

<응용논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.11.1119>

ISSN 1226-4873(Print)

2288-5226(Online)

차량용 중공 스테빌라이저바의 내측 쇼트피닝 효과

서유원^{*†} · 서진원^{*} · 이원기^{*} · 김진영^{*}

* 대원강업(주) 기술연구소

Effect of Inner Shot Peening Process for Tubular Stabilizer Bars

Yu Won Seo^{*†}, Jin Won Sur^{*}, Won Ki Lee^{*} and Jin Young Kim^{*}

* R&D Center, Daewon Kang Up Co., LTD.

(Received April 26, 2017 ; Revised July 10, 2017 ; Accepted July 13, 2017)

Words: Stabilizer Bar(스테빌라이저바), Inner Shot Peening(내측 쇼트피닝), Fatigue Life(피로수명), Residual Stress(잔류응력), 유한요소해석(Finite Element Analysis)

초록: 차량 하부에 장착된 스테빌라이저바는 차량이 곡선 구간을 선회할 때 차량의 자세를 유지해 줌으로써 차량 주행을 보다 편안하게 해 준다. 스테빌라이저바는 중실과 중공 타입 2가지가 있으며, 차량의 경량화를 위해 중공 형태의 스테빌라이저바의 적용이 늘고 있다. 차량의 경량화를 위한 중공 스테빌라이저바는 중실에 비해 무게가 34% 이상 경량화가 가능하지만 경량화 비율이 높아질수록 제품의 내구 수명은 급격하게 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 내구 수명 감소에 대한 대책으로서 소재의 고강도 및 고경도 소재를 적용하거나 쇼트피닝 공법을 개선 하는 등의 노력을 통해 내구 수명을 보장할 수 있다.

Abstract: The stabilizer bar mounted on the vehicle underbody makes for a more comfortable ride by holding the vehicle itself when the vehicle is cornering. Stabilizer bars are available in two types: solid and tube. To lighten the weight of the vehicle, and owing to weight reduction requirements, tubular stabilizer bars are increasingly being used. Tubular stabilizer bars can be fabricated to be over 34% lighter than solid bars, but the lifetime of the product tends to decrease rapidly as the weight ratio increases. However, the durability can be improved by utilizing high-strength and high-hardness materials for the stabilizer bar or by improving the shot peening method.

1. 서 론

최근 자동차 산업은 자동차의 연비 향상 및 배출 가스 저감을 위해 경량화 및 고강도화에 대한 연구 개발이 진행되고 있다.

이러한 경량화 및 고강도화 기술은 수많은 자동차 부품에 적용되고 있으며, 차량의 곡선 주행시 스티어링 및 조정 안정성을 확보하기 위한 스테빌라이저바(stabilize bar)에도 오래 전부터 기술 개발이 이루어지고 있다. 국내 자동차 산업에는 2000년 초부터 경량화를 위해 중실(solid)에서 중공 스테빌

라이저바(tubular stabilizer bar)의 개발을 통해 중실 스테빌라이저바에 비해 34~38% 중량 저감을 가져왔다. 최근에는 자동차사에서 더 많은 중량 저감이 요구사항에 따라 고강도 파이프를 보다 경량화한 개발이 진행되고 있다.

하지만 스테빌라이저바의 중량 저감을 위한 중공화는 제품에 가해지는 응력을 증가하게 되어 내구 수명이 저하되기 때문에 쇼트피닝에 대한 가공 공법도 따라서 발전하게 되었다. 고강도 파이프 소재를 이용한 스테빌라이저바는 고경도의 쇼트볼을 사용하며, 크기가 다른 쇼트볼로 2회에 걸쳐서 쇼트피닝(2 stage shot peening)하여 중량 저감에 따른 내구 수명 감소를 상쇄할 수 있게 되었다.⁽¹⁾

이러한 연구 개발도 추가적인 중량 저감에 있어서 파이프의 두께(t)가 감소하면서 파이프의 외측

* 이 논문은 WC300 산업 기술 혁신 과제 결과물임

† Corresponding Author, syw@dwku.com

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

이 아닌 내측에서 피로 균열이 발생되어 일반적인 외측 쇼트피닝만으로는 한계점에 다 달았다. 이러한 내측 피로 균열 파괴에 대한 대안으로서 내측 쇼트피닝 공법을 적용한 스테빌라이저바가 개발되고 있다.

