3차원 유한요소법을 이용한 Inner Sleeve의 정밀냉간단조 공정설계 및 성형해석에 관한 연구

Study on Precision Cold Forming Process Design and Forming Analysis of Inner Sleeve Using 3D finite Element Method

*#손재환[1], 배대원[2], 박철우[1], 이호영[1], 서호권[3], 서창민[3]
*#J. H. Son(sjhwan@dmi.re.kr)[1], D. W. Bae[2], C. W. Park[1], H. Y. Lee[1], H. K. Seo[3], C. M. Seo[3]
[1]대구기계부품연구원, [2]영진전문대학 컴퓨터응용기계계열, [3](주)신도하이텍

Key words : precision cold forming and 3D FEM, DEFORM3D

1. 서론

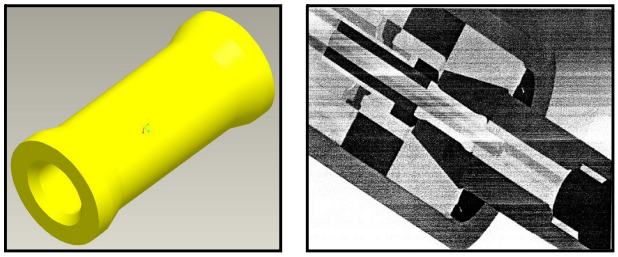
자동차용 Engine Mount Module 부품인 Inner sleeve는 고무와 흡착하여 엔진으로부터 발생하는 진동과 충격을 흡수하여 감쇠시키는 역할을 수행한다. 일반적으로 Inner Sleeve는 단부의 형상이 대칭적이고 볼록한 형상으로 인하여 CNC 공작기계를 이용한 절삭가공방식으로 생산되고 있으며, 제조공정이 복잡하여 사이클타임(cycle time)이 과다하게 소요되고, 원재료의 낭비가 심한 절삭공정이다.

본 연구에서는 다단-포머방식의 Parts Former 설비에서 기존의 복잡한 절삭공정을 냉간단조로 대체하여 완제품을 생산할 수 있도록 하였다. 다단-포머방식을 적용한 Inner sleeve는 Fig.1에서 보는 바와 같이 전단을 필요로 하는 내경전단공정과 상하대칭구조의 볼록한 단부위로 인하여 다축의 성형공정이 요구된다.

자동화냉간단조시스템 설비인 Parts Former를 이용한 단조공정은 5~6단계로 이루어지고, 정밀한 단조품을 생산하기 위해서는 금형설계 및 공정기술, 단조설비의 정밀도, 윤활기술, 성형기술, 열처리기술 등과 같이 관련기술의 종합적이고 일괄적인 기술개발이 이루어져야 한다.[1)]

따라서 완전밀폐단조공정(full enclosed die forging)[5)]을 이용하여 원하는 형상을 정밀하게 완성하기 위해서 각 공정별 성형하중, 단면감소율과 유동응력(flow stress)의 분포가 적절하게 이루어지도록 해야 한다. 이러한 단조공정에서의 성형예측을 위하여 3차원 유한요소해석 기법이 널리 적용되고 있으며, 다양한 단조공정에 대한 성형을 예측하려는 노력들이 수행되어져 왔다.

본 연구에서는 3차원 유한요소법을 이용하여 성형해석을 수행하고 이를 바탕으로 Inner Sleeve의 정밀냉간단조공정에 적용하고자 한다.



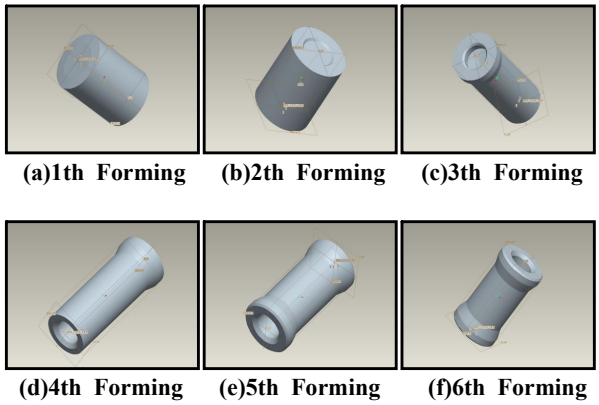
(a)Inner Sleeve (b)Split die

Fig. 1 Inner sleeve and split die

2. 3차원 Inner Sleeve 정밀냉간단조 유한요소해석

정밀냉간단조를 수행하기 위하여 밀폐단조방식의 다단-포머공정으로 이루어지도록 하며, 각 공정별 금형을 설계하여 적용하고자 하였다. 특히 밀폐단조공정설계에서 급격한 형상변경은 소성하중을 급격히 증가시켜 금형의 조기마모 및 파손을 초래하므로, 장비의 성형압력과 금형수명 등을 고려하여 적절한 공정분할이 이루어져야 한다.

