

페라이트계 스테인리스 강 MAG 용접의 기계적 물성에 관한 연구

이경철* · 김재성* · 김현재* · 임경호** · 이보영**†

*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

**한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

A Study on the Mechanical Properties of MAG Weld on Ferritic Stainless Steel Sheets

Gyeong-cheol Lee*, Jae-seong Kim*, Hyun-jae Kim*, Kyoung-ho Lim** and Bo-Young Lee*,†

*Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Koyang 412-791, Korea

**Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Koyang 412-791, Korea

†Corresponding author : bylee@kau.ac.kr

(Received April 21, 2008 ; Revised May 16, 2008 ; Accepted March 27, 2009)

Abstract

Ferritic stainless steels have a good heat resistance and economic advantage. They are used for applications such as automotive exhaust systems where resistance to general corrosion is superior to carbon steels. However, there are not enough research for ferritic stainless steels on weldability mainly used as automotive exhaust manifolds. In this study, mechanical and microstructure properties of as-welded STS 429L and STS 444 ferrite stainless steels were confirmed by tensile, bending, hardness test, optical microscopy and scanning electron microscopy. Tensile strength of the STS 444 is higher than the STS 429L when it is a raw material. In contrast to this fact, STS 429L indicated higher tensile strength after butt welded. In addition, the hardness have a increasing tendency as getting down on the bead.

Key Words : GMAW, MAG, Weldability, Ferritic stainless steel, STS 429L, STS 444, Solid wire STS430LNb

1. 서 론

부품의 경량화와 더불어 내구성의 향상은 차세대 동력원 개발과 더불어 자동차업계에서 활발하게 연구되고 있는 과제이다. 이와 함께 세계적으로 환경문제에 대한 관심이 점점 높아짐에 따라, 배기 시스템의 경량화와 더불어 점점 더 높아지는 배기온도에 대한 내열성을 만족시키는 소재의 개발이 활발히 진행되고 있다. 일부 자동차 제조 회사에서는 고온 내식성 및 내열성이 우수하다고 알려진 페라이트계 스테인리스 강 소재 STS429L 및 STS444를 배기 매니폴드 (이하 hot end부)에서 부터 머플러 팁 (이하 cold end부)까지 전체 배기 계통에 적용하고 있다¹⁾.

이중 hot end부는 고온 강도 및 고온 내식성 내산화성이 특히 더 높게 요구되는 부위로 소재의 특성에 관

한 연구와 성능 및 수명과 관련된 연구가 활발히 진행 중이다. 페라이트계 스테인리스 강에 첨가되는 페라이트 안정화 합금원소 나오븀(Nb) 과 타이타늄(Ti)이 화학적 안정성 외에도 기계적 강도에도 긍정적인 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며 한 단계 더 나아가 최근 개발된 페라이트계 스테인리스 강은 탄소와 질소의 함량을 최소화 하여 용접 후 응고과정에서 오스테나이트 및 마르텐사이트 조직의 생성을 최대한 억제시켜 결함 발생을 최소화 시키는 것으로 보고되고 있다^{2,5)}. 또한 기계적 측면에서도 엔진 각 피스톤에서 배출된 배기 가스가 지나가는 통로와 이들이 합쳐지는 부위의 형상 최적화 설계를 통해 배기 가스가 정체되어 역류하게 되는 Back flow를 최소화 하여 배기가스의 유동성능 및 엔진 출력을 높여주는 연구와 열 피로 해석을 통해 배기 시스템의 수명을 예측하는 연구가 활발하게 진행되고 있다³⁻⁴⁾.

