

# 윤활제 및 표면 거칠기에 따른 베벨기어의 온간단조 성형성 평가

김동환\*, 김병민#

## Evaluation of Formability for Warm Forging of The Bevel Gear on The Lubricants and Surface Roughness

Dong Hwan Kim\* and Byung Min Kim#

### ABSTRACT

In the hot forging process lubricant influences on frictional condition only, but in the warm forging process it influence on the formability such as dimensional accuracy, filling state and frictional condition and it is important to estimate a lubricating characteristic of lubricants in the warm forging. In this paper, in order to evaluate the formability of billet in warm forging process according to the lubricant and lubricating method, lubricant and lubricating test have been performed using oil-based and water-based lubricant which were widely used in the hot and warm forging processes. The surface roughness of initial billet was measured to evaluate the influence on the formability of billet and the forming load and dimensional accuracy were compared and evaluated. From the experimental results, it can be known that water-based lubricants are more excellent than oil-based lubricants for warm forging of complex shape like a bevel gear. Also, in this study characteristics of deformation have been investigated according to surface treatment of initial billet.

**Key Words** : Bevel gear (베벨기어), Warm forging (온간 단조), Lubricating characteristic (윤활 특성), Lubricant (윤활), Lubricating test (윤활 방식 시험), Surface roughness (표면 거칠기)

### 1. 서론

최근의 정밀단조 기술은 고품질, 복잡한 형상 및 향상된 기계적 성질의 제품을 생산하기 위해 온간단조에 의해 10~60 $\mu$ m 이내의 고정밀의 제품을 생산하고 있으며, 특히, 기어(gear)류의 온간단조 제품은 단류선의 단속이 없어 강도를 향상시킬 수 있으

며, 기계가공에 비해 생산속도의 증가 및 소재 손실을 줄일 수 있기 때문에 많은 연구가 진행되고 있다<sup>1-5</sup>.

복잡한 형상을 가진 기어의 온간단조 성형공정 설계에는 제품 성형 공정 수, 소재 및 금형의 초기 가열온도, 성형속도, 윤활제등의 공정변수가 고려되어야 한다. 이 중 윤활제는 열간단조 공정에서는

접수일: 2004년2월 3일 ; 게재승인일: 2005년 1월 21일

\* 진주국제대학교 자동차공학과

# 교신저자, 부산대학교 기계공학부

Email bmkim@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-3074

주로 금형의 수명을 연장시키기 위한 금형윤활, 금형냉각에 큰 비중을 두고 있으며, 다른 공정 변수에 비해 제품의 성형성에 영향이 크지 않기 때문에 공정 설계 시 크게 고려되지 않는다. 하지만, 온간가공에서는 금형의 수명뿐만 아니라, 윤활제의 특성 및 사용방법에 따라 제품의 성형 특성에 크게 영향을 미친다.

정확한 속도비와 작은 구조로써 동력을 전달하는 기어류 부품의 단조에 대하여 현재까지 많은 문헌을 통하여 금속유동 및 금형설계에 관한 연구가 제시되었다. Meidert<sup>6</sup> 등은 복합 구동 장치를 사용하여 베벨기어의 냉간단조 가능성을 조사하였고, 이후에 Westphal<sup>7</sup> 등은 냉간단조된 사이드 베벨기어에 적용하였으며, Doege<sup>8</sup> 등은 베벨기어 단조 금형을 제작하여 단조 베벨기어의 품질을 평가하였다. Meidert<sup>9</sup> 등은 2차원 유한요소 해석으로 베벨기어의 냉간단조 공정 설계를 수행하여 단조 금형 응력 감소를 위한 금형 형상을 개선하였고, Doege와 Nagele<sup>10</sup>는 베벨기어의 유한요소 해석결과와 실험 결과를 비교하였다.

Sheljaskov<sup>11</sup>는 윤활제에 따른 리어 액슬 스피들(rear axle spindle)의 온간단조 성형성 및 금형 수명에 관한 연구를 통하여 금형에 윤활 하는 것이 나쁘게 되면 제품 축출이 어렵고 마멸에 의한 금형수명이 단축된다고 하였다. Tatsuro<sup>12</sup> 등은 온간단조에 있어서 금속과 결합력이 강한 건조된 윤활 고착층이 금형의 수명을 향상 시키는데 도움을 준다고 하였다. Jeong<sup>13</sup> 등은 수용성 및 유용성 윤활제에 대하여 온간 링 압축시험을 수행하여 윤활제에 따른 마찰특성을 평가하였다.

