

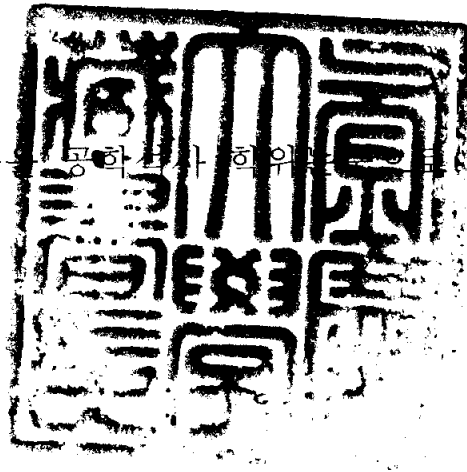
714
4420
1
5

공 학 석 사 학 위 논 문

승용차용 플레어 너트(Flare Nut)의 단조공정 유한요소해석

지도교수 한 규 택

이 논문을 공 학 석 사 학 위 논 문 으 로 제출함



2003년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

정밀기계공학과

추 덕 열

추덕열의 공학석사 학위논문을 인준함

2002년 12월 23일

주 심 공학박사 오명석



위 원 공학박사 진인태



위 원 공학박사 한규택



목 차

Figure & Table List	vi
Nomenclature	viii
Abstract	x
1. 서론	
1-1. 연구배경	1
1-2. 연구목적	3
2. 본론	
2-1. 단조금형	5
2-1-1. 단조의 개요	5
2-1-2. 단조공정의 설계	9
2-1-3. 재료의 특성	14
2-2. 유한요소해석 기법을 이용한 성형해석	16
2-2-1. DEFORM TM -3D 소프트웨어의 적용 이론식	16
2-2-2. 해석방법과 전처리(pre-processing)	19

2-2-3. 4단계 단조공정의 모델링	22
 3. 결과 및 고찰	
3-1. 격자(mesh) 형상	25
3-2. 유효응력(effective stress) 분포	28
3-3. 유효변형률(effective strain) 분포	30
3-4. 고찰	32
 4. 결론	38
 참고문헌	39

Figure & Table List

Fig. 1	Flow chart of processes planning for flare nut	10
Fig. 2	Geometry of flare nut	11
Fig. 3	Punch & die for forging(1)	12
Fig. 4	Punch & die for forging(2)	13
Fig. 5	Products of SWCH	14
Fig. 6	Flow stress-strain curve of SWCH 10A	19
Fig. 7	Punch & die of 1st · 2nd process	22
Fig. 8	Punch & die of 3rd · 4th process	23
Fig. 9	Mesh shape of forging processes	25
Fig. 10	Node & element number-time curve	26
Fig. 11	Effective stress distribution of forging processes	28
Fig. 12	Effective stress-time curve	29
Fig. 13	Effective strain distribution of forging processes	30
Fig. 14	Effective strain-time curve	31
Fig. 15	Load-time curve	32
Fig. 16	Nodal velocity-time curve	33
Fig. 17	Nodal displacement-time curve	34

Fig. 18	Photo of flare nut	35
Fig. 19	Tryout of die	36
Fig. 20	Die of flare nut(1)	36
Fig. 21	Die of flare nut(2)	36
Table 1	Temperature of forging	7
Table 2	Material properties of SWCH 10A	15
Table 3	Test of prototype	37
Table 4	Forging process development effect	37

Nomenclature

σ_{ij}	stress
$\bar{\sigma}$	effective stress
$\dot{\epsilon}_{ij}$	strain velocity
$\bar{\epsilon}$	effective strain
$\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\bar{\epsilon}}$	effective strain velocity
F_j	loaded force
U_i	deformed velocity
V	volume
S	surface area
K	penalty constant
$\vec{v}$	velocity vector
$\vec{t}$	traction vector
$\vec{n}$	normal unit vector on contact surface
Δv_n	normal velocity

Δv_s sliding velocity to a tangent direction

t_s friction stress

c constant

n strain exponent

m strain rate exponent

y material constant

Finite Element Analysis of Forging Processes of the Flare Nut for Automobiles

Duk Ryol Chu

*Department of Precision Mechanical Engineering, Graduate School
Pukyong National University*

Abstract

The flare nut is an important part that has used to joint a brake tube in automobiles. It was made of SWCH 10A into machining. But, we intend to make it into not machining but metal forming like forging & thread. The main focus of present paper is to investigate an optimal shape of the forging processes for the flare nut using DEFORMTM-3D, commercially available finite element code and tests. Actually, an explicit finite element analysis of the forging processes has been carried out to predict an optimal shape of the flare nut and its results were reflected in the tests of the forging processes design for the flare nut. The simulation results which had obtained from finite element analysis were greatly contributed to the forging processes design for the flare nut. An optimal shape of the flare nut showed a good agreements with test results. Furthermore, this results should contribute to a developments of the forging processes for a variety of the parts.

1. 서론

1-1. 연구배경

플레어 너트(flare nut)는 자동차 브레이크 오일(brake oil)이 출입하는 브레이크 튜브 관단(brake tube-end) 체결용 부품이다. 이것은 치수정밀도와 표면조도(surface roughness)가 높게 요구되며 유해한 결합인 균열, 파손, 누유 등이 없이 완벽하게 품질보증이 되어야 하는 동시에 자동차 1대 당 사용량도 20개를 훨씬 상회할 만큼 많이 사용하므로 대량생산 시스템이 요구되는 부품이다. 또한 플레어 너트는 언더컷(undercut)요소도 지니고 있어 주의해서 가공해야 한다.

1980년대 초반까지 플레어 너트를 가공하기 위해서는 절삭과 선삭 가공 방식을 이용했으나, 이는 대량생산이 불가한 문제점과 가공조건이 수시로 바뀌는 단점을 안고 있어서 완벽한 품질보증을 기하기 어려웠다. 이러한 생산의 문제점과 품질보증의 문제점을 동시에 만족시켜야 하는 필요성에 의해 여러 가지 가공방법을 모색한 끝에 금형을 이용한 단조가공법이 채택되었다. 또한 갈수록 치열한 국내외 시장경쟁에서의 우위를 확보하기 위해서도 대량생산방식인 단조가공법으로의

선회는 불가피한 것이었다. 그러나 1980년대 중반까지 국내 자동차 산업의 생산은 미미한 수준에 불과하였던 시기였고 자금과 기술부족으로 국내 제작 시 선반, 밀링 등 다수의 공작기계를 사용해야 했다. 이것은 시간적 손실도 컸으며 작업 인원의 과다 투입 및 공구의 마모로 인한 비용부담 등 고가의 제조원가가 소요되었다. 그래서 불가피하게 외국 자동차 부품업체에서 이미 개발한 플레어 너트를 구매할 수밖에 없었다. 그러나 1997년 국제통화기금 체제 발표 이후 환율의 불규칙한 등락으로 전량 수입에 의존하던 국내업체들은 큰 타격을 입었다. 이러한 환차손을 극복할 수 있는 방안은 오직 플레어 너트의 국산화뿐이었다. 안정된 가격으로 부품을 조달 받아 자동차 제조사에 수급하기 위해서는 국산화가 유일한 대안이라는 것에 의심의 여지가 없었다. 또 날로 글로벌화 되어 가는 국제화 시대에 시장 확대와 매출 증대를 기대할 수 도 없다는 결론을 내리게 되었다. 그러나 국내기술은 전무한 상태였다. 이러한 배경에 의해 플레어 너트의 생산기술 국산화는 시급히 해결해야 할 과제임에 틀림없게 되었으며 이에 본 연구가 시작되었다.

1-2. 연구목적

플래어 너트를 앞서 살펴 본 것과 같이 전량 수입에 의존하여 환차손을 입고 있는 문제점을 주지하고 국산화하기 위하여 본 연구에서는 새로운 플래어 너트 단조공정을 설계해 보고 이를 실제 현장과 유사한 조건에서 유한요소해석(finite element analysis)하여 그 결과를 최적의 단조공정개발에 활용해 보고자 한다. 컴퓨터를 이용해 시뮬레이션(simulation)하면 실제 현장에 적용 시 야기되는 문제점을 빠르고 저렴하며 비교적 정확하게 미리 알아 낼 수 있고, 이러한 문제점을 보완·수정하여 최종적으로 최적의 단조공정을 도출한다면 우수한 품질의 제품을 값싸게 얻을 수 있게 되며 아울러 생산원가의 절감 효과도 예상할 수 있다.

유한요소법(finite element method)은 1950년대에 경계값 문제의 근사해를 구하는 중요한 방법의 하나로 부상했었다. 1960년대 말까지도 유한요소법에 대한 공학논문은 많이 발표되었으나 수학논문은 많지 않았다. 1970년대에 비로소 이 방법의 장점과 더불어 수학적 표현이 정립되었고 이와 관련된 보간이론(interpolation), 스플라인(spline), 미분방정식과 더불어 유한요소법은 수학적으로 인정받게 되었다.⁽¹⁾

플래어 너트를 탄소강 소재인 SWCH 10A로 단조 가공하는 공정은

소성변형을 이용한 것이다. 소성가공에선 소성변형량에 비하여 탄성변형량이 매우 적기 때문에 아예 이를 무시해 버린 강소성문제로 흔히 가정한다. 탄성변형량을 무시하면 계산량이 많이 줄어서 해석시간을 단축할 수 있는 장점이 있다. 이러한 강소성 성형조건 문제를 분석하는데 유한요소법을 응용하기 시작한 학자는 Kobayashi 등⁽²⁾이 있고 Zienkiewicz 등⁽³⁾이 일반화하였다. 소성가공문제는 현재 강소성 유한요소법^(4~7)으로써 많이 해결하고 있다.

