

Counter Flow 방식의 랙 다이를 이용한 고정밀도 Worm 전조기술 개발

고대철#, 이정민*, 김병민*

Development of Form Rolling Technology for High Precision Worm Using the Rack Dies of Counter Flow Type

Dae-Cheol Ko#, Jung-Min Lee* and Byung-Min Kim*

ABSTRACT

The objective of this study is to suggest the form rolling technology to produce high precision worm on the base of three dimensional finite element simulation and experiment. It is important to determine the initial workpiece diameter in form rolling because it affects the quality of tooth profile. The calculation method of the initial workpiece diameter in form rolling is suggested and it is verified by finite element simulation. The form rolling processes of worm shaft used as automotive part using both the rack dies of counter flow type and the roll dies are considered and simulated with the same numerical model as actual process by the commercial finite element code, DEFORM-3D. Deformation modes of workpiece between the form rolling by the rack dies of counter flow type and the roll dies are investigated from the result of simulation. The experiments using rack dies and roll dies are performed under the same conditions as those of simulation. The surface roughness, the straightness and the profile of worm are measured precisely using the worm shafts obtained from experiment. The results of simulation and experiment in this study show that the form rolling process of worm shaft using the rack dies is decidedly superior to that using roll dies from the aspect of the precision of worm such as the surface roughness, the straightness and the profile of worm.

Key Words : Form Rolling(전조), Roll Dies(롤 다이), Rack Dies(랙 다이), Counter Flow(카운터 프로), Worm(웜), Finite Element Simulation (유한요소 시뮬레이션)

1. 서론

봉재를 회전시켜 가공하는 전조가공은 2 개 또는 3 개로 된 롤 사이에 소재를 회전시켜 성형하는 롤 다이 전조방식과 한 쌍의 랙 다이를 서로 반대방향의 동일한 속도로 움직여 제품을 성형

하는 랙 다이 전조방식이 있다. 랙 다이 전조방식은 랙 다이가 수평으로 배치된 것을 로토 프로(Roto Flow)식이라 하며, 수직으로 배치된 것을 카운터 프로(Counter Flow)식이라 한다. 현재 대부분의 생산현장에서는 작업공간을 적게 차지하는 수직식이 많이 사용되고 있다. 일반적으로 롤 다

접수일: 2003 년 12 월 15 일; 게재승인일: 2004 년 8 월 13 일

교신저자: 양산대학 자동차과

Email: dcko@yangsan.ac.kr, Tel: (055) 370-8297

* 부산대학교 정밀기계공학과

이스를 이용한 전조방식은 공구 궤적의 비틀림과 불완전한 성형가공부를 남게 하므로 건전한 전조 제품의 생산을 위해서는 랙 다이스 전조방식의 채택이 필요하며, 랙 다이스 전조방식을 이용한 기어전조는 가공능률이 높아 대량생산 및 고강도 기어제품의 제작이 가능하다. 그러나 현재 워엄 기어전조 제품의 성형특성 등에 대한 연구가 미흡하여 제품 불량률이 매우 높은 실정이므로 고정밀도의 워엄 기어제조에 어려움이 있다.^{1,2}

현재까지 전조가공에 대해 수행된 연구결과들을 살펴보면, Hayama³ 와 Kasei⁴ 등은 나사 전조에서 전조력을 평가할 수 있는 해석적 방법을 제시하였고, Ivanov⁵ 는 정밀 헬리컬 전조를 위해 헬리컬이나 동심의 채널을 가지는 롤의 형상을 결정하는 일반적인 방법을 제시하였다. 전조에서 피로저항을 개선하기 위하여 Martin^{6,7} 은 전조시 나사산 뿌리부에 생성되는 잔류응력의 영향에 대해 수치해석을 행하였다. Dotson 등⁸ 은 평 다이스에 의한 나사 전조에서 최종 나사 형상에 대한 재료, 소재 직경, 나사 피치 등의 영향을 실험으로 관찰하였고, Domblesky 와 Feng⁹ 은 나사전조공정의 근사화를 위한 2 차원 평면변형률 모델을 제시하고 상용 유한요소 코드인 DEFORM 을 이용하여 나사산 높이에 대한 나사형상, 마찰, 유동응력, 소재직경 등의 영향을 조사하였다. 또한 Gagg¹⁰ 는 롤 다이스의 재질과 적정 경도 선정에 위한 기준을 제시하였다. 이상에서 언급된 대부분의 연구들은 주로 롤 다이스에 의한 나사전조에 집중되어 있고 실험 및 해석을 통해 전조가공의 기초적인 연구결과를 제시하였다. 최근에 정밀 전조가공을 위해 랙 다이스 전조방식이 실제 현장에 적용되고 있으나, 이에 대한 연구가 부족하여 제품생산에 많은 어려움을 겪고 있다. 또한 국내에서는 각종 나사 및 기어류의 치형 성형을 위해 전조가공이 널리 적용되고 있음에도 불구하고 기반 기술이 취약하여 실제 제품의 생산에 상당한 애로를 겪고 있는 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 랙 다이스 전조방식을 이용한 고정밀도 워엄 전조기술을 개발하여 워엄 전조제품의 생산성 향상 및 품질 안정화에 기여하고자 한다. 이를 위해 자동차 부품에 소요되는 워엄 샤프트의 전조에 대해 롤 다이스 전조방식과 카운트 프로방식의 랙 다이스 전조방식에 대한 유한요소 해석을 수행하여 고정밀도 워엄 제조를 위한 전조