2. 이론적 배경

2.1 쇼트피닝 가공

자동차, 기계, 항공 부품과 같은 주기적인 반복 하중을 받는 부품의 피로강도(fatigue strength)를 증진시켜 수명을 연장시키는 표면 경화법(surface hardening)으로 쇼트피닝 가공이 널리 적용되고 있다. 쇼트피닝 가공 방법은 금속의 표면에 금속 또는 비금속의 쇼트볼을 고속으로 투사하여 금속의 표면을 해머링하는 일종의 냉간 가공(cold working)이다.⁽²⁾

쇼트피닝 가공은 Fig. 1과 같이 쇼트볼이 금속표면에 고속으로 충돌하는 순간 쇼트볼이 가진 운동 에너지를 전이시키며, 이때 표면부에 소성변형(plastic deformation)으로 인한 압축 잔류 응력(compressive residual stress)을 발생시킨다.^(3,4)

쇼트피닝 가공의 효과는 지극히 표면에만 잔류하는 압축응력이기 때문에 재료의 기계적 특성이 바뀌지는 않는다.

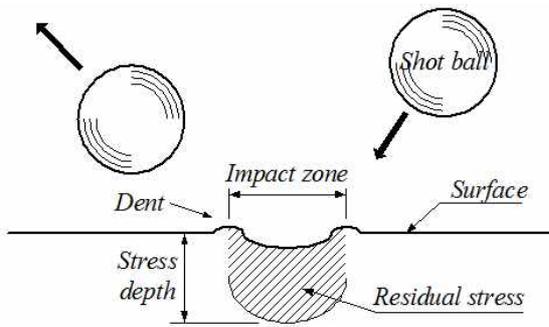


Fig. 1 Principal of shot peening

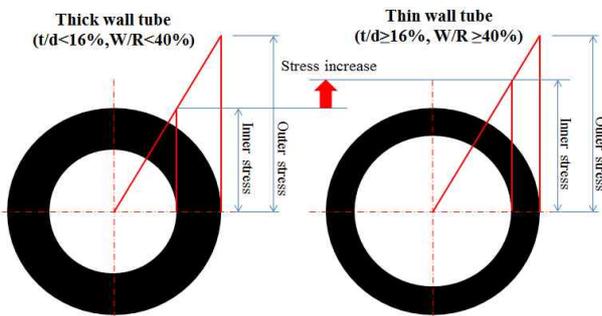


Fig. 2 Stress distribution of tubular stabilizer bar

2.2 내측 쇼트피닝 가공의 필요성

일반적으로 반복 하중을 받는 스테빌라이저바의 최대 응력은 외측에서 발생되며, 쇼트피닝 가공도 외측에만 하는 것이 일반적인 제조공정이다.

일반적인 중공 스테빌라이저바의 경우 외경과 두께 비율에 따라 중실 스테빌라이저바 대비 경량화율이 34~38% 범위에서 설계가 일반적이었으나, 고강도 소재가 적용됨에 따라 경량화율이 40% 이상으로 설계 되고 있다.⁽⁵⁾

고강도 및 고경량화로 인해 Fig. 2와 같이 중공 스테빌라이저바의 두께 비율이 감소함에 따라 외측 응력의 증가 비율에 비해 내측의 응력이 증가하는 경향을 나타낸다. 외측에 발생하는 피로 균열(fatigue crack)은 외측 쇼트피닝 가공을 통해 균열 발생을 지연시켜 피로 수명(fatigue life)을 증대할 수 있는 방안이 있으나, 내측 응력 증가로 인한 피로 균열 발생은 지연시킬 수 없는 한계가 있다.

