

◆특집◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 I

고속회전용 기어의 정밀도 향상을 위한 전조가공에 관한 연구

장정환*, 우에마쯔 세이조**, 조성현*, 김준성*, 류성기*

A Study on Roll Forming for Precision Improvement of High Rotation Gear

Jeong-Hwan Jang*, Seizo UEMATSU**, Seong-Hyun Cho*, Junseong Kim* and Sung-Ki Lyu*

Key Words : Roll forming (전조가공), Precision improvement (정밀도 향상), Concave error (홈오차), Displacement at tooth tip (이끝변형), Pressure angle error (압력각오차), Forced displacement (강제변위량)

1. 서론

기어는 가장 일반적으로 널리 사용되는 동력 전달장치로서, 한 쌍의 원통이나 원뿔에 이를 붙여 서로 맞물리게 하여 동력을 전달한다. 기어는 소음과 중량의 문제에도 불구하고 정확한 동력전달속도비와 동력전달효율이 좋으므로 소형기계, 장난감으로부터 대형터빈의 감속기, 자동차, 기차, 고속전철, 항공기, 고속회전체 등의 감속장치, 차동장치 등에 널리 사용되고 있다. 기어는 중세에 이르러 시계용으로 사용하기 때문에 정교하게 사용되었으며, 특히 현존하는 가장 오래된 도오버성의 시계는 오늘날 기어와 동일한 모양의 기어를 사용하였다. 15세기 후반, 레오나르도 다빈치는 여러 가지 기어 장치를 고안하여 기어의 기술사에 특기할 만한 성과를 남겼다. 기어의 치형은 원이 직선 위를 구를 때 원주 위의 궤적을 이용한 사이클로이드(cycloid) 곡선과 원에 감은 실을 풀 때 실끝이 그리는 궤적을 이용한 인벌류우트(involute) 곡선을 이용하고 있다. 또 프랑스의 수학자 데자

르그(Desargues)는 실제로 의 사이클로이드 치형을 사용하여 마찰이 적은 기어제작에 성공하였다.

1695년경에 프랑스의 필립 드라이일은 인벌류트곡선을 사용한 치형을 발표하였지만, 1745년 오일러(Euler)와 1771년 케스트너(Kaestner)가 인벌류트 곡선이 치형에 우수함을 발표한 이후, 여러 학자들에 의해 치형으로는 인벌류트 곡선이 사이클로이드 곡선보다 우수함이 입증되었다. 그 후 많은 연구자들에 의한 지속적인 연구결과로 19세기 전반에 오늘날 사용하는 대부분의 기초적인 치형 이론이 완성되었고 현재 인벌류트 곡선이 가장 널리 사용되고 있다.¹ 근래 기어는 고정밀도, 고내구성, 소형, 경량화 등을 요구하고 있다. 특히 소음을 감소시키고 소형, 정밀화를 이루기 위해서 기어의 정도 향상에 관한 연구가 필요하게 되었다. 국내에서는 기어설계, 가공 및 검사기술은 일본, 유럽 등에 비하여 매우 낮은 수준이며, 이러한 일반적인 기어 가공방법으로 KS 0~1급의 거어를 가공하기가 어렵다. 따라서 대부분의 기어는 치형을 절삭한 후 다듬질가공 과정을 거치게 된다.

근래 전조가공이 양산성이 우수하므로 획기적인 기어의 후 다듬질가공법으로 떠오르고 있다.²⁻⁶ 이 기술의 실질적인 적용에 관한 연구는 소수 학자들에 의해 일본, 중국 등에서 계속 수행되어 왔다. 그러나 국내에서는 기어 전조가공에 관한 연

* 경상대학교 기계항공공학부, K-MEM R&D Cluster
** Yamagata University
Email sklyu@gsnu.ac.kr
기어설계, 기어박스설계, 기어 전조가공 등에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

구가 전무한 상태이므로 고정밀 기어를 필요로 하는 고속회전용 기어의 정밀도 향상을 위한 전조가공에 관한 연구가 필요하다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 전조가공 장치

2.1.1 강제변위방식의 가공원리

강제변위방식은 기존의 정하중방식에 비하여 고정도의 치형을 얻을 수 있는 새로운 기어전조법이다. 이 방식은 스퍼기어를 정하중으로 전조한 경우에 문제가 되고 있는 홈과 압력각오차의 억제 대책으로서 개발한 것이다. 전조가공에 따른 치형오차의 발생기구에 관한 연구에 따르면, 치형의 홈은 외접 맞물림에 전조하는 경우, 동시 맞물림 점 수가 변화하는 것에 따라 발생하는 치면접촉력의 변동이 중요한 원인이 되어 발생한다. 압력각 오차는 공구의 압축력이 비교적 큰 경우에 맞물림 피치점 부근에서 이의 중심부까지 소성영역이 되기 때문에 이 끝측이 소성변형으로 발생하는 것으로 알려져 있다. 외접 맞물림에서 기어를 전조하는 것은 오차의 발생원인인 동시 맞물림점 수의 변화를 전조의 맞물림 과정 자체에 포함하고 있는 단점은 있으나, 재료의 착탈이 용이하고 장치의 구조가 복잡하지 않다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 전조량에 대응하는 공구의 변위를 일정하게 유지하는 데 따른 외접맞물림의 장점을 살리고 전조가공의 특유한 치형오차의 발생을 억제하는 실용적인 공구압축법인 강제변위방식에 대하여 논한다.

