

STS429L 겹침 용접부의 파단 특성에 관한 연구

최동순* · 김재성* · 김현재* · 이보영**†

*한국항공대학교 공과대학 항공우주 및 기계공학부 대학원

**한국항공대학교 공과대학 항공우주 및 기계공학부

A Study on Characteristic of Fracture in Lap Joint Welded STS429L

Dong-soon Choi*, Jae-seong Kim*, Hyun-jae Kim* and Bo-young Lee**,*†

*Graduate School, Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University,
Gyeonggi 412-791, Korea

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

†Corresponding author : bylee@kau.ac.kr

(Received March 26, 2009 ; Revised June 2, 2009 ; Accepted September 22, 2009)

Abstract

Recently, a demand of ferritic STS is increasing rapidly in automobile exhaust system. Exhaust manifolds are the part nearest to the engine so that the material is exposed to high temperature exhaust gas. Excellent heat resistant properties, especially high temperature strength, thermal fatigue resistance and high corrosion resistance are necessary for these parts. STS429L contains 15 weight percent of Cr and low Mo, so has good price competitive. And it has excellent high temperature strength and corrosion resistance, so receives attentions as material that applying to exhaust manifold. In tensile test of lap joint welded STS 429L, most of specimens are failed in base metal, but occurs brittle fracture in weld metals at some specimens in the face of good welding conditions. In the process of tensile test, lap joint welded STS429L specimens are transformed locally. The brittle fracture occurs that local transforming area exists in weld metals. But, butt welding specimens made by same materials showed ductile fracture in tensile test and bending test. In this study, suppose the reason of brittle fracture is in the combined local transform and tensile stress, through analysis of bead geometry, evaluate geometrical factor of brittle fracture in lap joint welded STS429L.

Key Words : STS429L, Lap joint, Exhaust manifold, Automobile industry, Ferritic stainless steel, Bead geometry, Brittle fracture

1. 서 론

최근 자동차 배기계의 보증 연한이 길어지고 엔진 성능 향상에 따라 배기가스의 온도가 높아지면서, 배기계 소재에 더 높은 고온 특성 및 열피로 특성이 필요해졌다. 보통 구상흑연주철로 대표되는 주철 소재가 지금까지 배기매니폴드에 적용되어 왔으나, 점차적으로 배기가스의 온도가 상승함에 따라 내열성에서 한계를 나타내고 있다. 경량화와 환경 문제에 관한 요구까지 더해지면서, 위 요구들을 모두 만족할 수 있는 다른 소재에

의 관심이 높아지고 있다. 그 중 페라이트계 스테인리스 스틸은 오스테나이트계 스테인리스 스틸에 비하여 가격 면에서 유리하고, 고온 강도 및 내식성이 우수하며, 열팽창 계수가 낮다는 장점을 가지고 있어 이 소재에 대한 관심이 증대되고 있다¹⁾.

STS429L은 페라이트계 스테인리스 스틸 중 15Cr wt%의 소재로서, 배기계 부품 중에서도 가장 높은 고온 강도와 열 피로 특성을 요구하는 부품인 배기매니폴드에 적용되고 있는 소재이다. 스테인리스 스틸의 내열성과 산화한계온도는 우선적으로 Cr 함량의 영향을 받는다¹⁾. 하지만 STS429L은 15Cr wt% 계이면서도 다

른 배기매니폴드용 18Cr wt% 소재인 STS 430J1L에 버금가는 산화 한계온도(950℃)와 고온 강도(21N/mm², at 900℃)를 가지고, 고온 내식성이 우수하여 향후 지속적으로 적용될 것으로 기대가 되는 소재이다¹⁻²⁾.

