

<기술논문>

로터리 스웨이징 공정의 점진성형에 의한 중공
드라이브샤프트의 진동모드 및 내구특성

임 성 주¹⁾ · 이 낙 규²⁾ · 이 지 환³⁾

인하대학교 대학원 첨단정밀공학과¹⁾ · 한국생산기술연구원 디지털생산공정팀²⁾ · 인하대학교 금속공학과³⁾

Vibration Mode and Durability Characteristics of Automotive TDS
using Rotary Swaging Process for Incremental Forming

Seong-Joo Lim^{*1)} · Nak-Kyu Lee²⁾ · Chi-Hwan Lee³⁾

¹⁾Department of Advanced Precision Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

²⁾Digital Production Processing Team, KITECH, 944-32 Dongchun-dong, Yeonsu-gu, Incheon 406-130, Korea

³⁾Department of Material Science and Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received 12 April 2005 / Accepted 10 May 2005)

Abstract : Rotary swaging is one of the incremental forming process which is a chipless process using the reduction of cross-sections of bars, tubes and wires. The TDS(Tube Drive Shaft) of monobloc used in automotive has been developed by the rotary swaging process. The mechanical characteristics of swaged parts such as the hardness, thickness and roughness are also estimated to conduct experimental analyses of rotary swaging process with the materials of 34Mn5. Furthermore the change in the vibration mode of TDS due to design parameters, which are the tube length, diameter and thickness, has been investigated and analysed. The weight of the TDS product is smaller by about 12.8% than that of SDS with the same performance. It could be evidently found that the TDS is designed to be much lighter than SDS (Solid Drive Shaft). This advantage might give some possibility to improve the NVH (Noise-Vibration-Harshness) characteristics. A maximum torque and a total number of torsional repetitions for the TDS is checked and measured to know the torsional intensity and fatigue strength through the static torsion test and torsional durability test, respectively. A total number of the torsional repetitions up to the fracture for the TDS is greater than 250,000 times.

Key words : Rotary swaging(로터리스웨이징), Natural frequency(고유진동), Drive shaft(구동축), Torsion mode(비틀림모드), Bending mode(굽힘모드), Noise-vibration-harshness(소음, 진동, 잡음)

1. 서론

드라이브샤프트는 동력전달의 고효율화를 얻기 위하여 엔진에서 발생한 회전력을 바퀴에 직접 전달하는 동시에 조향(Steering) 기능을 수행하는 자동차의 중요한 부품이다. 이러한 드라이브샤프트는

Fig. 1과 같이 트리포드조인트(Tripod joint)부와 등속조인트(Constant velocity joint : CV joint)부로 구성된다.

지금까지 대부분 자동차에 사용되고 있는 중실 드라이브샤프트(Solid Drive Shaft: SDS)의 경량화를 위한 방법으로 드라이브샤프트의 소재개선, 형상개선 등 여러 방법으로 일시적인 중량감소 효과를 보았으나 SDS로는 더 이상의 중량감소를 기대하기 어

*To whom correspondence should be addressed.
lim@kitech.re.kr

려우며, 나아가 기존의 SDS로는 운전시 엔진의 2차 주파수와외 공진 현상으로 인하여 NVH(Noise, Vibration and harshness)문제를 완화시키는데 한계성을 나타내고 있어 좀더 적극적인 개선이 요구되고 있는 실정이다.¹⁾ 따라서 최근 선진 자동차 메이커에서는 이러한 단점을 개선하기 위한 연구를 통하여 기존 SDS를 TDS(Tube Drive Shaft)로 대체함으로써 비틀림 강성(Torsional Stiffness) 향상, 굽힘 강성(Bending Stiffness) 향상, 소음(Booming) 감소, 엔진진동 주파수와외 NVH 억제효과 상승 및 기존 중실축 대비 약 23%의 중량절감 효과와 약 30% 정도의 강성증대효과를 도모하였다.^{2,3)} 따라서 향후에는 이러한 장점으로 인하여 TDS가 국내외 모든 자동차에 대부분 사용될 것으로 전망된다.