기술을 개발하고자 한다. 전조가공에서 초기 소재경은 성형되는 제품의 치수정밀도와 기어 치형의 표면 결함에 직접적인 영향을 미치는 중요한 인자이다. 이에 본 연구에서는 초기 소재경을 이론적으로 계산하고 유한요소 시뮬레이션을 통해 이를 검증하고자 한다. 또한 워엄 샤프트의 롤 다이스 전조방식과 카운트 프로방식의 랙 다이스 전조방식에 대해 실제 공정과 동일한 유한요소 시뮬레이션을 수행하여 제품의 정밀도 측면에서 랙 다이스 전조방식의 필요성을 설명하고자 한다. 이러한 해석결과는 동일한 조건하에서 수행한 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증함으로써 고정밀도 워엄 제조를 위한 전조기술을 확립하고자 한다.

2. 워엄 샤프트 전조의 초기 소재경 결정

2.1 초기 소재경 계산

자동차 전동시트, 섀시 등 적용되는 워엄 샤프트의 소재는 AISI 1045 이며, 나사의 줄수는 3 줄이다. 제품 요구치수 기준은 피치가 3.325mm, 외경이 $\phi 8.05 \pm 0.05$ mm, 내경이 $\phi 4.22$ mm 이다. Fig. 1 은 본 연구에서 고려한 워엄 샤프트의 치형형상을 나타낸 그림이다.

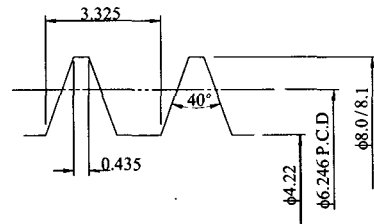


Fig. 1 Tooth profile of worm shaft

전조시 초기 소재경은 성형되는 제품의 치수정밀도와 치형의 표면결함에 직접적인 영향을 주기 때문에 초기 소재경의 결정은 매우 중요하다. 전조가공시 소재경이 작으면 전조 치형의 높이가 낮게 되고 소재경이 크면 전조시 소재 내부에 인장응력을 많이 받게 되므로 치형 내부에 크랙이 발생한다. 실제 대부분의 현장에서는 나사의 유효경이 허용된 공차범위에 근접하게 하기 위하여 여러 가지 소재경을 선삭가공하여 시행착오법으로 최종 제품규격에 적합한 초기 소재경을 결정하

로 제품 개발시 많은 시간 및 비용이 소요되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 체적일정조건 하에서 초기 소재경을 계산하는 이론식¹¹을 활용하여 전조 전의 소재경을 계산하고 이를 유한요소 시뮬레이션으로 검증하고자 한다. 전조 다이스의 진입으로 인한 골지름의 체적과 나사 치형의 체적의 합과 동일한 체적을 가지는 조건하에서의 이론적 초기 소재경 d_r 은 다음의 식(1)과 같이 구해질 수 있다.

