

자동차용 일체형 유니버설 샤프트 조인트의 냉간단조 공정 유한요소해석

권혁홍*, 송승은⁺, 김오승⁺⁺

(논문접수일 2011. 05. 03, 수정일 2011. 07. 21, 심사완료일 2011. 08. 02)

Finite Element Analysis on the Cold Forging Process of the Unified Universal Shaft Joint for the Automobile

Hyuk-Hong Kwon*, Seung-Eun Song⁺, Oh-Seung Kim⁺⁺

Abstract

This study was aimed at the design of the dies for the unified shaft joint using the computer simulation to shorten the period of production, on the basis of the process planning which was designed by the field experts. In the computer simulation, 'Deform-3d' and 'Eesy-DieOpt' have been used, which are the commercial process analysis and die design program. Through the process analysis, we could know the propriety of the forming process, the inner pressure of the die and the suitable fitting pressure between the insert and the sleeve which was not showing any positive tangential stresses in the insert. Through the simulation of die design, we could know the number of the stress ring, the diameter ratios, the stresses of the die, the shrink fitting tolerance and temperature in the condition of the already determined maximum outer die diameter of the multi-stage former. The validity of the die design using the computer simulation was analyzed by the experiments and the results were satisfactory. As the results of this study, the new and easy die design system for multi-forging has been developed.

Key Words : Unified Shaft Joint(일체형 샤프트 조인트), Cold Forging(냉간 단조), Die Design(금형설계), Forging Process Finite Element Analysis(단조공정 유한요소해석)

1. 서론

인텀 샤프트(intermediate shaft)는 유니버설 조인트(universal joint)와 스티어링 칼럼과 조향기어 박스에 동력을 전달하기 위해 연결되는 핀치요크(pinch yoke)로 구성되며 본 연구에서 다루고자 하는 유니버설 조인트는 Fig. 1와 같이 샤프트 조인트

와 파이프 조인트로 구성되어 있다. 기존 유니버설 조인트의 가공공정은 단조 공정에 의하여 성형되는 샤프트부와 프레스에 의해 성형되는 Yoke부를 절상공정과 용접공정을 통해 일체화하는 것이 일반적이다.

Fig. 2와 같이 기존의 인텀샤프트를 만드는데 용접 가공은 가공이 용이하다는 장점이 있으나 단시간에 국부적으로 고열

* 대진대학교 뿌리산업연구센터, 컴퓨터응용기계설계공학과 (hhkwon@daejin.ac.kr)

주소: 487-711 경기도 포천시 호국로 1007번지

+ 대진대학교 대학원 기계설계공학과

++ (주)드림텍

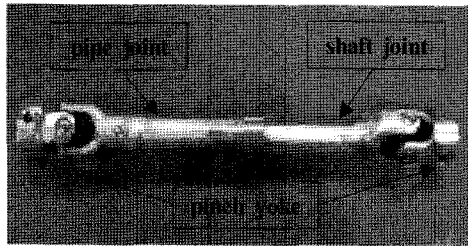


Fig. 1 Components of Intermediate Shaft

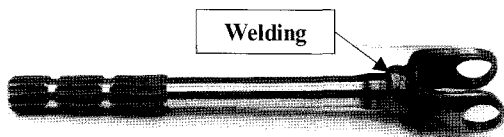


Fig. 2 Welded of Intermediate Shaft

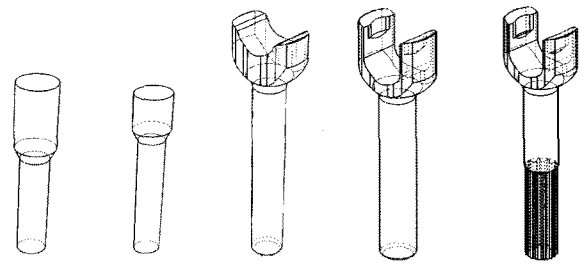
을 가해 재료를 접합하므로 요크부와 샤프트와 파이프부 접합부에 고열에 의한 가공부 재질 변화에 의한 국부적인 물성 변화가 발생하고, 용접균열 수축 변형 및 잔류 응력을 발생시키는 단점을 내포하고 있고 자동차 부품으로서의 조향력 전달불량, 진동에 의한 용접부위 파손 등 잠재적사고 위험성을 가지고 있어 품질 신뢰성을 하락시키는 요인이 되고 있다.

