

페라이트계 스테인리스강을 사용한 다층형 벨로우즈 개발

서창희^{#1}, 오상균¹, 정윤철¹, 최진영², 박명규³, 김영석⁴

Development of Multi-layer Bellows using Ferritic Stainless Steel

C. H. Suh, S. K. Oh, Y-C. Jung, J. Y. Choi, M. K. Park and Y. S. Kim

Abstract

Ferritic stainless steel is used for parts of exhaust system of commercial vehicle, because it has such advantages as low price and high corrosion resistant compared with austenite stainless steel. Even though ferritic stainless steel has these merits, to manufacture multi-layer bellows with complex geometry, austenite stainless steel is being used in the industry, because of its high ductility. However, recently, the mechanical property of the ferritic stainless is getting improved and alternating austenitic stainless steel. In this paper, the possibility of mass production of bellows made of ferritic stainless steel like MH1 and 443CT is studied. Tensile test and ridging test are carried out to observe mechanical properties of STS304, MH1 and 443CT. Forming analysis using FEM is performed to investigate plastic strain during forming process. Prototype bellows has been made using STS304, MH1 and 443CT, respectively, and fatigue tests are carried out to evaluate fatigue life of bellows.

Key Words : Bellows, Multi-layer, Ferritic Stainless Steel, Roll Forming, Finite Element Method

1. 서 론

자동차용 벨로우즈는 자동차의 배기계에서 엔진과 배기파이프를 연결하며, 엔진과 외부의 진동을 흡수하는 역할을 담당한다. 배기량이 크고 도로주행 여건이 열악한 상용차용 벨로우즈는 승용차용 벨로우즈에 비해서 보다 우수한 내구성이 요구되기 때문에 단층으로 제조되는 승용차용과는 다르게 다층의 형태로 제조되어진다. 대표적인 제조 공법은 하이드로포밍과 롤포밍 공법이며, 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 사용되고 있는 벨로우즈용 소재는 오스테나이트계인 STS304 이다. 페라이트계 스테인리스강은 오스테나이트 스테인리스강에 비해 고가 원소인 니켈의 함유량이 거의 없기 때문에 가격이 저렴하고 내부식성이 우수하기 때문에 배기계 부품용으로 널리 사용되고 있다. 하지만 성형성은 부족하기 때문에 벨로우즈와 같이 고성형이 요구되는 부품의 제조시에는 성형시 크랙 발생과 같은 많은 문제를 나타내고 있다. 국내외에서 성형성이 향상된 페라이트계 스테인리스강의 개발이 활발히 진행[1]되고 있으나 아직 페라이트계 스테인리스강을 적용한 벨로우즈의 개발에 대한 연구는 미미한 실정이며, 기존의 벨로우즈 관련 연구들은 대부분 형상의 최적화에 의한 내구수명 향상에 대한 연구들이다[2, 3, 4].

본 연구에서는 성형성과 부식성이 우수한 페라

1. 대구기계부품연구원 기계부품소재시험평가센터
2. 정도정밀
3. 영남이공대학 기계과
4. 경북대학교 기계공학과
E-mail:suhch@dmi.re.kr

이트계 스테인리스 강인 MH1과 443CT를 사용하여 상용차용 다층형 벨로우즈를 개발하였으며, 기존의 STS304를 사용하여 제조된 벨로우즈와의 특성을 비교하여 양산적용 가능성을 검토 하였다. 3가지 소재를 사용하여 재료 물성을 평가하였으며, 유한요소법을 사용한 성형해석, 시제품 제작, 내구시험을 수행하여 제품의 수명을 평가하였다.

2. 제 목

2.1 실험 방법

본 연구에 사용된 소재는 두께가 0.25 mm 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. 실험은 Instron 5569 를 사용하여 변위 제어 방식으로 2 mm/min 의 속도로 수행하였다. 변형율의 정밀한 측정을 위해서 표점거리 50 mm 의 연신율계(extensometer)를 사용하였다.