승용차에 쓰이는 hot end부는 제작 방법에 있어, 제조사마다 약간의 차이가 있으나 최근의 흐름은, 박판 및 배관을 성형하고 용접하는 방식으로 제작하는 추세이다. 형상이 복잡하기 때문에 성형과정에서 생기는 갭(gap)의 영향을 최소화하기 위해 소모성 전극 아크용접을 적용하고 있으며, 또한 언더컷(undercut)과 같은 용접결함을 최소화 하고, 미려한 비드 외관을 얻기 위해 Ar에 O₂를 소량 첨가한 혼합가스 공정으로 생산하고 있다. 현재 국내에서는 Hot end부를 생산하고 있는 많은 기업들이 저탄소 페라이트계 스테인리스 강 중에서 서도 고온 강도 및 고온 내식성이 우수한 STS 444 소재나 크롬(Cr)과 몰리브덴(Mo)의 함량을 낮춰, 생산가격 면에서 경쟁력을 확보한 STS 429L 소재를 사용하고 있다. 또한 전극으로 동종의 페라이트계 STS 430LNb 용가재를 사용하고 있다. 그러나 사용되는 용접 와이어와 두 모재의 용접성과 관련한 연구는 미비한 실정이다. 문헌에 의하면 페라이트계 스테인리스 강은 모재와 화학적 조성이 같거나 유사한 페라이트계 스테인리스 강 용가재를 선택하여 용접하는 것이 바람직하다고 알려져 있으나 구조적으로 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구는 미미한 실정이다.

이에 본 연구에서는 페라이트계 스테인리스 강 용접에 주로 사용되는 STS 430LNb 용가재를 이용하여 hot end부에 주로 사용되는 두 가지 페라이트계 스테인리스 강 소재(STS 429L, STS 444)의 기계적 물성 차이를 비교하고, 이들의 용접특성을 일부 도출하였다.

2. 사용 재료

본 실험에 사용한 모재는 국내에서 생산된 2mm 두께의 STS 429L 및 STS 444 압연 강판을 사용하였으며, 용가재는 STS 430LNb(1.2 ϕ)를 사용하였다. Table 1은 모재와 용가재의 화학적 조성을 보여주고 있다. STS 444의 경우 STS 429L 보다 탄소의 함량이 다소 높고 실리콘 및 망간의 함유량이 낮다. 두 가지 모재와 전극 모두 완전 페라이트(fully ferritic) 조직을 갖고 있으며, 용접 후에도 입계와 입내에서 완전 페라이트 조직을 형성함을 확인하였다. 용접부의 기계

Table 1 Chemical compositions of ferritic stainless steels for this study

	C	Si	Mn	Cr	P	Mo	Cu	Nb
STS429L	0.03	1.0	1.0	15	0.04	1.7	-	0.5
STS444	0.06	0.19	0.28	18.6	0.021	2.0	-	-
STS430LNb	0.015	0.5	0.5	18.5	0.013	-	0.1	0.45

Table 2 Mechanical properties of Base Metals

	Yield Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]	Max. Bending Strength [MPa]	Fracture Elongation [%]
STS429L	360	480	640	19
STS444	385	520	665	20

적 물성을 비교하기 위해 모재의 인장물성을 구하였고, Table 2와 같다. 모재에 대한 인장물성은 모두 압연된 방향으로 시험하여 측정된 값이며, 탄소함량이 높은 STS 444의 모재 물성이 STS 429L보다 높음을 볼 수 있다. 파단 연신율은 각 시험편마다 18~22% 범위 내에서 편차를 보였으며 Table 2에 기재된 값은 그 평균값으로 실제 두 모재의 연신율은 거의 비슷한 수준일 것이라 판단된다. 모든 용접 과정은 Ar 98%와 O₂ 2% 혼합가스를 사용하였고, 채취한 시험편의 크기 및 형태는 Fig. 1과 같이 KS 표준 규격⁶⁾에 맞추어 제작하였다.

3. 실험 방법

본 실험에서는 소모성 전극 아크 용접에서 두 종류의 페라이트계 스테인리스 강에 화학적 조성이 다른 페라이트계 전극으로 용접 시 기계적 물성의 변화를 비교하기 위해 강종을 제외한 모든 용접조건을 한 가지 조건으로 진행하였으며, 아래보기 맞대기 용접을 실시하였다. 동종의 재질끼리 맞대기 용접한 두 가지 시편(STS 429L, STS 444)과 두 모재를 용접한 한 가지 시편(dissimilar)을 사용하였다. 용접조건 선정은 비드 끝단(toe)에서 언더컷(undercut)이 발생하지 않고, 모재의 두께 이상으로 용입이 되는 한 조건을 선정하여 세 가지 시험편에 동일하게 적용하였으며 공통적으로 적용된 용접조건은 Table 3에 나타내었다. 모든 맞대기 용접시험편은 용접 후 밀링가공 및 표면처리를 통해 비드를 완전히 제거하였고, 이 과정에서 용접부의 시편 두께가 모재보다 0.3mm 더 얇아지는 결과를 초래하였으나, 결과적으로 용접부에서 파단을 유도하는 긍정적 결과를 얻었다. Fig. 2는 용접한 시험편 각각의 조건에서의 비드와 그레인 형태를 보여주고 있다.