본 연구는 요크부와 샤프트부가 단조공정에 의해 일체형으로 구성되는 일체형 샤프트 조인트 개발에 목적을 둔다. 냉간단조 성형법은 설비 및 금형의 성형능력의 한계를 적절히 이용하여 재료의 기계적 성질을 향상시킬 수 있으며, 소재의 손실을 줄이고, 고도의 성형성과 고강도가 요구되는 제품을 저렴한 비용으로 대량 생산 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, 치수의 정밀도를 높일 수 있으며, 표면의 상태를 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 냉간단조 성형법은 금형의 파손 및 마모, 응력집중에 의한 국부적인 변형이 생기기 쉽고, 공구 및 금형수명의 제한을 크게 받으며, 강성이 높은 고가의 금형재의 사용 및 정밀가공에 의해 제품생산 비용이 높아질 수 있다. 이에 관하여 단조설계검증 단계에서 CATIA와 Deform-3D⁽¹⁻²⁾를 통한 공정해석으로 타당성을 검토하고 새로운 공정 제시와 실제 금형을 제작 실험하여 공법의 유효성을 검증하였다. 따라서 본 연구를 통하여 자동차 부품의 고강성과 경량화 및 신뢰성, 제품원가의 경쟁력을 꾀할 수 있을 것이다.

2. 단조 공정설계

2.1 샤프트 조인트의 조향부품 설계

현장 금형전문가와 함께 성형공정 설계된 바와 같이 각 공정 설계 단계내의 성형공정해석을 통하여 성형공정설계의 유용성 및 타당성을 검토 하였다. 따라서 Fig. 3과 같은 일체형 샤프트 조인트의 단조 성형 공정 설계를 수행하였다. 소재를 제조하려



#1 process	#2 process	#3 process	#4 process	#5 process
forward extrusion	forward extrusion	upsetting	backward extrusion	serration extrusion

Fig. 3 Forming Design for The yoke of Unified Shaft joint

는 샤프트 조인트의 길이 및 체적과 압축 비율을 감안하여 단조로 절단 하고, 샤프트가 성형될 로드부와 요크부로 성형될 부분을 개략적으로 나누어서 ①업세팅 및 샤프트부 1차 압출 성형 공정과 ②요크부 성형될 두부를 업세팅 및 샤프트부 2차 압출 성형공정, ③요크부를 일정 깊이의 이형의 홈을 형성하는 요크부 예비 성형 공정, ④요크부를 후방압출하며 샤프트부 치수를 보강하는 성형 공정, ⑤샤프트부의 기어를 압출로 성형하는 공정의 5공정으로 설계하였다⁽⁴⁻⁹⁾. 성형된 샤프트조인트는 요크부와 샤프트부가 일체형으로 이루어지면서 요크부는 양측이 이형으로 대칭이 되는 구조를 갖게 된다.

3. 유한요소해석

3.1 샤프트 조인트의 성형공정해석

샤프트 조인트의 성형공정해석을 위해서 냉간단조 소재의 기계적 성질을 응력-변형률의 관계식(stress-strain relation)을 통해 구하였다. 시험에 사용된 소재의 유동 응력 및 물성치를 알기 위해서 단순압축시험을 하였다.

압축시험에 사용된 시편의 재질은 성형해석 시험에 사용된 재질은 동일한 SWRCH10A이며 크기는 $\phi 14.9\text{mm} \times 15.6\text{mm}$ 로 선반가공을 통하여 제작하였다.

재료의 소성 변형 응력은 다음과 같이 변형시의 외부조건들의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\bar{\sigma} = f(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \quad (1)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 변형률, $\dot{\bar{\epsilon}}$ 은 변형률 속도, 그리고 T 는 변형온도를 의미한다.

압축시험은 프레스의 램 속도를 실험 전 구간에 걸쳐 2mm/sec로 설정하였고, 실온(20°C)에서 실험을 수행하여 온도변화는 무시하였다. 따라서 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\sigma} = f(\bar{\epsilon}) \quad (2)$$

압축시험은 시편의 직경 및 높이의 변화와 하중 상태의 관계를 보는 것으로 이에 의하여 유동 응력과 변형률의 관계식을 구할 수 있다.

$$\bar{\epsilon} = \ln \frac{h_0}{h} = \ln \frac{A}{A_0} \quad (3)$$

$$A = A_0 e^{\bar{\epsilon}} \quad (4)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{L}{A} = \frac{L}{A_0 e^{\bar{\epsilon}}} \quad (5)$$

여기서, L 은 압축하중, h 는 시편의 높이, A 는 시편의 단면적, A_0 는 시편의 초기 단면적, h_0 는 시편의 초기 높이이다.

