

기어 정밀정형 성형을 위한 후 공정으로서의 냉간 아이어닝 공정에 대한 연구

장유철* · 박철성* · 김병민** · T.A. Dean*** · 강범수†

(2002년 2월 21일 접수, 2002년 7월 31일 심사완료)

Experimental and Numerical Study of Cold Ironing as a Post-Process of Net-Shape Manufacture of Gears

Yu-Chul Chang, Chul-Sung Park, Byung-Min Kim, Trever A. Dean and Beom-Soo Kang

Key Words : Cold Ironing(냉간 아이어닝), Net-Shape(정밀정형), Springback(탄성복원)

Abstract

Cold ironing, as a post-forging operation of warm forged gears, needs a clear understanding of form errors due to die-elasticity and springback of component. In order to simplify the analysis of cold ironing, a single tooth instead of a whole gear component was investigated. The influence of initial surface roughness, die design, and die/workpiece interference has been examined experimentally and numerically. As a result the changes in geometrical profile, dimensions, and surface finish in a single tooth were observed. This study demonstrates that predicted dimensions can be achieved and surface finish also can be greatly improved.

1. 서론

정밀정형 성형(Net-Shape forming)은 단 한번의 공정으로 최종 제품을 생산하는 공정을 일컫는다. 최근 후 공정이 필요치 않는 정밀정형 성형 공법에 의한 단조 기술이 기어부품 성형분야에 활발히 진행되고 있다. 이 기술은 호빙(hobbing), 터닝(turning) 그리고 그라인딩(grinding)의 절삭공법에 의한 기어부품제작의 전통적인 생산공정들보다 비용과 원자재 절감 등의 생산성 측면에서 많은 이점이 있다.⁽¹⁾ 정밀정형 성형 공정의 궁극적인 목적은 후 처리 가공 공정이 필요하지 않는 부품을 생산하는 것이다. 그러나, 일반적으로 동력 변속 장치로서의 기어부품은 특히 복잡한 형상으로 인하여

여 가공 후, 치수의 정확성과 치형의 표면을 향상시키기 위한 후 공정단계가 추가적으로 요구된다. 이러한 후 공정은 기어부품의 온간 단조공법에 의한 성형 시 야기되는 고온 때문에 필요하다. 이로 인해, 정밀도가 높은 부품을 생산하기 위한 공법 측면에서, 냉간 단조는 온간 단조나 열간 단조보다 더 자주 이용되어져 왔다. 베벨 기어의 경우 상온에서의 냉간 단조에 의한 정밀정형 성형이 이미 가능한 단계에 있다. 하지만, 동력 변속 기어 박스에 사용되는 평 기어와 헬리컬 기어는 직경 대비 두께가 크다. 이로 인하여, 평 기어와 헬리컬 기어의 단조 시 상온에서의 프레스 용량과 금형 강도의 제한으로 인하여 제품의 성형성을 높이기 위해서는 고온에서의 열간 단조에 의한 성형이 불가피하다.⁽²⁾ 열간 단조 시 증가된 온도는 성형 후 냉각 과정에서 인편형성(scale formation)과 재료산화(material oxidation), 그리고, 소재의 수축으로 인하여 바람직한 치수 정도를 가진 제품 양산을 방해하는 주요 요인이다. 그러므로, 호빙, 셰이빙 그리고 그라인딩과 같은 후 공정에 의한 마무리 공정이 필요하다. Dohmann 와 Meier 는 온간 단조에 의하여 성형된 헬리컬 기어의 마무리공정으로서

† 책임저자, 회원, 부산대학교 항공우주공학과

E-mail : bskang@hyowon.pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2310 FAX : (051)513-3760

