

# 다층형 벨로우즈의 성능에 미치는 스테인리스강 물성의 영향

서창희<sup>1</sup> · 오상균<sup>1</sup> · 정윤철<sup>#</sup> · 이락규<sup>1</sup> · 박명규<sup>2</sup> · 김영석<sup>3</sup>

## Effect of Stainless Steel Properties on Performance of Multi-layer Bellows

C. H. Suh, S. K. Oh, Y-C. Jung, R. G. Lee, M. K. Park, Y. S. Kim

(Received December 11, 2008)

### Abstract

Generally ferritic stainless steels are used for parts of exhaust system in commercial vehicle, because they have many advantages as low price and high corrosion resistant compared with austenitic stainless steels. Even though ferritic stainless steels have such various merits, austenitic stainless steels have been used to manufacture multi-layer bellows with complex geometry because of their high ductility. Recently, the mechanical properties of the ferritic stainless steels are getting improved and alternating austenitic stainless steel. In this paper, the possibility of mass production of multi-layer bellows made of ferritic stainless steel like MH1 and 443CT was studied. Tensile test, ridging test and corrosion test were carried out to observe material properties of STS304, MH1 and 443CT. Three types of prototype bellows were made using STS304, MH1 and 443CT stainless steels, and stiffness and fatigue tests were carried out to evaluate performance of the prototype bellows.

**Key Words** : Bellows, Multi-layer, Ferritic Stainless Steel, Roll Forming

### 1. 서 론

자동차용 벨로우즈는 자동차의 배기계에서 엔진과 배기파이프를 연결하며, 엔진과 외부의 진동을 흡수하는 역할을 한다. 배기량이 크고 도로주행 여건이 열악한 상용차용 벨로우즈는 승용차용 벨로우즈에 비해서 보다 우수한 내구성이 요구되기 때문에 단층으로 사용되는 승용차용과는 달리 다층의 형태로 사용된다. 대표적인 제조 공법에는 하이드로포밍과 롤포밍 공법이 있으며, 하이드로포밍 공법에 비해서 롤포밍 공법은 연속작업이 가능하고 부대장치가 많이 필요하지 않는 장점을

가지고 있다. 또한 판재 소재를 성형하여 최종 제품을 생산하기 때문에 중간에 파이프 제조공정이 필요치 않아 제조 원가의 절감에도 유리하다.

현재 벨로우즈용 소재로는 주로 오스테나이트계의 STS304 스테인리스강이 사용되고 있다. 페라이트계 스테인리스강은 내부식성이 우수하고 오스테나이트계 스테인리스강에 비해 고가 원소인 니켈의 함유량이 매우 낮아 가격이 저렴하기 때문에 배기계 부품용으로 널리 사용되고 있다. 하지만 성형성은 다소 부족하기 때문에 벨로우즈와 같이 고성형이 요구되는 부품에는 성형시 크랙 발생과 같은 많은 문제를 나타내고 있다. 국내외

1. 대구기계부품연구원 기계부품소재시험평가센터

2. 영남이공대학 기계과

3. 경북대학교 기계공학부

# 교신저자: 대구기계부품연구원 기계부품소재시험평가센터,

E-mail:ycjung@dmi.re.kr

에서 성형성과 내구성 향상을 위한 페라이트계 스테인리스강의 개발이 활발히 진행[1]되고 있으나 아직 페라이트계 스테인리스강을 적용한 벨로우즈의 개발에 대한 연구는 미미한 실정이다. 벨로우즈에 관한 기존의 연구들은 대부분이 오스테나이트계 스테인리스강을 사용한 단층관에 대한 것이며, 연구 내용도 형상 최적화에 의한 내구수명 향상에 대한 연구들이 대부분이다[2~4].

