

자동차용 중공드라이브 샤프트의 성형공정 연구

임성주*, 이낙규**, 오태원***, 이지환****

(2003년 6월 19일 접수)

Forming Process of the Automotive TDS (Tube Drive Shaft) by the Rotary Swaging Process

S. J. Lim, N. K. Lee, T. W. Oh and C. H. Lee

Abstract

Rotary swaging is one of the incremental forming process which is a chipless metal forming process for the reduction of cross-sections of bars, tubes and wires. In the present work, the rotary swaging machine and dies were designed to investigate the formability of TDS(Tube Drive Shaft) used in automotive industry. The process variables such as the speed of forming, the shape of the formed materials and the reduction of area were also estimated to study experimental analyses of rotary swaging process using the materials of 34Mn5 and S45C. From experimental results, it was found that the process variables affected the quality of TDS in terms of hardness, the precision of products and the surface roughness. The hardness after swaging approved to be increased with the increase in the reduction of diameter. And it was found that the grain size became smaller and the elongated grains were formed in the axis direction.

Key Words : Rotary Swaging, Incremental Forming, Tubular Drive Shaft(TDS), Solid Drive Shaft(SDS)

1. 서론

최근 자동차산업은 자동차 연비향상과 환경 보호 차원에서 구조 경량화 및 엔진성능 향상, 배기가스 감소를 위한 여과장치개발, 그리고 소음진동의 감소와 승객의 안전도 향상을 위한 기술개발 등 여러 분야에서 많은 연구가 진행되고 있다.

자동차 동력 전달 축인 드라이브샤프트(Drive shaft)는 Fig. 1과 같은 구조와 형상을 갖고 있으며 엔진(Engine)

에서 발생된 토크(Torque)를 바퀴로 전달 할 뿐만 아니라, 헨가 장치에 따라 원활하게 움직이면서 조향에 대응할 수 있는 자동차 축류 부품의 하나로 트랜스미션(Transmission)과 차동기어박스(Differential gear box)사이에 연결되며 전륜과 후륜 및 4륜 구동차에 적용되고 있다. 지금까지 중실 드라이브샤프트(SDS:Solid Drive Shaft)의 경량화를 위한 방법으로 드라이브샤프트의 소재 개선, 형상개선 등 방법으로 어느 정도 중량감소 효과를 보았으나 현재 자동차에 적용되고있는 SDS로는 더

* 인하대학교 대학원 첨단정밀공학과(KITECH)
** 한국생산기술연구원 디지털생산공정팀
*** (주)현양
**** 인하대학교 금속공학과

이상 중량감소를 기대하기 어려울 뿐만 아니라 엔진의 2nd 차수 주파수와 휠 허브(Wheel hub) 주파수의 공진 현상(Noise, Vibration and harshness : NVH) 문제를 야기 시키고 있다. 따라서 이를 억제하는 방안기술로 진동흡수 및 진동수 변화를 주기 위하여 댐퍼(Damper)를 채용하거나, 질량(Mass)을 추가하는 방법 등을 사용하고 있으나 이는 오히려 차량 무게를 증가시키는 요인이 되고 있다. 때문에 최근 선진 자동차 메이커(GM, BMW, VW)에서는 이러한 단점을 개선하기 위한 연구를 통하여 기존 SDS를 TDS로 대체함으로써 기존 대비 중량감소와, 비틀림 강성(Torsional Stiffness) 향상, 굽힘(Bending Frequency)향상, 그리고 소음(Booming)감소효과와 엔진 진동 주파수와 NVH억제 효과로 인하여 약23% 정도의 중량절감 효과와 약 30%정도의 강성증대효과를 도모하였다.^(1~2)

따라서 향후에는 이러한 장점으로 인하여 TDS가 국내외 자동차 업계에서 대부분 사용될 것으로 전망된다.



