

기어전조의 기어 형상 및 압력각오차에 관한 연구

장정환 · 김준성 · 배효제 · 우에마쯔* · 조성현** · 류성기****

경상대학교 대학원 기계항공공학부 · *야마가타대학교 기계시스템공학과

포철기연(주) · *경상대학교 항공기부품기술연구소

(2008. 3. 5. 접수 / 2008. 7. 28. 채택)

A Study on the Concave and Pressure Angle Error of Gear Finish Roll Forming

J.H. Jang · J.S. Kim · H.J. Bae · S. Uematsu* · S.H. Cho** · S.K. Lyu****

Graduate School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

*Mechanical Systems Engineering, Yamagata University

**POSCO Machinery Co. Ltd.

***ReCAPT, GSNU

(Received March 5, 2008 / Accepted July 28, 2008)

Abstract : This study deals with finish roll forming by forced displacement can be conceived as a method of eliminating errors in conventional form rolling under constant loads. This method produces a high-precision tooth profile by low-speed form rolling when a high rigid screw or cam is used at the pressurized section. Tooth profile is decided in the beginning of roll forming and δ_{max} mainly increases if the number of roll forming process is increased. Gear class is improved by one or two class after roll forming if the gear has convex type error and pressure angle error in KS 4 class. If the gear have concave type error and pressure angle error and pressure angle error, gear class is not improved in theory, but improved a little in practice. In the finishing roll forming, it inevitably yields both the concaving of tooth profile and plastic deflection of addendum of teeth. Experiments show that the concaving and the plastic deflection are successfully reduced, the accuracy of tooth profile reaches to KS 0 class.

Key Words : finish roll forming, profile error, concave error, pressure angle error

1. 서론

전조가공은 포드사에서 최초로 제안되었으며¹⁾, 당시 프로파일의 정확도 0~0.4 μ m인 지름피치 19.3, 압력각 20°, 잇수 19인 기어를 생산하였다. 이를 기반으로 일본 자동차사와 기어 제조자들은 다른 크기의 기어 전조가공을 시도했지만, 고품질의 기어를 얻지 못하였다.

이 기술의 실질적인 적용에 관한 연구가 일본, 중국 등에서 몇명의 학자들에 의해서 계속 연구되어 왔으며²⁻⁵⁾ 기어는 고정밀도, 내구성, 소형·경량화, 안전성 등이 요구되고 있다⁶⁻⁸⁾.

기어는 소음과 중량의 문제에도 불구하고 정확한 동력전달속도비로 동력전달효율이 좋으므로 장

난감의 소형기어로부터 대형터빈의 감속기, 자동차나 기차, 항공기 등의 감속장치·차동장치에 다양하게 사용되고 있다.

전조가공은 세이빙 보다 양산성이 우수하여 획기적인 기어의 후처리 가공법으로 두각을 나타내고 있다. 그러나 국내에서는 기어전조에 관한 연구를 수행하고 있지 않기 때문에 기어의 마무리 가공방법 중 획기적인 방법으로 주목받는 기어의 전조가공에 관한 연구가 필요한 실정이다.

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

본 연구에서는 강제변위방식의 기어전조가공 원리와 특성을 연구하고, 치면접촉력과의 관계, 축간

* To whom correspondence should be addressed.
sklyu@gsnu.ac.kr

거리의 변동, 각속도의 변동, 압력각오차의 억제기구 등을 고찰하고자 한다.

