

中空素材에 의한 스피어기어의 냉간단조

최재철, 허관도*, 김창호, 최영

부산대학교 기계설계공학과

* 동의대학교 기계설계학과

Abstract

Closed-die forging of spur gears with hollow cylindrical billet has been analysed by using the upper-bound method. A kinematically admissible velocity field has been developed, wherein, an involute curve has been introduced to represent the forging die profile. In the analysis, the deformation regions have been divided into nine zones. A constant frictional stress has been assumed on the contacting surfaces. Utilizing the formulated velocity field, numerical calculations have been carried out to investigate the effects of various parameters, such as module, number of teeth and friction factor, on the forging of spur gears.

1. 서론

기어의 제작에 있어서 기계공작상 또는 열처리에 의해 제작 오차가 발생되고, 운전하중과 회전에 의해서 기어는 변형되어 그 결과 진동, 소음 및 파손의 원인이 될 수 있다. 따라서 원활한 운전을 위해서는 기어장치 주변요소와 더불어 기어의 제작에 있어서 정밀하고 충분한 강도를 가지는 기어를 제작할 필요가 있다. 기어의 제조에 있어서 현재 고정밀도를 필요로 하는 제품은 호밍, 레이핑 및 해이핑과 같은 전삭가공에 의해서 대량생산되고 있다. 그러나 소성가공에 의해 성형된 기어는 전삭가공에 의해 성형된 기어에 비하여 재료절감과 강도 증가등을 기대할 수 있으므로, 최근 기어의 제조에 있어서 생산성을 높이는 방법으로 소성가공에 의한 기어의 성형법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1)~3)} 그런데 냉간단조용 공구와 금형은 가혹한 하중조건에서 사용되기 때문에 마모, 파손등의 손상이 일어나기 쉽다. 따라서 공구의 수명연장과 관련하여 적절한 공구선택과 정밀단조를 수행하기 위해서는 단조하중 예측과 단조방법의 개발등이 필요한 것이다. 단조하중과 압력을 구하는 해석법으로는 슬래브법, 상·하계법, 유효요소소법등이 있으며, 이중 상계해법은 금형설계시 실용적 측면에서 매우 유용한 방법이다. 본 논문에서는 중공형 원주의 초기소제에 의하여 인버뉴트 치형의 스피어기어를 냉간밀폐단조할 때, 동적가용속도장을 구하고 이 속도장에 의한 상계해를 수치적으로 구하여 가공물의 높이 변화에 대응하는 단조하중, 초기소제의 내경크기에 대한 상대압력, 가공물의 높이 감소율에 대한 상대압력 및 기어의 잇수 변화에 대한 상대압력의 변화등을 해석한다. 그리고 계산된 결과와 실험한 결과를 비교 하며 냉간단조된 기어의 성형도를 고찰하고자 한다.

2. 이론해석

2.1 동적가용속도장

Fig. 1은 중공형의 원주빌렛에 의하여 스피어기어를 밀폐단

조할 때 변형영역을 나타낸 것이다. 이와같은 변형영역과 다이의 경계면에 대하여 체적일정조건과 수직속도성분의 연속성 및 경계조건을 만족하는 새로운 동적가용속도장을 구하고 이 속도장에 의한 상계해를 수치적으로 구한다. 여기에 사용된 좌표계는 중심 O의 r, θ, z 원주 좌표계이다. 여기서 이빨리원과 맨드릴 사이에 최대형 변형영역이 존재한다고 가정하여 반경 r_m이 도입되었다. 이 r_m은 에너지 소비율이 최소로 되는 위치로 결정된다. 그리고 이론해석을 위해 가정된 내용은 다음과 같다.

- 1) 스피어기어 단조에 사용되는 금형은 단조제품의 이빨원 보다 조금 더 깊게 가공되어 있으며, 그 틈새는 아주 작은 것으로 생각한다.
- 2) 다이, 펀치 및 치공구들은 완전강체로서 어떠한 변형이나 체적변화가 없다.
- 3) 단조된 재료는 등방성, 비압축성이고, Mises의 유효변형치율 따른다.
- 4) 재료 유효변형의 자유면의 형상은 O를 중심으로 하는 원호이다.
- 5) 가공물과 공구사이의 접촉면에서 마찰은 일정한이다.
- 6) 초기소제의 직경은 이빨리원 직경과 같다.