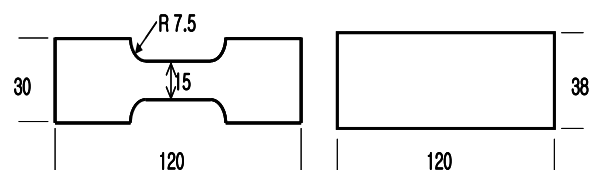


Fig. 1 Schematic illustrations of specimens

Table 3 Welding parameters for this study

Welding Current	150A
Welding Voltage	18V
Welding Speed	10mm/sec
Heat Input	1.5kJ/cm
Contact tip to workpiece distance	12mm
Base Metal Dilution Rate	38~41%

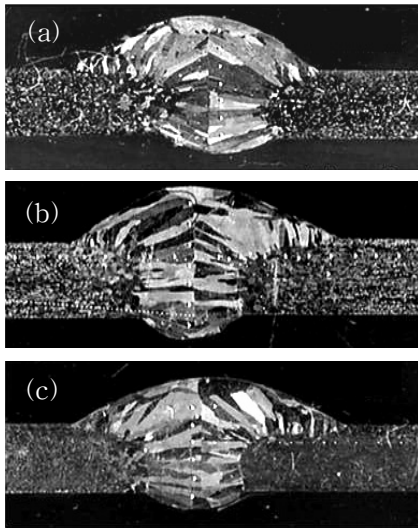


Fig. 2 Bead shape and their enlarged grain boundaries of (a) STS 429L (b) STS 444 (c) dissimilar

인장시험은 50mm/min의 시험 속도로 실험하였고, 연신을 측정은 표점거리 50mm를 기준으로 시험 전 후에 늘어난 길이를 측정하였다. 항복 및 인장응력 모두 공칭응력을 사용하였으며, 항복응력은 0,2% offset method를 사용하여 도출하였다. 굽힘시험은 서포터 간격 60mm, 최대 굽힘 각을 150°로 한정 짓고, 30mm/min의 시험 속도로 시험 중 표면에서 3mm이상 균열이 발생 시 시험을 중지하는 것으로 설정하였다. 150° 이내에서 파단이 발생하지 않을 경우 연성은 충분히 확보된 것으로 판단할 수 있으나, 각 시험편의 굽힘강도를 비교할 수 없기 때문에 시험기로부터 얻어진 하중 값 중에서 최대하중에 대해 flexural bending strength를 구하여 굽힘강도를 비교하였다. Flexural bending strength를 구하는 식은 다음과 같다.

$$S = \frac{Plt}{4I} \tag{1}$$

여기서 P : 시험기에서 측정된 최대하중
 l : 굽힘 서포터 사이의 거리
 t : 시험편의 두께
 I : 시험편의 폭 방향 관성모멘트

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 인장 물성

세 가지 모재 조건에 대한 인장시험 결과는 Table 5와 같다. 1,2,3번 시편 모두 용접부에서 뚜렷한 단면 수축이 발생하면서 연성과파단 되었다. 파단 면에 대해 전자주사현미경(SEM)을 사용하여 관찰한 결과 Fig. 3과 같이 ductile rupture에 equiaxed dimple이 형성된 연성과파괴가 일어났음을 확인하였다. 인장시험 결과는 Table 4와 같다. Table 2에 나타난 모재강도와 비교해볼 때, STS 444 용접 시험편의 인장물성이 낮게 나타나는 경향을 가지고 있는 것으로 판단된다.

