

# 초박판·고정밀 연소관 개발을 위한 유동성형 공정의 적용

은 일 상, 임 성 택, 박 성 한 (국과연)  
김 정 배, 최 열 경, 이 공 우 (삼성항공)

## 요 약

초강도 마레이징강의 초박판 고정밀 연소관의 유동성형공정 조건을 도출하기 위하여 치수제어 시험을 실시하고, 가공열처리 공정이 적용된 연소관의 물성 및 구조시험을 통해 신뢰성을 평가하였다. 두께 0.5mm 이하인 초박판 연소관의 유동성형에서 두께증가 현상은 성형속도 0.5~0.75m/rev에서 X롤러의 성형비를 상대적으로 10x 이하로 하고, 성형반경을 4mm로 작게함으로써 제어할 수 있었으며, 이와 같이 개발된 연소관은 인장강도가 300ksi 이상으로 크게 강화되었고, 예상 최대작동압력에 대한 안전계수가 1.3 이상으로서 구조적 안전성이 입증되었다.

### 1. 서 론

유동성형(flow forming:F/F)은 회전하는 맨드릴에 관상의 예비성형체(preform)를 장착하고 롤러로 압착시켜 큰 소성변형을 주는 회전가공법의 한 분야로서 미사일, 원자력, 자동차 및 의료 산업에 까지 그 적용이 확대되고 있다[1,2,3]. 각종 유도탄의 중소형 고체추진기관용 연소관 제작기술로서 유동성형공정은 구조적 안전성 개선, 경량화, 정밀도 및 신뢰도 향상, 생산단가절감 등을 목적으로 이용되고 있으며, 특히 선진국에서는 경량화가 요구되는 휴대용 지대공 미사일의 경우 Stinger, Gremlin(SA-14, Iglu)등의 벽두께가 약 0.5mm인 초박판고정밀 연소관(very thin and high precision motor case)제작에 적용된 것으로 알려져 있다[1]. 국내에서도 이미 5종의 연소관 제작에 유동성형공정이 적용된 바 있으나[3,4,5,6,7,8] 두께가 1.5mm로 가장 얇았던 천마 마레이징강연소관 개발시 두께증가 현상 때문에 두께제어가 매우 곤란했었다[5].

초박판 튜브는 외경에 대한 두께비(W/D)가 약 0.5% 이하 또는 두께가 0.5mm이하인 아주 얇은 관으로 정의되며, 휴대용 미사일에 사용되는 연소관은 대부분 W/D가 약 0.5% 이기 때문에 W/D가 약 1% 인 천마 연소관보다 두께제어가 더욱 어려울 것으로 예상할 수 있다. 따라서 선진국에서도 초박판 연소관의 경우는 유동성형공정의 실험 연구를 통해서 최적공정 조건을 설계하고 있는 것으로 추정되지만 자세한 연구결과가 보고되지 않고 있으며, 단지 일본에서 직경 0.3mm, 두께 8 $\mu$ m인 초박판 의료용 튜브(W/D $\approx$ 3%)의 유동성형중에 발생한 재료파단현상을 금속학적으로

규명하면서 극히 일부의 성형조건을 제시하고 있을 뿐이다[9]. 또한 국내에서도 천마연소관개발시 유동성형 공정에 대한 근사해석 및 성형력측정에 관한 연구를 수행한 바 있으나, 현재의 연구 결과는 최적 공정설계에 정성적으로만 이용되고 있는 형편이다 [10,11,12].

일반적으로 부적당한 유동성형 공정 조건에 의하여 발생될 수 있는 문제점은 소성불안정(plastic instability)에 의한 불량한 제품표면상태, 내경 및 두께의 편차,두께증가(Spring back:  $\Delta t$ =성형두께-제품두께), 내경성장(diameter growth:  $\Delta d$ =제품내경-맨드릴외경), 등이 있으며, 이들은 예비성형체의 재질 및 두께, 유동성형시의 성형율(percent reduction), 성형속도(feed rate), 각 롤러의 성형비(reduction ratio), 롤러의 형상등에 의하여 지배된다.

