

# 연료 압력 조절기용 가이드 밸브의 냉간 단조 개발에 관한 연구

송승은\*, 권혁홍<sup>+</sup>

(논문접수일 2011. 10. 19, 수정일 2011. 12. 21, 심사완료일 2012. 01. 11)

## A Study on the Cold Forging Development of Guide Valve for the Fuel Pressure Regulator

Seung-Eun Song\*, Hyuk-Hong Kwon<sup>+</sup>

### Abstract

This study was aimed at the design of the dies for the guide valve for the fuel pressure regulator 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** : Guide valve(가이드 밸브), Cold forging(냉간 단조), Die design(금형설계), Forging process analysis(단조공정해석)

## 1. 서론

연료 압력 조절기(fuel pressure regulator)는 Fig. 1과 같이 연료 챔버와 스프링 챔버로 구성되며 연료 시스템에서 연료 탱크에 설치되는 탱크 단위의 일부이다. 연료 시스템에서 연료 압력 조절기의 필수적인 목적은 모든 엔진 부하 조건 하의 매니폴드 진공에 시스템의 설정 연료 압력을 제어하여 일정한 차등의 연료 압력을 유지하는 기능을 가지고 있다. 작동 방식은 연료 유입구를 통해 연료가 주입되어 격막과 스프링력을 초과하

는 압력이 가해지면 밸브가 열리면서 초과 연료를 연료탱크로 되돌려 보내고 내부의 스프링이 약화되어 압력이 감소되면 밸브를 닫아 적절한 연료 압력을 제어 하게 된다. 연료 압력 조절기를 구성하는 부품 밸브의 핵심 부품으로 가이드 밸브(guide valve)의 기존 제작 방식은 가공공정으로 절삭공정을 통해 생산하는 것이 일반적이다. 기존 절삭공정의 피삭재 가공 후의 칩(chip)처리, 공구의 빈번한 교환 주기, 작업 시 안정성 문제와 밸브 플레이트의 볼 안착부 각도로 인해 과다연료 투입, 제품의 Burr나 흠 등으로 다이어프램(diaphragm)이 찢기거나 구멍이

\* 대전대학교 대학원 기계설계공학과

+ 교신저자, 대전대학교 컴퓨터응용기계설계공학과 (hhkwon@daejin.ac.kr)

주소: 경기도 포천시 호국로 1007번지

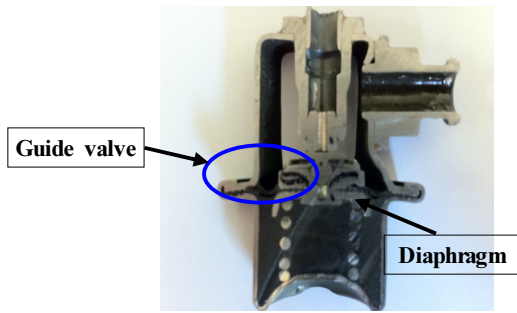


Fig. 1 Guide valve of fuel pressure regulator

뚝려 과다 연료 소비 및 배기가스 과다 배출의 환경 문제 등으로 차량의 인적·물적 피해요소가 함께 증가되어 대외적으로 국내 자동차 부품의 신뢰성이 하락되는 잠재적 문제점을 가지고 있다. 이에 따라 본 연구는 절삭공정을 냉간 단조공정으로 대체하여 후가공이 없는 가이드 밸브를 개발하고자 한다.

소성가공의 한 분류인 냉간 단조성형법은 상온에서 소재에 압축력을 가하여 복잡한 형상의 제품을 만드는 금속성형가공법으로 기존의 기계부품 생산방식의 주를 이루었던 기계가공방식 보다 소재의 비용과 손실을 줄일 수 있고, 고도의 성형성과 강도를 요구하는 제품을 대량으로 생산할 수 있다. 또한, 주조나 기계가공에 비해서 기계적 성질을 향상시킬 수 있으며, 제품 치수의 정밀도를 높일 수 있고, 표면 상태를 향상시킬 수 있다. 따라서 본 연구를 통하여 자동차 부품의 고강성과 경량화 및 신뢰성, 제품원가의 경쟁력을 꾀할 수 있을 것이다.