이전의 연구에서는 윤활제와 윤활방식에 따른 온간단조 성형성에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 복잡한 형상을 가진 베벨기어를 초기 소재의 표면 거칠기에 따라 베벨기어를 온간단조 공정을 통해 성형하고, 표면 거칠기에 따른 온간단조 성형 특성을 파악하였으며, 온간 및 열간단조에서 널리 사용되고 있는 유용성 윤활제(Soy+Graphite, Oildag)와, 수용성 윤활제(Deltaforge #31, Renite S-26-X, Deltaglaze #151)를 사용하여 각 윤활제와 윤활방식에 따라 베벨기어의 성형하중과 정밀도를 비교, 평가하였고 온간단조에서의 베벨기어를 성형하는데 적합한 윤활제 및 윤활방식을 제시하였다.

## 2. 베벨기어의 온간단조

본 연구의 대상 제품은 상용 자동차 내부의 차동기어 장치에 사용되는 베벨기어로, 사이드 기어와 피니언을 한 쌍으로 하여 변속기에서 감속된 회전력을 좌·우 차축에 분배하는 역할을 한다. 베벨기어는 치선이 직선이고 원뿔 꼭지점으로 향해 있는 직선형 베벨기어와 치선이 나선형인 스파이어(spire) 베벨기어로 분류된다.

본 연구에서 온간단조 공정으로 성형할 베벨기어는 직선형 베벨기어로서 압력각이 22.5°이고, 모듈이 6.5, 잇수가 11개인 피니언 기어를 대상으로 연구를 수행하였다. 피니언 베벨기어의 기계도면과 온간단조 도면은 Fig. 1과 같다.

베벨기어의 소재는 크롬-몰리브덴강인 SCM 420H을 사용하였으며, 금형의 소재는 열간 금형강인 YXR 33소재를 사용하였다. 베벨기어를 온간단조로 성형하기 위한 성형공정은 지름이 45mm이고 높이가 66mm인 초기 빌렛을 사용하여 먼저 절단면에 대한 펀치의 파손 및 치수 정밀도를 위한 예비 업세팅 공정과 최종제품성형 시 균일 변형을 위한 예비 성형공정으로 성형한 후 최종 제품을 성형하는 온간단조공정으로 구성된다.

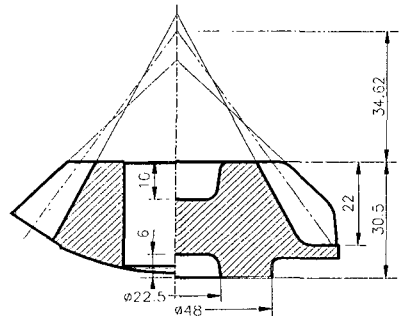


Fig. 1 Machined(left) and forged(right) drawing for the worm forged bevel gear

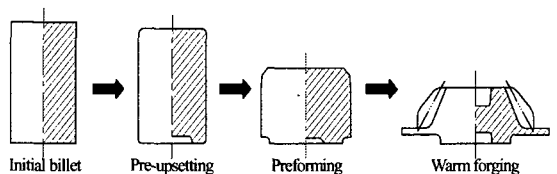


Fig. 2 Process sequence of worm forging for bevel gear

Fig. 2는 베벨기어를 온간단조로 성형하기 위한 공정 순서를 나타내었으며, Table 1에 베벨기어의 온간단조 성형조건을 나타내었다.

