

SEM을 이용한 나일론피니언의 마멸특성 고찰

김충현[†] · 안효석* · 정태형**
(2001년 10월 12일 접수, 2002년 3월 20일 심사완료)

Investigation about the Wear Characteristics of Nylon Pinions Against Steel Gears by SEM

Choong Hyun Kim, Hyo-Sok Ahn and Tae Hyong Chong

Key Words: Wear(마멸), Nylon Gear(나일론 기어), Pitch Line Velocity(피치선속도) SEM (Scanning Electron Microscope, 주사전자현미경)

Abstract

Power-transmission Nylon pinions against steel gears for different pitch line velocities was studied with a power circulating gear test rig under unlubricated condition by SEM(Scanning Electron Microscope). The wear characteristics of Nylon pinions varied significantly with the pitch line velocity and applied load. Wear occurred most severely at the regions including pitch circle and root circle of Nylon pinions. It is confirmed that Nylon pinions are able to be used for power-transmission under limited conditions.

1. 서 론

동력전달용 나일론기어의 마멸특성은 작용하중, 피치선속도, 그리고 온도와 습도 등 운전조건과 주위환경의 변화에 따라 현저히 달라지게 된다.^(1,2)

본 연구에서는 강기어(steel gear)와 맞물려 운전되는 동력전달용 나일론피니언의 마멸특성 변화를 연구하기 위하여 피니언의 피치선속도가 각각 3m/s와 4m/s인 경우에 대한 내구성실험을 수행하였다. 이후 실험을 거친 나일론피니언의 치면을 SEM으로 관찰, 비교함으로써 운전시간 경과에 따른 나일론피니언의 마찰마멸특성을 파악하고, 이를 기존의 연구결과⁽³⁻¹⁰⁾와 비교, 분석하였다.

2. 실험연구

2.1 실험장치

본 연구에서는 Fig. 1에 보인 것과 같은 기어내구성 실험장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 이 실험장치는 두 축 사이의 중심거리가 75mm로 고정된 동력순환식 기어실험장치로서 피니언 축에는 토크와 회전수를 측정하는 토크계측기(torque detector)가 설치되어 있다.

2.2 시험기어의 제작

피니언의 재료로는 나일론, 기어는 열처리하지 않은 SM45C를 각각 사용하여 제작하였으며, 각 시편의 제원은 Table 1에, 피니언재료의 물성치는 Table 2에 각각 나타내었다.

시편 제작과정에서 발생한 불순물을 제거하기 위하여 피니언은 에틸알코올, 강기어는 아세톤에 각각 담가 초음파세척기를 이용하여 세척하고 건조기에서 40℃로 48시간 동안 건조시킨 후 곧바로 실험에 사용하였다.

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술연구원 트라이블로지연구센터

E-mail : chkim@kist.re.kr

TEL : (02) 958-5668 FAX : (02) 958-5659

* 회원, 한국과학기술연구원 트라이블로지연구센터

** 회원, 한양대학교 기계공학부

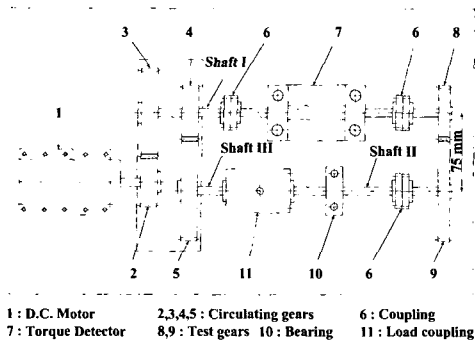


Fig. 1 Schematic view of the gear test rig

Table 1 Specification of the test gears

	Pinion	Gear
Material	Nylon	SM45C
Elastic modulus [N/mm ²]	2900	210000
Module	2	
Number of teeth	30	45
Pressure angle [deg.]	20	
Profile shift coefficient	0	
Dia. of pitch circle [mm]	60	90
Dia. of tip circle [mm]	64	94
Tooth width [mm]	5	10
Clearance coefficient	0.25	
Machining	Hobbing	
Grade	KS 6	KS 6

Table 2 Properties of the Nylon

Specific Weight	1.39
Tensile strength [MPa]	62
Hardness, Rockwell	R111~R118

Table 3 Test conditions

Applied load [N/mm]	9.8, 19.6, 29.4
Rotation speed [rpm]	955 / 1273
Pitch line velocity [m/s]	3 / 4 (for pinion)
Revolution [x 10 ⁶]	1, 3, 5, 10
Environment	Air
Temperature	Room temperature
Humidity	35 ~ 55%

2.3 마찰마멸실험

실험조건은 Table 3에 나타내었다.

2.4 마멸특성 평가

실험을 거친 나일론피니언의 치면을 SEM으로 관찰하였고 이 자료를 바탕으로 마찰마멸특성을 고찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 운전조건에 따른 나일론피니언의 치면변화

3.1.1 피치선속도가 3m/s인 경우

Fig. 2부터 Fig. 5는 작용하중이 9.8N/mm (1kgf/mm)인 경우에 대한 관찰결과로서 Fig. 2는 총회전수가 1x10⁶ 회전일 때 치면변화를 보인 것이다.

접촉치면 전체를 나타낸 Fig. 2(a)를 보면 사진 중앙의 피치선상을 따라서 치꼭을 가로지르는 밝은 띠를 볼 수 있는데 이것은 구름접촉(rolling contact)이 이루어지는 피치선부분에 생성되는 대표적인 마멸흔적이다. 즉, 반복하중에 의한 변형으로 고열이 발생하면서⁽¹⁰⁾ 나일론재료가 용융되어 기계적 특성이 약해진 후⁽¹¹⁾ 반복하중을 받아 치면으로부터 나일론재료가 이탈되면서 작은 구멍(pit)을 남기는 피팅(pitting) 현상이다.

Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)에 보인 피치선상을 350배로 확대한 것으로서 고온에 의하여 나일론재료가 용융되었다는 것을 보여준다. 사진 우측상단에 보이는 좁쌀 같은 하얀 점들은 치면 전체에서 관찰되는 것으로서 녹은 상태의 나일론재질이 상대강기에 표면에 점착되었다가 떨어지면서 치면으로부터 재료가 이탈하는 현상의 초기과정을 보여주는 흔적이라고 사료된다. 한편, 사진중앙부의 커다란 마멸입자는 고온에 의하여 용융된 후 이 뿌리방향의 마찰력에 의하여 아래쪽으로 눌러서 밀린 것이며, Fig. 2(c)는 피치선하단부를 500배로 확대, 관찰한 것으로서 나일론재료의 왕복동 마찰마멸실험⁽³⁾에서처럼 하중이 반복적으로 작용하면서 변형이 증가하는 크리프(creep)현상을 일으킨 나일론재질이 적층된 후 깎여나가고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 2(d)는 이뿌리부분을 관찰한 것으로서 이뿌리쪽으로 굽힘과 동시에 일부 재질이 밀리면서 뜯겨어진 듯한 흔적을 볼 수 있다. 이것은 나일론재질이 연화된 후 상대방 기어와의 마찰에 의하여 재질이 굽히거나 밀려나가면서 생기는 현상

이라고 판단된다.

Fig. 2(e)는 이뿌리부분을 2,000배로 확대한 것으로서 치표면 재질이 이탈되어 작은 구멍이 생기면서 마멸이 진행되는 과정을 보여주고 있다.

Fig. 2(f)는 이끝부분을 500배로 확대, 관찰한 것으로서 상대방 강기어와의 마찰에 의하여 이끝 방향으로 깎여 나간 마멸흔적을 보이고 있다.

Fig. 2(g)는 접촉치면 반대쪽 치면을 관찰한 것으로서 마찰마멸흔적을 거의 볼 수 없으며 Fig. 2(h)는 이 치면을 200배 확대한 것으로서 나일론 피니언의 가공시 발생한 가로방향의 가공흔적이 그대로 남아있는 것을 보여준다. 따라서, 현재의 운전 조건에서는 접촉치면 반대쪽에서 마찰이 거의 이루어지지 않는다는 것이 밝혀졌다.

Fig. 3은 Fig. 2와 하중은 동일하면서 총회전수가 3×10^6 회전인 경우이다. Fig. 3(a)는 피치선부분을 500배로 확대, 관찰한 것으로서 총회전수가 1×10^6 회전인 Fig. 2(c)와 비교할 때 훨씬 더 심한 크리프현상이 발생한 것을 볼 수 있으며, 전술한 왕복동 마찰마멸실험⁽³⁾에서처럼 용융, 냉각과정이 반복되면서 취성이 생긴 후 하중의 작용에 의하여 치표면 재질이 파손된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3(b)는 피치선과 이끝 중간의 치면으로서 반복되는 마찰로 인하여 이끝 쪽의 치면온도가 상승하면서 재질의 연화가 촉진된 후 마찰에 의하여 이끝방향으로 나일론재질이 밀려나면서 마멸되고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 3(c)와 (d)는 피니언의 이끝부분 치면을 보여 주고 있다. Fig. 3(c)에서는 용융된 재질이 치표면으로부터 완전히 떨어져 나간 흔적과 약 200 μm 의 길이를 갖는 대형 마멸입자를 볼 수 있는데 용융, 냉각과정을 거친 치면으로부터 이탈된 후 뭉쳐진 것으로 판단된다. 한편, Fig. 3(d)는 연화된 치면의 나일론재질이 외부로부터 유입된 입자 또는 치표면으로부터 떨어져 나간 나일론 마멸입자 등과의 마찰작용에 의하여 이끝 방향으로 깎여 나간 것으로 사료된다.

Fig. 3(e)는 이뿌리부분으로서 Fig. 2(d)에 비하여 전체적으로 매끈한 면을 보이면서 중간중간 마찰방향으로 길게 패인 흔적을 볼 수 있으며 육안관찰에 의하면 용융 후 심하게 눌린 상태임을 알 수 있었다. 이것은 계속되는 마찰에 의하여 그온에 노출된 이뿌리부분의 재질이 열화된 후 상대방 강기어 치면에 눌리거나 깎인 흔적이다.

또한, 기다란 마멸입자는 가늘고 길게 잘려나가 기 쉬운 나일론 마멸입자이며^(3,4) 구형입자는 외부로부터 유입된 이질재료가 마찰면에 끼인 후 고온의 작용을 받아 만들어진 것으로 보인다. Tuskamoto 등⁽⁹⁾에 의하면 플라스틱 기어는 이끝보다 이뿌리부분에서 마찰마멸이 훨씬 큰 것으로 나타났으며 이러한 연구결과는 본 실험에서 관찰된 사실과도 잘 일치한다.

전체적으로 볼 때 총회전수가 3×10^6 회전인 경우에는 1×10^6 회전인 경우에 비하여 운전시간이 경과함에 따라 마찰마멸이 더욱 심화되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 총회전수가 5×10^6 회전인 경우로서 Fig. 4(a)의 전체 치면을 보면 피치선을 포함한 이끝부분은 밝지만 하단의 이뿌리부분은 어둡게 보이고 있다. 밝은 부분은 심한 마찰열로 인하여 재질이 용융된 후 눌리고 떨어져 나가는 마멸이 진행되면서 표면이 울퉁불퉁해짐으로써 빛을 산란시킨 결과이다. 반면에 아래쪽의 이뿌리부분은 마찰열에 의하여 연화된 후 상대방 강기어의 이끝에 의하여 심하게 눌린 흔적을 나타내고 있다.

Fig. 4(b)는 피치선상을 확대한 것으로서 용융, 냉각 후 깨지던 나일론재질이 결국 치표면으로부터 대량으로 이탈되거나 밀려나면서 홈(groove)을 이루기 시작하는 것을 보여준다. Tsukamoto^(6,7)에 의하면 피치선부분에서는 치면 상호간의 미끄럼 마찰에 의하여 나일론재질의 소성유동(plastic flow)이 발생함으로써 패이게 된다고 하였으며 이는 본 실험에서 나타난 결과와도 잘 일치한다.