본 연구에서는 성형성과 부식성이 우수한 페라이트계 스테인리스강인 MH1 과 443CT 를 사용하여 상용차용 다층형 벨로우즈를 개발하였다. 개발된 벨로우즈의 양산적용 가능성을 검토 하기 위해 기존의 STS304 를 포함한 3 가지 소재에 대한 재료 물성 평가, 시제품 제작, 강성 및 내구시험을 수행하여 개발된 벨로우즈의 성능을 평가하였다.

## 2. 시험 방법

본 연구에 사용된 소재는 두께가 0.25mm 인 STS304, MH1, 443CT 이며, 화학적 조성은 발광분광분석기를 사용하여 평가하였다.

소재의 연성과 강도를 평가하기 위한 인장시험은 KS B 0802 규격에 따라서 진행하였으며, 시편은 KS B 0801 13B 호 형상으로 압연방향과 평행하게 가공하였다. 시험은 Instron 5569 를 사용하여 변위 제어 방식으로 0.000033m/s(≒2mm/min)의 속도로 수행하였으며, 변형율의 정밀한 측정을 위해서 표점 거리 50mm 의 연신율계(extensometer)를 사용하였다.

소재의 리징(ridging)특성을 평가하기 위한 시편은 KS B 0802 5 호 형상으로 압연방향과 평행하게 가공하였으며, 변형율이 25%되는 시점에서 실험을 멈추고 시편의 중심부에서 인장방향과 수직인 방향으로 표면거칠기를 측정하였다. 또한 리징특성이 소재의 부식성에 미치는 영향을 검토하기 위해서 원판재와 25% 연신된 인장시편을 사용하여 스테인리스강의 부식성 평가에 널리 사용되는 JASO 사이클부식시험을 수행하였다.

스테인리스 소재를 사용하여 제조되는 다층형 벨로우즈의 몸체부 형상을 Fig. 1 에 나타내었다. 몸체부는 외측 지름이 96mm, 주름부의 피치와 깊이를 각각 8.3mm 와 9.6mm 로 설계하였다. 두께가 0.25mm, 폭이 89mm 인 관재물을 사용하여 우선 4 개의 산과 골을 가지는 주름 형상을 성형하고 4 겹의 나선형으로 겹치는 공정을 거쳐서 다층

형 벨로우즈의 몸체부를 완성하였다.

몸체부의 시제품은 롤포밍 공정으로 제작하였으며, 변형율의 급격한 변화를 피하기 위해서 6 개의 롤을 사용하여 주름 형상을 순차적으로 성형하였다. 이후 4 겹의 구조를 가지는 다층의 원통형으로 성형하였다. 몸체부 성형 후 양쪽 끝단에 파이프를 용접하여 벨로우즈를 완성하였으며, 유연성을 부여하기 위해서 압축 공정을 통해 돌기의 형상이 S 자형이 되도록 사이징 처리하였다.

벨로우즈의 강성은 Instron 5569 를 사용하여 0.000083m/s(≒5mm/min)의 속도로 인장 변위를 부여하여 평가하였다.

내구시험은 변위 제어 방식으로 수행하였으며, 축방향으로 인장 15mm 와 압축 15mm 가 반복적으로 작용하도록 하였다. 시험은 모터와 캠을 사용하여 회전운동을 직선왕복운동으로 변화시키는 전용으로 제작된 장비에서 수행하였으며, 시험 속도는 15Hz 로 하였다.

