

자동차 배기계용 페라이트계 스테인리스강 용접부 물성

홍 승 갑 · 엄 상 호 · 이 원 배

Weld Properties of Ferritic Stainless Steels for Automotive Exhaust Manifolds

Seung Gab Hong, Sang Ho Uhm and Won Bae Lee

1. 서 론

최근 자동차 생산량 증가와 함께 배기가스 규제, 차량 경량화, 부식환경이 엄격한 부위의 장수명화 등을 목적으로 최근 10년간 배기계 부품의 스테인리스강 적용이 급격히 증가되고 있다. 현재 자동차 1대당 20~30kg 정도 사용되고 있는 스테인리스강 중에서 배기계 용으로 사용되는 페라이트계 스테인리스강이 주종을 이루며, 이러한 페라이트계 스테인리스강의 내열성, 내부식성, 내산화성 및 가공성 등을 향상시키기 위한 합금 개발이 적극적으로 추진되고 있다¹⁻⁴⁾. 아래 표 1은 배기계 부품별 요구특성 및 적용강종을 보여준다.

배기계 부품은 엔진에 가까운 쪽부터 배기 매니폴더, 프론트 파이프, 플렉시블 파이프, 촉매 컨버터, 센터 파이프, 메인 머플러, 테일 파이프 등으로 구성되어 있으며(그림 1), 적용되는 온도에 따라 약 600℃이하에서 사용되는 저온용과 600℃이상에서 사용되는 고온용으

로 크게 나뉜다. 저온용의 경우는 기본적으로 부품제조를 위한 가공성이 요구되며, 배기가스 중에 포함되어 있는 수분이 응축하면서 생기는 응축수에 의한 내면부식 및 제철염 등으로 인한 외면 부식에 대한 저항성이 요구된다. 이에 비해 고온용의 경우는 엔진의 각 기통에서 배출되는 배기가스를 모으고, 정화하는 역할을 하는 부품들로 이루어져 있으며, 고온강도, 열피로 특성, 고온산화 특성 및 가공성 등이 주로 요구된다.

배기계 부품의 용접은 크게 파이프류 제조를 위한 조관용접, 부품용접 및 조립용접 등으로 구분된다. 적용용접 프로세스로는 GTAW, ERW, LBW, GMAW 등이 있으며, 최근에는 용접생산성 및 품질향상을 위해 ERW 및 LBW 적용이 증가되고 있다.

본 논문에서는 배기계용으로 사용되는 페라이트계 스테인리스강의 용접부 특성 중 최근 이슈가 되고 있는 용접부 열피로 특성, 부식특성 및 가공성에 대하여 소개하고자 한다.

Table 1 주요 배기계 부품의 요구특성 및 적용 강종 (◎: 매우 중요, ○: 중요)

	Exhaust Manifold	Front Pipe	Flexible Tube	Catalytic Converter	Center Pipe	Main Muffler	Tail Pipe
적용온도(℃)	950~700	800~600	700~400	800~600	600~400	400~100	400~100
고온산화	◎	◎		◎			
고온강도	◎	◎	○	◎			
피로강도	◎	◎					
고온염해	○	○	◎	○	◎		
내/외면 부식성						◎	◎
가공성	◎	◎	◎	○		○	○
주요 적용강종 (JIS 규격)	SUH409L SUS429 SUS430J1L SUS444	SUH409 SUS429 SUS430J1L SUS444	SUS304 SUS316L SUSXM15J1	SUH409L SUS429 SUS430J1L SUS436L	SUH409L	SUH409L SUS432 SUS436L	SUS304 SUH409L SUS430J1L SUS436L