$$d_r = \sqrt{\frac{4}{\pi}(V_1 + V_2)} \quad (1)$$

여기서, $V_1 = \frac{\pi}{4}d_k^2$

$$V_2 = 0.5hn(t + F_{cs})\sqrt{[\pi(d_k + 2x)]^2 + P^2}$$

$$t = 2h \tan \theta + F_{cs}$$

$$x = \frac{h}{3}(2F_{cs} + t)/(F_{cs} + t) \text{ 이다.}$$

또한 d_k 는 골지름, h 는 나사산의 높이, n 는 축방향 단위 길이당 나사산수, t 는 나사산 뿌리부(thread root)의 길이, F_{cs} 는 나사산 끝단부(thread crest)의 길이, P 는 피치, θ 는 나사산의 반각, x 는 골지름으로부터 산형의 중심까지 거리, V_1 은 축방향 단위 길이당 골지름 체적, V_2 는 축방향 단위 길이당 나사치형의 체적을 나타낸다. Fig. 1에 나타낸 워 샤프트의 치형단면 치수로부터 식(1)을 이용하여 계산하면 초기 소재경은 $\phi 5.76\text{mm}$ 임을 알 수 있다.

2.2 FE-Simulation 에 의한 검증

이론적 초기 소재경의 검증을 위해 식(1)로부터 계산된 $\phi 5.76\text{mm}$ 를 기준으로 0.02mm 간격으로 변화시켜 $\phi 5.72 \sim \phi 5.80\text{mm}$ 의 5 가지 경우에 대하여 유한요소 시뮬레이션을 수행하였다. 전조시 원주방향의 소재 변형은 무시할 수 있으므로 2차원 평면변형을 문제로 단순화시켜 해석을 수행하였다.⁹ 시뮬레이션에 사용된 재료는 AISI 1045이며, 응력-변형률 관계식은 인장시험을 통하여 다음의 식(2)와 같이 구하였다.

$$\bar{\sigma} = 103.99\bar{\epsilon}^{0.11} [Mpa] \quad (2)$$

Fig. 2에 2차원 시뮬레이션 결과를 나타내었다. Fig. 2(a)에서 실제 AISI 1045로 전조할 경우 소재의 연신률이 4%로 측정되었으므로 이를 고려하기 위해 양쪽 끝단에 스톱퍼(stopper)를 두었다. Fig. 2(b)와 (c)는 다이 압입량이 60%일 경우와 최종단계에서 소재의 변형을 나타내고 있다. 5 가지 초기 소재경에 대한 시뮬레이션 결과로부터 최종 제품의 외경을 측정하여 Table 1에 나타내었다. 워 샤프트의 요구치수 기준에 의하면 제품의 외경은 $\phi 8.05 \pm 0.05\text{mm}$ 이다. 따라서 초기 소재경이 $\phi 5.76\text{mm}$ 일 때 해석으로 예측된 제품의 외경이 $\phi 8.07\text{mm}$ 이므로 식(1)로 계산된 초기 소재경이 타당함을 알 수 있다.

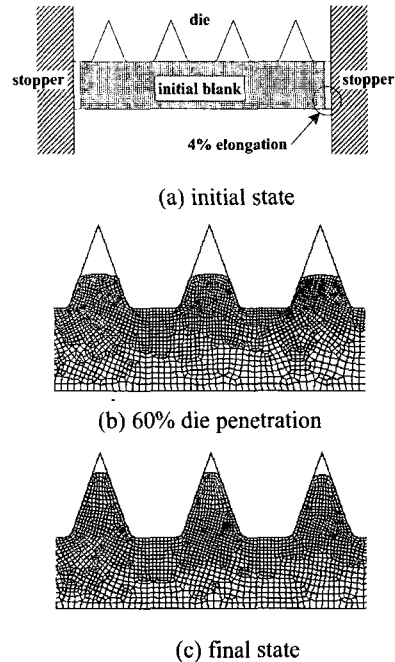


Fig. 2 Verification of initial workpiece diameter by FE-simulation

Table 1 Predicted outer diameter, d_o of worm shaft for initial workpiece diameter, d_r by FE-simulation

d_r	$\phi 5.72$	$\phi 5.74$	$\phi 5.76$	$\phi 5.78$	$\phi 5.80$
d_o	$\phi 7.77$	$\phi 7.85$	$\phi 8.07$	$\phi 8.17$	$\phi 8.25$