Fig. 1 에 강제변위방식의 가공원리를 나타낸 바와 같이 공구와 피가공기어의 맞물림부의 d 의 상수는 k_1, k_2 , 합성상수 k 는 $k_1 \cdot k_2 / (k_1 + k_2)$, 가압 요소의 상수는 k_3 로 표시한다. 강제변위방식에서는 k_1, k_2, k_3 는 직렬접속의 관계에 있고, 그 크기는 $k_3 \gg k_1 \cdot k_2 / (k_1 + k_2)$ 가 된다. 처음에 가압요소를 반복해서 공구에 강제적으로 변위 델타를 주고 공구와 피가공기어의 축간거리를 일정하게 유지하면서 전조한다. 이 때 맞물림부의 합성상수는 동시 맞물림 점의 수가 많을 때에는 크게 되고, 작을 때에는 작게 된다. 따라서 홈의 발생억제는 물론 치형오차의 개선도 가능하게 된다.⁷⁻¹⁰

Fig. 2 는 1 공구 1 소제형의 강제변위식 전조장치의 개략도이다. 그리고 Fig. 3 은 전조장치의 사

진을, Fig. 4 시뮬레이션 모습을 나타내고 있다. 공구홀더와 피가공기어가 연결된 축의 상하변위는 전기 마이크로 메타로 측정하고 양자의 차이로부터 피가공기어의 상대적 변위량, 전조중의 축간거리의 변동을 구한다. 동시에 공구의 치형변형, 설정압축력, 공구의 구동력을 스트레인게이지를 이용하여 측정하고 모든 데이터는 증폭기 피치그래프에 기록된다.

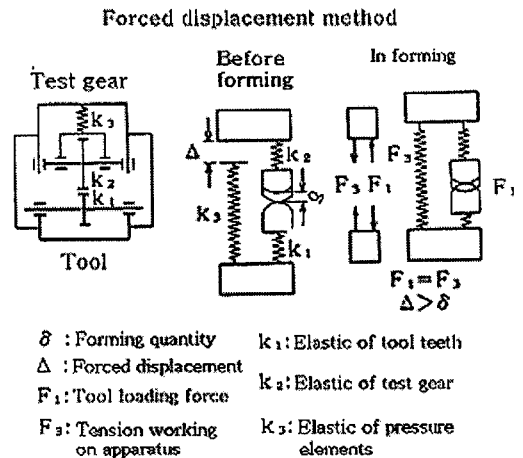
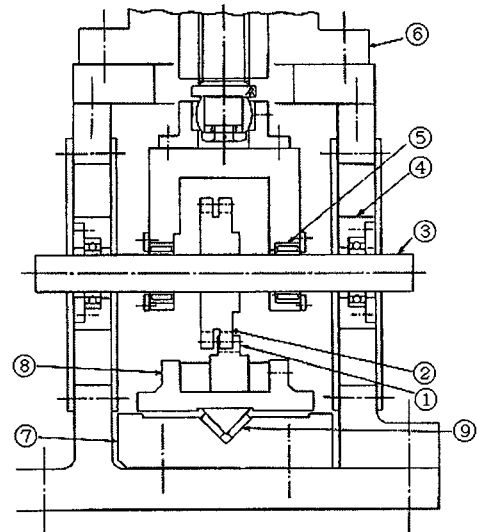


Fig. 1 Principal of the manufacturing in F.D.M.



①Roll forming tool(Rack) ②Test gear ③Shaft
 ④Pedestal ⑤Compressing part ⑦Tool guide
 ⑧Tool holder ⑨V-type pedestal