이와 같은 방법으로 계산된 결과에 대해서 최소오차자승법을 이용하여 다음과 같이 응력-변형률의 관계식(stress-strain relation)을 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 60.146 \bar{\epsilon}^{0.083} \quad [MPa] \quad (6)$$

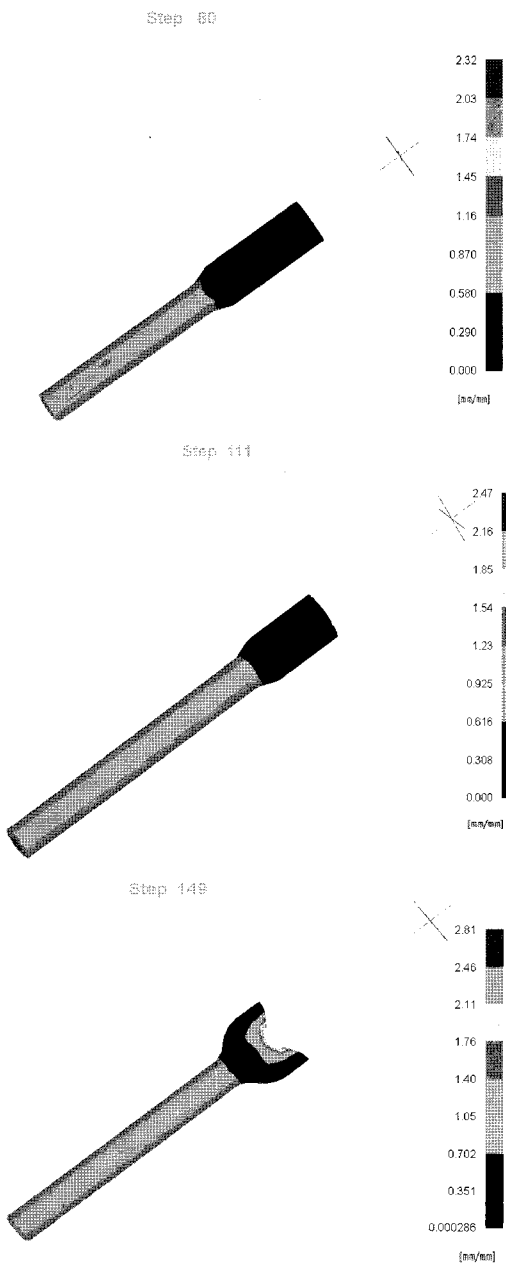


Fig. 4 Effective strain of the #1~#3 process

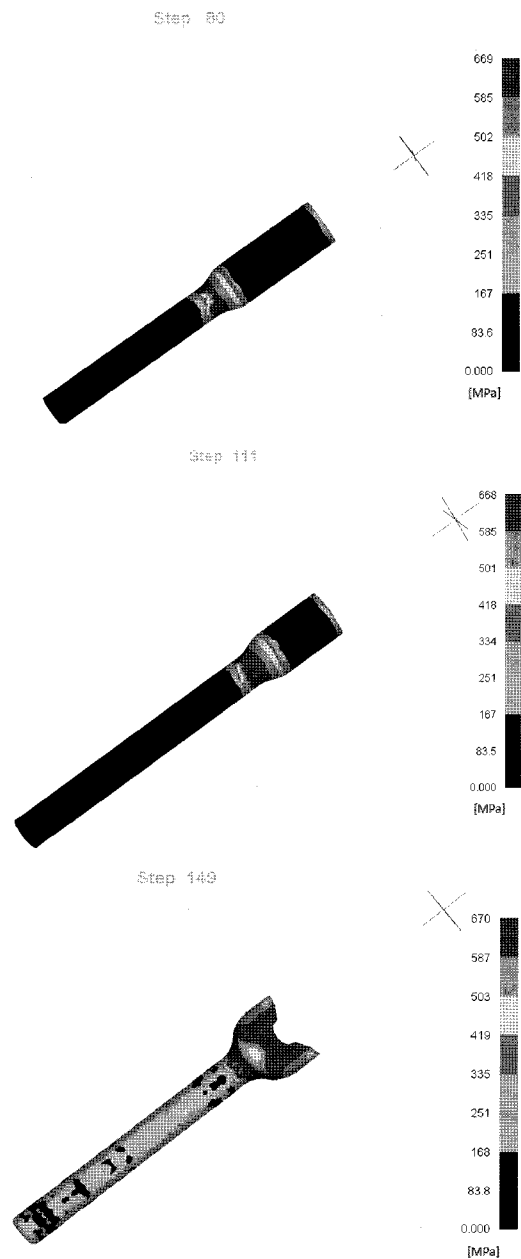


Fig. 5 Effective stress of the #1~#3 process

Table 1 Forming analysis results for the shaft joint

Process	Effective-stress[MPa]	Effective-strain[mm/mm]	Load×10 ⁵ [N]	Tons
#1	669	1.45	1.26	12.8
#2	668	1.23	1.25	12.7
#3	670	2.81	1.56	15.9
#4	698	4.24	2.82	28.7
#5	759	5.53	1.64	16.7

