

플라스틱스피기어의 내구성향상에 관한 실험연구

김충현[†] · 안효석* · 정태형**
(2002년 2월 25일 접수, 2002년 6월 21일 심사완료)

Experimental Study for the Durability Enhancement of Plastic Spur Gear

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

Key Words: Wear(마멸), Plastic Spur Gear(플라스틱 스피기어), Durability(내구성)

Abstract

Operating test of power-transmission plastic spur gears were performed inspecting both characteristics of friction-wear and endurance, and suggesting endurance improvement method that either drills internal holes of tooth or inserts metallic pin in the internal hole of tooth and verifying this newly-provided method. In case of acetal gears, amount of friction-wear is observed to increase by development of plastic deformation and increase of tooth stiffness due to brittle material property of acetal. To the contrary, in case of nylon gears, suggested method is shown to drop down the tooth temperature for about 3~10 °C than original gear, thus amount of wear is reduced by over 30% and operating life prolonged by more than 200%. Hence, suggested method is proved to be practically applicable to the plastic gears made by soft polymers such as Nylon.

1. 서론

경량으로서 대량생산에 적합한 플라스틱기어는 산업전반에 걸쳐서 다양하게 사용되고 있으나 플라스틱 재질고유의 특성으로 인하여 강기어(steel gear)에 비하여 내열성과 기계적강도가 뒤떨어진 다. 이러한 플라스틱기어의 단점을 보완하고 강도를 향상시킴으로써 동력전달용으로 활용하기 위한 많은 연구가 이루어져 왔다.^(1-12,15)

실제 운전시 플라스틱기어는 반복변형에 의한 열이 발생하여 치면온도가 상승함으로써 플라스틱재료의 기계적강도가 감소하고 대량마멸 및 조기파손을 초래하는 것으로 알려져 있다.^(4,5)

따라서, 본 연구에서는 이러한 치면온도상승을 억제하기 위한 방안으로서 플라스틱기어 치형내

부의 치중심선상에 구멍을 내거나 강철핀을 삽입 함으로써 히스테리시스 열손실을 줄이거나 응력 집중을 방지하고 발생한 열을 치면 전체와 주변으로 확산시키는 설계방법을 제시하고 기어내구성 실험연구를 수행하여 그 효과를 살펴보았다.

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 나일론과 아세탈, 기어는 SM45C를 각각 사용하여 제작하였으며, 각 시편의 재원은 Table 1에, 피니언재료의 물성치는 Table 2에 각각 나타내었다.

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술연구원

트라이블로지연구센터

E-mail : chkim@kist.re.kr

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

* 회원, 한국과학기술연구원 트라이블로지연구센터

** 회원, 한양대학교 기계공학부

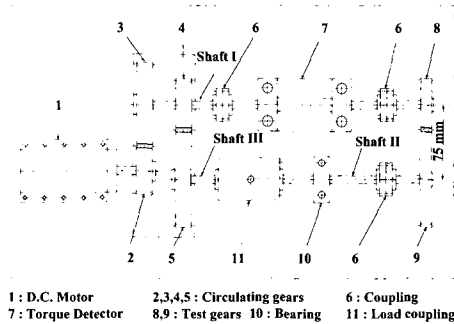


Fig. 1 Schematic view of the gear test rig

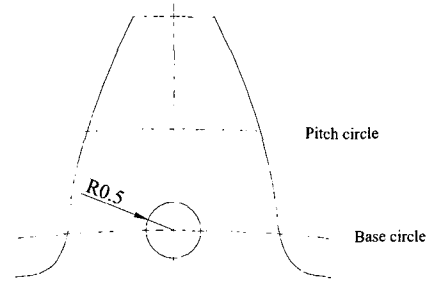


Fig. 2 Drilled hole in a pinion tooth

Table 1 Specification of the test gears

	Pinion	Gear
Material	Nylon / Acetal	SM45C
Elastic modulus [N/mm ²]	2900 / 2620	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 plastic materials

Properties	Nylon	Polyacetal
Specific Weight	1.39	1.63
Tensile strength [MPa]	62	65
Hardness, Rockwell	R111~R118	M94, R118

Table 3 Test conditions

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

피니언시편은 기본 제원을 만족하는 원래의 피니언(이하 Solid), 소정의 위치에 구멍을 뚫은 피니언(이하 Hole), 그리고 강철편을 삽입한 피니언(이하 Insert)의 세 가지로 나누어 제작하였다.