Fig. 2 An experimental apparatus roll forming

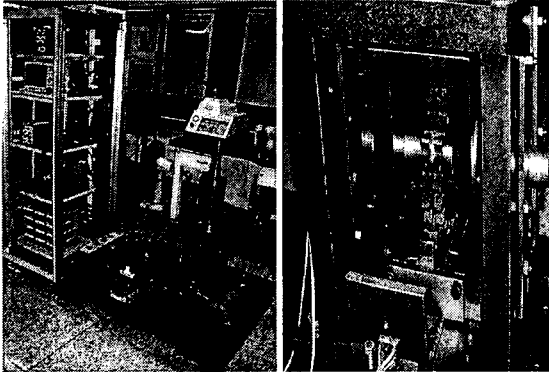


Fig. 3 Photograph of apparatus

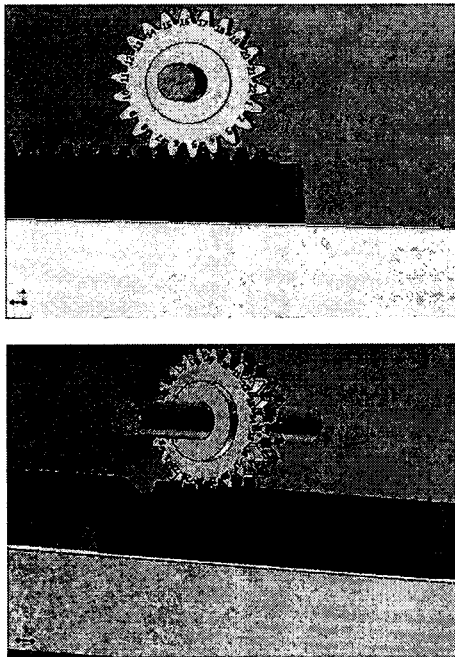


Fig. 4 3D simulation of roll forming

2.1.2 공구와 피가공기어

시험기어는 평기어, 공구는 랙(Rack)을 사용하였으며 그 제원은 Table 1에 나타내었다. 피가공기어의 전가공은 호브커터(hob cutter)를 사용하여 치절 가공하였다. 호브커터는 이끝에 흑이 붙은 모양의 커터로서 전조중에 전조공구의 이끝이 피가공기어의 이뿌리부에 접촉하는 것을 방지할 수 있다. 피가공기어의 치면은 전조할 때를 고려하여

공구를 맞물리게 제작하였으며, 회전방향 전방의 치면을 맞물림측(Engaging side, follow side) 치면, 회전방향 후방의 치면을 피동측(Driven side) 치면이라 한다. Fig. 5는 전조가공 후, 피가공기어의 치형곡선 일치를 나타낸 것이다. Fig. 6은 시험기어를 나타내었다. 기준이는 전조이의 변형량을 측정할 때, 치형곡선과 치형변형값을 비교하는데 기준으로 사용한다.

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 | | Hob cutter, Pinion cutter | |
| Material | SK5 | SM45C | |
| Hardness | HRC 63 | HRB 80 | |
| Individual pitch(μm) | 1.0 | 7 | |
| Cumulate pitch(μm) | 1.0 | 20 | |
| Gear class | | Pressure angle error KS 0~4 Concave error KS 0~2 | |

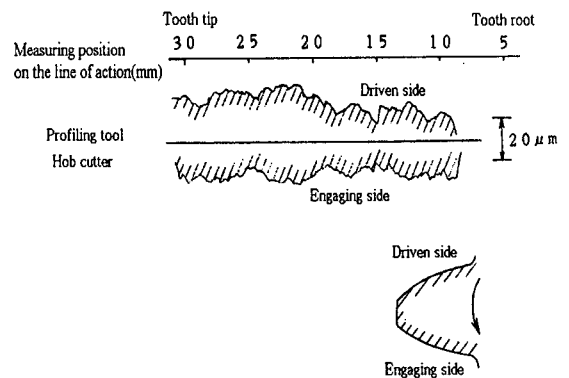


Fig. 5 Tooth profile error of the test gear

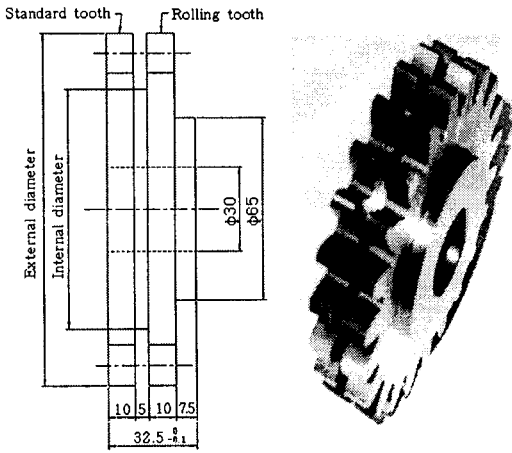


Fig. 6 A photograph of test gear

2.2 전조효과의 평가법

전조기어의 치형곡선은 동시맞물림점 수, 공구 압축력의 설정치, 공구압축량의 설정값 등의 실험 조건에 따라 다양하게 변화한다. 전조효과의 객관성을 고려한 전조효과의 평가법으로 치형곡선의 형상변화를 나타내는 양을 처음에 결정한다. 치형곡선의 형상변화에는 엄밀하게는 전가공치형의 정도도 영향을 끼치지만 실험에 의한 평가는 치형의 형상변화에 기초한 압축량으로 평가한다. 치형의 형상변화를 나타내는 양은 최대압축량, 흠(형상오차), 이끝부근의 압축량(변위)와 압력각오차로서 Fig. 7에 나타내었다.

