

상단 아치 형상 중실 오스테나이트계 스테인리스강의 2단 인발 공정 최적화

배성준¹ · 김정훈² · 홍성박³ · 홍성규⁴ · 남궁정⁵ · 이광석^{6, #}

Optimization of Two-Step Cold Drawing for Upper Arch-Shape Solid Type Austenitic Stainless Steel

S.J. Bae, J.H. Kim, S.B. Hong, S.K. Hong, J. Namkung, K.S. Lee

(Received May 18, 2022 / Revised October 11, 2022 / Accepted November 28, 2022)

Abstract

In the automotive industry, cold-drawn austenitic stainless steel is commonly used to handle high fuel pressures in gasoline direct injection (GDI) engines. In this study, we analyzed the effects of main process variables such as cross-sectional shape, drawing speed and friction coefficient on the microstructure, hardness and residual stress of the drawn material in the two-step cold drawing process. By changing the cross-sectional shape in the first-step cold drawing, the possibility of improving the shape accuracy or physical properties of the finally cold-drawn fuel rail pressure sensor product was investigated.

Keywords: Austenitic stainless steel, Cold-drawing, Finite element analysis, Strain distribution, Residual stress

1. 서 론

자동차 배기가스 중 온실가스(CO₂, NO_x, SO_x) 배출량 저감, 엔진 출력특성 및 토크 향상, 다운사이징 등 가솔린 직접분사식(GDI, Gasoline Direct Injection) 연료분사시스템 제조 업계의 요구사항은 결국 연비 향상과 연계된 엔진 부품의 경량화/고내압/고강도 동시 구현 소재부품 기술 확보이다[1-3]. 즉 연료 펌프와 인젝터 사이에서 고압 조건에서의 목표 신뢰성 및 강도는 점점 높게 요구되고 있는 실정으로, 현재 250 bar 수준의 연료분사 압력 대비 미래에는 350 bar 이상의 수준을 요구할 것으로 예상된다[4,5].

현재는 250 bar 수준의 연료분사 압력에 매칭되는 500 MPa급 이상 오스테나이트계 스테인리스강으로 제조한 연료레일(fuel rail)이 주로 활용되고 있다. 그러나 미래에는 350 bar 이상의 연료분사 압력에 견딜 수 있는 800 MPa 급 이상 고강도화를 요구할 것으로 예상되며, 이를 만족하는 부품 물성 및 최종 형상은 기본적으로 고강도 스테인리스강의 높은 변형량을 부가한 냉간 인발 공정을 이용함으로써 확보 가능할 것으로 예상된다.

또한 연료레일 압력센서(fuel rail pressure sensor)는 엔진에 정량의 연료를 공급하기 위해 연료 공급 양을 조절하는 장치로, 연료 레일과 동일 스테인리스강 인발재가 활용되며, 인발품의 고강도화, 형상 정밀도 및 홀 가공성 기반의 수율 향상, 내압특성 향상, 잔류응력 저감 등의 요구 특성 확보를 위해서는 열처리를 포함한 적절한 인발 공정 설계 기술 개발이 선행되어야 한다[6-8].

1. 한국재료연구원 재료공정연구실, 기술지원
2. 한국재료연구원 재료공정연구실, 선임연구원
3. 부곡스텐레스, 부사장
4. 리녹스, 대표이사
5. 포항산업과학연구원, 수석연구원
6. 한국재료연구원 재료공정연구실, 책임연구원

Corresponding Author: Korea Institute of Materials Science,
E-mail: ksl1784@kims.re.kr, ORCID ID: 0000-0002-4378-7902