본 실험은 모든 실험조건 내에서 조기파손이 발생하지 않아야 하는 장기간의 내구실험이므로 플라스틱피니언 치형내부에 뚫은 구멍의 크기나 구멍 중심의 위치는 예비실험을 통하여 결정하였다. 우선, 구멍의 크기는 모듈(m)을 기준으로 하여 $m/2$, 또는 $m/4$, 즉 1.0mm와 0.5mm 두 가지, 그리고 구멍 중심의 위치는 피치원과 기초원 두 가지를 고려하였다. 예비실험 결과 피치원상에 반지름 0.5mm의 구멍, 또는 기초원상에 반지름 1mm인 구멍이 있는 경우에는 19.6N/mm (2kgf/mm)의 하중 작용시 1×10^5 회전 이전에 치형이 부러지는 절손이 발생하였다. 따라서, Fig. 2에 보인 바와 같이 Hole 피니언 또는 Insert 피니언의 경우 구멍(또는 강철편) 반지름은 0.5mm, 구멍(또는 강철편) 중심 위치는 기초원과 치중심선의 교점으로 정하였다.

2.3 마찰마멸실험 및 실험자료취득

실험조건은 Table 3에 나타내었다.

시편표면의 불순물을 제거하기 위하여 플라스틱피니언은 에틸알콜, 강기어는 아세톤에 각각 담가 초음파세척기를 이용하여 세척하고 건조기에서 40℃로 48시간 동안 건조시킨 후 시편의 중량을 측정하고 곧바로 실험에 사용하였다.

실험 전후의 플라스틱피니언 시편중량의 변화를 0.0001[g] 단위까지 측정가능한 정밀전자저울로 측정하여 마멸량을 계산하였다.

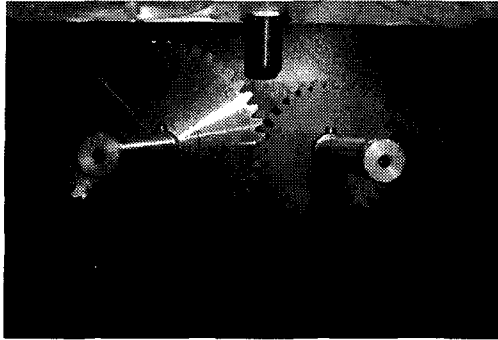


Fig. 3 Temperature measurement

한편, 플라스틱피니언의 피치선상 치면중양의 온도를 계측할 수 있도록 Fig. 3과 같이 비접촉식 적외선온도계를 시험기어상자 상단뚜껑에 설치하고 실험시간 경과에 따른 치면온도변화를 살펴보았다.

2.4 내구성능 평가

Solid 피니언, Hole 피니언, 그리고 Insert 피니언에 대하여 총회전수 1×10^7 회전에 이를 때까지 기어내구성 실험을 수행한 후 비마멸량 변화, 치면온도 변화, 그리고 나일론피니언의 수명변화를 비교, 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비마멸량의 변화

실험에 따른 피니언재질의 마멸특성의 변화를 파악하기 위해 피니언의 마멸량으로부터 체적마멸량을 구한 후 이 값을 다시 피니언의 잇수, 치면의 투영면적, 그리고 총회전수로 나누어 다음과 같이 비마멸량(W_s)⁽¹⁹⁾을 계산하고 비교하였다.

$$W_s = \frac{W_v}{z \cdot 2 \cdot m \cdot b \cdot N_T}$$

- 여기서 W_v : 체적마멸량 [mm³]
- z : 피니언 잇수
- m : 모듈 [mm]
- b : 치폭 [mm]
- N_T : 총회전수 [rev.]

Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나일론과 아세탈피니언의 비마멸량 변화를 나타내었다.

Fig. 4에 보인 나일론피니언의 비마멸량을 살펴보면 Solid 나일론피니언보다 치형내부에 구멍을 뚫거나 강철핀을 삽입한 경우에 마멸량이 크게 감소하였으며 작용하중이 클수록 비마멸량의 감소폭은 더욱 큰 것으로 나타났다.

Solid 피니언에 대한 비마멸량변화를 살펴보면 Hole 피니언의 경우 하중이 9.8N/mm (1kgf/mm), 19.6N/mm (2kgf/mm), 그리고 29.4N/mm (3kgf/mm) 일 때 Solid 피니언 비마멸량의 75%, 55%, 그리고 40% 수준으로 감소하였고, Insert 피니언의 경우에는 각각 70%, 85%, 그리고 35% 수준으로 감소하였다.

치형내부에 구멍이 있는 경우에는 점탄성재료인 나일론재질이 쉽게 변형되면서 하중 전달시 발생하는 히스테리시스 열손실을 감소시키고 강철핀을 삽입한 경우에는 발생한 열을 치면전체로 전달함으로써 국부적인 치면온도상승을 억제하여 내열성이 약한 나일론재질의 열화(degradation)를 지연 또는 감소시킴으로써 마멸발생이 줄어드는 것으로 판단된다.