Fig. 5 과 같이 SWRCH10A 소재는 식 (6)의 응력-변형률관계식을 사용하여 5공정 단계로 성형공정해석을 수행하였으며, 마찰상수의 값은 $m=0.05$ 로 적용하여 수행하였다.

샤프트조인트 성형공정해석의 5단계 공정에서 유효 응력, 변형률 및 하중을 정리하면 Table 1과 같다.

각 공정에서의 유효응력의 경우 변형속도와 온도, 유효 변형률 관계에 따른 각각의 항복응력 한계치 미만인 경우에 재료가 파손되지 않기 때문에 이를 고려하면서 성형 가능성을 검토하였다.

이들 공정 중 Fig. 6번과 같이 4번 공정에서 유효응력이 698MPa, 유효 변형률 4.24mm/mm, 하중은 2.82×10^5 [N]의 결과치를 보였으며 유효응력치가 공정품 전반에 걸쳐서 분포 되

는 것을 알 수 있었다. 이는 5번 공정품의 기어 정밀도를 높이는 샤프트부 치수 보간과 이형 축대칭 요크부의 후방압출이 전체 공정 중 유효응력의 분포와 하중이 높게 나오는 요인임을 알 수 있었다. Fig. 8과 같이 5번 공정에서는 유효응력이 759MPa, 유효변형률이 5.53mm/mm, 하중 1.64×10^5 [N]로 측정되었는데, 이는 단조 공정품의 샤프트부 기어 성형 시 극심한 변형률 때문인 것으로 판단된다. 즉, 성형해석을 통해 냉간단조 성형 시 4번, 5번 공정이 금형의 수명과 단조품의 품질을 결정 짓는 요소라 할 수 있다.