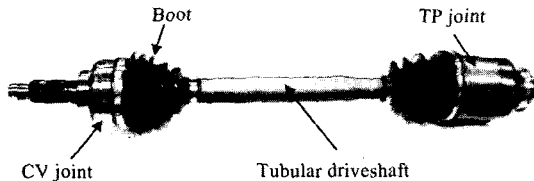


Fig. 1 Assembly of automotive tubular driveshaft

현재 TDS의 제작방법으로는 튜브재에 미리 중실재로 성형된 드라이브샤프트 끝단 부를 용접하는 용접(Welding) 공정과 일체형(Monobloc) 튜브형태로의 제작을 위한 Cold rolling 공정, Hydraulic expansion 공정, Cold drawing 공정, 그리고 로터리 스웨이징 공정 등이 있다. 그러나 용접 등에 의한 제작방법은 재료의 균일한 소성유동을 얻을 수 없는 단점 때문에 다른 공정에 비하여 소재의 균일한 소성유동과 요구되는 내구성을 얻을 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있는 로터리 스웨이징 성형 방법이 현재 TDS의 성형공정으로 각광을 받고 있다.^{4,5)}

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

본 논문에서는 국내 기술진에 의하여 개발된⁶⁾ 외륜 회전형 로터리 스웨이징 장치를 이용하여 중공

축의 개발을 위한 TDS의 성형 특성 및 실차 적용시의 성능특성 만족도 검증을 위한 TDS의 길이(Length), 직경(Diameter), 튜브 두께(Thickness) 변화에 따른 고유진동수(Natural frequency)의 민감도해석과 정적 비틀림, 내구성 특성평가를 통한 품질안정화 기술 확립을 통하여 현재 자동차에 사용되고 있는 SDS를 일체형 TDS로 개발하기 위한 제품화공정기술을 제시하고자 한다.

2. 중공 드라이브샤프트의 성형 특성

2.1 로터리 스웨이징 장치

로터리 스웨이징 공정의 원리는 모터동력에 의한 주축스핀들의 회전력에 의하여 스펀들과 롤러 사이에 일정한 상대 회전운동이 발생하여 롤러와 해머 간에 반경방향으로 일정한 틈(Gap)이 발생하여 롤러가 해머의 상사점과 하사점을 통과 할 때 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 속의 성형소재는 그 반복적인 충격력에 의하여 요구된 금형 형상에 따라 점진적으로 성형이 이루어진다.⁷⁾

로터리 스웨이징 공정의 특징^{8,9)}은 원형, 사각형, 테이퍼 등 형상을 갖는 제품의 대량 생산에 매우 경제적인 성형방법으로서 구조가 간단하고, 비속련자도 작업이 용이하다. 또한 성형 중 소재의 칩 발생이 거의 없으며 소재의 형상과 재질에 따라서 다소 차이는 있지만 생산성이 매우 높다. 그리고 강(Steel)과 비철금속(Non-ferrous) 등과 같이 다양한 재질을 대상으로 적용이 가능하며, 열간 및 냉간 성형도 가능하다. 그리고 성형된 소재 내부 조직이 파이버 유동(Fiber flow) 형태를^{10,11)} 갖기 때문에 기계적 성질이 향상된다. 또한 절삭가공에 비하여 제품의 표면 거칠기와 치수 정밀도 등이 우수하며 공정의 자동화가 용이한 장점을 가지고 있다.

2.2 중공 드라이브샤프트의 스웨이징 성형

TDS의 제품성형에 사용된 재질은 현재 스위스 Rothrist사의 xMny 계열의 상용화된 재질로서 성형성과 강도 면에서 우수한 소재로 알려진 이음매 없

는 튜브소재(Seamless tube)인 34Mn5($\phi 31 \times 6t$)를 사용하였다.

소재의 화학성분은 0.35C-0.28Si-1.23Mn-P0.01-0.003S-0.038Al-0.04Ti로 구성되며 Mn 함유량이 높은 것이 이 소재의 특징이다.