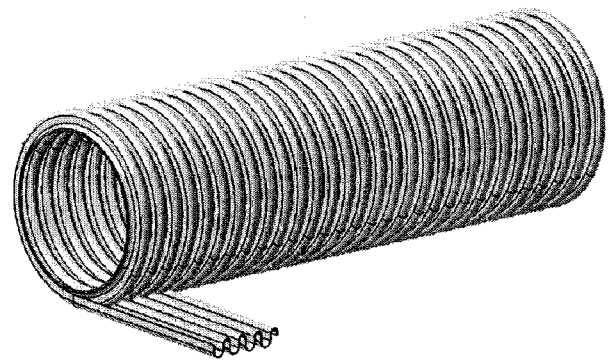
소재의 리징(ridging)특성을 평가하기 위해 시편은 KS B 0802 5 호 형상으로 압연방향과 평행하게 가공하였으며, 변형율이 25%되는 시점에서 실험을 멈추고 시편의 중심부에서 인장방향과 수직인 방향으로 표면거칠기를 측정하였다.

벨로우즈의 설계 형상과 성형공정을 검토하기 위해서 사용한 유한요소모델을 Fig. 1 에 나타내었다. 벨로우즈는 외측 지름이 96 mm, 돌기부의 피치와 깊이를 각각 8.3 mm 와 9.6 mm 로 설계하였다. 성형공정은 두께가 0.25 mm, 폭이 89 mm 인 판재물을 사용하여 우선 4 개의 산과 골을 가지는 주름 모양을 형성하고 4 겹의 나선형으로 겹치는 공정을 거쳐서 최종 다층형 벨로우즈를 완성하였다. 본 연구에서는 주된 성형인 판재의 주름 성형만을 고려하여 해석을 수행하였다. 해석모델을 간략히 하기 위해서 평면변형 상태로 가정하고 하형은 동일하게 고정시키고 단공정형(single step process)과 다단공정형(multi step process)의 2 가지 공정 모형으로 해석을 수행하였다. 단공정형은 상형의 5 개 돌기가 동시에 내려오면서 성형하는 방식이며, 다공정형은 1 번 돌기가 내려오고 이 후 2 번, 최종적으로 3 번 돌기가 내려와서 성형이 완료된다. 소성거동을 묘사하기 위해서 Von Mises 항복조건과 등방경화이론을 적용하였다. 유한요소해

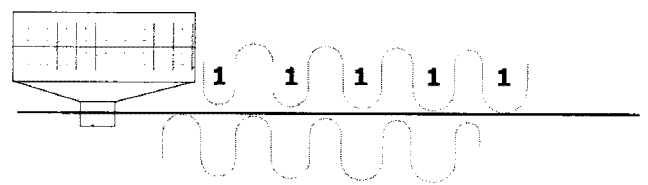
석은 상용 탄소성 해석 프로그램인 MARC 2007 을 사용하였다. 해석에 사용한 요소는 평면변형 솔리드 요소이며, 소성변형중의 급힘변형을 잘 재현하기 위해 두께 방향으로 4 개의 요소를 채용하였다. 실험에서 얻어진 재질별 유동곡선을 사용하여 해석하였으며, 금형과 소재의 마찰계수는 0 으로 하여 풀포밍시의 구름 마찰을 묘사하였다.

롤포밍 공정으로 시제품을 제작하였으며, 변형율의 급격한 변화를 피하기 위해서 6 개의 롤을 사용하여 주름형상을 순차적으로 성형하였다. 이후 4 겹의 구조를 가지는 다층의 원통형으로 성형하였으며, 유연성을 부여하기 위해서 압축 공정을 통해 돌기의 형상이 S 자형이 되도록 사이징 처리하였다. 최종적으로 벨로우즈의 양쪽 끝단에 파이프를 용접하여 벨로우즈를 완성하였다.

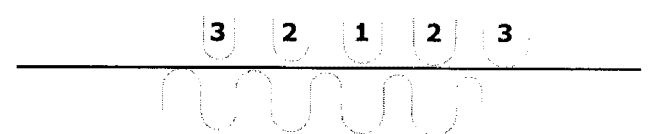
내구시험은 변위 제어 방식으로 축방향으로 벨로우즈에 인장과 압축이 가해지도록 수행하였다. 실험은 모터와 캠을 사용하여 회전운동을 직선왕복운동으로 변화시키는 전용으로 제작된 장비에서 수행하였다.



(a) 3D geometry of bellows during forming process



(b) Single step process



(c) Multi step process

Fig. 1 Forming process of bellows

3. 결과 및 고찰

3.1 소재 특성

소재별 화학적 조성을 Table 1 에 나타내었다. STS304 소재는 니켈의 함유량이 높으나 페라이트 계인 MH1 과 443CT 는 니켈이 거의 첨가되지 않음을 확인하였다.