본 연구는 초강도 마레이징강(C-250)을 이용하여 두께 0.5mm, 직경 85mm인 초박판 고정밀 연소관을 유동성형하는데 있어 두께증가제어의 가능성을 확인하고 유동성형공정인자들이 연소관의 정밀도에 미치는 영향을 분석하였으며, 유동성형공정과 가공열처리 공정(TMT: thermo - mechanical treatment)을 조합하여 제작한 연소관의 재질평가와 수압파열시험(hydro-burst test)을 실시하여 구조적 안전성을 평가하였다.

### 2. 시험 방법

#### 2.1 시료의 준비

사용된 시료는 진공용해 및 ESR 정련(VIMESR)된

국산 초고강도 18%-Ni, 마레이징강(C-250)으로서 화학성분은 Table 1과 같다. Fig.1은 열간 후방압출후 용체화 열처리된 예비성형체(I.D 83.67mm×15.0mm×L280mm)로 부터 1차 및 2차의 유동성형 공정으로 두께 0.5mm, 길이 약 1000mm의 연소관을 제작하기 위한 개략 공정도를 나타낸 것이다.

유동성형에 사용된 장비는 ST-56-112 CNC three roller F/F M/C이며, 사용된 윤활제와 냉각제는 각각 gleitmo 820과 수용성 절삭유이다. 1차 유동성형시의 롤러 형상과 성형속도는 튜브의 내경성장과 소성불안정을 억제할 수 있도록 경험자료로 부터 설계하여 사용하였으며, 표면조도가 우수한 I.D 83.80mm×O.D 83.0mm×L460mm의 고정밀 시험용 튜브를 제작할 수 있었다.

## 2.2 치수제어 시험

Fig.2는 예비성형체 및 1차 유동성형된 시험용 튜브와 함께 2차 유동성형시험으로 제작된 초박관 연소관을 나타낸 사진이다. 치수제어시험은 1차 유동성형된 두께 3mm의 시험용 튜브 8개를 사용하여 두께 0.5mm의 초박관 고정밀 연소관을 유동성형할 때 성형조건들(성형속도, X,Y,Z 롤러들의 성형비 및 롤러 형상)이 연소관의 두께증가와 내경성장에 미치는 영향을 파악하기 위한 것이며 각각의 성형조건으로 제작된 연소관의 두께와 내경을 정밀측정하고, 그결과를 비교분석하였다.

성형속도(feed rate) 변화시험은 시험용 튜브 2개를 사용하였으며, 표면조도를 고려하여 속도범위가 0.25mm/rev에서부터 1.0mm/rev까지 비교적 작게 되도록 맨드릴의 회전수를 300rpm으로 일정하게 하고, 롤러의 축방향 진행속도를 75 mm/min.에서 부터 300mm/min.까지 변화시켰다. 또한 롤러의 형상은 내경성장량을 최소화 시키기위하여 성형각( $\alpha$ :lead angle)과 배출각 ( $\beta$ :relief angle)은 크게하였고 두께증가량을 최소화시키기 위하여 성형반경(R:forming radius)은 작게 설계하였으며 X,Y,Z 롤러의 성형비는 3:3:4로 하였다. Table 2는 성형속도 변화시험 조건을 나타낸 것이다.

롤러의 성형비(reduction ratio) 변화시험은 시험용 튜브 3개를 사용하였으며 X,Y,Z 롤러들의 성형비를 각각 3:3:4, 1:2:2 및 1:4:5로 변화시켰고, 성형속도 변화시험과 동일한 형상의 롤러를 사용하여 동일한 속도변화를 주었다. Table 3은 롤러의 성형비 변화시험조건을 나타낸 것이다.

롤러 형상 변화시험은 시험용 튜브 3개를 사용하였으며, 최종 성형롤러인 X롤러( $\alpha=30^\circ$ , R=4mm,  $\beta=8^\circ$ )를 기준으로 하여 R과  $\beta$ 를 각각 8mm 와  $3^\circ$ 로 변화시켰고, X,Y,Z 롤러의 성형비는 1:4:5로 일정하게 하여 성형속도 변화시험과 동일한 속도변화를

주었다. Table 4는 롤러 형상 변화 시험 조건을 나타낸 것이다.