이러한 파이프 내측 피로 균열 발생 지연을 위해 파이프 내측에도 쇼트피닝 가공을 통한 압축 잔류응력을 부여하여 피로내구 수명 향상을 위한 기술로 발전해 왔다.⁽⁶⁾

3. 실험 및 해석방법

3.1 재료의 기계적 화학적 성질

본 연구에서는 중공 스테빌라이저바의 소재로 사용되고 있는 압연강판재(34Mn5, DIN1.1166)를 사용하여 조관 인발하여 파이프를 제작하였다.

이 재료의 화학적 성분은 Table 1에 표시하였으며, 열처리후(퀵칭&템퍼링) 기계적 성질은 Table 2에 표시하였다.

3.2 중공 스테빌라이저바 제품 제작

본 연구를 위한 중공 스테빌라이저바는 Fig. 4와 같은 형상으로 제작하였다. 내측 쇼트피닝 영향 및 내구수명 검토를 위해 Table 3과 같은 사양으

Table 1 Chemical composition of steel (wt%)

	C	Si	Mn	P	Al	Cr	Ti
34Mn5	0.33 ~0.40	0.15 ~0.35	1.20 ~1.40	0.02 Max	0.02 ~0.06	0.05 ~0.20	0.015 ~0.06

Table 2 Mechanical properties of steel (After Q/T)

	Tensile Strength	Hardness	Elongation
34Mn5	1800Mpa	HRc50	12.6%

Table 3 Condition of tubular stabilizer bar

Variant	W/R* (%)	OD (mm)	ID (mm)	t (mm)	t/OD (%)
Solid	0%	Ø24.0	-	-	-
Tube 1	36%	Ø25.2	Ø16.2	4.5	18%
Tube 2	40%	Ø25.6	Ø17.6	4.0	16%
Tube 3	45%	Ø26.1	Ø19.1	3.5	13%
Tube 4	48%	Ø26.5	Ø20.1	3.2	12%

* W/R : Weight reduction ratio between solid bar and tubular bar

Table 4 Condition of shot peening

1) Outer shot peening

Shot ball size	0.87 mm
Shot amp.	70A
Shot projection time	90 Second

2) Inner shot peening

Shot ball size	0.4mm
Shot ball flow rate	500g/min
Nozzle speed	60 rpm
Nozzle stroke	2mm/sec
Accumulate pressure	4 bar

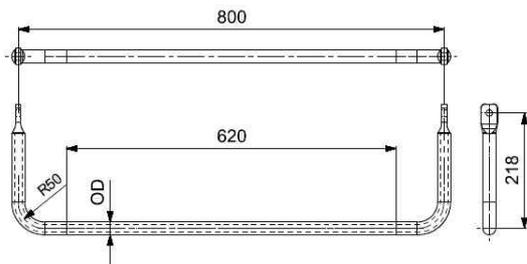


Fig. 3 Drawing of stabilizer bar

로 제작하였다. Table 3의 제품 제작 조건은 동일한 강성이 되도록 파이프의 외경 및 두께를 선정하였다.

성형된 스테빌라이저바는 열처리후 Table 4와 같은 조건으로 쇼트피닝 가공하였다. 외측쇼트피닝 가공은 대차식 외측 쇼트피닝기(conveyer shot peening machine, Daewon, KOR)를 사용하였으며, 내측쇼트피닝은 Fig. 4와 같은 에어 분사식 내측 쇼트피닝기(Inner shot peening machine, Rösler Oberflächen-technik GmbH,GER)를 이용하여 실시하였다. 내측 쇼트피닝 가공은 쇼트피닝 분사 노즐이 회전 및 전진하면서 파이프 내측으로 삽입되어 파이프 내측을 쇼트피닝 가공하게 된다. 내측쇼트피닝 가공은 응력이 가장 높은 구간인 곡선 밴딩

