

전조가공을 이용한 기어의 치형오차수정에 관한 연구

류성기[#], Seizo Uematsu^{*}

A Study on Correction of the Gear Tooth Profile Error by Finish Roll Forming

Sung-Ki Lyu[#] and Seizo Uematsu^{*}

ABSTRACT

This study deals with the correction of gear tooth profile error by finish roll forming. First, we experimentally confirmed that the tooth profile error is a synthesis of the concave error and the pressure angle error. Since various types of tooth profile errors appear in the experiments, we introduced evaluation parameters for rolling gears to objectively evaluate profile quality. Using these evaluation parameters, we clarified the relationship among the tooth profile error, the addendum modification factor (A. M. factor), and the tool loading force.

We verified the character of concave error, pressure angle error, tool loading force and number of cycles of finish roll forming by using a forced displacement method. This study makes clear that tool loading force and number of cycles of finish roll forming are very important factors that affect involute tooth profile error.

The results of the experiment and analysis show that the proposed method reduces concave and pressure angle errors.

Key Words : Finish Roll Forming(전조가공), Tool Loading Force(공구압축력), Profile Error(치형오차), Concave Error(형상오차), Pressure Angle Error(압력각오차)

1. 서론

산업이 발달함에 따라 기어는 고정밀도, 고내구성, 소형·경량화 등이 요구되고 있다.^{1,2)} 특히, 소음을 감소시키고 소형·정밀화를 이루기 위해 기어의 고정도가공에 관한 연구가 요구되고 있다. 그러나 한국의 기어설계, 가공 및 검사기술은 일

본, 미국, 유럽에 비해 부족한 부분이 많으며, 일반적인 기어가공방법으로 KS 0~1급의 기어를 가공하기가 어렵다. 따라서 대부분의 정밀도를 요구하는 기어는 치형을 절삭한 후 일반적으로 세이빙가공과 연삭을 하고 있다.

근래 전조가공이 세이빙가공 보다 양산성이 우수하여 획기적인 기어의 후처리 가공법으로 떠오르

접수일: 2004년 9월 18일; 게재승인일: 2005년 1월 21일

교신저자: 경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구소

E-mail : sklyu@nongae.gsnu.ac.kr, Tel : (055)751-6072

* Yamagata University, uematsu@m3.dewa.or.jp

근래 전조가공이 세이빙가공 보다 양산성이 우수하여 획기적인 기어의 후처리 가공법으로 떠오르고 있다. 전조가공은 포드 자동차에 의해서 처음 제안되었으며³, 전조가공에 관한 연구는 일본, 미국 등에서 다소 연구되고 있다.^{4,7}

그러나 국내에서는 기어 전조가공에 관한 연구를 수행하고 있지 않기 때문에 기어의 마무리 가공 방법 중 획기적인 방법으로 주목받고 있는 전조가공에 관한 연구가 필요하다.

강제변위방식은 기존의 정하중방식 보다 고정도의 치형을 얻을 수 있는 새로운 기어전조법이다. 이 방식은 스퍼기어를 정하중으로 전조하는 경우 문제가 되고 있는 형상오차와 압력각오차의 억제대책으로 개발한 것이다.

본 연구에서는 강제변위방식의 전조가공원리, 전조가공특성을 연구하고, 가공정도의 관점에서 강제변위방식을 생산현장에서 실용적으로 적용 할 수 있도록 전조횟수, 공구에 주는 설정변위량과 피가공기어 치면상의 변형량 δ_{max} , δ_{ca} , δ_T , δ_a 과의 관계를 실험에 의하여 구하였다. 그 결과 치형오차의 발생을 억제하여 고정도가공이 가능한 조건을 설정하였다. 그리고 그 가공조건을 기초로 강제변위방식의 가공정도, 치형오차의 억제기구와 전조가공치면의 향상 등에 대하여 고찰하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 전조장치

전조장치는 1공구 1소재형이며, 자유구동방식으로 전조한다. 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타냈다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 공구는 ①에 있는 랙(rack)을 이용하였으며 공구의 구동속도는 4.5 mm/min 이다.

