

냉간 압출된 유성기어의 내부결함 방지

이정환*, 최종웅*, 이영선*, 최상호**

Prevention of Internal Defects of Cold Extruded Planetary Gears

J. H. Lee*, J. Choi*, Y. S. Lee*, and S. H. Choi**

ABSTRACT

It is investigated that internal defect of planetary gear which consists of two gears with different number of teeth on both side. The internal defect, central burst, begin to form at the place of adiabatic shear band which usually has maximum ductile fracture value during the forming operation, forward and backward extrusion. It makes the plastic forming of planetary gear difficult. The prediction of defect to minimize the cost to produce the planetary gear. The finite element simulation code DEFORM is applied to analyze the defects. In the analysis, the toothed gears are assumed as axisymmetric cylinders whose diameters are equal to those of pitch circles of the each gears. Experiments were carried out with the SCM415 alloy steel as billet material and AIDA 630-ton knuckle-joint press. The calculated results and experimental inspections are compared to design a die and blank without defects and the results are useful to predict the internal defect.

Key Words : Internal defect(내부결함), Ductile fracture(연성파괴), Forward and backward extrusion (전·후방 압출), Planetary gear (유성기어), Adiabatic shear band(단열전단밴드)

기호설명

D : 소재직경 t : 플랜지 두께
 $\bar{\sigma}$: 유동응력 $\bar{\epsilon}$: 유효 변형률
 R/H : 높이감소율

1. 서 론

일반적인 소성가공 공정에서 소재는 큰 변형이 발생하고 이러한 변형은 재료내부에 국부적인 결함을 생성시키며 나아가 파손에 이르는 원인이 된다. 결함은 소재의 변형이력, 공정조건 등에 따라 차이

가 있다. 이러한 결함을 방지함으로써 금형 설계 기간 단축 및 소재의 절감에 의한 원가절감 및 제품의 기계적 성질 향상을 꾀할 수 있으므로 많은 연구가 이루어지고 있다.

냉간 가공 중 발생할 수 있는 가장 일반적인 결함의 종류로는 내부 중심축 선상에서 연성파괴나 단열 전단밴드의 생성으로 발생하는 내부결함(chvron crack)이 있으며^[1-3], 표면에 생선의 비늘이나 뱀의 피부와 같은 모양의 결함(fish skin, snake skin)과 냉간 압출 공정에서 일반적으로 발생하는 결함으로서 소재의 길이가 짧을 경우 펀치와 접촉하는 끝부분에 발생하는 파이핑 결함(piping defect)

* 한국기계연구원 재료공정연구부 소성응용그룹

** 광호정밀

등이 있다¹⁴⁾. 이러한 결함 등은 강도, 피로수명 과 같은 제품의 기계적 성질 저하의 원인이 되므로 성형 중 결함이 발생하지 않도록 플랭크의 형상 및 크기와 금형 설계를 하는 것이 바람직하다.

감속기 등에 사용되는 유성기어는 양쪽에 잇수가 다른 치형을 갖는 기어로서 소성가공에 의해 제품을 성형할 때 양쪽의 치형을 전·후방 복합압출로써 동시에 성형하므로 소재의 중심에 내부결함이 발생할 가능성이 매우 높기 때문에 성형 난이도가 높은 공정으로 냉간 압출에 의한 시도가 전혀 이루어지지 않았다. 이러한 이유로 해서 현재까지 유성기어는 주로 기계가공으로 제작되어왔다. 그러나, 소성가공으로 유성기어를 제작할 경우 치형의 강도 향상, 내마모성 향상, 열처리에 의한 치형 변형 최소화 및 맞물림 소음의 감소 등의 기계적 특성과 대량생산 및 소비되는 재료의 감소에 따른 경제성 확보 등의 많은 장점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 중실형 소재로부터 유성기어를 성형할 경우 상·하부의 치형을 각각의 피치원 직경에 상당하는 원통형 축대칭 2차원 형상으로 가정하여 소재의 중심부에서 발생하는 내부결함을 감소성 유한요소 해석으로 예측하고 실제 성형과 비교함으로써 결함이 발생하지 않는 금형의 구조 및 플랭크를 설계하고자 한다.