본 성형 실험은 Fig. 2와 같이 로터리 스웨이징 성형 5공정과 절삭공정 3공정, 세레이션 성형 2공정 등 전체 10공정으로서 제 1공정은 튜브끝단의 기계가공이고, 제 2공정은 Feed-in 스웨이징 성형공정, 제 3공정부터 6공정까지는 Recess 스웨이징 공정으로 진행되며 그 외에 스냅링 홈 가공공정으로 진행된다. 실제 성형된 제품의 길이는 465.0 mm, 최대경은 $\phi 31.0$ mm로 표면조도 및 치수정밀도가 우수한 제품을 얻을 수 있었다.¹²⁾

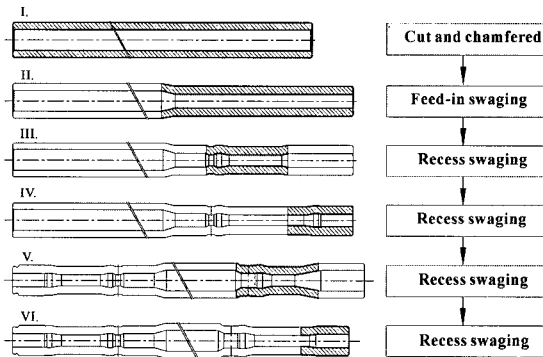


Fig. 2 Rotary swaging process of TDS

성형조건은 스피들의 회전수 120 rpm, 성형 소재의 이송속도(Forming speed) 5.5 mm/sec조건으로 소재의 투입은 소재공급장치를 이용한 자동공급을 하였으며 실험 결과로는 로터리스웨이징 성형 전후의 경도(Hardness) 및 두께(Thickness) 변화량, 표면조도(Surface roughness) 등이 어떠한 경향으로 나타나는지 관찰하였다.

Fig. 3은 각 성형 공정에 따른 TDS의 실제 성형품 사진으로 원소재로부터 Feed-in 공정, Recess 공정, 세레이션 성형, 그리고 스냅링 홈 기계가공이 진행된 상태를 보여주고 있다.

Fig. 4는 성형된 TDS의 Feed-in 성형부와 Recess 성형부의 직경감소를 변화에 따른 두께 변화를 나타낸 그래프로서 Feed-in 스웨이징 성형 부는 약

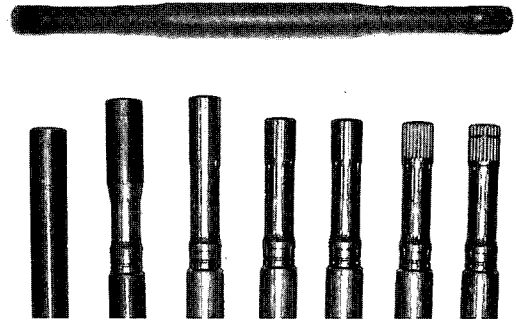


Fig. 3 Products of TDS

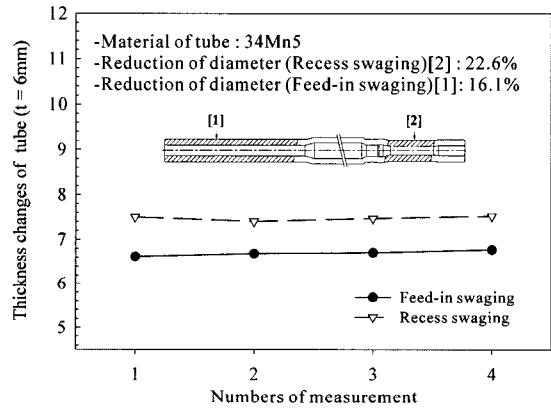


Fig. 4 Increment of tube thickness after swaging

11.67%의 두께증가를 보였으며, Recess 스웨이징 성형 부는 약 24.3%의 두께증가량을 나타냄으로서 직경감소율이 증가함에 따라 튜브 두께가 크게 증가됨을 확인하였다. 즉 성형 후 두께증가량은 각 부위에 따라 다소 차이는 있지만 전반적으로 증가되었으며 성형전보다 약 0.5 mm~1.5 mm 정도 두께가 증가됨에 따라 스웨이징 성형을 통하여 강성 면에서 기계적 성질이 향상 될 수 있음을 알 수 있었다.