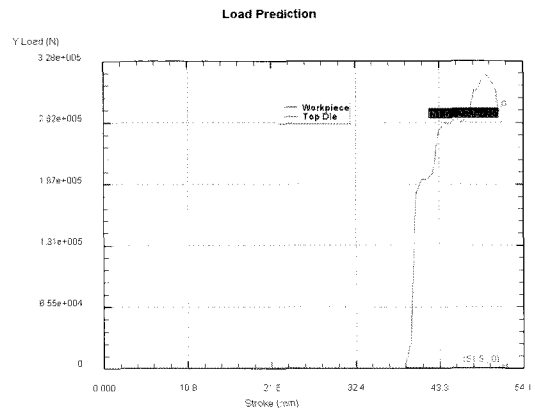


Fig. 7 Load-stroke curve of the #4 process

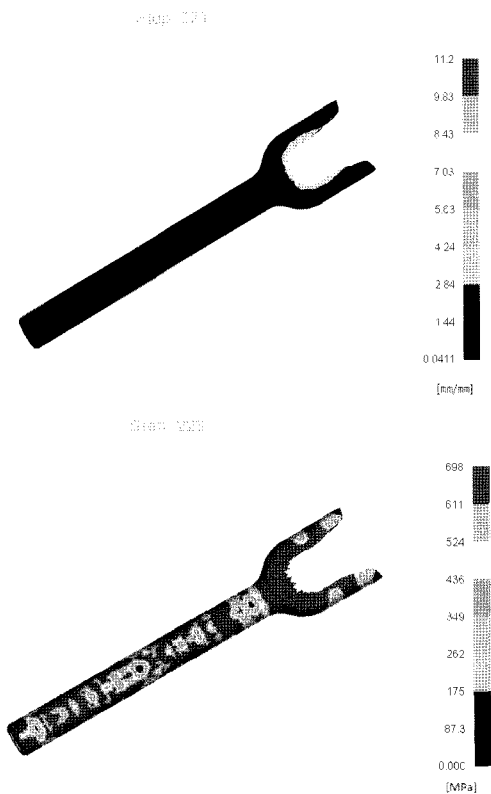


Fig. 6 Effective stress and strain of the #4 process

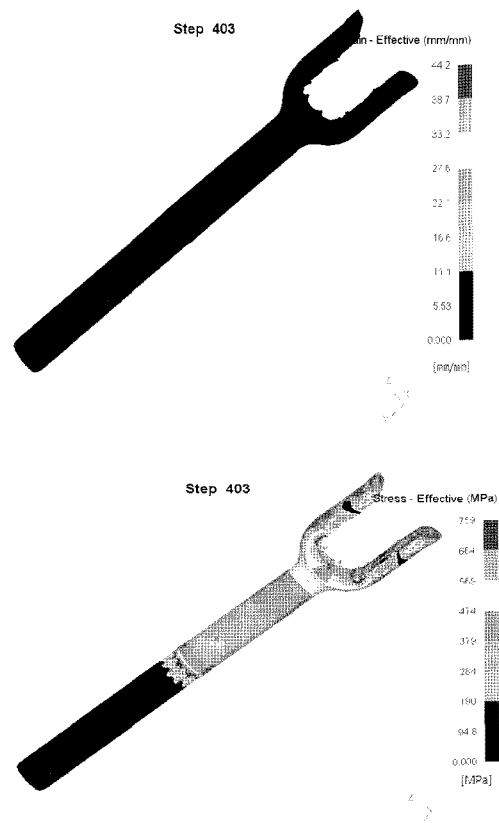


Fig. 8 Effective stress and strain of the #5 process

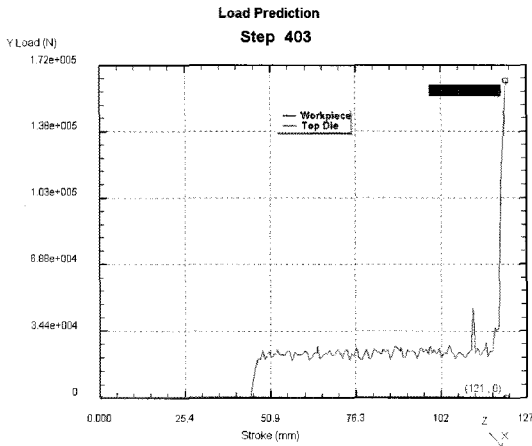


Fig. 9 Load-stroke curve of the #5 process

이와 더불어 공정의 성형하중 능력이 성형기의 용량 범위 내에 있는지 확인해 보았다. 각 공정별 최대성형하중은 각각 12.8톤, 12.7톤, 15.9톤, 28.7톤, 16.7톤 정도로 성형공정 수 5공정의 각 공정별 성형하중은 다단 성형기의 성형하중 600톤 이내에 있으며 충분히 안전함을 확인할 수 있다. 설계된 공정은 소재의 성형 한계치와 다단 성형기의 성형능력을 고려하였을 때 공정이 적절하게 설계되었음을 판단할 수 있다.

3.2 샤프트 조인트의 다단조 금형설계

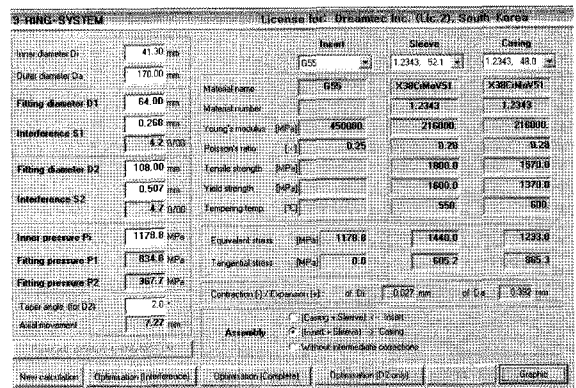
3.2.1 금형설계

앞선 성형 공정 해석을 통해 샤프트 조인트의 다단조 금형설계를 위한 금형해석을 수행하였다. 여기서 단조 공정품의 요크부 및 샤프트부 치수보간 성형공정의 금형설계를 검증하기 위해 Eesy-2-form의 Eesy-DieOpt⁽³⁾를 활용하여 금형설계를 수행하였다.