2.2 상계해

각 영역의 속도장에 의해 각각의 진단변형율 속도를 계산하면 $\dot{\epsilon}_{\theta z}$ 와 $\dot{\epsilon}_{rz}$ 는 모두 0이고, $\dot{\epsilon}_{\theta r}$ 는 ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑧ 및 ⑨ 영역에서 존재한다. $\dot{\epsilon}_{\theta r}$ 는 다음 식으로 구한다.

$$\dot{\epsilon}_{\theta r} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial U_r}{r \partial \theta} + \frac{\partial U_{\theta}}{\partial \theta} - \frac{U_{\theta}}{r} \right\} \quad (1)$$

그리고 제안한 속도장에서의 유효변형율속도는 아래의 식으로 평가한다.

$$\frac{1}{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\dot{\epsilon}_r^2 + \dot{\epsilon}_\theta^2 + \dot{\epsilon}_z^2 + 2\dot{\epsilon}_r\dot{\epsilon}_\theta} \quad (2)$$

그리고 각각의 영역에 대한 내부에너지 소비율, 전단에너지 소비율 및 마찰에너지 소비율은 다음식들에 의하여 평가하며, 수치적으로 계산된다.

$$\dot{E}_{p,i} = \int_V \sigma_n \dot{\epsilon}_i dV \quad (3)$$

$$\dot{E}_S = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \int_S |\Delta V| dS \quad (4)$$

$$\dot{E}_f = \frac{m\sigma_n}{\sqrt{3}} \int_{A_i} |\Delta V| dA_i \quad (5)$$

여기서 σ_n 는 해석하려는 순간의 유효응력이다. 그리고 ㉠영역에서 ㉡영역까지 전체에너지 소비율은 위에서 기술한 내부에너지 소비율, 전단에너지 소비율과 마찰에너지 소비율의 총합이다. 즉,

$$\dot{E}_T = \Sigma \dot{E}_p + \Sigma \dot{E}_S + \Sigma \dot{E}_f \quad (6)$$

전체에너지 소비율은, 일정한 속도 u 로 움직이는 펀치에 제공된 동력과 같아야 한다. 그러므로 스피어기어 전체에너지 소비율은

$$\begin{aligned} E_T &= 2NE_T \\ &= P_m \cdot A \cdot u \end{aligned} \quad (7)$$

이고, 상대압력에 관한 상계값은 다음으로 평가한다.

$$\frac{P_{av}}{\sigma_0} = \frac{E_T}{\sigma_0 \cdot u \cdot A} \quad (8)$$

여기서, Λ 는 해석하려는 순간의 펀치와 가공물의 접촉면적이다.

3. 실험

스피어기어의 밑케단조시 재료의 유동형태를 파악하기 위하여 흑색과 백색의 플라스틱신을 원주형으로 직경하여 Toyo Baldwin 25톤 만능시험기로 시험했다. 실험에 사용된 재료의 유동응력을 평가하기 위하여 마찰효과를 최소화하는 외삽법⁸⁾을 이용하였다. 이 시험에 사용된 소재의 치수는 직경 24mm, 높이를 각각 24mm, 12mm 및 8mm의 원주형으로 가공하였다. 압축시험 각 단계마다 재 율환치리를 하고, 구한 값들을 최소자승법으로 보간하여 응력과 변형율의 관계식을 얻었다. 그리고 마찰상수를 구하기 위하여 Al2024와 Si2C를 외경:내경:높이 비가 6:3:2로 가공하여 링 압축시험을 하였다. 마찰상수는 약 0.1~0.15정도였다. 스피어기어의 냉간단조를 위하여 소재를 중공의 원주로 가공하여 완전풀림 연치리를 한 후 율환피마치리를 하였다. 율환피마치리는 Al2024와 Si2C에 대하여 각각 1.탄치, 2.수세, 3.에칭, 4.수세, 5.산세, 6.수세, 7.당새, 8.피마, 9.수세, 10.중화, 11.율환, 12.건조의 순서로 시행 하였다. 링 압축시험을 할 때도 소재는 위와 같은 율환피마치리를 하였다. 그리고 단조시에는 광유에 MOS₂가 첨가된 율환제를 소재에 얇게 분부 도포하여 실험했다. 황삭용 전극과 정삭용 전극을 가공하여 스피어 기어 단조를 니이를 방전가공 하였고, 방전가공된 니이는 유동성 점토를 이용하여 호우납기에서 램핑가공 하였다. 가공된 니이의 모둘은 2.0, 잇수는 15이다.