2. 실험방법 및 실험장치

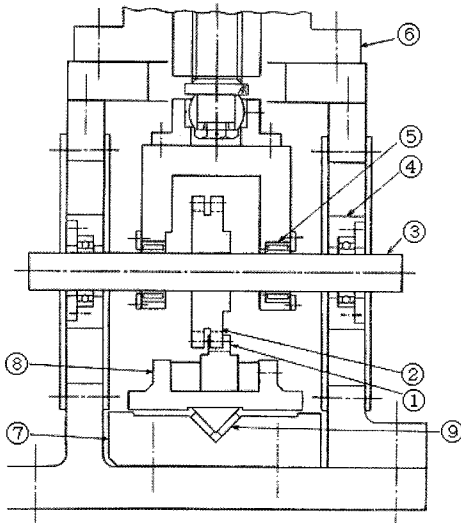
2.1. 기어전조장치

기어전조장치는 1공구 1소재형태이며, 자유구동 방식으로 전조가공한다. 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 공구 ①에 있는 랙을 이용하였으며 공구의 구동속도는 4.5mm/min이다.

공구압축력 F는 가압부 ⑥의 강제변위용 나사 압축식으로 가압한다. 가압부에 사용한 나사는 외경 70mm, 피치 20mm, 나사산 높이 5mm의 대형 사각 나사이다.

이것과 맞물리는 나사길이는 120mm이다. 이 나사의 스프링 상수 K_3 는 9.7kN/ μ m, 나사부의 면압강도는 축력 30kN에 대하여 5MPa로 설계되었다. 공구 안내면 내부는 공구안내대 ⑦과 공구홀더 ⑧로 구성되어 있으며, 이들 사이에는 직선 운동용 V형 축받침 ⑨를 사용하고 있다. 공구는 홀더에서 누름나사로 고정되어 있고, 홀더는 안내대 위를 전·후 방향으로 운동한다.

피가공기어 ②는 공구 상면으로부터 압력을 받아 공구의 직선운동과 더불어 전조가공된다. 피가공기어의 설치축에는 공구압축력을 지지하는 축받침과 축을 상하로 안내하는 축받침 ④가 있다.



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

Fig. 1. An experimental apparatus of roll forming.

공구압축력을 지지하는 축받침에는 기본 동정 격하중 23kN의 원통 축받침 2개를 사용하였고, 축받침간 거리는 90mm이다. 축의 지름은 ϕ 30mm, 축받침간의 휨강도는 0.55GN/m이다. 축과 축받침 그리고 축과 기어의 겹은 25 μ m이다.

2.2. 공구와 피가공기어의 제원

시험기어는 모듈 5인 스퍼기어를 사용하였고, 공구는 랙이다. 시험기어와 랙의 제원을 Table 1에 나타내었다. 시험기어는 잇수 22, 전위계수 0, 0.52이다. 이것은 동시맞물림점의 변화와 치형오차의 관계를 조사할 목적으로 설정하였다.

본 연구에서 사용한 시험용 기어 재질은 SM45C 시판재료이다. 공구 이의 크기는 11.25mm이고, 이 끝에는 0.7mm의 모따기를 하였으며, 기준 피치선으로부터 윗부분의 직선부는 4.3mm이며 공구는 열처리 후 연삭 가공하였다.

시험기어는 호브커터(hob cutter)를 사용하여 호브가공하였다. 시험기어의 치형은 치면 거칠기(Rz)가 약 10 μ m, 치형정도는 압력각 오차가 KS 4급 이하, 치형의 형상(concave)오차는 KS 2급 이하로 나타났다.

시험기어의 치면은 공구를 맞물리게 만들어 전조할 때 회전방향 전방의 치면을 맞물림측 치면, 회전방향의 후방의 치면을 피동측치면이라고 한다. 시험기어는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 전조이와 기준으로 되어 있다. 전조이는 전조가공실험을 할 때 사용하며, 기준이는 전조가공 후 전조이의 변형량을 측정할 때, 치형과 이끝곡선을 비교할 때 사용한다. 이폭은 두 기어 모두 10mm이다.