본 연구는 상용유한요소해석 프로그램인 DEFORMTM-3D를 이용하여 플레어 너트의 단조성형공정을 해석하고 그 결과를 설계에 반영하여 최적의 플레어 너트 단조공정을 개발하였다.

2. 본론

2-1. 단조금형

2-1-1. 단조의 개요

단조(forging)란 금속재료를 고온으로 가열하여 연화(softening)된 상태에서 이를 프레스(press)나 해머(hammer) 등으로 소성 변형을 일으키게 하여 성형하는 작업이다. 이러한 작업은 오랜 옛날부터 일용품, 장식품, 무기 등의 제조에 적용해 온 가공법이다. 오랜 세월 동안 이 작업은 대장장이의 손에 의해 전해 왔으나 19세기 이후 동력을 이용한 단조기계의 출현으로 비로소 근대적인 발전을 가져오게 되었다. 특히 2차대전 후 자동차 공업과 기타 대량생산 공업의 발달로 단조작업에도 양산화, 자동화 물결이 밀어닥친 것, 공정의 자동화, 인력 절감화를 추진시키기 위해 단조품 치수정밀도에 대한 수준이 높아진 것, 항공기 공업 등의 발달로 단조품 신뢰도에 대한 요구가 높아지는 등의 결과로 단조기술에 관한 연구가 진척되어 급속한 발전을 가져오게 되었다.

기계적 성질이 우수한 제품을 얻기 위한 단조의 분류는 크게 열간단

조(hot forging)와 냉간단조(cold forging)로 나누어 볼 수 있다. 열간단조에는 해머단조(hammer forging), 자유단조(free forging or open die forging), 형단조(stanping or drop forging or close die forging), 프레스단조(press forging), 업셋단조(upset machine forging), 압연단조(roll forging) 등이 있다. 냉간단조에는 헤딩(cold heading), 코닝(conning), 스웨이징(swaging) 등이 있다.⁽⁸⁾

단조가공의 첫째 목적은 재료 조직의 개선에 있다. 즉 잉곳(ingot)의 수지상정을 타격, 압축 등으로 미세하고도 균일한 결정으로 하는 것, 수축공이나 기공 등을 압축 밀착시키는 것, 국부적인 편석(segregation)을 확산시켜 균질화 함에 있다. 둘째 목적은 성형이다. 자유단조, 형단조 등으로 섬유상 조직(fiber flow)을 살리면서 최종 형상에 가깝게 성형하여 재료의 손실을 줄이고 최소의 기계가공으로 제품화하도록 가공한다. 이런 결과로 높은 강도와 인성을 지닌 신뢰도 높은 제품을 얻을 수 있다. 현재 산업 전반에 걸쳐 새로운 금속의 발견과 합금의 개발로 더욱 개선된 단조기술과 가공기술이 실용화되고 있다.

단조온도는 재질, 단조물 크기, 단조 기계의 용량 등에 따라 다르다. 일반적으로 순금속, 고온일수록 성형 저항이 감소되어 단조하기 쉬워지고, 금형의 마모도 적어진다. 그러나 가열온도가 지나치게 높으면 결정입계의 용융이나 입계의 산화가 일어난다. 따라서 이런 것이 일어나

지 않게 하려면 보통 재료의 응고온도보다 100 °C~150 °C 정도 낮은 온도를 가열의 상한으로 한다. 가공의 종료 온도가 높으면 그로부터 재결정 온도까지 내려가는 사이에 결정립의 성장이 일어나므로 종료 온도는 가급적 낮은 편이 좋고 가공 잔류 응력을 재료 속에 남기지 않기 위해서는 재결정 온도보다 높은 것이 좋다(가공 다듬질 온도를 적당히 해서 변형이 없는 미세한 조직으로 하려면 A_{F1} 변태점 또는 그 바로 위의 온도가 좋다). 실제로 있어서는 단조품의 크기, 형상의 복잡성, 재질에 따른 변형 저항의 대소 따위 조건도 고려하여 단조온도를 정해야 한다. 일반적으로 형단조는 형 내에서의 유동성을 좋게 하기

Table 1 Temperature of forging

단조 재료 \ 온도	최고 단조 온도 °C	단조 완료 온도 °C
탄소강 잉곳	1200	800
특수강 잉곳	1200	800
탄소강	1300~1100	800
니켈강	1200	850
크롬강	1200	850
크롬니켈강	1200	850
스테인리스강	1300	900
고속도강	1250	950
스프링강	1200	900
니켈청동	850	700
인청동	600	400
듀랄루민	550	400
동	800	700
황동	750~850	500~700

위해 자유단조보다는 고온에서 작업이 이루어진다. Table 1은 최고 단조온도와 단조완료온도의 예이다.

냉간단조는 재료를 가열하지 않고 상온 또는 상온에서 가까운 온도에서 실시하는 단조방법으로 정밀도 면에서는 가장 우수한 단조품을 얻을 수 있다. 냉간단조 가공은 안정도가 증가하고 후가공이 불필요한 고정도화와 복잡한 형상을 가공하는 고난도 가공화로 진보하면서 비용 절감과 생산량 증대 목적의 선두주자로 그 응용범위를 넓혀 가고 있다.

2-1-2. 단조공정의 설계

본 연구에서는 기존의 절삭·선삭 가공과 같은 기계 가공 방식에 의한 플레어 너트의 제조 공정을 냉간단조에 의해 성형하기 위하여 다음과 같은 사항을 고려하여 공정을 설계하였다. 첫째, 기존의 가공방식보다 공정수와 시간이 줄어야 한다. 둘째, 비용절감효과가 실현되어야 한다. 셋째, 제품 양산 시 결함이 없어야 하고 기계의 수명을 단축시키지 않아야 한다. 이렇게 설계된 단조공정을 3차원 CAD프로그램으로 모델링 한 후 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORMTM-3D로써 유한요소해석을 수행하였다.

단조금형은 총 4단계의 공정으로 설계하였으며 플레어 너트의 육각부, 외경 및 튜브가 삽입되는 내경 부위에 정밀단조가 이루어지도록 하였다.

Fig. 1은 플레어 너트의 단조 공정 설계를 위한 순서도이다. 먼저 성형형상에 대하여 검토한 후 그 형상을 적절히 성형할 수 있도록 단조공정을 설계하고 그것을 모델링 한다. 이 모델링 된 자료를 상용유한요소해석 프로그램 DEFORMTM-3D에 적용하여 문제를 시뮬레이션한다. 이 시뮬레이션 결과를 초기에 설정한 성형형상의 설계조건들과 만족하는지 비교·검토해 본다. 그 조건들을 만족한다면 모든 프로세

스는 끝난다. 그렇지 않으면 문제점을 보완·수정하여 단조공정을 재 설계하여 모델링하고 시뮬레이션 과정을 거쳐 설계조건들을 만족시키는 형상이 도출될 때까지 피드백 과정을 반복한다.

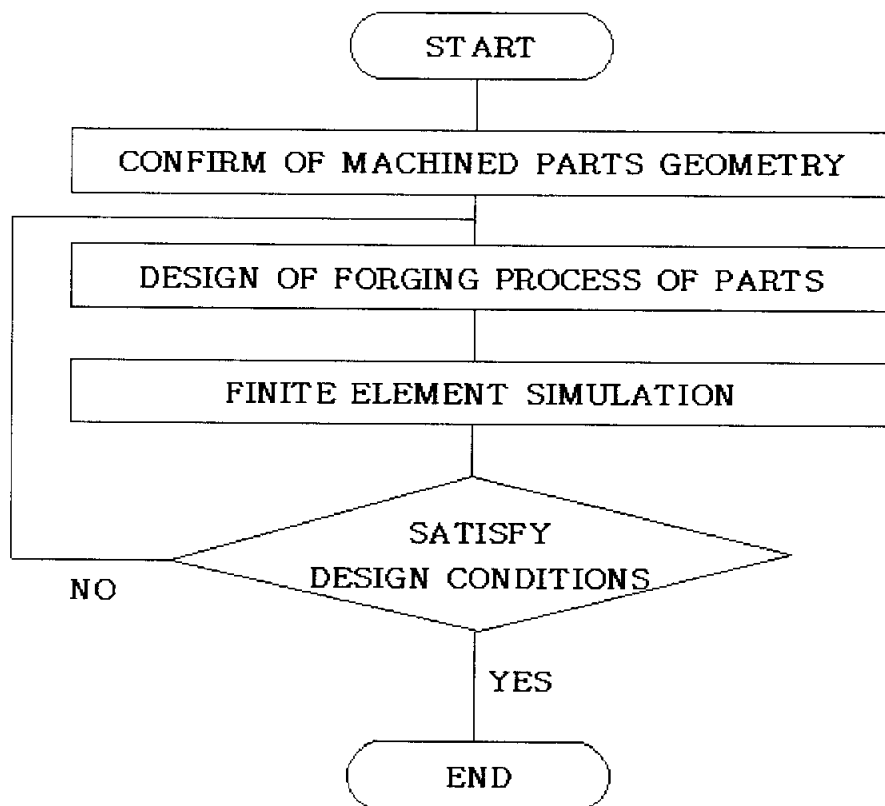


Fig. 1 Flow chart of processes planning for flare nut

Fig. 2는 플레어 너트의 설계 도면이다.