Fig. 2는 중공의 원주형 빌렛에 의한 인버류트 스피어 기어의 냉간 밑케단조에 관한 개략도를 나타낸 것이다. 이 그림에 도시된 바와 같이 펀치, 다이 및 이젝터에는 치가 가공되어 있고, 가공물을 단조 할 때 이젝터는 정지상태를 유지하도록 한다. 그리고 맨드릴과 함께 펀치가 일정속도로 하강함에 따라 재료는 니이의 치 공간으로 유동되어 간다. 실험에 사용된 프레스는 300 ton 유압 프레스이고, X-Y 기록계를 이용하여 프레스 램 스트로크와 가압력을 기록 하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 스피어기어의 단조시 재료의 유동형태를 파악하기 위하여 모델체인 플라스틱신에 의하여 실험된 것이다. 초기의 빌렛과 다이의 치 공간으로 완전히 재료유동이 된 경우를 나타낸 것인데, 이 결과에서 이뿌리원과 중심사이에 축대칭 변형영역이 존재함을 볼 수 있다. 그러므로 속도장의 구성에서 축대칭 영역의 존재를 가정하여, 준독립변수 r_m 을 도입 한 것을 입증하고 있다. Fig. 4는 초기소재의 높이가 10일때 각각의 잇수, 모둘 및 마찰상수등의 조건에서 축대칭영역으로 생 각한 준독립변수 r_m 의 이뿌리원 반경에 대한 비와 가공물의 높이 감소율과의 관계를 해석적으로 구한 결과이다. 여기서 중공소재의 내경은 각각 이뿌리원 직경의 50%를 선택한 결과이다. 이 해석결과는 기어의 잇수가 많을수록 r_m/r_n 이 큰 값을 보이고 있다. 이와같은 현상은 가상적으로 잇수가 무한히 많아지면 축대칭 실린더 형상이 되어 축대칭 영역으로 생 각한 준독립변수 r_m 이 바로 실린더의 반경이 되어 r_m/r_n 가 1의 값을 가지게 될 것이다. 해석된 결과는 이와같은 현상을 따른다고 생각된다. 그리고 각각의 잇수 조건에서 마찰상수 0.1, 0.12 및 0.15에 대한 r_m/r_n 값 차이는 거의 없고, 모둘변화 1.0, 1.5 및 2.0에 대해서도 r_m/r_n 값 차이는 거의 없다. 그리고 약 5%정도까지의 높이 감소율에서는 r_m/r_n 의 변화가 커지만, 그 이후에는 큰 변화가 없는 것으로 본다. 그런데 기어의 잇수가 15인 경우, 중심의 원주형 모델체 플라스틱신으로 모둘 4에 대하여 실험한 결과와 거의 같은 값을 가짐을 알 수 있었다. Fig. 5와 Fig. 6은 중공형 원주빌렛의 서로 다른 내경에 대한 상대압력의 변화를 마찰상수, 모둘등의 조건에서 해석한 결과이다. Fig. 5는 잇수가 15일때, Fig. 6은 잇수가 24일 때 구한 결과이다. 이 그림들에서는 중공소재의 내경이 이뿌리원에 접근할수록 상대압력이 급상승하는 것을 보이나, 이뿌리원 직경의 약 50%이하의 내경에서는 상대압력의 변화가 커지않다. 그리고 이 범위내에서 마찰상수와 모둘의 변화에 대한 상대압력의 변화는 잇수가 많아질수록 조금씩 증가하는 결과를 나타낸다. 이것은 모둘 증가에 의해 치가 커지는 연유로 생각된다. 이와같은 내경과 상대압력의 관계를 참고하여 잇수 15, 모둘2.0의 다이에서 냉간단조시, 상대압력이 5를 넘지않는 범위로부터 중공소재의 직경을 13mm, 15mm 및 17mm로 선택하였다. Fig. 7은 스피어기어의 잇수 증가에 따른 상대압력의 변화를 마찰상수, 모둘의 각 조건에서 해석한 결과이다. 이 그림에서 잇수가 같을때 마찰상수와 모둘이 불수록 상대압력이 큰 값을 가진다. 그리고 모둘이 1.0과 1.5일때는 잇수가 15일때보다 낮은 상대압력을 가지는 잇수의 범위가 존재하는 것을 볼 수 있다. 그런데 잇수가 점차 많아지면 상대압력도 증가하는 경향이다. 또한 잇수가 적을때보다 잇수가 많을때 마찰상수와 모둘의 증가에 의한 상대압력의 증가

