

플라스틱기어의 마멸특성에 관한 고찰

김충현* · 김영민* · 안효석 · 정태형**

한국과학기술연구원 트라이볼로지연구센터

*한양대학교 기계설계학과 대학원

**한양대학교 기계공학부

Wear Characteristics of Plastic Pinion Against Steel Gear

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

Tribology Research Center, KIST

*Department of Mechanical Design and Production Engineering, Hanyang University

**School of Mechanical Engineering, Hanyang University

Abstract – Wear characteristics of acetal and Nylon pinions against steel gear were studied to gain a better understanding of their tribological behaviors. Wear tests were conducted with power circulating gear test rig under dry contact conditions. Specific wear rates were measured as a function of applied load and the number of revolution. The worn teeth surfaces were examined with a profile projector and a camera. Nylon pinion showed lower specific wear rates than acetal pinion, but suffered teeth breakage under high load per unit tooth width. The dominant wear mechanisms found were adhesion and abrasion.

Keyword – wear, plastic gear, acetal pinion, Nylon pinion, machine element, specific wear rate.

1. 서 론

열가소성 고분자재료인 나일론과 아세탈은 구형결정구조(spherulitic structure)를 갖는 결정성 고분자로서, 마찰계수가 낮고 강인한 특성을 보유하고 있으므로 기어, 배관용 부품, 자동차 부품, 그리고 완구류 등의 재료로 사용된다[1,2].

이들 공업용 플라스틱의 마찰마멸특성에 대한 연구는 지속적으로 다양한 분야에 걸쳐서 이루어졌으며 [3~7,14], 이성철 등[8]은 사출성형 플라스틱기어의 설계, 제작기술을 개발하고 연구결과를 생산현장에서 성공적으로 활용한 바 있다.

또한, 일본에서는 플라스틱기어의 강도향상에 관한 연구[8~13]가 지속적으로 진행되어 상당한 연구결과를 축적하고 있으나 국내에서는 동력전달용 플라스틱기어의 설계, 제작에 대한 이론적 근거가 마련되지 않은 상태에서 주로 경험에 의해 생산, 활용됨으로써 신뢰도를 인정받지 못하고 있는 실정이다.

2. 실험연구

2-1. 실험장치

본 연구에서는 동력전달용 플라스틱기어의 체계적인 설계자료를 구축하기 위하여 Fig. 1에 보인 것과

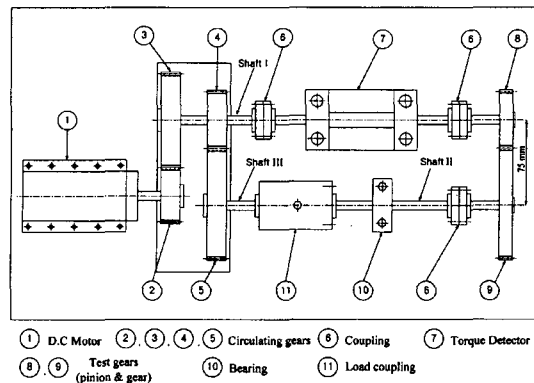


Fig. 1. Schematic view of the gear test rig.

같은 기어내구성 실험장치를 설계, 제작하고 실험을 수행하였다. 이 실험장치는 두 축 사이의 중심거리가 75 mm로 고정된 동력순환식 기어실험장치로서 피니언 축에는 토크와 회전수를 측정하는 토크계측기 (torque detector)가 설치되어 있다.

2-2. 시험기어의 제작

피니언의 재료로는 나일론과 아세탈, 기어는 SM45C를 각각 사용하여 제작하였으며, 각 시편의 제원은 Table 1에 나타내었다.

시편 제작과정에서 발생한 불순물을 제거하기 위하여 피니언은 에틸알코올, 강기어(steel gear)는 아세톤에 각각 담가 초음파세척기를 이용하여 세척하고 건조기에서 40°C로 48시간 동안 건조시킨 후 곧바로 실험에 사용하였다.

2-3. 마찰마멸실험

실험조건은 Table 2에 나타내었다.

실험은 피니언의 재질, 총회전수와 하중을 변화시키면서 수행하였으며 총 24세트의 실험을 실시하였다.