Table 1. The material and precision of roll forming tools and test gears

	Tool	Test gear
Module(m)		5
Number of teeth(z)	11(22)	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		Hub cutter, Pinion cutter
Material	SK5	SM45C
Hardness(HRC)	63	58.6
Individual pitch(μ m)	1.0	7
Cumulate pitch(μ m)	1.0	20
Gear class		Pressure angle error KS 0~4 Concave error KS 0~2

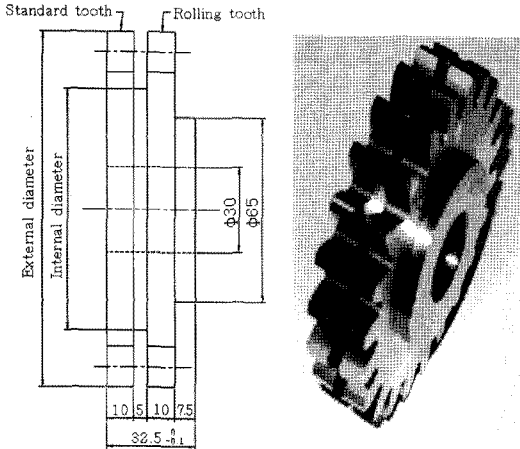


Fig. 2. Shape and Photograph of the test gear.

2.3. 실험조건 및 실험방법

치형에서 홈의 발생을 억제시키는 장치는 작용선 위에서의 치면 접촉력의 변화, 압축력과 축간거리의 변동, 공구와 피가공기어 간의 상대각속도 변동 등으로 고찰된다. 압력각 오차의 발생 억제기구는 전조중의 치형의 변화, 치의 소성변형 및 반경방향의 변화량으로 설명된다.

전조중의 치형의 변화는 전조중의 작용선상의 4개소에서 측정하며, 이의 소성변형, 변위량은 치의 측면에 설정한 측정점의 변위와 치형의 측정점과 동일한 위치에서 측정한다. 전조의 반복수는 치형의 형상변화가 거의 종료할 때까지로 하고, 전조횟수는 5회로서 피가공기어는 호브가공으로 하며, 전조전의 치형정도는 압력각 오차성분이 KS 4급, 치형의 요철에 따른 성분은 KS 2급의 범위에 있다.

본 연구는 고정도의 치형을 얻는 것을 목적으로 안전한 기어를 생산하는 것을 목적으로 하기 때문에 피가공기어의 재질은 재료 의존성이 없는 시판 재료 하고 SM45C를 풀립(annealing)처리 한 다음 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 홈발생 억제기구

강제변위방식으로 전조가공을 실험한 경우 치형의 홈발생을 억제할 수 있는 원인을 다음과 같은 3가지 방법으로 검토하였다.

3.1.1. 치면접촉력과의 관계

Fig. 3에 나타난 치형의 수치해석 계산프로그램의 순서도³⁾를 나타냈다. Fig. 4는 정하중방식(C.L.M.:

Calculate Load Method)과 강제변위방식(F.D.M: Forced Displacement Method)에 의한 실험결과를 나타내었다. 정하중 압축방식에서 압축력 F는 9.8kN으로 하고, 치면접촉력은 피동측(driven side) 치면과 맞물림측(follower side) 치면의 작용선상의 1점 맞물림 구간에서 높게 나타났다. 그리고 이 부분에서는 일정한 압축력으로 동일하게 반복 수행하면 홈발생이 확대되었다.

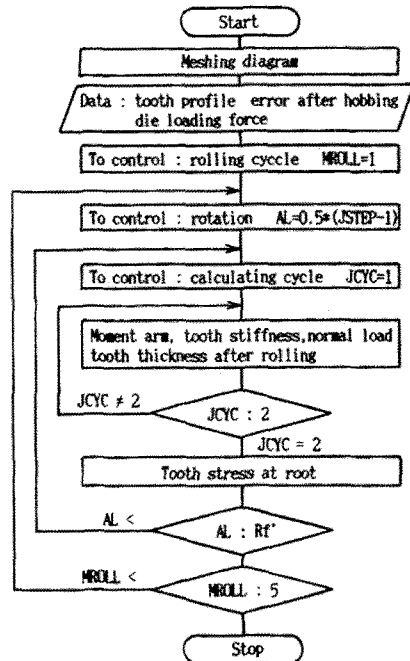


Fig. 3. Procedure of numerical calculation.