인장시험 결과를 Table 2 와 Fig. 2 에 나타내었다. STS304 가 MH1 과 443CT 에 비해서 약 2 배 정도의 우수한 연성을 나타내었으며, 벨로우즈의 성형시에도 STS304 가 유리할 것으로 판단된다. STS304 는 네킹의 발생 없이 최종파괴가 발생한 반면, MH1 과 443CT 는 연신율이 약 20%인 지점에서 네킹이 발생하였다. 즉, 벨로우즈의 성형시 성형량이 약 20%이내이면 모든 소재에서 성형시 네킹이나 파단발생과 같은 문제점은 없을 것으로 생각된다.

리징 시험 후 측정된 표면거칠기 결과를 Table 3 에 나타내었다. 실험 전 측정결과는 3 강종 모두에서 표면거칠기 특성이 유사하게 나타났으며, 실험 후 측정에서는 STS304 에 비해서 MH1 과 443CT 의 경우에 Ra 와 Rz 가 다소 높게 나타났다. 리징의 발생 원인은 두께에 따라서 불균질하게 발달하는 집합조직 때문이라고 알려져 있으며, 특히 페라이트계 스테인리스 강은 주조 후 슬래브 중심층에 발달한 주상정의 결정립 미세화가 잘 이루어 지지 않고, 판재의 중심층에 방위가 유사한 결정립 군이 형성되어 강한 소성 이방성을 나타내게 되어 성형시 리징 발생량이 증가하게 된 것으로 생각된다[5].

표면거칠기는 탄성영역 이내에서 행해지는 고주기 피로시험에서 응력 집중원으로 작용하여 재료의 내구성을 저하시키는 요인으로 작용하므로, 벨로우즈 성형 후 발생된 리징이 내구성에 미치는 영향은 추후 보다 심도 있는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

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

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

Table 2 Results of tensile test

Material	Tensile strength (MPa)	0.2% proof strength (MPa)	Elongation (%)
STS304	708	286	69
MH1	586	354	30
443CT	492	322	36

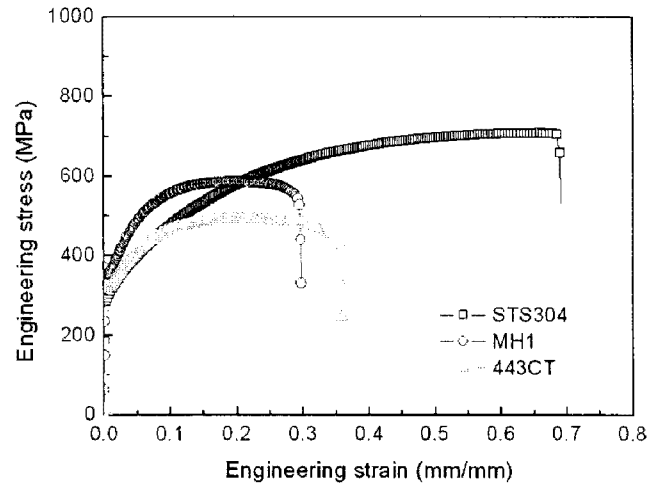


Fig. 2 Engineering stress vs engineering strain curves

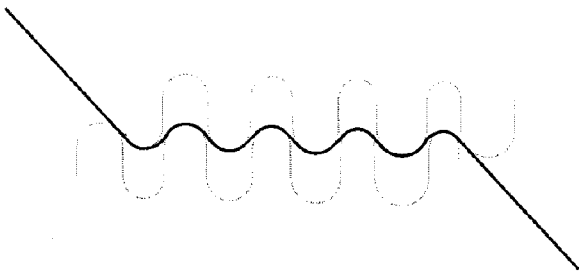
Table 3 Results of roughness test

Material	Ra(μm)		Rz(μm)	
	before	after	before	after
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

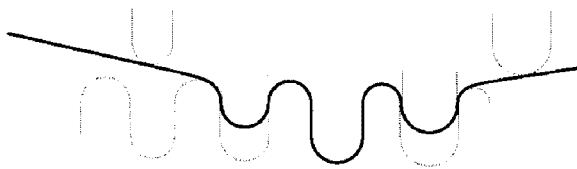
3.2 성형 해석

소재별 해석 결과를 Fig. 3 과 Table 4 에 나타내었다. 단공정형에서는 다단공정형에 비해 소재에 발생하는 국부적인 등가소성변형율(equivalent plastic strain)이 증가하였으며, 동일 공정에는 소재에 따른 차이가 크지 않음을 확인하였다. 즉, 국부적인 등가소성변형율은 소재 특성보다는 성형 공정에 더 큰 영향을 받는다고 판단된다.