2. 소재 실험

본 연구에서 해석 및 실험대상으로 한 소재는 SCM415이며 그 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of SCM415

Composition(weight %)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.18	0.22	0.68	0.01	0.014	1.0	0.17

성형 중 마찰의 효과를 줄이기 위하여 소재의 표면에 냉간가공용 인산염 피막처리를 하였다. 소재와 금형 사이의 마찰상수를 구하기 위하여 Fig. 1과 같이 외경 : 내경 : 높이의 비가 6 : 3 : 1의 비율을 갖는 시편으로써 링 압축시험을 수행한 후 Osakada¹⁹⁾등이 제안한 방법에 따라 마찰상수와 유

동응력을 계산하였다. 링 압축시험으로써 구한 마찰상수(m)는 0.10이며 유동응력은 다음 식과 같다.

$$\bar{\sigma} = 848.56 (\bar{\epsilon})^{0.1554} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Fig. 2에 압하율에 따른 변형된 시편의 모양을 나타내었다.

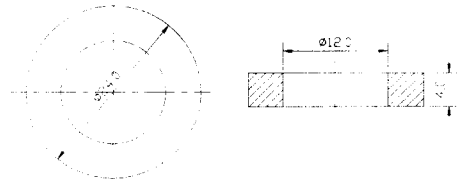


Fig. 1 Dimensions of ring compression test specimen (unit : mm)

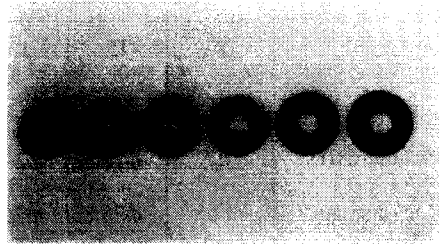


Fig. 2 Photograph of deformed ring compression test specimens for each step

3. 결함예측 및 실험

유성기어의 성형 중 발생하는 내부결함에 관계되는 공정변수는 소재직경, 플랜지 두께 및 다이축 플랜지부의 경사각 등이다. 본 연구에서는 위의 세 가지 공정변수에 따른 결함발생의 유무를 실험과 비교·고찰하고 결함이 발생하지 않는 금형을 설계하고자 하였다.

유성기어의 형상은 Fig. 3과 같이 상부와 하부에 잇수가 다른 기어가 있으며, 잇수의 차이가 감소비가 되고 플랜지 부위는 성형 후 기계가공에 의해 제거된다. 상·하부의 기어를 각각의 피치원 직경과 동일한 직경을 갖는 원통형 축대칭 형상으로

가정하였다.

실험 및 해석의 대상으로 한 유성기어의 상부와 하부 지형의 규격을 Table 2에 나타내었다.



Fig. 3 Appearance of planetary gear

Table 2 Specification of planetary gear
[unit : mm]

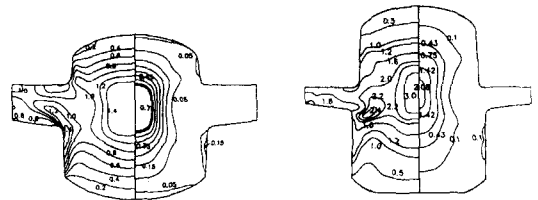
		P1	P2
Module	M	1.5	
Pressure angle	α	20°	
Teeth number	N	15	14
Coeff. of profile shift	x	0.5	
Pitch diameter	d_p	$\phi 22.5$	$\phi 21.0$
Outside diameter	d_o	$\phi 26.8$	$\phi 24.0$
Root diameter	d_r	$\phi 20.25$	$\phi 18.25$

다이축 플랜지부의 경사각이 7°, 소재의 직경이 플랜지부의 직경과 동일한 $\phi 40.0$ mm, 플랜지 두께가 4 mm인 경우 강-소성 유한요소 해석프로그램인 DEFORM을 사용하여 2차원으로 단순화하여 해석한 Fig. 4의 결과에서 보듯이 압출품의 중심부에서 연성과괴치가 가장 높게 나타나 중심축선상에서 결함발생이 예측되었다. 이는 Fig. 5의 실제 성형에서 중심축선상에 내부결함(central burst)이 발생한 것과 일치한다. 결함은 연성과괴치가 최대값을 갖는 중심부에서 발생하여 변형이 진행되는 동안 유동의 중립면을 따라 외부로 성장하였다.