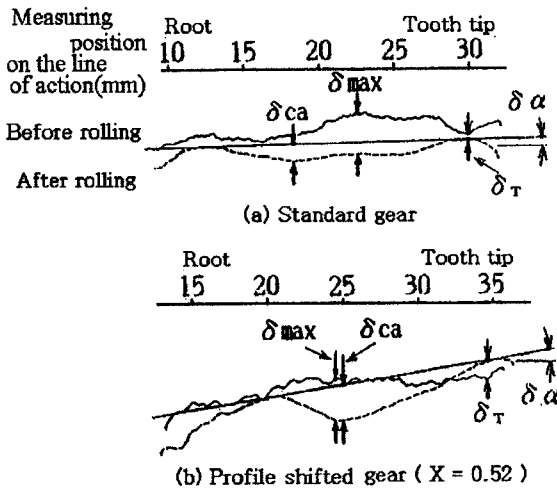


Fig. 7 Plastic deformation of the tooth profile

2.3 실험방법

강제변위방식의 실험조건은 강제변위량 혹은 그 때에 발생하는 최대공구압축력으로 표시한다. 공구압축력은 가공중의 동시맞물림점 수에 따라 변화하기 때문에 동시맞물림점 수가 4 점이 되는 위치에서 강제변위량을 설정한다. 실험에서 구한 최대공구압축력과 강제변위량과의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 전조효과와 평가는 전조반복 횟수에 따라 치형곡선의 형상변화와 이측면 중심선의 변위의 대소로 평가한다. Fig. 9-11에는 전조중에 기어이와 공구이의 맞물림 진행방향과 맞물림상태를 나타내었다.

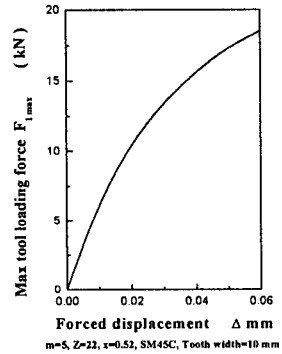


Fig. 8 Relationship between the F1max and the forced displacement

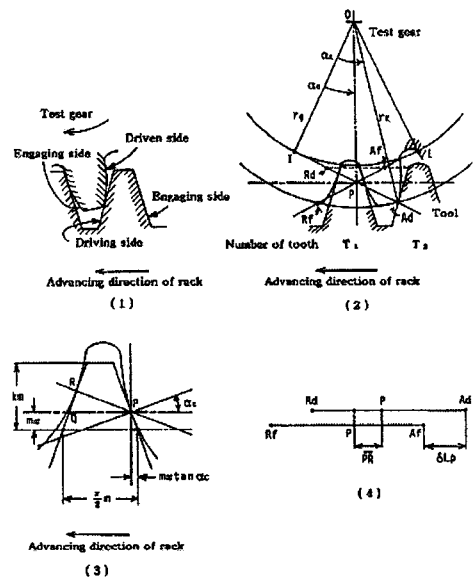


Fig. 9 An engagement state of the tool and the test

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전조횟수에 따른 치형오차의 발생정도

KS 0 급의 표준기어를 설정 압축력 9.8 kN 을 기본으로 반복해서 전조실험하여 얻은 치형의 한 예를 Fig. 12 에 나타내었다. 실선과 파선은 각각 전조 전과 후의 치형곡선이다. 1 회 의 전조로 맞물림측 치면의 피치점 부근에 홈이 만들어진다. 압축량은 이의 중앙부로부터 이뿌리에 걸쳐 치면에 따라 다르게 나타난다. 피동측의 치면은 전조전의 치형에 걸쳐 거의 균일하게 변형된다. 전조실험을 5 번 반복할 경우 압축량은 증가하고 이의 중앙부는 이의 뿌리측에 비해 오차가 2 배 증가함을 알 수 있다. 이 때 피동측 치면의 압력각오차는 수정된다. 맞물림측 치면에는 전조의 반복 작업이 없었던 피치점 부근의 홈이 증대된다. 이끝과 이뿌리측의 압축량은 첫 번째 전조와 비교했을 때 거의 증가하지 않았다. Fig. 13 에서 사용된 재료는 SM45C 의 시판재이다. 이 경우 1 회 의 전조로 피동측 치면 맞물림측 치면의 치형중앙부에 홈이 발생한다. 홈은 전조의 반복에 따라 확대된다. 피동측 치면에는 이끝과 이뿌리의 일부에 보여진 길이 방향 변형의 진행이 없는 부분이 있고, 압력각오차가 발생한다. 맞물림측 치면에는 압축량은 이(齒)의 중앙으로부터 이뿌리에 걸쳐서는 많지만 이끝 부분에는 전조를 반복해도 적다. Fig. 14 는 Fig. 13 의 실험 중 조질재를 사용한 경우이며, 피동측 치면의 압축량은 전조를 5 회 반복 실험하였을 때 이끝에서 10 μm , 이뿌리에서 약 5 μm , 홈은 약 5 μm 이 된다. 맞물림측 치면의 압축량은 이끝과 이뿌리의 일부에 약 2~3 μm 이 되지만 치형 중앙부는 약 10 μm 의 홈이 발생된다.