반면, 아세탈피니언은 Fig. 5에 보인 것처럼 치형내부에 변형을 가함으로써 오히려 비마멸량이 증가하는 것으로 나타났다.

Solid 피니언에 대한 비마멸량변화를 살펴보면 Hole 피니언의 경우 하중이 9.8N/mm (1kgf/mm), 19.6N/mm (2kgf/mm), 그리고 29.4N/mm (3kgf/mm) 일 때 Solid 피니언 비마멸량의 35%, 195%, 그리고 140% 수준으로 변화하였고, Insert 피니언의 경우에는 각각 120%, 220%, 그리고 180% 수준으로 증가하였다. 즉, 하중 9.8N/mm (1kgf/mm)인 Hole 피니언의 경우를 제외하면 모두 마멸량이 급증하였다.

아세탈은 김충현 등⁽¹¹⁾의 왕복동실험 결과에서 밝혀진 바와 같이 취성이 강한 재료로서 변형에 의한 충격흡수효과가 나일론에 비하여 현저히 작은 특성을 가진다. 따라서, 구멍을 뚫은 아세탈피니언은 단면적이 감소하면서 재료 내부에서 소성유동이 발생하여 치형 전체가 휘어지는 변형이 이루어짐으로써 강기어와의 간섭이 발생하는 등 마찰마멸조건이 악화됨으로써 마멸발생량이 증가하는 것으로 사료된다. 또한, 강철핀을 삽입한 아세탈피니언의 경우에는 치형 강성이 커짐으로써

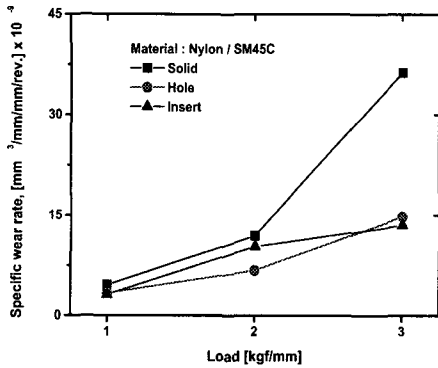


Fig. 4 Variation of specific wear rate for Nylon pinion specimens (1kgf/mm), 1x10⁶ rev.

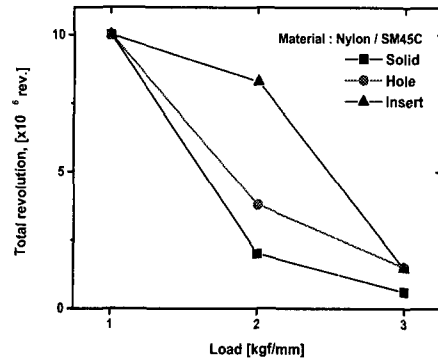


Fig. 6 Variation of fatigue life with load for Nylon pinion specimens

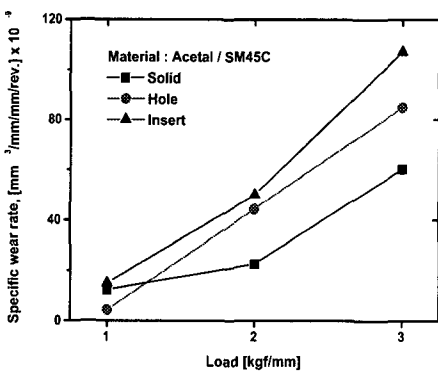


Fig. 5 Variation of specific wear rate for acetal pinion specimens (1kgf/mm), 1x10⁶ rev.

하중이 작용하여도 쉽게 변형되지 못하고 상대방 강기어와 심한 마찰을 일으키면서 마멸이 심화된 것으로 판단할 수 있다.

3.2 나일론피니언의 수명변화

아세탈피니언은 치면에서 대량마멸이 발생하였으나 모든 실험조건하에서 총회전수 10⁷ 회전에 도달할 때까지 절손은 발생하지 않았으며 나일론 피니언의 경우 운전조건에 따라 일정 회전 이후 절손이 발생하였다. 따라서, 운전가능한 나일론 피니언의 총회전수를 하중값을 기준으로 하여 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6을 보면 하중이 9.8N/mm (1kgf/mm)인 경우 모든 나일론피니언에서 총회전수는 10⁷ 회전에 이를 때까지 절손이 발생하지 않았다.