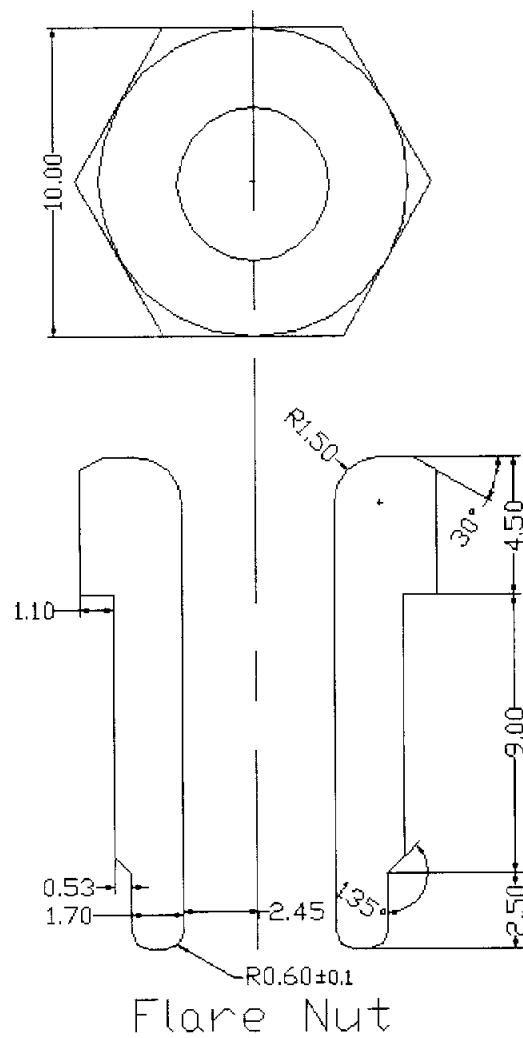


Fig. 2 Geometry of flare nut

Fig. 3~Fig. 4는 4단계 단조금형 도면이다. 하강 펀치(descending punch)는 펀치의 설계기준에 맞춰 제품의 내부 형상이 설계되도록 하였다.

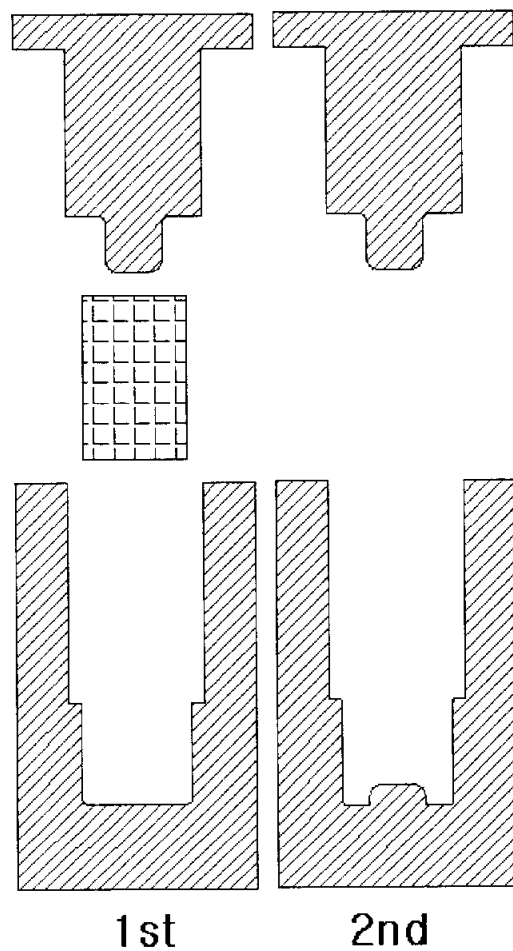
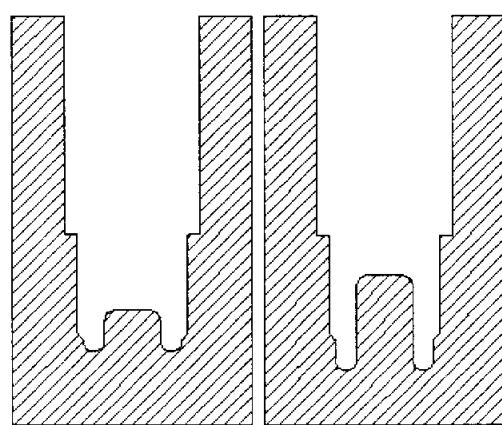
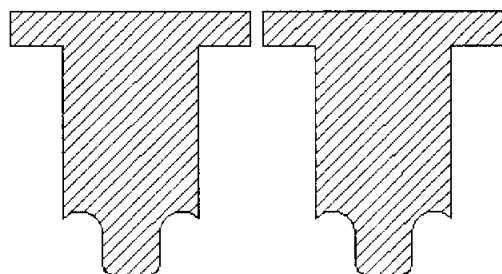


Fig. 3 Punch & die for forging(1)



3rd

4th

Fig. 4 Punch & die for forging(2)

2-1-3. 재료의 특성

일반적으로 플랜지 볼트, 너트, 스크류 등에 냉간 압조용 탄소강선인 SWCH(carbon steel wires for cold heading & cold forging)계열을 많이 사용하고 있다. Fig. 5는 SWCH계열의 재료로 만들어진 제품들의 사진이다.⁽⁹⁾

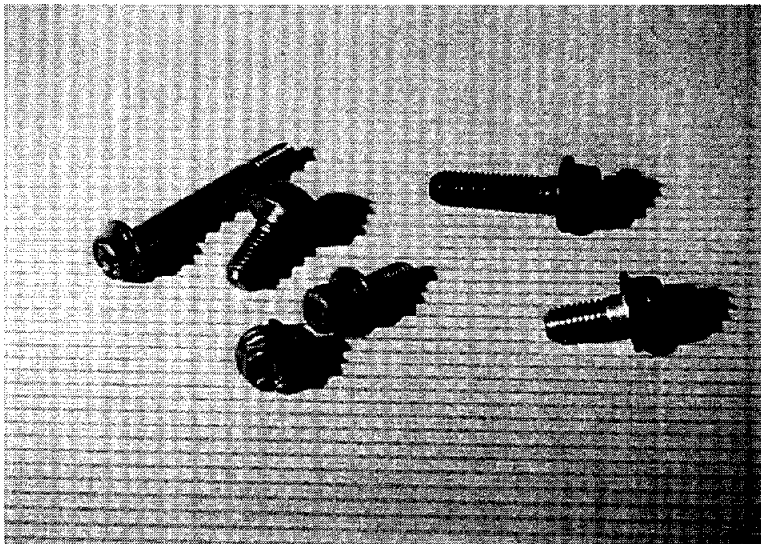


Fig. 5 Products of SWCH

플래어 너트의 소재는 이 냉간 압조용 탄소강선 중에서도 SWCH 10A를 사용한다. 여기서 A는 탈산강(Al-killed steel)임을 의미한다.

이 재료의 물성치는 Table 2와 같고, 지름의 허용차는 ± 0.4 이하이다.⁽¹⁰⁾

Table 2 Material properties of SWCH 10A

구분 \ 선지름		9mm
기계적 성질 (냉간가공)	인장강도	340N/mm ² 이상
	연신율	11%이상
	단면수축율	45%이상
	경도	85HRB이하
화학적 조성 %	C	0.08~0.13
	Si	0.1이하
	Mn	0.3~0.6
	P	0.03이하
	S	0.035이하
	Al	0.02이상

2-2. 유한요소해석 기법을 이용한 성형해석

2-2-1. DEFORMTM-3D 소프트웨어의 적용 이론식

유한요소해석 기법을 이용한 이론해석은 미국의 에스에프티씨사(Scientific Forming Technologies Corporation)가 개발한 소성가공 전용 컴퓨터 해석 프로그램인 DEFORMTM-3D 소프트웨어를 활용하였다. 플레어 너트의 다단 단조공정의 적합성 및 단조 시 소재의 변화들에 대한 여러 가지 이론적인 해석을 수행하였다.^(11~13)

DEFORMTM-3D 소프트웨어는 다음과 같은 강점소성식을 사용하고 있다.

평형방정식은

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (1)$$

적합방정식은

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad \dot{\epsilon}_V = u_{i,j} = 0 \quad (2)$$

구성방정식은

$$\sigma'_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3 \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (3)$$

경계조건은

$$\begin{aligned}\sigma_{ij}n_j &= F_j \text{ on } S_F \\ u_i &= U_i \text{ on } S_U\end{aligned}\quad (4)$$

여기서 σ_{ij} 와 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 각각 변형재료의 응력과 변형률 속도를 나타내고 $\bar{\sigma}$ 와 $\dot{\bar{\epsilon}}$ 는 각각 재료의 유효응력과 유효변형률 속도를 나타내고 있는데 각각 $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{3}(\sigma_{ij} - \bar{\sigma}\delta_{ij})(\sigma_{ij} - \bar{\sigma}\delta_{ij})}$, $\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\bar{\epsilon}}\delta_{ij})(\dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\bar{\epsilon}}\delta_{ij})}$ 로 정의되며 F_j 는 재료의 경계면에 걸리는 힘, U_i 는 경계에서의 변형속도를 나타내고 있다.

(1)~(4)식에 변분법을 적용하여 다음과 같은 약형(weak form)을 구할 수 있다.

$$\int_V \left(\frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\epsilon}}} \right) \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V K \dot{\epsilon}_V \delta \dot{\epsilon}_V dV - \int_{S_F} t_i \delta u_i dS = 0 \quad (5)$$

여기서 V 와 S 는 각각 체적과 표면적을 나타내고 K 는 페널티 상수를 나타낸다.

DEFORMTM-3D소프트웨어에서 사용하는 접촉조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[\vec{v}] \cdot \vec{n} = 0 \quad , \quad [\vec{t}] = 0 \quad (6)$$

여기서 $\vec{v}$ 와 $\vec{t}$ 는 속도벡터와 트렉션(traction)벡터이며 $\vec{n}$ 은 접촉면에 수직인 단위벡터이다. 접선방향의 트렉션은 마찰법칙을 만족하여야 한다.