## 2. 단조 공정설계

냉간 단조에 의한 부품의 성형은 단일 공정으로 이루어지는 것이 아니고 여러 공정의 예비 성형을 거쳐 다단으로 이루어진다. 따라서 냉간 단조공정설계는 여러 가지 가공법 중 원하는 부품을 성형하기 위한 적절한 가공공정과 공정순서를 결정해야 하며 예비형상을 설계하고, 조건을 통해서 가장 경제적인 부품을 생산할 수 있는 방법을 찾아내는 것을 목적으로 하고 있다. 개발하고자 하는 가이드 밸브의 단조도를 바탕으로 체적 일정의 조건에 따라 단조품의 체적을 구하고 소재의 절단 높이를 정하였다. 이때 소재의 양호한 절단을 얻기 위해서 절단 높이/선재경의 절단 비율은 0.5 또는 그 이상이 되게 하여 원소재의 절단은  $\varnothing 6.6 \times 12.5\text{mm}$ 로 정하였다. 단조설계검증 단계에서 Catia V5로 모델링하며 Deform-3D<sup>(1-2)</sup>로 성형공정해석을 통하여 그 타당성을 검토하고 새로운 공정 제시와 실제로 금형을 제작하여 공법의 유효성을 검증하였다.

가이드 밸브 단조품의 성형공정순서를 Fig. 2과 같이 6단 냉간단조 성형공정으로 설계하였다. 절단된 소재를 단조로 ① 전

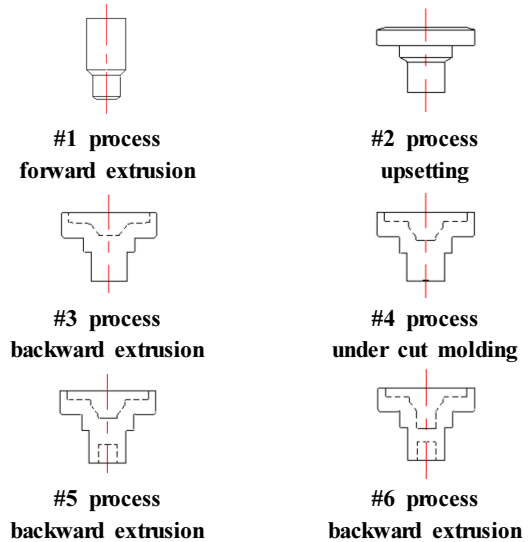


Fig. 2 Metal forming design of the guide valve

방 압출하여 볼 안착부가 성형될 두부와 스프링이 안착될 로드부로 성형될 부분을 개략적으로 나누어서 ② 두부 업셋팅 및 로드부 전방압출공정 ③ 컵부 후방압출 및 볼 안착부 각도 성형공정, ④ 컵부 일정한 깊이의 홈을 형성하며 목 밑 언더컷 형상을 성형하는 공정, ⑤ 로드부 내부에 일정한 깊이의 내경 홈을 형성하는 공정, ⑥ 컵부 볼 안착부에 내경 홈을 연장하는 공정의 6공정으로 설계하여 단조품을 개발하였다.

## 3. 유한요소해석

### 3.1 가이드밸브의 성형공정해석

성형공정해석을 위해서 냉간 단조소재의 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 SWRCH18A이며 크기는  $\varnothing 6.6 \times 12.5\text{mm}$ 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,  $\bar{\epsilon}$ 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 관계식을 구했다.

$$\bar{\sigma} = 156.898 \bar{\epsilon}^{0.105249} \quad [MPa] \quad (6)$$

원기둥의 소재는 Z축을 중심으로 90° 간격으로 서로 대칭이 되는 성질이 있으므로 소재에 대하여 1/4 분할 모델링을 하였으며, 응력-변형률 관계식을 사용하여 단조성형공정해석을 수행하였다. 냉간 단조공정하에 마찰상수 값은  $m=0.05$ 로 적용하여 수행하였다<sup>(3)</sup>.