Hole 피니언의 경우 수명변화 경향은 Solid 피니언의 변화와 흡사하여 하중이 증가함에 따라 수명이 급격하게 감소하였으나 Insert 피니언의 경우에는 하중이 19.6N/mm (2kgf/mm)로 증가하여도 수명이 크게 감소하지 않는 것으로 나타났다.

Hole 피니언의 경우, 하중이 19.6N/mm (2kgf/mm)이면 Solid 피니언보다 수명이 190%로, 하중이 29.4N/mm (3kgf/mm)이면 250%로 증가함으로써 나일론피니언의 치형내부에 구멍을 뚫으면 마멸량이 감소할 뿐만 아니라 수명도 증가하는 것으로 나타났다.

한편, Insert 피니언의 수명은 하중이 19.6N/mm (2kgf/mm)와 29.4N/mm (3kgf/mm)일 때 Solid 피니언보다 각각 415%와 240%로 증가하였다. 이러한 수명향상 효과는 Hole 피니언의 경우보다 평균 약 1.5배 정도 큰 것으로서 강철핀 삽입에 의한 내구성향상 효과가 매우 크다는 것을 말해준다.

이전의 연구결과^(4,5)에 의하면 나일론피니언은 치면중앙에서 치면온도가 최고로 나타나며 그로 인하여 기계적특성이 취약해진 재료가 균열을 일으킨다고 하였다. 따라서, 강철핀을 삽입하는 경우에는 강기어와 접촉하면서 발생하는 열이 전열 계수가 큰 강철핀을 따라 치면전체로 전달됨으로써 치면온도가 국부적으로 급상승하는 것을 방지하여 균열생성을 지연시키는 것으로 판단된다.

3.3 나일론피니언의 치면온도 변화

내열성이 뒤떨어지는 나일론피니언의 치면온도 변화와 마멸발생과의 상관관계를 알아보기 위하여 Fig. 7에 실험경과에 따른 치면온도변화를 나타내고 전술한 마멸량 변화와 함께 고찰하였다.

3.3.1 하중이 9.8N/mm (1kgf/mm)인 경우

Fig. 7(a)에서 최고치면온도는 Solid 피니언 > Insert 피니언 > Hole 피니언의 순서로 높게 나타났다. 피니언의 치면온도는 실험 시작과 더불어 서서히 상승한 뒤 일정 온도를 유지하는 것으로 나타났다. 이것은 실험시작 후 하중작용에 의하여 치면온도가 상승하다가 마멸 등에 의하여 치형이 변화되면서 접촉압력이 낮아져서 온도상승요인이 줄어들기 때문인 것으로 판단된다.

Solid 피니언의 경우 치면온도는 30~37℃ 범위를 유지하였다.

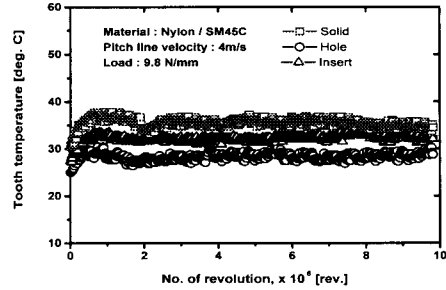
Hole 피니언의 치면온도는 25~30℃ 범위로서 가장 낮았으며 실험 전구간에 걸쳐서 치면온도 변화가 가장 심한 것으로 나타났다. 따라서, 치형 내부의 구멍이 피니언치형의 변형에너지를 흡수함으로써 발열량이 줄어들면서 최고온도가 감소할 뿐만 아니라 변형에너지발생량이 일정하지 못하여 치면온도의 변화도 심한 것으로 판단된다.

Insert 피니언의 치면온도는 27~33℃ 범위에 있었으며 전체 실험구간에 걸쳐서 치면온도가 거의 일정하게 유지되었다. 이것은 전술한 바와 같이 강철편의 열전달효과에 의하여 치면온도가 감소하고 치면전체온도가 일정하게 유지되기 때문인 것으로 사료된다.

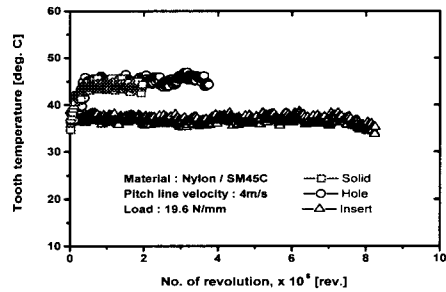
실험시작 전 시험상자 내 공기의 평형온도는 20℃ 정도였으며 실험 시작과 더불어 상승하여 25~27℃ 범위를 유지함으로써 시험기어 상자 내부의 공기온도와 나일론치면 최고온도는 7~10℃ 정도의 차이를 보였다.