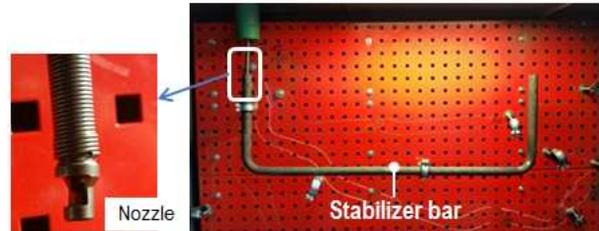


Fig. 4 Inner shot peening machine & test specimen



Fig. 5 Inner shot peening processing section

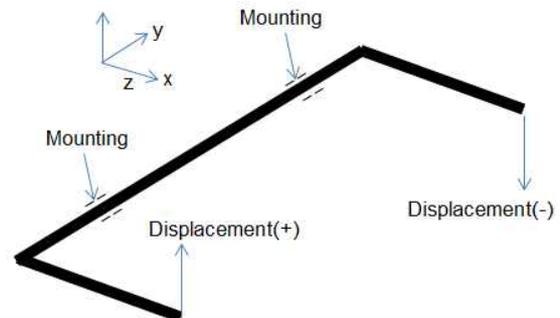


Fig. 6 Test conditions of stabilizer bar

부에 Fig. 5와 같이 적용하였으며, 곡선 밴딩부 중앙을 기준으로 양쪽 70 mm 구간에 실시되었다.

3.3 스테빌라이저바 피로 시험

스테빌라이저바의 내구시험은 Fig. 6과 같이 양

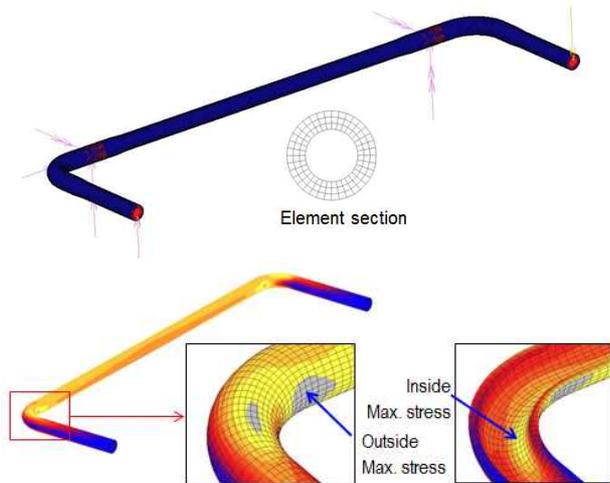


Fig. 7 FE model of stabilizer bar

쪽의 마운팅부를 베어링으로 지지하고 양끝 단에서 변위를 가하여 스테빌라이저바가 절손될 때까지의 피로 수명을 구하였다.

스테빌라이저바 내구시험은 고속내구시험기(High speed oscillator for stabilizer bar, iABG, GER)를 사용하였으며, 8 Hz 속도로 실시하였다. 이때 양끝단에 가해지는 변위값은 ±38.5 mm로 동일 값을 역상으로 가진하였다.

3.4 중량 저감율에 따른 중공 스테빌라이저바 응력 해석

Table 3에 기술된 중공 스테빌라이저바의 중량저감비율(W/R)에 따른 내외측의 응력 변화는 유한요소 해석(FEA, Finite element analysis)을 통해 검토하였다. 해석에 사용된 프로그램은MSC/Marc 비선형해석솔버(Non-linear solver)를 사용하였다.

유한 요소 해석은 Fig. 7과 같이 모델링하였으며, 8노드 육면체 요소(8node Hexa 3D element)를 사용하였다. 경계 조건은 Fig. 6의 내구시험 조건과 동일하게 2곳의 지지부(Mounting) 절점(node)을 회전이 가능하고 상하 움직임이 없도록 구속한 후 양쪽 끝단에서 동일한 상대 변위(±38.5mm)를 가하여 그 때 작용하는 밴딩부의 내측 및 외측의 최대 주응력(Max. principal stress)을 계산하였다.