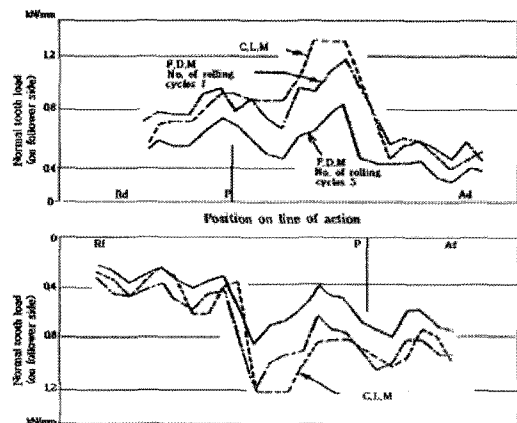


Fig. 4. Normal tooth load in F.D.M and C.L.M.

강제변위방식의 경우 공구 압축력 F_{lmax} 는 9.8 kN으로 하고 전조 1회를 수행하면 맞물림측 치면의 치면접촉력은 정하중방식에서와 동일한 결과를 나타내지만 피동측의 치면접촉력은 점점 작아졌다.

그리고 치면 접촉력이 큰 구간은 적어진다. 공구에 새로운 변위를 주어 전조를 반복 수행할 경우 치면접촉력은 치면상에 남아 있는 전조량의 감소에 따라 작아지고 이의 탄성과 조화를 이루면서 맞물린다. 따라서 강제변위방식에서는 흠이 치형 중앙부에서 발생하지 않도록 전조되어 압축량은 치형에 따라 거의 균일하게 된다.

3.1.2. 축간거리의 변동

전조중의 치형의 형상변화는 축간거리의 변동과 관계가 있는 것으로 나타났다. 따라서 축간거리의 변동에서 치형의 형상변화를 알 수 있다. 전조후와 전조중의 축간거리의 변동에 대한 계산결과와 실험결과를 Fig. 5에 나타냈다.

Fig. 5(a)에서 알 수 있듯이 강제변위 방식에 의한 전조치형을 계산한 경우, 축간거리는 전조 1회마다 약 0.005mm가 변화되었다. 이 변화량은 2점 맞물림 구간에서 작고 4점 맞물림 구간에서 크게 나타났다. Fig. 5(b)의 결과에 따르면 치형곡선상의 압축량은 2점 맞물림 구간에서 작고 4점 맞물림 구간에서 크게 나타났다. 축간거리의 변동에 따른 진폭은 전조 횟수를 증가하여도 변하지 않는다. Fig. 5(c)의 결과 강제변위방식에서는 압축량은 치형상에 있어 거의 일정하게 흠을 발생시키지 않는다는 것을 알 수 있다. 다음은 축간거리의 변동을 전조치형과 전조중의 이의 탄성변형으로부터 계산한 측정치와 비교하였다. Fig. 5의 (d)에서 계산값은 2점 맞물림 구간에서 크고 4점 맞물림 구간에서 작게 나타났다. 이 결과 위에 나타낸 계산의 예, 즉 탄성 변형을 고려하지 않는 경우와 비교하면 축간거리의 변동의 진폭은 변화하지 않지만 변위곡선의 방향은 반전된다. 이것을 측정값과 비교하면 측정된 변위량은 0.01mm에서 계산값과 동일하며, 2점 맞물림 구간에서 크고 4점 맞물림 구간에서 작다. 측정값은 전조치형과 이의 탄성변형으로 계산한 값과 일치한다.