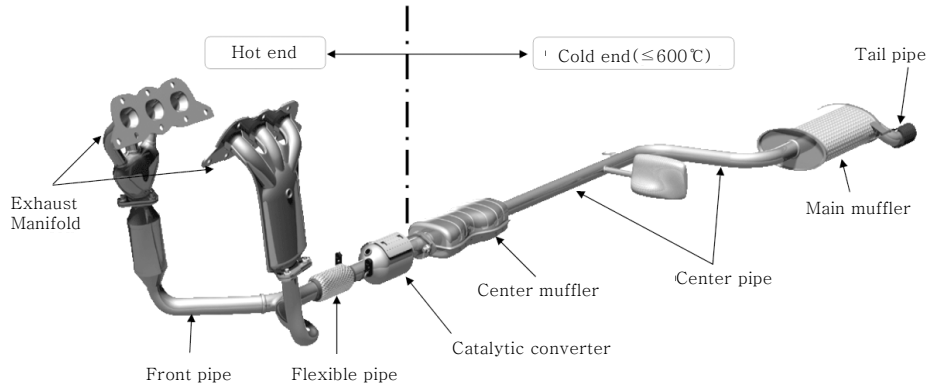


Fig. 1 배기계 시스템 구성

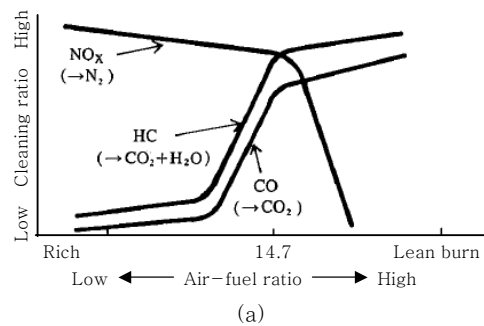
2. 용접부 열피로 특성

그림 2는 배기계 부품 중 가장 높은 온도부위에 사용되는 배기 매니폴더 부품의 외관사진을 보여준다. 이와 같은 배기 매니폴더는 주행 중 엔진으로부터 배출되는 배기가스가 최초로 모아지는 부품으로써, 주행패턴에 따라 부품 표면온도가 상온에서 900°C이상까지 주기적으로 변화된다. 이와 같은 반복적인 열사이클에 따라 수반되는 부품의 수축과 팽창은 부품 전체에 걸쳐 인장 및 압축응력을 부가하게 되며, 이에 따라 엔진에 근접한 부품들은 극심한 열피로 손상을 받게 된다. 이러한 부품에 적용되는 강종으로는 409L, 429EM, 430J1L 및 444강 등이 있으며(표 1), 복잡한 배기 매니폴더 제작을 위한 가공성 및 고온 기계적 물성 등이 요구되고 있다.

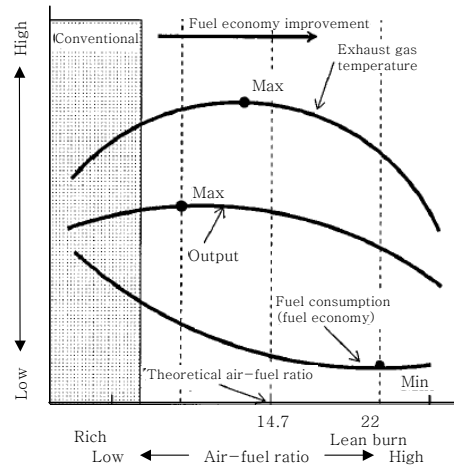
그림 3은 공연비(Air-fuel ratio)에 따른 배기가스 정화효율(그림 3(a)) 및 배기가스 온도변화(그림 3(b))를 보여준다. 그림에서 보듯이, 정화효율이 가장 우수한 공연비 값(14.7부근)에서 배기가스 온도는 최대가 되는 것을 알 수 있다. 따라서, 최근에는 환경규제 강화에 따라 배기가스 정화효율을 향상시키기 위해서 배기가스 온도를 높이는 방향으로 엔진 및 배기계 시스템을 설계하고 있으며, 이는 적용강종 변화를 유도하였다. 즉, 기존에 750~800°C의 낮은 배기가스 온도에서는



Fig. 2 자동차 배기 매니폴더



(a)



(b)

Fig. 3 (a) 공연비에 따른 배기가스 정화효율 및 (b) 배기가스 온도 변화¹⁾

409L 혹은 429강종들이 주로 사용되었으나, 근년에는 배기가스 온도를 950°C까지 상승시키고 있으며, 이에 따라 Nb, Mo, W 등을 첨가하여 고온인장 특성 및 열피로 특성을 개선한 페라이트계 스테인리스 강종들이 개발 및 적용되고 있다²⁻⁴⁾.

