성형을 통해 고분자 기어를 제작한다면, 본 연구에서의 기어보다 더욱 신뢰성이 높을 것으로 사료되며, 더욱 다양한 재료와 치형의 고분자 기어를 제작 및 평가할 수 있다.

(2) 표면 코팅의 내마모성 향상을 위한 추가 연구가 필요하다. 습식 표면 코팅은 목표 시료와 코팅액의 접촉도를 높여 코팅의 내마모성을 향상시키기 위해 주로 코팅액에 코팅의 접착력을 향상 시켜주는 Binder를 별도로 추가하여 표면에 도포한다. 본 연구에 사용된 고분자 재료는 별도의 Binder 없이 높은 접착력과 코팅의 균일성을 보였으나 후속 연구에서 코팅액에 Binder 추가 시 더욱 신뢰성있는 코팅이 만들어 질 것으로 예상된다.

(3) 더욱 높은 토크 환경에서의 구동의 필요성이 있다. 기존 금속 기어 이론에서, 사이클로이드 기어는 인볼류트 기어보다 추력이 약하다는 이론이 존재한다. 그러나 본 연구에서의 사이클로이드 기어 치형은 1.2Nm 에서부터 12.0Nm까지의 토크 환경에서 높은 효율과 추력을 보여 기존 이론에 반하는 특성을 보였으며 이를 증명하기 위해서는 더욱 높은 토크환경에서의 각 치형에 따른 추력과 효율을 측정할 필요성이 있다. 또한 PA 재료의 토크에 의한 파손 한계점을 명시하기 위한 추가실험의 필요성이 존재한다.

(4) 실제 산업의 적용을 위한 기어박스의 제작이 필요하다. 고분자 기어는 금속 기어와 비교하였을 때 중량과 NVH, 윤활 측면에서 장점이 존재한다. 이를 실험적으로 증명하기 위해 동일한 기어박스를 제작하여 장비를 가동하였을 때 효율과 소음 및 진동, 그리고 무윤활 상태에서의 금속 기어와 고분자 기어의 차이를 보일 시 고분자 기어의 신뢰성이 상승할 것으로 보이며, 장난감 자동차와 같은 경 하중에서부터 중형 발전기용 기어박스과 같은 고 하중까지를 예시로 들 수 있다.

REFERENCES

- [1] F. Owuna, Stability of vegetable based oils used in the formulation of ecofriendly lubricants—a review, *Egyptian Journal of Petroleum*, (2020).
- [2] Z.-K. Qiu, P.-Z. Zhang, D.-B. Wei, X.-F. Wei, X.-H. Chen, A study on tribological behavior of double-glow plasma surface alloying W-Mo coating on gear steel, *Surface and Coatings Technology*, 278 (2015) 92-98.
- [3] P.K. Singh, A.K. Singh, An investigation on the thermal and wear behavior of polymer based spur gears, *Tribology International*, 118 (2018) 264-272.
- [4] G. Hlebanja, M. Hriberšek, M. Erjavec, S. Kulovec, Experimental determination of plastic gear durability, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2019, pp. 012066.
- [5] L. Novakova-Marcincinova, J. Novak-Marcincin, Applications of rapid prototyping fused deposition modeling materials, in: *Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium*, 2012, pp. 0057-0060.
- [6] A. Kumar, C. Gandhi, Y. Zhou, R. Kumar, J. Xiang, Latest developments in gear defect diagnosis and prognosis: A review, *Measurement*, 158 (2020) 107735.
- [7] A. Waldschik, S. Büttgenbach, Micro gear pump with internal electromagnetic drive, *Microsystem technologies*, 16 (2010) 1581-1587.
- [8] D. Juzovitski, Interactive Robotic Vacuum Cleaner, Diploma work, (2011).
- [9] T. Mushiri, T.J. Mugova, C. Mbohwa, Design and fabrication of a pedal powered washing machine, in: *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bogota, Colombia*, 2017, pp. 355-366.
- [10] D. Zorko, I. Demšar, J. Tavčar, An investigation on the potential of bio-based polymers for use in polymer gear transmissions, *Polymer Testing*, 93 (2021) 106994.
- [11] K. Mao, A new approach for polymer composite gear design, *Wear*, 262 (2007) 432-441.
- [12] H. Düzcükoğlu, R. Yakut, E. Uysal, The use of cooling holes to decrease the amount of thermal damage on a plastic gear tooth, *Journal of failure analysis and prevention*, 10 (2010) 545-555.