Fig. 1 Assembly of automotive drive shaft

TDS의 제작방법으로는 튜브재에 성형된 드라이브샤프트 끝단 부를 용접하는 마찰용접(Friction welding)공정과 일체형 튜브형태로의 제작을 위한 Cold rolling 공정, Hydraulic expansion 공정, Rotary swaging, Cold drawing 공정, 등이 주목되고 있다. 그러나 이중 Rotary swaging 공정은 다른 공정에 비하여 많은 장점을 가지고 있으며 용접공정에 비하여 재료의 균일한 소성유동과 요구되는 내구성을 얻을 수 있기 때문에 TDS의 성형공정으로 현재 각광을 받고있는 공정중의 하나이다.^(3~4)

그러나 국내의 경우 자동다단 로터리 Rotary swaging 라인의 경우 전량 수입되고 있기 때문에 Rotary swaging 장치 및 금형 개발을 포함한 공정의 국산화, 실용화에 대한 연구가 절실히 요구되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Feed-in 스웨이징 성형과 Receiving 스웨이징 성형이 가능하도록 국내 기술진에 의하여 개발된⁽⁵⁾ Rotary swaging 장치(Fig. 3)를 이용하여 현재 자동차에 사용되고 있는 SDS를 일체형(Monobloc) TDS로 개발하기 위한 Rotary swaging 성형공정 연구

를 통한 TDS 설계 제작 및 성형공정기술을 제시하고자 한다.

2. 로터리 스웨이징 성형공정

Rotary swaging 성형공정의 원리는 모타동력에 의한 스피들의 회전력에 의하여 스피들과 롤러 사이에 일정한 상대 회전운동이 발생하게 된다. 이 상대회전운동에 의하여 Fig. 2와 같이 스피들의 위치가 어느 각도만큼 회전 할 때 로울러와 해머간에 반경방향으로 일정한 틈(Gap)이 발생하여 금형과 해머가 열렸다(Open) 닫혔다(Close)를 반복적으로 하게된다 이때 롤러가 해머의 상사점과 하사점을 통과하여 해머에 일정한 이동거리(Stroke)를 주게 된다. 이 해머의 이동거리 만큼 서로 마주 보고 있는 금형은 축 중심을 향하여 반경 방향의 타격(Radial blows)을 유발하게 된다. 이때 금형 속으로 성형 소재를 공급 전진시키면 금형의 반복적인 충격력으로 인하여 요구된 형상으로 소재의 점진적인 성형이 이루어진다.⁽⁶⁾