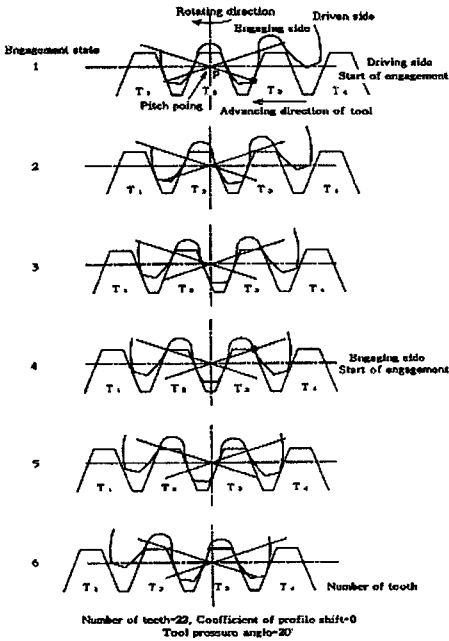


Fig. 10 An engagement state of roll forming (Coefficient of profile shift = 0)

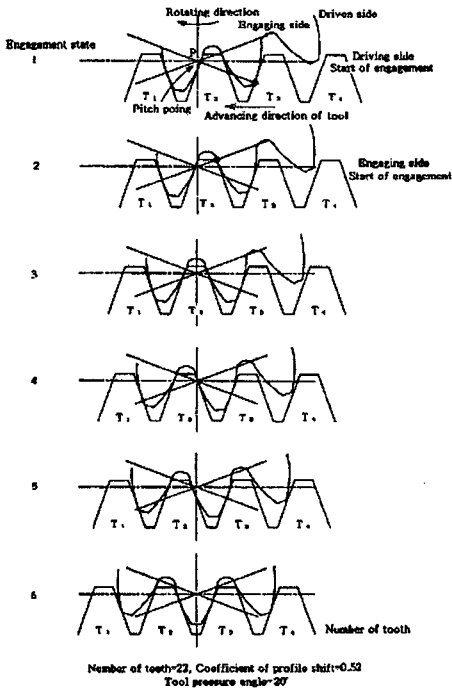


Fig. 11 An engagement state of roll forming (Coefficient of profile shift = 0.52)

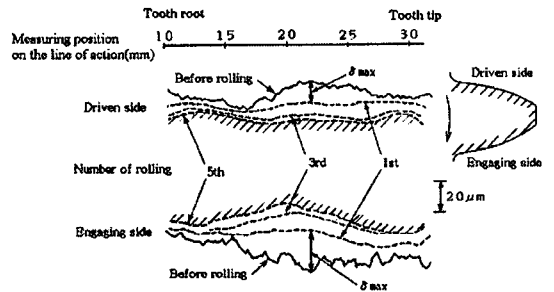


Fig. 12 Tooth profile of roll forming (9.8kN, SM45C, Coefficient of profile shifted 0)

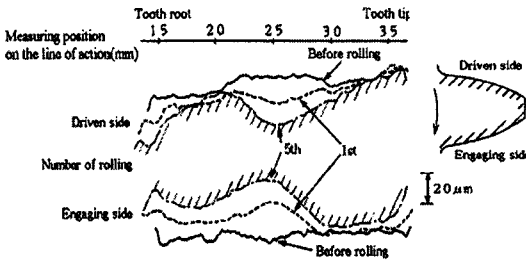


Fig. 13 Tooth profile of roll forming (9.8kN, SM45C, Coefficient of profile shifted 0.52)

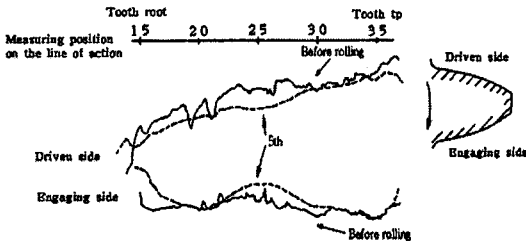


Fig. 14 Tooth profile of roll forming (forging 9.8kN, SM45C, Coefficient of profile shifted 0.52)

이 결과값을 시판재의 결과값과 비교하면 치형 중앙부의 흠은 적지만 압축량은 이끝부에서 많고 이뿌리측에서 적게 나타나며, 치형은 기본적으로 동일한 형태로 된다. 따라서 시험에 사용되는 기어는 시판재를 사용한다.

Fig. 12, 13 에서 나타난 것처럼 전위기어와 표준기어에는 치형상의 압축량의 분포가 아주 다르다. 치형곡선의 형상에 전위계수와 공구 압축력, 전조릿수의 관계를 명확히 하기 위해 전조효과와 평가량을 이용해 검토하면 치형곡선의 모양은 비교적 초기에 결정됨을 알 수 있다.