현상이 현저하다. Fig.8은 Al-2024를, Fig.9는 S12C를 각각 직경26mm, 두께10mm, 내경15mm로 가공하여 여러단계에 걸쳐 가공물의 다이 채움상태의 단조하중을 점검하면서 행한 실험결과이다. 가공물이 다이의 이빨쪽으로 채워지 갈때, 필치와 접촉된 부분이 이빨터의 접촉된 부분보다 재료유동이 조금 빠른 것을 볼 수 있었다. 그런데 상계해석에 사용된 용력과 변형률의 관계식은 단순압축시험에 의하여 구한 결과 Al-2024는 $\sigma = 340.67 \varepsilon^{0.1718}$ MPa, S12C는 $\sigma = 641.17 \varepsilon^{0.27}$ MPa이고, 유효변형률은 가공물의 높이 변화에 대한 대수변형률을 이용했다. 가공물의 압축량과 하중의 관계에 대하여, 실험한 결과와 상계해석한 결과를 비교한 것이 Fig.10과 Fig.11이다. Fig.10은 Al-2024에 대한 것이고, Fig.11은 S12C에 대한 것이다. 여기서 상계해석한 결과와 실험한 결과는 그 경향이 유사하다. 여기서 해석한 결과와 실험한 결과에서 Δt 가 차이가 있는 것은, 가공된 다이의 치높이가 해석에 적용된 치높이보다 조금 크고 또한 미소한 플래시의 발생과 치공구들의 탄성 압축량등에 그 원인이 있다고 본다. Fig.12는 Al-2024를 이용하여 단조된 스피어기어의 경도분포를 마이크로 비키스 경도계에서 구한 것으로, 이뿌리원 필렛부에 높은 경도분포를 나타내고 있다. 이것은 필렛부가 가공경화를 많이 받아 강도가 증가했음을 입증하고 있다. 그리고 S12C로 냉간단조된 제품을 3차원 측정기에서 정밀도를 측정한 결과 KS규격 6등급 정도임을 관측하였다.

5.결론

중공 원주형 소재를 이용하여 인벌류트 스피어기어를 냉간 밀폐단조 할 때, 동적가용속도장을 구하여 상계해석하고 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 스피어기어를 단조할때 이뿌리원과 중심사이에 축대칭 변형영역이 존재함을 플라스틱신을 이용한 실험에서 확인했다.
- (2) 상계해석결과 스피어기어의 잇수가 많을수록 r_m/r_n 이 큰 값을 가진다.
- (3) 중공소재의 내경이 이뿌리원에 접근할수록 상대압력이 급상승하지만, 이뿌리원 직경의 약 50%이하의 내경에서는 상대압력이 거의 일정하다.
- (4) 냉간단조된 제품의 정밀도는 KS규격 6등급정도이다.