Table 1 Deformation conditions for warm forged bevel gear

	Billet	Die
Material	SCM420H	YXR33
Preheating temp.	850(°C)	300(°C)
Velocity	70 mm/sec	

### 3. 베벨기어의 온간단조 성형성 평가 시험

#### 3.1 표면 거칠기 시험

초기 소재의 표면 거칠기는 금형과 윤활제의 마찰특성을 결정하는 중요한 요인으로 작용하고 이러한 마찰 특성은 단조제품의 성형성에 큰 영향을 미친다. 따라서 온간단조에서 초기 소재의 표면 거칠기에 따른 베벨기어의 성형성을 평가하기 위해 초기 소재를 쇼트 블라스팅(shot-blasting) 처리, 고속 선반(turning) 가공, 및 연삭(polishing) 가공 방법으로 시편을 제작하였다. 쇼트 블라스팅 처리는 쇼트 블라스트 장비에서 0.6mm인 스틸볼을 사용하여 30분간 처리하였다. 각각의 표면 처리에 대해 표면 거칠기를 측정된 결과, 쇼트 블라스트 처리한 시편의 중심선 평균 거칠기,  $R_a = 8.0 \mu\text{m}$ , 고속 선반은  $R_a = 3.8 \mu\text{m}$ , 연삭 가공은  $R_a = 0.8 \mu\text{m}$ 의 측정값을 얻었다. 표면 거칠기에 따른 베벨기어 성형 시험은 각 표면 거칠기와 수용성 및 유용성 윤활제와의 성형 특성을 파악하기 위해 금형에 수용성 윤활제인 Deltaforge #31과 유용성 윤활제인 미강유에 흑연을 1:1 비율로 희석시킨 Soy+Graphite를 윤활하여 시험을 수행하였다.

Table 2 The conditions of surface roughness

	Die	Billet
Shot-blasting	Deltaforge #31	None
	Soy+Graphite	
Turning	Deltaforge #31	
	Soy+Graphite	
Polishing	Deltaforge #31	
	Soy+Graphite	

Table 2는 표면 거칠기에 따른 베벨기어 온간단조 특성을 평가하기 위한 시험 조건을 나타내었으며, 각 조건에 대하여 보다 정밀한 데이터를 확보하기 위해 다섯 번의 시험을 반복 수행하였고, 윤활제와 표면 거칠기에 따른 베벨기어의 성형 시험결과를 Fig. 3에 나타내었다.

#### 3.2 윤활제 및 윤활 방법

윤활제 및 윤활 방법 또한 단조공정에서 금형의 마찰특성, 성형하중 및 금형의 마멸 등에 영향을 미치는 중요한 공정변수이다. 본 시험에서는 베벨기어의 온간단조 성형에서 윤활제의 특성을 파악하기 위해서 열간 및 온간단조 성형 시 널리 사용되고 있는 유용성 윤활제와 수용성 윤활제를 사용하였다. 유용성 윤활제로는 Acheson 사의 Oildag 와 미강유에 흑연을 1:1로 혼합한 윤활제를 선정하였으며, 수용성 윤활제로는 Acheson사의 Deltaforge #31, Renite사의 S-26-X와 수용성 백색계 코팅제인 Deltaglaze #151를 선정하여 베벨기어의 성형시험을 수행하였다. 이 다섯 가지 종류의 윤활제의 특성을 Table 3에 나타내었다. 또한, 윤활 방법에 대한 베벨기어의 성형성 평가 시험을 위해서 표면 거칠기에 따른 특성 평가에 사용된 윤활제와 동일한 것으로 사용하였으며, 초기 소재 표면 거칠기는 모든 시편을 쇼트 블라스팅 처리한



Fig. 3(a) Warm forged bevel gear according to each surface roughness(from left, shot-blasted, turned, polished) with oil-based lubricant (Soy+Graphite)



Fig. 3(b) Warm forged bevel gear according to each surface roughness(from left, shot-blasted, turned, polished) with water-based lubricant (Deltaforge#31)

Table 3 Comparison of properties on each lubricant

	<i>Soy+Graphite</i>	<i>Oildag</i>	<i>Dealtaforge#31</i>	<i>Renite S-26-X</i>	<i>Deltaglaze #151</i>
<i>Fluid Comp.</i>	<i>Oil</i>	<i>Oil</i>	<i>Water</i>	<i>Water</i>	<i>Water</i>
<i>Lubricant</i>	<i>Graphite</i>	<i>Graphite</i>	<i>Graphite</i>	<i>Graphite</i>	<i>Graphite</i>
<i>Density(kg/liter)</i>	<i>Graphite0.92</i>	-	<i>1.08</i>	<i>1.08</i>	<i>1.414</i>
<i>Ratio (Product : Diluent)</i>	<i>1:1</i>	<i>1:0(100%)</i>	<i>1:3(Water)</i>	<i>1:3(Water)</i>	<i>1:3(Water)</i>