Fig. 4(c)는 이끝과 피치선 중간 부분에서 나일론이 용융된 후 주기적인 마찰작용에 의하여 끌려 올라가면서 심하게 마멸되고 있는 현상을 잘 나타낸다.

Fig. 4(d)는 이뿌리부분으로서 그 동안 연화된 후 눌리고 굳히던 치표면에서 마멸입자가 형성되면서 마멸이 심화되는 단계를 보여준다.

Fig. 5는 총회전수가 1×10^7 회전인 경우로서 Fig. 5(a)를 보면 반복되는 마찰로 인하여 피치선부분이 심하게 눌린 상태이며 피치선부분에서는 이전보다 훨씬 큰 마멸입자가 관찰되고 있다. 이후 이들 마멸입자가 이탈되면서 피치선상에 더욱 깊은 홈이 패이게 된다. 한편, 접촉치면의 반대쪽을 나타낸 Fig. 5(b)를 보면 아직까지 주목할 만한 접촉흔적을 찾아 볼 수 없으나 가늘고 기다란

게 꼬인 나일론 마멸입자를 볼 수 있다.

전체적으로 볼 때, 강기어와 물리는 나일론 피니언의 피치선부분에서는 치면 상호간의 미끄럼 마찰에 의하여 나일론재질의 소성유동이 발생하고, 마찰이나 반복변형에 의한 열에 의하여 재질이 용융되어 기계적 특성을 잃고 마멸되면서 치폭을 따라 좁고 긴 홈을 생성하기 시작하는 것을 볼 수 있었다. 또한, 이끝과 피치선 사이에서는 피치선상보다는 덜하지만 반복되는 마찰작용에 의하여 나일론재질이 연화되어 이끝방향으로 밀려 올라가거나 깎이는 작용을 받아 마멸이 진행되는 것을 볼 수 있었으며, 이뿌리부분에서는 상대방 강기어 이끝과의 마찰에 의하여 나일론재질이 용융 후 심하게 눌리면서 대량으로 마멸되는 현상⁽⁸⁾을 관찰할 수 있었다. 한편, 접촉치면 반대쪽의 치면에서는 전체 운전구간에 걸쳐서 접촉흔적이 거의 발견되지 않았다.

Fig. 6부터 Fig. 8은 작용하중이 19.6N/mm (2kgf/mm)인 경우에 대한 관찰결과로서 Fig. 6은 총회전수가 1×10^6 회전일 때의 치면변화를 보인 것이다.

Fig. 6(a)는 이끝부분을 관찰한 것으로서 하중이 9.8N/mm (1kgf/mm)인 경우에 비하여 이끝부분 마멸이 조기에 발생함을 알 수 있다. 즉, 동일한 회전수일 때 하중 9.8N/mm (1kgf/mm)인 경우의 이끝을 보인 Fig. 2(f)의 치면이 비교적 매끈한 데 비하여 Fig. 8(a)에서는 심한 마찰열에 의하여 나일론피니언의 이끝부분이 용융되어 매끈해진 것을 볼 수 있다.

Fig. 6(b)를 보면 피치선상에서 이미 심한 피팅 현상의 진행으로 치면이 깊게 패이는 현상이 발생한 것을 볼 수 있는 데 이는 하중이 9.8N/mm (1kgf/mm)일 때 총회전수가 1×10^6 회전인 Fig. 2(c)보다 훨씬 더 심할 뿐만 아니라 총회전수가 1×10^7 회전인 Fig. 5(a)의 치면상태와 거의 유사하였다. 따라서, 하중이 19.6N/mm (2kgf/mm)인 경우에는 하중이 9.8N/mm (1kgf/mm)일 때보다 피치선상의 마멸이 매우 심하게 진행된다는 것을 알 수 있다.

이뿌리부분에서도 Fig. 6(c)에 보인 것처럼 마멸현상은 급속하게 진행되었다. 이것은 이뿌리부분에 고온이 발생하면서 나일론이 용융된 직후 마찰에 의하여 이뿌리방향으로 납작하게 눌리면서 밀려나간 크리프 현상으로서 하중이 9.8N/mm

(1kgf/mm)인 경우와 비교할 때 이뿌리부분에서 비교적 짧은 시간 내에 마멸이 대량으로 진행되고 있다는 것을 보여준다.

총회전수가 3×10^6 회전인 경우를 나타낸 Fig. 7의 경우 (a)는 이끝부분을 나타낸 것으로서 치면이 심하게 용융되고 이끝방향으로의 마찰작용을 받아 밀려 올라가면서 치면으로부터 재료가 이탈되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7(b)의 피치선부분을 살펴보면 사진 중앙의 피치선을 기준으로 치폭방향으로 길게 패인 홈과 피치선 상하부분이 용융된 흔적을 볼 수 있을 뿐만 아니라 사진 상단으로부터 높이의 약 1/4 정도 내려온 부분에서는 치면 전체를 가로질러서 균열(crack)이 생성된 것을 볼 수 있다.

Terashima 등⁽⁸⁾에 의하면 피치선부분에서의 균열은 과도한 미끄럼마찰에 의하여 나일론재질이 유리전이온도(glass transition temperature)⁽¹¹⁾보다 고온에 노출되면서 재료가 열화된 후 반복적인 하중을 받아 생성된다고 하였으므로 Fig. 7(b)의 나일론피니언 치형은 열에 의한 파손이 진행되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7(c)는 Fig. 7(b)의 균열부분을 500배로 확대한 것으로서 나일론재료가 용융되거나 소성유동을 일으킨 흔적을 볼 수 있으며 과도한 열에 노출된 후 기계적 특성을 잃은 나일론재질에 하중이 작용하면서 균열이 시작된 것으로 판단된다.

Fig. 7(d)와 (e)는 각각 접촉치면과 그 반대치면에서 발견된 마멸입자들로서 이들 막대형 또는 뭉친 형태의 마멸입자들은 고열과 고하중의 작용으로 인하여 치면에서 떨어져 나온 후 뭉쳐진 것이며 해당 피니언의 운전조건이 매우 가혹한 상태를 말해 준다.