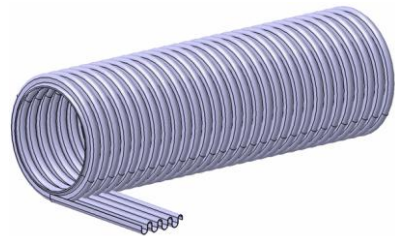


Fig. 1 Schematic of the multi-layer bellows body

## 3. 결과 및 고찰

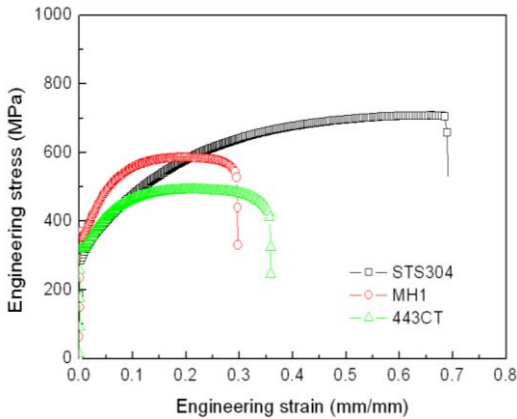
### 3.1 소재 특성

다층형 벨로우즈 제조에 사용된 소재의 화학 조성을 Table 1 에 나타내었다. STS304 소재는 니켈의 함유량이 매우 높으나 페라이트계인 MH1 과 443CT 는 니켈 함유량이 매우 낮다. 또한 STS304 는 오스테나이트 안정화를 위해 망간을 다량으로 함유하였다. 443CT 는 부동태 피막을 형성하는 크롬을 다량 함유하고 있어 부식성 측면에서 유리할 것으로 예상된다.

인장시험 결과를 Fig. 2 와 Table 2 에 나타내었다. STS304 가 MH1 과 443CT 에 비해서 약 2 배 정도의 우수한 연성을 나타내었으며, 벨로우즈의 성형 시에도 STS304 가 유리할 것으로 판단된다. 오스테나이트계 스테인리스강은 페라이트계 스테인리스강에 비해 인장강도와 연신율은 매우 높지만

**Table 1** Chemical composition of stainless steels used in the present study(wt%)

Materials	C	Si	P	Mn	Ni	Cr
STS304	0.05	0.56	0.03	1.63	8.45	18.19
MH1	0.004	0.37	0.02	0.19	0.20	15.31
443CT	0.002	0.11	0.02	0.16	0.24	22.24

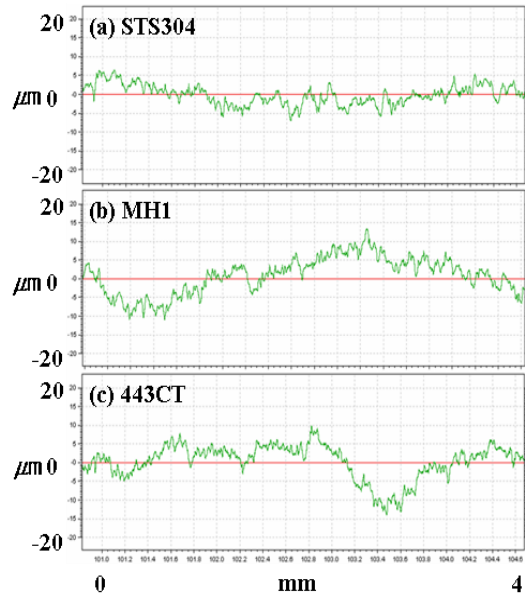


**Fig. 2** Comparison of engineering stress vs strain curves

**Table 2** Comparison of the results of tensile test

Materials	Tensile strength (MPa)	0.2% offset yield strength (MPa)	Elongation (%)
MH1	586	354	30
443CT	492	322	36

항복강도는 오히려 낮다. 연신율에서 커다란 차이를 나타내는 것은 소성변형시 작동가능한 슬립시스템의 수에 기인하고 오스테나이트계 스테인리스강의 커다란 강도는 소성변형의 진행에 따라 전위강화와 응력 유기변태에 의한 마르텐사이트가 형성되기 때문인 것으로 생각된다. STS304는 네킹의 발생 없이 최종파괴가 발생한 반면, MH1과 443CT는 연신율이 약 20%인 지점에서 확산박이 발생한 후 최종파괴에 이르렀다. 본 결과로부터 벨로우즈의 성형시 성형률이 약 20%이내이면 페라이트계 스테인리스강에서도 성형시 네킹이나 파단발생과 같은 문제점은 없을 것으로 생각된다.