STS430LNb wire를 사용한 STS429L의 MAG 맞대기 용접부의 인장 강도는 모재와 비슷하며 용접 금속에서 연성 파단이 발생한다고 밝혀져 있다.³⁾ 하지만 실제 배기매니폴드의 제작 현장에서는 제품의 복잡한 형상으로 인한 성형 시의 공차 발생 및 가공의 난해함 등을 이유로 맞대기 이음을 사용하지 않고, 겹침 이음을 사용한다. 따라서 현장 용접 조건을 최대한 모사하고 올바르게 적용하기 위해서 겹침 이음에 대한 정적 강도 및 파단 특성을 연구할 필요가 있다. 이는 차체에 장착된 배기매니폴드의 경우 높은 고온에 의한 피로 및 엔진, 차체에서 오는 진동에 의한 피로 또한 손상을 일으키는 원인이 되기 때문이다.

이에 본 연구에서는, 단순 인장 실험으로 배기매니폴드 소재의 기초적인 겹침 용접 이음의 파단 특성을 용접부 단면 형상 분석을 통해 확인하고자 하였으며, 실제 차량 테스트에서 활용할 수 있는 조건을 확보하기 위해 엄격한 용접 조건을 선정하였다.

2. 실험방법

2.1 사용 재료

본 실험에 사용한 재료는 STS429L이며, 두께 2mm의 냉간 압연재이다. 용접 와이어는 STS430LNb 재질의 Solid wire로, 두 소재의 화학 조성은 Table 1과 같다. Table 2는 STS 429L의 기계적 물성을 보여주고 있다.

Table 1 Chemical compositions of STS429L sheet and STS430LNb wire (wt%)

		C	Cr	Mo	Nb	Ni	Si	Mn	P	S
Base metal	STS 429L	0.007	15.0	0.01	0.33	0.13	1.02	0.27	0.02	0.001
Filler wire	STS 430LNb	0.01	18.5	-	0.45	-	0.50	0.50	0.013	0.003

Table 2 Mechanical properties of STS429L

	Yield Strength [MPa]	Tensile Strength [MPa]	Max. Bending Strength [MPa]	Fracture Elongation [%]
STS 429L	360	480	640	19

2.2 겹침 이음 용접

본 실험에 사용한 용접기는 Hitachi社의 350CAII 용접기이며, 보호가스로는 Ar 98%+O₂ 2% 혼합가스를 사용하여 PB(아래보기 필릿) 자세의 MAG 용접을 실시하였다. 본연구에서는 다양한 용접부의 형상을 제작하여 형상 인자에 의한 파단 특성을 도출하기 위하여 Fig. 1에 나타낸 용접 조건과 입열량을 변화시켜 기초 실험을 통하여 우선적으로 걱정된 용접 조건의 범위를 도출하였다. 기초실험에서 선정된 용접 조건 범위와 생산 현장의 용접 속도를 고려하여 용접 속도를 60cm/min, CTWD를 13mm로 고정하여 Table 3과 같이 8개의 조건을 선정하였으며, 200mm*130mm의 STS429L 판재를 5mm 겹쳐 용접하였다.

2.3 인장 시험

인장 시험에 사용된 시험기는 Shimadzu社의 AG-10TA이며, 인장 속도는 Test speed를 50mm/min로 하여 시험을 진행하였다. 인장 시험 시편의 채취 및 제

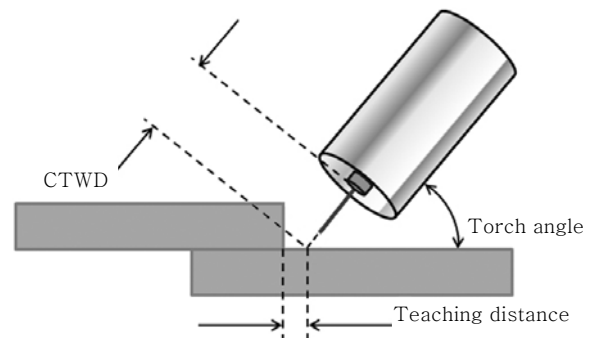


Fig. 1 welding conditions

Table 3 Welding conditions and results of lap joint tensile test

No.	Heat input (kJ/cm)	Teaching distance (mm)	Torch angle (°)	Number of weldment fracture specimens
No. 1	2.17	0.5	45	0/5
No. 2	2.17	0.5	50	1/5
No. 3	2.17	0.5	60	0/5
No. 4	2.17	1.0	50	1/5
No. 5	1.78	0.5	50	1/5
No. 6	1.97	0.5	50	1/5
No. 7	2.39	0.5	50	0/5
No. 8	2.60	0.5	50	0/5