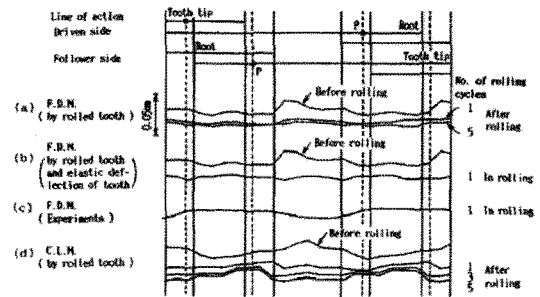
따라서 강제 변위방식의 압축량은 작용선상에 따라 균일하고 그 효과가 크다는 것을 알았다. 정하중방식에서 전조한 치형에 따라 계산한 경우, 축간거리의 변동은 4점 맞물림 구간보다 2점 맞물림 구간이 크다. 이것은 2점 맞물림 구간의 압축량이 많아서 그 부분의 치형에서 흠이 발생한다는 것을 나

타낸다. 전조횟수가 증가할 경우, 변위곡선의 진폭은 점점 크게 된다.

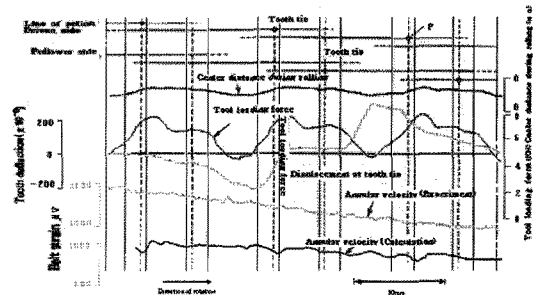
이 결과로부터 정하중 방식의 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다. 압축량의 분포는 2점 맞물림 구간에서 크고 4점 맞물림 구간에서 작다. 이것은 치형의 흠과 관련되어 나타나고 흠은 전조횟수의 증가에 따라 확대된다.

3.1.3. 각속도의 변동

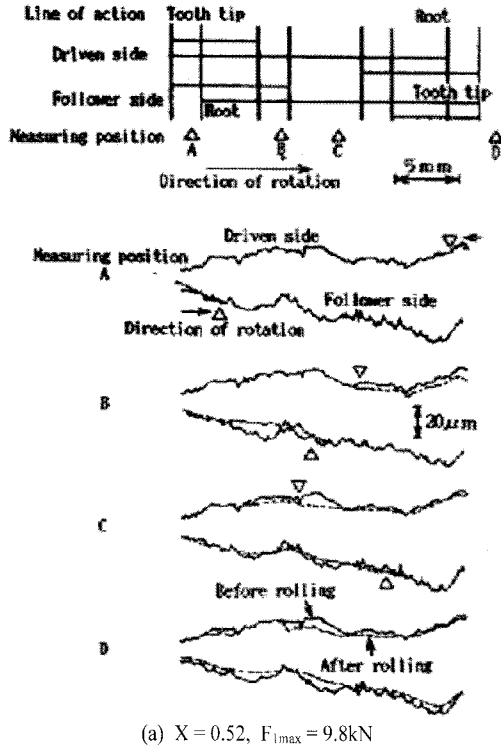
강제변위방식으로 전조할 경우, 각속도의 측정값과 계산값을 Fig. 6에 나타냈다. 측정값은 그림과 같이 작은 거칠기의 일정한 직선으로 나타났다. 이것은 압축량이 좌·우 치면상에서 대등하고 동시에 작용선상의 각 점에서 변화하지 않는다는 것을 나타내고 있다. 따라서 강제변위방식에서는 공구와 피가공치차 간의 각속도 관계만이 나타나며, 전조중의 각속도는 일정하고 동시에 흠이 발생하지 않는다는 것을 실험으로 확인하였다. 계산한 곡선의 기울기는 측정결과와 거의 동일하게 나타났다. 계산결과는 전조치형에 흠이 발생하지 않고, 측정량은 작용선상에 거의 일정하였다. 단, 곡선의 형상은 다소 다르지만 스텝을 0.5mm로 주었기 때문에 발생한 것으로 고찰된다.