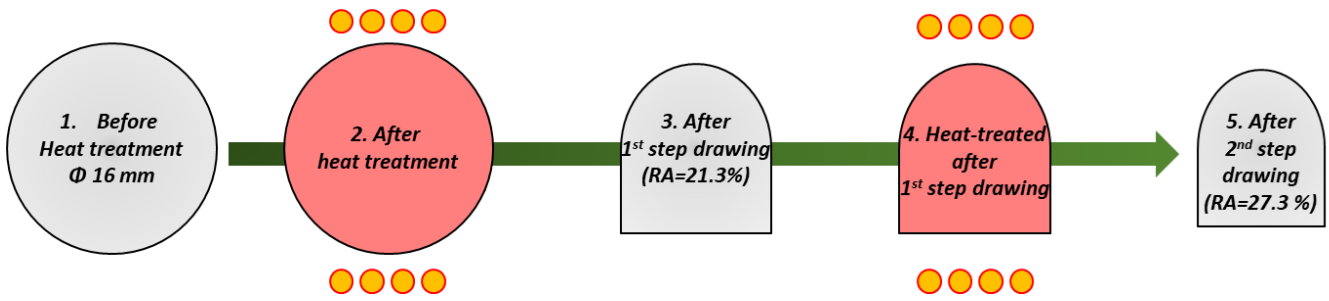


Fig. 1. Schematics of two-step cold-drawing process

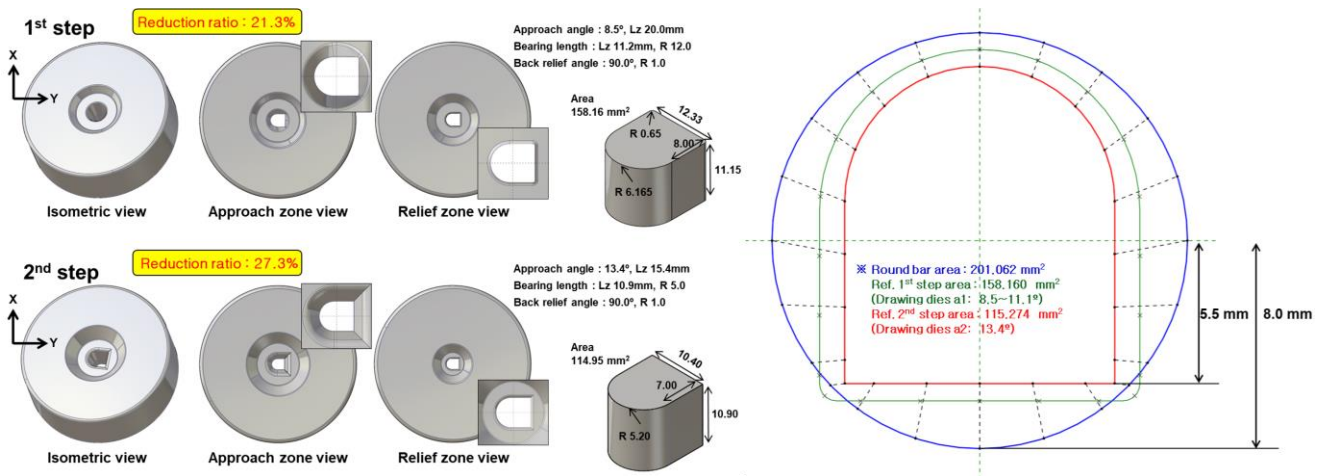


Fig. 2. (Left) Die geometry of present cold-drawing process, (Right) Cross-sectional shape for each process

본 연구에서는 오스테나이트계 스테인리스강 연료 레일 압력센서의 2단 냉간 인발 공정에 있어서 1차 인발 공정 형상(단면)의 공정변수가 최종 인발재의 미세조직, 경도, 잔류응력 등에 어떠한 영향을 미치는지 분석하고 해당 제품의 허용 잔류응력 및 강도 연신율지수 요구 수준 확보를 위한 최적 인발 공정 설계안을 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

현재 적용 중인 2단 인발 공정은 크게 그 단계를 '1. 직경 16 mm 환봉 → 2. 1차 열처리 → 3. 1st step 냉간 인발 → 4. 2차 열처리 → 5. 2nd (최종) 냉간 인발'과 같이 크게 5단계로 나눌 수 있으며, 단면 형상 개략도 및 기존 시편 형상은 Fig. 1과 같이 도시할 수 있다. 실제 2단 인발 공정에 활용 중인 인발 금형을 3차원 측정을 통해 형상 정보를 추출한 결과는 Fig. 2와 같다. 두 번의 냉간 인발-열처리 공정을 반복하여 최종 목표 형상 상단 아치형 단면을 가지는

중실 인발재를 확보할 수 있으며, 첫 번째 및 두 번째 단면 감소율(RA, reduction of area)은 각각 21.3%, 27.3%였다.

Fig. 1의 1. 직경 16 mm인 304 오스테나이트계 스테인리스강 환봉, 2. 1차 열처리재, 3. 1st step 냉간 인발재, 4. 2차 열처리재, 5. 2nd (최종) 냉간 인발재를 Fig. 3과 같이 확보, 주요 단계별로 XRD (ASTM E2860) 방법을 활용해 위치별 잔류응력 값을 확인하였다.

Fig. 4와 같이 길이 방향으로 20 cm 간격으로 간섭 받지 않는 3개의 구역(section 1, 2, 3으로 표기)에서, 4개의 각기 다른 위치(Fig. 4 우상단 A-A' 단면의 points 1, 2, 3, 4로 표기)에서 잔류응력을 측정된 뒤 위치별 평균값을 도출하고자 하였다. 또한 인발 방향으로 환상 및 봉상 시편을 Fig. 3의 1. 직경 16 mm인 304 오스테나이트계 스테인리스강 환봉 및 2. 1차 열처리재의 경우 환봉 중앙부에서, Fig. 1의 3. 1차인발재, 4. 2차 열처리재, 5. 2차 (최종) 냉간 인발재의 경우 Fig. 5와 같이 표면 및 중앙부에서 ASTM E8M (표점 거리 25 mm) 및 ASTM E8M 05 (표점 거리 12.5 mm)

기준으로 각각 가공, 기계적 물성을 확인하였고, 변형률속도는 10^{-3} s^{-1} 을 적용하였다. 이외에도 잔류응력 및 기계적 물성에 영향을 미치는 위치별 미세조직은 전계방사형 주사전자현미경(Field-Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) 및 전자후방산란회절(Electron Backscatter Diffraction, EBSD) 분석을 통해 확인하였고, 경도 분포 변화 또한 마이크로 비커스 및 로크웰 C 경도 측정을 통해 확인하였다.



Fig. 3. Photos of as-received, annealed and cold-drawn γ -stainless steel

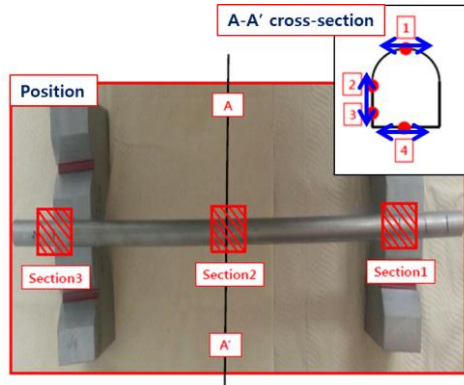


Fig. 4. Location of sections where residual stresses of cold-drawn arch-type γ -stainless steel were measured

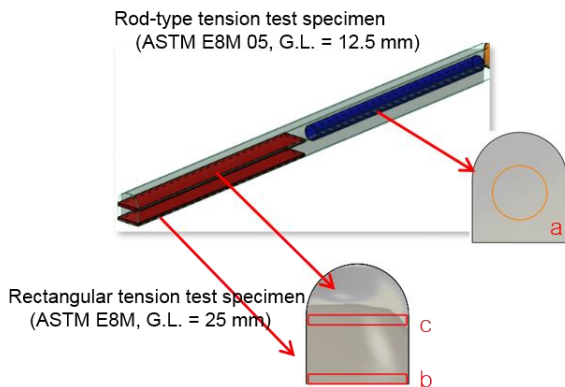


Fig. 5. Location of tensile specimens cut from cold-drawn arch-type γ -stainless steel

기존 형상을 참고로 설계한 신규 단면 형상은 거시적으로는 단면 감소율을 변경시키고, 미시적으로는 국부적인 미충진(unfilling) 현상을 제거함과 동시

에 위치별 소재 유동 분포를 유도할 수 있다. 여러 형상으로 설계한 신규 단면형상이 전체 인발 공정 변형률, 잔류응력 변화, 최종 인발재 충진률 등에 미치는 영향에 대해 Forge NxT 2.0를 활용한 유한요소 해석을 수행해 예측하였으며 그 상세 조건은 Table 1과 같다.