(6)식을 변분법으로 나타내면 다음 식과 같다.

$$\int_S K_i \Delta v_n \delta \Delta v_n dS + \int_S t_s \delta \Delta v_s dS = 0 \quad (7)$$

여기서 Δv_n 은 수직방향으로 들어가는 속도이고 Δv_s 는 접선방향으로 미끄러지는 속도이며 t_s 는 마찰응력이다.

2-2-2. 해석방법과 전처리(pre-processing)

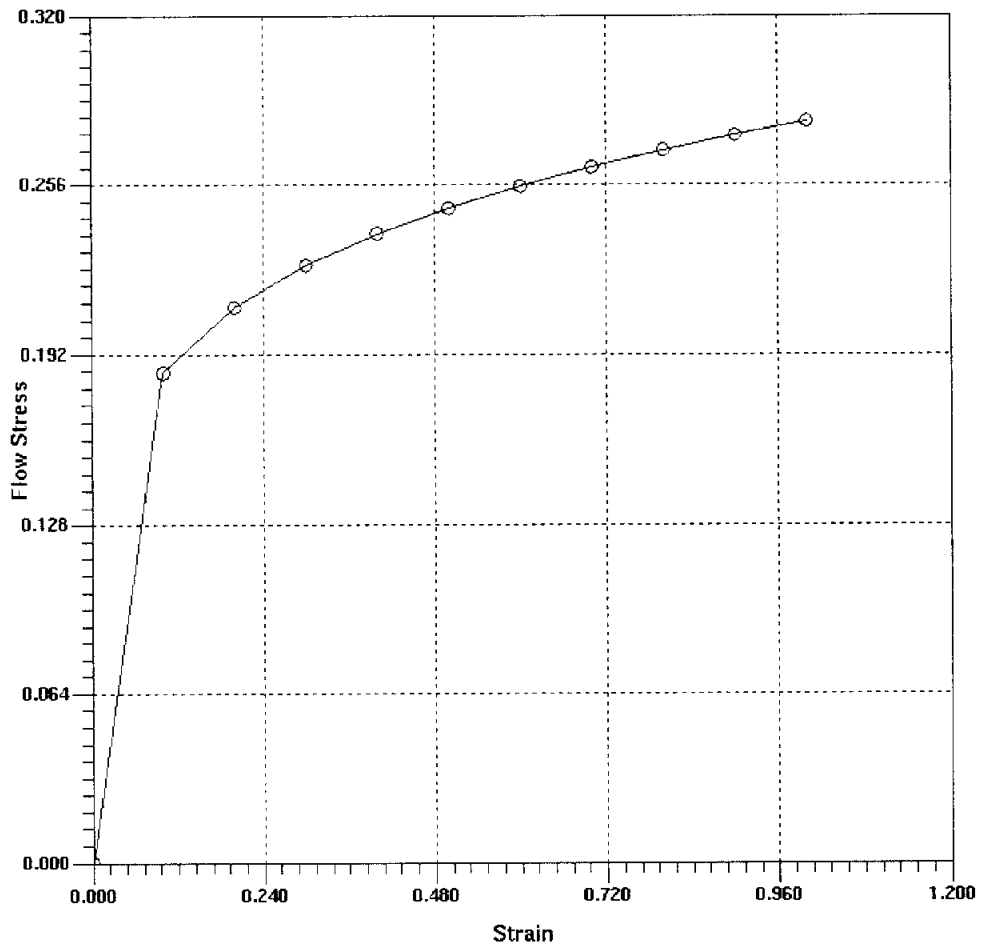


Fig. 6 Flow stress-strain curve of SWCH 10A

플래어 너트와 단조공정의 펀치와 다이는 중심축을 기준으로 축대칭 형상(axisymmetric shape)이다. 축대칭 형상의 문제는 주로 그 일부만

을 따로 잘라내어 많이 해석한다.⁽¹⁴⁾ 해석이 끝난 후 해석결과를 기준 축에 회전시켜 완전한 형상의 해석 결과를 얻을 수 있고 그 결과도 만족스럽다. 그래서 이 문제에서도 해석량을 적게 하고, 해석 시간도 아울러 줄이기 위해서 축을 중심으로 1/4 형상만을 모델링(modeling)하여 해석에 적용시켰다. 플레어 너트의 재질은 냉간 압조용 탄소강 선재인 SWCH 10A 를 사용하였다.

Fig. 6은 플레어 너트의 소재인 SWCH 10A의 응력과 변형률 관계를 나타내고 있는 그래프이다.

일반적으로 냉간단조의 경우 편치와 다이가 소재에 작용하는 일정 전단마찰(constant shear friction)을 가정하여 마찰계수(friction coefficient) 값을 전공정에 대하여 $\mu=0.08$ 로 가정한다. 4단계 가공 공정이 모두 상온(20 °C 기준)에서 이루어지는 냉간단조 공정이므로 재료의 유동응력과 변형률의 관계를 다음의 식으로 가정하였다.

$$\sigma = c \bar{\epsilon}^n \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^m + y = 0.28 \bar{\epsilon}^{0.18} MPa \quad (8)$$

여기서 c는 상수(constant)이며 그 값은 재료의 인장강도를 고려하여 0.28로 설정한다. n은 가공경화지수(strain exponent)로 값은 0.18이며 m은 변형률 속도 의존성 민감도 지수(strain rate exponent)로 그 값은 0이다. y는 재료 상수(material constant)이며 값은 0이다.

유효변형률은

$$0 \leq \bar{\varepsilon} \leq 1 \quad (9)$$

이다. 근사법(iteration method)은 뉴우턴-랩슨법(Newton-Raphson method)을 사용하였다.

강소성 문제이므로 소재는 소성체(plastic body), 각각의 공정의 펀치와 다이는 강체(rigid body)로 가정하여 탄성변형을 무시한 채 시뮬레이션 하였다. 플레어 너트가 단조 가공되는 전체공정을 200단계로 나누고 펀치하강속도(punch descending velocity)를 1mm/sec로 설정함으로써 실제 작업조건과 유사하게 설정하였다. 모든 공정의 공차(tolerance)는 0.01mm이다. 소재의 규격은 직경과 길이가 각각 9mm, 14mm이다. 금형은 펀치와 다이가 완전히 닫히는 폐금형(closed type die)이다.

2-2-3. 4단계 단조공정의 모델링

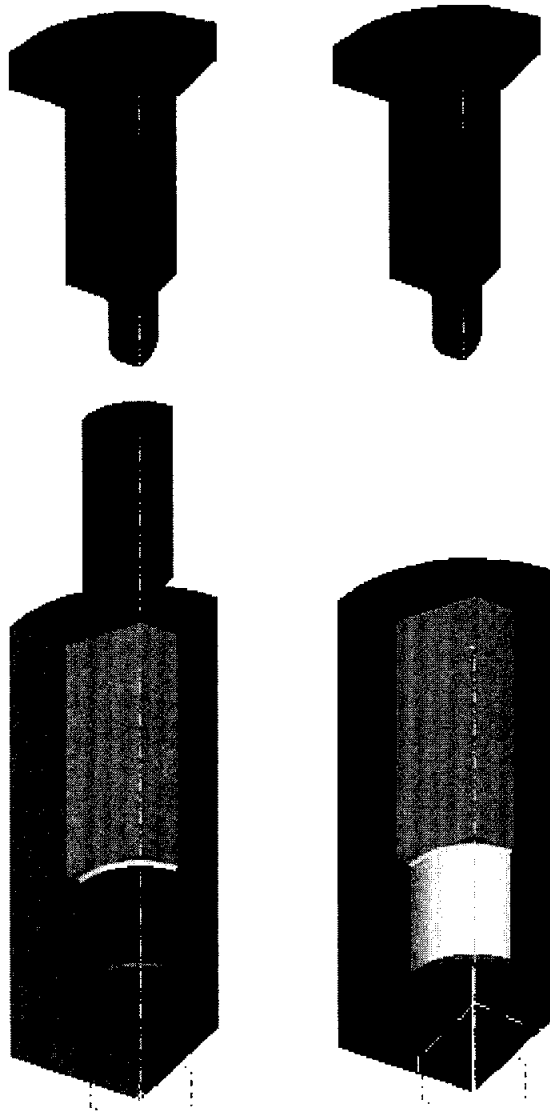


Fig. 7 Punch & die of 1st · 2nd process

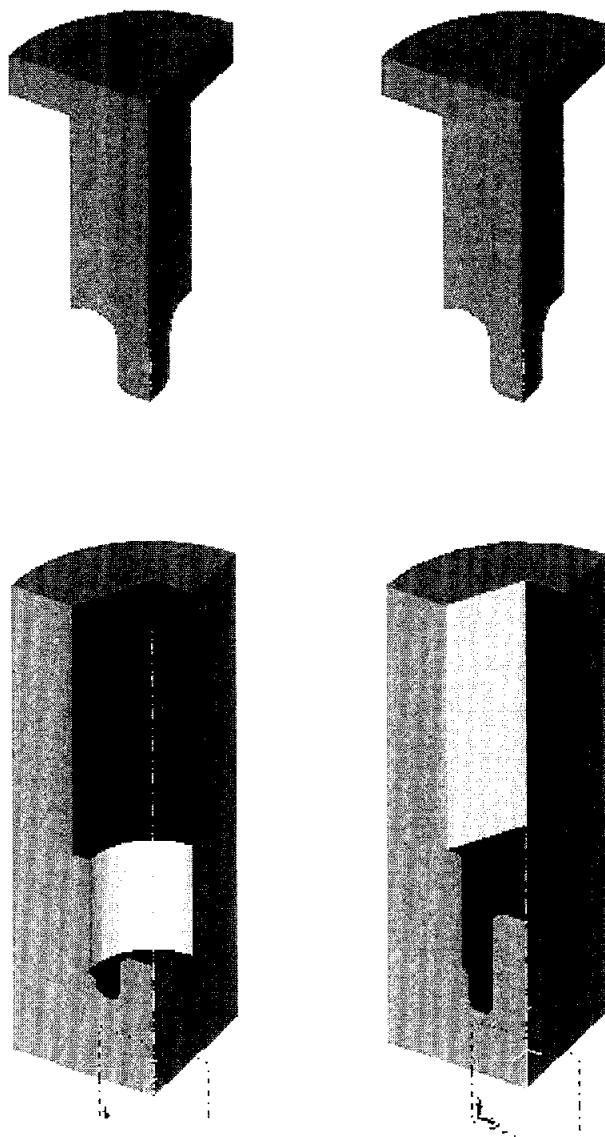


Fig. 8 Punch & die of 3rd · 4th process

Fig. 7은 3차원 캐드 모델링 프로그램을 이용하여 1·2단계 단조공정을 1/4형상으로 쉐이딩(shading)하여 모델링한 것이고 Fig. 8은 3·4단계 단조공정을 1/4형상으로 모델링한 것이다. 각각의 다단 금형에서 소재의 성형한계를 고려하여 필렛(fillet) 반경을 0.1mm~1mm로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 격자(mesh) 형상