위 모든 시험에서 각각의 성형조건당 성형 길이는 150mm로 하였으며, 두께증가를 고려하여 X롤러와 맨드릴의 간격 즉 성형두께를 0.3mm로 일정하게 하였다.

## 2.3 구조적 안전성 평가 시험

유동성형 공정과 가공 열처리 공정을 조합하여 제작된 연소관의 축방향 인장시험과 노치인장시험, 그리고 금속조직시험을 실시하여 유동성형 공정과 가공 열처리 공정이 각각 연소관의 강도개선에 미치는 영향을 분석하였다. 금속조직 관찰용 무식액은 3g oxalic acid + 90ml H<sub>2</sub>O + 10ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 수용액을 사용하였다.

또한 롤러형상 변화시험 결과 두께증가량이 가장 작았던 성형조건 즉  $\alpha=30^\circ$ , R=4mm,  $\beta=3^\circ$  인 X 롤러를 사용하여 0.75mm/rev의 성형속도로 제작된 연소관 2개를 이용하여 일축 수압파열시험(uni axial hydro-burst test)을 실시하였다. 두께가 각각 0.4mm 와 0.44mm인 연소관의 시린더부 양 끝단과 중간에 원주방향과 축방향으로 6체널의 스트레인 게이지를 부착하고 내압을 500psi씩 4단계로 2000psi까지 증가시킨 후 파괴될 때 까지 200psi씩 증가시키면서 Measurement Group사의 P3500 portable indicator로 변형율을 측정하였으며, 이 변형율로 부터 연소관의 등가응력을 계산하여 안전계수를 평가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 두께증가량 및 내경성장량

Fig.3은 성형속도의 변화에 따른 연소관의 두께증가량 및 내경성장량의 변화를 함께 나타낸 것이다. 두께 0.3mm로 성형시의 두께증가량은 성형속도 0.25mm/rev에서 0.47mm로서 목표 두께증가량(0.2mm)보다 약 0.3mm 크고, 성형속도 0.5mm/rev 이상에서는 0.57mm로서 일정하게 목표증가량보다 약 0.4mm 크게 나타났다. 그리고 내경성장량은 성형속도 0.25mm/rev에서 약 0.4mm로 크게 나타났으나, 성형속도 0.5mm/rev 이상에서는 약 0.15mm 이하로 제어되었다. 두께증가의 원인은 롤러 선단 직하의 재료가 롤러의 진행방향과 반대방향으로 유동하기 때문이며, 이것은 썸기압축시험(wedge indentation test)에서 재료의 용기(pile up)현상[13]과 비슷한 것으로 생각된다. 이와 같이 성형속도 변화에 따른 두께증가와 내경성장은 상호 보완적으로 일정 체적을 유지하며, 성형속도만을 변화시킴으로써 초박관 연소관을 성형할 수 없다는 것을 알 수 있었다.

Fig.4는 X,Y,Z 롤러들의 성형비를 변화시켜서 X롤러의 상대적 성형비를 30%에서 부터 20%와 10%로 감소시킴에 따른 두께증가량과 내경 성장량을 나타

낸 것으로서 0.25mm/rev 에서 부터 1.0mm/rev까지 각각의 일정한 성형속도에서 시험한 결과를 비교한 것이다. X롤러의 상대적 성형비를 감소시킴에 따라 두께증가량은 모든 성형속도에서 크게 감소하여 제어되는 경향을 보이며, 10%의 성형비에서는 목표두께증가량에 접근하였고, 내경성장량은 0.5mm/rev 이상의 모든 성형 속도에서 약간 증가하는 경향을 보이나 약 0.2mm로 제어되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 두께증가가 제어되는 이유는 최종성형 롤러인 X롤러의 성형 체적이 감소됨에 따라 X롤러 직하의 재료 유동이 상대적으로 작아지기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 초박판 연소관의 유동성형은 X롤러의 상대적 성형비를 10% 이하로 감소시킴으로써 가능하다는 결론을 얻었다.