* 부산대학교 대학원 항공우주공학과

** 회원, 부산대학교 기계공학부

*** University of Birmingham
School of Manufacturing and Mechanical Engineering

냉간 단조에 관하여 연구하였으며, ISO3962 의 5 등급보다 낮지만 단조 공법에 의한 기어제품을 2 등급까지 향상시켰다.⁽³⁾ Eyerciglu 와 Dean 은 고온에서의 1 차 단조에 이은 후 공정으로서 냉간 아이어닝 공법을 연구하였다.⁽⁴⁾ 아이어닝 공정은 소재의 두께와 표면의 성질을 향상시키기 위한 공정으로 드로잉, 재드로잉과 함께 청량음료용기(can) 생산의 주요 공정이다.⁽⁴⁾ 그러나, 두꺼운 두께를 가진 기어에 대한 아이어닝 공정의 적용은 등속조인트(constant velocity joint)에서 유일하게 찾아볼 수 있다.⁽⁵⁾ 단조 부품에 대한 아이어닝 공법의 적용은 아직 광범위하게 연구되지 않고 있는 실정이며, 이의 메커니즘과 공정 변수에 대한 연구가 요구된다. 본 연구에서는 두께가 두꺼운 부품의 아이어닝 공정 후 표면거칠기(surface roughness)와 치수의 정도, 치형곡선을 연구하기 위해서 금형 치수보다 두꺼운 치수의 단일 치형과 금형 및 펀치를 설계하였으며, 성형 인자의 효율적인 분석을 위하여 유한요소해석을 통해 얻어진 결과와 비교하였다. 아이어닝 공정 후, 잔류 응력의 재분포에 의한 시편의 탄성회복과 금형의 탄성변화 또한 정밀정형 성형에서는 제품의 치수를 변화시키는 주요 인자이다. 본 연구에서는 내연적(implicit) 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/standard 를 이용하여, 상기된 성형 인자들을 고려하였다.⁽⁶⁾

2. 실험 및 유한요소해석

단일 치형 시편을 50 톤의 유압프레스(Denison 社)를 이용하여 1mm/sec 비율로 아이어닝하였다. 아이어닝 공정 후, 치형의 표면거칠기는 Rank Taylor Hobson 社에서 만든 Talysurf Taylor-120L 를 사용하여 측정하였고, 치형곡선은 Ferranti Metrology Systems 社의 CMM(co-ordinate measuring machine) Merlin Mk1 에 의해 측정하였다.

그리고, 아이어닝 공정의 유한요소해석은 ABAQUS/standard 를 사용하여, 아이어닝 공정의 주요 변수에 대한 해석을 수행하였다.

2.1 단일 치형 아이어닝 실험(Single tooth ironing)

2.1.1 실험

Fig. 1 은 단일 치형의 아이어닝 금형 구성을 보여준다. 치형 소재는 16MnCr5 이고 금형과 펀치의 경도는 48-52 HRC 의 H13 이다. 금형구조, 단일 치

형의 치수 및 기하학적 형상은 실제 기어 치형에 근거하여 제작하였으며, 치형은 사다리꼴 형상으로 단순화하였다. 금형제작을 용이하게 하기 위해서, 금형을 좌, 우 2 개로 구성하였으며, 볼트로 접합하도록 설계하였다. 금형과 단일 치형의 치수를 Fig. 2 와 Table 1 에 나타내었다. 단일 치형의 이뿌리 치수는 W 이며, 단일 치형이 금형의 개구부를 통과할 때 변형을 유발하지 않을 정도로 작다. 이

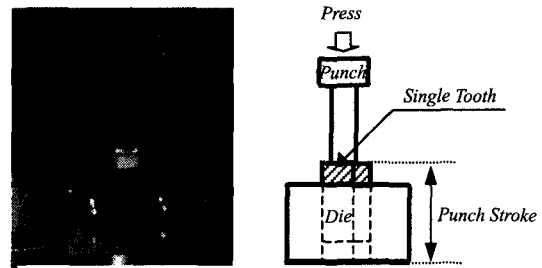
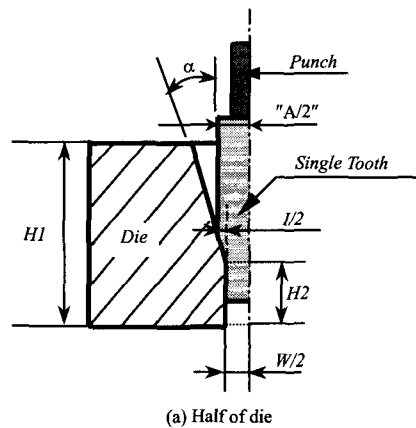
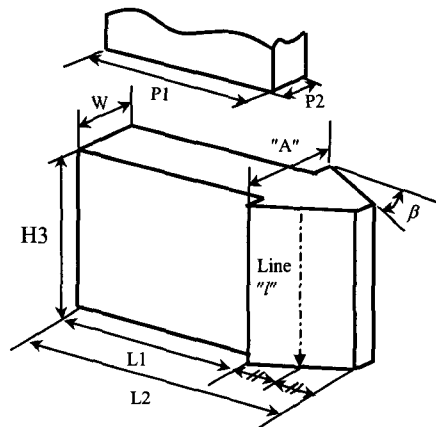