참고문헌

- (1) F.Dohmann and O.Traudt, "Metal Flow and Tool Stresses in Cold Forging of Gear Components", *Advanced Technology of Plasticity*, Vol.II, pp.1081~1089, 1987.
- (2) S.Fujikawa, H.Yoshioka and S.Shimamura, "Cold- and Warm- Forging Applications in the Automotive Industry", *Journal of Materials Processing Technology*, 35, pp. 317~342, 1992.
- (3) I.Moriguchi, "Cold Forging of Gear and Other Complex Shapes", *Journal of Materials Processing Technology*, 35, pp. 439~450, 1992.
- (4) M.Meidert, M.Knoerr, K.Westphal, T.Altan, "Numerical and Physical Modelling of Cold Forging of Bevel Gears", *J. of Materials Processing Technology*, Vol.33, pp.75~93, 1992.

- (5) K.Lange, A.Hettig, M.Knoerr, "Increasing Tool Life in Cold Forging through Advanced Design and Tool Manufacturing Techniques", *J. of Materials Processing Technology*, Vol.35, pp.495~513, 1992.
- (6) K.Lange, "Some Aspects of the Development of Cold Forging to High-Tech Precision Technology", *J. of Materials Processing Technology*, Vol.35, pp.245~257, 1992.
- (7) K.Kondo and K.Ohga, "Research on Application of the Precision Cold Die Forging Utilizing Divided Flow to Thick Products", *Advanced Technology of Plasticity*, Vol.II, pp.1239~1244, 1993.
- (8) W.F.Hosford, R.M.Caddell, "Metal Forming, Mechanics and Metallurgy", Prentice-Hall International, 1983.

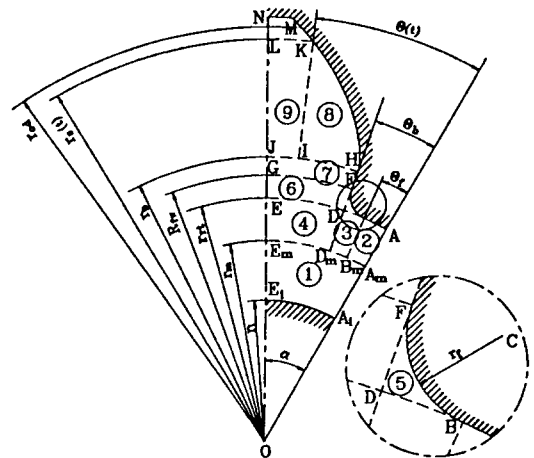


Fig.1 Assumed deformation regions of involute tooth profile.

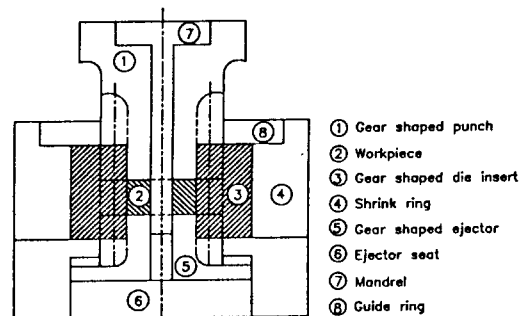


Fig.2 Schematic drawing of die sets for spur gear forging.

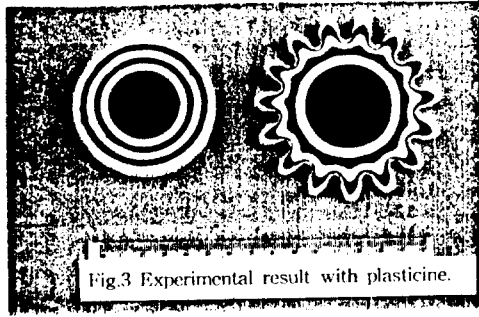


Fig.3 Experimental result with plasticine.