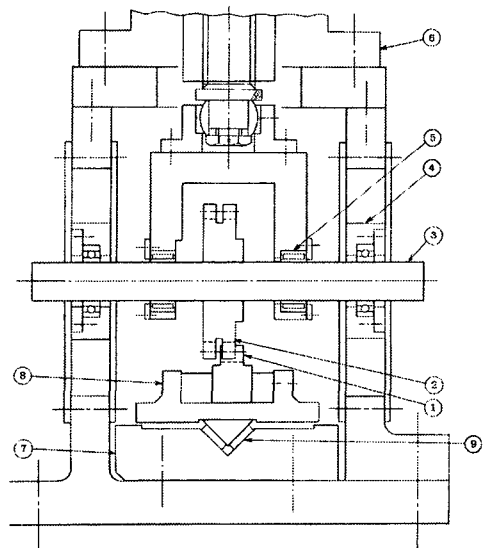
공구압축력 F는 가압부 ⑥의 강제변위용 나사 압축식으로 가압한다. 가압부에 사용한 나사는 외경 70 mm, 피치 20 mm, 나사산 높이 5 mm의 대형 사각나사이다. 이것과 맞물리는 나사길이는 120 mm이다. 이 나사의 스프링 상수 K3는 9.7 kN/μm, 나사부의 면압강도는 축력 30 kN에 대하여 5 MPa로 설계되어 있다. 공구안내부는 공구안내대 ⑦과 공구홀더⑧로 구성되어 있으며, 이들 사이에는 직선운동용 V형 축받침 ⑨를 사용하고 있다. 공구는 홀더에서 누르는 나사로 고정되어 있고, 홀더는 안내대 위를 전·후방향으로 운동한다. 피가공기어 ②

는 공구 윗부분으로부터 압력을 받아 공구의 직선운동과 더불어 전조된다. 피가공기어의 설치축에는 공구압축력을 지지하는 축받침과 축을 상하로 안내하는 축받침 ④가 있다.

공구압축력을 지지하는 축받침에는 기본 동정격하중 23 kN의 원통 축받침 2개를 사용하였고, 축받침간 거리는 90 mm 이다. 축의 축경은 ϕ 30 mm, 축받침간의 휨강도는 0.55 GN/m이다. 축과 축받침 그리고 축과 기어의 갭(gab)은 25 μm이다.

2.2 공구와 피가공기어의 제원

시험기어는 모듈용(Module)이 5인 스퍼기어를 사용하였으며, 공구는 랙(rack)을 사용하였다. 공구와 피가공기어의 제원을 Table 1에 나타냈다. 피가공기어의 잇수는 22이고, 전위계수는 0, 0.52 이다.



①Roll forming tool(rack) ②Test gear ③Shaft
④⑤Pedestal ⑥Compression part ⑦Toolguider
⑧Tool holder ⑨V-type pedestal

Fig. 1 An experimental apparatus of roll forming

이것은 동시맞물림점의 변화와 치형오차의 관계를 조사할 목적으로 설정하였다. 본 연구에 사용한 시험용 기어의 재질은 SM45C 시판재료를 사용하였다.

공구 이의 크기는 11.25 mm이고, 이끝에는 0.7 mm의 모따기를 하였으며, 기준 피치선으로부터 윗부분의 직선부는 4.3 mm이다. 공구는 열처리 후 연삭 가공하였다.

시험기어는 호브커터(hob cutter)를 사용하여 호브 가공하였다. 시험기어의 치형은 치면 거칠기가 약 10 μm, 치형정도는 압력각 오차가 KS 0~4급, 치형의 형상(concave, 凹凹)오차는 KS 0~2급으로 나타났다.

시험기어의 치면은 공구를 맞물리게 만들어 전조할 때 회전방향 전방의 치면을 맞물림측치면, 회전방향 후방의 치면을 피동측치면이라고 한다.

시험기어의 이(齒)는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 전조이(齒)와 기준이(齒)로 되어 있다. 전조이는 전조가공실험을 할 때 사용하며, 기준이는 전조가공 후 전조이의 변형량을 측정할 때, 치형과 이끝곡선을 비교할 때 사용한다. 이(齒)폭은 두 기어 모두 10 mm이다.