3. 웜 샤프트 전조공정의 유한요소해석

3.1 웜 샤프트의 롤 다이스 전조공정

2 개의 회전 롤을 이용한 실제 웜 샤프트의 롤 다이스 전조공정을 모델링하고 DEFORM-3D 로 시뮬레이션하였다. 롤 다이스 방식의 웜 샤프트 전조공정에 대한 3 차원 모델링결과와 시뮬레이션 과정을 Fig. 3 에 나타내었다. Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯이 롤 다이스의 직경은 $\phi 260\text{mm}$ 이고 폭은 60mm 이며, 본 연구에서 고려한 롤 다이스 전조방식은 *infeed* 방식이므로 시뮬레이션 동안에서 소재의 이송현상을 방지하기 위하여 소재의 양끝단면에 위치한 절점들에 대해 변위를 구속하였다. 롤 다이스와 소재 접촉면에서의 마찰조건은 롤 다이스와 소재사이의 미끄럼 현상을 억제하고 원활한 치형의 성형을 해석하기 위해 마찰상수, m 을 0.9 로 가정하여 건마찰상태에 가깝게 하였다.² 롤 다이스의 회전과 소재쪽으로의 압입에 의해 치형의 성형이 이루어짐을 Fig. 3(b)에서 관찰할 수 있다.

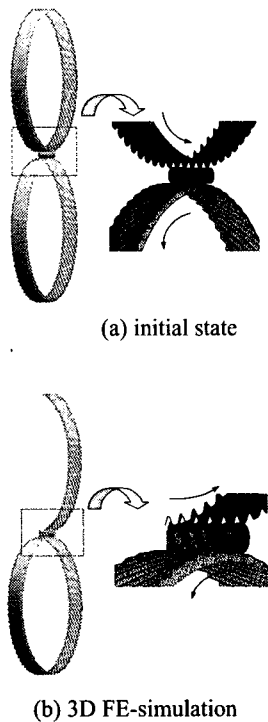


Fig. 3 FE-modeling and simulation for form rolling of worm shaft using the roll dies

롤 다이스의 진입량에 따른 치형의 성형과정을 Fig. 4 에 단계별로 나타내었다. 롤 다이스 전조 방식의 경우, 성형해야 할 치형과 합치하는 총형의 치형공구 압입에 의해 다이스의 치홈부분으로 소재가 변형함에 따라서 치형이 성형된다. Fig. 4 의 A, B, C 부분에 대한 치형의 성형과정을 확대한 결과에서 볼 수 있듯이, 롤 다이스에 의한 치형의 성형은 롤 다이스의 측면을 따라 소재 유동이 먼저 일어나고 중앙부분의 유동이 상대적으로 느리기 때문에 치형의 끝단부가 완전하게 성형되지 않음을 관찰할 수 있다. 이로 인해 치형의 형상이 건전하지 못함을 볼 수 있고 소재에 불완전한 성형가공부가 남게됨을 관찰 할 수 있다.

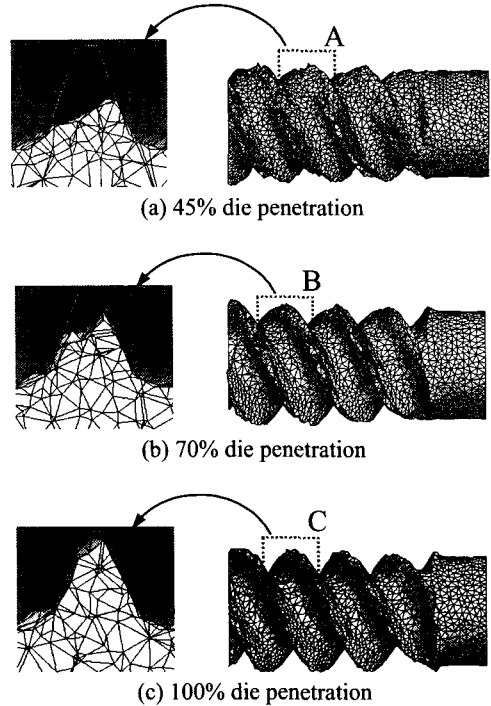


Fig. 4 FE-simulation results for form rolling of worm shaft using the roll dies

롤 다이스 진입량에 따른 소재 내부의 유효 변형률 분포를 Fig. 5 에 나타내었다. 성형의 초기 단계에는 치형의 부위에 변형이 집중되고 치형의 성형이 진행됨에 따라 변형영역의 분포가 점차 소재 내부로 확대됨을 볼 수 있다.