Table 4 Lubricant and lubricating method according to each test method

		<i>Die</i>	<i>Billet</i>
<i>Lubricant test</i>	<i>Water based</i>	<i>Dealtaforge#31</i>	<i>None</i>
		<i>Renite S-26-X</i>	
		<i>Deltaglaze #151</i>	
	<i>Oil based</i>	<i>Soy+Graphite</i>	
		<i>Oildag</i>	
<i>Lubricating test</i>	<i>I case</i>	<i>Dealtaforge#31</i>	<i>Soy+Graphite</i>
	<i>II case</i>	<i>Soy+Graphite</i>	<i>Dealtaforge#31</i>
	<i>III case</i>	<i>Soy+Graphite</i>	<i>Soy+Graphite</i>

시편을 사용하였다. 윤활제 및 윤활방법 시험에 사용된 시험 조건을 Table 4에 나타내었다. 각 조건에 대한 시험의 재현성을 확보하기 위하여 다섯 번 반복 수행하였다. 각 윤활제에 대한 베벨기어 성형 시험 결과를 Fig. 4에 나타내었고, Fig. 5에 윤활방법에 대한 베벨기어 성형 시험 결과 사진을 나타내었다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 표면 거칠기에 따른 베벨기어 성형 특성

표면 거칠기가 각각 다른 초기 소재로 수용성 및, 유용성 윤활제로 금형에 윤활하여 베벨기어 온간단조를 실시하여 성형 하중을 측정하였다. 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 수용성 윤활제 및 유용성 윤활제 모두 표면 거칠기가 큰 쇼트 블라스팅 처리한 초기 소재로 온간단조 했을 때의 성형 하중이 가장 낮고, 연마된 초기 소재의 온간단조 성형 하중이 가장 높은 것을 알 수 있었다. 또한, 유용성 윤활제로 윤활했을 때 보다 수용성 윤활제로 금형에 윤활하였을 때의 성형 하중이 낮게 측정되었다.

이와 같은 결과는 표면이 거친, 즉  $R_a$  값이 클 경우, 초기 소재 표면에 접촉돌기(asperity)가 높고 많이 분포되어 있기 때문에 골과 골 사이에 형성된 윤활제가 변형되면서 금형과 소재 접촉면에 윤활제가 손실되지 않고 지속적으로 윤활막이 형성되지만, 고속선반 및 연마한 소재는 접촉돌기가 낮기 때문에 골과 골 사이에 적은 양의 윤활유를 함유하게 되고 변형이 증가되면 될수록 골과 골 사이에 형성된 윤활제가 손실되어 변형이 종료되는 시점에는 금형과 소재가 미끄럼 운동을 할 수 없게 되어 높은 성형 하중이 요구된다. 따라서 온간단조에서는 마찰 상수 및 성형 하중을 감소



(a)Deltaforge#31 (b)Renite S-26-X (c)Deltaglaze#151



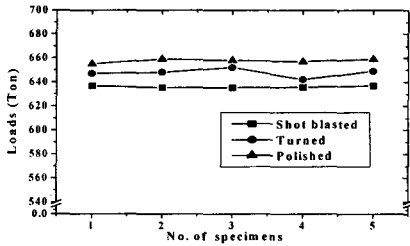
(d)Soy+Graphite (e)Oildag

Fig. 4 Warm forged bevel gear for each lubricant test

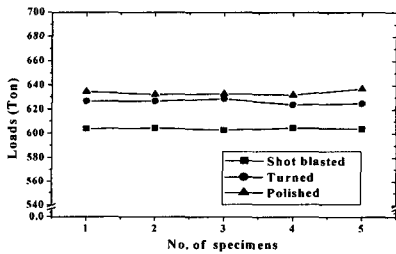


(a) I case (b) II case (c) III case

Fig. 5 Warm forged bevel gear for each lubricating method test



(a) oil-based lubricant (Soy+Graphite)



(b) water-based lubricant (Deltaforge #31)

Fig. 6 Loads according to each surface roughness used each other lubricant on the die

시키고 성형이 종료될 때까지 윤활 상태를 유지하기 위해서는 초기 소재 표면 거칠기를 크게 가져가는 것이 성형 하중을 감소시키는데 유리하다고 판단된다.