Fig. 5의 결함은 일반적인 압출 공정에서 볼 수 있는 내부결함(chevron crack)과는 그 형상에 있어 약간의 차이가 있다. 압출에서 발생하는 결함은 소

재유동 방향에 대하여 볼록(convex)한 형상을 갖는 반면 본 연구에서 발생하는 결함은 소재유동 방향에 대하여 오목(concave)한 형상을 갖는다. 하지만, 두 가지 결함은 모두 경계면에서 발생하는 인장응력에 의한 것으로 동일한 발생기구를 갖는다. 압출 공정에서는 입구와 출구의 유동속도차이에 의해 인장응력이 발생하지만 본 연구에서 발생한 유성기어의 결함은 상부와 하부로 소재가 동시에 유동함에 따라 중립면상에서의 유동방향의 차이에 의해 인장응력이 발생하므로, 일반적인 압출 공정보다 더 높은 결함발생의 가능성을 가지고 있다고 할 수 있다.

2차원으로 가정한 형상이 실제 3차원 부품의 성형상태에서의 연성과괴치를 정량적으로 예측할 수 없으나 정성적으로는 최대값을 갖는 위치를 예측할 수 있으므로 연성과괴치의 변화를 비교함으로써 연성과괴치를 줄이는 방향으로 금형을 설계하였다.



(a) R/H = 75 % (b) R/H = 100 %

Fig. 4 Distribution of effective strain and ductile fracture value for extruded planetary gear

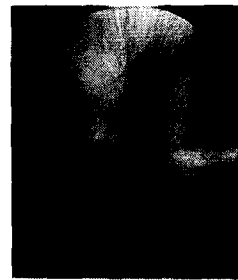
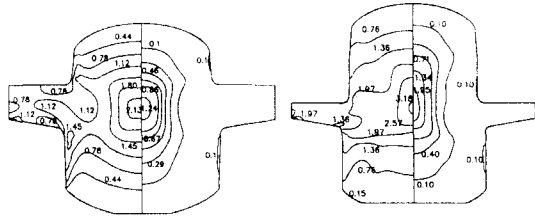


Fig. 5 Photograph of extruded planetary gear

(D : $\phi 40.0$ mm, t : 4 mm)

압출품 내부의 연성과괴치를 감소시키기 위해 다이축 플랜지부의 경사를 10°, 소재의 직경을 $\phi 40.0$ mm로 하여 해석을 수행하고 Fig. 6에 그 결과를 나타내었다.

경사각이 7° 인 경우와 비교해서 경사각이 크므로 중심부로 유동하는 소재의 량이 증가하여 높이감소율(R/H)이 75%에서 하부 금형의 바닥에 소재가 접촉한 것을 볼 수 있다.



(a) R/H = 75 % (b) R/H = 100 %

Fig. 6 Distribution of effective strain and ductile fracture value of 10° angle

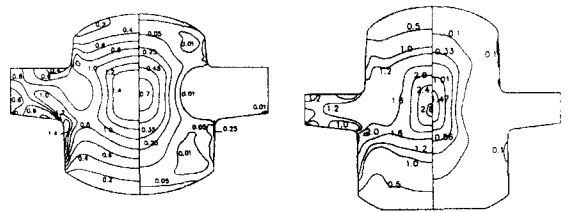
최종 성형단계에서 경사각이 7° 인 경우와 비교해서 유효변형률은 3.18로 약간 크고 연성과괴치는 1.95로서 약 6 %정도 작은 값을 갖는 등 큰 차이가 없다. 따라서, 결합발생 제어의 관점에서 본다면 펀치 및 다이의 경사각의 크기는 내부결합의 생성유무에 큰 영향이 없으며 경사각을 증가시키는 것은 소재체적 증가로 인한 제품중량을 증가시키는 결과만을 초래한다고 생각된다.

소재직경을 ϕ 40.0 mm, 경사각을 7° 로 하고 플랜지의 두께를 4 mm에서 6 mm로 증가시킨 경우에 대하여 Fig. 7과 Fig. 8에 해석 및 실험결과를 각각 나타내었다. 최종 성형상태에서 중심축선상의 최대변형률 값은 거의 차이가 없으나 연성과괴치는 플랜지 두께가 4 mm인 경우에 비하여 플랜지에서 내부로 유동하는 소재 량이 감소하므로 1.47로 감소하였다. 최종성형 단계에서 비록 내부 결함은 발생하였지만 그 크기는 상당히 감소하였음을 볼 수 있다. 소재중심부에서 연성과괴치의 감소로 인하여 내부결합의 발생시기가 지연되어 최종 성형상태에서 그 크기가 감소되었다고 생각된다.