Table 1. Specification of the test gears

	Pinion	Gear
Material	Nylon, acetal	SM45C
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. Test conditions

Applied load	1.5 N*m(1 kgf/mm, 3 N*m(2 kgf/mm), 4.5 N*m(3 kgf/mm)
Rotation speed [rpm]	955
Pitch line velocity [m/s]	3 (for pinion)
Revolution [× 10 ⁶]	1, 3, 5, 10
Environment	Air
Temperature	Room temperature
Humidity	35 ~ 55%

온도의 영향을 크게 받는 고분자재료의 특성을 고려하여 각각의 실험세트는 매번 새로운 시편을 사용하였으며 각 세트마다 평균 2.5회에 걸쳐서 동일한 실험을 반복하였다.

2-4. 마멸특성 평가

실험 직전과 실험수행 직후에 피니언의 중량을 측정하여 마멸량을 계측하였고, 투영기(profile projector)와 사진기를 이용하여 총회전수에 따른 치형 및 치면의 변화를 관찰하였으며, 비마멸량(specific wear rate)을 바탕으로 하여 피니언의 마멸특성을 고찰하고 그 마멸기구를 파악하고자 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 마멸량의 변화

3-1-1. 재질에 따른 마멸량

플라스틱기어의 재질에 따른 마멸량의 변화를 Fig. 2에 도시하였다. 마멸량은 질량으로 측정된 피니언재질의 마멸량을 밀도값으로 나누어 부피단위의 체적마멸량(wear volume)으로 바꾼 것으로서 단위는 [mm³]이다.

Fig. 2 (a)의 아세탈의 경우 실험 전 과정을 볼 때 시험 초기부터 마멸이 많이 발생하였으며 이후 지속적으로 마멸이 이루어지면서 실험이 진행될 수록 마멸량이 증가하는 추세를 보였다. 이러한 실험결과는 실험이 진행되는 동안 육안으로 관찰한 결과와 일치하였다. 즉, 아세탈피니언의 경우 강기어와 볼림이 이루어지면서 길이가 짧고 굵은 마멸입자를 다량으로 발생시켰다. 이것은 강도가 훨씬 큰 강기어와 볼림이 진행되면서 상대적으로 무른 재질의 아세탈피니언의 재질이 마멸되면서 모재로부터 이탈한 것으로 판단된다.

작용하중이 3 kgf/mm(29.4 N/mm)인 경우에는 1 kgf/mm(9.8 N/mm)인 경우보다 체적마멸량이 4배 이상으로 증가하는 등 작용하중의 증가와 더불어 마멸량도 대폭 증가하였다. 그러나, 아세탈 피니언을 이용한 모든 실험에서 이(tooth)가 절손된 피니언은 나타나지 않았다.

이러한 실험결과로 볼 때 아세탈의 경우 비교적 취성이 큰 재질로서[14] 작용하중을 견디지 못하고 잘게 부서어지면서 쉽게 마멸된다는 것을 알 수 있었다.

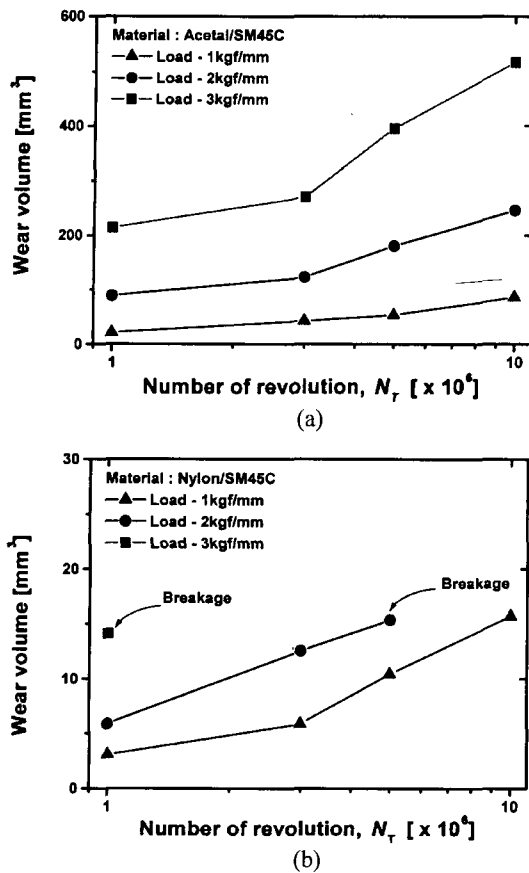


Fig. 2. Variation of the wear volume for various material with revolution.