Table 1 Forming analysis results for the guide valve

Process	Effective-stress [MPa]	Effective-strain [mm/mm]	Load [tons]		
			Top Punch	Bottom Die	
#1	1330	2.73	Top Punch	2.73	5.5
			Bottom Die	2.77	
#2	1310	2.62	Top Punch	6.05	11.99
			Bottom Die	5.94	
#3	1350	4.78	Top Punch	8	16.08
			Bottom Die	8.08	
#4	1360	7.05	Top Punch	6.81	13.68
			Bottom Die	6.87	
#5	1290	8.57	Top Punch	7.35	14.692
			Bottom Die	6.88	
			Die Pin	0.462	
#6	1400	6.43	Top Punch	0.482	0.969
			Bottom Die	0.487	

가이드 밸브 단조성형공정해석의 6단계 공정에서에 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.

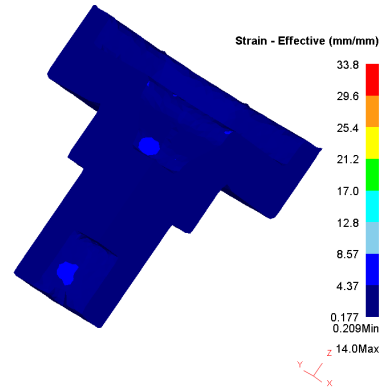


Fig. 3 Effective strain of the #5 process

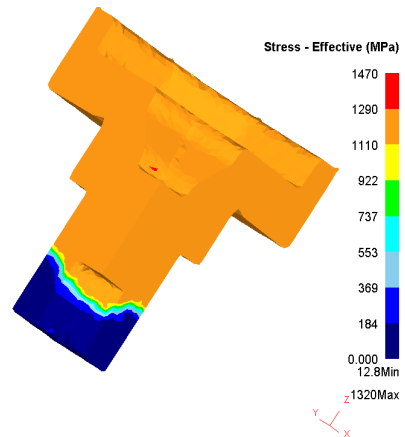


Fig. 4 Effective stress of the #5 process

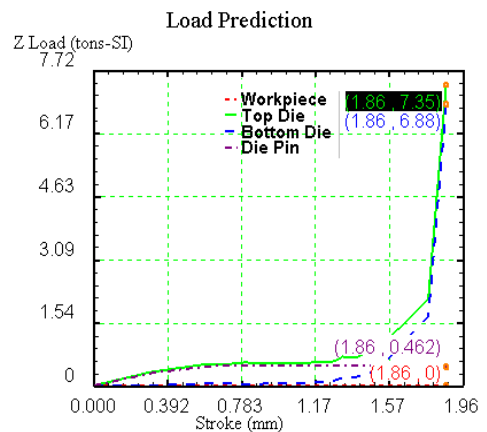


Fig. 5 Load-stroke curve of the #5 process

이들 공정 중 Fig. 3~5과 같이 5번 공정에서 유효응력이 1290MPa, 유효 변형률 8.57mm/mm, 하중은 7.35tons의 결과 값을 보였다. 이는 유효 변형률이 로드부 후방압출공정에서 변형이 국부적으로 집중되어 작용하고 많은 하중이 걸리는 것으로 파악하였다. 이러한 점을 반영하여 금형설계 시 금형의 수명과 단조품의 정밀도를 높이기 위해 유동금형으로 설계 제작하여 성형공정 작업 시 효율적인 변형과 하중을 분배해야 하는 요인으로 볼 수 있었다. 그리고 공정의 성형하중 능력이 성형기의 용량 범위 내에 있는지 확인해 보았다. 각 공정별 최대성형 하중은 각각 5.5, 11.99, 16.08, 13.68, 14.692, 0.969Ton로 성형공정 수 6공정의 각 공정별 성형하중 합은 62.911Ton으로 다만 성형기 HBPf-630의 성형하중 150 Ton 이내에 있으며 충분히 안전함을 확인할 수 있다.