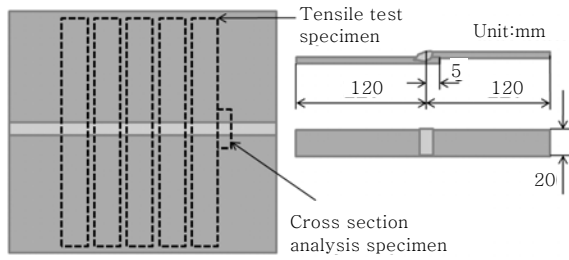


Fig. 2 Schematic illustration of making specimens

작은 Fig. 2와 같이 KS표준 규격⁵⁾을 따랐다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 인장 시험 결과

겹침 이음과 모재 및 맞대기 이음의 인장 강도³⁾를 비교한 데이터를 Table 4에 나타내었다. 겹침 이음 시편은 전체적으로 모재나 맞대기 이음의 인장강도 값에 비해 낮게 측정되었으며, 이는 겹침 이음에서 나타나는 형상적인 특징으로 인해 토우부 및 루트부가 응력이 집중되는 노치로 작용하여 상대적으로 낮은 값이 나온 것으로 판단된다.

겹침 이음의 각 용접 조건 당 5개 시편의 인장 시험을 실시한 결과 총 40개의 시편 중 36개의 시편은 모재에서 연성 파단이 발생하였다. 이는 모두 용접부에서 파단이 발생한 맞대기 이음의 인장 시험과는 다른 결과로³⁾, 덧살을 제거하지 않고 인장 시험을 실시함에 따라 보강 덧살로 인한 인장 하중 분산이 그 원인인 것으로 판단된다.

세부적인 파단 양상을 Table 3에서 살펴보면, 4개의 조건에서 각 1개씩의 용접부 파단이 발생하였다. 용접부 파단은 파단부 단면의 수축이 거의 보이지 않은 순간적인 파단으로, 파단 위치 또한 HAZ나 fusion line이 아닌 용접 금속을 가로질러 발생하였다. 이전 맞대기 용접을 실시한 시험편의 경우 모든 시험편이 용접부에서 연성 파단의 양상을 보였으나³⁾, 겹침 용접의 경우

Table 4 Tensile properties of base metal, butt joint and lap joint of STS429L

	Base metal	Butt joint	Lap joint	
			failed at base metal	failed at weld metal
Tensile strength (MPa)	510	510	462	448
Elongation (%)	19	16	16	10

동일한 조건에서 용접하였음에도 불구하고 맞대기 이음과는 달리 일부 용접부에서 순간적인 파단이 발생하였다. 이는 고입열 조건으로 용접한 STS 400계열의 경우 상온 인장시험 시 모재 파단이 일어나는 것을 볼 때⁴⁾, 고온에서 나타나는 크롬탄화물(Cr₂₃C₆, Cr₇C₃)과 같은 입계 석출물 등에 의한 파단보다는 용접부의 형상이 더 큰 영향을 준 것으로 판단된다.

3.2 단면 형상 분석

3.2.1 표준 규격 형상 인자의 분석

용접부 단면 형상 측정은 우선 Fig. 3과 같이 KS 표준 규격⁶⁾에 정의된 Penetration, 각장(Leg length)을 측정하였으며, 각 치수가 파단 형태에 미친 영향을 보기 위하여 측정 결과를 파단 위치별로 분류하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 제외된 형상 인자인 목두께는 이론 목두께로, 각장을 양변으로 하는 이등변삼각형의 높이에 해당하여 $\{(각장)/\sqrt{2}\}$ 로 나타낼 수 있어 각장의 길이에 비례하므로 제외하였다.