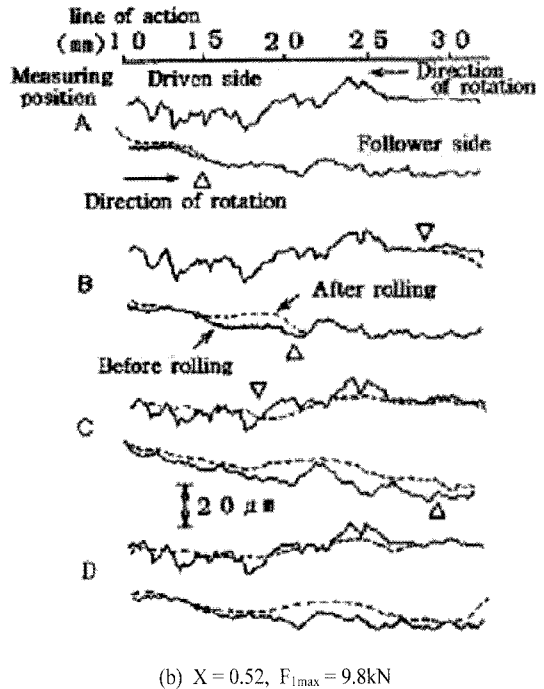
Nodule 5, No. of teeth 22, X 0.52, F_{lmax} 9.8kN
Fig. 5. Variation of center distance during rolling.



Nodule 5, No. of teeth 22, X 0.52, F_{lmax} 9.8kN
Fig. 6. Variation of angular velocity by F.D.M.



(a) $X = 0.52, F_{\max} = 9.8\text{kN}$



(b) $X = 0.52, F_{\max} = 9.8\text{kN}$

Fig. 7. Variation of tooth profile in rolling process.

3.2. 압력각오차의 억제기구

강제변위방식으로 전조한 경우에 압력각오차의 발생을 억제한 기구는 전조중의 치형의 변화와 치의 측면에 설정한 측정점의 변위에서 설명된다. 전조중의 치형의 변화를 작용선상의 4점에서 측정하였다. 이들의 측정점을 A, B, C, D로 나타내고, Fig. 7에서 맞물림선도에 나타내었다. 실험결과는 전위 계수 0.52의 치차를 예로 나타내었다.

측정점은 A에서 피동측(driven side) 치면은 이끝(Tooth tip)에서 맞물림측(follower side) 치면은 이뿌리(Root)에서 맞물림이 시작되며, 공구와 접촉된 부분은 정방향으로 변형하고 있다. 측정점 B의 치형은 맞물림의 진행에 따라 공구와 접촉된 부분은 정방향으로 변형하고 있다.

측정점 C의 치형은 맞물림의 진행에 따라 접촉점이 좌우 치면의 작용선상에 교차하는 것으로 나타났다. 공구와 접촉한 부분의 치형은 정방향으로 변형하고 측정점 B에서 나타난 치형과 크게 변화하지 않았다. 측정점 D의 치형은 양치면 모두 맞물림이 끝난다.

Fig. 8에 치형변화에 대하여 측정한 치의 소성변형, 연신율, 변형률을 나타냈다. 치의 소성변형은

측정점 B까지는 발생되지 않고 맞물림이 측정점 C까지 진행된 후 발생한다. 이 구간에서 접촉점은 좌우 치면의 작용선 상에서 교차한다. 치의 맞물림은 이끝(Tooth tip)에 표시하면 측정점 C에서 $2\mu\text{m}$, 측정점 D에서 $4\mu\text{m}$ 로 측정된다. 측정점 C, D에서 발생한 치의 크기방향의 신장은 $1\mu\text{m}$, 변형률(Strain)은 0.1%로 나타났다.

여기에서 정하중 압축방식으로 얻은 결과의 일부를 Fig. 8에 나타낸 강제변위방식의 결과와 비교한다. 최대공구압축력은 10kN으로 하고 동일조건에서 전조할 경우, 정하중 방식에서는 이끝(Tooth tip)의 소성변형 $10\mu\text{m}$, 신장 $6\mu\text{m}$, 변형률 0.2%로 나타났다.