스웨이징 성형 후 성형된 TDS의 Feed-in 스웨이징 성형부와 Recess 스웨이징 성형부의 표면 거칠기를 살펴 본 결과 Feed-in 스웨이징 성형부는 Ra 0.76 그리고 Recess 성형부는 Ra 0.31 값으로 나타났으며 기계가공에 의한 SDS의 표면 거칠기 Ra 3.97 보다 한층 더 우수한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다. 따라서 스웨이징 성형을 하는 경우 기존의 냉간 단조 공정이나 기타 성형공정에 비하여 외표면이 매우 매끄러운 정형품의 생산이 가능함을 본 실험을 통해

여 확인할 수 있었다.

그러나 윤활유를 사용하지 않은 경우의 표면조도는 광택이 없고, 금형 표면도 검고 거칠게 되는 것을 볼 수 있었다. 이에 반하여 윤활유를 사용하는 경우는 성형 후 성형부위의 열 발생 및 소음 등이 상당히 감소되었으며 표면이 매끄러운 광택 면을 갖는 성형품의 생산이 가능하였다. 따라서 스웨이징 성형 시 반드시 윤활유를 공급해야만 향상된 양질의 제품을 생산할 수 있다는 것을 본 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

3. 중공 드라이브샤프트의 평가

3.1 고유진동수의 민감도 해석

자동차의 설계가 변경되면 기존 제품의 형상이나 치수 또한 변경이 요구되며 어떤 방향으로 설계변경이 진행되어야만 자동차의 성능특성 향상에 도움을 줄 수 있는 방향인지를 미리 예측하는 것이 매우 중요하다.

따라서 이를 위하여 자유단(Free-Free) 경계조건에서 TDS의 길이, 튜브두께, 그리고 직경크기변화에 따른 고유진동수의 민감도(Sensitivity) 해석을 수행하였다.¹³⁾ Table 1, Table 2 그리고 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)의 그래프는 각각의 길이변화, 직경변화, 튜브 두께변화에 대한 굽힘 모드와 비틀림 모드의 변화를 보여주고 있다. Table 1에서 L0은 TDS의 초기 길이를 말하며, Table 2에서 D0은 초기직경을 그리고 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에서 t0은 초기 두께를 나타내며 이 값을 기준으로 양의 값은 치수가 커지는 것이고 음의 값은 치수가 감소하는 것을 의미한다. Table 1은 TDS의 길이 변화에 대한 1차 굽힘 모드와 비틀림 모드의 변화를 나타낸 도표로서 길이가 길어질수록 고유진동수가 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 따라서 설계 변경 시 축의 길이를 길게 하는 것보다는 단축으로 설계를 하는 것이 고유진동수 영역 향상 측면에서 유리함을 알 수 있다.

Table 2는 TDS의 직경 변화에 대한 1차 굽힘 모드와 비틀림 모드 변화를 보여주는 도표로서 직경이 증가하면 고유진동수도 함께 증가됨을 알 수 있다.

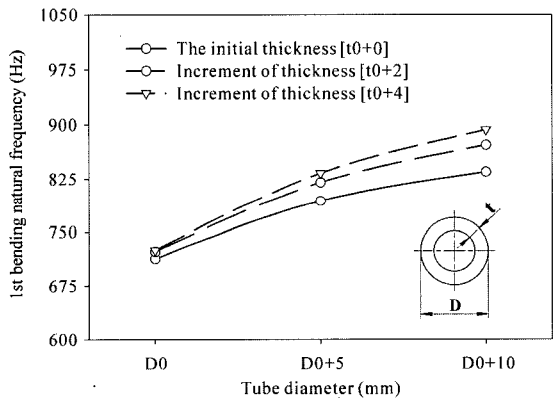
Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에서는 튜브의 직경과 두께가 증가함에 따라서 고유진동수가 증가함을 알 수 있