각장은 KS표준 규격⁵⁾에서의 정의에 따라 용접 금속에 내접하는 직각이등변삼각형의 한 변의 길이를 적용하였다. 그 결과 No. 3과 4의 시험을 제외하고 모든

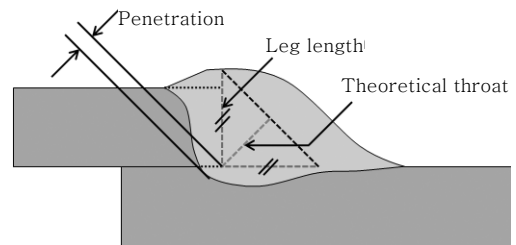


Fig. 3 KS standard geometry factors

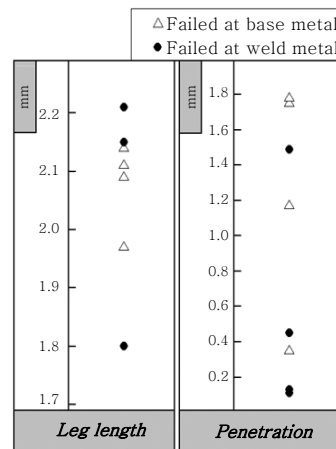


Fig. 4 Results of analysis on KS standard geometry factors

시편의 각장 1이 모재 두께인 2mm를 넘는 것으로 나타났으며, No.3 시편도 1.97mm로 모재 두께에 거의 근접한 것으로 나타났다. 순간적인 파단이 발생한 시편 중 No.4 시편은 각장 1의 길이가 1.8mm로 나타나, 기본적으로 변형 집중 부위의 두께가 부족할 경우 인장 하중이 집중되면서 취성 파단과 같이 용접 금속이 순간적으로 파손된 것으로 판단된다. 또한 각장의 길이가 2.15mm 이상인 경우에도 용접 금속의 순간적인 파단이 일어났다. 덧살은 일반적으로 인장 시험 시 하중을 분산시켜 주는 역할을 하지만, 인장 초기에 국부 변형이 발생하는 겹침 인장시편의 경우 일정 두께 이상의 덧살은 국부 변형 부위의 변형 진행을 방해하여, 인장 시험기에서 더 큰 인장 하중이 인가되어도 변형이 완료되지 않아 복합 하중을 변형 부위에 집중시키는 것으로 판단된다.

Penetration은 0.5mm 이내의 작은 값에서 용접 금속에서 순간 파단이 발생하는 경향을 보였으나, No. 2 시편에서 1.49mm의 값에서도 용접 금속의 순간적인 파단이 발생하여, 용접 금속 파단에 영향을 미치는 주요한 인자라고 판단하기엔 충분치 않다.

3.2.2 표준 규격 외 형상 인자의 분석

KS 표준 규격은 구조물의 바람직한 이음부 설계를 목적으로 규정된 것으로, 용접성에 하자가 없어 구조재로 많이 사용되는 재료와 형상을 바탕으로 제안되었다. 그러므로 최근까지 용접성에 대한 연구가 충분하지 않아, 구조재로 사용하지 않은 박판재의 페라이트계 스테인리스 스틸에 표준 규격을 그대로 적용하는 것은 바람직하지 않다.

No.5의 시편 용접부 단면의 인장 시험 전의 형상과 인장 시험 후 모재와 용접부에서 각각 파단이 발생한 시편의 단면을 Fig. 5에 나타내었다. 박판재 겹침 이음의 인장 시험은 특징적으로 인장 시험 중 루트부와 토우부에서 국부적인 소성 변형이 집중적으로 일어나고, Fig. 5의 b)에서 보는 바와 같이 모든 용접 금속 파단 시편이 두 부위 중 상판 쪽의 변형 부위에서 용접 금속