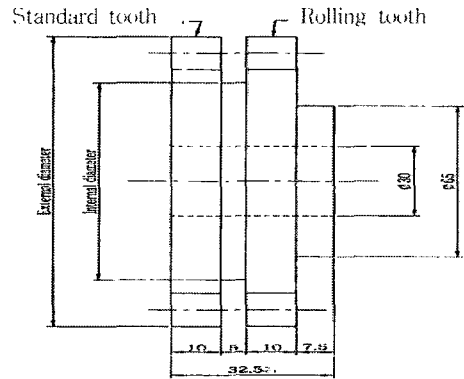


Fig. 2 A shape of the test gear

Table 1 Dimensions of roll forming tools and test gears

	Tool	Test gear	
Module(m)		5	
Number of teeth(z)	11	22	
Pressure angle(deg)		20°	
Tooth width(mm)	17.5	10(roll forming)	
Coefficient of profile shift		0	0.52
External diameter		120	125
Profiling tool		Hob cutter, Pinion cutter	
Material	SK5	SM45C	
Hardness	HRC63	HRB80	
Gear class		Press. angle error KS0~4 Concave error KS0~2	

2.3 전조효과의 평가법

전조기어의 치형곡선은 동시 맞물림점의 수, 공구압축력의 설정값 등 실험조건에 따라 다양하게 변화한다. 전조효과의 평가는 치형곡선의 형상변화를 나타내는 양으로 평가하였다. 치형의 형상변화를 나타내는 양은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 최대 변형량 δ max, 형상오차 δ ca, 이끝부근의 변위 δ T와 압력각오차 δ α 로 나타낸다.

δ max는 전조전후의 치형곡선을 비교한 최대 변형량이다. δ ca는 전조후의 치형곡선의 이끝과 이뿌리 극대점의 접선을 긋고 접선을 기준으로 측정 한 변형량이다. 이것은 맞물림 피치점 부근에서 발생하며 전조후의 형상오차를 나타낸다. δ T는 이끝원에서 이끝부의 형상이 변화한 변형량이다. δ α 는 압력각 오차를 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전조횟수에 따른 치형오차의 발생정도

표준기어를 설정 압축력 9.8 kN으로 반복 전조 실험하여 얻은 치형의 예를 Fig. 4(a)에 나타냈다. 실선과 파선은 각각 전조 전·후의 치형곡선을 나타낸다. 전조시험결과 변형량은 치면에 따라 같은 것이 아니라 중앙부근에서 크게 나타났다. 맞물림측의 치면에서는 이(齒)의 중앙부와 이뿌리사이에서 변형량이 12~16 μm로 나타났다.

피동측의 치면은 전조전의 치형에 따라 거의 균일하게 변형되었다. 전조실험을 5회 반복 실험한 경우 변형량은 이(齒)의 중앙부에서 약 25 μm , 이끝과 이뿌리측에서 약 10 μm 로 나타났다.

전위계수 0.52의 기어를 설정 압축력 9.8 kN으로 전조실험을 반복하여 얻은 치형의 예를 Fig. 4(b)에 나타냈다.

전조실험결과 1회의 전조로 피동측치면과 맞물림측 치면의 치형중앙부에서 약 20~25 μm 의 변형량이 나타났으며, 전조실험을 반복함으로써 30~35 μm 까지 증가하였다. 피동측 치면의 이끝과 이뿌리 부분에서는 변형이 적게 나타났다.

맞물림측 치면에서는 변형량이 이(齒)의 중앙과 이뿌리사이에서 크게 나타났으며, 이끝부분에서는 적게 나타났다.

그리고 Fig. 4에서 알 수 있듯이 치형상의 변형량 분포는 전위기어와 표준기어가 다르게 나타났다. Fig. 5는 표준기어에 공구 압축력을 9.8 kN으로 전조했을 때 전조횟수와 압축량의 관계를 나타냈다. δ_{max} 는 피동측치면과 맞물림측치면 모두 전조가공 횟수의 증가에 따라 증가하는 경향으로 나타났다. δ_{ca} 와 δ_{T} 는 전조실험을 5회 반복 실험한 경우 거의 일정한 값에 도달하는 것으로 나타났다.