3.3.2 하중이 19.6N/mm (2kgf/mm)인 경우

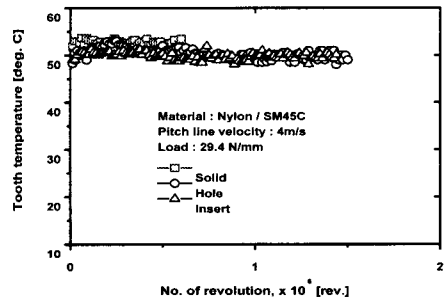
Fig. 7(b)에 보인 것처럼 하중이 9.8N/mm (1kgf/mm)인 경우보다 치면온도가 실험시작 후 훨씬 빠르게 상승하였을 뿐만 아니라 최고치면온도가 5~10℃정도 더 높았다. Solid 피니언의 경우 하중이 9.8N/mm (1kgf/mm)인 경우보다 치면온도가 단시간 내에 급격하게 상승하여 45℃에 도달하였고 2x10⁶ 회전 후 절손되었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Variation of tooth surface temperature of Nylon pinion

Terashima 등⁽⁹⁾의 연구에 의하면 나일론재료의 온도가 10℃ 증가하면 나일론의 인장강도가 약 5~10%정도 감소하며, Du Pont사의 설계자료⁽¹⁴⁾에 따르면 재료에 가해지는 압력이 상승할 경우에는

고분자재질이 연화(softening)되기 시작하는 열변형온도 범위가 급격하게 감소하게 된다는 것을 알 수 있다.

따라서, 하중이 작용하여 높은 응력에 노출된 나일론피니언은 치면온도가 상승함에 따라 나일론의 유리전이온도인⁽¹³⁾ 50℃보다 낮은 45℃ 범위에서도 나일론이 연화되어 소성변형을 일으키면서 마멸이 진행되고 이후 기계적강도가 급격하게 감소하면서 인장축에서 균열이 발생, 성장함으로써 절손되는 것으로 판단된다.

Hole 피니언의 치면온도변화는 Solid 피니언과 거의 유사하였으나 수명은 Solid 피니언의 1.8배 정도로 증가하였다. 이것은 Solid 피니언의 경우 치면온도가 45℃이상의 고온으로 계속 유지된 반면 Hole 피니언은 구멍의 완충작용에 의하여 치면온도가 주기적으로 2℃가량 감소하였다가 다시 상승하는 과정을 반복하면서 열변형이 일어나는 고온에 지속적으로 노출되는 기회가 적어지고 기계적강도가 상대적으로 양호하게 유지되면서 치면에서의 균열 생성시기를 지연시켰기 때문이라고 사료된다.

Insert 피니언의 경우에는 치면온도가 37~38℃를 유지하여 다른 피니언보다 10℃ 정도 낮았으며 수명도 훨씬 길었다. 따라서, 치면온도가 낮을수록 나일론재료 고유의 기계적특성을 유지할 수 있기 때문에 마멸에도 강할 뿐만 아니라 수명을 크게 증가시키는 것으로 볼 수 있다

또한, 대부분의 나일론피니언이 절손이 발생하기 전의 실험구간에서는 Fig. 7(b)에서처럼 치면온도가 감소하는 경향을 보이는데 이것은 치면균열이 성장함에 따라 동력전달이 제대로 이루어지지 않게 되면서 발열량이 감소하기 때문일 것으로 판단된다.

3.3.3 하중이 29.4N/mm (3kgf/mm)인 경우

Fig. 7(c)에 나타난 것처럼 실험 시작 후 약 3분 이내에 치면온도가 45℃ 이상에 도달할 정도로 급격한 온도상승이 관찰되었다. 이 때 시험기어 상자의 공기온도는 29~30℃ 정도로서 나일론 치면온도와는 20~25℃의 차이를 보였다.

Solid 피니언의 경우 치면온도는 53~54℃까지 증가하였고 6x10⁵ 회전 후 절손되었으며 실험을 거친 나일론피니언 치면을 육안으로 관찰해 보면 피치선 근처가 모두 심하게 눌리거나 피팅이 발

생한 것으로 보아 가혹한 환경에 놓여 있었음을 알 수 있었다. 따라서, 실험 시작 후 단시간 내에 나일론피니언 치면온도가 나일론재질의 유리전이온도보다 높아진 후 계속 유지됨으로써 열화된 재질에서 소성유동이 발생하면서 대량마멸을 일으킴과 동시에 기계적강도가 현저하게 감소한 피니언 치면에서 균열이 생성된 후 빠르게 성장하여 조기 절손이 발생한 것으로 판단된다.