4.2 굽힘 물성

채취한 굽힘 시편에 대해 횡 방향 굽힘 시험을 실시한 결과 세 시편 모두 최대 굽힘 각까지 표면 터짐이나

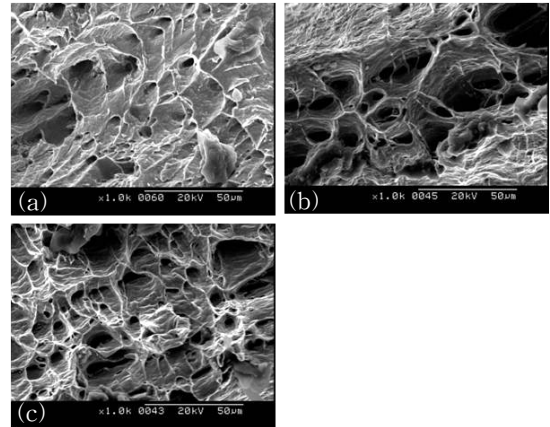


Fig. 3 Ductile rupture surfaces. The results from SEM analysis indicate equiaxed dimples. (a) STS 429L, (b) STS444, (c) dissimilar

Table 4 Tensile strength of welded specimens

Specimen types	Yield Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]	Fracture Elongation [%]
STS429L	385	510	16
STS444	340	470	14
Dissimilar	380	495	15

Table 5 Max. Bending Strength of welded specimens

Specimen types	Max. Bending strength[MPa]
STS429L	630
STS444	590
Dissimilar	615

균열이 발생하지 않았다. 이에 따라 최대 굽힘 하중이 걸리는 지점에서의 강도를 계산하여 실험 조건에 대한 최대 굽힘 강도를 비교하여 Table 5에 나타내었다. 인장시험결과와 유사하게 STS 429L만을 용접 했을 시 가장 우수한 물성을 얻을 수 있었다. STS 444 시편의 경우, 인장시험 결과와 비슷한 경향을 보여주는데, STS 430LNb solid wire를 사용하여 용접 후 기계적 물성이 크게 낮아지는 것을 볼 수 있다. Li. C 및 H.S Jeong의 연구⁹⁾에 따르면 STS 444 모재를 TIG 용접 후 응고과정에서 저용점 황화합물이 석출되면서 발생하는 micro crack으로 인해 연성이 떨어지는 것으로 보고된 바 있는데, 본 실험에서도 STS 444의 경우 연신율이 가장 낮은 것으로 확인되었다. 그러나 모재 및 용가재에 황 성분이 포함되어 있지 않은 점과 굽힘 시험에서 용접부 터짐이나 균열이 발생하지 않은 결과로 미루어볼 때, 본 실험에서 STS 444의 물성이 낮아진 원인은 다를 것으로 판단된다. 세 가지 시험편에 대해 추가적으로 광학현미경 분석 및 EDS 화학성분 분석을 실시하였으나 용접금속 및 모재에 걸쳐 화학적 조성의 불균일이나 경화 상(phase)은 발생하지 않았다.

4.3 경도 시험

강도시험에서 나타난 파단강도 차이와 경도 사이의 상관관계를 알아보기 위해 Micro vickers 경도기를 사용하여 경도를 측정하였으며, 수평 및 수직방향 측정값을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. STS 444의 용접부 경도가 용착금속 및 열영향부에서 다른 두 시험편 및 모재 경도보다 낮게 나타나는 경향을 보였다. 이는 각 시험조건 별로 강도 차이가 나타나는 경향과 유사하다. 또한 페라이트계 스테인리스 강은 일반적으로 용접 전후에 경도 변화폭이 작은 것으로 알려져 있는데⁸⁾, 측정방향을 이면 비드로부터 비드 상단까지 수직방향으로 측정한 결과 경도가 점차적으로 감소하는 것으로 나타났다.

완전 페라이트 조직이 갖는 빠른 확산은 용접 후 용접금속내 화학적 조성을 균일하게 하는 특징이 있다⁵⁾.