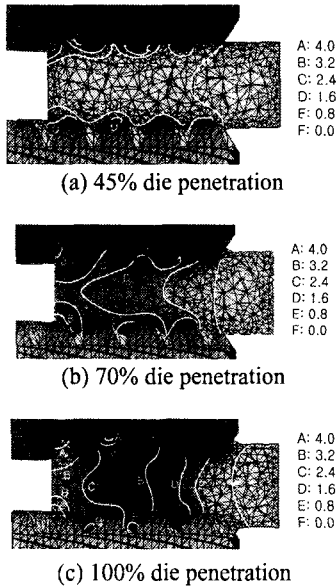


Fig. 5 Effective strain distribution within worm shaft using the roll dies

3.2 웜 샤프트의 랙 다이스 전조공정

롤 다이스 전조방식과 비교를 위하여 동일한 조건하에서 카운터 프로 방식의 랙 다이스 전조공정을 시뮬레이션하였다. 랙 다이스의 설계는 웜 샤프트의 실제 공정을 모사하여 Fig. 6 과 같이 설계하였다. 설계된 랙 다이스는 성형부, 평형부, 탈락부 세부분으로 다이스 표면이 구분되어 있다. 평형부에서는 거의 완성된 치형을 더욱 고정도 치수로 사상을 하며, 탈락부에서는 성형품의 탄성회복을 서서히 일어나게 하며 다이스에서 성형품의 이탈을 원활하게 한다.

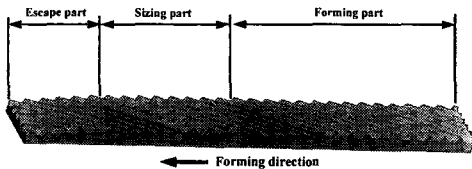


Fig. 6 Shape of rack dies

Fig. 7 은 카운터 프로방식의 랙 다이스를 이용한 웜 샤프트의 실제 전조공정을 유한요소 모델링하여 3 차원 시뮬레이션한 결과를 나타낸 그림이다. Fig. 7(a)는 랙 다이스 전조의 초기 상태를 나타

내고 있으며, 랙 다이스의 길이 및 폭은 각각 600mm, 40mm 이다. 랙 다이스 전조의 시뮬레이션에서 랙 다이스와 소재 접촉면에서의 마찰조건은 롤 다이스의 시뮬레이션과 동일하게 가정하였으며, 그 외에 어떠한 구속조건도 소재에 부여하지 않았다. Fig. 7(b)는 랙 다이스가 진행함에 따라 랙 치형이 소재로의 압입이 이루어지므로 치형의 성형이 일어남을 볼 수 있다.

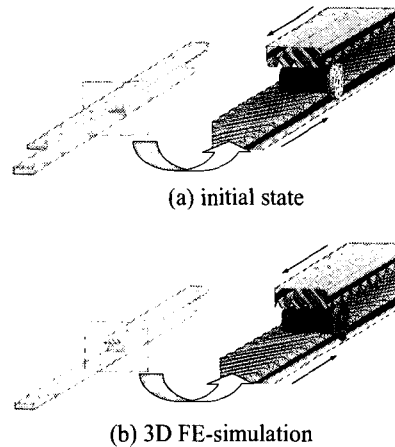


Fig. 7 FE-modeling and simulation for form rolling of worm shaft using the rack dies

랙 다이스의 진입량에 따른 치형의 성형과정을 Fig. 8 에 나타내었다. 성형 초기에서는 소재의 치수 자국이 일어나고 이어서 랙 치형이 소재로의 압입이 증가함에 따라 치형의 성장과 창성이 진행됨을 볼 수 있다. 또한 Fig. 8 의 각 단계에서 A, B, C 부분에 대한 랙 다이스 내부로의 치형 성형을 보다 자세히 관찰해 보면 성형 초기단계에는 약간의 불균일한 소재 유동이 일어나지만, 성형이 진행됨에 따라 랙 다이스 성형부의 경사각을 따라서 치형이 점진적으로 성형됨을 알 수 있다. 랙 다이스 전조의 경우 치형 끝단부의 소재 유동속도가 거의 균일하므로 치형의 형상이 양호하고 좋은 표면정도가 유지됨을 관찰할 수 있다. 또한 랙 다이스 전조는 전조동안에 다이스 전폭을 사용하므로 소재의 궤적이 적어 표면정도나 진직도 측면에서 유리함을 예측할 수 있다. 따라서 Fig. 4 와 8 의 시뮬레이션 결과로부터 고정밀 웜 샤프트의 제조를 위해서는 랙 다이스 전조방식을 채택하는 것이

합리적임을 알 수 있다.