Hole 피니언의 경우에는 Solid 피니언보다 치면온도가 느리게 상승하였으며 최고 치면온도는 Solid 피니언보다 2~3℃ 정도 낮아서 50℃ 전후를 유지하였고 수명은 Solid 피니언보다 2배 이상으로 증가하였다. 또한, 나머지 두 가지 하중에서처럼 구멍이 뚫린 경우에는 치면온도가 주기적으로 2~3℃ 정도 감소하였다가 상승하는 현상을 관찰할 수 있었다.

3.4 고찰

3.4.1 PV값과 치면온도의 관계

전술한 바와 같이 하중을 전달하는 과정에서 발생하는 나일론피니언의 치면온도 상승은 마멸과 수명에 지대한 영향을 주게 된다. 이러한 치면온도 상승에 가장 큰 영향을 주는 것으로 알려진 하중, 미끄럼속도에⁽¹⁵⁻¹⁸⁾ 대하여 살펴보았다.

강기어 상당 헤르쯔 응력(steel gear equivalent Hertz stress, P)⁽⁵⁴⁾은 강기어와 플라스틱기어의 물림을 강기어끼리의 물림으로 가정하여 산출한 접촉응력값을 말하며 기어쌍의 제원, 기어재료의 기본 물성, 그리고 작용하중(치면에 수직인 하중) 등을 포함하는 공식 (1)로부터 계산할 수 있다.

$$P = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \frac{P_n}{b} \cdot \frac{2(z_1 + z_2)}{z_1 z_2 m \sin \alpha} \cdot \frac{2}{\frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2}}}$$

$$= \sqrt{\frac{P_n}{\pi b d_1 \sin \alpha} \left(\frac{u+1}{u} \right) \cdot \frac{2}{\frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2}}}$$
(1)

여기서, P_n : 수직하중 [N]
 b : 치폭 [mm]

- m : 모듈 [mm]
 - z : 잇수
 - α : 압력각 [deg.]
 - ν : 포아송비
 - E : 재료의 탄성계수 [N/mm^2]
 - d : 피치원 지름 [mm]
 - u : 기어비 =기어잇수/피니언잇수
- subscript
- 1 : 피니언
 - 2 : 기어

또한, 치면에서의 평균미끄럼속도(average sliding velocity)^(15,17,18)를 V 라고 하면 Fig. 8은 PV 값의 변화에 따른 나일론피니언의 치면온도 상승량[$^{\circ}C$]의 관계를 나타낸 것이다. 이 때 치면온도 상승량은 (실험 시작 후 평형상태에 도달한 치면의 평균치면온도 - 실험 시작 전의 치면온도)로서 구하며 PV 값이 49.03~84.92 [$MPa \cdot m/s$]인 범위에서만 적용된다.

Fig. 8에 Solid, Hole, 그리고 Insert 피니언에서의 PV 값 변화에 따른 나일론피니언의 치면온도 상승량(ΔT)과의 관계를 나타내었으며 수식으로 정리하면 공식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta T &\approx 0.48 PV - 16 && : \text{Solid} \\ &\approx 0.60 PV - 27 && : \text{Hole} \quad (2) \\ &\approx 0.49 PV - 20 && : \text{Insert} \end{aligned}$$

Fig. 8에서 동일하중일 경우 치면온도 상승량은 Solid 피니언이 가장 크고, Insert 피니언이 가장 작다는 것을 알 수 있다. 또한, Hole 피니언은 작용하중이 9.8N/mm (1kgf/mm)일 경우 치면온도 상승량이 Insert 피니언처럼 작지만 하중이 29.4N/mm (3kgf/mm)로 커지면 치면온도가 급격하게 높아져서 Solid 피니언 수준에 도달하는 것으로 나타났다.

따라서, 나일론피니언 치형내부에 구멍을 뚫거나 강철핀을 삽입하면 치면온도상승을 억제하는 효과가 있다는 것이 밝혀졌으며, 특히 강철핀을 삽입하는 것이 구멍을 뚫는 것보다 치면온도상승 억제효과가 보다 우수함을 알 수 있다.