Fig. 2 (b)의 나일론피니언의 경우 시험 초기부터 종료시까지 체적마멸량은 거의 선형적으로 증가하는 추세를 보였다. 또한, 아세탈피니언에서처럼 실험 중반 이후부터 마멸발생량이 늘어났을 뿐만 아니라 하중의 증가와 더불어 마멸량이 증가하였으나 그 증가율은 상대적으로 낮았다. 실험 후 육안으로 관찰한 결과 강기어와 접촉을 일으킨 마찰면이 매끄러운 거울면(mirror surface)으로 변해 있는 것을 알 수 있었다. 또한, 하중이 2 kgf/mm(19.6 N/mm)인 경우 3×10^6 회전 후 치면에 균열(crack)이 발생한 것을 관찰할 수 있었으며, 5×10^6 회전 후 절손(breakage)되었고 하중이 3 kgf/mm(29.4 N/mm)인 경우에는 8×10^5 회전 이후에 이(tooth)가 절손되었다.

따라서, 나일론피니언의 경우에는 물림이 진행됨에 따라 하중의 작용으로 인하여 고온에 노출된 나일론 치면이 용융되어 매끄럽게 놀리면서 마찰계수가 감

소하여 부드럽게 물림이 진행되는 것으로 보이며[14], 이후 물림이 계속될 경우 마찰면 온도가 지속적으로 상승하면서 나일론 재질이 열화(degradation)되어 기계적 특성이 떨어짐으로써 재질내부에 균열이 발생, 성장하여 결국 절손되는 것으로 판단된다.

3-1-2. 하중에 따른 마멸량

플라스틱기어의 하중에 따른 체적마멸량의 변화를 살펴보면 나일론피니언의 체적마멸량은 아세탈피니언에 비하여 1/3~1/15 수준에 불과하다는 것을 알 수 있다. 이것은 아세탈피니언의 경우 하중증가와 더불어 마멸발생량이 큰 폭으로 증가한 반면 나일론은 체적마멸량의 변화가 상대적으로 작았기 때문이다.

따라서, 플라스틱피니언의 체적마멸량의 비교를 통하여 절손이 발생하지 않는 운전조건에서는 나일론의 마멸특성이 아세탈보다 상대적으로 우수하다고 할 수 있다.

3-1-3. 재질에 따른 비마멸량

전술한 바와 같은 부피단위의 체적마멸량을 이용한 마멸특성의 비교는 전체적인 경향을 살펴는 데 중요한 역할을 하고 있으나 각 재질의 운전조건에 따른 마멸특성의 변화를 파악하기 위해서는 피니언의 총회전수와 단위 치폭당 하중값을 반영한 비마멸량에 관한 고찰이 이루어져야만 한다. 따라서, 플라스틱피니언의 재질에 따른 비마멸량의 변화를 Fig. 3에 도시하였다. 여기에서 비마멸량은 부피단위의 체적마멸량값을 총회전수와 단위 치폭당 하중으로 나누어 준 것으로서 단위는 $[\text{mm}^3/\text{Rev.}/\text{kgf} \cdot \text{mm}]$ 이다.

Fig. 3 (a)의 아세탈피니언의 경우 초기 길들이기(break-in) 과정에서 다량의 마멸이 발생한 후 비마멸량이 급격하게 감소한 다음 일정한 감소세를 유지하였으며, 실험 전 구간에 걸쳐서 지속적으로 마멸이 이루어진다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 3 (b)의 나일론피니언의 경우 비마멸량이 아세탈의 비마멸량의 1/5~1/20 수준으로서 상당히 적었다. 하중이 2 kgf/mm(19.6 N/mm)인 경우에는 하중이 1 kgf/mm(9.8 N/mm)인 경우에 비하여 비마멸량이 오히려 감소하는 역전현상을 보였으며 하중이 3 kgf/mm(29.4 N/mm)인 경우에는 비마멸량이 크게 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 역전현상은 하중증가율보다 비마멸량의 증가율이 작아져서 발생한 현상이므로 Fig. 2에서 살펴본 것처럼 나일론피니언의 경우 해당구간에서의 하중증가가 마멸량증가에 미치는 영향이 아세탈피니언의 경우보다 훨씬 작다는 분석