- [13] M. Kalin, A. Kupec, The dominant effect of temperature on the fatigue behaviour of polymer gears, *Wear*, 376 (2017) 1339-1346.
- [14] A.K. Singh, S. Yadav, P.K. Singh, A Comparative Study for Transmission Efficiency of ABS, POM, and HDPE Spur Gears, in: *Advances in Engineering Design*, Springer, 2019, pp. 269-277.
- [15] Z. Lu, H. Liu, P. Wei, C. Zhu, D. Xin, Y. Shen, The effect of injection molding lun ker defect on the durability performance of polymer gears, *International Journal of Mechanical Sciences*, 180 (2020) 105665.
- [16] D. Koffi, A. Bravo, L. Toubal, F. Erchiqui, Optimized use of cooling holes to decrease the amount of thermal damage on a plastic gear tooth, *Advances in Mechanical Engineering*, 8 (2016) 1687814016638824.
- [17] S.S. Kumar, B.S. Babu, N. Prabhakar, C.N. Chakravarthy, Thermal stress reduction on polyamide gear by finite element method, *Materials Today: Proceedings*, 46 (2021) 819-825.
- [18] H. İmrek, Performance improvement method for Nylon 6 spur gears, *Tribology International*, 42 (2009) 503-510.
- [19] A.K. Singh, Siddhartha, Development and investigation on transmission efficiency of functionally graded material-based polybutylene terephthalate spur gears, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 234 (2020) 473-489.
- [20] K. Mao, D. Greenwood, R. Ramakrishnan, V. Goodship, C. Shrouti, D. Chetwynd, P. Langlois+, The wear resistance improvement of fibre reinforced polymer composite gears, *Wear*, 426 (2019) 1033-1039.
- [21] K. Dearn, T. Hoskins, D. Petrov, S. Reynolds, R. Banks, Applications of dry film lubricants for polymer gears, *Wear*, 298 (2013) 99-108.
- [22] A.J. Mertens, S. Senthilvelan, Surface durability of injection-moulded carbon nanotube-polypropylene spur gears, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 232 (2018) 909-921.
- [23] S. Kirupasankar, C. Gurunathan, R. Gnanamoorthy, Transmission efficiency of polyamide nanocomposite spur gears, *Materials & Design*, 39 (2012) 338-343.
- [24] J. Tavčar, B. Černe, J. Duhovnik, D. Zorko, A multicriteria function for polymer gear

- design optimization, *Journal of Computational Design and Engineering*, 8 (2021) 581-599.
- [25] V. Glukchov, L. Varepo, I. Nagornova, F. Doronin, Strength and geometry parameters accuracy improvement of 3D-printed polymer gears, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2019, pp. 032019.
- [26] S.F. Kabir, K. Mathur, A.-F.M. Seyam, A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties, *Composite Structures*, 232 (2020) 111476.
- [27] Y. Zhang, K. Mao, S. Leigh, A. Shah, Z. Chao, G. Ma, A parametric study of 3D printed polymer gears, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107 (2020) 4481-4492.
- [28] R. Dunnigan, J. Clemens, M. Cavalli, N. Kaabouch, S. Gupta, Beneficial usage of recycled polymer particulates for designing novel 3D printed composites, *Progress in Additive Manufacturing*, 3 (2018) 33-38.
- [29] Y. Zhang, C. Pursell, K. Mao, S. Leigh, A physical investigation of wear and thermal characteristics of 3D printed nylon spur gears, *Tribology International*, 141 (2020) 105953.
- [30] T. Kotkar, P. Masure, P. Modake, C. Lad, B. Patil, Modelling and testing of spur gear made of different 3D printed materials, *Int JS Res Sci Eng*, 4 (2018) 1389-1394.
- [31] M. Wakuda, Y. Yamauchi, S. Kanzaki, Y. Yasuda, Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact, *Wear*, 254 (2003) 356-363.
- [32] S. Tarasov, A. Kolubaev, S. Belyaev, M. Lerner, F. Tepper, Study of friction reduction by nanocopper additives to motor oil, *Wear*, 252 (2002) 63-69.
- [33] Y. Hu, Y. Wang, C. Wang, Y. Ye, H. Zhao, J. Li, X. Lu, C. Mao, S. Chen, J. Mao, One-pot pyrolysis preparation of carbon dots as eco-friendly nanoadditives of water-based lubricants, *Carbon*, 152 (2019) 511-520.
- [34] H. Hertz, On the contact of solids—on the contact of rigid elastic solids and on hardness, *Miscellaneous papers*, (1896) 146-183.
- [35] J. Achard, Contact and rubbing of flat surface, *Journal of Applied Physics*, 24 (1953) 981-988.