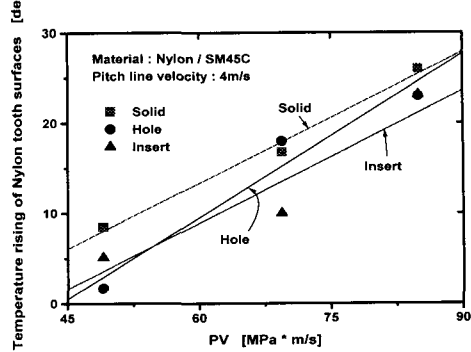


Fig. 8 Temperature rising of tooth surface versus PV value

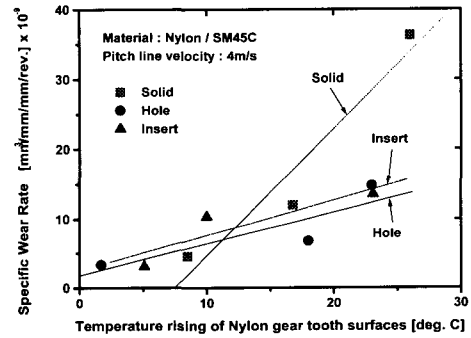


Fig. 9 Variation of specific wear rate with temperature rising of tooth surface

3.4.2 치면온도와 비마멸량과의 관계

나일론피니언의 치면온도 상승(ΔT)에 따른 비마멸량(W_s) 변화를 Fig. 9에 나타내었으며, 이들 관계를 수식으로 표현하면 공식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} W_s &\approx 1.8 \times 10^{-9} \Delta T - 1.4 \times 10^{-8} && : \text{Solid} \\ &\approx 4.6 \times 10^{-10} \Delta T + 1.8 \times 10^{-9} && : \text{Hole} \\ &\approx 5.1 \times 10^{-10} \Delta T + 2.5 \times 10^{-9} && : \text{Insert} \end{aligned} \quad (3)$$

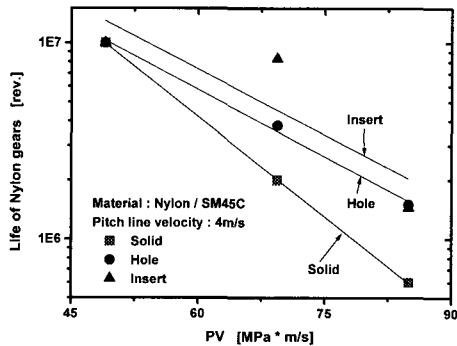


Fig. 10 Life of Nylon gears versus PV value

우선, Solid 피니언의 경우 치면온도 상승량이 10℃ 이하인 경우에는 비마멸량이 Hole 피니언이나 Insert 피니언과 큰 차이가 없었으나 치면온도 상승량이 커질수록 비마멸량이 급격하게 커지는 것을 볼 수 있다. 반면, Hole 피니언이나 Insert 피니언은 Solid 피니언에 비하여 치면온도 상승에 따른 비마멸량의 증가율이 현저하게 감소하였을 뿐만 아니라 그 변화양상이 서로 유사하였다.

Fig. 8과 Fig. 9를 종합하여 보면 Hole 피니언과 Insert 피니언의 경우 Solid 피니언에 비하여 동일 하중을 전달할 때 발생하는 치면온도 상승폭이 감소함으로써 내열성이 떨어지는 나일론피니언의 마찰마멸특성이 대폭 개선되어 비마멸량 증가율이 현저하게 감소하는 등 내구성이 크게 향상된 것으로 나타났다.

3.4.3 치면온도와 수명과 관계

Fig. 10은 PV값과 나일론피니언의 수명(NT) 변화를 나타낸 것으로서 이들 사이의 관계를 수식으로 표현하면 공식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 N_T &\approx 10^{-0.034PV + 8.7} && : \text{Solid} \\
 &\approx 10^{-0.023PV + 8.1} && : \text{Hole} \quad (4) \\
 &\approx 10^{-0.022PV + 8.2} && : \text{Insert}
 \end{aligned}$$

Fig. 10을 보면 동일하중에서 나일론피니언의 수명은 항상 Insert > Hole > Solid 피니언의 순서로 긴 것으로 나타났다. 이것은 치형내부에 구멍을 뚫거나 강철편을 삽입할 경우 Fig. 8과 Fig. 9에서 살펴본 바와 같이 나일론피니언의 치면온도

상승을 억제함으로써 마멸발생을 감소시킬 뿐만 아니라 나일론피니언 치면에서의 균열생성을 방지 또는 지연시키기 때문이라고 판단된다.

4. 결론

전술한 실험조건 내에서 강기어와 맞물리는 플라스틱기어의 내구성실험을 통하여 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

(1) 나일론피니언의 치형내부에 구멍을 뚫거나 강철편을 삽입할 경우, 치면온도가 평균 3~10℃ 정도 낮아지면서 마찰마멸특성이 개선됨으로써 나일론피니언의 마멸량이 30%이상 감소할 뿐만 아니라 수명이 200% 이상으로 증가하여 치면내구성을 향상시킴과 동시에 피로수명을 연장시키는 것으로 나타났다.