3.2 공구압축력과 압축량과의 관계

Fig. 15 는 표준기어를 강제변위방식으로 전조한 결과를 나타낸다. 피동측 치면, 맞물림측 치면과 함께 공구압축력 F_{1max} 를 크게 하면 δ_{max} 는 증가하나 δ_{ca} , δ_T 는 δ_{max} 보다 작다. 따라서 F_{1max} 를 적당히 설정하면 δ_{ca} 를 작게, δ_{max} 는 10~15 μm 가 되고, 치면의 거칠기는 완전히 제거된다.

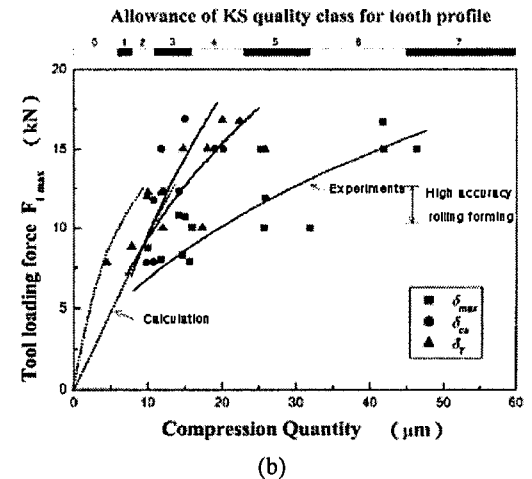
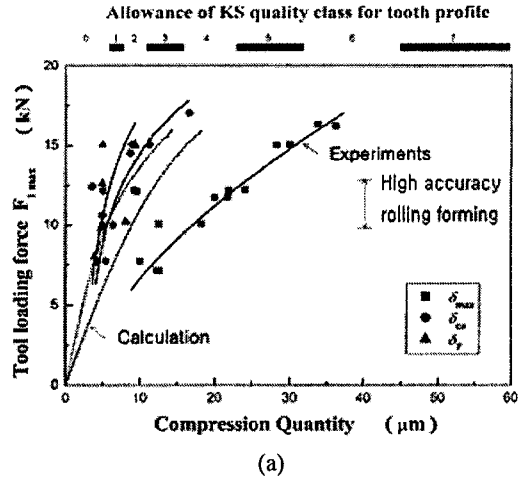
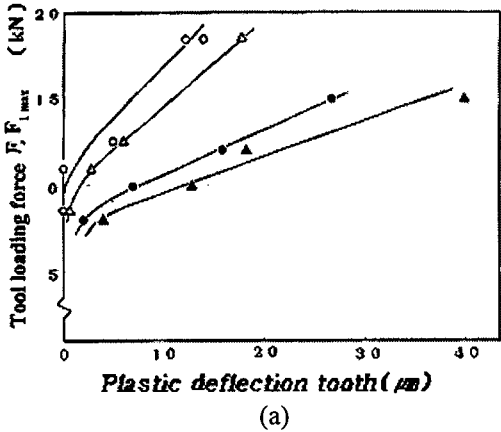


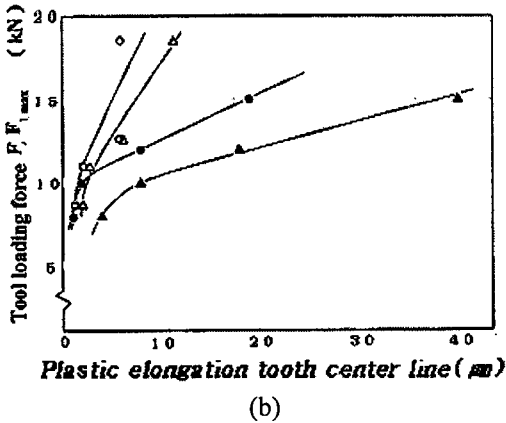
Fig. 15 Relationship between tool loading force and compressive quantity by F.D.M.(Coefficient of profile shift 0)

3.3 공구압축력과 이의 소성변형과의 관계

Fig. 16 은 전위계수 0.52 의 치차에 대하여 공구압축력 F_{1max} 와 전조후의 소성변형 δX 및 소성신장 δY 와의 관계를 나타냈다. Fig. 22 에 나타난 δX 와 δY 는 이의 중심선상에서 이끝(Tooth tip)으로 부터 0.5 mm 위치에서 측정된 값이다. 강제변위방식에서의 1 회 전조한 경우, 11 kN 이 될 때까지 δX 는 발생되지 않고, 11 kN 이상이 되면 발생한다. δX 는 전조반복 횟수를 증가시켜도 별로 누적되지 않는다. δY 는 δX 의 경우와 같으며 F_{1max} 가 11 kN 까지는 작은 값이 된다.