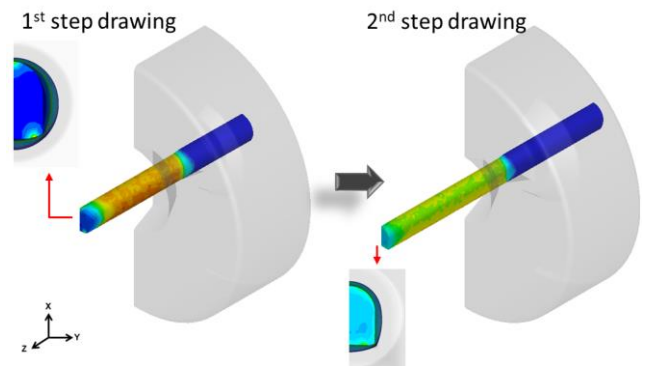


Fig. 6. FE model of 2-step shape drawing process

Table 1. 2 step cold drawing simulation conditions

Material	STS304 exp.
Problem definition	3D [180°] symmetric model
Drawing speed	100 mm/s
Friction (Coulomb friction)	0.05
Heat transfer coefficient	2000 W/(m ² k)
Billet and Die temperature	20 °C
Element size (Tetra)	0.18~1.0 mm
Number of nodes	9,035 ea
Number of elements	48,362 ea

1차 인발 공정 단면 형상을 기존 중실 아치형 및 신규 round shape으로 규정하였고, 기존 중실 아치형 설계 형상은 제품 바닥부의 폭 방향 잔류응력의 영향을 알아보기 Fig. 7과 같이 단면을 설계하였다. 최종 목표 형상을 유지하고 폭방향 비율을 크게 변경하여 설계하였으며, 2A' 형상의 단면적(159.6 mm²)은 기존 1차 인발 단면적(158.2 mm²)과 유사하게 설계하였으며, 2B' 형상은 최종 목표 단면과 2A' 형상 단면의 평균치로 설정하였다.

신규 볼록형 설계는 1차 인발 시 전체 변형률을 상대적으로 균일하게 유도하는 형상으로 1차 인발 기준 최소 15.3%, 최대 29.5% 범위 내에서 다양한

단면감소율 변화를 설계하였다(기존 21.3%).

초기 round bar와 최종 제품 형상을 분할한 2d 좌표를 획득하여 수치적인 평균을 구하여 볼록형의 기준 형상 1.0A(1.0B) 기준으로 단면적이 약 3% ~ 9% 증가하는 A타입(숫자가 클수록 높이/폭 증가)과, 감소하는 B타입(숫자가 클수록 높이/폭 감소) 형상을 Fig. 8과 같이 설계하였다.

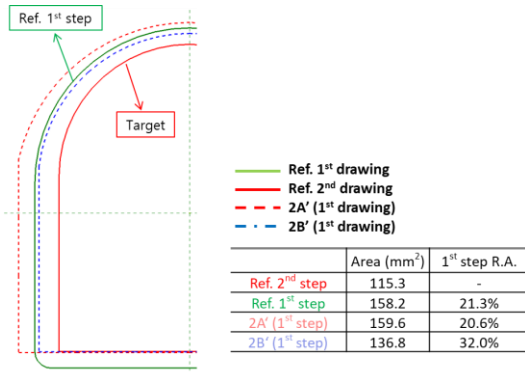


Fig. 7. Offset shape design of reference arch

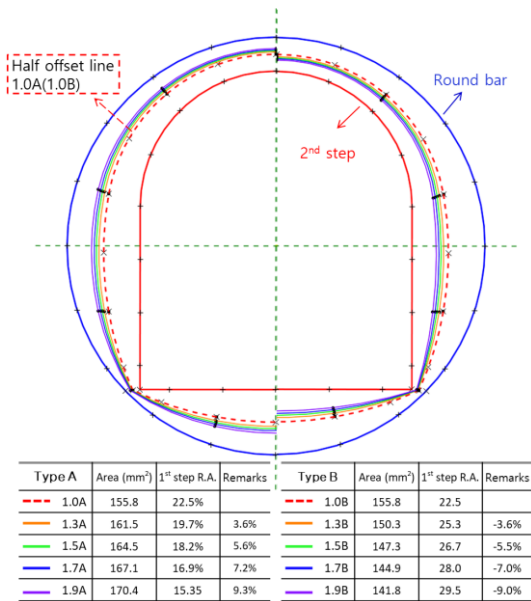


Fig. 8. Arithmetically designed convex-shaped intermediate geometries

3. 결과 및 고찰

3.1 기초 물성 도출

단계별로 확보한 기준 모재, 열처리재 및 인발재의 인장 물성은 Fig. 9 및 Table 2와 같다. 첫 번째 및

두 번째 인발 후 중앙부로부터 확보한 인장 물성의 경우 두 번째 인발재의 강도가 첫 번째 인발재 대비 다소 높고 연신율이 떨어지는 현상을 확인하였는데, 이는 단면 감소율이 두 번째 인발시 27.3%로 첫 번째 인발의 21.3%보다 다소 높기 때문으로 판단된다.