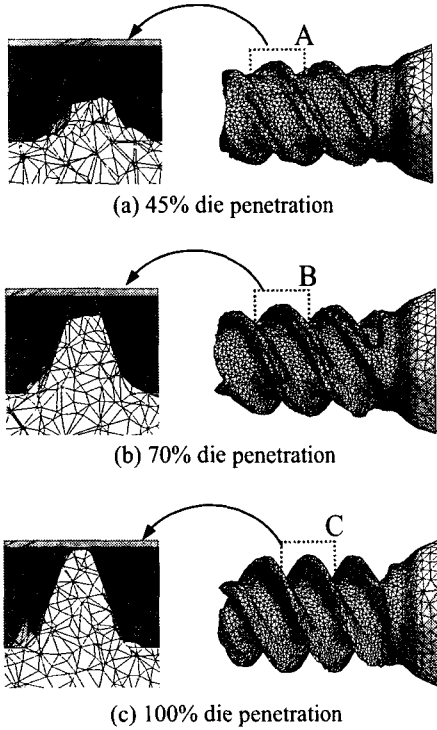


Fig. 8 FE-simulation results for form rolling of worm shaft using the rack dies

Fig. 9 에 랙 다이스 진입량에 따른 소재 내부의 유효 변형률 분포를 나타내었다. 성형 초기에는 치형의 부위에 변형이 집중되고 성형이 진행됨에 따라 변형영역의 분포가 점차 소재 내부로 확대됨을 볼 수 있다. 치형의 이끝부분에 가장 큰 변형률 분포가 존재하므로 고강도의 워름 제조가 가능함을 예측할 수 있다. Fig. 10 은 롤 다이스 및 랙 다이스 전조방식에서 전조력의 변화를 나타낸 그림이다. 롤 다이스 전조방식의 경우 5.7ton의 전조력이 소요되며, 랙 다이스 전조방식의 4.2ton의 전조력이 필요함을 볼 수 있다. Fig. 5와 9의 유효 변형률 분포를 비교해 보면 롤 다이스 전조방식이 소재 내부에 비교적 높은 변형률이 분포하며, Fig. 10의 시뮬레이션으로 예측된 전조력도 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 롤 다이스 전조방식의 경우, 롤 다이스가 워름의 P.C.D(pitch circle diameter)까지 압입될 때와 치형의 성형이 완료될

때까지 큰 전조력이 소요되는 반면에, 랙 다이스 전조방식의 경우 워름의 P.C.D 까지는 큰 전조력이 작용하지 않으며, 치형이 점진적으로 성형되기 때문에 나타난 결과라고 판단된다.

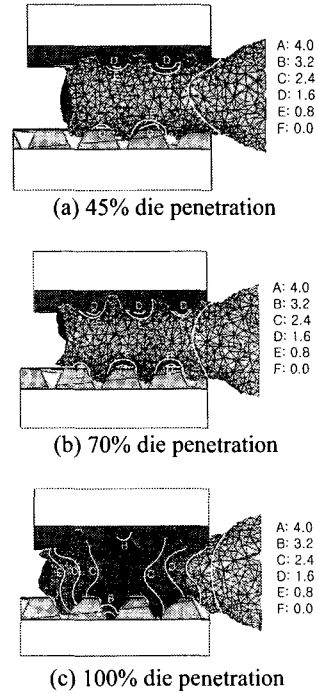


Fig. 9 Effective strain distribution within worm shaft using the rack dies

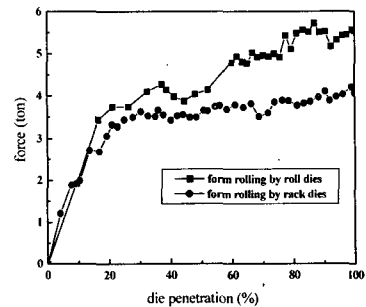


Fig. 10 Variation of the required force

3.3 워름 샤프트 전조공정에 대한 실험결과

시뮬레이션 결과의 검증은 위하여 동일한 조건하에서 워름 샤프트를 랙 다이스 전조방식과 롤 다이스 전조방식으로 성형해 보았다. Fig. 11에 랙

다이스 및 롤 다이스 전조방식으로 각각 성형된 워름 샤프트를 나타내었다.