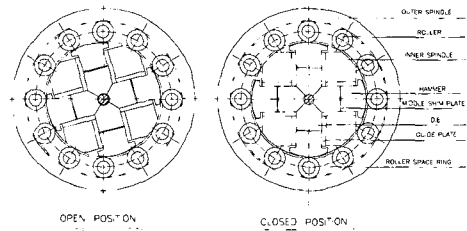


Fig. 2 Forming mechanism of rotary swaging process

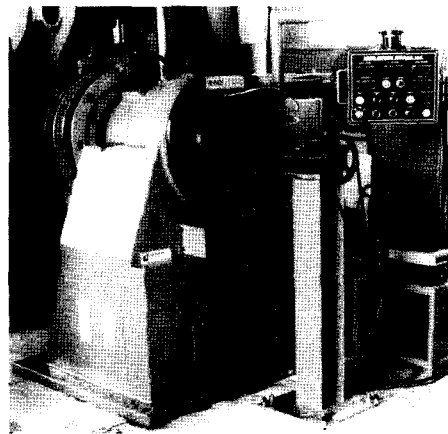


Fig. 3 Rotary swaging M/C

이러한 로터리 스웨이징 공정의 특징⁽⁷⁻⁸⁾ 원형, 사각형, 테이퍼 등 형상을 갖는 축류제품의 대량 생산에 매우 경제적인 성형방법으로서 타 공정에 비하여 설비비가 저렴하며 구조가 간단하고, 비숙련자도 작업이 용이하다. 또한 성형중 소재의 칩 발생이 거의 없으며 소재의 형상과 재질 및 단면 감소율에 따라서 다소 차이는 있지만 생산성이 매우 높다. 리고 강(Steel) 및 비철금속(Non-ferrous) 등과 같이 다양한 재질을 대상으로 적용이 가능하며, 열간 및 냉간 성형도 가능하다. 그리고 성형된 소재의 내부 구조가 화이버유동(Fiber flow) 형태를⁽⁹⁻¹⁰⁾ 때문에 기계적 성질이 향상된다. 또한 절삭가공에 비하여 제품의 표면 거칠기가 매우 매끄럽고 치수 정밀도 등이 우수하며 공정의 자동화가 용이한 장점을 가지고 있다. 그러나 작업 중 소음과 진동이 발생하는 단점이 있다.

3. 성형실험

TDS의 성형실험에 사용된 재질은 현재 스위스 Rothrist사의 xMny 계열의 합금으로 성형성과 강도면에서 우수한 소재로 알려진 34Mn5와 국내소재인 S45C 두 소재에 관하여 성형실험을 수행하여 성형전후 기계적 특성 변화를 고찰하였다.

Table 1 Chemical composition of 34Mn5 and S45C

Elements	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti
34Mn5 ($\phi 31 \times 6t$)	0.35	0.28	1.23	0.010	0.003	0.038	0.04
S45C ($\phi 31 \times 6t$)	0.43	0.23	0.79	0.011	0.017	-	-

소재의 화학성분은 Table 1과 같으며 34Mn5강의 경우 Mn 함유량이 높은 것이 이 소재의 특징이다.

3.1 드라이브샤프트의 스웨이징 성형

Fig. 4는 본 실험에 사용된 금형으로 Recess 스웨이징 금형과, Feed-in 스웨이징 금형 등이 세트로 있다.

성형소재들은 실험에서 발생될 수 있는 실험오차를 최대한 감소시키기 위하여 모든 시편의 양쪽 끝단을 기계가공을 하였다 그리고 성형 중에 발생하는 소음 및 마찰을 방지하고 성형 중 발생하는 열의 상승으로 인한 성형품의 조직변화 및 표면이 검게 타는 것을 방지하기 위하

여 비수용성 절삭유를 성형 부위에 계속적으로 분사 공급하였다.

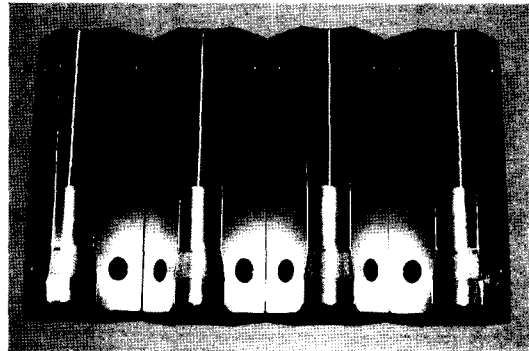


Fig. 4 Forming die of TDS (Four-split die)

본 실험에서는 34Mn5와 S45C 튜브 소재에 대하여 Rotary swaging 성형공정 5공정, 절삭공정 2공정, 압출(Serration) 2공정 등 모두 9공정으로 완성하였으며 제품의 표면조도 및 치수정밀도가 우수한 제품을 얻을 수 있었다.

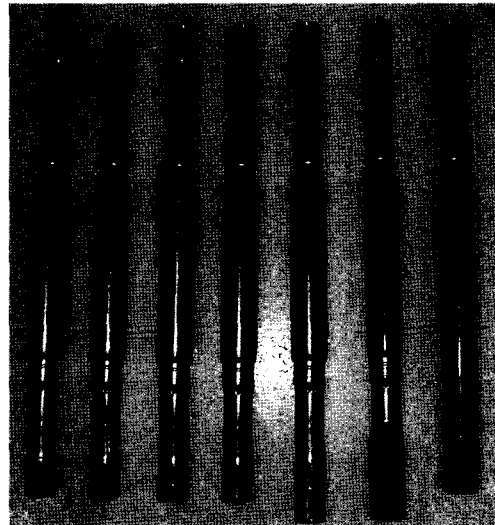


Fig. 5 Forming process of TDS

Fig. 5는 공정별로 성형된 제품사진으로 Fig. 6(a), Fig. 6(b)은 TDS의 각각 Rotary swaging 성형부의 형상을 자세히 보여 주고 있다. 제1, 2공정은 Feed-in 스웨이징 성형공정, 제3, 4공정은 Feed-in과 Recess 스웨이징