Fig.5는 0.25mm/rev에서 부터 1.0mm/rev까지의 성형속도에서 두께증가량과 내경성장량에 미치는 X롤러 형상의 영향을 나타낸 것으로서 X롤러의 상대적 성형비는 10%로 일정하게 한 결과이다. X롤러의 R은 4mm,  $\beta$ 는 8°를 기준으로 할 때 R을 8mm로 증가시키면 두께증가량은 모든 성형속도에서 매우 커지고, 내경성장량은 0.75mm/rev이하에서 증가하는 경향을 나타냈으며,  $\beta$ 를 3°로 감소시키면 두께증가량은 모든 성형속도에서 작아져서 목표두께증가량 이내로 제어되지만 내경성장량은 모든 성형속도에서 크게 증가되는 경향을 나타내었다. 이와같이 X롤러의 형상 변화에 의하여 두께증가량과 내경성장량이 크게 변하는 것은 최종 성형 롤러인 X롤러에 의하여 재료의 유동방향이 크게 변하기 때문이며, 초박판 유동성형의 최적 공정 설계를 위해서는 X롤러의  $\alpha$ 각을 포함해서 R 및  $\beta$ 의 형상 변화에 대한 연구가 추가적으로 수행되어야 한다는 것을 알 수 있다. 그러나 본 실험 조건에서 X롤러는 R이 4mm이고,  $\beta$ 가 8°인 기준 형상으로 하고 성형속도는 0.5mm/rev이상으로 하면 두께증가와 내경성장을 동시에 제어할 수 있다고 판단된다.

Fig.6는 성형속도 변화가 연소관의 내외면에서 롤러의 성형흔적으로 나타나는 표면조도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 연소관 내면의 표면조도는 0.5mm/rev이상의 성형속도에서, 연소관 외면의 표면조도는 0.75mm/rev 이상의 성형속도에서 급격하게 불량하여 지는 것을 알 수 있다. 따라서 초박판 연소관을 유동성형 할 때 두께증가와 내경성장을 최소로 제어하면서 표면조도가 양호한 연소관을 생산하기 위해서는 X롤러의 형상을 최적 조건으로 설계하고, X롤러의 상대적 성형비를 10% 이하로 하며, 성형속도를 0.5mm/rev 에서부터 0.75mm/rev까지의 범위로 관리하는 것이 바람직하다는 결론을 얻었다.

### 3.2 재료특성 및 구조안전성

Fig.7은 예비성형체와 초박판 연소관(두께:0.45mm)의 3차원 금속조직을 비교하여 나타낸 것이다. 후방 압출상태의 예비성형체는 비교적 큰 결정립(약 30 $\mu$ m)들이 등축의 구조를 이루고 있는 반면, 유동성형된 연소관은 축방향(L)의 재료 유동이 크게 발달되어 있

고 입계 관찰이 매우 어려울 정도로 미세한 결정립(약 3 $\mu$ m)을 나타내고 있다. 이것은 유동성형에 의한 90%에 이르는 냉간 가공 효과로 인하여 원재료의 결정입과 Ti(C,N)과 같은 유해 2차상 입자가 미세화되어 강화에 기여할 것으로 판단된다.