- [36] P.A. Radi, L.V. Santos, V.J. Trava-Airoldi, TRIBOLOGICAL TOOLS FOR LUBRICANTS DEVELOPMENT FOR SPACE APPLICATIONS.
- [37] S. Dalbehera, Effect of Cenosphere on the Mechanical and Tribological Properties of Natural Fiber Reinforced Hybrid Composite, in, 2016.
- [38] R.K. Upadhyay, L.A. Kumaraswamidhas, Bearing failure issues and corrective measures through surface engineering, in: Handbook of Materials Failure Analysis, Elsevier, 2018, pp. 209-233.
- [39] R.W. Snidle, H.P. Evans, M. Alanou, Gearing tribology, in: Tribology Series, Elsevier, 2003, pp. 575-588.
- [40] S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy, Efficiency of injection-moulded polymer composite spur gears, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 223 (2009) 925-928.
- [41] A.L. Kapelevich, T.M. McNamara, Direct Gear Design® for Automotive Applications, in, SAE Technical Paper, 2005.
- [42] R. Yakut, H. Düzcükoğlu, M. Demirci, The load capacity of PC/ABS spur gears and investigation of gear damage, Archives of Materials Science, 42 (2009) 42.
- [43] S.N.H. Mazlan, M.R. Alkahari, F.R. Ramli, N.A. Maidin, M.N. Sudin, A.R. Zolkaply, Surface finish and mechanical properties of FDM part after blow cold vapor treatment, Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 48 (2018) 148-155.
- [44] Y. Jin, Y. Wan, Z. Liu, Surface polish of PLA parts in FDM using dichloromethane vapour, in: MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2017, pp. 05001.
- [45] Y. Chai, R.W. Li, D.M. Perriman, S. Chen, Q.-H. Qin, P.N. Smith, Laser polishing of thermoplastics fabricated using fused deposition modelling, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 96 (2018).
- [46] S. Grigoriev, M. Volosova, S. Fyodorov, M. Lyakhovetskiy, A. Seleznev, DLC-coating application to improve the durability of ceramic tools, Journal of Materials Engineering and Performance, 28 (2019) 4415-4426.
- [47] S. Wei, W. Kang, J. Davidson, J. Huang, Supercapacitive behavior of CVD carbon nanotubes grown on Ti coated Si wafer, Diamond and related materials, 17 (2008) 906-911.