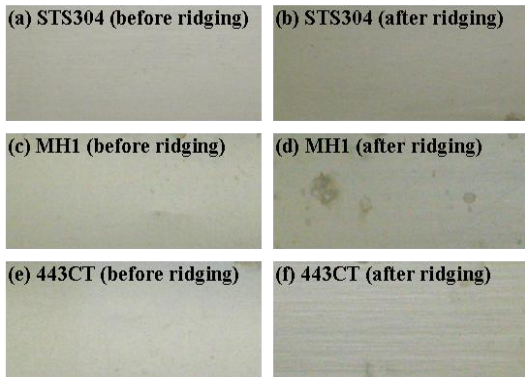


**Fig. 3** Surface profiles on center of specimens after ridging

**Table 3** Comparison of the results of roughness measurement

Materials	Ra(μm)		Rz(μm)	
	Before ridging	After ridging	Before ridging	After ridging
STS304	0.121	0.849	0.716	4.474
MH1	0.126	0.981	0.767	5.128
443CT	0.117	0.993	0.671	5.068

리징 시험 후 측정된 표면형상과 표면거칠기 결과를 Fig. 3과 Table 3에 나타내었다. 표면형상 측정 결과에서 STS304에 비해서 MH1과 443CT는 더욱 커다란 진폭의 변화를 나타내었으며, 표면거칠기 측정에서도 STS304에 비해서 MH1과 443CT는 Ra와 Rz가 다소 높게 나타났다. 인장 후 표면이 거칠어지는 리징 현상의 발생 원인은 두께에 따라서 불균질하게 발달하는 집합조직 때문이라고 알려져 있으며, 특히 페라이트계 스테인리스강의 경우에는 주조 후 슬래브 중심층에 발달한 주상정의 결정립 미세화가 잘 이루어 지지 않고, 판재의 중심층에 방위가 유사한 결정립군이 형성되어 강한 소성 이방성을 나타내게 되어 성형시 리징 발생률이 증가하게 된 것으로 보고되고 있다[5].



**Fig. 4 Comparison of the results of cyclic corrosion test using stainless steel sheets and 25% elongated stainless steel sheets**

표면특성은 탄성영역에서 행해지는 고주기 피로시험에서 응력 집중원으로 작용하여 재료의 내구성을 저하시키는 요인으로 작용하므로, 벨로우즈 성형 후 발생한 리징이 내구성에 미치는 영향은 금후 보다 심도 있는 연구가 필요하다.

리징 발생 전후 시편을 사용하여 수행된 사이클 부식 시험 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 리징 발생 전 시편에서는 3 가지 소재 모두에서 부식이 발생하지 않았지만 리징 발생 후 시편에서는 다소 차이를 나타내었다. STS304 와 443CT 에서는 부식발생이 거의 없었으나, MH1 에서는 일부 영역에서 부식발생이 시작되고 있다. 이러한 현상은 두 가지 원인에 의한 결과로 생각된다. 첫 번째는 첨가된 원소에 대한 영향으로, 일반적으로 스테인리스강의 경우 첨가된 원소 중 크롬에 의해서 표면에 얇고 치밀한 크롬산화물층(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)인 부동태 피막의 형성으로 고내식성을 가지게 되는데, 오스테나이트계 스테인리스강인 STS304 는 크롬 이외에 니켈과 몰리브덴이 첨가되어 페라이트계 스테인리스강에 비해 내식성이 우수하다고 알려져 있다. MH1 과 443CT 의 경우, 같은 페라이트계 소재이지만 첨가된 크롬의 양이 많은 443CT 가 더욱 우수한 고내식성을 가지게 된다. 두 번째는 페라이트계 스테인리스강에서 현저하게 나타나는 리징에 의한 영향이다.

리징 후 MH1 과 443CT 에서 발생한 깊은 골들로 인해 유효 표면적이 증가하고 분무된 염수가 표면에 잔류할 수 있는 시간과 양이 증가하여 가혹한 조건을 만들었기 때문에 부식발생에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.