유용성 및 수용성 윤활제를 사용하여 표면 거칠기에 따른 베벨기어 성형 결과를 비교해 보면 베벨기어와 같은 밀폐형 단조에서는 유용성 윤활제보다는 수용성 윤활제를 사용하는 것이 성형 하중을 감소시키는데 유리한 것을 알 수 있었다. 이 같은 결과는 수용성 윤활제에 사용되는 용제인 물의 비등점은 100°C이고, 금형의 가열온도를 300°C로 하였기 때문에 금형 상에서 온도차( $\Delta T$ )는 200°C로 막 비등(film boiling)영역에 속해 안정된 막 비등 증발이 진행되므로 막 비등에 의한 건조 마찰을 진행하게 된다.

따라서 금형에 고착된 얇은 고체 윤활막은 성형이 진행되면서 금형과 소재의 마찰을 감소시키면서 윤활막이 거의 다 파괴되어 성형이 완료된 후 금형 상에 잔류물이 거의 남지 않게 된다. 그러나 유용성 윤활제는 용제인 오일의 비등점이

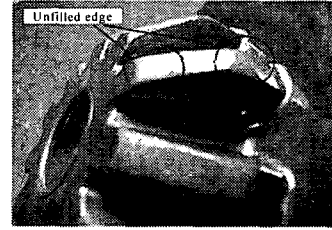


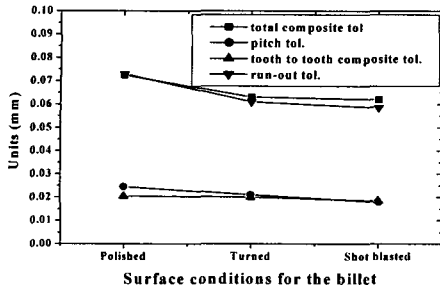
Fig. 7 Tooth corner profile for bevel gear used oil based lubricant

236°C이고, 금형 상에서 온도차( $\Delta T$ )는 64°C로 핵 비등(nucleate boiling)영역으로서 오일이 유체 상태와 기포 상태로 공존하는 영역이 된다. 핵 비등 영역 상태의 유용성 윤활제는 성형이 진행되는 동안 유체 윤활을 하게 되고, 성형이 진행되는 동안에 윤활막 파괴가 거의 없이 성형이 종료되어 금형 상에 윤활제의 잔류물이 유체 상태 또는 고체 상태로 존재하게 된다. 따라서 성형이 진행되면서 유체상의 윤활막이 파괴되지 않고 금형 상에 잔류하게 되고, 이렇게 잔류해 있는 유체상의 윤활제는 성형이 종료되면서 치형 모서리부에 모이게 된다. 모서리부에 모여 있는 윤활제는 치형의 완전 성형을 위한 금속 유동을 방해하게 되므로 치형의 완전 충만을 위해서는 많은 성형 하중이 필요하게 된다.

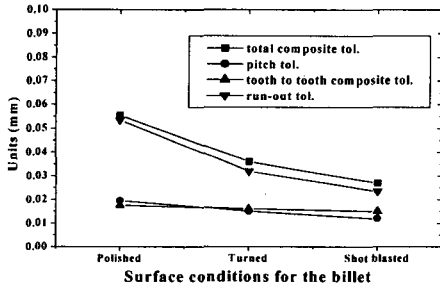
Fig. 7에 유용성 윤활제를 윤활하여 성형이 종료된 후의 베벨기어 금형의 모서리 부를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 유용성 윤활제로 윤활된 금형의 온간 단조품은 치형 모서리부에 윤활제의 잔류물이 존재하고, 이로써 금형 공동부를 완전히 채우지 못함을 알 수 있다.

수용성 윤활제를 금형에 윤활하여 각각 5개씩 온간단조 실험한 제품을 3차원 측정기를 이용하여 KS B 1405에 규정한 베벨기어의 품질을 평가하였다. 각 윤활제별 표면 거칠기에 대한 품질 평가 평균값을 Fig. 8에 나타내었다.