이정 성형공정, 그리고 제 5, 6공정은 Recess 스웨이징 성형 공정이다. 34Mn5와 S45C소재의 성형과정 중 제 5공정의 경우 일반적으로 Feed-In성형을 한 후 Recess 성형을 실시해야하나, 직경감소율이 작기 때문에 Feed-In 성형과정을 생략하고 곧바로 Recess 공정으로 성형을 하였으나 큰 문제없이 성형이 가능하였다.



Fig. 6(a) Product of tubular drive shaft (BJ part)

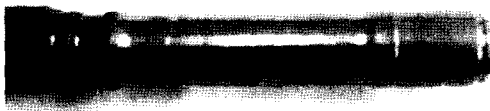


Fig. 6(b) Product of tubular drive shaft (TJ part)

성형조건은 스피들의 회전수 120rpm, 성형 소재의 이송속도(Forming speed)5.5mm/sec조건으로 성형하였다. 소재의 투입은 소재공급장치를 이용한 자동공급을 하였다.

4. 결과 및 고찰

실험 결과로 Rotary swaging 성형 전후의 경도변화 (Surface hardness), 표면조도(Surface roughness), 치수 정밀도(Precision), 튜브의 두께(Thickness) 변화량, 금속학적 성형조직 등이 어떠한 경향으로 나타나는지 관찰하였다.

Fig. 6은 TDS의 성형품으로 성형 후 표면조도가 한층 더 우수해진 것을 확인 할 수 있었으며 성형 후 경도 값이 대체적으로 상승된 것을 알 수 있었다. 그리고 성형품의 금속학적 미세조직 또한 치밀해진 것을 확인 할 수 있었다.

4.1 성형품의 경도변화

튜브재 34Mn5, S45C의 성형 전 후 내 외부 및 튜브의 성형 깊이에 관한 경도분포를 고찰하였다.