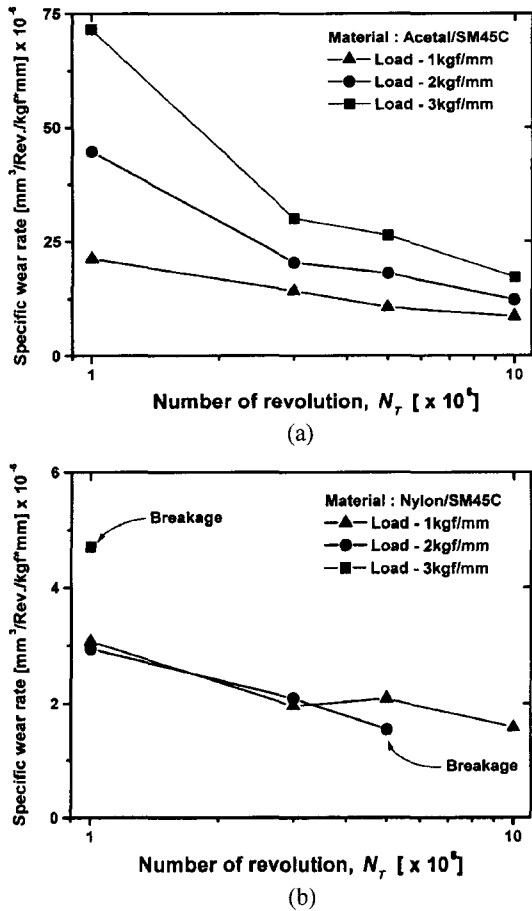


Fig. 3. Variation of the specific wear rate for various material with revolution.

결과와 일치한다.

또한, 초기 구간 이후 감소하던 비마멸량이 실험 중간부분에서 감소폭이 줄어들거나 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 나일론재질이 작용하중의 영향을 받아 고온에 노출됨으로써 마멸이 증가하는 구간일 것으로 사료된다. 즉, 마찰열로 인하여 용융된 후 냉각과정을 거친 나일론 재질이 기계적 특성을 상실함으로써 모재로부터의 이탈현상이 가속화되는 [14] 영역으로 판단된다.

한편, 작용하중이 2 kgf/mm(19.6 N/mm)와 3 kgf/mm (29.4 N/mm) 사이의 값을 가질 때 하중증가에 따른 나일론피니언의 비마멸량 증가율에 급격한 변화를 보이는 천이영역이 존재할 것으로 추측된다.

3-1-4. 하중에 따른 비마멸량

실험을 통하여 얻은 하중에 따른 비마멸량의 변화

를 살펴보면 아세탈피니언의 초기 비마멸량은 하중의 크기에 비례하여 증가하였으나 실험이 진행될 수록 증가폭은 감소하였다. 이러한 비마멸량의 급상승 현상은 상대방 강기어와의 마찰에 의한 효과 뿐만 아니라 김충현 등[14]이 고찰한 바와 같이 피니언 모재로부터 이탈한 단단한 아세탈마멸입자가 피니언과 기어의 마찰면 사이에 끼어들면서 피니언표면을 긁어내는 “third-body abrasion”현상이 진행되어 마멸을 가속화하는 역할을 수행한 것으로 추측된다.

나일론피니언의 경우에는 하중의 크기에 따른 비마멸량의 변화폭이 상대적으로 작았으며 하중이 2 kgf/mm (19.6 N/mm)인 경우에는 5×10^6 회전에서, 하중이 3 kgf/mm (29.4 N/mm)인 경우에는 초기 단계인 8×10^5 회전에서 질손이 이루어져서 더 이상 마멸경향을 관찰할 수 없었다.

비마멸량의 변화자료로부터 판단할 때 피니언의 이(tooth)가 질손되지 않는 범위에서는 총회전수와 작용하중이 동일한 경우에는 나일론피니언의 마멸특성이 아세탈피니언보다 매우 우수한 것으로 보인다.

3-2. 피니언 치형의 변화

실험 후 피니언 치형을 투영기로 50배 확대하여 관찰하고 실험 전의 치형과 비교함으로써 강기어와 맞물리는 플라스틱피니언의 치형변화를 살펴보았다.