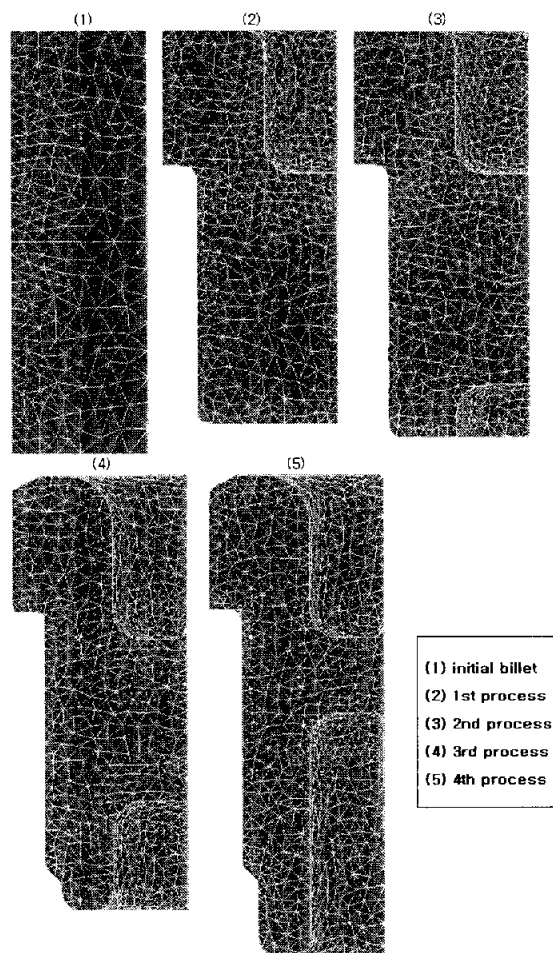


Fig. 9 Mesh shape of forging processes

Fig. 9은 4단계 단조공정 시 각각의 공정에서의 플레어 너트의 격자 (mesh)형상을 보여주고 있다. 여기서 각 공정의 격자수와 요소수를 그래프로 나타내면 Fig. 10과 같다.

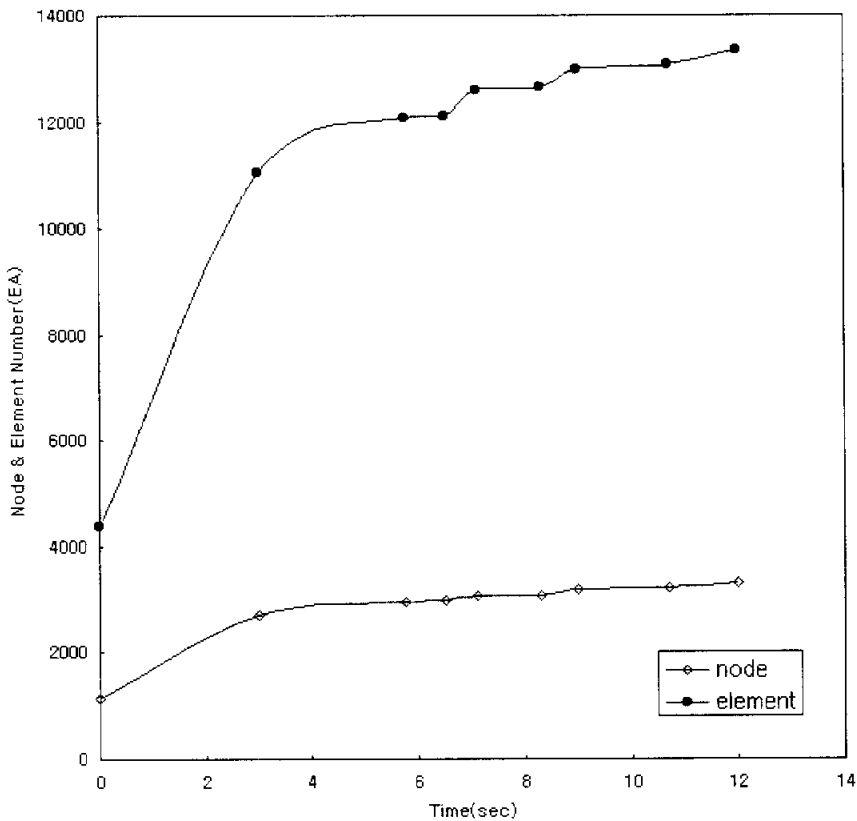


Fig. 10 Node & element number-time curve

Fig. 10은 4단계 단조공정의 시간에 따른 모델의 노드(node)와 요소 (element)가 증가하는 경향을 보여주고 있는 그래프이다. 해석프로그램

에서 1단계 공정 초기에 노드가 1141개, 요소의 4401개였는데 공정이 진행됨에 따라 격자가 재생성 되는 리메싱(remeshing)작업에 의해 1단계 공정 중반부까지 급격하게 노드수도 증가하였다. 이것은 해석량이 크게 늘어났음을 의미하는 것이다. 또 1단계 중반부 이후로는 노드수가 점차 소폭으로 증가하고 있다. 플레어 너트 원소재의 일부분이 각각의 공정이 진행됨에 따라 격자가 심하게 찌그러 지거나 훼손되면 프로그램 내부에서 자동적으로 위와 같은 리메싱 작업을 한다. 성형해석시 변형이 많은 부분에서의 정확도를 높이기 위해서 더 세밀한 격자로 나뉜 것이다.

3-2. 유효응력(effective stress) 분포

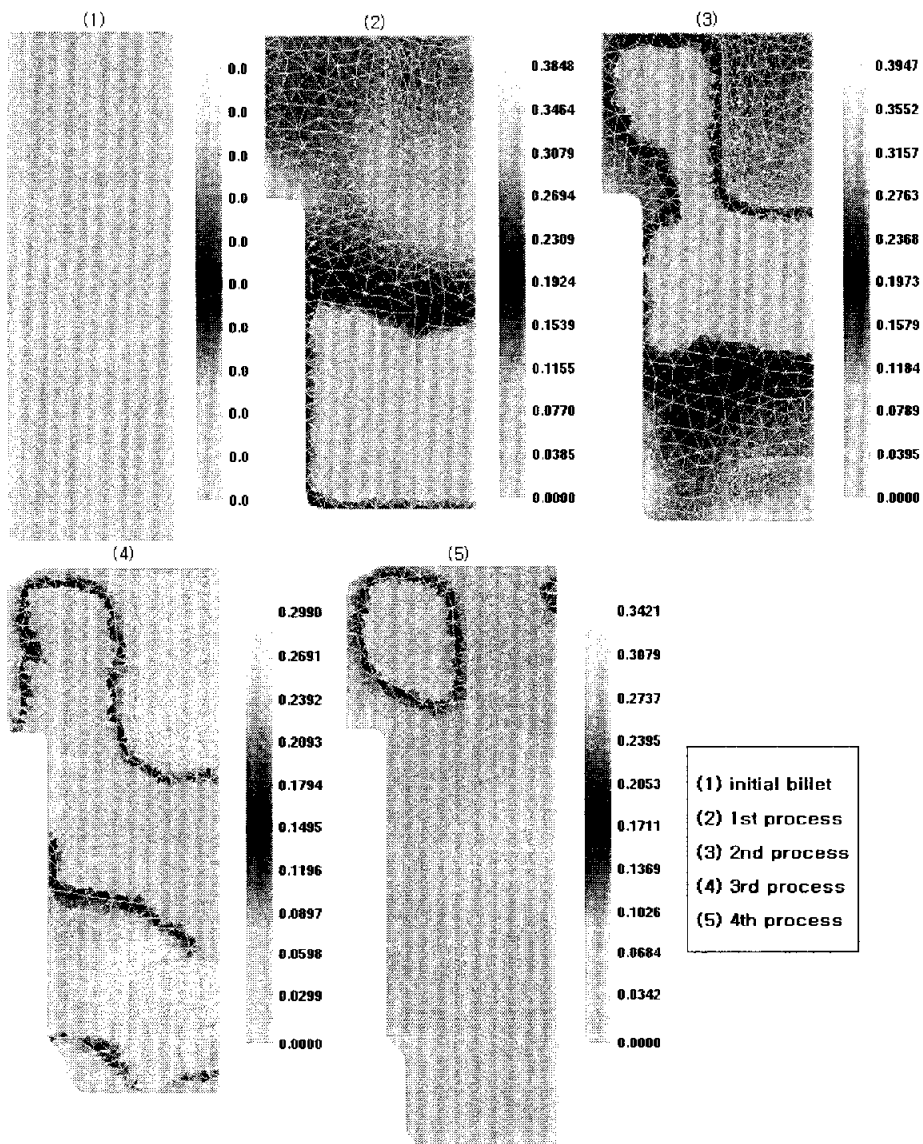


Fig. 11 Effective stress distribution of forging processes

Fig. 11은 4단계 단조공정 시 각각의 공정에서 플레어 너트의 유효응력 분포를 보여주고 있다. 이것을 그래프로 분석해 보면 Fig. 12와 같다.