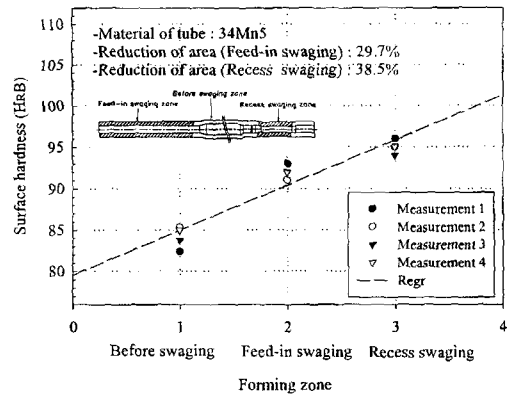


Fig. 7(a) Distribution of surface hardness

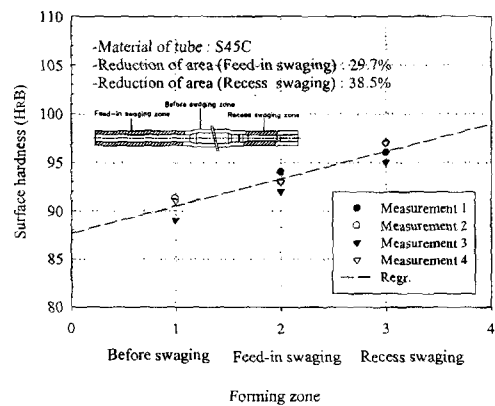


Fig. 7(b) Distribution of surface hardness

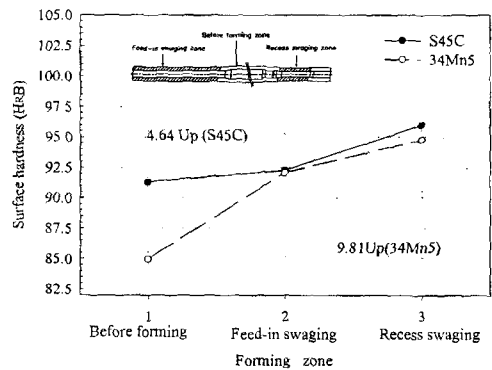


Fig. 7(c) Distribution of surface hardness

Fig. 7(a)과 Fig. 7(b)은 34Mn5와 S45C간의 성형전 경도 및 성형 후 Feed-in 스웨이징 성형부와 Recess 스웨이징

이징 성형부의 경도분포를 4번 측정(Measurement)하여 나타낸 그래프로서 성형 후 전반적으로 경도 값이 증가 되었음을 알 수 있다.

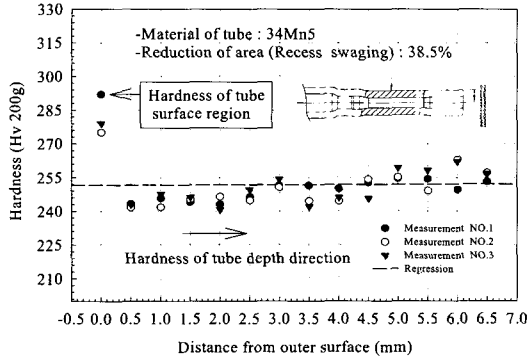


Fig. 7(d) Distribution of hardness to inside direction from outer surface of tube

Fig. 7(c) 그래프에서 보는바와 같이 34Mn5 소재의 변형 후 경도 증가량은 약 HRB 9.81이고, S45C 소재는 약 HRB 4.64의 증가량을 나타냄을 알 수 있다. 34Mn5 강의 경우는 S45C강 보다 원소재 경도가 낮음에도 불구하고 성형 후 표면경도의 증가량이 약간 크게 나타남을 확인하였다. 또한 튜브재의 두께방향의 성형깊이에 따른 성형 후 경도분포를 살펴본 결과 성형력을 직접적으로 받은 외표면(Surface)에서 제일 큰 경도 값을 나타냈으며 성형 품의 내부 단면 깊이 방향의 경도분포는 Fig. 7(d)와 같이 외면경도보다 낮은 경도 값을 나타냈으며 표면으로부터 내부단면 안쪽 중심 방향으로 들어갈수록 경도가 미소하게 증가되는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과는 성형소재가 성형되면서 내외부 압축응력이 작용하여 외표면은 변형경화 되어 표면경도가 상승되고 내부는 조직이 치밀화 되었음을 알 수 있다.

4.2 성형품의 치수정밀도

Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 TDS성형소재 34Mn5와 S45C 소재의 Feed-in 스웨이징 성형부, Recess 스웨이징 성형부의 외경 치수를 측정된 결과이다. 측정된 치수 중 몇 군데 치수편차 폭이 상이하게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 금형 세팅 오차에 의한 것으로 판단되므로 추후 금형 조립의 오차를 최대한 줄여준다면 제거될 수 있는 요인이라 판단된다.

성형된 제품의 치수편차를 살펴보면 Fig. 8(a)에서 알

수 있듯이 성형치수 ϕ 26mm인 경우 Feed-in 스웨이징 성형 시 S45C의 치수편차가 0.068mm~0.072mm이고, 34Mn5의 경우는 0.048~0.060mm의 치수편차를 나타내고 있으며 Fig. 8(b)와 같이 성형치수 ϕ 24mm인 경우 S45C의 치수편차가 -0.041~0.045mm이고, 34Mn5의 경우 -0.041~0.046mm의 치수편차를 나타냄을 볼 수 있다. 그러나 치수편차는 요구되는 치수공차 범위내의 값으로 두 튜브재 모두 기준성형치수에 근접한 치수로 매우 정밀하게 성형되었음을 실험을 통하여 확인 할 수 있었으며 스웨이징 공정의 우수성을 입증할 수 있었다.