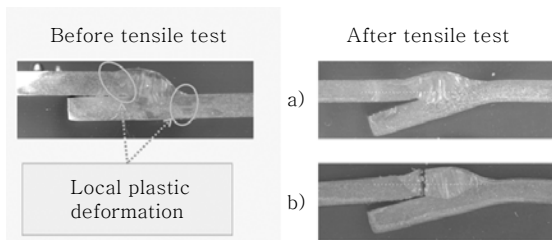


Fig. 5 Results of tensile test (No. 5) a) Failed at base metal b) Failed at weld metal

을 횡단하여 순간적으로 파단이 발생하였다. 따라서 상판에만 존재하는 루트부의 노치 형상과 국부적인 다축 응력 집중이 이 용접 금속의 파단에 영향을 미쳤다고 판단할 수 있다. 실제 시편의 경한 정도를 확인하기 위해 인장 시험 전후에 경도 시험을 실시하여 평균값을 table 5에 나타내었으며, 그 중 No. 2 시편의 수평 경도 분포를 fig. 6과 Fig. 7에서 보여주고 있다.

x축의 거리는 상판의 fusion line을 0으로 한 거리이며, 측정 간격은 0.2mm이다. Fig 6과 fig. 7에서 보는 바와 같이 인장 시험 전의 경우 평균적으로 180 (HV 0.2) 정도의 경도 분포를 보였으나, 인장 시험 후 파단면을 중심으로 왼쪽편의 경도가 다른 부위에 비하여 평균 250 (HV 0.2)으로 높게 측정되었다. 이는 파단면의 가까운 곳부터 국부적인 경도 상승이 진행되었음을 의미한다. 결국, 다축 응력의 집중과 노치 형상의 존재는 겹침 이음의 인장 시험 시 용접 금속의 경도를 상승시키고 이에 따라 취성 파단과 같이 순간적으로 파손시킨다.

지금까지의 분석들을 토대로 하여 표준 형상 인자보다는 국부 변형 부위를 기준으로 하는 형상 인자의 분석이 필요하다고 판단하여 Fig. 8과 같이 L_1 , L_2 , θ_1 , θ_2