### 3.2 가이드 밸브의 개선금형설계

개발단계에서 가이드 밸브의 시제품을 단조로 시험 삼아 생산 하였다. 초기에 단조품 200개를 제작 한 후 치수평가를 수행한 결과 문제없음을 확인하고, 175,000개를 연속생산 하였으나 4번 공정에 3번 공정품 삽입 시 단조공정품이 들어가지 않는 문제와 Photo 1과 같이 3번 금형의  $\varnothing 6.87$  초입부 코너부위가 파손되는 문제가 발생하였다. 이러한 원인으로 개발금형 3번 금형의 장력량을 감안 하지 않은 금형설계와 금형제작 시 금형 초경 압입 불량으로 추정 하였고 이를 개선하기 위해 3~4중 보강 다이의 금형 설계에 검증을 하기위해 Eesy-2-form의 Eesy-DieOpt<sup>(4)</sup>를 활용하여 금형강도 해석을 수행하였다.

Fig. 6, 7의 3번 공정에 대한 성형공정해석을 검토해 보면 내경 컵부 후방압출 시에 단조품 전반적으로 1180~1350Mpa 응력이 걸리지만 로드부 단에는 국부적으로 높은 응력이 집중되어 금형파손이 발생하였다.

개발금형과 개선금형의 내경  $\varnothing 6.87$ 성형 구간인 중간분할 금형에 인서트 팁과 보강링의 치수를 Table 2에 정리 하였고 금형해석을 통해 비교해 보았다.

Fig. 8의 위 그림을 보면 개발금형의 중간 부분은 3중 보강 다이로 사용된 금형재료는 다음과 같다. 인서트는 초경(G55),

보강 링의 재질은 STD 61(HRC 52.1)이며 케이스의 재질은 STD61 HRC 48.0)으로 냉간 금형 공구강을 사용하여 제작되었다. 조립순서는 인서트와 보강 링을 먼저 조립한 후 케이스에 조립한 것이다. 제1분할직경과 공차량은 직경  $\varnothing 22.50\text{mm}$ 와 0.096mm로 설계되었고, 제2분할직경과 공차량은 직경  $\varnothing 32.0\text{mm}$ 와 0.213mm로 설계되었다. 이때 열박음 온도는 각각 550℃, 600℃로 프레스 역지끼워박음 시 980.4, 647.8MPa의 외압력이 작용하도록 작업했다. 견딜 수 있는 내부압력은 1398.7Mpa이고 박음 시 테이퍼각도는 4.0°로 축 방향으로