파이프 외측의 최대 주응력은 밴딩부와 마운팅부 사이에서 발생하였으며, 파이프 내측의 최대 주응력은 밴딩부 중앙부분에서 발생하였다.

4. 결 과

4.1 내측 쇼트피닝 가공에 따른 압축잔류응력 쇼트피닝 가공에 따라 표면부는 압축잔류응력이

Table 5 Residual stress of tubular stabilizer bar

Position	Residual stress		Remark
	LH Side	RH Side	
Out side surface	-507 MPa	-512 MPa	
Inside surface	-589 MPa	-454 MPa	

Table 6 Stress increase rate by weight reduction ratio

Variant	W/R (%)	Outer stress (MPa)			Remark
		Increase rate			
		Vs. Solid	Vs. Tube		
Solid	0%	671	-	-	Solid
Tube 1	36%	810	21%	0%	Tube
Tube 2	40%	858	28%	8%	
Tube 3	45%	932	39%	15%	
Tube 4	48%	980	46%	20%	
Variant	W/R (%)	Inner stress (MPa)			Remark
		Increase rate			
		Vs. Solid	Vs. Tube		
Solid	0%	-	-	-	Solid
Tube 1	36%	505	-	0%	Tube
Tube 2	40%	570	-	13%	
Tube 3	45%	647	-	28%	
Tube 4	48%	702	-	39%	

발생하게 되며 이러한 압축잔류응력은 균열의 발생을 지연시키는 역할을 하게 된다. 내측 쇼트피닝 가공에 의한 압축 잔류응력 측정은 최대응력 지점부인 밴딩부의 단면을 절단하여 내측쇼트피닝 가공면을 X선 회절법(X-ray diffraction method)으로 표면부의 압축잔류응력 값을 측정하였다.

쇼트피닝에 의한 압축 잔류응력의 측정된 결과 값은 Table 5와 같다.

4.2 경량화 비율에 따른 응력 비교

동일한 변위(하중)에 대해서 중실 스테빌라이저바와 중공 스테빌라이저바에 작용하는 최대 응력을 비교한 결과가 Table 6에 나타내었다. 동일한 변위(하중)가 작용할 때 중실(Solid) 대비 중공 스테빌라이저바의 중량 저감 비율(W/R)이 36%(Tube 1)에서 48%(Tube 4)로 증가됨에 따라서 외측 응력은 21%에서 46%까지 증가하였다. 또한 중공 사양만 비교하면 Tube1에서 Tube 4로 중량 저감율이 높아질수록 외측응력은 20%까지 증가되었다. 이

Table 7 Stress increase rate by weight reduction ratio

Variant	W/R (%)	Outer Stress (MPa)	Inner Stress (MPa)	ID/OD Stress (%)
Tube 1	36%	810	505	62.3
Tube 2	40%	858	570	66.5
Tube 3	45%	932	647	69.5
Tube 4	48%	980	702	71.6

Table 8 Results of fatigue life

Variant	W/R (%)	Fatigue life ratio	
		W/O Inner shot peening	W/ Inner shot peening
Tube 1	36%	100%	332%
Tube 2	40%	89%	284%
Tube 3	45%	55%	147%
Tube 4	48%	44%	127%

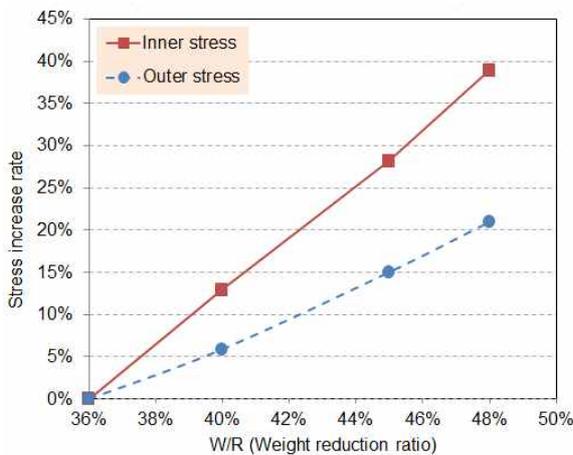


Fig. 8 Stress growth rate by weight reduction ratio

는 같은 강성을 갖고 있는 스테빌라이저바에서도 설계시 중량저감율(두께)을 고려야만 정확한 내구 수명 예측이 가능할 것이다.