Fig. 1 Initial tooling set-up



(a) Half of die



(b) Single tooth and punch

Fig. 2 The schematic of die and single tooth

로 인하여, 아이어닝 공정으로부터 치형의 이뿌리가 아닌 금형보다 치수(A-W)가 큰 치형의 사다리꼴 부분만 변형된다. 금형의 입사각(α)과 랜드(H2)의 치수는 고정되었다. 아이어닝 공정 후 치형두께 변화를 알아보기 위해서, 금형보다 큰 치수를 가진 치형에서 금형의 치수를 뺀 값인 간섭치수 I 는 0.3mm, 0.4mm 그리고 0.5mm 로 가공하였으며, 치형 윤활제로서 Phosphate/Soap 을 사용하였고, 금형의 윤활제로서 냉간 단조 윤활제인 Molydag 709 을 사용하였다.

2.1.2 유한요소해석

Fig. 3 은 단일 치형 실험에서 사용된 금형구조와 동일한 금형의 유한요소해석 모델을 보여준다. 본 연구에서는 아이어닝 공정 시 금형의 변형에 의한 치형곡선과 치형두께 변화에 대한 영향을 분석하기 위해서 아래와 같은 두 가지의 추가적인 금형모델을 선정하였다.

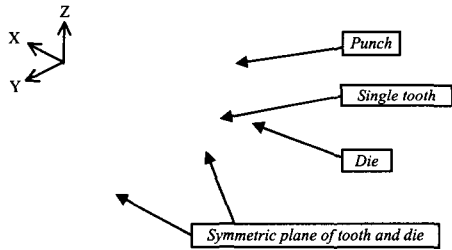


Fig. 3 Initial FE model of freely bolt-jointed die

- 일체형 금형모델 (One-piece die model) : 금형이 한 개의 일체형임 (Fig. 4(a))
- 볼트 고정 금형모델 (Rigid bolt-jointed die model) : 금형의 외곽에 고정된 강체 볼트가 있음 (Fig. 4(b))
- 스프링 결합 금형모델 (Freely bolt-jointed die model) : 금형 외곽의 강체 볼트에 스프링을 연결시켜 강체 볼트의 움직임을 자유롭게 함으로서 금형의 유연도를 높임 (Fig. 4(c))

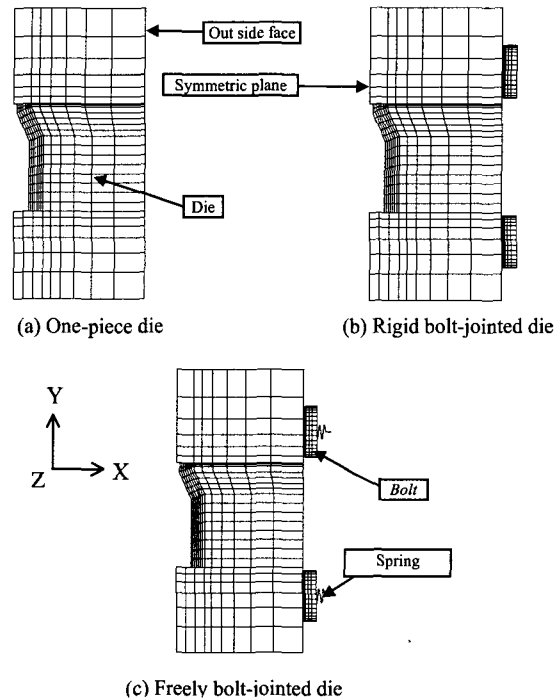


Fig. 4 The three models of the die for the simulations

Table 1 Dimensions of die and single tooth

Description of symbol	Dimensions
H1 – Die height	41 mm
H2 – Die land	12 mm
H3 – Tooth height	36 mm
L1 – Tooth root length	24.13 mm
L2 – Tooth length	34 mm
P1 – Punch length	20 mm
P2 – Punch width	7 mm
α – Die entry angle	10 °
β – Tooth flank angle	21.8 °
W – Die cavity and tooth root width	10.2 mm
"A" – Tooth flank width	10.5, 10.6, 10.7 mm
I – Interference between die (W) and tooth ("A")	0.3, 0.4, 0.5 mm