반면, 강제변위방식에서 나타난 소성변형은 약 1/3, 신장은 1/5, 변형률은 1/2로 나타났다. 이들의 변형량은 모두 작은 값이지만 접촉점이 좌·우 치면의 작용선 상에서 교차하는 측정점 C에서 발생하고 있다. 즉, 강제변위방식의 경우에도 소성변형은 맞물림 피치점 부근에서 치의 내부의 변형률이 크게 발생한다. 따라서 강제변위방식의 치면 접촉력은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 양치면의 작용선 상에 1점 맞물림 구간에서 작은 값으로 나타난다.

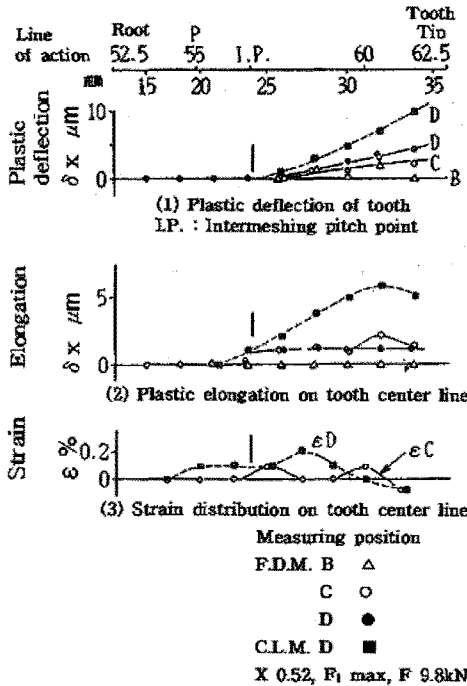


Fig. 8. Plastic deformation of tooth,

이것이 소성변형을 크게 변화시키는 원인이 된다. 이뿌리(Root)측의 변형과 신장은 수치적으로 작게 나타나지만 압력각오차에 미치는 영향은 적으며 치형곡선에서는 오차가 나타나지 않는다.

4. 결론

안전을 고려한 강제변위방식의 기어전조에서의 치면접촉력, 축간거리, 각속도, 압력각오차 등의 관계를 고찰한 결론은 다음과 같다.

- 1) 설정한 가공조건과 강제변위방식의 가공정도의 한계에 대하여 실험결과의 F_{1max} 값을 설정할 경우 고정도의 기어를 가공 할 수 있다.
- 2) 압축량은 작용선상에 따라 균일하고 그 효과가 크다.

3) 공구와 피가공기어 간의 각속도 관계에서 전 조중의 각속도는 일정하고 동시에 흠이 발생되지 않는다.

4) 압력각오차의 소성변형은 맞물림 피치점 부근에서 치의 내부의 변형률이 크게 발생된다.

감사의 글 : 이 논문은 산업기술재단 지역혁신 인력양성사업과 한국과학재단 한중국제공동연구 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) AGMA 109.19, "Roll Forming of Gear at Ford Motor Company", 1968.
- 2) Terauchi, M. Y., Tahara and Wakaoka, N., "A Study of Rolling Finish", Trans., JSME 43, pp. 4327~4336, 1977.
- 3) Uematsu, S., "How to Occur Involute Profile Error in Finish Roll Forming of Spur Gears", Trans., JSPE 54, pp. 139~144, 1988.
- 4) 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.
- 5) Lyu, S., "A Study on the Strength Evaluation of Carburized Gears", International Symposium on Technology of Machine Elements Design 2002. Research Center for Aircraft Parts Technology Gyeongsang National University, pp. 44~50, 2002.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) J. Jang etc, "A Study of the Contact Length of Tooth in gear Set", APCPM 2007, pp. 151~156, 2007.