(a)



(b)

| No. of rolling cycles | F.D.M | C.L.N |
|--------------------------|-------|-------|
| 1 | ○ | ● |
| 5 | ▲ | ▲ |

Fig. 16 Relationship between tool loading force and compressive quantity by F.D.M.(Coefficient of profile shift 0)

3.4 전조치형의 이론적 해석과 가공정도의 한계

앞에서 공구에 주는 설정변위량과 피가공기어의 치면상의 압축량 δ_{max} , δ_{ca} , δ_T 의 관계로부터 고정도의 치형을 얻는 가공조건을 설정했다. 그리고 이 조건을 기본으로 강제변위방식에서 얻어지는 전조치형의 이론해석을 하였다. 오차가 없는 전가공치형곡선에 대해서 전조의 이론계산을 행하고, 그 때에 발생하는 δ_{ca} 와 압력각오차 δ_a 의 관계를 고찰하였다. 또한, 전가공치형곡선에서 여

러 가지 오차를 주는 경우에 대해서 전조치형을 이론적으로 검토하였다. 여기서 조건으로서 주었던 강제변위량은 $\Delta=0.02$ mm 이다.

Fig. 17은 강제변위방식에서 얻어지는 치형의 해석결과를 전위계수 0.52의 기어에 대해서 나타내었다. 이 그림의 상부에는 전조중의 동시맞물림점 수의 변화를 대응시켜 보았다.

(1)은 공구압축력 F_1 을 나타낸다. 치형에서 오차가 없는 경우, F_1 의 계산치는 동시맞물림점 수가 4점 구간에서는 최대 10.8 kN, 두 점 맞물림 구간에서는 5~6 kN이 된다.

(2)는 단위 폭당 치면접촉력을 나타낸다. 치면접촉력은 피동측 치면, 맞물림측치면과 같이, 동시맞물림점 수가 작은 구간에서는 0.55~0.7 kN/mm가 된다. 맞물림이 이끝측과 이뿌리측에서 이행되어 동시맞물림점 수가 4점이 되는 구간에서는 0.8 kN/mm이다. 이 분포는 이(齒)의 스프링상수에 기초한 형태이다.

(3)은 계산치형을 나타낸다. 계산치형은 치형중앙부에서 정하중방식으로 전조한 경우와 같은 국부적인 흠은 발생되지 않는다. 그러나 치형곡선은 치면접촉력의 분포가 반전한 형태가 되고, 전체적으로 완만한 오목(凹)형태가 된다. 동시에 이끝측이 근소하게 크게 되고 압력각오차도 발생한다. 따라서 강제변위방식에서도 F_{1max} 를 어느 정도 이상 크게 설정하면, 치형에서는 완만한 흠과 압력각오차가 발생하고, 가공정도에 한계가 있는 것을 보여주고 있다.

(4)는 오차가 있는 치형을 전조하는 경우의 전조치형을 나타냈고 공구압축력 F_1 을 (1)로 나타냈다. F_1 의 측정치는 파선으로 표시했으나, 오차가 없는 치형에 대해서 계산한 값과 거의 일치하고 있다. 실험에서 이용한 기어의 전조전의 치형곡선은 피동측 치면에서 거칠기는 약 10 μ m, 압력각오차는 20 μ m이다. 맞물림측 치면의 치형곡선은 전조전에 압력각오차가 없는 치형이다. 이 기어는 전조후, 피동측 치면과 맞물림측 치면에서는 δ_{max} 가 10 μ m가 되고, 치면의 거칠기는 완전히 소거돼 흠은 발생하지 않는다. 그러나 피동측 치면의 전가공치형의 압력각오차는 그다지 개선되지 않는다.

Fig. 18은 강제변위방식의 치형의 해석결과를 표준기어에 대해서 나타냈다. 동시맞물림점 수의 변화와 치면접촉력, 치형형상의 관계는 전위기어의 경우와 같은 유형으로 유사하게 나타났다.

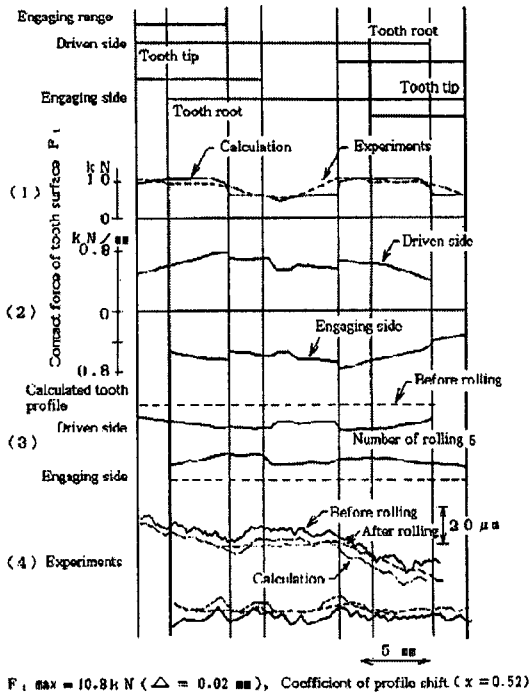


Fig. 17 Roll forming tooth profile by F.D.M.