Table 1 Mode shape by variation of TDS length

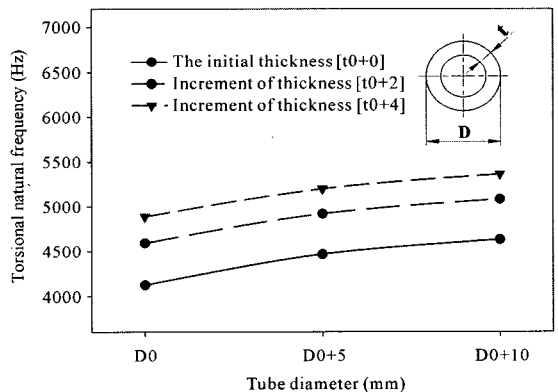
Length	First bending mode(Hz)	Torsion mode(Hz)
L0-20	767.0	4280.0
L0-10	739.0	4204.0
L0-5	725.5	4163.0
L0-0	712.3	4125.0
L0+5	699.4	4088.0
L0+10	686.9	4050.0
L0+20	662.7	3976.0

Table 2 Mode shape by variation of TDS diameter

Length	First bending mode(Hz)	Torsion mode(Hz)
D0-5	589.6	3507.0
D0-0	712.3	4125.3
D0+5	794.0	4467.0
D0+10	835.4	4632.0



(a) 1st bending mode



(b) 1st torsional mode

Fig. 5 Mode between of tube thickness and diameter

다. 그러나 두께 증가에 따른 고유진동수의 증가폭 보다는 직경 증가에 따른 고유진동수의 증가가 훨씬 더 지배적임을 알 수 있다. 즉 고유진동수의 증감의 효과는 직경변화, 길이변화, 두께변화 순으로 영향이 큼을 알 수 있다.

이러한 결과는 드라이브샤프트 설계 시 고유진동수의 영역 변화를 결정하는데 있어 축의 길이는 가능한 짧게 하고 직경은 가능한 크게 설정하는 것이 고유진동수를 고주파(High frequency) 영역 쪽으로 보내는데 유리함을 본 해석을 통하여 알 수 있었다. 따라서 이러한 결과들은 어떤 설계 변수를 어떻게 변경하는 경우가 최소한의 설계 변경으로 최대 효과를 얻을 수 있는지에 대한 판단을 하는데 도움을 줄 수 있다.

3.2 정적 비틀림 파단 및 내구 특성

스웨이징 성형된 드라이브 샤프트의 강성평가를 위하여 양단 고정 조건에서 SDS와 TDS의 강성을 비교하였다. 강성의 해석 결과 TDS의 경우 8.48×10^3 N/mm 이었으며 SDS의 경우는 6.368×10^3 N/mm 로 스웨이징 성형 후 TDS의 정적 비틀림 파단 시험(Torsional torque test)과 내구성(Torsional endurance test)시험은 TDS의 세레이션 끝단 부를 시험기의 한쪽 끝단에 고정하고 반대쪽에서 비틀림 모멘트를 부여하는 조건(JASO C 304)으로 수행하였다. Fig. 6은 본 시험에 사용된 장치(Rotary actuator, MTS)이다.

정적 비틀림 파단 강도시험은 TDS의 전 경화(All hardening) 및 부분경화(Partial hardening) 열처리된 두 경우에 관하여 수행하였으며 시험결과 Table 3에서 보듯이 부분경화의 경우 3,425 Nm 이고 전경화

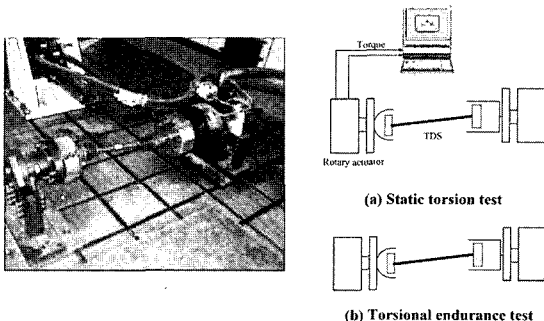


Fig. 6 Equipment of static torsion and endurance test

Table 3 Results of torsional torque fracture test

Tube drive shaft	Torsional torque (Nm)	Heat treatment by high frequency condition	Standard torsional torque of SDS (Nm)
TDS 1	4,330	All hardening	3,600
TDS 2	3,425	Partial hardening	

열처리를 실시한 경우의 비틀림 파단 값은 4,330 Nm로 부분경화 경우보다 크게 나타났다.