총회전수가 5×10^6 회전일 때의 피치선부분을 나타낸 Fig. 8(a)와 (b)를 보면 회전수가 각각 1×10^6 회전과 3×10^6 회전일 때인 Fig. 6(b)와 Fig. 7(b)에서 볼 수 있던 피치선상의 마멸입자들이 모두 떨어져 나가면서 치폭을 따라서 깊게 패인 홈을 남겨 놓았으며 피치선을 포함한 넓은 치면에서 완전히 녹아서 눌리거나 마찰방향으로 밀려나간 소성유동의 결과를 잘 보여준다.

Fig. 8(c)에서는 Fig. 7(b)와 (c)에 나타난 생성초기의 균열이 성장하여 접촉치면과 반대치면을 관통하는 거대한 균열로 진행된 것을 볼 수 있으며

균열 주위의 나일론재질이 이탈되어 피치선 윗부분이 완전히 절손되기 직전의 상태로서 이후 운전이 계속되면 이(tooth)는 부러지게 된다. Tsukamoto,⁽⁵⁾ Terashima 등⁽⁸⁾에 의하면 열전달계수가 낮은 나일론기어의 경우 치면중양부에서 온도가 가장 높게 나타나며 이러한 온도상승에 의하여 고온부에서 균열이 발생한다고 하였다. Fig. 8(c)는 이러한 연구결과를 뒷받침하고 있다.

한편, 작용하중이 29.4N/mm (3kgf/mm)인 경우에는 하중이 매우 크기 때문에 Fig. 6부터 Fig. 8의 과정이 매우 빠르게 진행되면서 이가 절손되는 것을 알 수 있다.

피치선속도가 3m/s인 나일론기어의 마찰마멸특성을 SEM으로 관찰한 결과를 종합해 보면 하중이 9.8N/mm (1kgf/mm)인 경우 비교적 마찰마멸이 느리게 진행됨으로써 총회전수는 1×10^7 회전에 다다르고 있는 것을 알 수 있었다.

하중이 19.6N/mm (2kgf/mm)로 증가하면 하중증가에 의한 마찰열 상승으로 인하여 마멸의 진행속도가 빨라지면서 총회전수 5×10^6 회전에서 나일론피니언의 이가 부러졌으며, 하중이 29.4N/mm (3kgf/mm)인 경우에는 마멸이 더욱 빨리 진행됨으로써 8×10^5 회전에서 절손이 발생하였다.

따라서, 나일론기어를 구동축에 사용할 경우에는 작용하중의 크기를 신중하게 고려하여 설계가 이루어져야 한다는 것을 알 수 있었다.

3.1.2 피치선속도가 4m/s인 경우

Fig. 9부터 Fig. 12는 하중이 9.8N/mm (1kgf/mm), Fig. 13과 14는 19.6N/mm (2kgf/mm), 그리고 Fig. 15는 29.4N/mm (3kgf/mm)인 경우에 대한 나일론피니언 치면의 관찰결과이다.

Fig. 9(a)의 접촉치면 전체를 보면 동일한 회전수(1×10^6 회전)에서 피치선속도가 3m/s인 Fig. 2(a)에 비하여 피치선부분의 마멸이 심화되고 있음을 알 수 있다. 즉, Fig. 2(a)에서는 피치선상에서 홈이 만들어지기 시작하고 나머지 치면에서 약간의 마찰흔적만 발견된 반면, 피치선속도가 4m/s로 증가한 Fig. 9(a)의 경우에는 피치선부분의 눌린 부분의 폭이 이뿌리와 이끝 쪽으로 넓게 확대되었으며 이끝부분에서는 재질이 이탈되면서 남기는 구멍이 발생하기 시작하였고 치면전체에 걸쳐서 심하게 눌린 마멸입자가 관찰되었다. 피치선속도가 3m/s, 하중이 9.8N/mm (1kgf/mm)인 경우

에는 Fig. 4(a)에서와 같이 총회전수가 5×10^6 회전일 때 유사한 크기의 마멸입자가 관찰되었다. 그러므로, 피치선속도가 상승하면 미끄럼마찰 속도가 커지면서 발생하는 마찰열이 증가함으로써 나일론재질이 단시간 내에 고온에 노출되어 마멸이 가속화되는 것으로 판단된다.

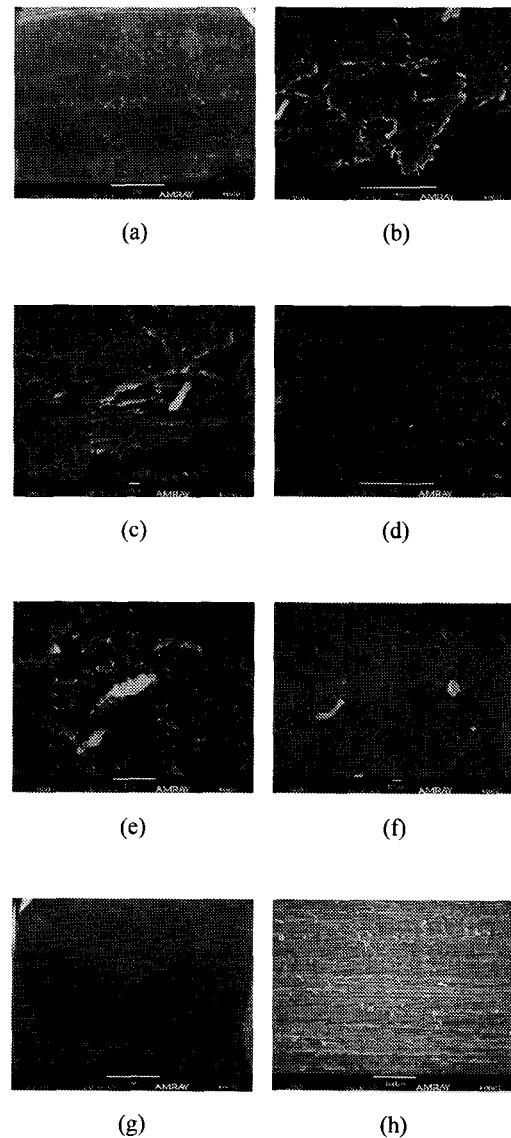


Fig. 2 SEM images of the tested Nylon pinion surfaces : test conditions - 3m/s, 9.8N/mm (1kgf/mm), 1×10^6 revolution