Table 2는 세 가지 금형모델의 X 방향으로의 경계조건을 나타낸다. 아이어닝 공정을 위한 금형 구성은 X 축 대칭이므로 1/2 모델만을 고려하였다. 정밀정형 성형에서 성형 중 소재와 금형의 마찰에 의한 금형의 변형은 최종 제품의 치수에 영향을 미치는 주요 공정 변수이다.⁽⁷⁾ 그러므로, 중공 실린더의 유한요소모델과 동일하게 금형의 변형을 고려하기 위해, 금형은 탄성모델이며, 소재인 치형은 아이어닝 공정 후 치형의 탄성복원에 의한 치수 변화를 알아보기 위해 탄-소성 모델로 고려하였다. Table 3은 유한요소모델의 물성치를 나타낸다.

닝에 요구되는 부하는 서로 다르다. 결과적으로, 요구되는 최대 아이어닝 하중과 에너지는 서로 다르며, 이는 프레스의 용량과 윤활제의 선정 및 금형의 수명을 평가하는데 중요하다. Fig. 6은 간섭치수 I가 0.3mm, 0.4mm, 0.5mm인 단일 치형의 아이어닝 하중을 보여준다. Phosphate/Soap의 마찰계수는 링 테스트(ring test)에 의하여 실험적으로 산출하였으며, 유한요소해석 시 마찰 계수 μ 는 0.1을 사용하였다. 해석결과와 실험결과의 비교를 위해서, 세 가지 해석모델 중 스프링 결합 금형모

3. 결과 및 고찰

3.1 단일 치형 아이어닝

3.1.1 변형된 형상

아이어닝에 의한 단일 치형의 변형 형상을 Fig. 5(a)와 (b)에 나타내었다. 여기서 치형 상부 끝의 뒤틀림이 하부 끝의 뒤틀림보다 두드러진다. 이것은 치형이 금형을 통과 할 때, 치형 하부의 소재 움직임은 금형과의 마찰로 구속을 받기 때문이며, 또한 상대적으로 상부의 소재의 흐름은 자유롭다. 그리고, 치형과 금형사이의 간섭치수 I가 클수록 아이어닝 공정에 의한 치형두께 감소가 두드러지게 되므로, 치형 상부에서의 소재흐름에 의한 뒤틀림은 두드러지게 나타난다.

3.1.2 아이어닝 시의 금형 하중

간섭치수 I의 크기에 따라 단일 치형의 아이어

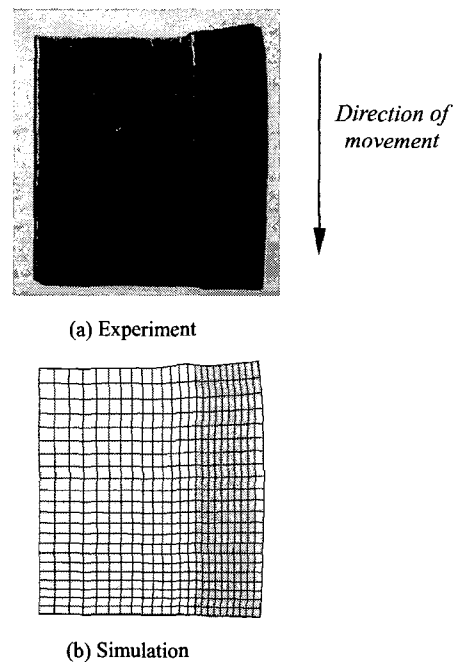


Fig. 5 The deformed shape of single tooth (view in the X direction)

Table 2 Boundary condition of the three models of the die for simulation in the X direction

Model	Symmetric plane	Outer side face
One-piece die	Fixed	Free
Rigid bolt-jointed die	Free	Fixed by bolt
Freely bolt-jointed die	Free	Constrained by spring element, but free

Table 3 Material property of FE model

	Material model	Young's modulus ($E - N/mm^2$)	Poisson's ratio (ν)	Spring constant ($k - N/mm$)
Die	Elastic	210	0.33	-
Tooth	Elastic-plastic	210	0.33	-
Punch	Rigid	-	-	-
Bolt	Rigid	-	-	-
Spring	Elastic	-	-	465.0e3