또한, 중공 스테빌라이저에 내측응력도 중량 저감 비율(W/R)이 증가할수록 최대 39%까지 내측응력이 증가됨이 해석적으로 나타났다.

Fig. 8은 중량 저감율(W/R)에 따른 내외측의 응력 변화량(Stress increase rate)을 그래프로 나타내었다. 중량 저감율(W/R)이 증가함에 따라서 외측보다 내측 응력의 증가율이 약 2배 정도 기울기가 급하게 증가하는 경향을 나타내었다.

4.3 경량화 비율에 따른 파이프 내외측 응력

중공 스테빌라이저바의 경량화 비율에 따라 외측응력과 내측응력의 비율을 Table 7에 비교하였

Table 9 Fatigue crack origin due to shot peening

Variant	W/R (%)	W/O Inner shot peening		W/ Inner shot peening	
		Inside surface	Outside surface	Inside surface	Outside surface
Tube 1	36%	0%	100%	0%	100%
Tube 2	40%	20%	80%	0%	100%
Tube 3	45%	100%	0%	40%	60%
Tube 4	48%	100%	0%	20%	80%

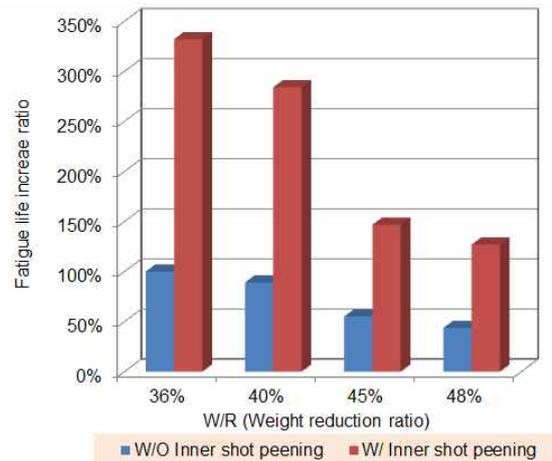


Fig. 9 Fatigue life growth ratio by weight reduction ratio

다. 중공 스테빌라이저바의 중량저감 비율(W/R)이 증가할수록 파이프 내측 응력 증가 비율이 크기 때문에 파이프 내/외측의 응력 차이도 줄어들게 된다.

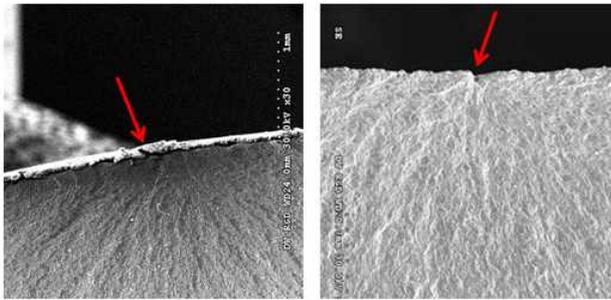
4.4 경량화 비율에 따른 내구 수명 비교

동일한 변위(하중)가 중공 스테빌라이저바에 가한 후 중량 저감 비율에 따라서 내구 수명 변화 및 파이프 내측 쇼트피닝 가공 후 내구 수명 시험 결과를 Table 8에 나타내었다.

중공 스테빌라이저바의 중량 저감 비율(W/R)이 36%를 기준으로 해서 중량 저감 비율이 48%까지 증가함에 따라서 내구수명은 Tube 1(W/R 36%) 대비하여 89%, 55%, 44%로 수명이 급격하게 감소되었다.

내측 쇼트피닝 가공한 스테빌라이저바의 경우에는 내측 쇼트피닝 가공하지 않은 스테빌라이저바에 비해 내구 수명이 332%, 284%, 147%, 127% 향상되는 결과를 나타내었다.