**Fig. 5 Multi-layer bellows manufactured in the present study by roll forming with different materials**

### 3.2 시제품 제작

롤포밍 공법에 의해서 몸체부 시제품을 제작하였으며, 6 개의 물을 배치하여 주름 형상 성형이 순차적으로 진행되도록 하였다. 3 가지 소재 모두 성형시에 파단이나 주름과 같은 문제들은 발견되지 않았었다. 완성된 시제품의 형상을 Fig. 5 에 나타내었으며, 제작된 시제품의 외형과 치수를 관찰한 결과 소재별로 특별한 차이점은 발견되지 않았다.

### 3.3 성능평가

시제품의 강성 평가 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 3 가지 소재로 제조된 벨로우즈 모두 유사한 기울기를 나타내고 있어 벨로우즈의 강성은 소재에 따라서는 큰 영향을 받지 않는 것으로 생각된다. 즉, 롤포밍 성형공정은 소재의 강도와 연성의 변화에 민감하지 않아, 소재의 차이에도 불구하고 설계된 치수 및 형상으로 성형이 원활히 수행된 것으로 판단된다. 선도가 약간의 비선형성을 나타내는 것은 제조공정의 불균일에서 오는 미세한 차이일 것으로 생각된다.

벨로우즈의 강성과 형상이 유사하므로 벨로우즈가 작동시 발생하는 국부적인 응력 분포와 크기는 소재에 관계없이 모두 유사한 수준일 것으로 생각되며, 따라서 벨로우즈의 내구수명은 소재의 강도와 표면특성에 의해서 주로 영향을 받을 것으로 생각된다.

시제품을 사용한 내구시험 결과를 Table 4 에 나타내었으며, 시험 후 파단된 형상을 Fig. 7 에 나타

내었다. STS304 와 MH1 으로 제조된 벨로우즈는 50 만회의 목표 수명을 만족하였으나 443CT 벨로우즈는 다소 낮은 수명을 나타내었다. 유사한 표면 특성을 가지는 MH1 과 443CT 벨로우즈의 경우는 인장강도가 높은 MH1 벨로우즈의 내구수명이 높게 나타났다. 금속 재료의 고주기 내구수명은 재료의 인장강도와 밀접한 관계를 가지며, 인장강도의 증가에 따라서 내구수명이 선형적으로 증가하게 된다[6]. 이러한 원인으로 인해서 강도가 우수한 MH1 벨로우즈의 내구수명이 높게 나타난 것으로 생각된다.