기어의 진동과 소음의 주요원인이 되는 치흡의 흔들림 오차(run-out tolerance)를 비교해 보면, 소재 표면을 연마하여 유용성 윤활제(Soy+Graphite)를 금형에 윤활한 후 베벨기어를 온간단조로 성형했을 때 치흡의 흔들림 오차는 0.073mm로 4급 수준이었다. 수용성 윤활제(Deltaforge #31)를 금형에 윤활했을 때 치흡의 흔들림 오차는 0.0535mm로 3급 수준으로 나타났으



(a) oil-based lubricant (Soy+Graphite)



(b) water-based lubricant (Deltaforge #31)

Fig. 8 The quality evaluation according to each surface roughness used each other lubricant on the die

며, 이는 유용성 윤활제 보다 수용성 윤활제를 사용하였을 때 베벨기어의 품질이 우수한 것을 알 수 있었다.

소재 표면을 고속선반 가공하여 유용성 윤활제 (Soy+Graphite)로 금형에 윤활한 후 베벨기어를 온간단조로 성형했을 때 치홈의 흔들림 오차는 0.061mm로 3급이었고, 수용성 윤활제(Deltaforge #31)을 금형에 윤활했을 때, 치홈의 흔들림 오차는 0.032mm으로 2급 수준으로 소재 표면을 연마했을 때와 동일하게 유용성 윤활제 보다 수용성 윤활제의 품질이 우수하였고, 소재 표면은 연마한 것 보다 고속선반 가공한 소재의 베벨기어 품질이 우수하였다.

소재 표면을 쇼트블라스팅 처리한 후 유용성 윤활제인 Soy+Graphite를 금형에 윤활하고 베벨기어를 온간단조로 성형했을 때 치홈의 흔들림 오차는 각각 0.0585mm로 3급, 0.081mm로 4급 수준이

었다. 수용성 윤활제인 Deltaforge #31을 금형에 윤활했을 때 치홈의 흔들림 오차는 0.0235mm으로 1급 수준으로 소재 표면을 연마 또는 고속선반 가공한 상태와 동일하게 유용성 윤활제 보다 수용성 윤활제의 품질이 우수하였다. 또한, 소재 표면을 쇼트 블라스팅 처리한 상태로 베벨기어를 성형하는 것이 소재 표면을 연마 또는 기계 가공한 상태 보다 우수한 품질을 얻었다. 초기 소재의 평균 표면 거칠기가 크게 되면 우수한 품질의 베벨기어를 온간단조로 성형 가능한 이유는 앞에서 설명한 바와 같이 소재의 거친 표면에 윤활제가 잔존해 있게 되어 성형이 진행되면서 새로운 표면에 지속적으로 윤활막을 형성시켜 주는 역할을 수행하기 때문이고, 유용성 윤활제 보다 수용성 윤활제의 품질이 우수한 이유도 유용성 윤활제의 잔류물이 치형의 모서리에 존재하여 베벨기어가 충만 되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 베벨기어와 같은 정밀 제품을 온간단조로 성형하기 위해서 소재의 표면은 매끄러운 것보다 거친 것이 성형 하중을 감소시키고 품질이 우수한 제품을 성형하는데 유리하고, 유용성 윤활제보다는 수용성 윤활제가 성형 하중을 감소하고 품질이 우수한 제품을 성형하는데 적합하다는 것을 알 수 있었다.

#### 4.2 윤활제에 따른 베벨기어 성형 특성

세 종류의 수용성 윤활제와 두 종류의 유용성 윤활제에 대해 베벨기어의 온간단조 시험을 통해 윤활제에 따른 베벨기어 성형 특성을 평가하였다. 각 윤활제에 대한 성형하중 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 윤활제에 대한 온간 베벨기어의 성형하중은 수용성 윤활제가 유용성 윤활제보다 낮은 성형하중 값을 나타나는 것을 알 수 있었다. 특히, 수용성 윤활제 중에서 Deltaforge #31이 604톤으로 가장 낮은 것으로 나타났으며, Renite S-26-X가 625톤, Deltaglaze #15가 640톤의 성형하중을 나타내었다.