플랜지 두께를 6 mm로 증가시킴으로써 연성과괴치의 최대값이 감소하므로 플랜지의 두께를 6 mm로 하고 소재의 직경을 ϕ 35.0 mm로 하였을 경우 동일한 치형에 대하여 해석한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

소재의 직경이 ϕ 40.0 mm인 경우와는 달리 변형의 초기에 소재의 일부가 플랜지부를 채우기 위해

반경이 증가하는 방향으로 유동하므로 소재의 중심부에 발생하는 유효 변형률 및 연성과괴치가 상당히 감소하여 최종성형 단계에서 최대값이 각각 1.9와 1.23이었다. 따라서, 내부결합이 발생할 가능성이 낮아지며 Fig. 10의 실험결과에서도 최종 성형단계에서 결함이 발생하지 않았다. 하지만, 압출품의 중심부에 과도한 변형으로 인하여 단열 전단밴드와 유사한 모양을 볼 수 있으며, 변형이 더 진행되거나 사용 중 피로에 의해 이곳에서 크랙이 발생할 가능성이 높다.



(a) R/H = 75 % (b) R/H = 100 %

Fig. 7 Distribution of effective strain and ductile fracture value of 6 mm flange thickness

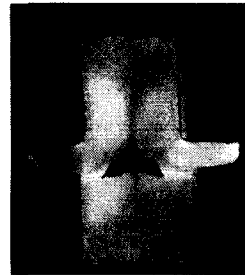
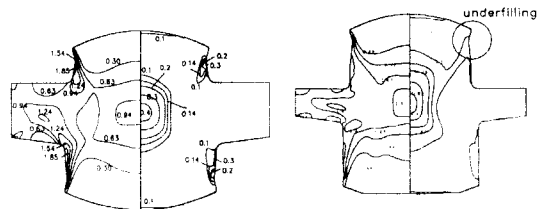


Fig. 8 Photograph of extruded planetary gear of 6 mm flange thickness



(a) R/H = 75 % (b) R/H = 100 %

Fig. 9 Distributions of calculated values of ϕ 35.0 mm billet diameter

소재의 직경을 감소시킴으로써 연성과괴치가

감소하므로 소재의 직경을 ϕ 33.0, ϕ 31.0으로 하여 동일한 해석을 수행한 결과를 Fig. 11, Fig. 12에 각각 나타내었다.

소재의 직경이 ϕ 33.0과 ϕ 31.0mm 인 경우 압출품의 내부 중심축선상의 연성과괴치가 ϕ 35.0 mm 인 경우보다 감소하였다.

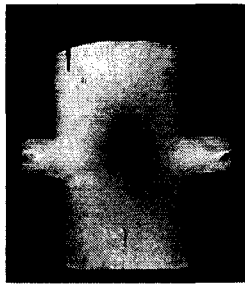
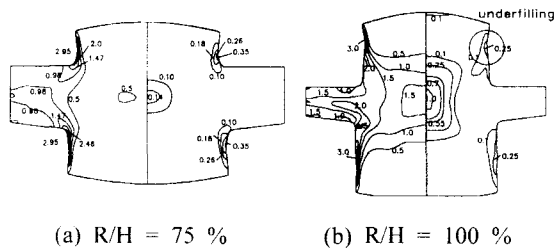


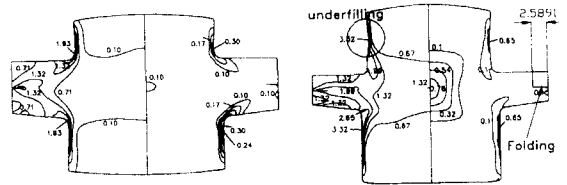
Fig. 10 Photograph of extruded planetary gear of ϕ 35.0 mm billet diameter