관상 시편의 경우 중앙부 대비 바닥부 인장 물성의 비교가 가능한데, 최종 인발품의 바닥 위치에서의 강도가 높고 연신율이 낮은 현상은 바닥부에서의 국부 변형률이 높아 가공 경화가 더 심하게 진행되었음을 의미한다. Table 2의 1차 인발 후 봉상, 관상 인장 시험 결과로 미루어 보아 냉간 인발 단면감소율을 21% 이상 수준으로 공정 설계한다면 인장강도 800 MPa 이상의 물성을 갖는 최종 인발재를 확보가 가능할 것으로 예측할 수 있었다. 이와 같은 공정 및 위치별 물성 변화는 로크웰 C 경도 측정 결과로부터도 확인 가능한데, Figs. 10(a) 및 10(b)는 각각 첫 번째 및 두 번째 인발재의 표면 및 절단면 경도를 3회 측정해 평균값을 도시한 결과로, 첫 번째 대비 두 번째 인발재가 전체적으로 경도 수준이 높고, 특히 바닥부 및 하단 모서리부의 로크웰 C 경도값이 33 이상으로 가장 높은 수준임을 확인할 수 있다.

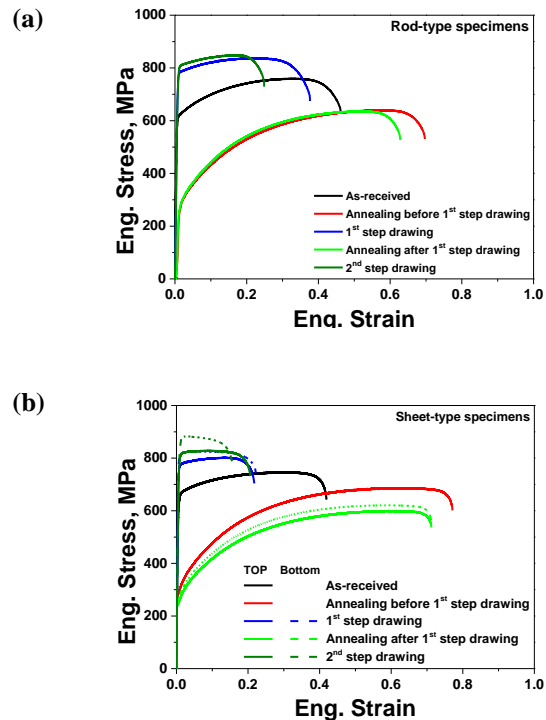


Fig. 9. Engineering stress-strain curves obtained by (a) rod-type and (b) sheet-type specimens cut from various locations of the as-received, annealed and cold-drawn γ -stainless steel

Table 2. Tensile properties from various locations of the as-received, annealed and cold-drawn γ -stainless steel

Rod Type	YS (MPa)	UTS(MPa)	El.(%)
As-received	595.8	759.6	46.2
As-annealed	258.7	640.2	69.7
After 1 st drawing	775.2	837.2	37.7
1 st drawing +Annealing	257.0	636.0	62.8
After 2 nd drawing	784.3	848.9	24.9

Sheet Type	YS (MPa)	UTS (MPa)	El.(%)
As-received	617.0	746.5	41.9
As-annealed	271.1	686.6	77.1
After 1 st step(top)	781.2	826.1	22.2
After 1 st step(bottom)	755.2	802.0	21.7
1 st step + Annealing(top)	261.1	622.7	71.2
1 st step + Annealing(bottom)	239.4	600.4	71.2
After 2 nd step(top)	770.0	884.2	15.8
After 2 nd step(bottom)	775.2	828.2	20.6

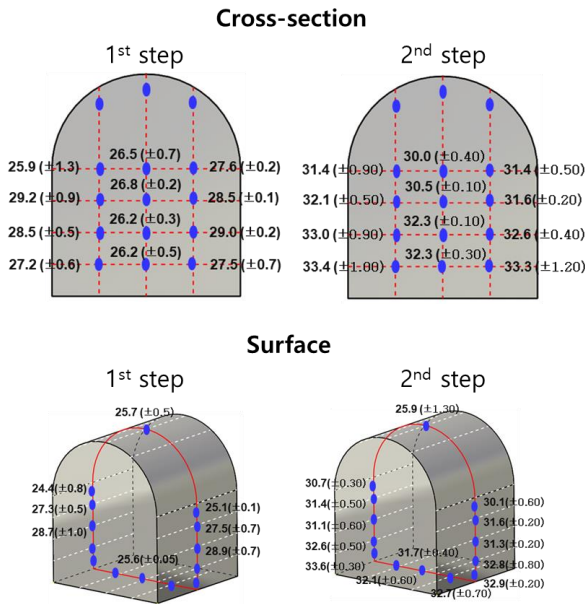


Fig. 10. Rockwell C hardness distribution obtained from 1st and 2nd step cold-drawn γ -stainless steel specimens

최종 인발재의 위치별 미세조직 변화를 EBSD 역극점도(Inverse Pole Figure, IPF) map으로 정리하면 Fig.

11과 같다. Fig. 11(a)는 직경 16 mm 열처리 환봉 단면 중앙부에서 확인한 IPF map으로, 상대적으로 조대한(평균 결정립도 19.4 μm) 미세조직을 보였다. 반면 1차 인발 후 중앙부 및 표면부 IPF map은 Figs. 11(b) 및 11(c)와 같다. GOS (grain orientation spread) 값이 작고 indexing이 잘 안되는 분율이 높은 위치, 즉 하단 모서리부에서 가장 미세한 결정립도를 보이는데, 이는 모서리부에서 변형량이 상대적으로 많았음을 의미한다. 2차 인발 후 중앙부 및 표면부 IPF map은 Figs. 11(d) 및 11(e)와 같다.