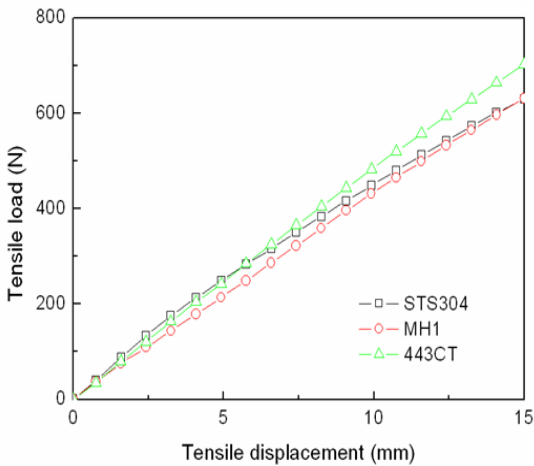


Fig. 6 Comparison of the results of stiffness test using multi-layer bellows



Fig. 7 Fractured 443CT multi-layer bellows after fatigue test

Table 4 Comparison of the results of fatigue test using multi-layer bellows

Materials	Fatigue life (cycles)
STS304	500,000
MH1	500,000
443CT	350,000

고주기로 반복하중을 받는 경우에 내구수명에 영향을 미치는 주요한 인자 중 다른 하나는 소재의 표면특성이다. 롤포밍 공정에서 소성변형을 가장 심하게 받는 주름 형상부에서 리징 발생 방향과 수직하게 표면 거칠기를 측정하였다. 적용 소재별 벨로우즈의 주름부 Rz 값은 STS304 의 경우 2.243 $\mu$ m, MH1 의 경우 4.833 $\mu$ m, 443CT 의 경우 3.418 $\mu$ m 로 시편을 사용한 25% 리징 시험시 보다는 전반적으로 다소 낮은 값을 나타내었으나, 롤포밍 성형시에도 리징에 의한 표면 거칠기값은 상당히 상승한 것으로 측정되었다. 오스테나이트계 스테인리스강에 비해 페라이트계 스테인리스강이 적용된 벨로우즈에서 거칠기 값이 높게 나타나 시편 시험에서와 동일한 경향을 나타내었다. 443CT 벨로우즈에 비해서 표면특성이 우수한 STS304 벨로우즈의 경우에 높은 수명을 나타내었다. 그러나 443CT 벨로우즈에 비해 표면특성이 유사한 MH1 벨로우즈도 높은 내구수명을 나타내고 있어 표면특성 보다는 재료의 강도가 벨로우즈의 내구수명에 주된 영향을 미치는 인자인 것으로 판단된다. 표면특성이 벨로우즈의 내구수명에 미치는 영향에 대해서는 금후 소재의 피로시험 등을 통해서 정량적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

페라이트계 스테인리스강의 자동차용 벨로우즈 적용 가능성을 연구하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 소재 자체의 연성은 STS304가 가장 우수하였지만, 3가지 소재 모두 벨로우즈의 성형에는 큰 문제점을 나타내지 않았다.

(2) 롤포밍 공정은 다수의 롤을 사용하는 순차적인 성형공정으로 소재의 연성이 크게 요구되지 않으며, 연성이 낮은 페라이트계 스테인리스 소재의 성형에 적합한 공법임을 확인하였다.

(3) 리징에 의한 표면거칠기 증가는 오스테나이트계 소재에 비해 페라이트계 소재에서 다소 높게 나타났으며, 부식성에 다소 영향을 미치는 것으로 판단된다.

(4) 벨로우즈의 내구성에 영향을 미치는 주요한 인자는 재료의 강도인 것으로 판단되며, 페라이트계 스테인리스강 중 고강도의 강을 선정하면 벨로우즈의 내구성이 더욱 향상 될 것으로

기대된다. 리징에 의한 표면거칠기 증가도 어느 정도 내구성에 영향을 미치는 것으로 생각되나 정량적인 영향도 평가에 대해서는 향후 연구가 필요하다.

(5) MH1을 사용한 벨로우즈는 기존의 STS304를 사용한 벨로우즈와 유사한 내구수명을 나타내었으며, 양산 적용 가능성을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부와 한국부품소재산업진흥원의 부품소재전문기업 기술지원사업의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

[1] Y. Inoue and M. Kikuchi, 2003, Present and future trends of stainless steel for automotive exhaust

system, Shinnitetsu Technical Report, Vol.378, pp. 55~61.

- [2] L. Younsheng, 1990, Strength analysis and structural optimization of U-shaped bellows, Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 42, pp. 33~46.
- [3] Z. Qian, Y. Tashiro, S. Takezono, W. Satoh and J. Harada, 1998, Stress analysis and fatigue life of multi-layered bellows, PVP, Vol. 368, pp. 211~217.
- [4] H. J. Kim, H. S. Kim, J. P. Kim, J. H. Park and M. J. Kim, 2006, Shape optimization for performance improvement of ship's U-type bellows, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol.20, No.6, pp. 123~129.
- [5] H. J. Shin, J. K. An, S. H. Park and D. N. Lee, 2003, The effect of texture on ridging of ferritic stainless steel, Acta Materialia, Vol. 51, pp. 4693~4706.
- [6] J. A. Bannantine, J. J. Comer and J. L. Handrock, Fundamentals of metal fatigue analysis, pp. 1~30.