델을 선정하였다. 아이어닝 하중곡선은 포물선에 가까운 형상을 보이며, 간섭치수 I 가 클수록 최대 아이어닝 하중은 크다. 아이어닝 부하의 최대값과 경향은 실험과 해석결과가 유사하다. 아이어닝 하중은 치형 시편의 두께 감소에 기인하는 힘과 치형과 금형의 마찰을 극복하기 위한 힘으로 구성된다. 아이어닝의 초기 단계에서, 치형이 펀치에 의해 금형의 개구부쪽으로 유입될 때 부하는 약 10kN 으로 급격히 증가하며, 변형량은 점점 증가하여 최대가 된다. 비록 소재의 변형량은 일정하지만, 아이어닝 하중은 펀치가 이동함에 따라 계속 증가한다. 이것은 금형과 접촉하고 있는 치형 표면적의 증가에 의한 마찰 저항이 증가하기 때문이다. 실험결과에서는 펀치의 이동량이 약 24mm

일 때 최대 아이어닝 하중이 생기지만, 해석결과 는 약 28mm 에서 최대값이 나타난다. 치형이 금형 개구부 밖으로 나올 때 부하는 치형의 마찰 면 적 감소로 인하여 하강한다. Fig. 7은 아이어닝 공 정에서 단계별 치형의 변형 모습을 나타낸 그림이 다.

3.1.3 표면거칠기

자동차 기어 박스의 소음과 진동은 차량의 운행 중에 승차감을 저해하는 요인이며, 그 원인들 중 의 하나가 바로 기어 표면의 거친 정도이다.⁽⁸⁾ 일 반적으로, 기어 치형의 바람직한 표면마무리와 형 상을 얻기 위해선 그라인딩과 호빙의 마무리 공정 이 요구된다. 본 연구의 목적은 열간 단조 이 후 의 기어부품의 마무리 공정으로 냉간 아이어닝 공 정의 표면마무리 향상 정도를 알아보는 것이다. Table 4 는 아이어닝 전과 후의 표면거칠기를 중심 선 평균거칠기(center line average)로 나타내며, Ra 값으로 표시하였다. 아이어닝 전, 금형의 랜드와 입구 부분의 표면거칠기는 평균 0.4 μ m 이며 모든 시험 조건들에 대하여 아이어닝 공정에 의한 표면 거칠기가 향상되었음을 알 수 있다. 초기 치형의 표면거칠기 Ra 값은 3.0 ~ 3.5 μ m 였다. 그러나 아이 어닝 후, Ra 값은 약 0.5 μ m 로 감소되었으며 1 μ m 이 하의 표면거칠기는 대부분의 완성 기어부품에서 바람직한 수치이다. Fig. 8 에서 보는 것처럼, 간섭 치수 I 가 클수록 표면거칠기도 많이 향상되었으 며, 간섭치수 I 가 0.5mm 인 경우, 초기 Ra 값은 3.16 μ m 에서 0.37 μ m 로 88% 감소하였다.⁽⁹⁾ Fig. 9 는 아이어닝 전과 후의 단일 치형의 3 차원 표면거칠 기를 보여준다.

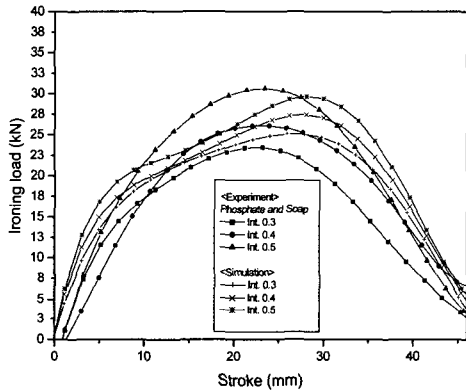


Fig. 6 The ironing load obtained experimentally and numerically in the simulation of freely bolt-jointed die model

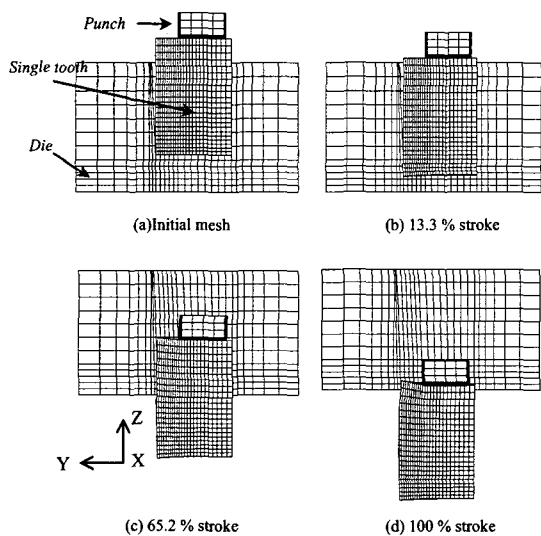


Fig. 7 Mesh deformation

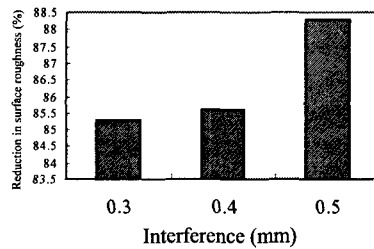


Fig. 8 Percentage reduction of surface roughness

Table 4 Surface roughness before and after single tooth ironing (Unit: μ m)