소재의 기계적 특성을 고려하여 소성유동이 원활히 일어나도록 제어할 필요가 있으며, 이러한 공정을 설계하기 위하여 3차원 유한요소해석 소프트웨어를 사용하여 공정을 설계하였다. 단조공정설계는 냉간단조 공정을 바탕으로 수행하였고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 Fig.2와 같이 공정별 포밍(forming) 형상을 결정하였다.



(a)1th Forming (b)2th Forming (c)3th Forming

(d)4th Forming (e)5th Forming (f)6th Forming

Fig. 2 Cold forging process of a inner sleeve

금속재료의 소성가공시 발생하는 변형률은 매우 크기 때문에 소성가공문제 해석에서 탄성변형률을 무시하여 소재를 강소성(rigid-plastic)으로 가정하였으며, 사용 소프트웨어에서 적용한 한계변형율(limiting strain rate)과 평균변형율(average strain rate)은 식(1), (2)와 같이 표현된다.[2)]

$$\dot{\varepsilon}_{ij}=\frac{3}{2}\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}_0}{\bar{\sigma}_0}\sigma'_{ij} \qquad (1)$$

$$\dot{\bar{\varepsilon}}_{ij}=\frac{V}{h} \qquad (2)$$

여기서, $\dot{\varepsilon}_{ij}$는 변형률속도이고, σ'_{ij}는 편차응력성분, $\bar{\sigma}_0$는 유효응력, $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$는 유효변형률속도이며, V는 상부 다이의 초기속도이고, h는 시편의 높이이다.

본 연구에서는 Inner Sleeve의 단조공정해석에 강소성 유한요소(rigid-plastic)해석 소프트웨어인 DEFORM-3D를 사용하였으며, 한계변형율이 평균변형율속도의 0.1~1.0%가 되도록 시뮬레이션 하였다.[3)] 해석을 위하여 3D CAD 프로그램인 Pro Engineering을 이용하여 제품과 금형을 모델링 하였고, 모델링 한 결과를 3차원 요소분할하여 Universal file로 변환하였으며, DEFORM-3D로 읽어 들인 후 해석에 적합한 요소분할을 다시 수행하였다.

성형해석 시 DEFORM-3D에서 사용한 조건은 다음과 같다. 첫째로 금형의 속도는 공정과 상관없이 일정하게 적용하였으며, 둘째로 상형다이와 소재, 하부다이와 소재에 대한 마찰조건은 냉간강소재일 때와 동일하게 주어졌고, 셋째로 상하부 다이는 강체로 설정하였다. 생산현장에서는 성형 시 윤활제를 사용하고

있으며, 소재와 상하부다이의 마찰은 전단응력마찰(constant shear stress friction)로 설정하여 마찰계수는 $m=0.12$로 선택하였다. 시뮬레이션에 사용한 소재의 재질은 아래의 Table 1과 같다.

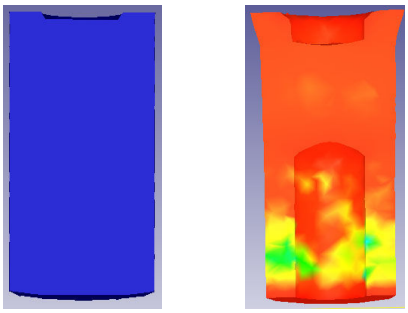
Table 1 Workpiece material

Material	C	S	Si	P	Mn
SWRCH 10A	0.089	0.007	0.068	0.018	0.444

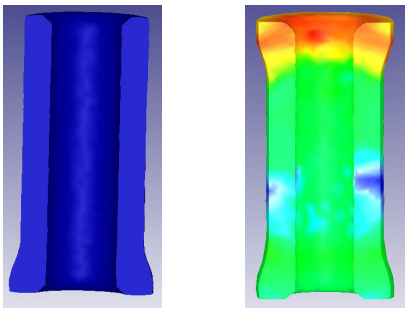
3. 시뮬레이션 및 고찰

3.1 Inner Sleeve의 성형공정

적용 소재인 강선재의 초기전단치수는 완성품의 체적을 고려하여 전단하였고, 이를 이용하여 1차 성형공정에서 5차 성형공정까지 시뮬레이션 하였다. Fig.3은 각 공정별 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.