Table 5는 초박판 연소관과 예비성형체의 인장시험 및 노치인장시험 결과이다. 유동성형후 직접시험, 즉 TMT 공정(E)의 연소관은 유동성형 후 용체화 열처리(SHT) 및 시효한 공정(D)의 연소관에 비해 인장강도와 항복강도가 각각 20ksi, 27ksi 증가되었다. 이와같이 TMT에 의한 강화량( $\Delta\sigma_{E-D}$ )은 유동성형에 의한 냉간가공 효과로서 가공경화(Strain Hardening) 현상과 석출거동의 변화에 기인된 것으로 판단된다. 또한 E 공정은 예비성형체를 SHT한 후 직접 시효한 공정 (B)에 비해 인장강도와 항복강도가 각각 30ksi, 38ksi 증가되었다. 이때의 강화량( $\Delta\sigma_{E-B}$ )은  $\Delta\sigma_{E-D}$ 보다 약 10ksi 크게 나타났다. 이것은 D 공정과 B 공정의 차이 ( $\Delta\sigma_{D-B}$ )로서 Fig.7에서 설명한 바와 같이 유동성형에 의한 입자 미세화 효과로 판단된다. 결과적으로 TMT를 적용한 초박판 연소관은 시효된 예비성형체의 기본강도( $\sigma_B$ )에, TMT의 가공경화 및 석출거동 변화에 의한 강화량( $\Delta\sigma_{E-D}$ )과 입자 미세화에 의한 강화량( $\Delta\sigma_{D-B}$ )을 합한 초고강도 수준(T-S=305 ksi)으로 강화될 수 있다. 한편 TMT 공정 (E)는 D 공정에 비해 낮은 연신률을 나타냈는데 이것은 항복후 즉시 파단되는 재료의 인장거동(T-S=Y)과 관계가 있으며, 인성(toughness)이 매우 불량할 것으로 예상된다. 따라서 재료의 노치민감성을 판단하기 위해 측정된 NSR(NTS/TS)값은 E 공정이 0.85로서 D 공정의 0.98보다 작게 나타났다. 일반적으로 C-250 마레이징강의 NSR 값은 판재의 경우 0.75-1.0으로 알려져 있고[14], 낮은 NSR 값은 높은 냉간 가공율과 관련이 있기 때문에 최적 공정 설계를 위해서는 정량적인 파괴인성 평가와 결합영향 분석을 실시하여 SHT후의 유동성형량을 적절하게 설정해야 될 것으로 판단된다.

Table 6은 연소관의 1축 수압파열시험 결과를 나타낸 것이고, Fig.8은 축방향으로 파열된 연소관사진이다. 이 사진으로 부터 저합금강과 다르게 매우 길고 복잡하며 상당량의 파편이 발생하였음을 알 수 있다. 이와같은 파괴양상은 마레이징강의 특징이기도 하지만 TMT에 의한가공경화와 유동성형공정에 의한 원주방향의 금속유동이 이와같은 고에너지 파괴를 유발한 것으로 판단된다. 또한 Table 6에서 파열압력으로 부터 계산된 원주방향의 응력이 Table 5에 나타난 E공정의 인장강도와 비슷한 것을 알 수 있는데 유동성형공정에 의한 원주방향의 금속유동성과 관련이 있다고 생각된다. 그리고 예상최대작동 압력

(MEOP) 2500psi에서 측정된 변형율을 증가응력으로 환산할 경우 연소관의 안전계수가 1.3이상 으로서 일반적으로 선진국에서 로켓트 및 미사일용 연소관에 적용되는 1.25 [15]보다 약간 크게 나타났다. 또한 연소관은 연소시 2축 압력을 받게 되며, 2축 수압을 받는 연소관의 안전계수는 1축 수압의 경우보다 13% 정도 증가된다. 따라서 개발된 연소관의 구조안전계수는 1.5이상으로서 구조적으로 충분히 안전한 것으로 입증되었다.

#### 4. 결론

초고강도 마레이징강의 초박판 고정밀 연소관을 개발할 목적으로 유동성형공정을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 성형속도는 두께증가현상을 효과적으로 억제할 수 있는 공정인자가 아니지만 0.5 mm/rev 이상으로 하면 축방향의 소성유동이 증가되기 때문에 내경성장을 크게 감소시키는 효과가 있다. 그러나 1mm/rev 이상이 되면 표면조도가 불량해진다.
- 2) 최종성형틀러인 X틀러의 상대적 성형비율 10%이하로 감소시키면 소성유동량이 상대적으로 감소되기 때문에 두께증가현상의 제어가 가능하다.
- 3) 성형각( $\alpha$ )이 30° 인 X 틀러의 성형반경(R)을 4mm이하로 작게하고 배출각( $\beta$ )을 3° 이하로 작게하면 두께증가현상이 억제되지만 내경증가현상이 뚜렷해지는 것을 알 수 있었다. 그러나 틀러형상변화의 영향을 고정밀 연소관의 최적공정설계에 이용하기 위해서는 앞으로 체계적인 성형공정해석 및 실험연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 성형속도를 0.5~0.75mm/rev으로 하고 X틀러의 상대적 성형비와 성형반경을 10%이하와 4mm이하로 설계한 유동성형공정을 적용하여 두께 0.5mm이하의 초박판 연소관을 제작할 수 있었으나 정밀도 개선을 위하여 틀러형상변화에 대한 추가적인 연구가 필요하다.
- 5) 유동성형과 시효열처리를 조합한 가공열처리 공정으로 개발된 초박판 연소관은 인장강도가 300 Ksi 이상으로 크게 강화되며, 수압파열시험 결과 구조적으로 안전한 것이 입증되었으나 NSR값이 낮기 때문에 파괴인성을 고려한 최적 설계가 이루어져야 할 것이다.

