

## Counter Flow 방식의 랙 다이를 이용한 고정밀도 Worm 전조기술 개발

고대철\*(양산대 자동차과), 박준모(부산대원 정밀기계공학과), 김병민(부산대 정밀기계공학과)

### Development of form rolling technology for high precision worm using the rack dies of counter flow type

D. C. Ko(Automotive Eng. Dept., YSC), J. M. Park, B. M. Kim(Precision Mechanical Eng. Dept., BNU)

#### ABSTRACT

The objective of this study is to suggest the form rolling technology to produce high precision worm. Rack dies and roll dies are usually used to roll parts with worm teeth. The form rolling processes of worm shaft used as automotive part using the rack dies of counter flow type and the roll dies are considered and simulated by the commercial finite element code, DEFORM-3D. It is also important to determine the initial blank diameter in form rolling because it affects the quality of thread. The calculation method of the initial blank diameter in form rolling is suggested and it is verified by FE-simulation. The experiments using rack dies and roll dies are performed under the same conditions as those of simulation. 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 rolling dies from the aspect of the surface roughness and the profile of worm.

**Key Words** : Roll Dies(롤 다이스), Rack Dies(랙 다이스), Counter Flow(카운터 프로), Worm(웜), FE-simulation(유한 요소 시뮬레이션)

#### 1. 서론

봉재를 회전시켜 가공하는 전조가공은 2 개 또는 여러 개로 된 풀형 다이스 사이에 소재를 회전시켜 성형하는 롤 전조방식과 한 쌍의 랙형 다이스를 서로 반대방향의 동일한 속도로 움직여 제품을 성형하는 랙 다이스 전조방식이 있다. 랙 다이스 전조방식은 랙형 다이스가 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 다이스를 이용한 전조방식은 공구 궤적의 비틀림과 불완전한 성형가공부를 남게 하므로, 건전한 전조제품의 생산을 위해서는 랙 다이스 전조방식의 채택이 필요하며, 랙 다이스 전조방식을 이용한 기어전조는 가공능률이 높아 대량생산 및 고강도 기어제품의 제작이 가능하다. 그러나 현재 Worm 기어전조 제품의 성형특성 등에 대한 연구가 미흡하여 제품 불량

률이 매우 높은 실정이므로 고정밀도의 Worm 기어 제조에 어려움이 있다[1,2].

따라서 본 연구의 목적은 랙 다이스 전조방식을 이용한 고정밀도 Worm 전조기술을 개발하여 Worm 전조제품의 생산성 향상 및 품질 안정화에 있다. 이를 위해 자동차 속도 계기판 등에 소요되는 Worm Shaft 전조에 대해 롤 다이스 전조방식과 카운트 프로방식의 랙 다이스 전조방식에 대한 유한 요소해석을 수행하여 고정밀도 Worm 제조를 위한 전조기술을 개발하고자 한다. 전조가공에서 초기 소재경은 성형되는 제품의 치수정밀도와 기어 산의 표면 결함에 직접적인 영향을 미치는 중요한 인자이다. 이에 본 연구에서는 초기 소재경을 이론적으로 결정하기 위한 방법을 제시하고 유한요소 시뮬레이션을 통해 이를 검증하고자 한다. 또한 Worm Shaft 의 롤 다이스 전조방식과 카운트 프로방식의 랙 다이스 전조방식에 대해 실험결과 동일한 유한 요소 시뮬레이션을 수행하여 제품의 정밀도 측면에서 랙 다이스 전조방식의 필요성을 설명하고자 한

다. 이러한 해석결과는 동일한 조건하에서 수행한 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증함으로써 고정밀도 Worm 제조를 위한 전조기술을 확립하고자 한다.

## 2. Worm Shaft 전조의 이론적 초기 소재경

### 2.1 초기 소재경의 결정

자동차 속도 계기판에 적용되는 Worm Shaft의 소재는 AISI 1045이며, 제품 요구치수 기준은 피치 3.325mm, 외경  $\phi$  8.0~8.1mm, 내경  $\phi$  4.22mm 이고 치수검증을 위한 검사볼 직경은  $\phi$  2.35mm이다. Fig. 1은 Worm Shaft의 치형형상을 나타낸 그림이다.