- [48] A. Todd, R. Dunlap, J. Dahn, Mössbauer effect studies of sputter-deposited tin-cobalt and tin-cobalt-carbon alloys, *Journal of alloys and compounds*, 443 (2007) 114-120.
- [49] C. Qi, A Magic Cube Approach for Crashworthiness and Blast Protection Designs of Structural and Material Systems, in, 2008.
- [50] 3D solution, <http://www.3dsolution.net/html/> (Accessed 22 October 2021)
- [51] A.G.M. Association, AGMA 2101-C95: Fundamental rating factors and calculation methods for involute spur and helical gears, in, Metric version), American Gear Manufacturers Association, Alexandria, VA, 1995.
- [52] 3D mon, <https://www.3dmon.co.kr/> (Accessed 22 October 2021)
- [53] A. Garg, A. Bhattacharya, A. Batish, Effect of cold vapour treatment on geometric accuracy of fused deposition modelling parts, *Rapid Prototyping Journal*, (2017).
- [54] H. Takise, T. Shintani, M. Suzuki, T. Takahashi, S. Aoyagi, Thin film formation of PEDOT conductive polymer and PVDF piezoelectric polymer by dip-coating method assuming application to flexible power generation element, *Electronics and Communications in Japan*, 103 (2020) 46-52.
- [55] W. Nareejun, C. Ponchio, Novel photoelectrocatalytic/solar cell improvement for organic dye degradation based on simple dip coating WO₃/BiVO₄ photoanode electrode, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 212 (2020) 110556.
- [56] C.J. Brinker, Dip coating, in: *Chemical Solution Deposition of Functional Oxide Thin Films*, Springer, 2013, pp. 233-261.
- [57] X. Tang, X. Yan, Dip-coating for fibrous materials: mechanism, methods and applications, *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 81 (2017) 378-404.
- [58] R. Baptista, D. Gadelha, M. Bandeira, D. Arteiro, M. Delgado, A. Ferro, M. Guedes, Characterization of titanium-hydroxyapatite biocomposites processed by dip coating, *Bulletin of Materials Science*, 39 (2016) 263-272.
- [59] J.J. Cervera-Moreno, A. Martinez-Borquez, P. Sotta, M. Laurati, AFM investigation of the influence of ethanol absorption on the surface structure and elasticity of polyamides, *SN Applied Sciences*, 1 (2019) 1-9.
- [60] D. Briggs, D.G. Rance, B.J. Briscoe, *Surface properties*, Pergamon Press plc, *Comprehensive Polymer Science: the Synthesis, Characterization, Reactions & Applications of Polymers.*, 2 (1989) 707-732.

- [61] D.E. Packham, Surface energy, surface topography and adhesion, International journal of adhesion and adhesives, 23 (2003) 437-448.
- [62] WONIL corporation, http://www.wonilkorea.com/bbs/board.php?bo_table=0303&wr_id=6
(Accessed 11 November 2021)
- [63] ArtRyx, https://www.artryx.com/shop/goods/goods_view.php?goodsno=145&category=002001(Accessed 14 November 2021)

감사의 글

누구보다 길고 탈도 많았던 2년간의 석사학위 기간이 끝나고 학위논문을 작성하게 되었습니다. 저 혼자 힘으로는 힘든 학위 기간을 무사히 마치지 못할 것이라 생각이 들 만큼 저에게 도움을 주신 분들이 많았습니다. 이 자리를 빌어 그동안 도움을 주신 분들께 감사의 말을 올립니다. 저의 지도교수님이신 김창래 교수님이 가장 먼저 생각이 납니다. 첫 제자라는 명목하에 교수님께서 대학원 선배와 같은 때로는 인생 선배 포지션으로 저를 이 자리까지 지도해주셔서 많은 것들을 배워 이렇게 졸업을 앞두고 되었습니다. 교수님과 함께 한 모든 일들이 추억이자 교육이었습니다. 무수히 많은 비가 내리던 날 저희를 위해 용산에서 연세대까지, 그리고 힘든 일이 있음에도 가르침을 주려 하셨던 교수님의 모습이 마치 어제 경험했던 일처럼 생생합니다. 평생이 지나도 잊지 못할 추억을 주시고 교육을 주심에 감사드리며, 교수님께 배운 연구 방법과 공부법, 그리고 삶을 살아가는 법을 마음속에 담아두고 항상 명심하며 앞으로의 인생에서도 교수님의 깨우침을 상기하며 살아가겠습니다. 졸업 후에도 교수님과의 인연을 놓지 않고 자주 찾아뵙겠습니다. 저에게 많은 조언과 도움을 주신 박정수 교수님과 이정원 교수님께도 감사의 인사를 올립니다. 박정수 교수님, 처음 대학원 진학에 눈을 뜨게 해주시고, 항상 저를 기억해주시고 친근하게 먼저 말씀해주시며 조언을 아끼지 않으신 박정수 교수님, 교수님 덕분에 대학원 첫 시작과 끝을 마무리 지을 수 있다는 생각이 들어 무한한 감사의 말씀을 올립니다. 이정원 교수님, 첫 부임을 하시고 직접 실험실 정리를 하시며 저에게 음료를 사주시고 마치 형처럼 저를 대해주신 일과 학술대회 발표 때 실수를 하였던 저에게 응원과 격려를 아끼지 않았던 일이 생각이 납니다. 그리고 교수님 실험실 원생이 아님에도 저의 의견에 관심을 가져주시고 많은 도움과 조언을 주셔서 심리적인 안정이 되어 무사히 졸업을 할 수 있었다고 생각하여 무한한 감사의 인사를 드립니다.