#### 참고 문헌

1. F.K. Lampson and W.S. Crownover, Maraging Steels, Proceeding of ferrous metallurgy committee of TMS, ed. by R.K. Wilson, 55(1988).
2. 馬場 輝, 塑性と加工, Vol.29, No.324, 13(1988)
3. 은일상 등, 국방연구개발 대토론회, 국방과학연구소, 151(1991).
4. Flow Forming 공법에 의한 해룡연소관 개발, 기술보고서 SMSD-521-88103, 국방과학연구소, 1988.
5. 은일상 등, 제 2차 유도무기 추진기관 학술대회 논문집, 국방과학연구소, 125(1992).
6. 은일상 등, 제 2차 유도무기 추진기관 학술대회 논문집, 국방과학연구소, 213(1992).
7. 275" 로켓트(MK 4/40) 일체칸막이형 모터케이스 개발 기술지원, 기술보고서 MSRD51990359, 국방과학연구소, 1990.
8. 275 인치 로켓트 모터(MK 66) 기술보고서(11), 기술보고서 MSDC-519-940075, 국방과학연구소, 1993.
9. 齊藤, 正美, 塑性加工 春季講演會, 33 (1989).
10. 홍성인 등, 한국소성가공학회 추계학술대회논문집, 39(1993).
11. 은일상 등, 한국소성가공학회 추계학술대회논문집, 47(1993).
12. 홍성인 등, 한국소성가공학회지, 제2권 제4호 통권 제5호, 70(1993).
13. W. Johnson, Int. J. Mech. Sci., Vol. 4, 323(1962).
14. R.F. Decker, Source Book on Maraging Steels, 359(1979).
15. NASA-SP-8025, 21(1970).

Table 1 Chemical Composition of 18%-250 Maraging steel

	Ni	Co	Mo	C	P	S	Mn	Si	Ti	Al	Fe
Analysis (wt. %)	18.40	8.31	4.96	0.013	0.001	0.004	0.005	0.029	0.48	0.11	Bal
Spec. *	17.0 ~ 19.0	7.0 ~ 8.5	4.6 ~ 5.2	0.03 Max	0.010 Max	0.010 Max	0.10 Max	0.10 Max	0.3 ~ 0.5	0.05 ~ 0.15	Bal

\* MIL-S-46850D

Table 2 Variation of feed rate

Roller geometry			Reduction Ratio of Rollers	Feed (mm/min)		RPM (rev/min)
$\alpha$ (deg)	R (mm)	$\beta$ (deg)		I	II	
Z	25	6	8	Z : 4	75	300
Y	30	5	8	Y : 3	150	
X	30	4	8	X : 3	225	
					300	

Table 3 Variation of reduction ratio and feed rate

	Reduction Ratio			Feed (mm/min)		RPM (rev/min)
	Z	Y	X	I	II	
I	4	3	3	I 75	150	300
II	2	2	1	II 225		
III	5	4	1	III 300		

Table 4 Variation of roller geometry and feed rate

	Roller geometry			Feed (mm/min)		RPM (rev/min)
	$\alpha$ (deg)	R (mm)	$\beta$ (deg)	I	II	
I	30	4	8	I 75	150	300
II	30	4	3	II 225		
III	30	8	8	III 300		

Table 5 Mechanical properties of 18 $\times$  Ni-250 maraging steel

No.	Properties Cond	Tensile Strength (Ksi)	0.2% Yield Strength (Ksi)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Notch* Strength (Ksi)	NSR* (NTS/YS)
A	Preform + SHT (As Recieved)	160	133	17.5	71	—	—
B	Preform + SHT + Aging	275	267	7	—	—	—
C	SHT + F/F	192	181	2.63	—	—	—
D	F/F + SHT + Aging	286	278	5.8	—	272	0.98
E	F/F + SHT + Aging	305	305	4.9	—	259	0.85

\* Notch radius = 0.018 mm max. , Kt = 17

Table 6. Result of uniaxial hydrotest of the very thin high precise motor cases.