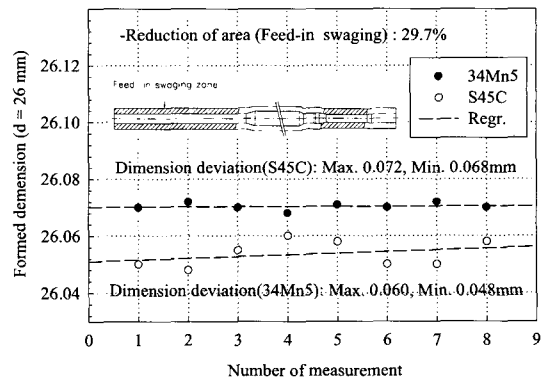


Fig. 8(a) Dimension deviation after feed-in swaging

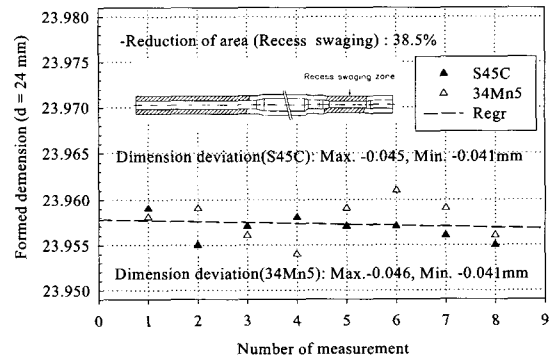


Fig. 8(b) Dimension deviation after recess swaging

4.3 성형품의 두께 변화

Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)는 성형된 튜브재(34Mn5, S45C) TDS의 Feed-in 스웨이징 성형부와 Recess 스웨이징 성형부의 단면감소를 변화에 따른 두께 변화를 보여주고 있으며 성형된 제품의 두께증가량은 Fig. 9(a)에서 알 수

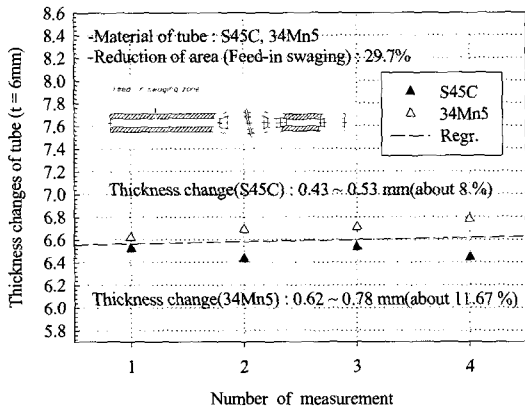


Fig. 9(a) Increment of tube thickness after feed-in swaging

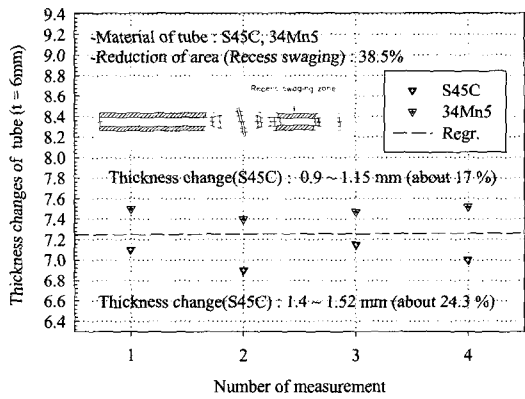


Fig. 9(b) Increment of tube thickness after recess swaging

있듯이 Feed-in 스웨이징 성형시 S45C는 약 8%, 34Mn5의 경우는 약 11.67%의 두께변화량을 보였으며 Recess 스웨이징 성형의 경우는 Fig. 9(b)와 같이 S45C의 두께증가량은 약 17%, 그리고 34Mn5의 경우는 약 24.3%의 두께증가량을 나타냄으로서 단면감소율이 증가함에 따라 크게 나타남을 확인하였다. Fig. 10의 성형된 튜브내부 단면사진에서 보듯이 성형 후 두께가 증가되었음을 알 수 있다.