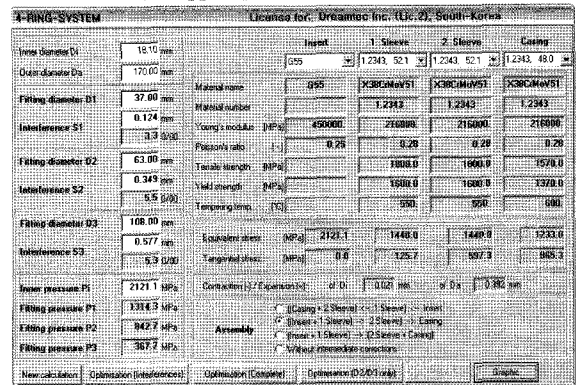
이중 5번 공정에 대한 금형설계 한 부분을 집중 검토하였다. 5번 공정에서 기어 성형시 금형의 샤프트부 압출 베어링에 국부적으로 약 759MPa의 응력치를 받으므로 초경 G55은 요크부, 목부, 로드부로 분할하고 각 분할 초경은 접선방향 응력(tangential stress) 값이 0보다 작아야 한다. 성형 시에 부하 받는 유효응력을 근거로 해서 금형설계 프로그램인 Eesy-DieOpt를 이용하여 금형설계한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

분할다이 중간 부분은 4-ring시스템으로 하였을 경우에 1314.3MPa의 이상의 예압이 생성되었으며, 인서트의 외경은 Ø37mm, 제1 보강링의 외경은 Ø63mm, 제2 보강링의 외경은 Ø108mm, 끼워맞춤공차를 각각 0.124, 0.349, 0.577mm로 한 결과 접선방향으로의 응력치가 0보다 작게 나타났다. 보강링의 재질은 STD 61(HrC 52.1)이며 케이스의 재질은 STD61 (HrC 48.0)으로 하였다. 조립순서는 인서트와 보강링을 먼저 조립한 후 여기에 다시 보강링을 씌워서 케이스에 조립하는 것으로 하

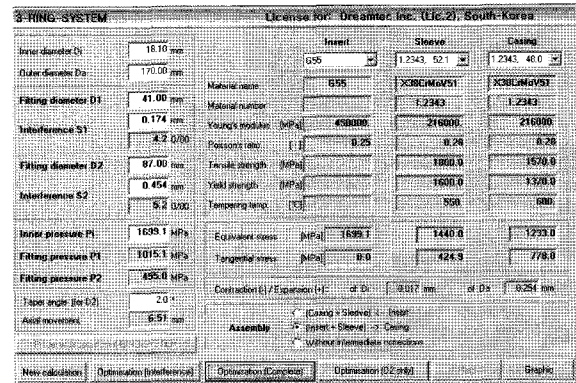
였다. 분할다이 아래 부분은 윗 부분과 마찬가지로 3-ring시스템으로 인서트의 외경은 Ø41mm, 보강링의 외경은 Ø87mm, 끼워맞춤공차를 각각 0.174, 0.454mm한 결과 충분히 예압력을 견디는 것으로 판단되었다. 분할금형들의 응력분포도를 Fig. 11에 나타내었으며, 나타난 분할금형의 윗부분, 중간부분, 아래부분의 인서트, 제1 및 2보강링의 슬리브와 케이스의 상당응력과 원주방향응력 모두 사용된 재질의 성형조건 한계 범위 내에 있음을 알 수 있었다. 이러한 해석내용을 근거로 하여 금형설계를 실시하였으며 5번 공정에 대한 금형 설계도면 Fig. 12와 단조금형 공정도를 Fig. 13에 나타내었다.