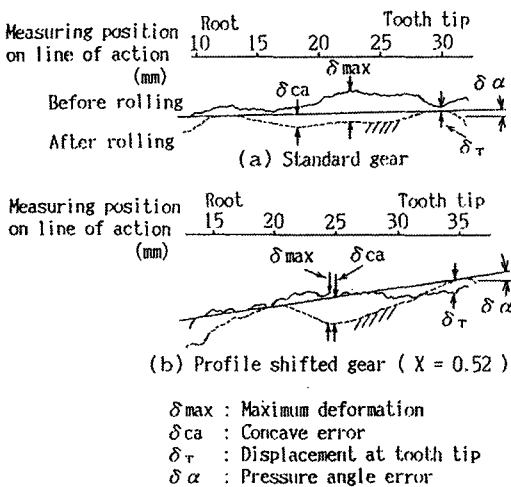


Fig. 3 Plastic deformation on tooth profile

이 결과 치형곡선의 모양은 비교적 전조가공 초기에 결정되며, 전조의 반복횟수를 증가시키면 δ_{max} 가 주로 증가하는것을 알 수 있었다.

3.2 공구압축력과 압축량의 관계

Fig. 6은 전위계수 0.52의 기어를 강제변위방식으로 전조한 시험기어의 공구압축력 F_{max} 과 δ_{max} , δ_{ca} , δ_{T} 의 관계를 나타냈다. 피동측치면에서 F_{max} 를 크게하면, 최대 변형량 δ_{max} 는 증가하였다. 형상오차 δ_{ca} 는 F_{max} 를 10 kN으로 하였을 때 발생하였고, F_{max} 가 10 kN 이상일 경우 다소 증가하였다. δ_{T} 는 F_{max} 가 12.5 kN까지는 양의 값이지만, F_{max} 가 그 이상의 값이 되면 음의 값으로 나타났다.

맞물림측치면에서는 δ_{max} 과 δ_{ca} 는 피동측치면과 같은 경향으로 나타났다. 그러나 δ_{T} 는 F_{max} 를 큰 값으로 전조하여도 양의 값으로 나타났다.

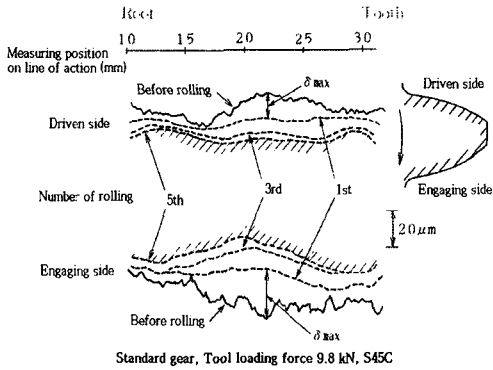
여기에서 얻어진 압축량 δ_{ca} , δ_{T} 를 KS의 치형 정도의 허용값과 비교하였다. 모듈 5, 피치원직경 110 mm의 기어에서는 치형정도의 허용값은 KS 0급에서 6 μm , 1급에서는 8 μm 이다. 전조 후에 발생하는 홈 δ_{ca} 가 지나치게 크면 전조에 따른 정도의 개선은 이루어지지 않는다.

δ_{ca} 는 F_{max} 값이 12.5 kN 이내에서는 피동측치면과 맞물림측 치면 모두 약 6 μm 이하로 나타났으며, KS 0급의 범위 안에 들어갔다. δ_{max} 는 약 18 μm 이하로 나타났으며, 치면의 거칠기는 향상되었다.