실험 후 피니언 치형을 확대 투영한 후 이뿌리부분부터 이끝까지의 총이높이를 40개 구간의 등간격으로 분할한 직선, 피치원, 그리고 이끝원 등과 만나는 좌우 치면상의 점 86개와 치중심선이 이끝원과 만나는 점 1개 등 총 87개 점의 (x, y) 좌표값을 수작업으로 측정하여 치형을 작성하였다. 또한, 실험을 거치지 않은 피니언을 재질별로 각각 5개씩 선정 후 전술한 방법으로 치형상의 점을 선정하여 (x, y) 좌표값을 측정한 후 평균을 취하여 치형을 작성하고 비교 기준이 되는 표준치형으로 이용하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 아세탈피니언과 나일론피니언의 치형이 실험이 진행됨에 따라 변화하는 과정을 보여준다. 이 때 나타난 치형 중에서 우측치면이 강기어와 물리면서 하중의 작용을 받은 접촉치면이다.

Fig. 4의 아세탈피니언 치형의 변화과정에서 가장 큰 특징은 마멸이 전체 치면에 걸쳐서 골고루 진행된다는 점이다.

치면에 작용하는 하중이 1 kgf/mm (9.8 N/mm)인 경우에는 Fig. 4 (a)와 같이 총회전수가 증가함에 따

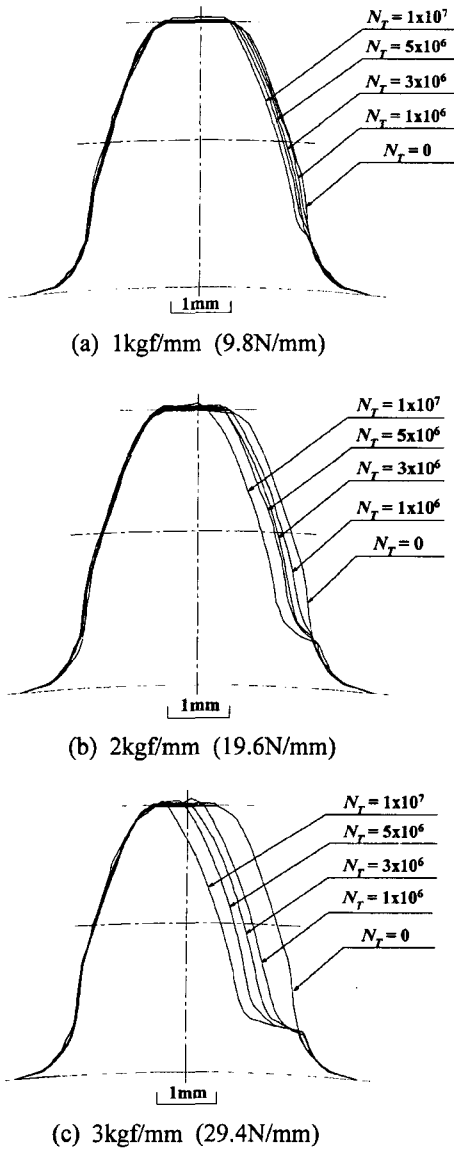


Fig. 4. Projected drawings of the tested acetal pinion specimens : N_r denotes the number of revolution of each specimen experienced.

라 치형이 조금씩 마멸되어 들어가는 것을 볼 수 있으며, 작용하중이 2kgf/mm(19.6 N/mm)인 경우에는 Fig. 4 (b)와 같이 총회전수가 증가함에 따라 치형이 크게 변화되었다. 육안으로 보아도 시간이 지남에 따라 마멸깊이가 하중이 1kgf/mm(9.8 N/mm)인 경우보다 크게 증가했다는 것을 알 수 있었다. Fig. 4 (c)에서처럼 작용하중값이 3kgf/mm (29.4 N/mm)인 경우에는 총회전수가 1×10^6 회전에 도달하였을 때 이