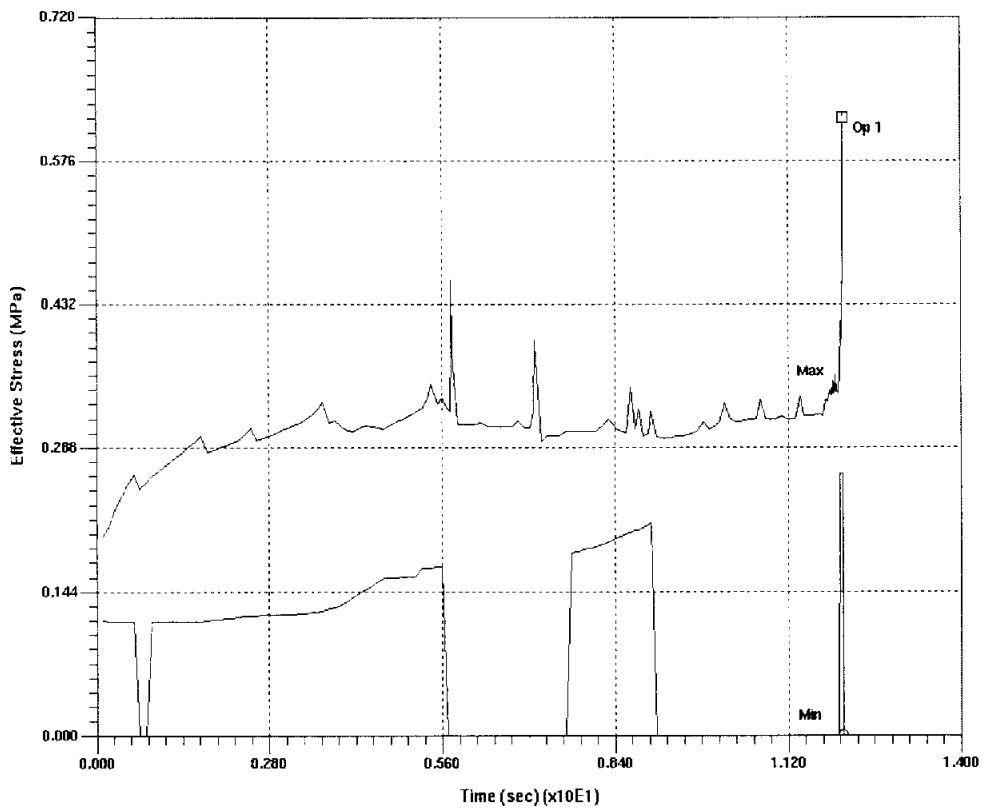


Fig. 12 Effective stress-time curve

Fig. 12는 시간에 따른 각 공정의 유효응력의 변화를 보여주고 있다. 각 단조공정의 유효응력의 최대값(Max)이 가공이 진행됨에 따라 점점 증가하다가 각 공정의 말단부에서 급격히 증가함을 알 수 있다.

3-3. 유효변형률(effective strain) 분포

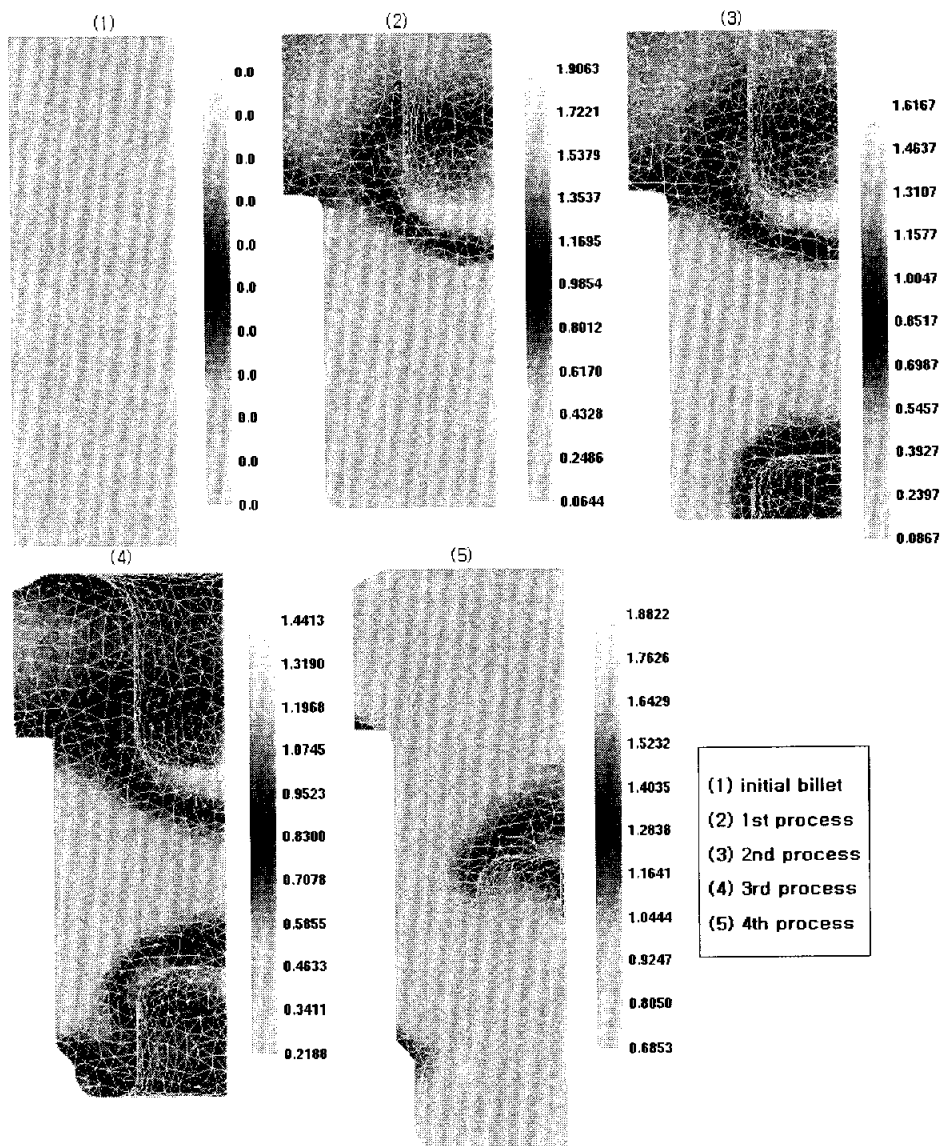


Fig. 13 Effective strain distribution of forging processes

Fig. 13은 4단계 단조공정 시 각각의 공정에서 플레어 너트의 변형률 분포를 보여주고 있다. 이것을 그래프로 분석하면 Fig. 14와 같다.

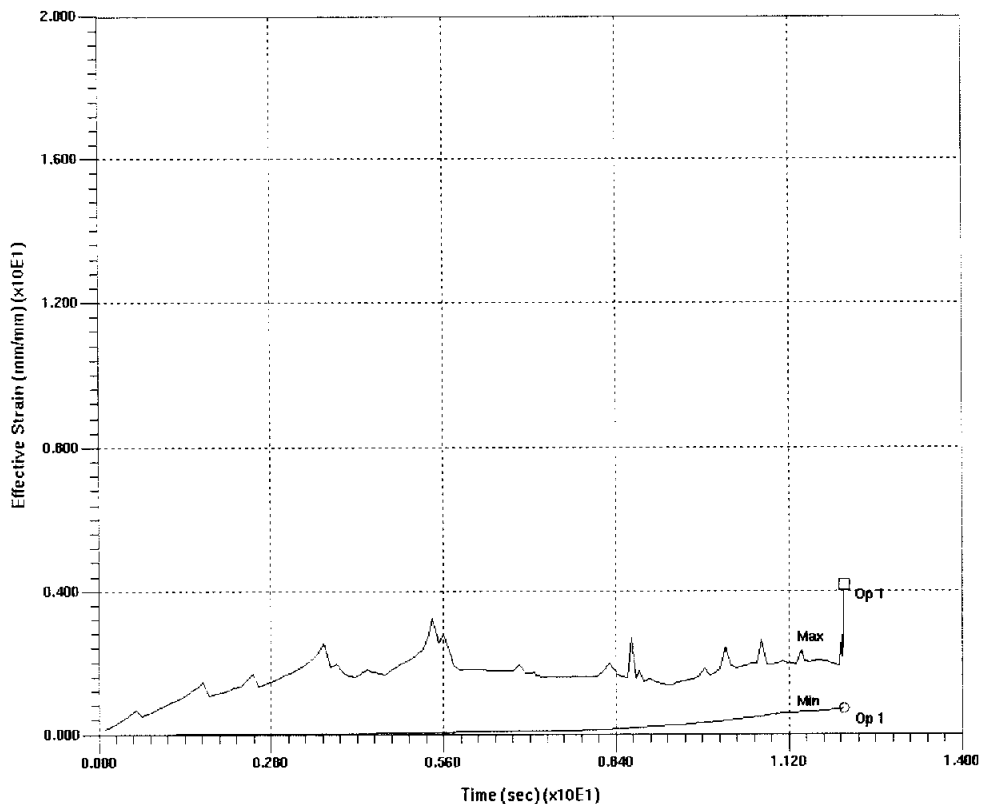


Fig. 14 Effective strain-time curve

Fig. 14는 시간에 따른 각 공정의 유효변형률의 변화량을 보여주고 있는 그래프이다. 각 공정의 변형률이 조금씩 증가했으나 그 차는 그리 크지 않았다. 특히 2단계 공정에서는 유효변형률이 거의 일정하였다.