Test No.	Thickness (mm)	Burst Pressure (psi)	$\sigma^{(1)}$ (Ksi)	$\sigma_{eq}^{(2)}$ (Ksi)	S.F <sup>(3)</sup>
1	0.44	3186	306	149.83	1.36
2	0.4	2983	310	152.2	1.34

- 1) Hoop stress calculated from burst pressure.
- 2) Equivalent stress calculated from measured strain at 2500 psi pressure.
- 3) Safety factor obtained from yield strength of 290 ksi.

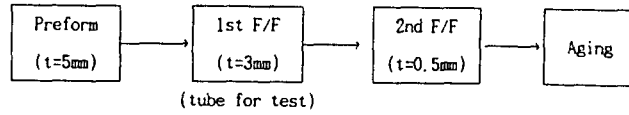


Fig.1 Fabricating Process of a very thin wall and high precision motor case.

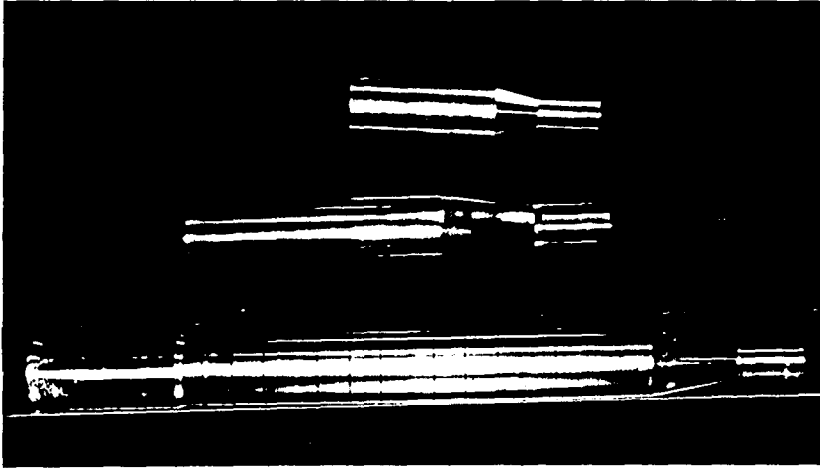


Fig.2 Procedure of flow forming experiment : a) machined preform, b) 1-pass flow formed tube, c) 2-pass flow formed motor case.

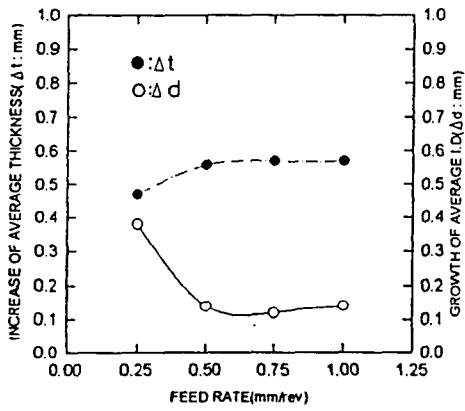


Fig. 3. Effect of feed rate on the thickness increase and the diametral growth.

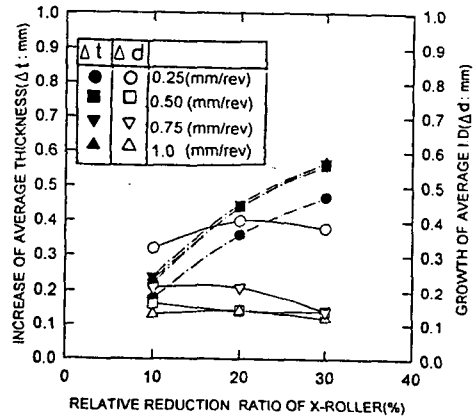


Fig. 4. Effect of relative reduction ratio of X-roller on the thickness increase and the diametral growth at constant various feed rate.