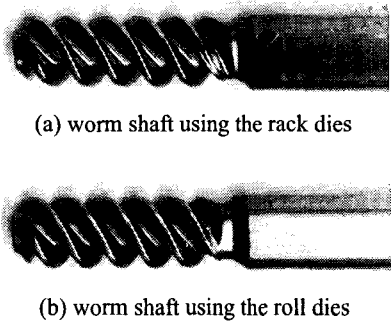


Fig. 11 Experimental results

실험결과와 정량적인 관찰을 위하여 치형의 측면을 따라 표면조도를 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 12 와 같다. Fig. 12 에서 점선은 압력각(pressure angle)의 변화를 나타내며, 실선은 표면조도를 측정된 데이터를 나타낸다. Fig. 12 의 좌.우측 데이터는 3 개의 치형에 대해 좌.우측면을 측정한 결과를 나타낸다. 워름 샤프트의 기준 압력각 20°에 대해, 랙 다이스 전조방식의 경우 평균 21.8 μm , 롤 다이스 전조방식의 경우 평균 55.2 μm 의 오차가 나타났다. 또한 랙 다이스 방식으로 전조한 경우 측정된 값이 거의 흔들림이 없이 표면조도(R_{max})가 6.2 이하로 우수하게 나타남을 관찰할 수 있다.

워름 샤프트의 형상을 조사하기 위하여 3 개의 치형에 대해 P.C.D 지점에서 오버핀경으로 리드각에 따라 3회전하여 측정된 결과는 Fig. 13 과 같다. Fig. 13 에서 실선은 오버핀경의 이동경로를 나타내며, 점선은 이동경로의 평균값을 의미한다. 3회전 동안의 리드각 오차는 랙 다이스 전조방식의 경우 평균 22.1 μm , 롤 다이스 전조방식의 경우 평균 63.3 μm 로 나타났다. 또한 P.C.D의 이동경로가 랙 다이스로 전조한 경우 평행하게 나타나고 있으므로 랙 다이스 전조한 워름 샤프트의 치형형상 및 진직도가 롤 다이스로 전조한 경우보다 우수함을 알 수 있다. 이러한 결과를 Table 2에 요약하여 나타내었으며, 랙 다이스로 전조한 워름 샤프트의 경우가 제품의 허용공차를 모두 만족하고 있음을 볼 수 있다. 이상의 시뮬레이션 및 실험결과로부터 랙 다이스 전조방식을 이용하여 고정밀도의 워름 샤프트 제조가 가능함을 알 수 있다.

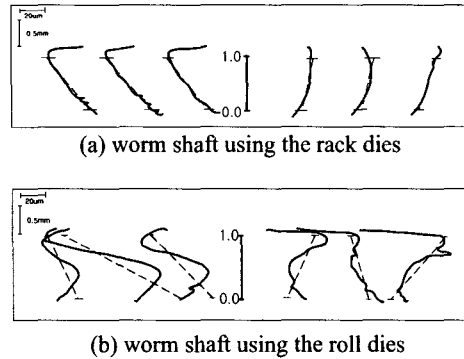
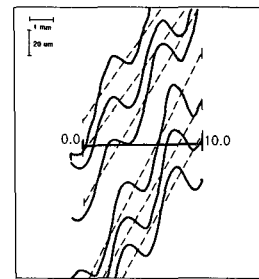
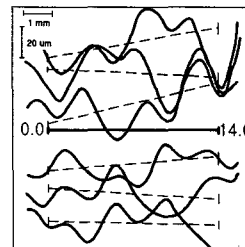


Fig. 12 Measured surface roughness of worm shaft



(a) worm shaft using the rack dies



(b) worm shaft using the roll dies

Fig. 13 Measured tooth profile of worm shaft

Table 2 Comparison of precision for worm shaft produced by roll and rack dies

Item	Roll	Rack	Tolerance
Pressure Angle Error(μm)	55.2	21.8	50
Surface Roughness(R_{max})	23.2	6.2	20
Lead Angle Error(μm)	63.3	22.1	25