단공정형에서는 성형시 각각의 돌기들이 소재의 유동을 막는 일종의 구속으로 작용하기 때문에 소재의 유동이 한쪽방향으로 비교적 자유로운 다단공정형에 비해서 국부적인 소재의 연신이 증가한 것으로 생각된다.



(a) Single step process



(b) Multi step process

Fig. 3 Deformed shape during forming process

Table 4 Results of forming analysis

Forming process	Material	Mises stress (MPa)	Equivalent plastic strain (mm/mm)
Single step process	STS304	826	0.255
	MH1	751	0.262
	443CT	654	0.256
Multi step process	STS304	703	0.191
	MH1	662	0.201
	443CT	643	0.206

3.3 시제품 제작 및 내구성 평가

성형량이 상대적으로 적은 단공정형 방식으로 시제품을 제작하였다. 롤포밍 공법의 특징을 살려 6 개의 롤을 배치하여 성형이 순차적으로 진행되도록 하였다. 성형시에 파단이나 주름과 같은 문제들은 발견되지 않았으며, 브라켓 용접 후 유연성을 부여하고 설계 치수를 확보하기 위해서 압축공정을 통해 사이징 처리하였다. 완성된 시제품의 형상을 Fig. 4 에 나타내었다.

시제품을 사용하여 축방향 인장-압축 조건으로 내구시험을 실시하였으며, 결과를 Table 5 에 나타내었다. STS304 와 MH1 은 목표 수명을 만족하였으나 443CT 소재는 다소 낮은 수명을 나타내었다. 금속 재료는 인장강도의 약 30 ~ 50% 정도에서 피로한도를 가지며, 인장강도가 높아질수록 높은 피로한도를 나타내기 때문에 STS304 와 MH1 의 수

명이 443CT 에 비해서 증가한 주요한 원인으로 생각된다[6]. 성형에 의한 표면거칠기의 증가가 피로특성에 미치는 영향에 대한 연구는 추후 필요할 것으로 생각된다.

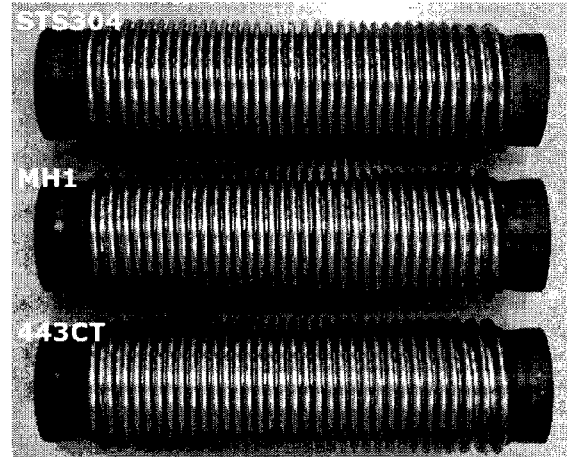


Fig. 4 Bellows manufactured by roll forming

Table 5 Results of fatigue test

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

4. 결론

페라이트계 스테인리스 소재를 사용하여 벨로우즈에 적용 가능성을 연구하였으며 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 소재 자체의 연성은 STS304가 가장 우수하게 나타났으나, 3가지 소재 모두 벨로우즈 성형에는 큰 문제점을 나타내지 않았다.

(2) 리징에 의한 표면거칠기는 페라이트계 소재에서 다소 높게 나타났으나, 벨로우즈의 피로수명에 미치는 영향은 추후 연구가 필요할 것으로 생각된다.

(3) 단공정형 보다는 단공정형이 성형에 유리함을 확인하였다.

(4) MH1를 사용해서 개발된 벨로우즈는 기존의 STS304를 사용한 벨로우즈와 유사한 내구수명을 나타내었으며, 양산 적용 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국부품소재산업진흥원의 부품소재전문기업 기술지원사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 井上宜治, 菊池正夫, 2003, 自動車排氣系用ステンレス鋼の現状と今後の展望, 新日鉄技報, 第 378号, 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] 김형준, 김현수, 김종필, 박준홍, 윤명진, 2006, 선박용 U형 벨로우즈의 성능 향상을 위한 형상 최적화, 한국해양공학회지, 제20권, 6호, 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.