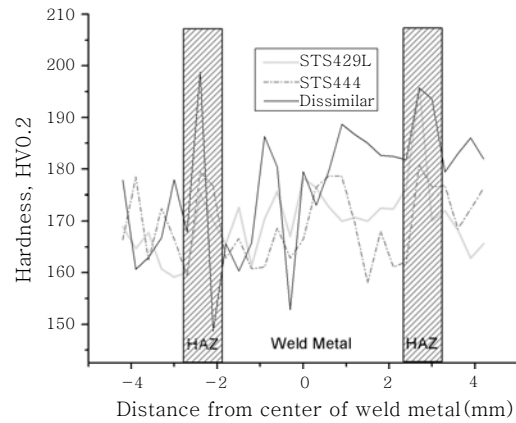


Fig. 4 Micro Vickers hardness variations of horizontal direction

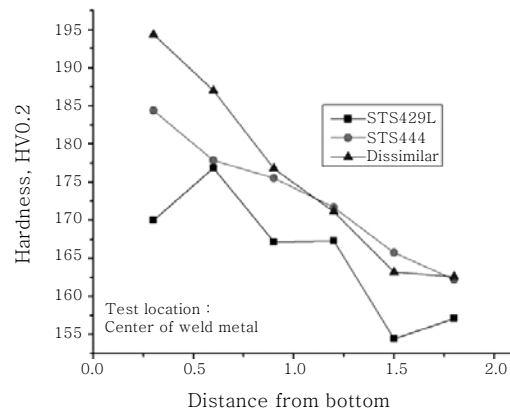


Fig. 5 Micro Vickers hardness variations of vertical direction

따라서 Fig. 2와 같은 단면 형상에서 용접금속이 차지하는 면적이 가장 작은 용접부 하단이 냉각속도가 가장 빠르며, 경도변화에 가장 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단할 수 있다. 세 가지 모재조합 조건에서 모두 덧살부에서 이면비드로 내려갈수록 경도는 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. 이로 인해 실제 사용환경에서 균열이 발생할 경우, 내부에서 외부로의 균열이 진전될 것으로 예상되며, 또한 모재와 이면 비드와의 두께 차이로 인해 이면비드가 노치로 작용하여 응력집중으로 균열 발생의 가능성도 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

페라이트계 스테인리스강의 MAG 용접특성을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 모재의 기계적 물성은 STS 444가 STS 429L보

다 우수하나, STS 430LNb로 용접 후 기계적 물성은 STS 444가 더 낮은 것으로 나타났다.

2) STS 444의 용접부 경도는 용착 금속 및 열영향 부에서 다른 두 시험편에 비해 낮다. 이는 용접 후 강도 변화와 유사한 경향을 보여준다.

3) 완전 페라이트 조직의 특성상, 화학적 조성의 차이 보다는 냉각속도가 강도 및 경도에 가장 큰 영향을 준 인자일 것으로 판단된다.

4) 세 가지 모재조합 조건에서 모두 덧살부에서 이면 비드로 내려갈수록 경도는 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. 이로 인해 실제 사용환경에서 균열이 발생할 경우, 내부에서 외부로의 균열이 진전될 것으로 예상되며, 또한 모재와 이면 비드로의 두께 차이로 인해 이면 비드가 노치로 작용하여 응력집중으로 균열 발생의 가능성도 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 (No.M20604005402-06B0400-40210) 사업의 일환으로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. JFE 21st. Century Foundation: Stabilized Rust and Corrosion Resistance Materials for Automobile Exhaust Systems, Chapter 1-E(2), An Introduction to Iron and Steel Processing, JFE, 2003
2. N.Fujita, K. Ohmura, A. Yamamoto: Changes of microstructures and high temperature properties during high temperature service of Niobium added ferritic stainless steels, Volume 351, Materials Science and Engineering A, 2003.
3. J.S. Kim, H.C. Kim, C.S. Jeon: Development of High Performance Gasoline Engine for Small & Middle Car, KSAE 2006 spring, 112~117
4. S.S. Kim, J.H. Lee, D.W. Kim: Development of Heat Resisting Austenitic Cast Alloy for Gasoline Engine Exhaust Manifold, KSAE 2006 spring, 1879-1885
5. John C. Lippold and Damian J. Kotecki : Welding Metallurgy and Weldability of stainless steels, John Wiley & Sons, Inc. 2005, 88-92
6. KSJC : KS B 0833 Fusion - welded butt joints in steel - Transverse tensile test. 2001.
7. Robert D. Cook & Warren C. Young : Advanced Mechanics of Materials, Macmillan Publishing Company, 1985,
8. H. Ktaft : Alloy 430 Ferritic stainless steel Welds Fail Due to Stress-Corrosion Cracking in Heat-Recovery Steam Generator, Springer Boston, 2007.
9. Li C and H.S. Jeong : Weldability of type 444 ferritic stainless steel GTA welds, International KWS Journal 3-1 (2003), 29~33