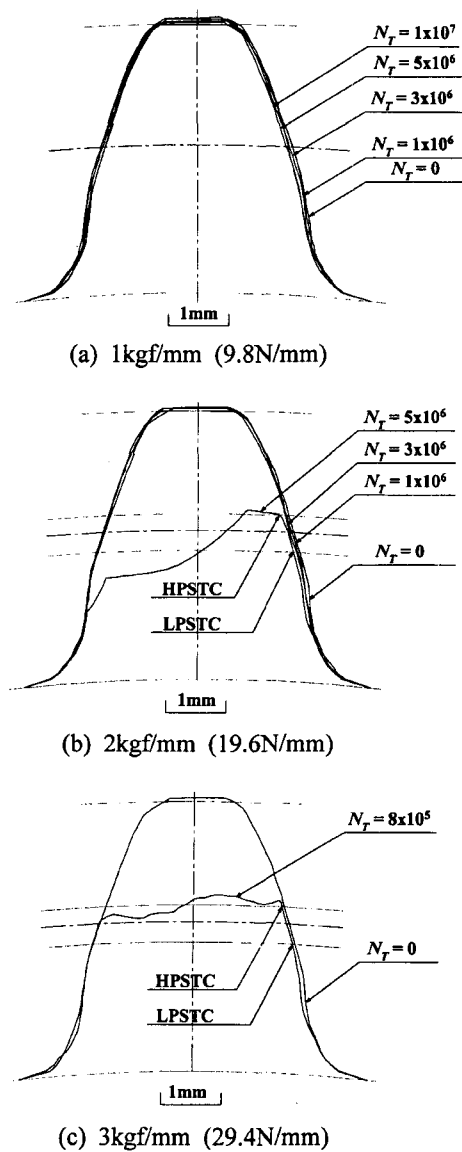


Fig. 5. Projected drawings of the tested Nylon pinion specimens : N_r denotes the number of revolution of each specimen experienced.

미 치형변화량이 해당기어의 제원을 기준으로 한 허용 치형오차값을 초과할 정도에 도달하였고, 이 경우에는 마멸과 더불어 운전소음도 크게 증가하였다. 이러한 사실은 Fig. 3 (a)에 보인 것처럼 하중의 증가에 비례하여 마멸량도 급격하게 증가한다는 분석결과와 잘 일치한다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 나일론피니언의 경우에는 전체적으로 아세탈피니언과 비교해 볼 때 치형변

화량이 극히 미미하였다. Fig. 5 (a)와 (b)는 치면에 작용하는 하중이 각각 1 kgf/mm (9.8 N/mm), 2 kgf/mm(19.6 N/mm)인 경우의 나일론피니언의 치형변화를 나타낸 것으로서 총회전수가 증가하여도 치형은 거의 변화하지 않았다. 전술한 치형측정 방법의 오차를 고려하더라도 치형변화가 매우 적은 것으로 판단된다.

그러나, 작용하중값이 2 kgf/mm(19.6 N/mm)인 경우에는 총회전수 5×10^6 회전에서, 하중값이 3 kgf/mm (29.4 N/mm)인 Fig. 5 (c)에서는 총회전수가 8×10^5 회전에 도달하였을 때 이미 피니언치형이 절손되어 치형변화의 비교, 분석이 제대로 이루어질 수 없었다.

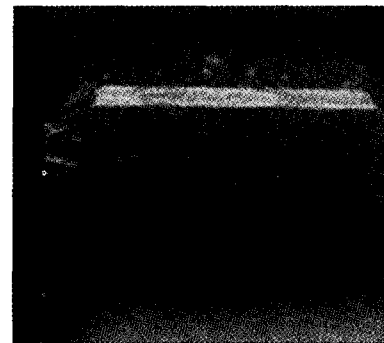
피니언 이(tooth)의 파손에 가장 큰 영향을 주는 것은 전달하중의 크기이다. 즉, 피니언과 기어의 전체 물림과정에서도 한 쌍만의 치형이 물림을 가지는 구간에서는 이(tooth)에 걸리는 하중이 극대화되는 관계로 인하여 파손이 발생하기 쉽다. 따라서, 피니언의 절손이 발생한 Fig. 5 (b)와 (c)에서는 치형의 절손위치를 파악하기 위하여 한 쌍의 치형만이 물림을 갖는 단일치접촉(single tooth contact) 구간의 위치를 표시하였다. 이러한 위치의 경계점으로서 최고 단일치접촉점(HPSTC, Highest Point of Single Tooth Contact)과 최저 단일치접촉점(LPSTC, Lowest Point of Single Tooth Contact)을 통과하는 원을 표시하였으며, 본 연구에서 사용된 피니언과 기어의 재원을 이용하여 계산한 결과, HPSTC와 LPSTC를 통과하는 원의 반경값은 각각 30.2759 mm와 29.6657 mm이었다.

Fig. 5 (b)와 (c)를 보면 피니언의 절손은 하중이 작용하는 치면의 HPSTC에서 발생하여 반대 치면의 피치원(pitch circle) 부근이나 이뿌리쪽을 향하여 진행된다는 것을 알 수 있었다.