4. 결론

본 연구에서는 고정밀 워의 전조를 위해 유한 요소 시뮬레이션과 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전조공정에서 초기 소재경을 계산하기 위해 체적일정조건을 이용한 이론식을 활용하였고, 실제 공정에 대한 2 차원 유한요소 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증하였다.
- (2) 워 샤프트 전조공정의 3 차원 시뮬레이션 결과로부터 랙 다이스 전조방식의 경우, 치형 성형의 초기단계에는 약간의 불균일한 소재 유동이 일어나지만 성형이 진행됨에 따라 랙 다이스 성형부의 경사각을 따라서 치형이 점진적으로 성형됨을 알 수 있었다. 반면에 롤 다이스에 의한 치형의 성형은 롤 다이스의 측면을 따라 소재 유동이 먼저 일어나고 중앙부분의 유동이 상대적으로 느리기 때문에 치형의 끝단부가 완전하게 성형되지 않아 불완전한 성형가공부가 존재하였다.
- (3) 유효변형률 분포와 전조력에 대한 시뮬레이션 결과로부터 롤 다이스 전조방식의 경우 롤 다이스가 워의 P.C.D 까지 압입될 때와 치형의 성형이 완료될 때까지 큰 전조력이 소요되나, 랙 다이스 전조방식의 경우 워의 P.C.D 까지는 큰 전조력이 작용하지 않고 치형이 점진적으로 성형되기 때문에 롤 다이스 전조방식이 소재 내부에 비교적 높은 변형률이 분포하며, 전조력도 크게 나타남을 알 수 있었다.
- (4) 3 차원 시뮬레이션 결과로부터 랙 다이스 전조방식의 경우 다이스의 성형부 경사각을 따라서 점진적으로 치형이 성형되고 전조 중 소재의 궤적이 적으므로 표면정도나 진직도 측면에서 유리함을 알 수 있었으며, 동일한 조건하에서 수행한 실험결과로부터 랙 다이스 방식으로 전조할 경우 표면정도 및 치형 형상을 롤 다이스로 전조한 경우보다 우수함을 알 수 있었다. 따라서 랙 다이스 전조방식을 이용하여 고정밀도의 워 샤프트 제조가 가능함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2002 년도 한국학술진흥재단의 지원

에 의해 연구되었으며(KRF-2002-003-D00025), 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 葉山益次郎, “回轉塑性加工學,” 東京: 近代編集社, 1981.
2. 東京: コロナ社, “回轉加工とスピニング,” 日本塑性加工學會 編, 1990.
3. Hayama, M., “Estimation of Thread Rolling Pressure,” J. of the JSTP, Vol. 9, pp. 190-197, 1968.
4. Kasei, S., Shiho, M., Yamamoto, A., “A Study on the Tapping Torque in the Cold Forming of Nut-Thread,” J. of the JSTP, Vol. 16, pp. 264-273, 1975.
5. Ivanov, V., “Profiling of Rollers for Thread Rolling,” J. of Mater. Process. Technol., Vol. 59, 1995.
6. Martin, J. A., “Mesh Density Study for Application to Large Deformation Rolling Process Evaluations,” Fatigue, Fracture, and Residual Stresses, ASME, Pressure Vessels and Piping Division, Vol. 373, pp. 177-184, 1998.
7. Martin, J. A., “Fundamental Finite Element Evaluation of a Three Dimensional Rolled Thread Form: Modeling and Experimental Results,” Fatigue, Fracture, and Residual Stresses, ASME, Pressure Vessels and Piping Division, Vol. 373, pp. 457-467, 1998.
8. Dotson, J. L., Henrey, C. R., Domblesky, J. P., “Experimental Investigation of External Thread Rolling,” Wire Journal International, pp. 64-68, 2002.
9. Domblesky, J. P., Feng, F., “A Parametric Study of Process Parameters in External Thread Rolling,” J. of Mater. Process. Technol., Vol. 121, pp. 341-349, 2002.
10. Gagg, C. R., “Premature Failure of Thread Rolling Dies: Material Selection, Hardness Criteria and Case Studies,” Engineering Failure Analysis, Vol. 8, pp. 87-105, 2001.
11. Kim, K. H., Kim, D. H., Kim, B. M., “Determination of Optimal Blank Diameter for High Precision of Spindle Screw,” J. of KSTP, Vol. 11, No.8, pp. 710-715, 2002.