일반적으로 배기계 부품, 특히 배기 매니폴더의 고온 내구성은 단품 혹은 배기계 시스템 전체로 만들어져 엔진에 장착하여 특정 열사이클을 모사하면서 평가하게 된다. 그림 4는 이러한 평가에서 파단된 배기 매니폴더

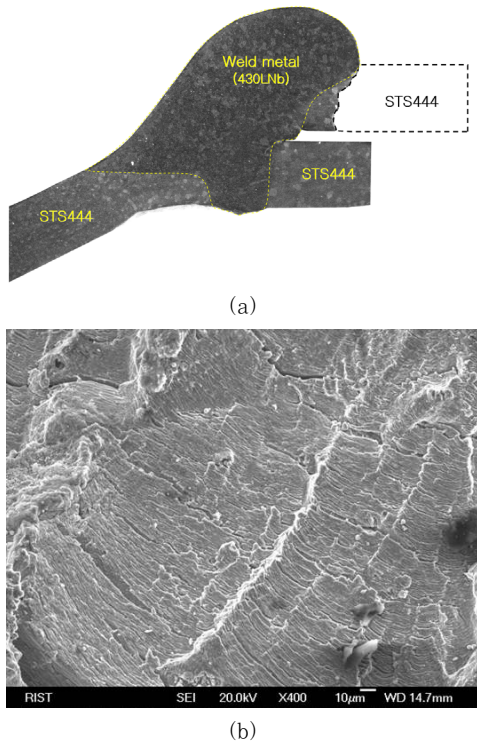


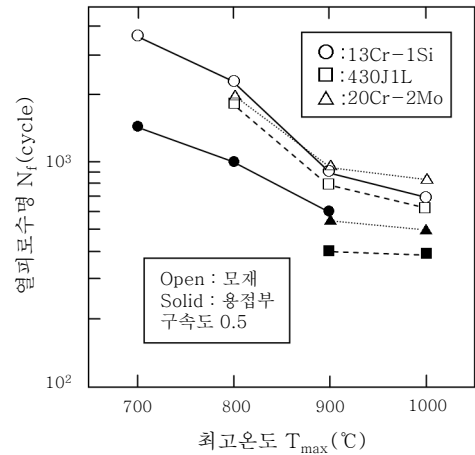
Fig. 4 파단된 배기 매니폴더의 (a) 용접부 단면 및 (b) 파단면⁵⁾

부품의 용접부 단면 및 파단면을 보여준다. 그림에서 보듯이, 배기 매니폴더 부품에서 관찰되는 대부분의 균열은 용접비드 토우부에서 시작하여 용접열영향부로 진전되는 양상을 나타내며, 파단면에서 관찰되는 striation 패턴에서도 알 수 있듯이, 열피로 손상에 의한 파단임을 확인할 수 있다.