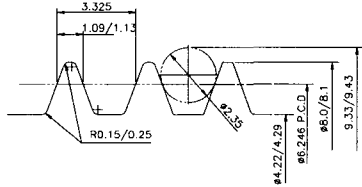


Fig. 1 Dimension of thread in Worm Shaft

전조시 초기 소재경은 성형되는 제품의 치수정밀도와 나사산의 표면결함에 직접적인 영향을 주기 때문에 초기 소재경의 결정은 매우 중요하다. 전조 가공시 소재경이 작으면 전조 치형의 높이가 낮게 되고 소재경이 크면 전조시 소재 내부에 인장응력을 많이 받게 되므로 치형부 내부에 크랙이 발생한다. 실제 대부분의 현장에서는 나사의 유효경이 허용된 공차범위에 근접하게 하기 위하여 여러 가지 소재경을 선삭가공하여 시행착오법으로 최종 제품 규격에 적합한 초기 소재경을 결정하므로 제품 개발시 많은 시간 및 비용이 소요되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 체적일정조건을 이용하여 초기 소재경을 계산하는 이론식을 제시한다[3]. 전조 다이스의 진입으로 인한 골지름의 체적과 나사 치형의 체적의 합과 동일한 체적을 가지는 조건하에서의 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,  $V_1 = \frac{\pi}{4} d_k^2 t$

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

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

$$x = \frac{h}{3}(2F_{cs} + t)/(F_{cs} + t) \text{ 이고, } d_k \text{는 골지}$$

름,  $h$ 는 나사산의 높이,  $n$ 은 축방향 단위 길이당 나사산수,  $P$ 는 피치,  $\theta$ 는 나사산의 반각,  $x$ 는 골

지름으로부터 산형의 중심까지 거리,  $V_1$ 은 축방향 단위 길이당 골지름 체적,  $V_2$ 는 축방향 단위 길이당 나사치형의 체적을 나타낸다. Fig. 1에 나타낸 Worm Shaft의 치형단면 치수를 식(1)에 대입하여 계산하면 초기 소재경은  $\phi$  5.756mm로 계산된다.

### 2.2 계산된 초기 소재경의 검증

계산된 초기 소재경의 검증을 위해 식(1)을 이용하여 계산된  $\phi$  5.756mm를 기준으로 0.02mm 간격으로 변화시켜  $\phi$  5.715~ $\phi$  5.796mm의 5가지 경우에 대하여 유한요소 시뮬레이션을 수행하였다. 전조시 원주방향의 소재 변형은 무시할 수 있으므로 2차원 평면변형률 문제로 단순화시켜 해석을 수행하였다[4]. Fig. 2에 2차원 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 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. 2(a)에서 실제 AISI 1045로 전조할 경우 소재의 연신률이 4%로 측정되었으므로 이를 고려하기 위해 양쪽 끝단에 stopper를 두었다. Fig. 2(b)와 (c)는 다이 압입량이 60%일 경우와 최종단계에서 소재의 변형을 나타내고 있다. 5가지 초기 소재경에 대한 시뮬레이션 결과로부터 최종 제품의 외경을 예측하여 Table 1에 나타내었다. Worm Shaft의 요구치수기준에 의하면 제품의 외경은  $\phi$  8.0~8.1mm이다. 따라서 초기 소재경이  $\phi$  5.576mm일 때 해석으로 예측된 제품의 외경이  $\phi$  8.068이므로 식(1)로 계산된 초기 소재경이 타당함을 알 수 있다.