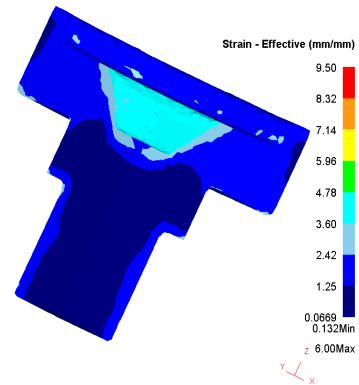


Fig. 6 Effective strain of the #3 process

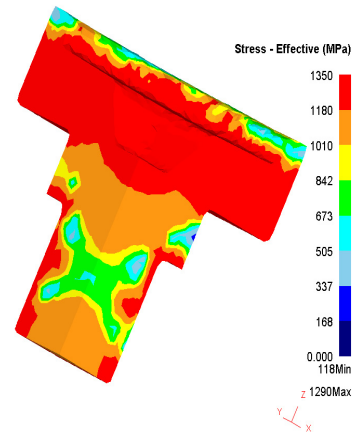


Fig. 7 Effective stress of the #3 process

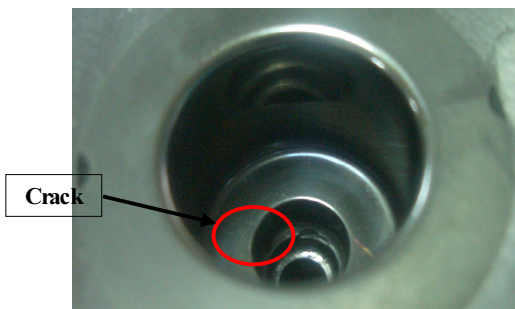


Photo 1 Crack damage die insert of photograph

Table 2 Comparison on the die with stressed ring

Classification		Development die	Amendment die
		Middle part	
Split dies	Die insert	$\varnothing 6.87$	$\varnothing 6.87$
	1st Sleeve	$\varnothing 22.5$	$\varnothing 13$
	2st Sleeve	$\varnothing 32$	$\varnothing 23$
	3rd Sleeve	$\varnothing 73$ (Casing)	$\varnothing 43$
	4th Casing		$\varnothing 73$