Table 5 Average of the hardness value before and after tensile test

측정부위	인장이전경도 (HV0.2)	인장이후경도 (HV0.2)
STS429	180±30	280±30

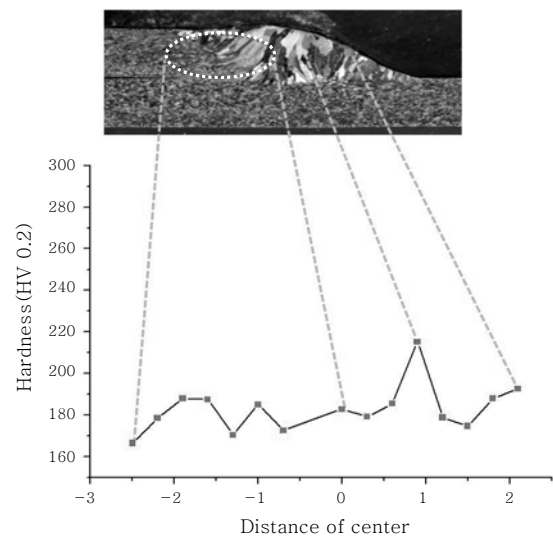


Fig. 6 Horizontal hardness distribution of No. 2 specimen before tensile test

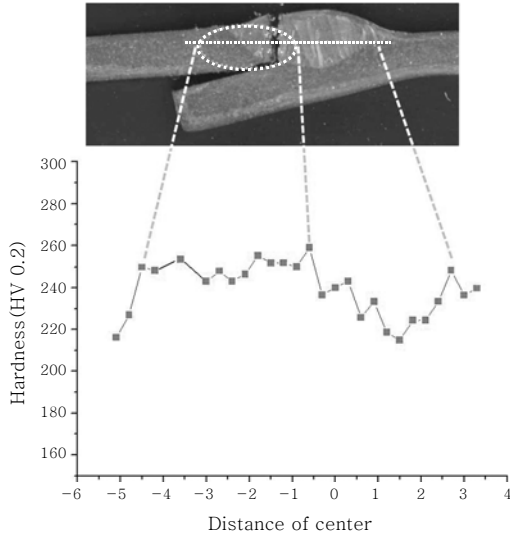


Fig. 7 Horizontal hardness distribution of No. 2 specimen after tensile test

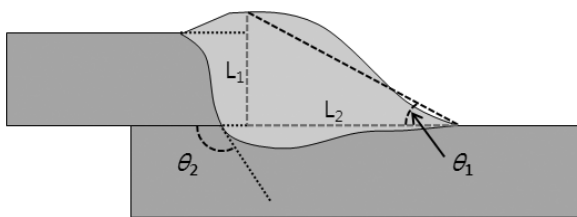


Fig. 8 Additional geometry factors

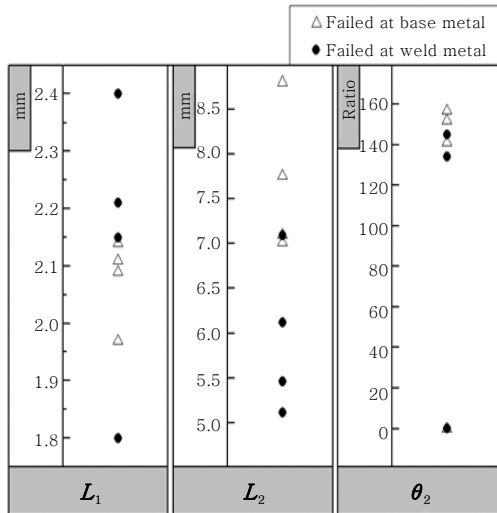


Fig. 9 Results of analysis on additional geometry factors

의 형상 인자를 설정하였다. 또한 각 인자를 측정하여 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

L_1 은 표준 규격에서의 각장과 같다. 표준 형상 인자의 분석에서 각장의 변화에 따른 용접 금속의 순간적인

Table 6 Comparisons of θ_1 and actual deformation angle

No.	L_1/L_2 ($\tan\theta_1$)	θ_1	Actual deformation angle(°)	error (%)
1	0.298	16.6	17.08	2.8
2	0.312	17.31	17.86	3.1
3	0.277	15.51	15.90	2.5
4	0.330	18.25	18.89	3.4
5	0.470	25.16	25.91	2.9
6	0.351	19.36	20.13	3.8
7	0.276	15.42	15.80	2.4
8	0.240	13.48	13.74	1.9

파단이 발생하지 않는 범위를 알 수 있었으나, 그 범위가 1.95-2.15mm 정도로 매우 좁고 실측 시 오차에 의한 한계가 존재하여 용접 금속의 순간적인 파단의 원인으로 판단하기에는 무리가 있다.

L_2 는 하판의 각장으로, 7mm 정도를 기준으로 길이가 부족할 경우 용접 금속에서 취성 파단과 같은 순간적인 파손이 일어났다. L_1 의 길이가 동일할 때 L_2 의 길이가 짧으면 겹침 이음 인장 시험 시 변형 부위의 변형 각도가 증가하여 루트부의 다축 하중도 증가하는 것으로 판단된다. 만약 인장 시험 중 변형 집중 부위에서만 변형이 발생하고 상판과 하판이 인장 방향과 완전히 일치한다고 가정한다면, 이 변형 각도는 L_1 과 L_2 를 양변으로 하는 직각삼각형의 L_2 쪽 예각, 즉 θ_1 과 같아진다. 이러한 가정은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 실제 인장 시험 후 시편의 단면을 볼 때 상당히 적절하다는 것을 알 수 있다. 실제 인장 시험 후 시편이 변형된 각도와 θ_1 을 비교해 보면 Table 6에서 보는 바와 같이 거의 일치함을 확인할 수 있으며 θ_1 이 17도 이상일 경우 용접 금속에서 파단된다. 이는 자동차 배기 매니폴드 소재로 주로 사용하고 있는 페라이트계 스테인리스 스틸의 겹침 이음에 대한 안정화된 용접조건을 확보하기 위해서는 KS 표준 규격에서 규정하고 있는 각장만을 적용하는 것보다 상판과 하판의 각장을 변수로 구분하여 적용하는 것이 적절하다고 사료된다. θ_1 은 $\tan^{-1}(L_1/L_2)$ 이므로 θ_1 의 직접 측정이 곤란한 경우 L_1 과 L_2 의 길이를 측정하여 그 비를 사용할 수도 있다. Table 6에 나타난 L_1/L_2 의 비가 약 0.3 이상일 경우 용접 금속에서 취성 파단과 같은 순간적인 파손이 발생하였다.