Fig. 7은 전 경화 및 부분 경화된 튜브 단면의 열처리 조직사진으로 전 경화된 경우 조직이 균일하고 치밀화되어 있음을 볼 수 있다. 이와 같이 TDS를 전 경화 열처리하는 경우에만 SDS의 기준 토오크 3,600 Nm 보다 약 20.3 %의 큰 값을 나타냄으로서 스웨이징 성형 후 공정으로 반드시 전경화 열처리 공정이 필요함을 본 시험결과 통하여 확인할 수 있었다. 그리고 시편의 파단은 모두 TDS 양쪽 끝단 최소 직경부에서 발생하였다.

Fig. 8은 비틀림 내구 강도시험 후 TDS의 파단 부위를 나타낸 사진으로서 b 부위에서 774,338번, c 부위에서 1,338,097번의 반복 수명을 나타냈다 이 값은 평가기준 수명인 250,000보다 상당히 큰 값으로 개발된 TDS의 내구성이 만족한 값을 나타냄을 알 수 있었다.

그리고 파단은 그 이상 반복시험횟수에서 나타났으며 대체적으로 파단 부위는 TDS 모두 세레이션 부로부터 크랙(Crack)이 시작되어 Fig. 8과 같이 부트 체결 부근에서 공통적으로 파단 됨을 확인할 수

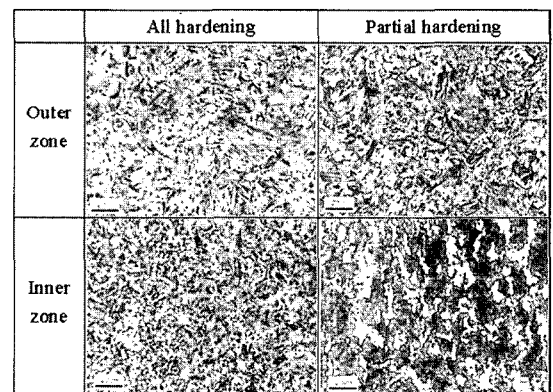


Fig. 7 Microstructure after heat treatment

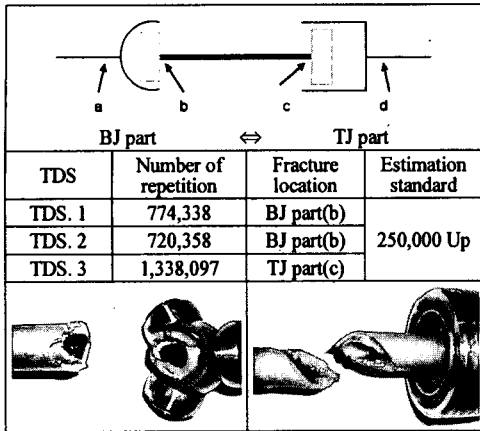


Fig. 8 Results after an endurance test

있었으며 비틀림 내구 시험결과 TDS는 SDS의 평가 기준값을 만족함을 확인하였으며 피로 수명은 제품의 성형 상태, 소재의 균일성, 열처리 상태, 제품의 표면 상태 등에 따라 수명에 큰 영향을 주는 요소임을 알 수 있었다.

4. 결론

현재 자동차에 사용되고 있는 SDS를 TDS으로 개발하기 위하여 점진성형공정인 로터리 스웨이징 공정에 의하여 TDS를 성형하였으며 성형 후의 두께 변화, 표면거칠기 그리고 튜브형상 등 성형성 특성 파악과 TDS의 성능평가를 위한 TDS의 길이, 중심부의 직경, 그리고 튜브두께의 변화에 대한 고유진동수의 민감도해석 및 비틀림 파단 및 내구성 시험을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 로터리 스웨이징 된 TDS의 표면경도 및 두께가 전반적으로 증가하였으며 이로 인한 강도 및 강성 등 기계적 성질이 향상됨을 예측 할 수 있었다.
- 2) 양단 고정 하에서의 중심부위 변형에 대한 강성 (Stiffness) 해석을 수행하였으며 그 결과 TDS가 SDS에 비하여 약 33% 강성이 증가되었으며 SDS 대비 중량도 약 12.8% 감소되었다. 따라서 개발된 TDS가 고유 진동수나 강성, 무게 측면에서 유리함을 확인하였다.
- 3) TDS를 전경화 열처리한 경우 비틀림 파단강도가 4,330 Nm로 SDS의 기준 토오크 3,600 Nm 보

다 약 20.3%의 큰 값을 나타냄으로서 스웨이징 성형 후 공정으로 반드시 전경화 열처리 공정이 필요함을 확인하였다.