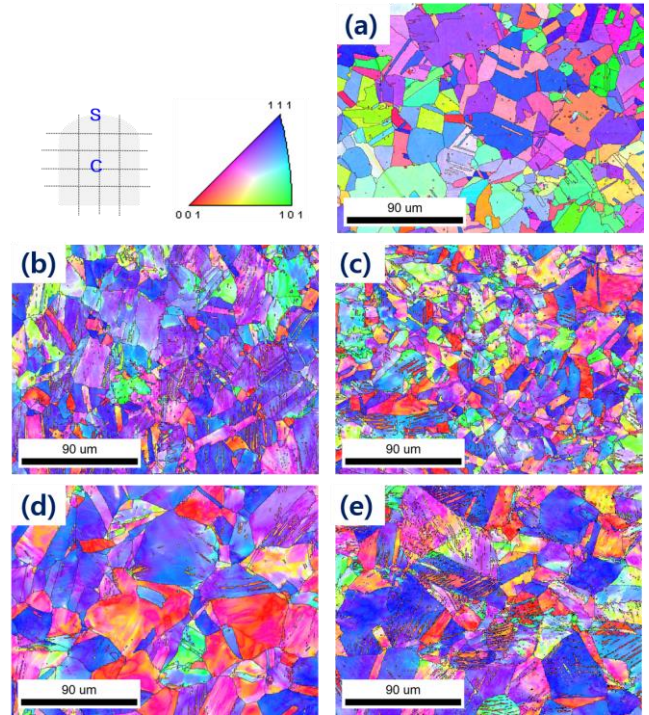


Fig. 11. Inverse pole figure maps obtained from representative cross-sectional points of (a) annealed round bar, (b) center part and (c) surface part of 1st-step cold drawn solid, and (d) center part and (e) surface part of 1st-step cold drawn solid γ -stainless steel

XSTRESS 3000 G2R (Cr tube)를 활용해 측정된 인발 방향 및 폭 방향으로의 잔류응력 측정 결과는 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12(a)는 인발 방향 잔류응력 측정 결과로, 1차 인발 후 열처리(full annealing)를 통해 인장 잔류응력이 대부분 소멸되는 현상을 확인하였고, 2차 인발 후 잔류응력이 급격히 다시 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 특히 상단 아치와 옆면 변곡점 부근(Fig. 12의 위치 2) 및 바닥 중앙부(Fig. 12의 위치 4)에서 상대적으로 높은 400 MPa 이상의 잔류

응력을 보였는데, 이는 인발 공정 최적 설계를 통해 잔류 응력 절대값 및 위치별 분포 차이를 감소시키는 연구가 필수적으로 수반되어야 함을 의미한다.

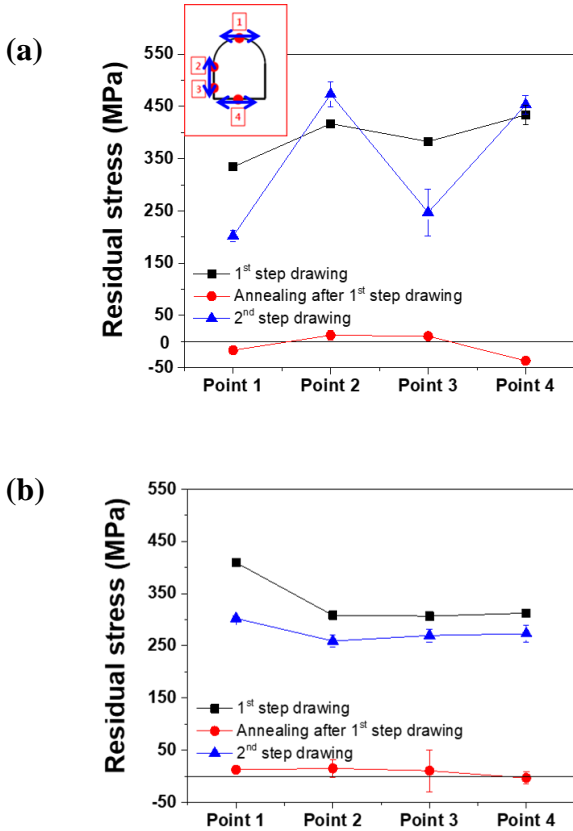


Fig. 12. Residual stress variations on the basis of (a) drawing and (b) width directions for 2nd step cold drawn solid γ -stainless steel specimens

3.2 1차 인발 단면 형상 변경이 최종 인발재 잔류응력 저감에 미치는 영향 유한요소해석 결과

2단 인발 공정의 첫 번째 인발 단면 형상 및 단면 감소율 변경이 최종 인발 공정의 하중, 변형률, 잔류 응력에 미치는 영향을 분석하기 위해 Fig. 7, Fig. 8과 같이 다양한 형상 변경안을 제시하였다. 이를 바탕으로 단면감소율에 따른 최종 인발에 걸리는 하중을 유한요소 해석을 통해 확인한 결과는 Fig 13과 같다.

볼록형 설계의 경우 기준 형상인 1.0A를 기준으로 1차, 2차 인발 하중이 역전되는 것을 확인할 수 있으며, 단순히 단면감소율이 증가할수록 결국 인발 하

중 또한 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

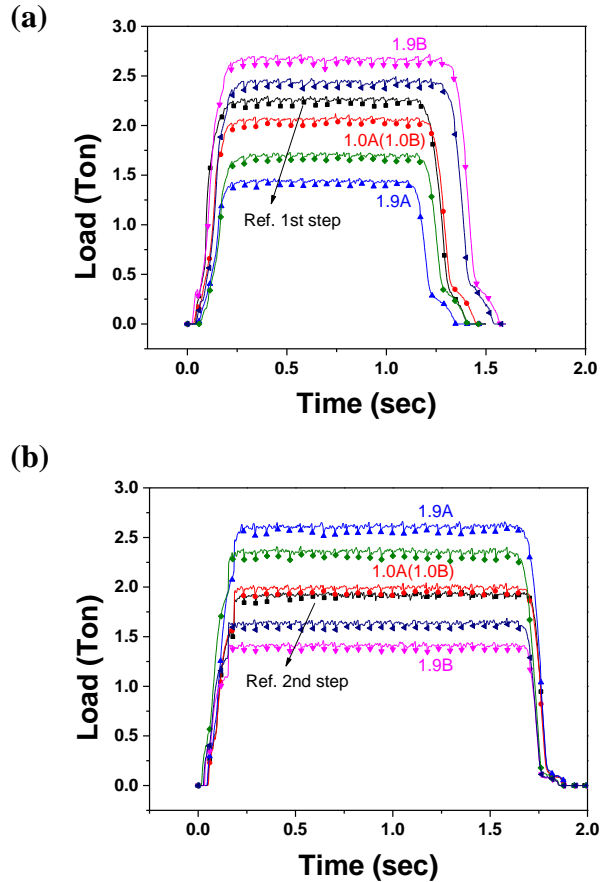


Fig. 13. Forming load results of redesign drawing process. (a) 1st step drawing process, (b) 2nd step drawing process