유일한 대학원 선배 이성준에게는 감사의 말로는 다 표현을 할 수 없을 정도의 도움을 받았습니다. 성준이는 유일한 저의 대학원 선배이자 동기였으며 친구이자 믿을 수 있는 동료였습니다. 성준이가 없었다면 저는 끝없는 연구의 미궁에 빠져 허우적거릴 뿐, 미궁에서 나올 수 없었을 것이며 감사의 말을 쓰는 이 단계까지 도달하지 못하였을 것입니다. 성준이는 명석한 두뇌로 저의 연구가 벽에 부딪혔을 때 같이 고민해주고 항상 해결책을 제시해 주었으며, 인생에 힘든 일이 부딪혔을 때 사회

선배로써 조언을 해주는 등의 도움을 주었으며 같이 차를 타고 여기저기 같이 돌아다니며 저 스스로 할 수 없었던 혹은 매우 힘들었을 것으로 예상되는 모든 일들이 성준이와 함께라면 수월하게 풀려나갔습니다. 그래서 저는 성준이에게 항상 도움만 받는 입장인 것 같아 상시 미안함과 고마운 마음이 듭니다. 아직 박사과정 중에 있는 성준이가 비록 현재는 고치 상태로 웅크려있지만 언젠가는 고치를 깨고 날개를 펴 자신의 꿈을 이루는 대한민국의 인재가 될 것이라 예상하며 앞으로의 행보에 응원을 아끼지 않을 것입니다.

부족한 저를 이 자리까지 올 수 있게 도움을 준 지인들에게도 감사의 인사를 올립니다. 장비를 이용함에 있어 친절하게 알려주시고 배려해주시며 연구에 대한 조언과 정보를 아끼지 않아 주신 연세대학교 한재호 선배님과 황윤후 선배님, 시뮬레이션 해석 관련하여 벽에 부딪혔을 때 직접 몇 시간이고 저와 같이 해석을 봐주고 알려주신 이광규 형과 친구 백선호, 실질적 선배가 없던 저에게 앞으로의 행보에 대해 알려준 김현식 형과 김호 형 그리고 친구 백선호와 최준혁 형, 같은 석사과정을 밟으며 일이 있을 때 항상 먼저 연락하고 조언을 구했던 황안재와 김단아, 매일 귀찮게 연락해도 웃으며 받아주는 동생 임성훈, 마지막으로 같은 대학교 대학원에서 학위 과정을 밟은 윤원준 형, 주강민, 김지운, 양지완, 김대현, 정도인, 김호성, 김성근, 용준혁, 박영균 모두와 함께 보낸 2년의 세월이 즐겁고 값진 시간이었으며 모두가 원하는 꿈을 이루고 행복하게 살기를 간절히 염원합니다.

그리고 석사과정 동안 변함없는 우정을 보여주고 응원해준 친구들인 윤우진, 최연재, 정윤환, 정다훈, 박원준, 이대능, 서동해, 나상원, 양우석, 김경태에게 감사의 말을 전합니다.

마지막으로, 제가 하는 행동에 의의를 품지 않으시고 오롯이 저를 믿어주신 부모님과 형에게 직접 말로는 표현하지 못한 감사의 인사를 전하며 앞으로도 더욱 성장하고 멋있는 김강민이 되도록 노력하겠습니다.

제 주변에 위와 같은 사람들이 계심으로써 지금의 제가 있으며, 모든 이가 앞으로의 삶에 있어 건승하기를 바랍니다. 감사합니다.

2021 년 12 월 9 일 김 강 민