(a)3th forming

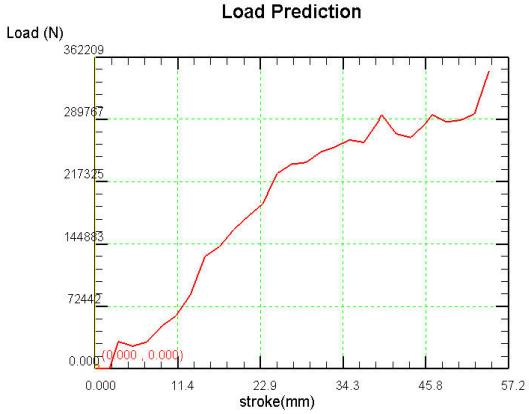


(b)5th forming

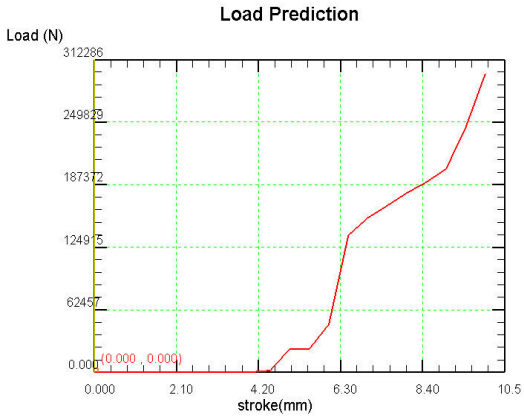
Fig. 3 Deforming patterns estimated from the 3D FE simulation

3.2 단조하중

Inner Sleeve의 공정별 단조성형해석 시뮬레이션을 통하여 예측한 성형하중을 Fig.4에 나타내었다.



(a)3th forming



(b)5th forming

Fig. 4 Forging loads estimated from FE simulation

특히 각 성형공정에서 보는 바와 같이 성형하중은 초기에는 서서히 증가하다가 성형완료시점에서 급격히 증가하는 것을 나타내고 있으며, 이는 단조완료시 소재가 금형과 완전히 밀착되는 밀폐효과를 보여주고 있는 것으로 판단된다.[4-5] 3차 성형공정에서 단조하중이 증가하였다가 감소하며, 다시 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 소재의 금형의 끼워맞춤 효과에 의한 마찰력 증감의 영향으로 판단된다. 따라서 중간공정의 금형설계 시 소재와의 치수차를 크게 하여 마찰력 발생을 방지할 필요가 있다. 또한 성형해석 시뮬레이션에서 예측된 각 공정의 성형하중은 30~100톤 범위에 속하여 현재 적용중인 다단 성형기를 이용함에 있어 적절한 성형하중의 분배로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차용 Engine Mount Module 부품인 Inner sleeve의 다단-성형기를 이용한 정밀냉간단조 공정설계를 위해 강소성유한요소법을 이용하여 단조공정을 해석하였고, 각 공정에서 Inner Sleeve의 성형과정과 단조하중 등을 시뮬레이션 하여 적절한 성형하중과 소재의 형상, 금형의 설계가 되도록 제안하였다.

단조공정은 6단계로 나누어 성형하도록 하였고 제안된 금형형상의 타당성을 확인하였으며, 이를 바탕으로 생산현장에서 신속한 공정설계를 적용할 수 있는 성형해석 기법을 마련하였다.

후기

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2006년도 중소기업기술혁신개발사업(일반과제)에 의해 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. N. R. Chitkara and Y. J. Kim, "Near-net shape Forging of a Crown Gear: Some Experimental Results and an Analysis", Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 41, No. 3, pp.325-346, 2001.
2. 김영석, 소성역학, 시그마프레스, 2003.
3. R. D. Cook, Concepts and Applications of Finite Element Analysis , 3rd Ed. John Wiley & Sons, New York, 1989.
4. 송종호, 김수영, 임용택, "3차원 유한요소법을 적용한 냉간단조 기어성형해석 및 설계", 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp.108-111, 2002.
5. 김용조, 박성대, "베벨기어의 밀폐단조 공정설계를 위한 유한요소해석", 한국기계가공학회지, Vol. 2, No. 1, pp.92-99, 2003.