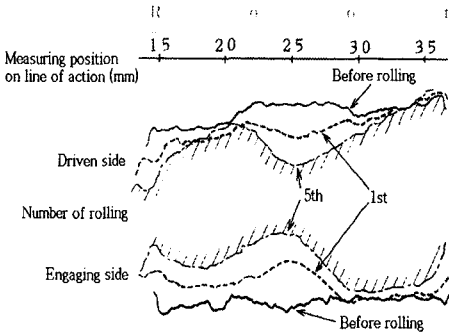
그리고 Fig. 6(a)에서 알 수 있듯이 피동측 치면의 이끝 압축량 δ_{T} 는 F_{max} 이 12.5 kN 이상이 되면 음의 값으로 나타났다. 따라서 F_{max} 을 10~12.5 kN에서 전조의 반복횟수를 5회로 하면, δ_{T} 는 피동측치면에서는 양의 값이 되며, δ_{ca} 는 KS 0급의 범위가 된다.

표준기어를 강제변위방식으로 전조한 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 피동측 치면과 맞물림측치면 모두 공구반복횟수를 5회로 하면, δ_{T} 는 피동측치면에서는 양의 값이 되며, δ_{ca} 는 KS 0급의 범위가 된다.

압축력 F_{max} 를 크게 하면 δ_{max} 는 증가하였다. 그러나 δ_{ca} , δ_{T} 는 δ_{max} 보다 작게 나타났다.



(a) Coefficient of profile shift = 0



Coefficient of profile shift 0.52, Tool loading force 9.8 kN, S45C

(b) Coefficient of profile shift = 0.52

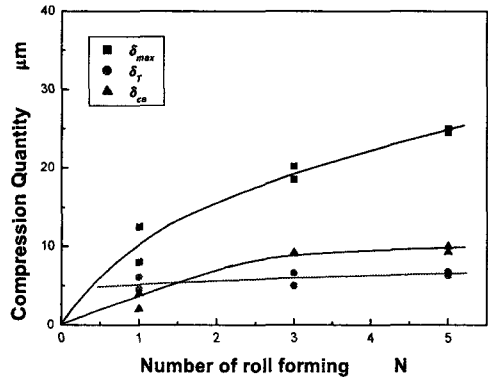
Fig. 4 The tooth profile of roll forming

따라서 F_{lmax} 를 적당히 설정하면 δ_{ca} 가 작 으면서, δ_{max} 는 10~15 μm 가 되며, 치면의 거칠기 가 향상되었다.

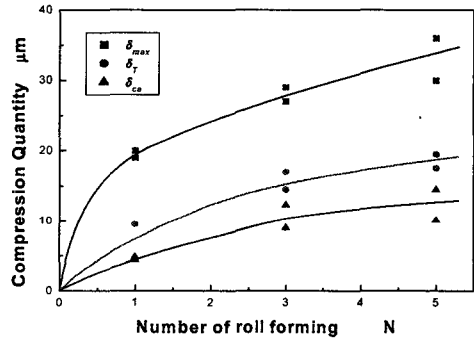
Fig. 6, 7에서 알 수 있듯이, 강제변위방식으로 전조하는 경우, F_{lmax} 를 10~12 kN으로 설정하고, 전조회수를 5회로 하면, δ_{max} 는 10~15 μm 가 되 며, 치(齒)면의 거칠기가 향상되었다. 그리고 δ_{ca} 와 δ_T 는 치형정도의 허용값 KS 0~1급의 범위가 므로 이 조건은 고정도 가공조건이 된다.

3.3 전조치형의 이론가공정과 전조가공치형

강제변위방식으로 얻어진 치형을 고찰한 결과, 기어를 전조하면 전조가공치형은 완만한 오목(凹) 형이 되고 3~4 μm 정도 치형이 수정되어 치형정도는 KS 0급으로 확인되었다.



(a) Driven side



(b) Engaging side

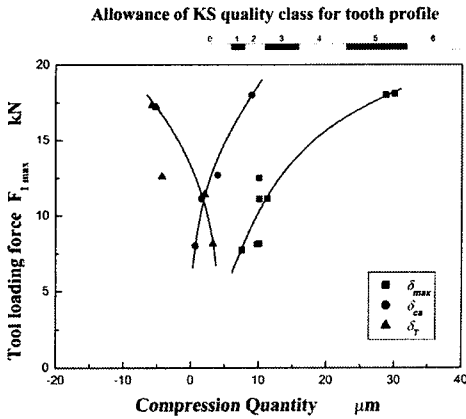
Fig. 5 The relationship between the number of roll forming and compressive quantity

그러나 실험에서 정한 고정도 치형이 얻어지는 조건의 범위에서는, δ_{ca} 는 $\delta_{max} > \delta_{ca}$ 인 경우 가 되기 때문에 δ_{max} 와 δ_{ca} 의 차이값이 가공전 치형의 정도 향상에 기여하게 된다.