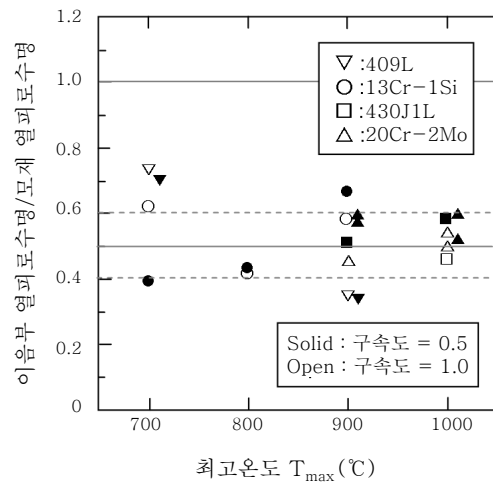
일반적으로 열피로 수명은 모재든, 용접부든 관계없이 부품이 받는 배기가스 온도가 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향을 나타내며(그림 5(a)), 이는 온도상승에 의한 모재 및 용접부의 고온강도 하락 및 고온에서 받는 열피로 손상에 의한 미세조직 열화때문으로 보고된다⁵⁾. 따라서, 배기가스 온도 상승에 따른 적용 강재 개발은 900°C이상의 고온에서 받는 열피로 손상에 견딜 수 있도록 고온강도를 높이고, 열피로에 의한 조직 열화를 억제하는 방향으로 설계되고 있다²⁻⁴⁾.

그러나, 파이프 형태로 제조된 부품의 열피로 시험 결과⁷⁾에 따르면, 동일한 열사이클을 받더라도, 모재에 비해 용접부 열피로 수명이 1/2수준에 머무는 것을 확인할 수 있다(그림 5(b)). 이와 같이 용접부의 열피로 수명이 모재에 비해 현저히 낮은 이유는 용접부 형상 및 조직학적인 영향 등을 생각할 수 있다.

그림 6은 용접부 형상에 따른 용접이음부 열피로 특성 평가 결과를 나타내는 것으로, 용접비드의 토우부



(a)



(b)

Fig. 5 열사이클 최고온도에 따른 (a) 모재 및 용접부 열피로 특성 및 (b) 모재대비 용접부 열피로 수명 저감계수⁷⁾

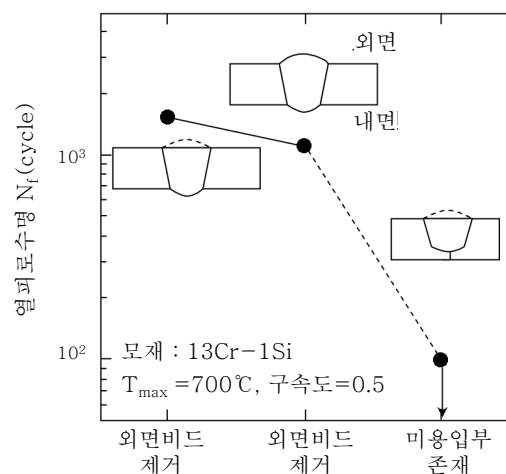


Fig. 6 용접부 열피로 수명에 미치는 비드 형상의 영향⁷⁾

혹은 미용입부와 같은 열사이클중 받는 인장/수축응력이 집중될 수 있는 부위의 존재로 인해, 이 부위에서 응력집중 계수값이 증가하기 때문에 열피로 특성이 크게 저하됨을 알 수 있다.

재현 용접열영향부에 대한 열피로 특성을 평가한 결과⁶⁾에서도, 용접비드 각도 및 토우부의 곡률반경이 열피로 특성에 매우 큰 영향을 미치며, 이는 용접비드 토우부 등과 같은 부위에서 열피로 시험시에 발생하는 응력집중계수 값이 높기 때문으로 보고된다.

이에 비해 용접에 의한 용접부 조직변화는 열피로 특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보고되고 있다. 즉, 용접열영향부의 결정립 크기를 변화시켜, 열피로 시험을 실시한 결과, 약 3배 가까운 결정립 크기 차이에도 불구하고, 열피로 특성은 통계적으로 별 다른 차이를 나타내지 않는 것으로 보고되고 있으며, 이는 열피로 시험중 시험편이 받는 변형으로 인해, 재결정이 발생하고 또한 고온피로 손상 및 크립손상을 동시에 받기 때문으로 추정된다.

배기계 부품용 용접재료는 기존에는 430LNb계의 용접재료를 많이 사용하고 있으나, 최근에는 용접금속의 미세조직을 제어하여 고온강도를 개선한 용접재료 개발도 보고되고 있다⁸⁻⁹⁾.