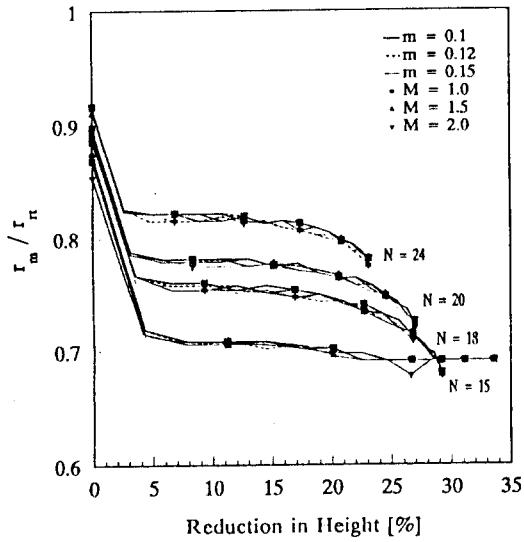


Fig.4 Variation of the fractional radius with respect to reduction in height.

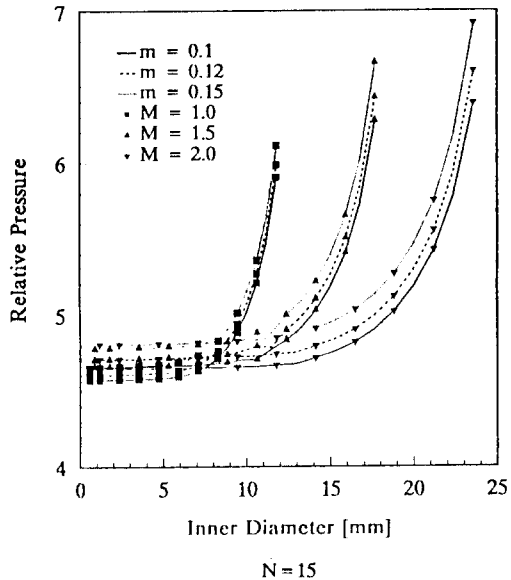


Fig.5 Variation of the relative pressure with respect to inner diameter of hollow cylindrical billet.

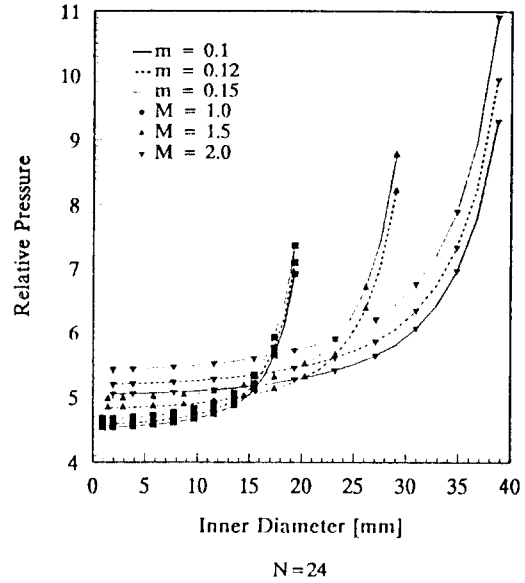


Fig.6 Variation of the relative pressure with respect to inner diameter of hollow cylindrical billet.

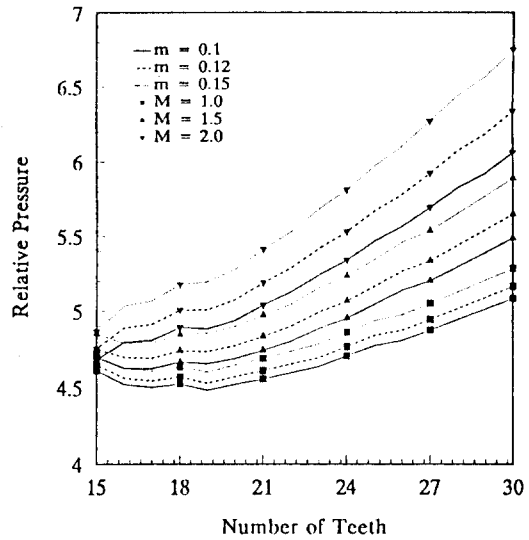


Fig.7 Variation of the relative pressure with respect to number of teeth.