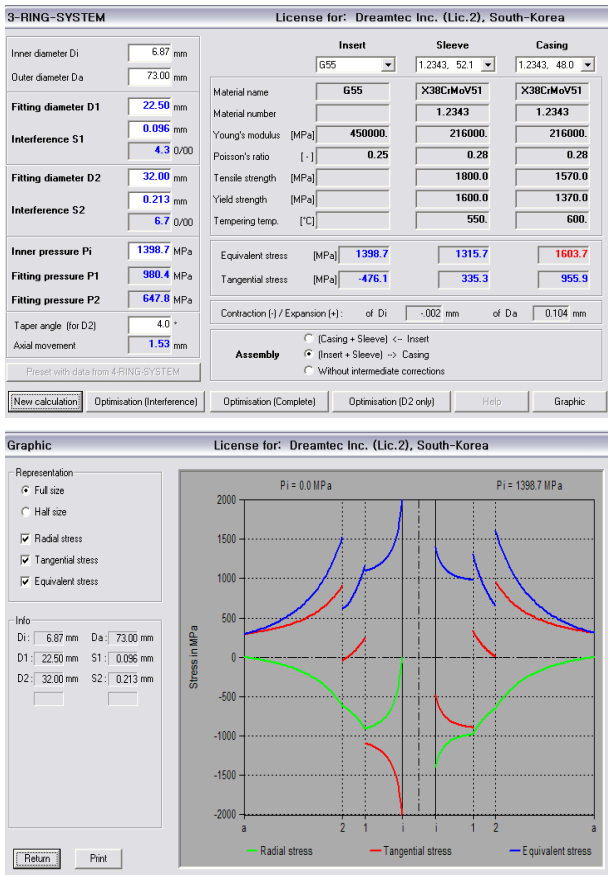


Fig. 8 Middle part of split development dies

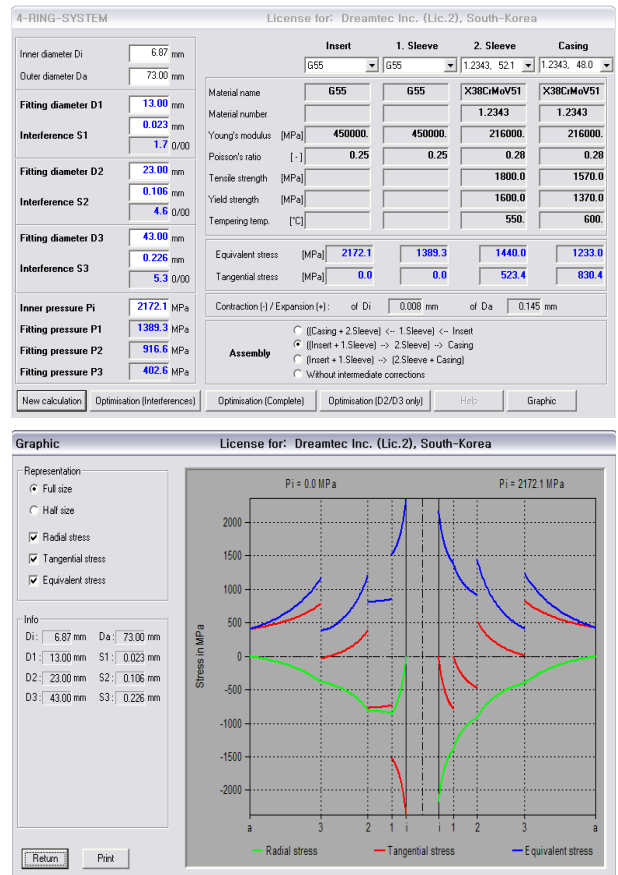


Fig. 9 Middle part of split amendment dies

1.53mm진행시킨 후 작업을 수행되었다. Fig. 8의 아래 그림은 실제 단조 가공 작업시의 인서트 링과 보강 링의 응력분포를 나타낸다. 인서트 링은 1398.7~ -476.1MPa, 보강 링은 1315.7~ 335.3MPa이고 케이스는 1603.7~ 955.9MPa로 나타났다. 이러한 결과로 미루어 보았을 때, 유한요소해석 3공정에서 측정된 유효응력 1350 Mpa과 금형 내부 압력 1398.7Mpa이 최대치를 받는다는 점과 금형의 제3 보강 링인 케이스 재질의 항복강도 1370Mpa을 등가응력 1603.7MPa넘어섬으로써 인서트 링의 내부압력을 상쇄시키지 못하여 작업이 진행됨에 따라 단조품의 장력량이 커져 제품의 공차범위내의 제품을 생산하지 못한 것으로 판단된다. 또한 예압력을 필요이상으로 크게 취하여 금형의 내부 모멘트의 증대와 피로수명의 저하 등이 이루어져 금형이 파손된 것으로 판단된다.

개발금형의 문제점을 보완한 개선 금형에 대한 금형해석인 Fig. 9을 보면 중간 부분을 4중 보강다리로 사용된 금형재료는 다음과 같다. 인서트는 초경(G55), 제1보강 링의 재질은 초경(G55)이며 제2보강 링의 재질은 STD 61(HRC 52.1)이며 케이스의 재질은 STD61(HRC 48.0)으로 냉간 금형 공구강을 사용하여 금형설계를 실시하였다. 조립순서는 인서트와 제1초경 보강 링을 조립하고 제2보강 링을 조립한 후 케이스에 조립한 것

이다. 제1분할직경과 공차량은 직경  $\varnothing$  13.0mm와 0.096mm로 설계되었고, 제2분할직경과 공차량은 직경  $\varnothing$  23.0mm와 0.106mm로 제3분할직경과 공차량은 직경  $\varnothing$  43.0mm와 0.226mm로 설계되었다. 내부압력은 2172.1Mpa을 견딜 수 있는 것으로 나타났다. 단조 가공 작업시의 인서트 링과 보강 링의 응력분포를 살펴보면 인서트 링은 2172.1~ 0MPa, 제1 보강 링은 1389.3~ 0MPa이고 제2보강 링은 1440~ 523.4MPa로 케이스는 1233~ 758.2Mpa로 나타났다. 또한 응력분포선도를 보면 초경 인서트 링은 반경방향응력으로의 예압력이 0~ -860MPa의 압축압력이 가해지고, 제1보강 링에서는 -860~ -800MPa, 제2보강 링에서는 -800~ -420MPa, 케이스는 -420~ 0의 예압력이 걸리는 것으로 파악되었다. 이러한 수치결과는 유한요소 해석의 단조공정품 응력이 집중된 구간에 금형 예압력을 미리 알아보고 금형 설계 시 인서트 링과 보강 링을 초경으로 쓰는 방법과 적절한 보강 링 개수를 선정하여 실제 작업 시 원활한 제품 생산을 도울 뿐만 아니라 제품의 공차의 정밀도를 향상 시키고 금형의 수명을 증대 할 수 있는 안전설계를 한 결과로 판단된다(5-10). 이를 반영하여 금형도 설계·제작한 결과 기존 금형보다 생산성이 약 20%정도의 금형수명이 증가하였다.