최종 인발 단계에서 정상 상태에서의 폭 방향으로의 유효 변형률 변화와 주응력 분포는 Fig. 14와 같다. 폭 및 길이 방향 공허 기준 대비 1.5B/1.9B와 같이 단면을 설계함으로써 유효 변형률을 낮출 수 있음을 확인할 수 있다. 기존 공정 대비 1.5B 공정이 폭 방향으로의 주응력 분포 차이 및 절대값을 낮추는 데 유효함을 확인할 수 있었고 유사한 경향으로 실제 인발 후 잔류응력 수준을 낮출 수 있을 것으로 예상된다. 이와 같은 1차 인발 단면 설계 변경이 최종 인발 단계에서의 충전률에 미치는 영향은 Fig. 15와 같이 예측되었는데, 기존 공정 대비 1.5B/1.9B와 같은 설계가 최종 충전률에 악영향을 주지 않고 99.6% 수준의 충전률을 유지할 수 있음을 알 수 있다.

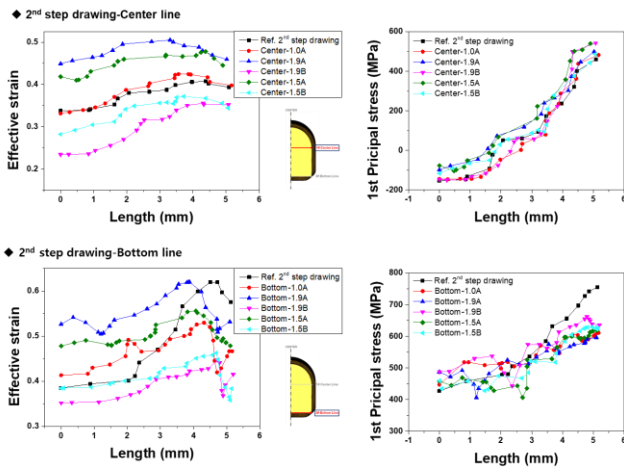


Fig. 14. FE analysis results of (left) effective strain distribution and (right) 1st principal stress distribution in the center and bottom of the redesigned drawing process

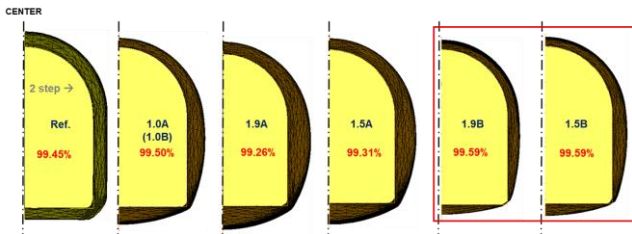


Fig. 15. FE analysis results of 2nd step drawing filling ratio

설계한 블록형 단면 중 폭 방향 변형률 분포 및 1차 주응력 편차가 낮은 1.5B 형상과 기존 arch 형상으로 설계한 2A' 형상의 최종 인발재의 바닥면 주응력 분포는 Figs. 16 및 17과 같다. 최종형상의 높이 방향 중앙부의 폭방향 1차 주응력 분포는 기존 형상(1차 주응력 편차 614.9 MPa)과 비교하여 2A' 형상(1차 주응력 편차 472.3 MPa)의 결과로 약 23% 개선됨을 확인하였고, Fig. 17(b)는 바닥부의 폭 방향 1차 주응력 분포로 블록형 1.5B 설계 형상이 내/외부 1차 주응력 편차를 확연히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 1차 인발 시 전체적으로 균일한 변형률을 유도하는 블록형 설계 단면이 2차 인발에서도 다른 설계 단면에 비해 변형률 분포에 유리함을 판단할 수 있었으며, Fig. 18을 보면 블록형 1.5B 형상이 2단 인발 공정 중 폭 방향 내/외부 변형률 분포가 비교적 균일하며 2차 인발 시 그 특징이 두드러지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 보아 블록형 1.5B 형상이 최적의 형상임을 판단할 수 있었다.

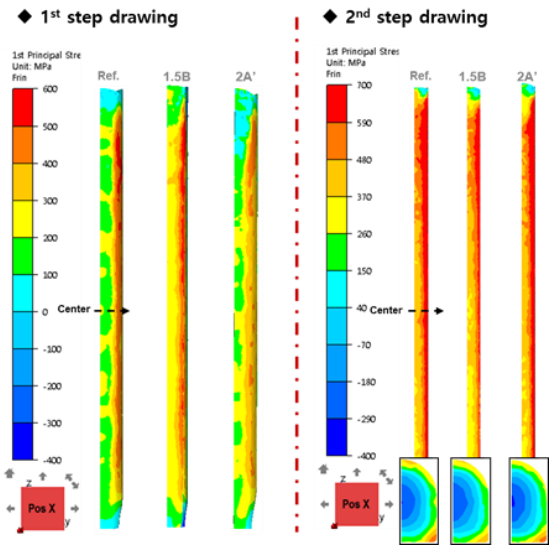


Fig. 16. 1st principal stress distribution result of FE analysis of proposed design at bottom surface

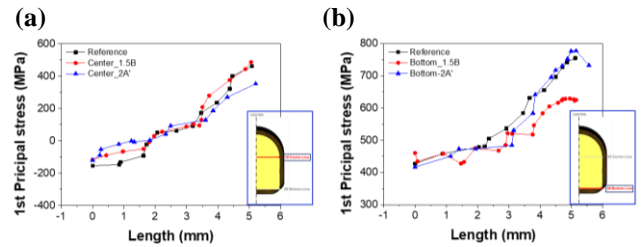


Fig. 17. Distribution of 1st principal stress for width direction at (a) center and (b) bottom surface