3-4. 고찰

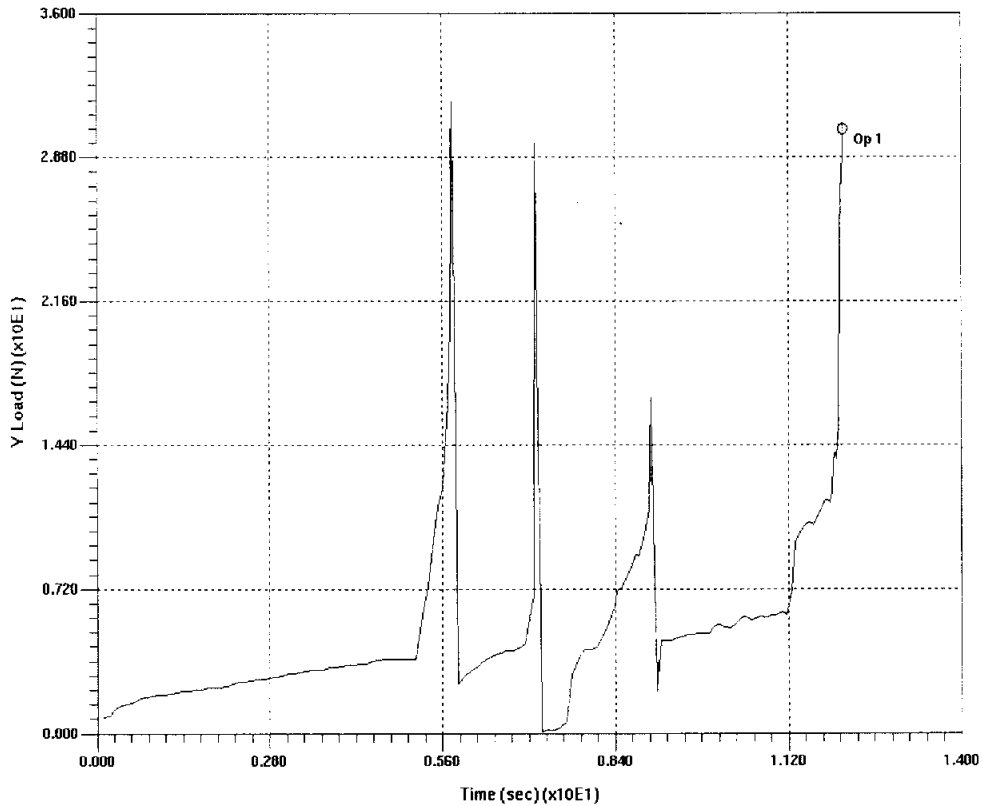


Fig. 15 Load-time curve

Fig. 15는 4단계 단조공정의 시간에 따른 하중(load)의 변화를 보여주고 있는 그래프이다. 각 공정에서 하중이 각각 비슷한 양상을 보이고 있다. 각 공정의 초반부에서 중반부까지는 하중이 서서히 증가하였으나 중반부 이후엔 급격히 하중이 증가했다. 특별히 3단계 공정에서는 공정의 초반부에서부터 하중이 꾸준히 증가하는 양상을 보였다. 이

것으로 각 공정에서 형상의 변형이 큰 부분에서 하중도 크게 요구됨을 알 수 있다.

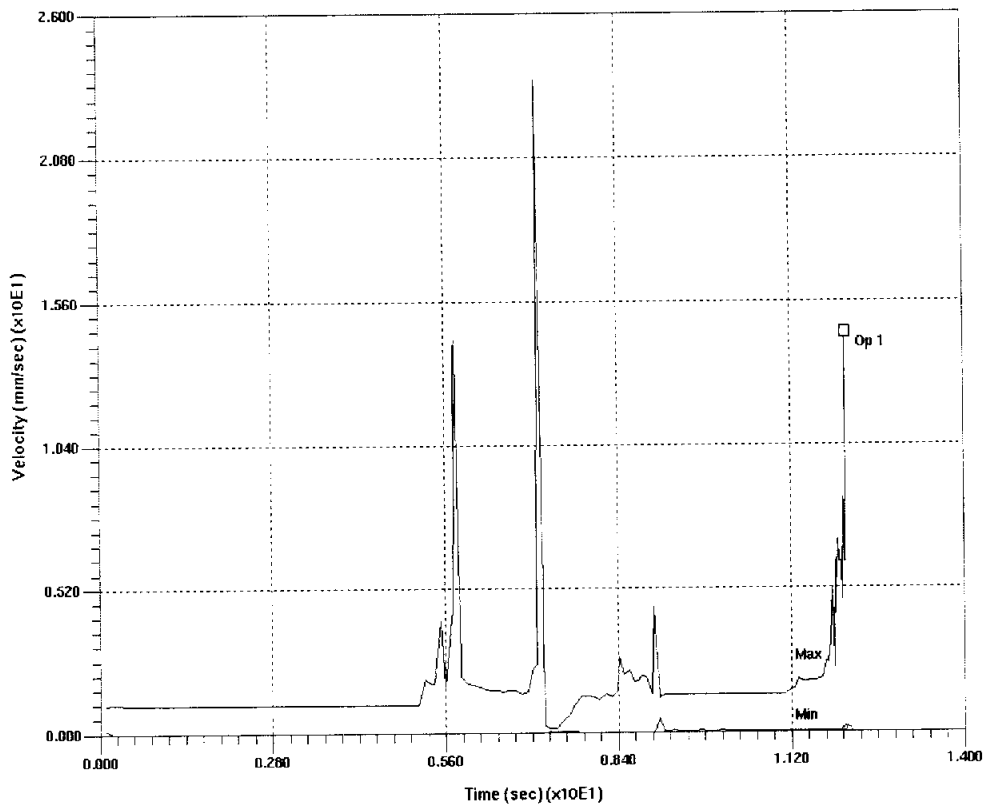


Fig. 16 Nodal velocity-time curve

Fig. 16은 4단계 단조공정의 시간에 따른 노드 속도(nodal velocity) 변화량을 보여주고 있는 그래프이다. 1단계 공정에서는 종반부까지 요소 속도의 최대값이 일정하게 유지되다가 종반부 이후부터 급격히 증가함을 보였다. 2단계 공정에서는 1단계 공정과 거의 흡사한 양상이었

으나 초반부에 노드 속도가 조금씩 감소했다. 대체로 각 공정의 속도 변화 양상이 비슷한 경향을 보였다. 여기서 노드 속도의 최대속도가 급격히 증가하는 것은 각 공정에서 형상변화가 많이 일어났음을 보여주는 것이다.

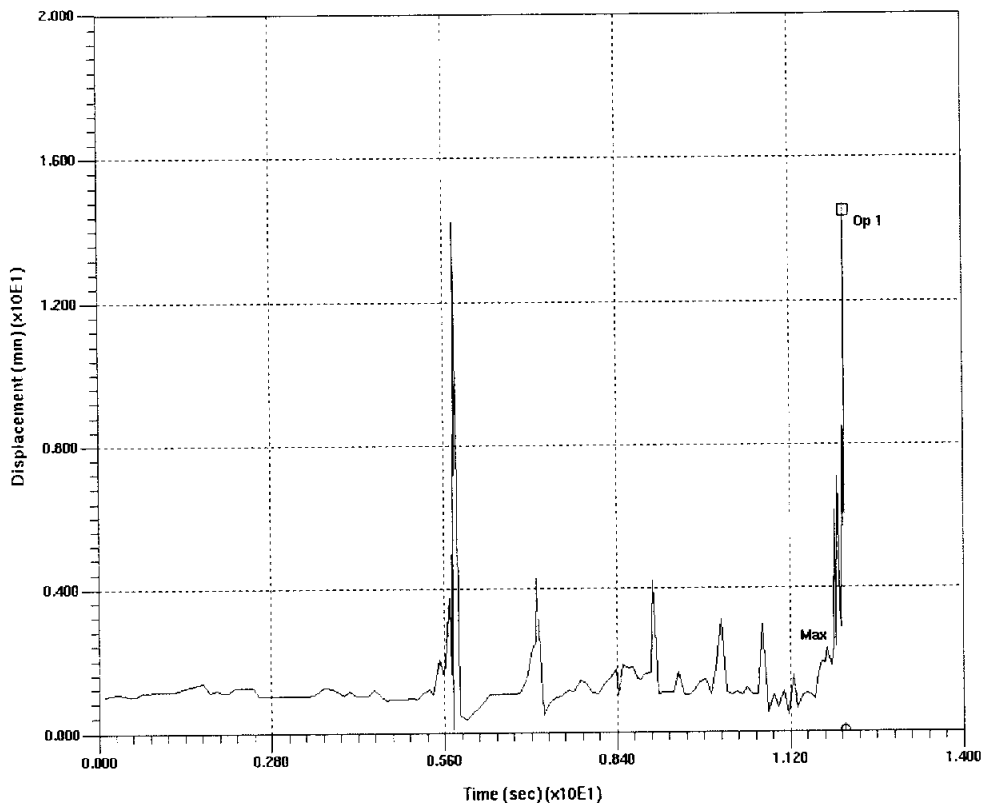


Fig. 17 Nodal displacement-time curve

Fig. 17은 4단계 단조공정의 시간에 따른 노드 변위량(nodal displacement)을 보여주고 있는 그래프이다. 각 공정의 변위의 최대값

이 말단부에서 크게 증가했다. 이것은 형상의 변화량이 말단부에서 컷음을 나타내는 것이다.