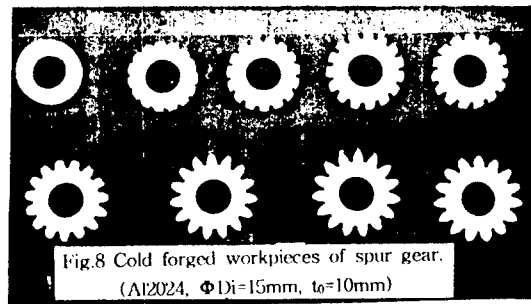
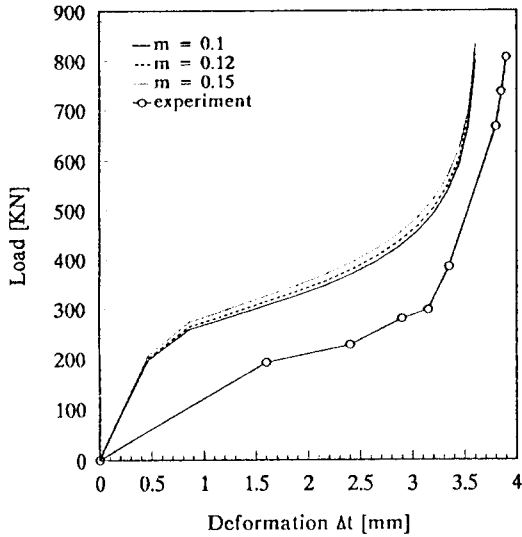
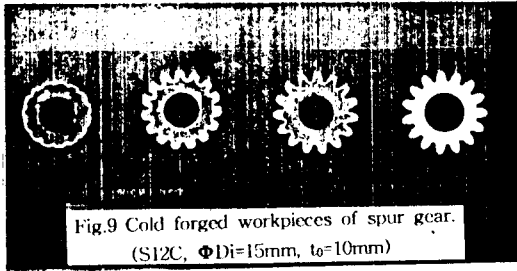
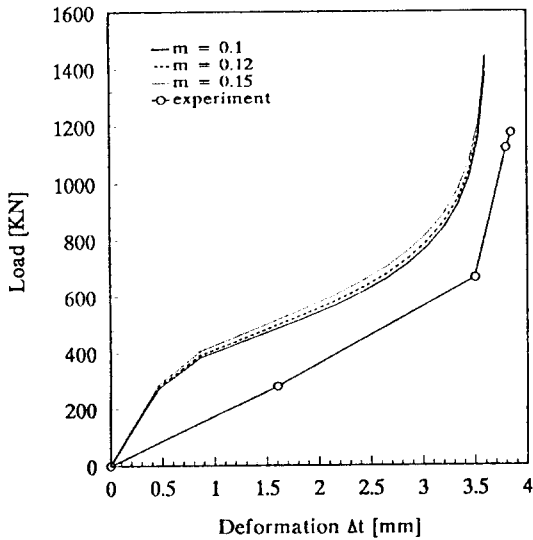


Fig.8 Cold forged workpieces of spur gear.
(Al2024, $\Phi D_i=15\text{mm}$, $t=10\text{mm}$)



$N = 15, M = 2.0, D_i = 15$ [mm]

Fig.10 Comparison of the experimental results with the upper bound solutions.(Al2024, t₀=10mm)



$N = 15, M = 2.0, D_i = 15$ [mm]

Fig.11 Comparison of the experimental results with the upper bound solutions.(S12C, t₀=10mm)

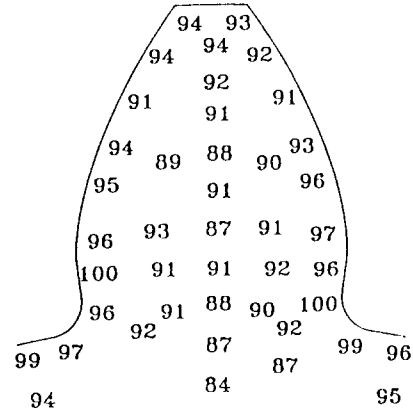


Fig.12 Micro vickers hardness test results.(Al2024)