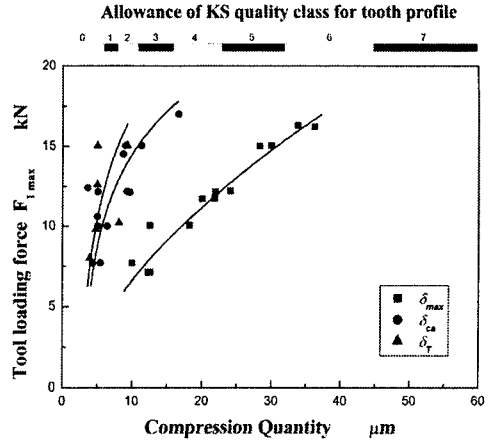
따라서 실험에서 정한 고정도 치형이 얻어지는 조건을 기초로 가공전 치형의 향상정도를 고찰하였 다. Fig. 8(a)는 전조가공전(前) 피동측 치면의 치형 곡선에서 압력각오차 δ_a 만을 주어 강제변위방식 에서 전조한 경우의 결과를 나타낸 그림이다.

그림의 횡축은 전조전의 압력각오차를 나타내 고 있다. 양의 값은 이끝측이 이뿌리측보다 높게 되고, 음의 값은 사라지는 모양을 나타낸다.

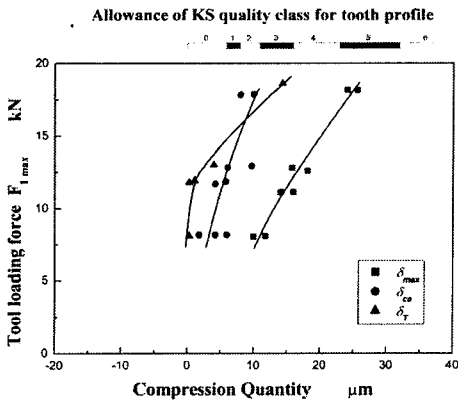
전조전의 정도가 KS 1급 이하의 치형은 전조가 공을 함으로써 1~2급 개선되었다.



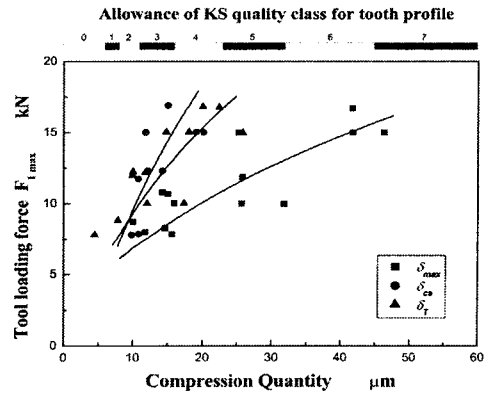
(a) Driven side



(a) Driven side



(b) Engaging side



(b) Engaging side

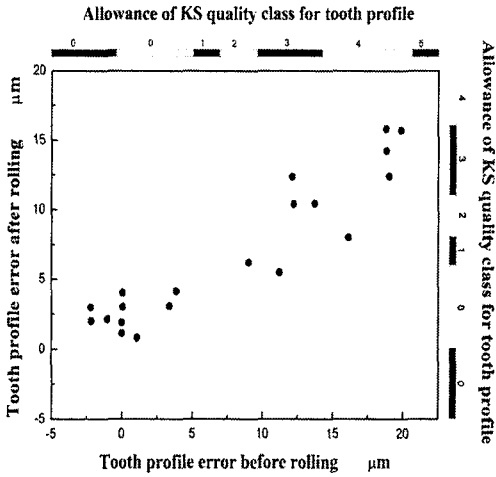
Fig. 6 The relationship between tool loading force and compressive quantity (Coefficients of profile shift = 0.52)