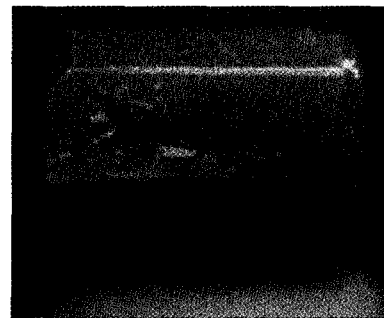
이상과 같은 치형변화를 종합해 볼 때 나일론피니언은 강인한 재질 특성상 일정 회전수까지 급히하중하에서 응력을 견디면서 하중을 전달하다가 치면의 온도가 상승하면서 재료고유의 기계적 특성을 점차 상실하고 그 한도를 넘어서면 치면에 균열(crack)이 발생, 성장하여 결국 절손되는 것으로 사료된다.

3.3. 피니언 치면의 변화

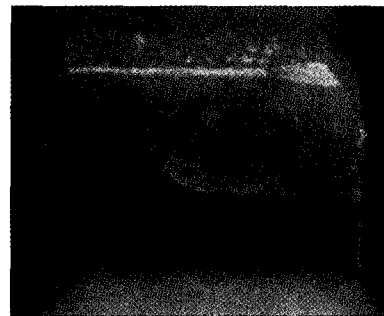
전술한 피니언치형의 형상변화를 통하여 아세탈피니언과 나일론피니언의 마멸특성의 차이점을 파악할



(a) $N_T = 1 \times 10^6$ rev.



(b) $N_T = 3 \times 10^6$ rev.



(c) $N_T = 5 \times 10^6$ rev.

Fig. 6. Worn tooth surface of Nylon pinion specimens : applied load = 2 kgf/mm(19.6 N/mm).

수 있었으며, 보다 정확한 분석을 위하여 실험을 거친 나일론피니언의 치면을 사진기로 촬영하여 관찰하였다.

Fig. 6은 실험이 끝난 나일론피니언의 치면을 접사 렌즈를 사용하여 근접촬영한 사진이며 파손전후의 치면변화가 잘 나타난 작용하중 2 kgf/mm (19.6 N/mm)인 나일론피니언 치형을 대상으로 하였다.

Fig. 6 (a)를 보면 피치선(pitch line) 부근의 치면에 이(tooth)의 길이방향을 따라서 미세한 선(line)과 같은 흔적을 볼 수 있다. 이것은 하중을 전달하는 접

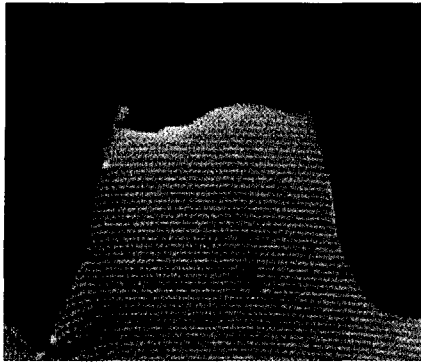


Fig. 7. Breakage of Nylon pinion tooth. : applied load = 3 kgf/mm(29.4 N/mm), $N_T = 8 \times 10^6$ rev.

촉치면의 온도가 상승하면서 용융된 나일론 재료가 상대방 강기어 치면과의 작용으로 인하여 작은 구멍(pit)을 남기면서 이탈되는 대표적인 마멸현상인 피팅(pitting)의 흔적이다.

피팅이 발생한 이후로 치면의 온도가 더욱 상승하면 나일론 재료는 급격하게 재료고유의 기계적 특성을 잃어버리게 되고 나일론피니언 치면에는 Fig. 6 (b)와 같이 균열이 생성된다. 이 상태에서 계속 물림이 진행되면 Fig. 6 (c)에서 보는 바와 같이 벌려진 틈새가 관찰될 정도로 균열이 진전되다가 결국 절손이 발생하는 것으로 판단된다. Fig. 6 (c)의 나일론피니언 치형에 이웃한 이(tooth)는 이미 절손된 상태이다.

Fig. 7은 3 kgf/mm(29.4 N/mm)의 고하중의 작용을 받아 절손된 나일론치형을 보여 준 것으로서 그 파 단면을 Fig. 5 (c)에 도시한 바 있다.

이상과 같이 나일론피니언에서 발생하는 피치점 부근의 피팅현상과 절손은 김충현 등[14]이 실험을 통하여 고찰한 바와 같이 내열성이 약한 나일론재질이 강기어와 물리면서 고하중을 전달하는 과정에서 생성되는 마찰열의 영향을 받아서 전술한 과정을 거치면서 파손되는 기계적인 손상[13]의 한 형태일 것으로 판단된다.