"A" dimension	Before	After
10.5 mm	3.4022	0.5019
10.6 mm	3.3780	0.4816
10.7 mm	3.1633	0.3711

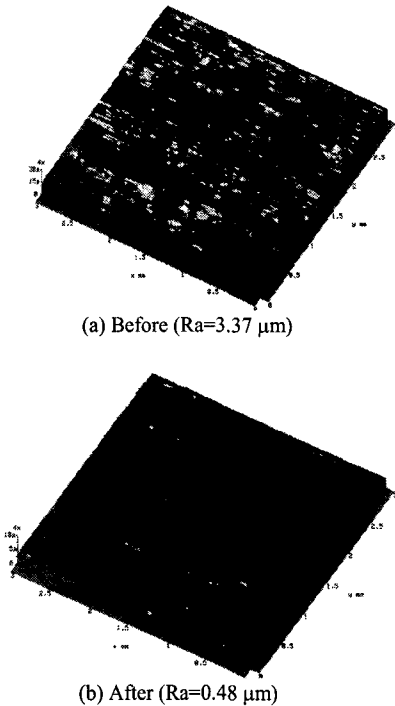


Fig. 9 3D representation of the tooth flank before and after single tooth ironing

3.1.4 표면 형상

치형곡선의 형상은 CMM 에 의해 측정하였으며, 스프링 결합 금형모델의 해석결과와 비교하였다. Fig. 2(b)의 치형 플랭크 상의 선 1 을 따라 치형곡선을 측정하였으며, Fig. 3의 대칭면으로부터 전체 치형두께의 반(Half thickness)을 측정하였다. 실험에 의하여 측정된 치형곡선과 수치는 Fig. 10에서 보이는 것처럼 해석과 실험에서 유사함을 보이며, 세 가지 초기 간섭치수의 모든 경우에서 크라운 형상의 치형곡선이 아이어닝 공정으로부터 유도되었다. 최대 치형두께는 실제 기어 사양에서 요구되는 수치보다 큰 40 ~ 60μm 이다. 간섭치수가 0.4mm 와 0.5mm 인 경우 치형곡선은 거의 유사하게 겹쳐져 있다. 이것은 0.5mm 의 간섭치수를 가진 치형의 두께 감소가 크기 때문이다. 아이어닝에 의하여 치형곡선의 바람직한 형태인 크라운 형상을 유도할 수 있는 것은 아이어닝 하중곡선에서 설명되어질 수 있다. 치형이 금형의 개구부를 통과할 때, 최대 아이어닝 하중과 접촉압력이 발생하는 펀치 스트로크의 중간 지점에서 금형의 탄성적 팽창단계는 최대이고, 치형두께의 감소는 최소이다(Fig. 12). 반면에 아이어닝 하중 곡선에서의 시작과 끝에서는 금형의 팽창은 최소이며, 치형두께 감소는 최대가 된다.