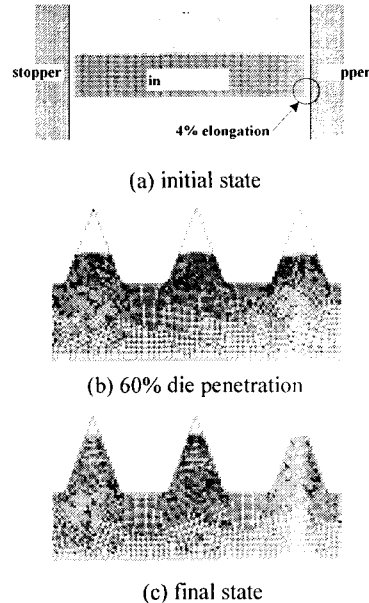


Fig. 2 FE-simulation for verification of initial blank diameter

Table 1 Predicted outer diameter,  $d_o$ , of Worm Shaft for initial blank diameter,  $d_r$ , by FE-simulation

$d_r$	$\phi$ 5.716	$\phi$ 5.736	$\phi$ 5.756	$\phi$ 5.776	$\phi$ 5.796
$d_o$	$\phi$ 7.766	$\phi$ 7.850	$\phi$ 8.068	$\phi$ 8.168	$\phi$ 8.254

### 3. Worm Shaft 전조공정의 유한요소해석

#### 3.1 Worm Shaft의 랙 다이스 전조

랙 다이스의 설계는 Worm Shaft의 실공정을 그대로 모사해서 Fig. 3과 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.

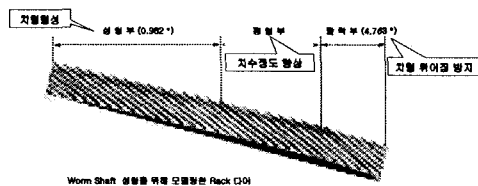


Fig. 3 Shape of rack dies

Fig. 4는 카운터 프로방식의 랙 다이스를 이용한 Worm Shaft 전조의 실공정을 유한요소 모델링한 결과이며, Fig. 5는 상용 유한요소코드인 DEFORM-3D를 이용하여 시뮬레이션한 결과를 나타낸 그림이다. 성형부의 초기에서는 소재의 치수 자국이 일어나고 이어서 랙 치형이 소재로의 압입이 증가함에 따라 치형의 성장과 창성이 진행됨을 볼 수 있다. 또한 랙 다이스 성형부의 경사각을 따라서 소재 neck 부분의 간섭이 없이 점진적으로 성형되므로 좋은 표면정도가 유지되며, 전조 중 소재의 깨짐이 적으므로 표면정도나 진직도 측면에서 유리함을 관찰할 수 있다.



Fig. 4 FE-modeling for form rolling of Worm Shaft using the rack dies

#### 3.2 Worm Shaft의 롤 다이스 전조

랙 다이스 전조방식과의 비교를 위하여 동일한 조건 하에서 2개의 회전 롤을 이용한 롤 다이스 전조공정을 시뮬레이션하였다. 롤 다이스 방식의

Worm Shaft 전조공정에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 롤 다이스 전조방식의 경우, 성형해야 할 치형과 합치하는 총형의 치형공구 압입에 의해 치홈부분으로 소재의 변형에 따라서 치형이 성형된다. 롤 다이스에 의한 치의 성형전조는 치형의 형상이 건전하지 못하여 불완전한 성형가공부가 남게됨을 관찰할 수 있다. 따라서 Fig. 5와 6의 시뮬레이션 결과로부터 고정밀 Worm Shaft의 제조를 위해서는 랙 다이스 전조방식을 채택하는 것이 필요함을 알 수 있다.