- 4) TDS 길이, 중심부의 직경, 튜브 두께의 변화에 대한 고유진동수의 민감도해석을 수행한 결과 길이는 짧게, 직경 및 튜브의 두께는 크게 설정하는 것이 고유진동수를 고주파영역으로 보내는데 유리함을 알 수 있었다.

본 연구를 통하여 로터리 스웨이징 공정으로 성형된 TDS를 개발하였으며 성형 후 제품평가를 통한 TDS의 제품화 가능성을 확인하였다. 그러나 향후 실용화 제품생산을 위한 튜브소재의 선정, 차종에 따른 제품 설계 및 평가기술 그리고 로터리 스웨이징 성형기술의 최적화 등 지속적인 연구가 요구되며 이를 통한 기반기술이 확보 될 경우 현재 및 차세대 자동차 경량화 및 NVH 특성 향상 등 자동차의 성능 향상에 크게 기여할 수 있으리라 기대된다.

References

- 1) S. K. Tang and S. H. Kang, "Design and Analysis of Kart Chassis Frame for Bending and Torsional Stiffness," Transactions of KSAE, Vol.11, No.4, pp.226-231, 2003.
- 2) P. Amborn, S. K. Ghosh and I. K. Lead Better, "Modern Side-Shaft for Passenger Cars : Manufacturing Processes I," GKN Automotive, J. of Materials Processing Technology, 63, pp.13-24,1995.
- 3) B. Muller, "Application of Rotary Swaging for the Economical Production of Light Weight Components, Mainly for the Car Industry," HMP, pp.1-5.
- 4) ASM. Metals Handbook, Forming, "Rotary Swaging of Bar and Tubes," Vol.4, pp.333-346, 1969.
- 5) S. Kalpakjian, "Dimensional Changes in Tube Swaging," J. of Engineering for Industry Transactions of the ASM, Vol.88, No.2, pp.147-150, 1966.
- 6) S. J. Lim, D. J. Yoon, J. H. Lee and K. H. Na, "Development of Rotary Swaging Machine with the Outer Rotor," J. of Industrial Techno-

- logy, KITECH, Vol.2, No.7, 1977.
- 7) R. L. Kegg, "Mechanics of the Rotary Swaging Process," Trans. ASME, Vol.84-86, No.4, pp.317-326, 1964.
 - 8) R. L. Suffredini, "How Swaging Affects Mechanical Properties of Steel," Metal Progress, pp.109-120, 1963.
 - 9) R. S. Dusseau and J. D. Bryzgel, Tool and Manufacturing Engineers Hand Book, Chap. 14. "Swaging," SME, Vol.2(Forming), pp.14-1~14-21.
 - 10) W. G. Ovens, E. L. Bartholomew and R. R. Biederman, "Metal Flow in Two-die Swaging," J. of Engineering for Industry Transactions of the ASM, Vol.98, No.4, pp.1121-1124, 1976.
 - 11) S. J. Lim, D. J. Yoon and K. H. Na, "The Forming Characteristic of Rotary Swaging Process," J. of the Korea Society for Technology of Plasticity, Vol.7, No.5, pp.432-438, 1998.
 - 12) S. J. Lim, N. K. Lee, K. H. Na and C. H. Lee, "Forming Process of the Automotive TDS (Tube Drive Shaft) by the Rotary Swaging Process," J. of the Korea Society for Technology of Plasticity Vol.12, No.6, pp.558-565, 2003.
 - 13) H. S. Yoon, C. O. Kim, M. S. Moon and S. Y. Oh, "Design of a Composite Propeller Shaft with the Reduced Weights and Improved NVh," Transactions of KSAE, Vol.11, No.1, pp.151-159, 2003.