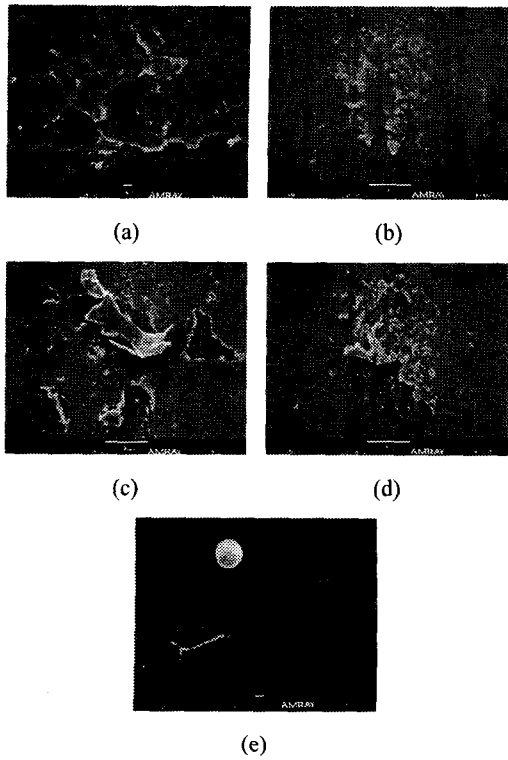


Fig. 3 SEM images of the tested Nylon pinion surfaces : test conditions - 3m/s, 9.8N/mm (1kgf/mm), 3×10^6 revolution

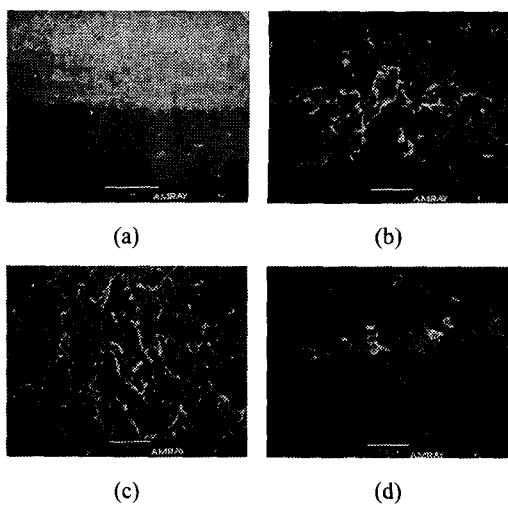


Fig. 4 SEM images of the tested Nylon pinion surfaces : test conditions - 3m/s, 9.8N/mm (1kgf/mm), 5×10^6 revolution

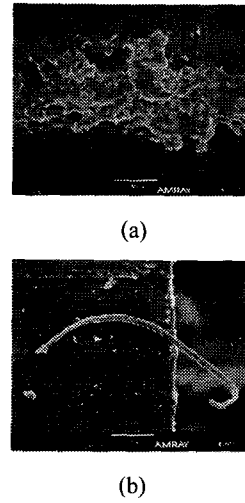


Fig. 5 SEM images of the tested Nylon pinion surfaces : test conditions - 3m/s, 9.8N/mm (1kgf/mm), 1×10^7 revolution

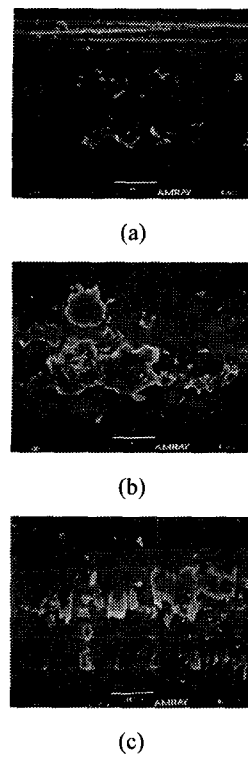


Fig. 6 SEM images of the tested Nylon pinion surfaces : test conditions - 3m/s, 19.6N/mm (2kgf/mm), 1×10^6 revolution

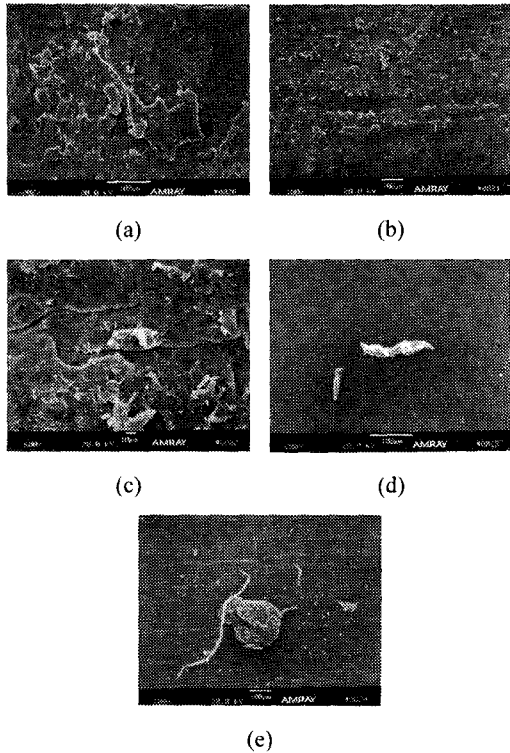


Fig. 7 SEM images of the tested Nylon pinion surfaces : test conditions - 3m/s, 19.6N/mm (2kgf/mm), 3×10^6 revolution