또한, 피로 파단은 응력 최대 지점인 밴딩부와 마운팅부 사이에서 나타났으며, Table 9와 같이 경량화 비율이 증가함에 따라 균열의 발생 위치는 외측 표면에서 내측으로 변화하는 경향을 나타내



(a) Outside surface crack (b) Inside surface crack

Fig. 10 Fracture crack origin

었다.

내측 쇼트피닝 가공하지 않는 제품의 경우 경량화율 45% 이상부터는 100% 파이프 내측에서 피로 균열이 시작되어 파단되는 경향을 나타내었다.

이러한 파이프 밴딩부의 내측 파단도 내측 쇼트피닝 가공을 적용함에 따라서 내측 경량화율 45% 이상의 파이프에서 내측 파단 현상이 감소됨을 나타내었다. 이러한 현상은 파이프 내측에도 쇼트피닝 가공에 따른 압축잔류응력 영향으로 인해 피로 균열 발생이 지연되어 피로 수명이 증가하였음을 알 수 있었다.

Fig. 10은 피로 균열부를 광학현미경(SEM)으로 관찰한 사진이다. Fig. 10(a)는 외측 표면에서 발생된 피로 균열이며, Fig. 10(b)는 내측표면에서 발생된 피로 균열 사진이다.

5. 결론

본 연구에서는 자동차용 중공 스테빌라이저바에 대해서 중량 감소로 인한 두께 감소는 내구 수명에 상당한 영향을 미치며, 이러한 내구 수명 증대를 위해 내측 쇼트피닝을 적용하여 피로 수명 향상할 수 있는 방안을 검토하였다.

본 연구에서 내측 쇼트피닝 가공을 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 중공 스테빌라이저바의 경량화율이 증가할수록 파이프의 외경은 커지고 두께는 감소하는 경향을 나타낸다.

(2) 경량화율이 증가할수록 중공 스테빌라이저

바의 외측응력 및 내측응력이 급격하게 증가한다. 외측응력 증가율에 비해 내측응력 증가율은 약 2배 정도 빠르게 증가한다.

(3) 경량화율이 증가할수록 중공 스테빌라이저바의 내구 수명이 감소하며, 내측 쇼트피닝 가공을 실시하면 내구 수명을 증대할 수 있다.

(4) 중공 스테빌라이저바 설계시 경량화 비율에 따른 내구수명 감소를 감안해서 설계가 필요하며, 중량 저감율 40% 이상인 경우 내측 쇼트피닝 가공 여부를 판단해야 한다.

후 기

본 연구는 중소기업청의 재원으로 중소중견기업 지원사업(World-Class 300 프로젝트, S2317960, 10% 승차감 · 조정 안정성 향상을 위한 저가형 능동 현가모듈 개발)의 지원을 받아 수행되었음.

참고문헌

(References)

- (1) Lee, S.-H. and Kim, H.-S., 1999, "The Effect of 2-step Shot Peening on the Fatigue Behavior of Spring Steel," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 23, No. 1, pp. 140~147.
- (2) Iida, K., A., 1984, "Dent and Affected Layer Produced by Shot Peening," *2nd International Conference on Shot Peening*, Chicago, pp. 283~292.
- (3) Cheong, S.-K., Lee, S.-H. and Chung, S.-C., 2001, "Effect of the Peening Intensity by Shot Peening," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 25, No. 10, pp. 1590~1596.
- (4) Lee, J.-G. and Kim, J.-K., 1997, "Influence of Residual Stress due to Shot Peening on Fatigue Strength and Life," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 21, No. 9, pp. 1498~1506.
- (5) Wittek, A. M. and Richter, H. C., 2011, "Tubular Stabilizer Bars - Calculation and Construction," *Transport Problems*, Vol. 6, No. 3, pp. 17~25.
- (6) Michael, P. B., 2000, "Method for Improving the Fatigue Life of a Tubular Stabilizer Bar," *US Patent*, US6418770B1.