앞에서 살펴본 결과들에 의하면 4단계 단조공정의 각 공정에서 응력의 변화량이 그리 큰 차이를 나타내지 않고 고른 분포를 보인다. 이것은 시뮬레이션을 통해 양호한 품질의 플레어 너트로 가공되었음을 나타내는 것이다. 또 단조로 가공할 수 있는 최적의 공정이 설계되었음을 보여주는 것이다.

이 4단계의 단조공정 설계도를 기초로 하여 제품을 양산하는데 적합한 조건으로 실제 설비에 장착하여 시제품을 만들어 보았다. Fig. 18~Fig. 21은 시제품과 단조금형 설비의 일부이다.

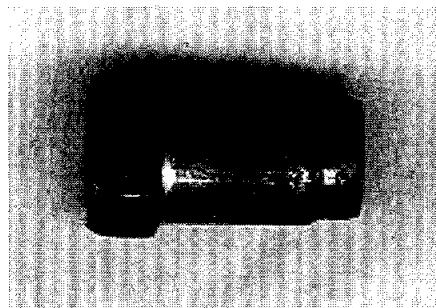


Fig. 18 Photo of flare nut

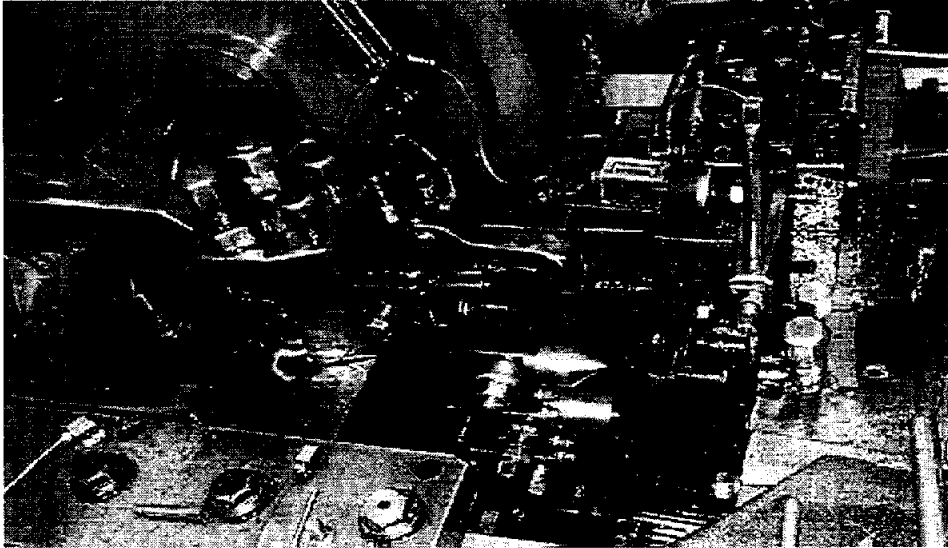


Fig. 19 Tryout of die



Fig. 20 Die of flare nut(1)

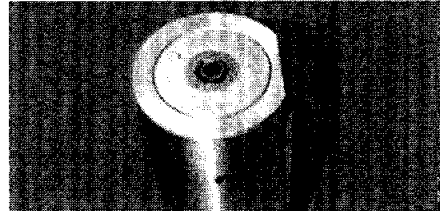


Fig. 21 Die of flare nut(2)

Table 3은 시제품을 규격에 적합한지 평가한 것이다. 단조금형에서 육각부와 외경 및 튜브가 삽입되는 내경의 정밀단조가 설계도와 같이 성형되었는지 평가한 결과 제품의 외관, 치수정밀도 등의 모든 부분에서 양산이 가능할 만큼 양호한 제품 상태를 보였으며 실차 장착도 실시하였다. 또한 기계적·물리적 성질도 양호한 제품으로 판명되었다.

Table 3 Test of prototype

구분 검사 항목	규격	측정치	판정
외관	사용상 유해한 흠이 없을것	이상 없음	합격
재질	SWCH 10A	변화 없음	합격
도금두께	MFZNT2-C(8 μ 이상)	양호	합격
내식성	168시간 경과 후 적청 발생이 없을것	양호	합격

Table 4 Forging process development effect

구분 개발시점	평균제조원가 won	평균소요량 EA/year	대응능력 day	실차 적용 item
전(수입)	30~100	25000000	60	20
후(국산)	25	1200000	30	1

Table 4는 단조공정개발을 통해 얻을 수 있는 효과이다. 과거 절삭가공에 의한 생산에서는 생산량이 적고 가공품의 품질이 일정하지 못해 불량률이 높았을 뿐만 아니라 소요인원이 과다하게 투입되어 생산단가가 높았으나 금속의 소성변형을 이용한 단조가공 생산방식으로 대체 개발한 결과 대량생산에도 무리가 없고 플레어 너트 제작에 소요되는 인원이 감소하여 제조원가가 크게 줄어드는 효과를 가져왔다.

4. 결론

본 연구의 초기에 2~6단에 이르는 수많은 공정을 설계한 후 유한요소해석을 실시하였다. 여기에서 얻은 결과를 반영하여 공정 수정과 피드백을 통해 비로소 최적의 4단계 단조 공정을 설계할 수 있었다.

플래어 너트의 단조공정을 설계 및 해석을 수행하는데 유한요소해석을 이용하였고 실제 시제품 제작을 위한 공정설계에 적용해 본 결과를 바탕으로 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 유한요소해석에 의해 플래어 너트에 나타난 응력과 변형률은 전반적으로 비슷한 크기를 나타내었으며 그 분포 또한 비교적 고르게 나타났다.
- (2) 기존의 기계가공방법을 지양하고 소성가공법의 하나인 단조를 이용하여 플래어 너트를 가공할 수 있는 최적의 공정설계법을 도출할 수 있었다.
- (3) 유한요소해석에 의한 시뮬레이션 결과를 통해서 적절한 단조 공정 및 금형을 설계할 수 있었다.
- (4) 해석결과를 실제 시제품 제작에 적용하여 만들어 본 결과 치수나 품질 면에서 모두 양호한 시제품을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- (1) 정상권, “유한요소법”, 대우학술총서, 1994.
- (2) C. H. Lee and S. Kobayashi, “New Solutions to Rigid-Plastic Deformation Problems Using a Matrix Method”, J. of Eng. for Ind., Trans. ASME, Vol.95, pp.865~873 (1973).
- (3) O. C. Zienkiewicz and P. N. Godbole, “Flow of Plastic and Visco-Plastic Solids with Special Reference to Extrusion and Forming Processes”, Int. J. Num. Meth. Eng. 8, pp.3~16(1974).
- (4) Yu, G. B. and Dean, T. A., “A Practical Computer Aided Design Approach to Design for Axisymmetric Forging Die Cavities”, Int. J. Mach. Tool, Des. Res. Vol. 25-1, pp.1~13(1985).
- (5) 김영석, 김현수, 김찬일, 최석탁, “토크 컨버터용 임펠러 허브의 냉간단조공정설계”, 한국정밀공학회지, 제17권 제11호, pp.213~219(2000).
- (6) 류찬호, 전만수, “부유금형을 가진 냉간단조 공정의 유한요소해석”, 한국소성가공학회지, 제9권 제2호, pp.159~164(2000).
- (7) 김현수, 이승동, 김용조, “크라운기어 형상의 밀폐단조공정설계를

- 위한 강소성유한요소해석”, Theses Collection of The Institute of Advanced Materials, Vol.10, pp.57~64(1998).
- (8) 金永玩, 辛根夏, 文源吉, 李京熙, “最新 機械製作法”, 光文閣, pp.165~185(1995).
- (9) <http://www.jpchqwire.com/eng/swch10a.html>
- (10) 日本工業規格, “JIS 鐵鋼 1991”, 日本標準協會, pp.1172~1177(1991).
- (11) S.I. Oh, et. al., “Capabilities and Applications of FEM code DEFORM: the perspective of the developer”, J. Mat. Proc. Tech., 1991.
- (12) 박승희, 윤성만, 신상엽, 박래원, 박종국, 이용기, 김대두, “선박 중형엔진용 일체형 Crankshaft 단조장치에 관한 연구”, 한국소성가공학회지, 제8권 제3호, pp. 237~244(1999).
- (13) <http://www.deform.com>
- (14) Daryl L. Logan, “A First Course in the Finite Element Method(2/E)”, PWS Publishing Company, pp.128~132(1996).

감사의 글

먼저 지금까지 항상 함께 해 주셨고 앞으로도 나를 든든한 반석으로 인도해 주실 하나님께 감사드립니다.

본 논문이 완성되기까지 대학원과정 내내 많은 지도를 아끼지 않으신 한규택 교수님께 감사드리며, 바쁘신 가운데 시간을 내어 논문을 심사하여 주시고 유익한 조언을 해주신 오명석 교수님, 진인태 교수님께도 깊이 감사드립니다.

2년의 석사과정 중 학문적 가르침과 함께 도움을 주신 부경대학교 기계공학부의 모든 교수님들과 조교 선생님들께 감사드립니다. 또한 같이 수학한 대학원 동기분들과 선후배님 그리고 전산응용성형 및 금형가공실험실에서 함께 생활하며 여러 가지 도움을 주신 실험실원들께도 감사를 드리며 때때로 곤란할 때 함께 해주고 격려의 메일과 전화로 위로해 준 나의 친구들에게도 감사드립니다.

끝으로 제가 원하는 길을 갈 수 있도록 믿고 허락해 주시고 도와주신 부모님과 동생들에게도 감사드리며, 이 작은 결실의 기쁨을 다함께 나누고 싶습니다.

2003년 1월 부경대학교 용당캠퍼스에서

추덕열 배상