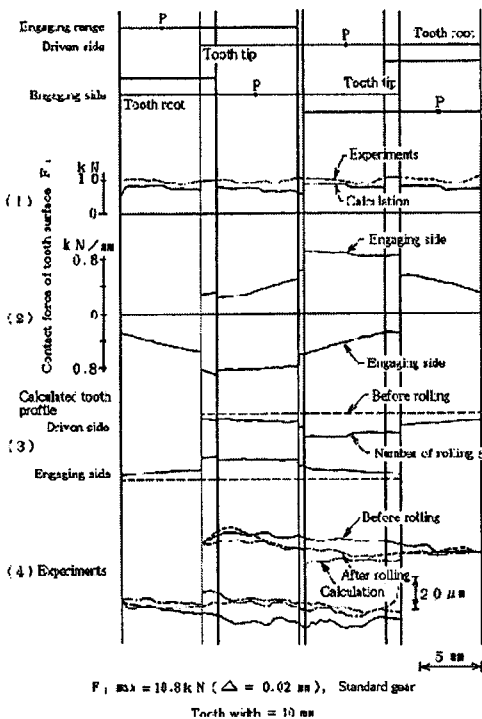


Fig. 18 Roll forming tooth profile by F.D.M.

4. 결론

고속회전용 기어의 정밀도 향상을 위한 전조 가공에서 문제가 되고 있는 치형의 홈과 압력각오차의 억제대책으로 제안된 강제변위방식과 그 가공특성 등을 고찰 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 강제변위방식은 가압부에서 고탄소강 나사 혹은 캠을 사용한다. 가압부는 공구의 변위를 주어 기능과 공구를 일정위치에 유지하는 기능을 갖고 있다. 전조는 가공부에 설정변위를 일정하게 가하며, 가압부에서 발생한 힘은 전조값을 소성변형 시키는 힘이 되어 전조기어와 공구 등의 탄성 변형력과의 조합으로 나타낼 수 있다

(2) 전조가공을 반복적으로 수행한 결과 δ_{ca} 와 δ_T 는 전조횟수 5 회 정도에서 거의 일정한 치수에 도달함을 알았다. 그리고 치형곡선의 모양은 전조가공 초기에 결정되며 전조가공에 의해 기어의 정밀도를 향상시킬 수 있다.

(3) 강제변위량과 전조효과와의 평가량 δ_{max} , δ_{ca} , δ_T 의 관계를 실험에 의하여 구하고, 전조가공에 따른 새로운 오차가 발생하지 않는 고정도치형이 얻어지는 가공조건을 설정하였다.

(4) 실험을 근거로 설정한 가공조건과 강제변위방식의 가공정도의 한계에 대하여 이론해석을 하였다. 그 결과 F_{tmax} 을 적절히 설정하면 치면의 거칠기를 완전히 감소시킬 수 있으며, 전조가공에 의해 KS1-2 급의 정밀기어를 가공 할 수 있다.

후 기

이 논문은 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI 04-01-03)과 2 단계 BK 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ford Motor Co., "Roll Forming of Gear at Ford Motor Company," AGMA, pp. 109-119, 1968.
2. Terauchi, Y., Tabara, M. and Wakaoka, N., "A Study on Rolling Finish of Gear : 1st Report, Distribution of Plastic Deformation on Profile," Trans. JSME, Vol. 43, No. 375, pp. 4327-4336, 1977.
3. Uematsu, S., "How to Occur Involute Profile Error in

- Finish Roll Forming of Spur Gears(1st Report),”
Trans. JSPE, Vol. 54, No. 1, pp. 139-144, 1988.
4. Uematsu, S. and Kato, M., “Involute Profile Error in Finish Roll Forming of Spur Gears(2nd Report) - formation of Pressure Angle Error,” Trans. JSPE, Vol. 55, No. 10, pp. 1839-1844, 1989.
 5. Uematsu, S. and Kato, M., “A New Method of forced Displacement for finish roll Forming of Spur Gears (1st Report)-working Process and mechanism,” Trans. JSPE, Vol. 56, No. 3, pp. 563-568, 1990.
 6. Uematsu, S. and Kato, M., “A New Method of forced Displacement for finish roll Forming of Spur Gears (2nd Report) - finishing Accuracy,” Trans. JSPE, Vol. 56, No. 11, pp. 2105-2110, 1990.
 7. Lyu, S. K., “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.
 8. Lee, S. H., “A Study on the Precision Analysis of Gear Measurement Using CNC Gear Tester & 3D Coordinate Measuring Machine,” Gyeongsang National University, pp. 1-73, 1999.
 9. Lyu, S. K., “International Symposium on Technology of Machine Elements Design 2002.” Research Center for Aircraft Parts Technology Gyeongsang National University, pp. 44-50, 2002.
 10. Lyu, S. K., “A Study on Correction of the Gear Tooth Profile Error by Finish Roll Forming,” J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 159-166, 2005.