즉 성형 후 두께증가량은 각 부위에 따라 다소 차이는 있지만 전반적으로 두께가 증가되었으며 두 소재 중 34Mn5 소재의 경우가 S45C보다 다소 높은 것으로 나타났으나 대체적으로 성형전보다 약 0.5mm~1.5mm 정도 두께가 증가되었음을 알 수 있었다.

4.4 성형품의 표면조도

Fig. 10은 성형된 TDS의 Feed-in 스웨이징 성형부와 Recess 스웨이징 성형부의 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 34Mn5와 S45C 소재 모두 SDS와 같이 기계가공에 의한 것 보다 스웨이징 성형 후에 한층 더 우수한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다. 그러나 성형성이 좋은 34Mn5 소재로 성형된 제품의 표면 거칠기가 S45C보다 더 우수한 것으로 나타났다. 또한 Recess 스웨이징 성형 방법이 Feed-in 스웨이징 성형 방법보다 표면 거칠기가 우수한 것으로 나타남을 알 수 있었다.

이러한 현상은 Feed-in 스웨이징 성형의 경우는 축방향의 소재이동이 큰 반면에 Recess 스웨이징 성형의 경우는 축 방향의 성형소재의 이동이 작고 정위치에서 단지 직경방향의 성형만이 진행되므로 표면 거칠기가 Feed-in 스웨이징에 비하여 우수하게 나타난 것으로 판단된다.

Elements	S45C(μm):Ra	34Mn5(μm):Ra (Rothrist社)
Feed forming part ②	0.95	0.76
Recess forming part ①	0.58	0.31
Solid drive Shaft(SDS)	Ra 3.97 μm	

Measurement point Recess forming part ① Feed forming part ②



Fig. 10 Surface roughness of before and after forming

따라서 스웨이징 성형을 하는 경우 기존의 단조공정이나 기타 다른 성형공정에 비하여 의 표면이 매우 매끄러운 정형품의 생산이 가능함을 본 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

또한 실험을 통하여 살펴본 결과 스웨이징 작업에서 윤활유의 사용유무와 금형 간의 다듬질 정도가 제품의 표면조도와 밀접한 관계가 있음을 확인하였다.

윤활유를 사용하지 않은 경우의 표면조도는 광택이 나지 않았으며, 금형 면도 검고 거칠게 되는 것을 볼 수

있었다. 따라서 본 실험에서는 광물성 비수용성 윤활유를 성형이 진행되는 동안 계속적으로 강제 분사 공급한 결과 소음도 줄어들었으며, 매끄러운 광택 면을 갖는 성형품의 생산이 가능하였다.

그리고 성형 후 성형부위의 열 발생률도 윤활유를 사용하는 경우에 상당히 감소되었음을 확인 할 수 있었다. 따라서 스웨이징 성형 시 반드시 윤활유를 공급하고 금형 표면의 광택을 유지하는 경우에만 표면조도가 향상된 양질의 제품을 생산할 수 있다는 것을 본 실험을 통하여 확인하였다.

4.5 성형품의 유동(Metal flow) 변화

Fig. 11은 TDS의 성형 후의 금속유동(Metal flow) 조직으로서 성형 후 금속조직이 성형력을 받아 성형 진행 방향으로 조직이 치밀해져 있는 것을 확인되었으며 Fig. 12와 같이 전형적인 소성가공의 금속유동 현상인 화이버 유동조직(Fiber structure)을 나타냄을 확인 할 수 있었다.