(a) upper part of the split dies

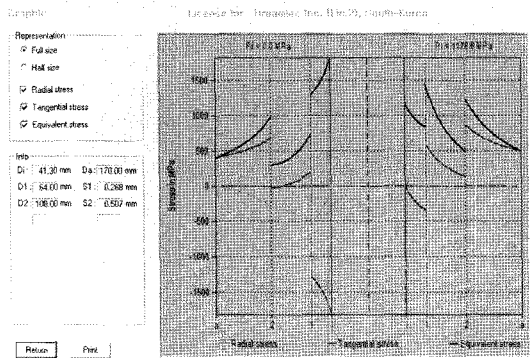


(b) middle part of the split dies

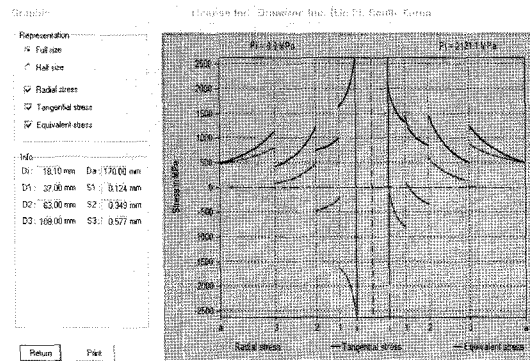


(c) lower part of the split dies

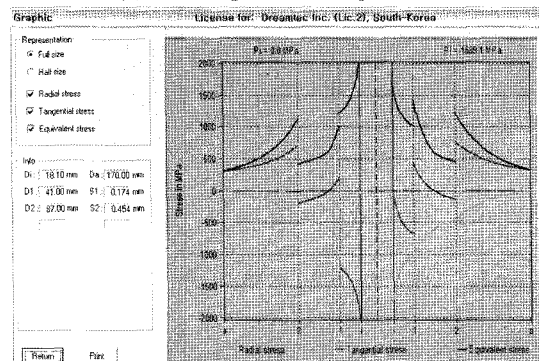
Fig. 10 Die design for the #5 process



(a) upper part of the split dies



(b) middle part of the split dies



(c) lower part of the split dies

Fig. 11 Distribution of stresses in the insert, sleeve and casing

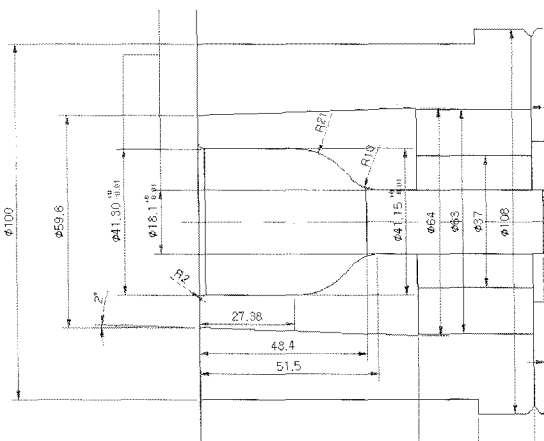


Fig. 12 Drawing of die design for the #5 process

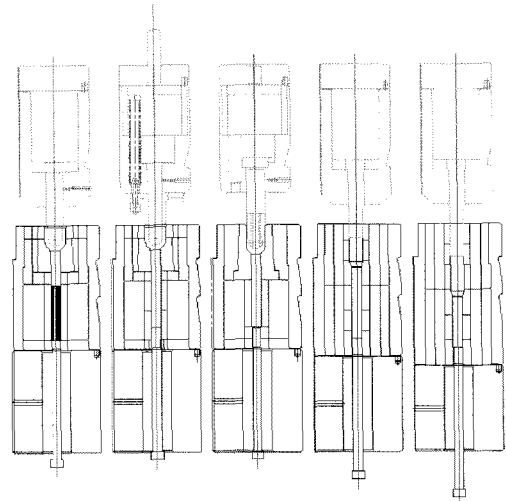


Fig. 13 Drawing of die design for the mold process

3.2.2 샤프트 조인트의 시제품 제작

- ① 원소재를 다단 포머기 압연공급부에서 공급하여 소재를 절단하고 절단된 소재는 샤프트 조인트의 길이 및 체적과 압축되는 비율을 정확히 계산하여 진행한다.
- ② 절단된 소재는 이송장치에 의해 이동되며 다이스와 대응

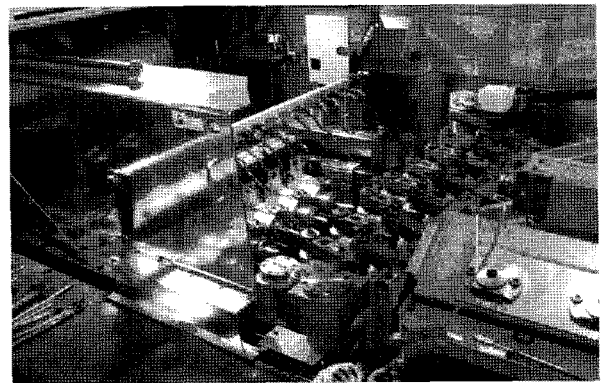
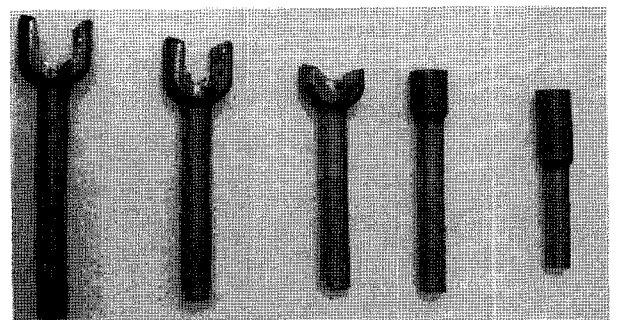


Fig. 14 Photo. of the multi-forging machine(HBPF-670) for the unified shaft joint



#5 process #4 process #3 process #2 process #1 process

Fig. 15 Photo of products produced by the die for each process

되는 방향으로 소재를 샤프트부와 요크부를 일체형으로 성형하는 샤프트 조인트 성형공정을 진행한다.