따라서, 나일론피니언을 구동부로 사용하고자 할 경우에는 구동축이 전달하는 토크(torque)에 의하여 발생하는 치면하중의 크기가 파손을 일으키기 않도록 제원설계에 신중을 기해야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

나일론과 아세탈재질의 피니언과 SM45C재질의 강

기어를 이용한 기어내구성 실험을 통하여 전술한 실험조건 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 아세탈피니언의 경우 나일론피니언보다 마멸량이 매우 많았으며, 두 가지 재질 모두 초기마멸이 크게 발생하였다.

(2) 아세탈피니언은 거의 모든 치면에서 균일하게 다량의 마멸이 발생하였으나 파손(failure)은 발생하지 않았다.

한편, 나일론피니언의 경우에는 마멸량이 아세탈피니언보다 현격하게 작아서 치형변화는 매우 적었으나, 하중이 2 kgf/mm (19.6 N/mm)과 3 kgf/mm(29.4 N/mm)인 경우에 최고 단일치접촉점 부근에서 절손되었다.

(3) 사진촬영을 통한 마찰면의 관찰 결과 나일론은 마찰열에 의하여 열화되어 기계적 강도가 감소함으로써 마멸이 이루어진 후 파손이 발생하는 것으로 판단된다. 따라서, 나일론의 경우 아세탈에 비하여 내열성이 뒤떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 기어재료로서의 활용 측면을 고려하여 이상과 같은 실험결과를 종합해 볼 때 파손이 발생하지 않는 하중 범위 내에서는 나일론이 아세탈보다 더 우수한 마멸특성을 보유하고 있음을 알 수 있었으며, 동력전달용 나일론피니언을 사용할 경우에는 단위치 폭당 하중의 크기가 가장 중요한 설계변수가 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이기만, 정동천, 플라스틱 해설과 물성집, 한국플라스틱기술정보, 1992.
2. 한영수, 현동훈, 박원규, 정태형, 성형플라스틱 기어 핸드북, 일진사, 1999.
3. Clerico, M., "Tribological Behaviour of Polyacetals," Wear, Vol 64, pp259, 1980.
4. Kang, T. et al, "Effects of Amorphous Nylon on the Properties of Nylon," Polymer Testing, Vol 16, pp 391, 1997.
5. Bai, M. et al, "Reciprocal Sliding Wear of SiC Particle-reinforced Al-Cu Aluminium Matrix Composites against Stainless Steel, High Speed Tool Steel and Ceramics II. Wear Mechanisms," Wear, Vol. 194, pp 126, 1996.
6. Uchiyama, Yoshitaka, "Survey of Polymer Tribology," Japanese Journal of Tribology, Vol. 37, No. 6, pp 657~665, 1992.
7. 강석춘, 정대원, "오일함침형 고분자량 나일론의 마

- 찰특성에 관한 연구,” 대한기계학회논문집 A권, 제 22권 제 11호, pp2011~2020, 1998.
8. 이성철, 김충현, 권오관, 허용정, “설계인자 보정방법에 의한 사출성형기어의 캐비티 설계,” 대한기계학회 논문집 A권, 제 20권 제 10호, pp3142~3151, 1996.
 - 9.塚本尙久, “プラスチック歯車の強度に関する研究,” 日本機械學會論文集 C編, 45卷, 391號, pp382~390, 1979.
 - 10.塚本尙久, “プラスチック歯車の強度に関する研究(第2報),” 日本機械學會論文集 C編, 46卷, 409號, pp 1116~1126, 1980.
 - 11.塚本尙久, “プラスチック歯車の強度に関する研究(第3報),” 日本機械學會論文集 C編, 47卷, 416號, pp 474~483, 1981.
 - 12.塚本尙久, 矢野 透, 坂井廣志, “ナイロン歯車の齒形變化にもなう騒音及び傳達效率,” 日本機械學會論文集 C編, 48卷, 425號, pp95~105, 1982.
 - 13.塚本尙久, “プラスチック歯車の強度に関する研究(第6報),” 日本機械學會論文集 C編, 50卷, 459號, pp2165~2173, 1984.
 14. 김충현, 안효석, 정태형, “플라스틱 재료의 왕복동 마찰마멸거동,” 한국윤활학회논문집, 제16권 제1호, pp1~8, 2000.