이것은 내열성이 약한 나일론피니언의 치면온도를 낮춤으로써 고온에 의한 나일론재질의 소성유동 발생 및 기계적강도 저하현상을 방지하여 마멸진행속도를 완화시키고 균열생성시기를 지연시키기 때문이라고 판단된다.

(2) 반면, 아세탈피니언에 구멍을 뚫거나 강철편을 삽입할 경우에는 일부 저하중에서의 실험을 제외하면 원래 그대로의 피니언보다 마멸이 증대되는 것으로 나타났다. 이것은 취성이 강한 아세탈피니언 치형내부에 구멍을 뚫거나 강철편을 삽입할 경우 각각 소성변형발생과 강성증대로 인하여 강기어와 과도한 마찰을 일으킴으로써 마멸량이 증대되는 것으로 사료된다.

(3) 본 연구에서 제안한 플라스틱스피기어의 내구성향상 방안은 나일론과 같이 내열성이 떨어지고 점탄성인 재료로 만든 플라스틱기어에 적용할 경우 치면 내구성 향상 및 수명증대 효과가 탁월한 것으로 밝혀졌다.

참고문헌

(1) Adams, C. E., 1986, *Plastics Gearing ; Selection and Application*, Marcel Dekker, Inc., New York.
 (2) Macdermott, C. P. and Shenoy, A. V., 1997, *Selecting Thermoplastics for Engineering Application, 2nd Ed.*, Marcel Dekker, Inc., New York.

- (3) Maxwell, J., 1999, *Plastics ; The Layman's Guide*, The University Press, Cambridge.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Tukamoto N., 1984, "Investigation about Load Capacity of Nylon Gears, when Tooth Surface Finishing of Mating Steel Gears is Different (2nd Report ; Abrasion of Nylon Gear Meshing with Ground Steel Gera)," *Bulletin of the JSME*, Vol. 27, No. 229, pp. 1529~1536.
- (7) Terashima, K., Tsukamoto N., and Shi J., 1984, "Development of Plastic Gears for Power Transmission (Power Transmission Mechanism of Plastic Gears)," *Bulletin of the JSME*, Vol. 27, No. 231, pp. 2061~2068.
- (8) Terashima, K., Tsukamoto, N., and Nishida, N., 1986, "Development of Plastic Gears for Power Transmission (Design on Load-Carrying Capacity)," *Bulletin of the JSME*, Vol. 29, No. 250, pp. 1326~1329.
- (9) 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.
- (10) Tsukamoto, N., Yano, T., Sakai, H., "Noise and Transmission Efficiency under Deformation of Tooth Form of Nylon Gears," *Bulletin of the JSME*, Vol. 25, No. 207, pp. 1465~1473.
- (11) Kim, Choong Hyun, Ahn, Hyo-Sok, and Chong Tae Hyong, 2000, "Reciprocating Sliding Wear of Nylon and Polyacetal Against Steel," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 24, No. 3, pp. 786~793.
- (12) Kim, Choong Hyun, Lee, Sung-Chul, Ahn, Hyo-Sok, and Chong, Tae Hyong, 2000, "Wear and Operation Characteristics of Acetal and Nylon Pinion Against Steel Gear," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 24, No. 9, pp. 2387~2396.
- (13) Ahn, Tae-Wan, Lee, Dong-Ho, Park, Yee-Soon, Lee, Sang-Won, and Chong, Han-Mo, 1987, *Physical Polymer Science*, Daekwang Publishing Co., Ltd.
- (14) DuPont Engineering Polymers, 2000, "General Principles for DuPont Engineering Polymers," pp. 57~70.
- (15) Tsukamoto, N., Taki, T., and Nishida, N., 1987, "A Study on Strength Design Methods of Plastic Gears," *Transactions of the JSME, C*, Vol. 53, No. 486, pp. 432~435.
- (16) Terashima, K., Tsukamoto, N., Nishida, T., and Seki, K., 1985, "A Study on the Power Translation Plastic gears," *Transactions of the JSME, C*, Vol. 51, No. 469, pp. 2309~2315.
- (17) Dudley, D. W., 1984, *Handbook of Practical Gear Design*, McGraw-Hill.
- (18) Colbourne, J. R., 1987, *The Geometry of Involute Gears*, Springer-Verlag.
- (19) Tsukamoto, N., Maruyama, H., and Mimura H., 1985, "Effect of Reducing Friction of Polyacetal in Gears," *Transactions of the JSME, C*, Vol. 57, No. 533, pp. 230~235.