- ③ 샤프트부와 요크부로 성형될 부분을 샤프트부와 요크부로 개략적으로 나누어서 성형하는 제1공정과 요크부로 성형될 부분을 업세팅으로 두부형상을 예비성형하는 제2공정과 두부형상을 일정 깊이의 홈을 형성하면서 양측으로 벌리는 예비성형하는 제3공정, 요크부형상을 이형으로 대칭이 되게 후방으로 압출하며 샤프트부의 치수를 보간 하는 제4공정, 샤프트부에 기어를 압출하는 제5공정, 샤프트 조인트의 개발 제품은 Fig. 14의 다단포머기에 장착된 금형을 통해서 Fig. 15과 같은 시제품 제작이 가능하였다.

4. 결론

본 연구는 생산현장의 전문가가 경험에 의하여 어떤 형상의 최종제품을 성형하기 위한 각 공정설계 단계에서부터 성형공정해석을 통하여 공정설계의 유용성과 타당성을 검토하고 이를 근거로 금형을 설계하는 손쉬운 방법을 연구하였다. 그리고 이 방법을 통한 금형설계의 적절성을 실제로 금형을 제작하여 생산현장에서 일체형 샤프트 조인트의 시제품 개발을 시도하였다. 이러한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 현장전문가의 경험과 지식을 컴퓨터 시뮬레이션과 접목시켜 성형해석을 통한 공정설계의 타당성을 검토하고, 이를 바탕으로 금형을 설계 제작하였으며, 기존 용접가공공정보다 시간과 비용을 15% 정도 절감할 뿐만 아니라 제품에 대한 사전 품질도 검증 할 수 있는 제조 기반을 마련했다.
- (2) 이 시스템을 적용하여 금형을 제작한 후 실험한 결과 양호한 제품이 생산되었으며, 실제로 생산현장에 적용하여 금형파손 없이 샤프트 조인트의 대량생산의 기반이 마련되었다. 따라서 공학적 지식이 많지 않은 현장전문가도 손쉽게 이용할 수 있는, 상용 성형해석 및 금형설계 프로그램을 적용한 새로운 형태의 금형설계 방법을 개발하였다.

참고 문헌

- (1) CATIA, V5 R17, *CATIA Document*, Dassault Systemes Inc.
- (2) Deform-3D, 2010, *Deform-3D Tutorial*, SFTC Inc.
- (3) Eesy-2-form Vers. 4.20, *Eesy-DieOpt Document*, CPM Inc.
- (4) Kwon, H. H., Moon, K. J., and Song, S. E., 2010, "Forging Process Analysis of the Multi-forging Die for the Unified Universal Pipe Joint of the Intermediate Shaft", *J. of the KSMTE.*, Vol. 19, No. 1, pp. 33~41.
- (5) Kwon, H. H., and Lee, B. K., 2005, "Process Analysis and Die Design for the Automobile Part Development by the Precise Cold Forging", *Proc. of the KSMTE autumn conf.*, pp. 109~114.
- (6) Kwon, H. H., Lee, B. K., and Cho, H. Y., 2002, "A Study on the Automated Process Planning System for Cold Forging of Non-axisymmetric Parts using FVM Simulation", *J. of Material Processing Technology* Vol. 130~131, pp. 524~531.
- (7) Kwon, H. H., and Lee, B. K., 2005, "Development of the Automobile Part for the Engine Oil Leakage Prevention by the Precise Cold Forging", *J. of the KSTP*, Vol. 14, No. 8, pp. 675~680.
- (8) Lee, S. D., and Byon, S. K., 2005, "Design of the Radial Extrusion Process for the General-purpose Flange Using Model Material", *J. of the KSMTE.*, Vol. 17, No. 2, pp. 114~120.
- (9) Kwon, H. H., Lee, W. B., and Lee, S. J., 2004, "Development of Shaft Spur Gear for Start Motor using Cold Forging" *J. of KASBIR.*, Vol.4, No.4, pp. 103~108.