Fig. 7 The relationship between tool loading force and compressive quantity (Coefficients of profile shift = 0)

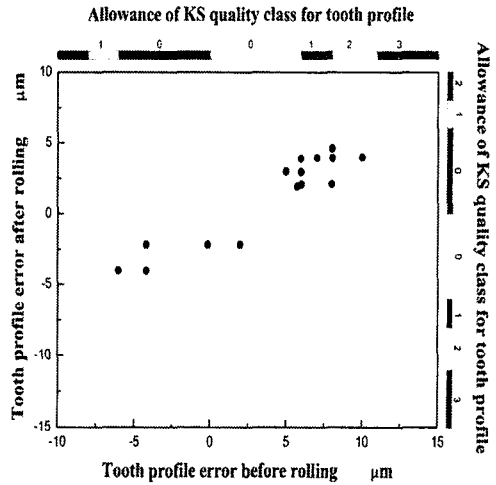
정도가 높은 0급의 치형은 조금 작아지나, 정도의 등급은 같은 0급의 범위에 있다.

그러나 전조후의 치형은 부드러운 오목(凹)모양이 되고, 형상오차 δ_{ca} 가 발생하였다. Fig. 8(b)는 맞물림측 치면에 압력각오차를 주는 강제변위방식에서 전조한 경우의 결과를 나타낸 그림이다. 결과는 피동측치면과 같은 경향으로 나타났다. 정도가 높은 0급의 치형은 조금 작아지나, 정도의 등급은 같은 0급의 범위에 있다. 전조전의 정도가 KS급 이하의 치형은 전조가공을 함으로써 1~2급 개선되었다.

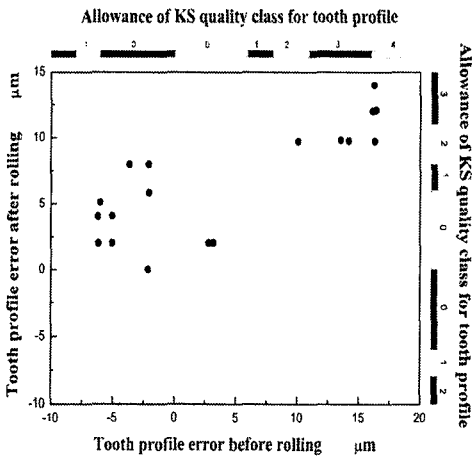
Fig. 9(a)는 피동측 치면에서 전가공치형의 곡선을 1개의 오목(凹)모양 혹은 볼록(凸)모양의 오차를 주어 전조하는 경우의 실험결과를 나타낸 그림이다. 오차는 맞물림 길이 20 mm의 범위에서 반주기의 sin파형으로 주고, 오차의 값은 sin파의 진폭으로 표시한다. 횡축은 전조 전에 준 오차를 나타내며, 종축은 전조 후에 얻은 치형곡선의 오차를 나타낸다. 오차가 없는 치형을 전조하면 δ_{ca} 는 4.5 μm 로 발생한다.



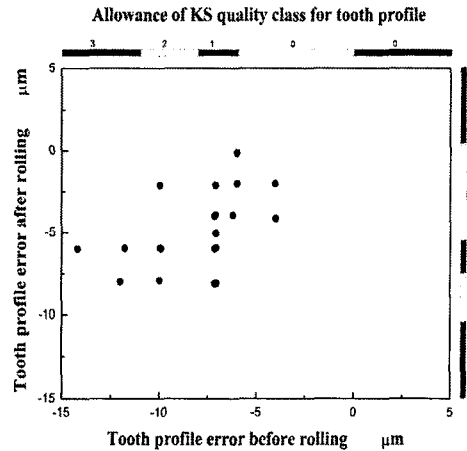
(a) Driven side



(a) Driven side



(b) Engaging side



(b) Engaging side

Fig. 8 Improvement of pressure angle error by F.D.M

Fig. 9 Improvement of concave error by F.D.M

전조 할 때에 δca 성분이 개선된 전조전후의 관계는 구배가 약 1/2, δca 와 δa 의 합을 구하면 약 2/3이 된다. 오차로서 치형에서 오목(凹)형 혹은 볼록(凸)형을 주는 경우, 전가공치형의 오차가 볼록(凸)형으로 비교적 큰 치형정도가 1급 이하의 경우, 전조 후는 1~2급 개선되었다. 오차가 볼록(凸)형으로 치형정도가 KS의 0급의 범위에 있는 경우, 전조 후의 정도는 조금 작아지지만, 같은 0급의 범위에 있게 된다.