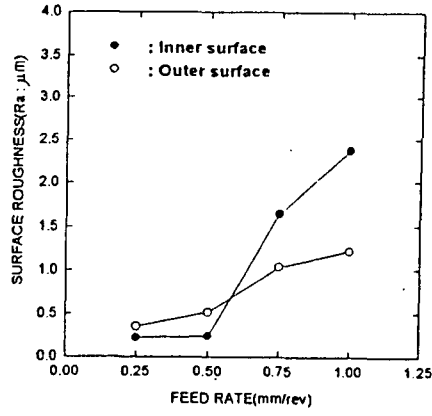
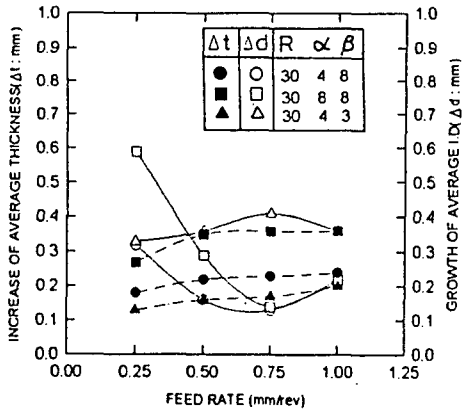


Fig. 5. Effect of X-roller geometry on the thickness increase and the diametral growth at the various feed rate (relative reduction ratio X-roller : 10%).

Fig. 6. Effect of feed rate on the surface roughness of flow formed motor case (X-roller geometry :  $\alpha=30$ deg., R=4 mm,  $\beta=10$ deg., relative reduction ratio X-roller : 10%).

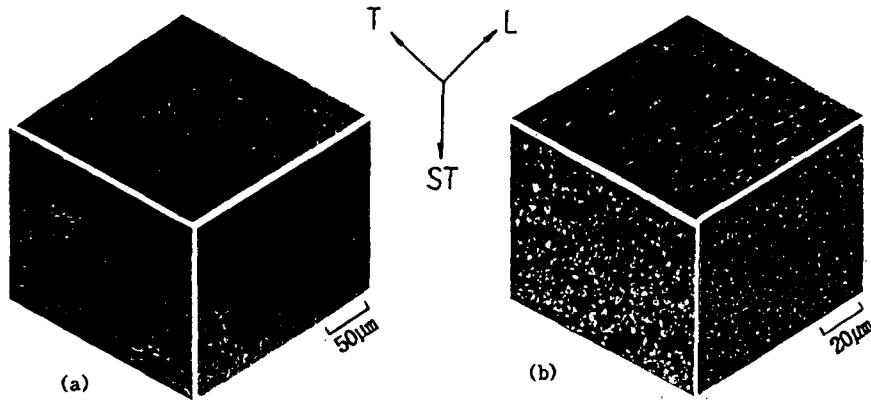


Fig. 7 Optical micrographs of 18Ni,C-250 maraging steel : a) extruded and aged preform, b) flow formed to about 90 % and aged motor case.

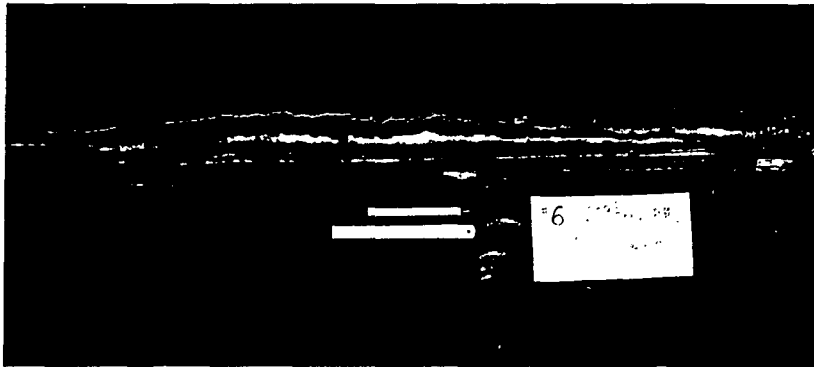


Fig. 8 Appearance of burst motor case after uniaxial hydro-burst test.