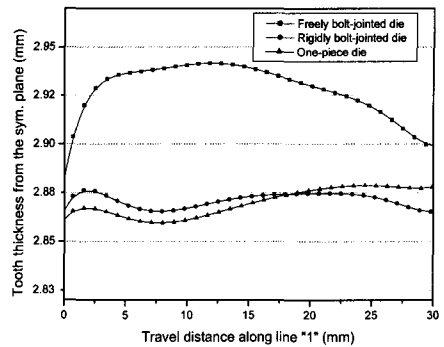


Fig. 10 The influence of interference on the tooth profile

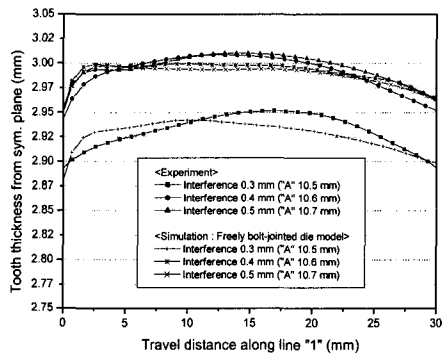


Fig. 11 The influence of die flexibility on the tooth profile

치형곡선 측면에서의 금형의 유연도의 영향

스프링 결합 금형모델과 일체형 금형모델, 그리고, 볼트 고정 금형모델로부터 금형의 변형이 치형곡선에 미치는 영향을 알아보았다. 세가지 모델에 대한 금형의 랜드와 입사각은 동일하고, 간섭치수와 마찰계수는 각각 0.3mm 와 0.1 을 사용하였다. Fig. 11 은 세가지 모델에 대한 치형곡선을 나타낸다. 일체형 금형모델과 볼트 고정 금형모델은 치형의 양 끝단이 두꺼우며, 거의 평평하다. 반면에, 스프링 결합 금형모델의 경우 바람직한 기어 치형인 크라운 형상에 가깝다. 기어 치형곡선에 대한 금형의 탄성변형량의 영향을 알아보기 위해 세가지 금형모델의 랜드부의 한 점의 변위값을 측정하였다. Fig. 12 에서 펀치 스트로크를 그래프상의 X 축에 나타내었으며, Y 축에는 금형의 랜드 중앙에 위치한 점의 X, Y 변위를 나타내었다.

Y 축 방향의 변위는 X 축 방향의 변위보다 작으며, 아이어닝 공정 중 Y 축 방향으로의 변위의 영향은 크지 않다. 스프링 결합 금형모델의 X 축 방향으로의 변위는 다른 두 모델의 값보다 훨씬 크다. 그러므로, 금형의 X 축 방향으로의 유연도가 크라운 형상의 바람직한 기어 치형을 유도하기 위

해서 아이어닝 금형설계 시 고려되어야 한다.

3.1.5 치형 치수

아이어닝 공정 전과 후의 스프링 결합 금형모델의 해석으로부터 구해진 치형두께를 Table 5에 나타내었으며, 또한 아이어닝 전, 후의 간섭치수도 나타내었다. 아이어닝 후, 10.5mm, 10.6mm 그리고 10.7mm의 A 값들에 대한 간섭치수는 각각 0.09mm, 0.11mm 그리고 0.11mm 이었다. 아이어닝 전의 간섭치수가 클수록, 변형 후 치형두께의 감소도 두드러진다. 일반적으로, 단조된 부품의 치수 정도는 금형의 마모와 함께 떨어진다. 그래서, 온간 단조에 의한 기어 단조 부품의 치수정도가 떨어지더라도, 후 공정인 아이어닝에 의하여 치수 정확성은 증가되어질 것이다.

치형 치수에서 금형강성도의 영향

최종 제품의 치형 치수 정확도에 대한 금형강성도의 영향은 유한요소해석을 통하여 연구되었다. 비교를 위해, 마찰계수 0.1과 0.3mm의 A가 사용되었다. 금형과 치형 사이의 변형 후 간섭치수를 Table 6에 나타내었다. 스프링 결합 금형모델의 경우, 아이어닝 후의 간섭치수는 최대였다. 즉 치형두께의 감소량이 최저였으며, 67.9% 감소하였다. 원인은 Fig. 12에서 알 수 있듯이 스프링 결합 모델이 금형 유연도가 가장 높기 때문이다. 볼트 고정 금형모델의 치수 감소 비율은 89.3%였고, 일체형 금형모델은 92.9% 감소하였다. 이 결과들로부터, 금형의 강성도는 치형두께 감소를 증가시키며, 아이어닝 후 공정에 의하여 정밀정형 성형이 가능하다. 그러므로, 아이어닝 금형 설계자는 바람직한 치형곡선과 치수 정확성을 얻을 수 있도록 금형의 유연도와 강성도를 동시에 고려하여야 한다.

4. 결론

(1) 아이어닝 하중은 포물선 형상이다. 온간 단조에 의한 기어부품의 간섭치수가 클수록, 후 공정으로서의 아이어닝 공정에서 요구되는 프레스 용량은 커진다.