전조전의 오차가 오목(凹)형의 경우, 치형정도는 이론상은 개선되지 않으나, 실측값은 다소 개선되었다.

Fig. 9(b)는 맞물림측치면에서 하나의 오목(凹)형 혹은 볼록(凸)형의 오차를 주어 전조하는 경우의 해석결과를 나타낸 그림이다. 오차의 치형은 반주기의 sin파형으로 주어진다. 전조전의 오차는 오목(凹)형 혹은 볼록(凸)형과 함께 개선되고 전조전후의 정도의 관계는 3/10으로 나타났다.

4. 결 론

기어 가공에서 문제가 되고 있는 치형의 형상오차와 압력각오차의 억제대책으로 제안된 강제변위 방식과 그 가공특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전조가공을 반복 수행한 결과 δ_{ca} 와 δ_T 는 전조횟수 5회 정도에서 거의 일정한 값에 도달하였으며, δ_{max} 는 피동측치면과 맞물림측치면 모두 전조를 5회 반복한 경우에도 계속 증가하였다. 즉, 치형곡선의 모양은 전조의 비교적 초기에 결정되며 전조의 반복횟수를 증가시키면 δ_{max} 가 주로 증가하였다.
- (2) 강제변위량과 전조효과의 평가량 δ_{max} , δ_{ca} , δ_T 의 관계를 고찰하여, 전조가공에 따른 새로운 오차가 발생하지 않는 고정도치형이 얻어지는 가공조건을 설정하였다.
- (3) 치면접촉력은 동시맞물림의 변화에 따라 변동이 적고, 작용선상에서 일정하게 되며, 흠이 없는 치형이 얻어진다. 그 결과, 공구에 주는 설정변위량이 적절하면, 치면거칠기는 향상되어 형상오차와 압력각오차는 KS 0~2급의 범위가 된다.
- (4) 실험을 근거로 설정한 고정도가공이 가능한 조건을 기본으로 전가공치형의 오차가 개선되는 특성을 비교하였다. 압력각오차와 볼록(凸)형에 있는 오차는 전조전의 정도가 KS 1~4급의 경우, 전조가공에 의해 1~2급 개선되었다.

후 기

이 논문은 2004년도 지방대학혁신역량강화사업, 지식기반기계 부품·소재 연구개발 클러스터사업단의 연구비지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Lyu, S., "A Study on the Effect of Shot Peened Treatments on the Strength of Carburized Gears," J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 14, No. 9, pp. 61-67, 1997.
2. Lee, S., "A Study on the Precision Analysis of Gear Measurement Using CNC Gear Tester & 3D Coordinate Measuring Machine," Gyeongsang

- National University, pp. 1 - 73, 1999.
3. AGMA 109.19, "Roll Forming of Gear at Ford Motor Company," 1968.
4. Terauchi, M. Y., Tahara and Wakaoka, N., "A Study of Rolling Finish," Trans., JSME 43, pp. 4327 - 4336, 1977.
5. Uematsu, S., "How to Occur Involute Profile Error in Finish Roll Forming of Spur Gears," Trans., JSPE 54, pp. 139 - 144, 1988.
6. Uematsu, S. and Kato, M., "Involute Profile Error in Finish Roll Forming of Spur Gears - formation of Pressure Angle Error," Trans., JSPE 55, pp. 1839-1844, 1989.
7. Lyu, S., "International Symposium on Technology of Machine Elements Design 2002. Research Center for Aircraft Parts Technology Gyeongsang National University," pp. 44 - 50, 2002.