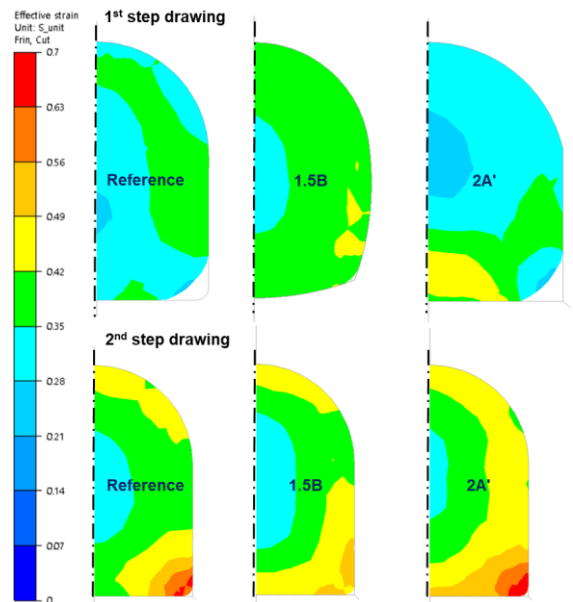


Fig. 18. Effective strain distribution result of FE analysis of proposed design

3.3 1차 인발 단면 형상 변경이 최종 인발재 잔류응력저감에 미치는 영향 실험적 검증

3.2장에서 유한요소해석을 통해 충전률 향상과 잔류응력 저감이 동시에 가능할 1차 인발 블록형 단면 최적 형상을 1.5B로 도출하였다. 비교를 위해 기존 1차 인발 형상과 유사하고 단면감소를 또한 거의 그대로 유지하나 장축/단축 값만 미세하게 수정한 신규 형상을 ‘Case A’로, 앞의 블록형 1.5B 형상을 ‘Case B’로 명명하고자 한다. 단면 형상의 특징은 Fig. 19 및 Table 3와 같이 정리 가능하다.

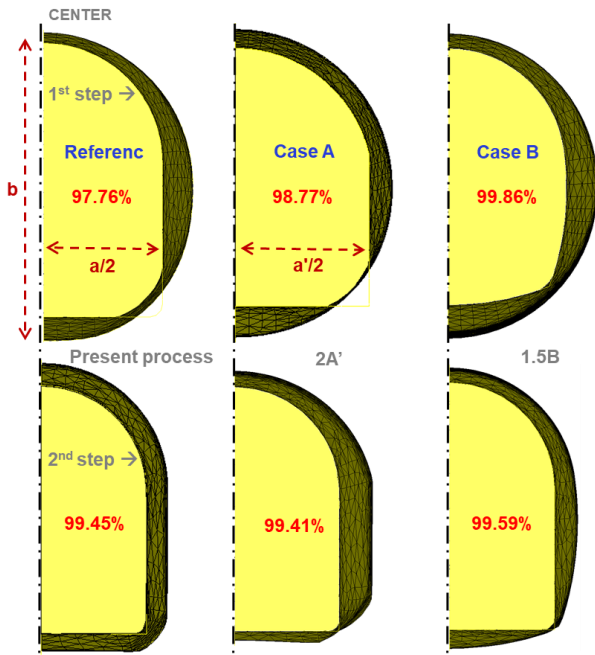


Fig. 19. Comparison of the reference shape for 1st step cold drawing with newly designed ones (Cases A & B)

Table 3. Characteristics of cross-section shapes adopted in this study for actual cold drawing experiment

Shape	Area (mm ²)	1 st step drawing		2 nd step drawing	
		RA (%)	RA (%)	RA (%)	RA (%)
Ref.	158.16	21.34	27.12		
Case A	159.62	20.61	27.76		
Case B	147.34	26.72	21.76		

Fig. 19 상단부의 1차 인발 단면에 맞는 Case A 및 Case B 인발 금형을 설계, 제작하였고, 그 실사는

Fig. 20과 같으며, 소재와 직접 접촉하는 부분은 초경 합금을 적용하였다. 또한 제작한 인발 금형을 활용해 1차 인발을 수행한 순서를 간단히 현장 사진을 참조해 도시하면 Fig. 21과 같다.

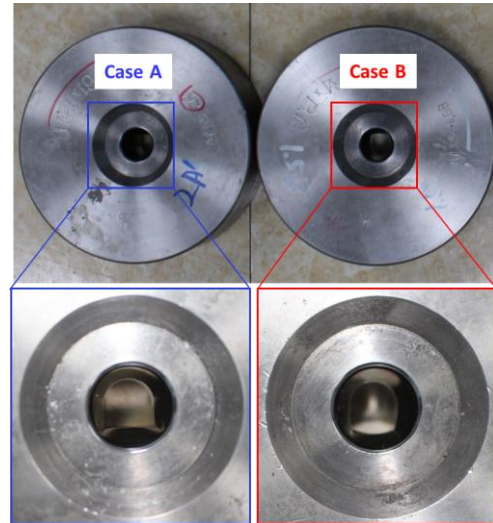


Fig. 20. Top-view of the dies for newly designed 1st-step cold drawing adopted in this study



Fig. 21. Photos for representative flowchart showing 1st step cold drawing followed by bright annealing

신규 1차 인발 금형들을 적용한 2차 인발품들을 확보하였으며, 인발품들로부터 Fig. 4와 동일한 위치에서 표면 및 중앙부에서 ASTM E8M (표점 거리 25 mm) 및 ASTM E8M 05 (표점 거리 12.5 mm) 기준으로 각각 인장 시편을 가공한 뒤, 변형률속도는 10⁻³ s⁻¹ 조건으로 1축 인장 시험을 수행한 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. Tensile properties from various locations for representative cold-drawn γ -stainless steels