Fig. 11 Metal flow of tubular drive shaft (TDS)



Fig. 12 Microstructure after forming (34Mn5)

5. 결론

기존의 자동차에 사용되고있는 중실드라이브샤프트(SDS)를 중공드라이브샤프트(TDS)로 개발하기 위하여 로터리 스웨이징 공정을 통한 자동차용 드라이브샤프트의 성형기술의 최적화를 위한 성형실험을 수행하였으며, 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 중공 구동축의 로터리 스웨이징 성형 후 제품의 표면경도가 전반적으로 증가하였으며, Recess 스웨이징 성형의 경우가 Feed-in 스웨이징성형 보다 약간 높은 경향을 보였다.

(2) 로터리 스웨이징 공정으로 TDS를 성형 시 Recess 스웨이징 성형과 Feed-in 스웨이징 성형에 따른 성형품의 두께 증가폭에 약간의 차이를 나타내기는 하였으나 대체적으로 성형전보다 두께가 모두 증가하여 강성 면에서도 유리함을 예상 할 수 있었다.

(3) 성형된 제품의 치수편차가 Feed-in 스웨이징시 성형소재 34Mn5이고 성형치수 ϕ 26mm인 경우 0.048~0.060mm, 성형치수 ϕ 24mm인 경우 -0.041~-0.046mm의 치수편차로 요구되는 정형형상 및 기준성형치수에 매우 근접하고 정밀하게 성형되었음을 확인 할 수 있었으며 스웨이징 공정의 우수성을 입증하였다.

(4) 스웨이징 공정으로 성형된 제품의 표면 거칠기는 재료마다 약간의 차이는 있었으나 Recess 스웨이징의 경우가 Ra 0.31~Ra 0.58 이었으며 Feed-in 스웨이징의 경우는 Ra 0.76~Ra 0.95 수준으로 두 성형방법 모두 매우 우수한 표면 거칠기를 나타냄을 알 수 있었으며 따라서 스웨이징 성형 시 반드시 윤활유를 공급하고 금형 표면 광택을 유지하는 조건에서 표면조도가 향상된 양질의 제품 생산이 가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Dr. -Ing. P. Amborn, Prof . S. K. Ghosh, I. K. Lead better, 1995, "Modern Side-Shaft fo Passeng-er Cars : Manufacturing Processes I", GKN Autotive, J. of Materials Processing Technology, 63. pp 13~24.
- (2) Dr. Bernhard Muller, "Application of rotary swaging for the economical production of light weight components, mainly for the car industry", HMP, pp. 1~5.
- (3) ASM. Metals Handbook, Forming, 1969, "Rotary

- Swaging of Bar and Tubes", Vol. 4, pp. 333~346.
- (4) Serope Kalpakjian, 1966, "Dimensional Changes in Tube Swaging", J. of Engineering for Industry Transactions of the ASM. Vol. 88, No. 2, pp. 147~150.
- (5) S. J. Lim, D. J. Yoon, J. H. Lee and K. H. Na, 1997, "Development of Rotary Swaging Machine with the Outer Rotor", J. of Industrial Technology, KITECH, Vol. 2, No. 7.
- (6) Richard L. Kegg, Trans. ASME., 1964, "Mechanics of the Rotary Swaging Process", Vol. 84~86, No. 4, pp. 317~326.
- (7) Romed L. Suffredini, 1963, "How Swaging affects Mechanical properties of steel", Metal progress, pp. 109~120.
- (8) R. S. Dusseau, J. D. Bryzgel, Tool and Manufacturing Engineers Hand book, Chap. 14. "Swaging", SME, Vol. 2 (Forming), pp. 14-1~14-21.
- (9) W. G. Ovens, E. L. Bartholomew, R. R. Biederman, 1976, "Metal flow in Two-die Swaging," J. of Engineering for Industry Transactions of the ASM. Vol. 98, No. 4, pp. 1121~1124.
- (10) S. J. Lim, D. J. Yoon and K. H. Na, 1998, "The Forming Characteristic of Rotary Swaging Process", J. of the Korea Society for Technology of Plasticity Vol. 7, No. 5, pp. 432~438.