3. 용접부 부식특성

앞서 언급하였듯이 배기계용 소재는 부품의 노출 온도에 따라 내고온염해성 및 배가스 응축수에 대한 내식성이 요구되고 있으며, 특히 Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} 이온 등을 포함하는 응축수 환경¹⁰⁾하에서 용접부의 내입계부식특성이 요구되고 있다.

스테인리스강의 입계부식은 용접열영향부또는 열처리 과정 및 사용 중 부적합한 가열시 결정립계에서 우선적으로 석출하는 Cr탄화물, 질화물에 의해 형성되는 결정립계 부근의 Cr결핍현상 때문에 나타나는 것으로 알려지고 있으며¹¹⁻¹²⁾, 특히 오스테나이트계 스테인리스강에 비해 C와 N의 고용도가 낮고, 확산계수가 큰 페라이트계 스테인리스강은 입계부식 감수성이 크므로, 그 사용에 주의가 필요하다.

특히, 저가이며, 가공성이 우수한 안정화원소로서 Ti를 포함한 11wt%Cr의 409L(JIS규정 $Ti/C \geq 6$)은 머플러 소재 등으로 널리 사용되고 있으나, 용접 열영향부에서의 입계부식 발생사례가 간혹 보고되고 있다¹³⁾. 그림 7은 배기계 부품용 용접에 주로 사용되는 GMAW 용접부 열영향부에서 발생한 입계부식 사례를 보이고 있다.

입계부식의 방지를 위해 입계 Cr탄질화물의 석출 저

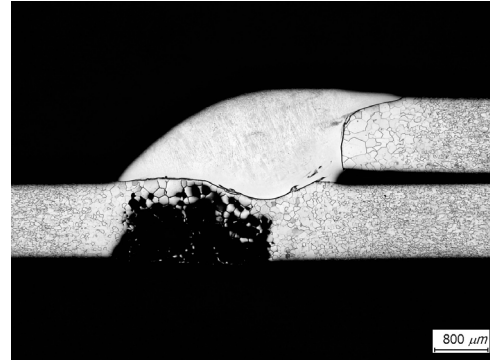


Fig. 7 409L(Ti/C=10) 용접부 입계부식 발생사례(500°C 열처리, Modified Strauss시험)

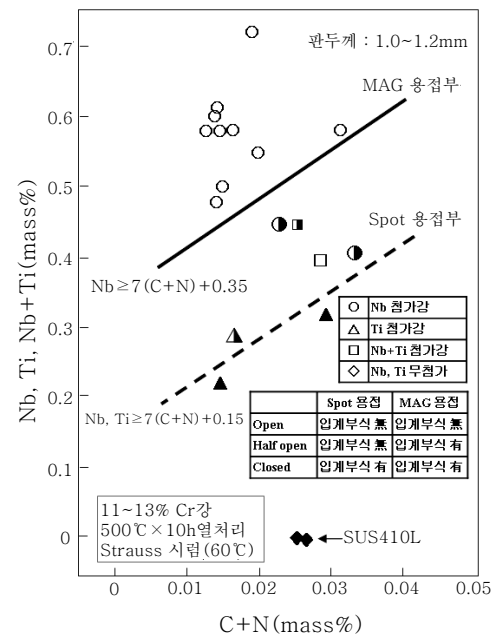


Fig. 8 입계부식감수성에 미치는 C+N, Nb 및 Ti의 영향¹⁴⁾

감을 목적으로, 소재 메이커에서는 고온에서 안정한 Ti, Nb 또는 복합 탄질화물의 생성을 위한 안정화비상향, C, N의 저감을 통한 Cr탄질화물 형성 억제 등의 노력을 진행하고 있다¹³⁻¹⁶⁾. 그림 8은 11~13%Cr강의 Spot 및 GMAW용접부의 내입계부식성에 미치는 Nb, Ti량과 C+N량의 영향을 보여주는 것으로, 입계부식 방지를 위해 필요한 Nb, Ti량은 C+N량에 따라 다르고, 용접방법에 따라서도 그 필요 첨가량이 다를 수 있다.