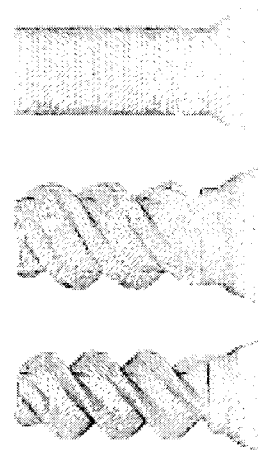


Fig. 5 FE-simulation results for form rolling of Worm Shaft using the rack dies

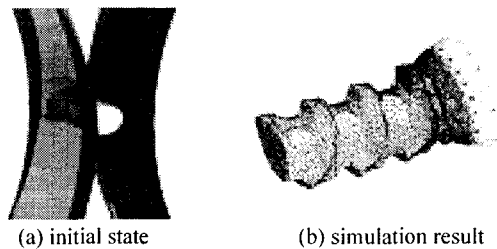


Fig. 6 FE-simulation for form rolling of Worm Shaft using the roll dies

#### 3.3 Worm Shaft의 전조공정에 대한 실험결과

시뮬레이션 결과의 검증을 위하여 동일한 조건 하에서 Worm Shaft를 랙 다이스 전조방식과 롤 다이스 전조방식으로 성형해 보았다. Fig. 7에 랙 다이스 및 롤 다이스 전조방식으로 각각 성형된 Worm Shaft를 나타내었으며, neck 부분에서의 표면정도가 랙 다이스로 성형된 경우가 보다 우수함을 관찰할 수 있다.

실험결과와 정량적인 관찰을 위하여 리이드 각에 따라 표면조도를 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 8과 같다. 랙 다이스 방식으로 전조한 경우 측정값이 거의 흔들림이 없이 표면조도가 0.6Ra 이하로

우수하게 나타남을 관찰할 수 있다. 또한 Worm Shaft의 형상을 조사하기 위하여 P.C.D(pitch circle diameter) 지점에서 오버핀경으로 리이드 각에 따라 측정된 결과는 Fig. 9와 같다. P.C.D의 이동경로가 랙 다이스로 전조한 경우 평행하게 나타나고 있으므로 랙 다이스 전조한 Worm Shaft의 치형형상을 롤 다이스로 전조한 경우보다 우수함을 알 수 있다. 이상의 시뮬레이션 및 실험결과로부터 고정밀도의 Worm Shaft의 제조를 위해서는 랙 다이스 전조방식의 사용이 필요함을 알 수 있다.

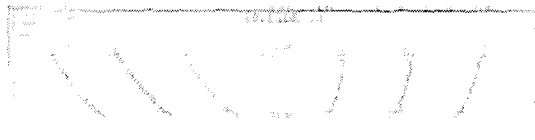


(a) Worm Shaft produced by the rack dies



(b) Worm Shaft produced by the roll dies

Fig. 7 Experimental results



(a) Worm Shaft produced by the rack dies



(b) Worm Shaft produced by the roll dies

Fig. 8 Measured surface roughness

#### 4. 결론

본 연구에서는 고정밀 Worm의 전조를 위해 유한요소 시뮬레이션과 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전조공정에서 초기 소재경을 계산하기 위한 이론적 계산식을 제시하였고 유한요소 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증하였다.
- (2) 랙 및 롤 다이스 전조공정에 대하여 실공정을 모사한 3차원 시뮬레이션을 수행하였으며, 랙 다이스 전조방식의 경우 다이스의 성형부 경사각을 따라서 점진적으로 치형이 성형되고 전조 중 소재의

레적이 적으므로 표면정도나 진직도 측면에서 우수함을 알 수 있었다.

(3) 유한요소 시뮬레이션과 동일한 조건하에서 수행한 실험결과로부터 랙 다이스 방식으로 전조할 경우 표면조도 및 치형형상을 롤 다이스로 전조한 경우보다 우수함을 알 수 있었다.

(4) 유한요소 시뮬레이션 및 실험결과로부터 고정밀도 Worm의 제조를 위해서는 랙 다이스 전조방식의 사용이 필요함을 알 수 있었다.

(a) Worm Shaft produced by the rack dies



(b) Worm Shaft produced by the roll dies

Fig. 9 Measured profile of Worm Shaft

#### 후 기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의해 연구되었으며(KRF-2002-003-D00025), 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 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.
2. 葉山益次郎, "回轉塑性加工學," 東京: 近代編集社, 1981.
3. 김광호, 김동환, 김병민, "고정도 Spindle Screw 전조공정에서의 최적 소재경 선정," 한국소성가공학회지, 제 11 권, 제 8 호, pp. 710-715, 2002.
4. Domblesky, J. P., and Feng, F., "A parametric study of process parameters in external thread rolling," J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 121, pp. 341-349, 2002.