Specimens	YS (MPa)	UTS (MPa)	EL. (%)
Ref._rod	644	893	22.0
Case A_rod	784	905	27.7
Case B_rod	656	837	30.1
Ref._bottom	782	934	12.0
Case A_bottom	839	953	14.2
Case B_bottom	766	880	24.6
Ref._center	588	853	20.0
Case A_center	730	873	18.5
Case B_center	585	812	27.4

기존 대비하여 1차 인발 단면을 볼록형으로 유지하면서 높이와 폭을 수치 평균 대비 줄이는 방향으로 (즉 단면 감소율을 높이는 방향으로) 최적화한 Case B 설계의 경우, 최종 제품 요구 수준인 인장 강도 800 MPa 이상을 유지하였고, 항복 강도 또한 기존 대비 거의 유사한 수준으로 유지하면서 연신율을 상당 수준 높일 수 있었다. 특히 높은 인장 잔류응력 분포가 예상되는 바닥부의 경우 연신율을 기존 대비 두 배 이상 높일 수 있었다. 이러한 경향은 Fig 22 Case B의 바닥부(point 4) 잔류응력(기존 공정 대비 ~1/2 수준) 측정 결과로 확인이 가능하며, 따라서 Case B 설계안이 추가 가공 작업(홀 가공 및 튜브 접합 등)에의 용이성 또한 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

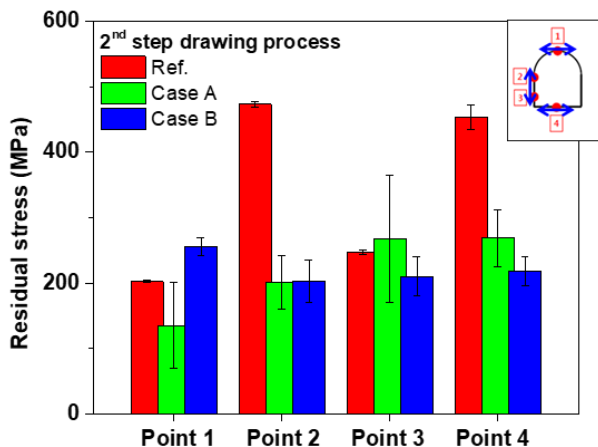


Fig. 22. Residual stress results of the redesigned process specimen on the drawing directions

4. 결론

본 연구는 연료분사시스템의 한 부품인 압력센서의 기존 인발 공정을 개선하기 위해 수행하였으며, 1차 인발 설계를 단면 형상(볼록형, 아치형), 단면 감소율 등의 공정 변수를 통해 최적 공정 설계안을 도출한 결과를 정리하면 아래와 같다.

(1) 기존 인발 공정에서 발생하는 문제점인 인발재 비틀림 현상을 해결하기 위해 제품 바닥면의 폭 방향 잔류응력 편차를 줄이는 냉간 인발 공정을 설계하고자 하였다. 우선 유한요소해석을 통해 1차 인발 형상 및 단면감소율 변화에 대해 최종 인발재가 받게 될 잔류응력 영향을 확인하였고, 이를 토대로 표면 잔류응력 저감 및 제품 충진률을 개선할 수 있는 설계안을 도출하였다.

(2) 유한요소해석 기반 도출한 인발 재설계 공정을 적용해 단면 형상이 변경된 인발 다이스 및 이를 적용한 시제 인발품을 제작하였고, 이를 분석한 결과 기존 1차 인발 형상 대비 볼록형으로 설계하되, 수치 평균 대비 폭과 높이를 동시에 감소시켜 궁극적으로 1차 인발 단면 감소율을 22.5%에서 26.7%까지 높이는 단면 형상이 최종 제품 요구 인장강도(800 MPa급 이상) 및 형상을 만족하면서도 기존 공정에 비해 바닥부 표면 인장 잔류응력을 저감하는 최적 조건임을 결론지을 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업핵심개발사업(No. 10063258)과 소재부품기술개발사업(No. 20010942)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] S.E. Neyestani, S. Walters, G. Pfister, G.J. Kooperman, R. Saleh, 2020, Direct radiative effect and public health implications of aerosol emissions associated with shifting to gasoline direct injection (GDI) Technologies in light-duty vehicles in the united states, Environ. Sci. Techno., vol. 54, pp. 687-696.
- [2] C. Weber, I. Sundvor, E. Figenbaum, 2019, Comparison

- of regulated emission factors of Euro-6 LDV in Nordic temperatures and cold start conditions: Diesel- and gasoline direct-injection, *Atmospheric Environment*, vol. 206, pp. 208-217.
- [3] R. Pesic, S. Milojevic, 2013, Efficiency and ecological characteristics of a VCR diesel engine, *Int. J. Automotive Technology*, Vol. 14, pp. 675-681.
- [4] K. Koo, S. Oh, Y. Kang, D. Kim, 2019, Development of reliability test mode for GDI fuel rail, *SAE Technical Papers*, Vol. 2019-April.
- [5] J. Park, J. Lee, H. Kim, D. Lim, Y. Park, H. Song, 2019, An analytical study with engine exciting force for development of next generation turbo-GDI fuel rail and tube, *KSAE 2019 Annual Spring Conference*, pp. 160-161.
- [6] L. Romoli, G. Lovicu, C.A.A. Rashed, G. Dini, M. De Sanctis, M. Fiaschi, 2015, Microstructural changes induced by ultrashort pulsed lasers in microdrilling of fuel nozzles, *Procedia CIRP*, Vol. 33, pp. 508~513.
- [7] S. Ahn, J. Park, J. Won, H. Kim, I. Kang, Y. Cho, S. Shin, 2017, An analytical FEM-based study of the drawing process of an ultra-high-pressure common-rail fuel tube, *J. Mech. Sci. Tech.*, vol. 31, pp. 3389-3396.
- [8] W. Huang, S. Yuan, L. Chai, L. Jiang, H. Liu, F. Wang, D. Wang, J. Wang, 2019, Development of grain boundary character distribution in medium-strained 316L stainless steel during annealing, vol. 25, pp. 364-371.