또한, 용접공정 측면에서 Ti(C,N)과 같은 안정화 화합물의 재고용 억제를 위해 GMAB(Gas Metal Arc Brazing)와 같은 저입열 접합기술의 적용이 검토되고 있다¹⁷⁾. GMAB기술은 아크열에 의해 저용점의 Filler wire(Cu-Al 또는 Cu-Si계)를 용융시켜 접합하는 기

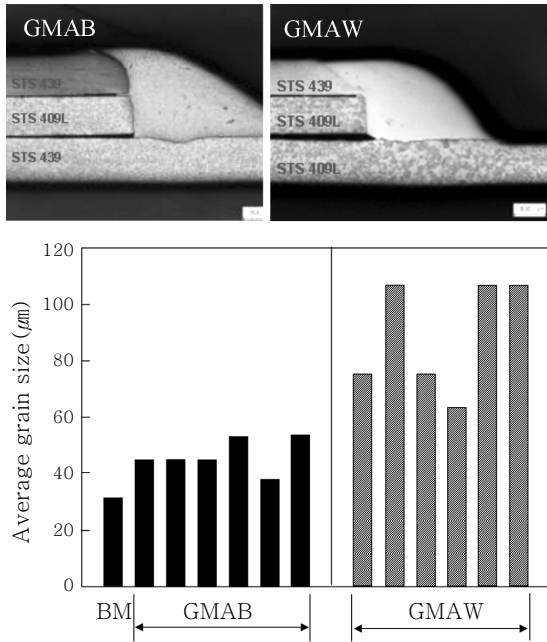


Fig. 9 GMAW 및 GMAB 용접부 조직 및 용접 열영향부 결정립 크기

술로, 그림 9의 단면조직과 GMAW와의 열영향부 결정립 크기 비교로부터 알 수 있듯이, 열영향부를 최소화할 수 있는 접합기술로, 향후 적용 가능성이 높다.

한편, 안정화 화합물의 고용, Cr탄질화물의 석출은 사용 온도에 영향을 받기 때문에, 앞서 언급하였듯이 소재 및 접합기술 측면에서의 노력과 함께, 배기계 부품 메이커에서도 적용 부위에 대한 환경을 고려한 소재 선정의 노력이 필요하며, 이러한 면에 있어서, 향후 소재 및 부품 메이커의 긴밀한 협조가 더욱 요구된다.

4. 용접부 가공성

자동차 배기계용 페라이트계 스테인리스강의 용접부 가공성 보증이 필요한 부분은 각 위치에 적용되는 pipe의 2차 가공성이다. 자동차 배기계용 pipe의 조관 작업은 간단하게 coil 절단, forming 및 용접단계로 이루어지며 적용 용접 공정으로는 GTAW, ERW, LBW 등이 있다. 조관된 pipe가 자동차 배기계 부품으로서 적용되기 위해서는 2차 가공(벤딩 및 확관)을 거친 후 shell 부품과 GMAW를 통해 조립된다. 조관된 pipe를 특히 저온(동절기)에서 벤딩 및 확관 가공을 하는 경우, 오스테나이트계 스테인리스강과는 다르게 용접부에서 우선 파괴가 발생하는 문제점이 있다¹⁸⁾.

페라이트계 스테인리스강의 용접부 저온가공성이 저하되는 요인은 주로 용접부 결정립 조대화 및 침입형 원소의 영향 때문이다. 페라이트계 스테인리스강은 용