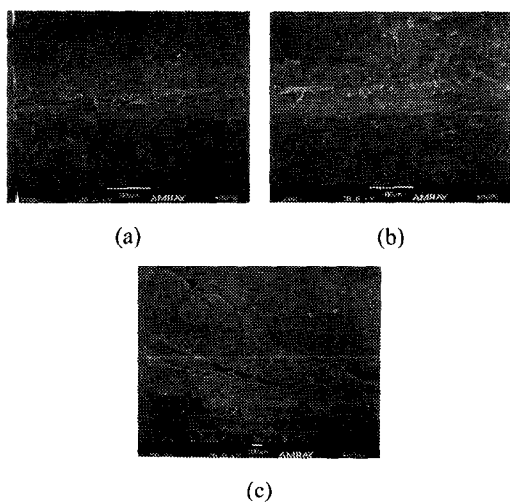


Fig. 8 SEM images of the tested Nylon pinion surfaces : test conditions - 3m/s, 19.6N/mm (2kgf/mm), 5×10^6 revolution

Fig. 9(b)와 (c)는 피치선과 이끝 중간부분으로서 백색의 좁쌀 같은 것은 치면에서 이탈되기 직전의 재료를 나타내며 비교적 큰 마멸입자(검은 그림자 동반한 것)도 볼 수 있다. 피치선속도가 3m/s인 경우에는 Fig. 2(b), (c), 그리고 (e)에 보인 것처럼 치면에 바늘 모양의 돌기가 생기거나 Fig. 2(d)처럼 대패로 밀어낸 것 같은 마멸흔적은 있었으나 Fig. 9(b), (c)에서와 같은 마멸현상은 보이지 않았다. 따라서, 피치선속도가 상승하는 경우에는 나일론피니언과 상대 강기어 사이에 발생하는 파이프압력값이 증가하면서⁽¹²⁾ 이와 같은 치면손상이 발생하는 것으로 판단된다.

대부분의 나일론 마멸입자는 Fig. 3(c), Fig. 5(b) 그리고 Fig. 7(d)와 (e)에 보인 것처럼 뭉치거나 꼬인 형태, 또는 막대형의 들들 말린 모양을 하고 있지만 Fig. 9(b)에 보인 마멸입자는 날카로운 형상을 가지고 있다. 이러한 형상의 마멸입자는 강기어 이끝 등의 작용에 의하여 치면으로부터 각여 나오거나 피팅현상에 의한 마멸입자일 것으로 판단되며, 이러한 형태의 마멸입자가 출현하는 것은 회전속도 상승에 의하여 마찰마멸이 심화되고 있다는 증거라고 사료된다.

Fig. 9(c)의 경우 사진 우측을 보면 일정한 폭으로 좁고 길게 굽힌 흔적이 보이는데 이것은 딱딱해진 나일론 마멸입자, 또는 외부로부터 유입된 강도 높은 입자에 의하여 재료 표면이 눌러면서 굽힌 흔적으로 판단된다.

Fig. 10은 총회전수가 3×10^6 회전이므로 위쪽은 심하게 눌린 피치선부분이고 중앙에 보이는 것은 피치선상에서 이뿌리쪽으로 밀려 내려온 후 납작하게 눌러진 나일론 재료로서 소성변형이 매우 심하게 일어나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 총회전수가 5×10^6 회전인 치면의 피치선부분을 촬영한 것으로서 피팅현상에 의하여 나일론재료가 치면으로부터 떨어져 나가면서 치폭방향으로 깊게 홈이 패인 것을 볼 수 있다. 이러한 패임현상은 피치선속도가 3m/s인 경우보다 훨씬 뚜렷하게 나타나는 것으로서 이후 운전이 지속되어 총회전수가 1×10^7 회전에 도달하면 Fig. 12처럼 피치선부분에서 미세한 균열이 생성되기 시작한다.

하중이 19.6N/mm (2kgf/mm)인 경우에는 Fig. 13에서처럼 총회전수가 1×10^6 회전일 때 이미 피치선상에 홈이 형성될 뿐만 아니라 피치선부분과

피치선 위쪽의 이끝부분이 심하게 눌러붙는 현상을 관찰할 수 있었다. 또한, 접촉치면 반대쪽 치면 이끝에 약간의 마찰흔적이 보였으며 이로부터 피치선속도가 4m/s인 경우에는 3m/s인 경우보다 마찰마멸이 증가하고 있음을 알 수 있다.

총회전수가 2×10^6 회전에 다다르면 마멸이 더욱 진행되어 Fig. 14(a)처럼 피치선부분이 깊게 눌러붙는 후 균열이 생성됨과 동시에 폭 200 μ m, 길이 1mm 정도의 나일론재질이 이탈되면서 균열이 성장함으로써 반대 치면으로까지 관통되었으며 총회전수 5×10^6 회전에서 절손에 이르렀다. 이 경우에는 반대 치면에서도 마멸이 진행되어 Fig. 14(b)에서처럼 피치선부분이 고온에 노출되면서 심하게 용융된 후 눌러 붙는 것이 관찰되었으며 이러한 반대 치면의 마멸현상은 피치선을 포함하여 이끝부분에서만 관찰되었다. 따라서, 피치선속도가 4m/s로 증가할 경우에는 상대방 강기어와의 간섭이 발생한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 15(a)와 (b)는 하중이 29.4N/mm (3kgf/mm)인 경우이며 극심한 마멸이 발생하고 있음을 보여준다. Fig. 15(a)는 이뿌리부분으로서 접촉치면 전체가 고온에 노출되어 용융된 후 이뿌리부분으로 밀려나면서 눌러붙은 흔적을 관찰할 수 있었으며 이후 균열이 생성, 진행되어 총회전수 8×10^5 회전에서 절손에 이르렀다.

Fig. 15(b)는 접촉치면 반대쪽 치면의 이끝부분을 관찰한 것으로서 Fig. 9(b)와 (c) 등에 나타난 것과 같이 치면으로부터 재질이 이탈되기 시작하는 것을 볼 수 있었다. 따라서, 피치선속도가 4m/s, 하중이 29.4N/mm (3kgf/mm)인 경우에는 하중을 전달하는 접촉치면과 반대치면 모두에서 심한 마찰마멸이 진행된다는 것을 알 수 있다.