각 윤활제에 따라 성형된 베벨기어를 3차원 측정기를 이용하여 품질을 평가한 결과는 Fig. 10에 각 윤활제에 따라 성형된 베벨기어를 3차원 측정을 나타내었다. 수용성 윤활제 Deltaforge #31과 Renite S-26-X 윤활제가 KS B 1405 기준 1급 수준이었으며, Deltaglaze #151은 2급, Soy는 3급, Oildag는 4급 기어 수준으로 나타났다. 또한, 단일

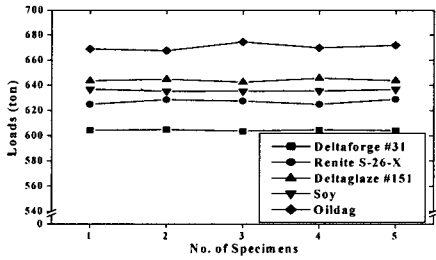


Fig. 9 Loads according to each lubricant

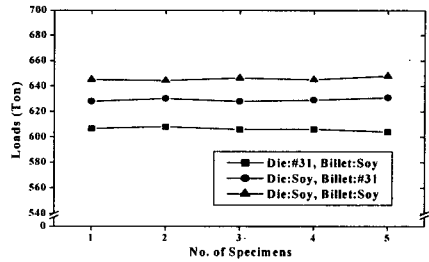


Fig. 11 Loads according to each lubricating method

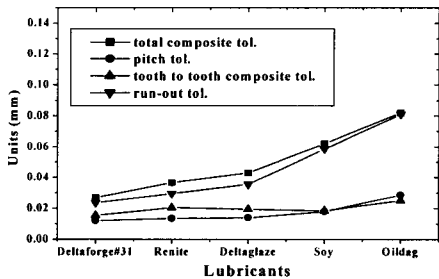


Fig. 10 The quality evaluation according to each lubricant

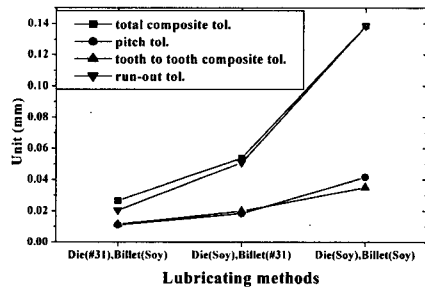


Fig. 12 The quality evaluation according to each lubricating method

피치 오차는 수용성 윤활제가 2급 기어 수준 이었 으며, 유용성 윤활제가 3급 수준으로 나타났다.

따라서 수용성 윤활제가 유용성 윤활제보다 성형하중이 낮고, 베벨기어의 품질이 우수한 것을 알 수 있었다. 특히, 수용성 윤활제 중 Deltaforge #31 윤활제가 온간단조에서 베벨기어를 성형하 는 데 가장 낮은 성형하중을 요구하고 치수 정도가 우수한 윤활제임을 알 수 있었다.

#### 4.3 윤활 방법에 따른 베벨기어 성형 특성

세 가지 윤활방식에 따른 베벨기어의 온간단 조 성형 실험을 통해 성형하중 및 베벨기어의 품 질을 평가하였다. Fig. 12에 윤활방식에 따른 베벨 기어의 성형하중을 나타내었다. 세 가지 윤활방식 중 금형에 Deltaforge #31을 분사하고 소재에 Soy+Graphite를 분사했을 때 성형하중이 605 톤으 로 가장 낮았고, 금형에 Soy+Graphite를 분사하고, 소재에 Deltaforge #31을 분사했을 때 성형하중은 630톤 이었다. 소재와 금형에 Soy+Graphite로 윤활 했을 때 성형하중(645톤)이 가장 크게 나타났고, 특히 금형에 유용성 윤활제를 분사하였을 때 성형

하중이 크게 나타났다. 이러한 원인도 베벨기어의 온간단조에서 유용성 윤활제가 금형 모서리에 오 일 잔류물이 잔존하기 때문에 성형하중이 증가하 는 것으로 판단된다. 세 가지 윤활방식에 따라 성형된 베벨기어의 품질을 3차원 측정기를 통해 평 가하였다.