Fig. 9와 같이 해석에 있어서는 전·후방으로 압출되어진 부분의 다이쪽에 미충진 영역이 관찰되었지만 Fig. 10의 실험에서는 이러한 미충진이 관찰되지 않았다. 또한, 소재의 직경이 플랜지의 직경보다 작은 경우에는 접힘(folding)에 의한 결함이 실험에서는 나타나지만 해석에서는 소재의 직경이 ϕ 31.0 mm 인 경우에만 Fig. 12에서와 같이 접힘이 나타났다. 이것은 실험과 이론해석에 있어 형상의 차이로 생각된다. 즉, 실제 제품은 치형이 있는 비축대칭 3차원 형상으로서 치형에 의한 마찰의 영향이 크지만 해석에서는 이것을 축대칭 형상으로 가정함에 따른 마찰의 영향이 실제 보다 작아서 발생한 차이로 생각된다.



(a) R/H = 75 % (b) R/H = 100 %

Fig. 11 Distributions of calculated values of ϕ 33.0 mm billet diameter



(a) R/H = 75 % (b) R/H = 100 %

Fig. 12 Distributions of calculated values of ϕ 31.0 mm billet diameter

소재의 직경이 ϕ 31.0 mm 인 경우는 해석에서 내부의 연성과괴치가 앞의 어느 경우보다 상당히 감소하였지만 플랜지 외주부에서 접힘 결함이 발생하였다. 접힘에 의한 결함은 유성기어를 사용할 경우 플랜지를 기계 가공하므로 접힘의 길이가 너무 길지 않으면 문제가 되지 않을 것이라 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 합금강을 이용하여 양쪽에 잇수가 다른 기어가 있는 유성기어를 전·후방 복합압출로써 성형할 경우 발생하는 결함을 방지하기 위해 실험과 이론해석을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 3차원 형상을 2차원 단순화하여 결함발생을 예측하였고, 이는 실제 단조 공정 및 금형 설계에 적용 가능함을 알 수 있었다. 하지만, 실험과 해석에서 미충진 부위 및 플랜지부 외각의 접힘에 있어 약간의 차이가 발생하였다.
2. 전·후방 복합압출로써 유성기어를 성형할 경우 금형의 경사각은 결함발생의 방지에 큰 영향을 주지 못한다.
3. 유성기어의 플랜지 두께가 클수록 또, 접힘이 발생하지 않는 한 소재의 직경이 작을수록 내부로 유동하는 소재의 량이 감소하여 결함 발생이 억제되었다.

참고문헌

1. Batra RC, Nechitailo NV, "Analysis of Failure Modes in Impulsively Loaded Pre-notched Plates,"

- Int. J. of Plasticity, Vol. 13, No. 4, pp. 291 ~ 308, 1997.
2. T. Okamoto, I. Fukuda and H. Hagita, "Material Fracture in Cold Forging - Systematic Classification of Working Methods and Types of Cracking in Cold Forging," Source Book on Cold Forging, ASTM, pp. 216 ~ 226, 1997.
 3. A. S. Wifi, A. Abdel-Hamid, N. El-Abbasi, "Computer-aided Evaluation of Workability in Bulk Forming Processes," J. of Mat. Proc. Tech., No. 77, pp. 285 ~ 293, 1998.
 4. C. E. Pearson and R. N. Parkins, "The Extrusion Metals," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1960.
 5. S. I. Oh, W. T. Wu, J. P. Tang and A. Vedhanayagam, "Capabilities and Applications of FEM code DEFORM : The Perspectives of the developer," J. of Mater. Process. Tech., Vol. 27, pp. 25 ~ 42, 1991.
 6. "DEFORM User's Manual V 6.0," Scientific Forming Technology Corporation, 1998.
 7. M. Oyane, T. Sato and K. Okimoto, "Criteria for Ductile Fracture and Their Applications," J. of Mechanical Working Technology, Vol. 4, pp. 65 ~ 81, 1980.
 8. Yang-Tai Lin, Jang-Ping Wang, "An Investigation into the Constant Friction with the Upper-Bound Flow Function Elemental Technique," J. of Material Processing Technology, Vol. 36, pp. 55 ~ 68, 1992.
 9. K. Osakada, M. Shiraishi, S. Muraki and M. Tokuoka, "Measurement of Flow Stress by the Ring Compression Test," Int. J. of JSME Series A, Vol. 34, No. 3, pp. 312 ~ 318, 1991.