이러한 관찰결과들로부터 나일론피니언의 피치선속도가 3m/s에서 4m/s로 증가하면, 피치선부분에서의 미끄럼마찰속도 상승과 치형의 반복변형에 의한 열량축적이 가속화되어 치면온도가 급상승하고, 치형에 과도한 휨(deflection)이 일어나면서 상대방 강기어와의 간섭을 일으킴으로써 치면에서의 마찰마멸이 급속하게 진행되어 조기에 절손이 발생하는 것으로 판단된다.

3.2 고찰

SEM을 이용한 나일론피니언 치면의 관찰결과를 피치선부분, 이뿌리부분, 그리고 이끝부분으로

나누어 살펴보면 다음과 같다.

우선, 피치선상에서는 이론적으로 볼 때 구름마찰(rolling contact)만 발생하기 때문에 마멸이 최소가 될 것으로 예상되지만 실제로는 치면온도 상승에 따른 나일론재료의 기계적특성 변화에 의하여 대량마멸이 이루어진다는 것이 밝혀졌다.

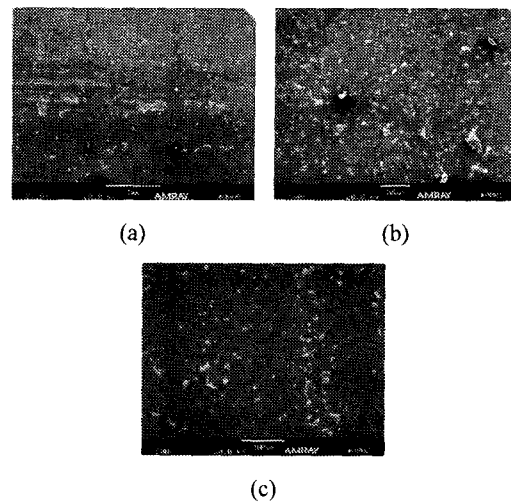


Fig. 9 SEM images of the tested Nylon pinion surfaces : test conditions - 4m/s, 9.8N/mm (1kgf/mm), 1×10^6 revolution

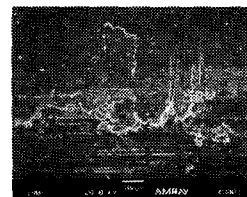


Fig. 10 SEM image of the tested Nylon pinion surface : test conditions - 4m/s, 9.8N/mm (1kgf/mm), 3×10^6 revolution



Fig. 11 SEM image of the tested Nylon pinion surface : test conditions - 4m/s, 9.8N/mm (1kgf/mm), 5×10^6 revolution

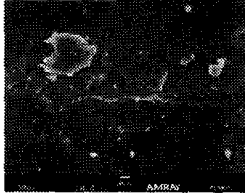


Fig. 12 SEM image of the tested Nylon pinion surface : test conditions - 4m/s, 9.8N/mm (1kgf/mm), 1×10^7 revolution

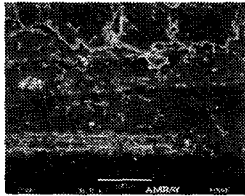


Fig. 13 SEM image of the tested Nylon pinion surface : test conditions - 4m/s, 19.6N/mm (2kgf/mm), 1×10^6 revolution

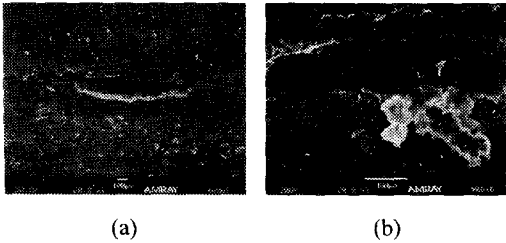


Fig. 14 SEM images of the tested Nylon pinion surfaces : test conditions - 4m/s, 19.6N/mm (2kgf/mm), 2×10^6 revolution

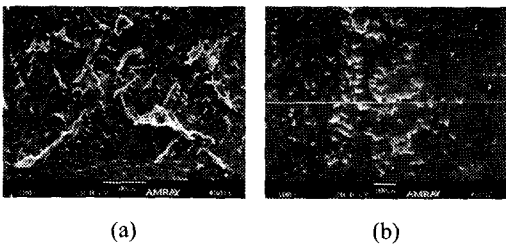


Fig. 15 SEM images of the tested Nylon pinion surfaces : test conditions - 4m/s, 29.4N/mm (3kgf/mm), 6×10^5 revolution

본 실험에서 강기어와 물리는 나일론피니언의 피치선상 치면온도를 비접촉식 온도계로 측정한 결과 운전조건에 따라 40~55℃ 정도까지 상승하는 것으로 관찰되었다. 나일론피니언 치면의 온도상승은 점탄성체인 나일론재료가 강기어와 접촉하면서 주기적인 반복변형에 의한 히스테리시스(hysteresis) 열손실이 발생하고 발생열량이 치형 내부에 축적되어 나타나는 것이다.^(7,10) 나일론피니언의 치면온도가 나일론재료의 유리전이온도인 50℃ 이상으로 상승할 경우에는 나일론이 열화되면서 탄성계수값이 대폭으로 감소하여⁽¹¹⁾ 기계적 특성을 상실하게 된다. 이러한 상태에서 장시간 동안 반복하중을 받게 되면 피치선부분의 나일론재료가 치면에 구멍을 남기면서 이탈하는 피팅현상과 열화된 나일론재료가 상대방 강기어에 의하여 강한 압력을 받아 소성변형을 일으켜 이뿌리방향과 이끝방향으로 밀려나는 크리프(creep)현상⁽⁷⁾이 발생하면서 치폭방향을 따라 기다란 홈(groove)을 형성하게 되고, 이후로 강기어와의 물림이 계속되면 고온의 나일론피니언 치면중앙에서 균열이 발생, 성장하여 절손에 이르게 된다.