(2) 초기 표면거칠기가 낮을수록, 아이어닝 공정 후 표면거칠기도 낮아진다. 하지만, 간섭치수가 클수록, 아이어닝 공정 후 표면거칠기의 차이는 작아진다. 즉, 간섭치수가 클수록 표면거칠기의 향

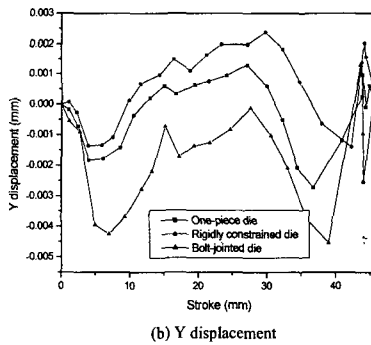
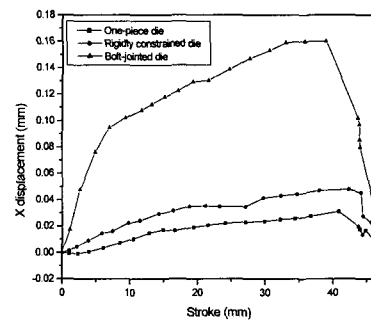


Fig. 12 The X and Y displacement of the middle point on the die land

Table 5 The oversize between die and tooth (FE simulation) (Unit : mm)

"A" dimension	Interference between die and tooth	
	Before ironing	After ironing
10.5	0.280	0.09
10.6	0.327	0.11
10.7	0.373	0.11

Table 6 The influence of die rigidity on the tooth dimensions (FE simulation) (Unit : mm)

Model	Interference between die and tooth		Reduction (%)
	Before ironing	After ironing	
One-piece die		0.02	92.9
Rigid constrained die		0.03	89.3
Freely bolt-jointed die	0.28	0.09	67.9

상은 두드러진다. 또한 초기 간섭치수가 클수록 치형두께는 급격히 감소함을 알 수 있다. 그리고, 후 공정인 아이어닝 공정을 통해 40 ~ 60 μ m 높이의 바람직한 크라운 형상의 기어 치형곡선을 얻을 수 있다.

(3) 크라운 형상을 가진 기어 치형 설계 측면에서 금형의 유연도에 대한 영향을 조사하기 위하여 세가지 금형모델에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 금형의 유연도가 클수록 전형적인 크라운 기어 치형에 가까운 형상을 아이어닝 공정으로부터 얻을 수 있지만, 치형의 치수 정확성 측면에서는 금형의 강성도가 클수록 치형의 치수 정확성이 높다. 금형의 유연도와 강성도에 대한 이해는 온간 단조 공법에 이은 아이어닝 후 공정에 의한 정밀정형기어 설계 시 금형설계자에게 유용한 자료가 될 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 부산대학교 ERC/NSDM 과 두뇌 한국 21(BK21) 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Eyercioglu O. and Dean T. A., 1995, "Developments and Performance Analyses of Precision Forged Spur Gear," PhD. Thesis, School of Manufacturing and Mechanical Engineering, The University of Birmingham.
- (2) Dean T. A., 2000, "The Net-Shape Forming of Gears," *Materials and Design*, Vol. 21, pp. 271~278.
- (3) Dohmann F. and Meier T., 1995, "Production Sequence Forming-Hardening-Hard Finishing for the Manufacture of Ready-to-Install Gearing," *Proc. Of the 9th Int. Cold Forging Congress*, pp. 85~93.
- (4) Schunemann M., Ahmetoglu M. A. and Altan T., 1996, "Prediction of Process Conditions in Drawing and Ironing of Cans," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 59, pp. 1~9.
- (5) Sun C., Li S. and Wang B., 2000, "Analysis of the Ironing of a BJ-Type Constant Velocity Joint Outer Race with the Upper Bound Element Method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 100, pp. 209~213.
- (6) Narasimhan N. and Lovell M., 1999, "Predicting Springback in Sheet Metal Forming: an Explicit to Implicit Sequential Solution Procedure," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 31, pp. 29~42.
- (7) Ou H. and Balendra R., 1998, "Die-Elasticity for Precision Forging of Aerofoil Sections using Finite Element Simulation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 76, pp. 56~61.
- (8) Amini N., Rosen B. G. and Westberg H., 1998, "Optimization of Gear Tooth Surface," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 38, pp. 425~435.
- (9) Wang Z., Dohda K. and Jeong Y., 2001, "FEM Simulation of Surface Smoothing in the Ironing Process," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 113, pp. 705~709.

(1) Eyercioglu O. and Dean T. A., 1995, "Developments and Performance Analyses of Precision Forged Spur