접 및 냉각 하는 동안 주로 단상 응고하기 때문에 용접 금속부는 물론 열영향부에서 결정립이 조대화된다. 또한 오스테나이트계 스테인리스강에 비해 침입형 원소인 C, N 등의 고용한이 낮기 때문에 용접과 같은 급냉 시 과포화 고용체로 기지에 존재하거나, 탄화물들을 만들어 용접부의 가공성을 극도로 악화시킨다. 그 외에도 Cr함량이 낮은 409 (11Cr)와 같은 합금의 경우는 모재 내 오스테나이트 형성 원소인 C, N의 함량이 높거나 (200ppm이상), 용접 시 shielding 및 오염제거가 불량한 경우 냉각도중 마르텐사이트상이 생성되어 용접부를 취화시킬 수 있다고 알려져있다. 이와 같이 용접부에서 발생하는 결정립 조대화, 고용강화, 석출경화 및 취약상의 생성은 소재의 취성 파괴를 조장하는 인자이며 이러한 취성 파괴가 상온에서도 발생할 수 있게 한다¹⁹⁾.

조관 pipe의 용접부 가공성은 소재의 성분 및 용접공정에 따라 크게 영향을 받기 때문에 성분의 제어 및 적절한 용접공정의 선택을 매우 중요하다고 할 수 있다.

그림 10에서 모재 C, N함량에 따른 아크 용접부 저온 충격에너지의 변화를 나타내고 있다. 모재의 C+N이 높아 질수록 용접부의 연성-취성 전이온도 (DBTT, Ductile-Brittle-Transition-Temperature)가 상온 이상으로 상승하여 용접부는 상온에서도 취성을 나타낼 가능성이 있다. 따라서 용접부의 DBTT를 상온 이하로 낮추기 위해서는 모재의 C+N량을 150ppm이하로 줄여야 한다.

그림 11은 자동차용 배기계 pipe용도로 사용되고 있는 대표적 강종들의 GTA용접부 온도에 따른 충격에너지의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 합금량이 많아 질수록 (409-439-441-444) 대부분의 온도에서 용접부 충격에너지가 낮아지고, DBTT온도가 높아짐을 알 수 있다. 이는 합금량이 많아질수록 침입