치흠의 흔들림 오차는 금형을 Deltaforge #31을 윤활하고 소재를 Soy로 성형했을 때 KS B 1405 기준으로 1급 수준이었으며, 금형을 Soy로 윤활하 고, 소재를 Deltaforge #31로 윤활했을 때 3급 수 준이었다. 금형과 소재를 Soy로 윤활했을 때는 5 급 수준으로 품질이 낮아지는 것을 알 수 있었다 (Fig. 12). 이중 윤활제를 금형과 소재에 각각 윤활 했을 때의 베벨기어의 성형하중과 품질을 평가한 결과, 수용성 윤활제를 금형에 윤활하고, 유용성 윤활제를 소재에 윤활했을 때 가장 좋은 것으로 나타났고, 수용성 윤활제를 금형에만 윤활했을 때 가 우수한 품질 수준 및 낮은 성형하중을 갖는 것 으로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서는 소재의 표면 거칠기와 윤활제 및 윤활방식에 따른 베벨기어의 온간단조 성형성을 평가하기 위해 베벨기어 온간단조 시험을 통해 성형하중 및 품질을 비교, 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 초기 소재의 표면 거칠기가 거칠수록 베벨기어를 온간단조로 성형하는데 성형 하중을 낮추고 우수한 품질 수준의 제품을 얻을 수 있었으며, 특히, 수용성 윤활제를 사용하고, 표면 거칠기가 거친 조건에서 가장 우수한 성형 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다.
- (2) 베벨기어 온간단조에 적합한 윤활제는 수용성 윤활제이고 특히, 시험에 사용된 수용성 윤활제 중 Deltaforge #31이 가장 우수한 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다.
- (3) 금형에 수용성 윤활제로 윤활하고 소재에 수용성 윤활제로 윤활했을 때 베벨기어 성형하중이 낮고 품질이 우수하였다. 그러나 금형에 수용성 윤활제로 윤활하고 소재는 무 윤활하였을 경우의 베벨기어 품질이 보다 우수하였다.
- (4) 베벨기어의 온간단조 성형에서 성형하중이 높을수록 제품 품질이 낮았다. 또한 성형하중이 낮으면 품질수준이 우수한 것을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Dean, T. A. "Concepts and practice in precision forging," 7th Int. Congress Cold Forging, Birmingham, pp. 15-23, 1985.
2. Dommelen, H. V. and Hirschvogel, M., "Some application of cold and warm forging," *Journal of Mat. Proc. Tech.*, Vol. 35, pp. 343-356, 1992.
3. Sheljaskov, S., "Halbwarmumformung," a *Tangewandte Technik, Pressen+Walzen*, pp. 106-110, 1993.
4. Doege, E. and Thalemann, J., "Near-net-shape forming in sheet metal forming and forging," *Annals of CIRP*, Vol. 38/2, 1989.
5. Kim, D. H. and Kim, B. M., "Preform design of the bevel gear for the warm forging using artificial neural network," *Journal of the KSPE*, Vol. 20, No. 7, pp. 36-43, 2003.
6. Meidert, M., Knoerr, M. and Altan, T., "Investigation of physical and numerical modelling of bevel gear forming," Report No. B-91-13, Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, Columbus, OH, May, 1991.
7. Westphal, K., Knoerr, M. and Altan, T., "Computer-aided design of cold forging punches," Report No. B-D-92-08, engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, Columbus, OH, March, 1992.
8. Doege, E. and Weber, F., "Jot forging of precision parts," *Journal of Mat. Proc. Tech.*, Vol. 35, pp. 569-481, 1992.
9. Meidert, M., Knoerr, M., Westphal, K. and Altan, T., "Numerical and physical modelling of cold forging of bevel gears," *Journal of Mat. Proc. Tech.*, Vol. 33, pp. 75-93, 1992.
10. Doege, E. and Nagele, H., "FE simulation of the precision forging process of bevel gears," *Annals of the CIRP*, Vol. 43, pp. 241-244, 1994.
11. Sheljaskov, S., "Warm forging-a technology for manufacturing of precision components," *Proceedings of the 5th international Conference on Technology of Plasticity*, Vol. 1, pp. 485-490, 1996.
12. Iwama, T. and Morimoto, Y., "Die life and lubrication in warm forging," *Journal of Mat. Proc. Tech.*, Vol. 71, pp. 43-48, 1997.
13. Jeong, D. J., Kim, D. J. and Kim, B. M., "Evaluation of friction shear factor by the lubricating methods in warm forging," *Journal of the KSTP*, Vol. 10, No. 4, pp. 319 - 328, 2001.