Photo 2 Photo of products produced by the die for each process

Table 3 Measurement of shape size about specimen

No	Check list	Tolerance (mm)	Measurement result				
			P1	P2	P3	P4	P5
1	Concentricity	0.2 below	0.07	0.09	0.12	0.10	0.08
2	Surface Flatness	0.05 below	0.017	0.015	0.013	0.015	0.018
3	Hardness	Hv 120 ~ 170	152.1	148.4	151.0	151.3	151.7

### 3.3 가이드 밸브의 시제품 제작

단조 공정 설계를 바탕으로 금형 제작하여 다단 포머기에 금형을 장착하고 소재는 SWRCH 18A를 사용하여 가이드 밸브의 시제품을 제작 하였다. 각 성형 공정별 단조 공정품은 Photo 2와 같이 성형되었다.

Table 3은 단조성형공정으로 성형된 초·중·종품 외에 별도의 시편 2개를 동심도 게이지 및 형상측정기와 로크웰 경도기를 통하여 측정한 결과이다. 측정결과는 모든 단조 시편에서 높은 치수 정밀도를 나타내었다. 이러한 결과로 공정설계 및 공정개선을 위해서 유한요소해석을 통하여 양호한 품질의 가이드 밸브를 개발할 수 있었다.

## 4. 결론

본 연구를 통해 연료압력 조절기용 가이드 밸브의 냉간단조 성형공정을 개발하고 각 공정설계 단계에서부터 성형공정해석을 통하여 공정설계의 유용성과 타당성을 검토하고 이를 근거로 금형을 설계하여 개발과정에서 양호한 품질의 제품을 제조할 수 있는 기반을 마련하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유한해석을 통해 응력이 집중되는 공정 금형에 초경 분할 4중 보강다이로 설계·개선하여 금형수명을 20% 증가 시켰다.
- (2) 기존 절삭 공정을 통해 제작되는 제품보다 35%의 원재료 절감효과를 보였다.
- (3) 기존 제조방식보다 생산성이 약 1.5배 정도 증대되어 작업 인력 대비 생산효율 증대의 효과를 가져왔다.
- (4) 절삭공정보다 우수한 제품의 형상 및 치수 정밀도를 확보하였고, 제품의 불완전 요소를 제거하여 품질을 향상시켰다.
- (5) 생산현장에 성형공정해석과 금형설계 그리고 금형강도해

석에 따른 냉간 단조품의 개발 방법론을 적용하여 공정설계의 타당성을 검토하고, 이를 바탕으로 기존 가공법을 대체함으로써 생산성 향상과 비용 절감 효과를 얻었다.

## 후 기

본 연구는 2012학년도 대전대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) CATIA, V5 R17, *CATIA Document*, Dassault Systemes Inc.
- (2) Deform-3D, 2010, *Deform-3D Tutorial*, SFTC Inc.
- (3) Kwon, H. H., J., Song, S. E., and Kim, O. S., 2011, "Cold Forging Process Finite Element Analysis of the Unified Universal Shaft Joint for the Automobile," *J. of the KSMTE*, Vol. 20, No. 5, pp. 582~588.
- (4) Eesy-2-Form, Vers. 4.20, *Eesy-DieOpt Document*, CPM Inc.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Lee, S. D., and Byon, S. K., 2005, "Design of the Radial Extrusion Process for the General-Pur Pose Flange Using Model Material," *J. of the KSMTE.*, Vol. 17, No. 2, pp. 114~120.
- (10) 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.