한편, 나일론피니언의 이뿌리부분에서는 상대방 강기어 이끝에 의하여 심한 마찰이 발생하였고 마찰열에 의하여 연화(softening)된 나일론재질이 긁히고 눌리면서 마찰마멸이 심하게 진행된다는 것을 알 수 있었다. Terashima 등의 연구⁽⁸⁾에 의하면, 이뿌리부분의 마멸이 진행됨에 따라 치면상의 주요 마찰발생 위치가 이뿌리부분에서 이끝 방향을 향하여 이동하게 되며 이로 인하여 피치선부분에서의 마멸이 심화된다고 하였다. 따라서, 맞물리는 상대방 강기어 이끝의 모난 부분을 등글리거나 치형을 수정해 주면 나일론피니언 이뿌리부분에서의 마찰마멸을 감소시킬 뿐만 아니라 마찰발생영역이 피치선쪽으로 확장되는 것을 방지함으로써 치면 전체에서의 마멸발생량을 현저히 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

이끝부분에서는 강기어와의 마찰에 의하여 이끝방향으로 치면이 긁히거나 재질이 용융되는 마멸흔적이 관찰되었으나 다른 부분에 비하여 마찰마멸은 상대적으로 적은 것으로 관찰되었다.

한편, 회전속도변화에 따른 영향을 살펴보면, 회전속도가 상승할 경우 나일론피니언은 미끄럼압력의 상승⁽¹²⁾으로 인하여 치면전체가 눌리면서 고열이 발생할 뿐만 아니라 치형에 과도한 힘

발생하여 상대방 강기어와 간섭을 일으킴으로써 접촉치면 반대쪽 치면에서도 마찰이 발생하는 등 마찰마멸이 가속화되는 것으로 나타났다.

또한, 하중이 증가할 경우에는 접촉응력의 크기가 커지면서 치면온도가 급상승하게 되어^(7,10) 전술한 마찰마멸과정이 단시간 내에 급속하게 진전됨으로써 대량마멸과 조기절손을 초래하는 것으로 밝혀졌다.

4. 결론

나일론피니언과 SM45C재질의 강기어를 이용한 기어내구성실험을 통하여 전술한 실험조건 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 내열성이 뒤떨어지는 나일론재료로 제작된 나일론피니언은 반복변형과 마찰에 의해 발생하는 열이 재질 내에 축적되면서 열화되어 기계적 강도가 감소함으로써 소성변형과 균열의 발생, 성장에 의한 절손이 발생하게 된다.

(2) 나일론피니언은 피치선속도가 상승함에 따라 미끄럼마찰속도와 치형의 반복변형량 증가에 의한 열량축적이 가속화되어 치면온도가 급상승함과 동시에, 치형에 과도한 힘이 발생하여 마찰마멸이 가속화되었다.

(3) 나일론피니언의 치면하중이 증가할 경우에는 치면온도가 급상승하면서 대량마멸과 조기절손을 초래하였다.

(4) 이상과 같은 기어내구성실험 결과를 종합하여 볼 때, 나일론피니언의 치면온도 상승은 마찰마멸특성 및 운전수명에 커다란 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 따라서, 동력전달용 나일론피니언의 내구성을 향상시키기 위해서는 작용하중과 회전속도 등 운전조건의 적절한 선정, 상대방 강기어의 치형수정, 적절한 냉각방법 도입 등을 통하여 나일론피니언의 치면온도를 낮추는 것이 무엇보다도 중요하다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) 이기만, 정동천, 1992, "플라스틱 해설과 물성집," 한국플라스틱기술정보.
- (2) 한영수, 현동훈, 박원규, 정태형, 1999, "성형 플라스틱 기어 핸드북," 일진사.
- (3) 김충현, 안효석, 정태형, 2000, "나일론과 폴리아세탈의 왕복동마찰마멸특성에 관한 고찰," 대한기계학회논문집 A권, 제24권 제3호, pp. 786~793.
- (4) 김충현, 이성철, 안효석, 정태형, 2000, "아세탈과 나일론피니언의 마찰 및 운전특성에 관한 고찰," 대한기계학회논문집 A권, 제24권 제9호, pp. 2387~2396.
- (5) J. H. Chen, F. M. Juarbe, and M. A. Hanley, 1981, "Factors affecting fatigue strength of Nylon gears," *J. of Mechanical design - Transaction of the ASME*, Vol. 103, pp. 543~548.
- (6) Tsukamoto, N., 1979, "Investigation about the Strength of Plastic Gears (1st. The Strength of Nylon Gears which have Counter-corwing)," *Bulletin of the JSME*, Vol. 22, No. 173, pp. 1685~1692.
- (7) Tsukamoto, N., 1981, "Investigation about the Strength of Plastic Gears (2nd report ; Abrasion of the Nylon Gear for Power Transmission, Meshing with the Steel Gear)," *Bulletin of the JSME*, Vol. 24, No. 191, pp. 872~881.
- (8) Terashima, K., Tsukamoto, N., and Nishida, N., 1986, "Development of Plastic Gears for Power Transmission (Abnormal Wear near Tooth Root and Tooth Fracture near Pitch Point)," *Bulletin of the JSME*, Vol. 29, No. 251, pp. 1598~1604.
- (9) Tsukamoto, N., Yano, T., and Sakai, H., 1982, "Noise and Transmission Efficiency under Deformation of Tooth Form of Nylon Gears," *Bulletin of the JSME*, Vol. 25, No. 207, pp. 1465~1473.
- (10) Shoji, A., Nogami, M., and Satho, I., 1996, "Studies on the strength of Injection Molded Plastic Gears," *DE-Vol. 88, Power Transmission and Gearing Conference, ASME* 1996, pp. 739~744.
- (11) 안태완, 이동호, 박이순, 이상원, 정한모, 1987, "고분자물성," 대광문화사.
- (12) Theberge, J. E., Arkles, B., and Cloud, P., 1974, "How Plastics Wear against Plastics," *Machine design*, Oct. 31, pp. 60~61.