4. 결 론

페라이트계 스테인리스 스틸인 STS 429L의 겹침 용접 금속에 대한 파단 특성을 요약하면 다음과 같다.

1) STS 429L 겹침 이음의 인장 강도는 모재보다 우수하나 간헐적으로 용접 금속에서 취성 파단과 같은 형태로 순간적인 파단이 발생하며, 이는 이음 형태 자체의 형상적 원인에서 기인한다고 판단된다.

2) KS 표준 규격에 명시된 용접부 단면 형상 인자에 대하여 분석하여 본 결과 각장이 1.95~2.15mm 사이 일 때 인장 시험 시 용접 금속의 순간적인 파단이 발생하지 않음을 알 수 있었다.

3) 집중 변형 부위를 중심으로 형상 인자를 정하고 분석해 본 결과 KS 표준 규격에서의 각장(L₁)과 표준 규격 외 형상 인자인 하판의 각장(L₂)이 변형 부위의 변형 각도에 영향을 주는 것으로 분석되었으며, 이에 L₁/L₂의 비를 사용하여 배기 매니폴드에 사용되는 페 라이트계 STS 소재의 겹침 이음 용접 시 발생하는 용접 금속의 순간적인 파손을 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

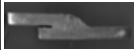
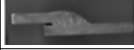
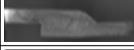

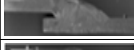



후 기

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

참 고 문 헌

1. Sang-gon Ahn : A recent tendency on development, techniques of manufacturing and welding of STS used in automobile exhaust system, A institute of welding techniques, **10-1**(1994), 1~26
2. Beddoes J, Parr JG, : Introduction to stainless steels, ASM International (3rd ed), 1998
3. Gyeong-cheol Lee, Young-gi Lee, Jae-seong Kim, Bo-young Lee, Soon-woo Kwon and Do-seok Han : A Study on the Mechanical Properties of MAG Weld on Ferritic Stainless Steel Sheets, KWJS 2008 spring, **49-61**(2008), 69~69 (in Korean)
4. Young-gi Lee, Jae-seong Kim, Gyeong-cheol Lee, Bo-young Lee, Sung-kyu Hong : Characteristics of aging treatment in ferritic stainless steel welds, KWJS 2008 autumn, **50-28**(2008), 45~45 (in Korean)
5. KS B 0841 Destructive test on welds in metallic materials -Tensile Test on cruciform and lapped joints , KSJC, 2001
6. KS B ISO 5817 Arc-welded joints in steel - Guidance on quality levels for imperfections”, KSJC, 2007 (in Korean)

참 조

시편번호	단면형상	파단 수 (5개 중)	KS표준규격			표준규격 외 형상 인자			
			각장 (mm)	목두께 (mm)	용입 (mm)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	Θ ₁ (°)	Θ ₂ (°)
No. 1		0	2.09	1.4779	1.17	2.09	7.01	16.6	141
No. 2		1	2.21	1.5627	1.49	2.21	7.09	17.31	145
No. 3		0	1.97	1.393	0.35	1.97	7.1	15.51	0
No. 4		1	1.8	1.2728	0.13	1.8	5.46	18.25	134
No. 5		1	2.4	1.6971	0.11	2.4	5.11	25.16	0
No. 6		1	2.15	1.52.3	0.45	2.15	6.12	19.36	0
No. 7		0	2.14	1.5132	1.75	2.14	7.76	15.42	152
No. 8		0	2.11	1.492	1.78	2.11	8.8	13.48	157