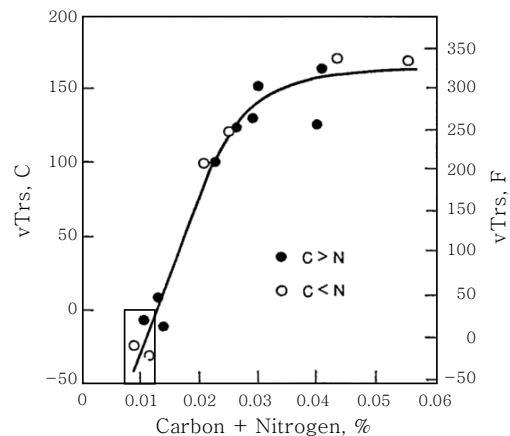


Fig. 10 17Cr 페라이트계 스테인리스강의 모재 C+N량에 따른 용접부 저온 충격에너지 변화²⁰⁾

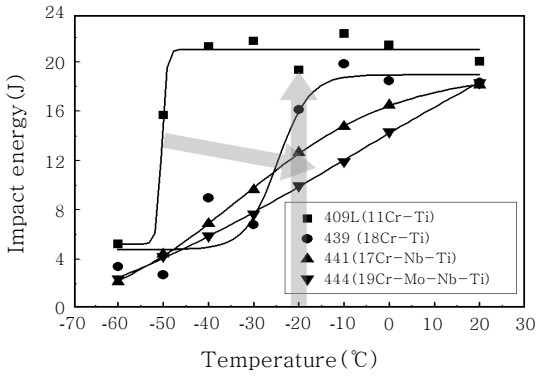


Fig. 11 각각의 페라이트계 스테인리스강GTA용접부 온도에 따른 충격에너지변화²¹⁾

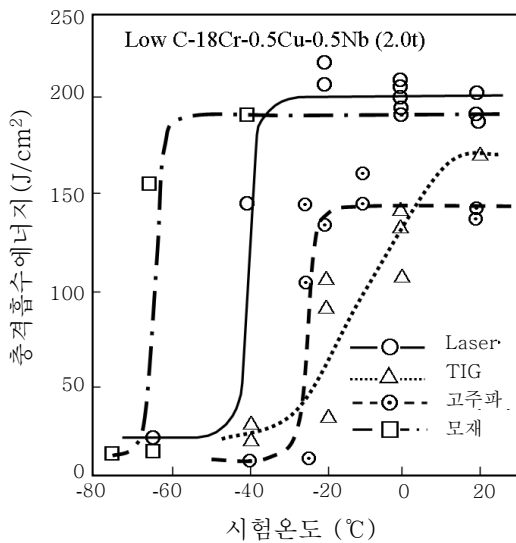


Fig. 12 용접공정 및 온도에 따른 페라이트계 스테인리스강 충격흡수에너지 변화²²⁾

형 원소인 C, N의 고용량이 더욱 낮아져 C, N에 의한 고용강화 효과가 커지기 때문이며, 또한 합금량이 많아 질수록 다양한 석출물들이 용접 및 냉각도중에 생성되어 용접부 인성을 낮추고 저온 취성을 조장한다. 따라서 441, 444와 같이 고합금 페라이트계 스테인리스강의 용접 pipe의 저온 가공성을 보충하기 위해서는 C, N등 침입형 원소 함량을 관리함은 물론, 그 외 강화효과를 일으키는 원소 즉 Ti, Nb, Mo등의 첨가 범위의 제어도 매우 중요하다고 할 수 있다.

그림 12는 조관 용접공정 및 용접부 온도별 페라이트계 스테인리스강의 충격흡수에너지의 변화를 나타내고 있다. 모재의 경우 취성을 파괴를 일으키지 않고 가공을 할 수 있는 온도는 약 -65°C였으며, 레이저용접은 -40°C, 고주파 ERW용접은 -25°C, TIG용접은 약 -10°C임을 알 수 있다. 위 그림에서 알 수 있듯이 레이저 용접부의 가공성이 타 용접법에 비해 월등히 높음을 알

수 있는데, 레이저 용접부가 타 용접부에 비해 용접 비드폭이 매우 좁고, 용접부 결정립 미세하기 때문이다. 고주파 ERW 용접의 경우 용접생상성 측면에서 타 공정대비 경제적이며, 용접비드폭 및 결정립 크기가 레이저 용접부와 거의 유사 수준이지만, 계면 용융 후 squeezing 공정 시 접합 계면에 계재물 들이 편석될 확률이 크기 때문에 용접부 가공성 측면에서는 레이저에 비해 약간 열위한 결과를 나타내고 있다. GTA 용접부는 용접입열량이 많아 용접비드가 넓고 용접부 결정립이 크기 때문에 용접부의 저온 가공성이 열위하며, 가공성 보충을 위해서는 침입형 원소의 성분을 극히 낮게 제어 하거나, 용접부 응고결정립을 미세화 시키기 위한 성분제어가 필요하다고 알려졌다.

현재 배기계 조관 용접공정은 생산성 및 품질 특성을 고려하여 고주파 ERW 용접이 주를 이루고 있으며, 저합금 페라이트계 스테인리스강의 단품용접은 GTA용접을 주로 적용하고 있다. 하지만 품질 보증연한 증가 및 경량화를 위해 고합금 페라이트계 스테인리스강의 적용이 활발하게 이루어지고 있으며, 이러한 소재들은 고주파 ERW로서 품질보증에 한계가 있기 때문에 레이저 용접을 적용하여 품질을 보증할 수 있다. 따라서 향후에는 배기계 조관용접 기술로서 레이저의 적용이 매우 증가하리라 예상 할 수 있다.

5. 맺 음 말

자동차 배기계용 페라이트계 스테인리스강은 다양한 온도, 분위기에서 사용되며, 환경규제가 강화됨에 따라, 요구되는 물성 또한 엄격해지고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 배기계 부품의 용접부 물성 중에서 특히 최근에 이슈가 되고 있는 열피로 특성, 부식특성, 가공성을 중심으로 관련 기술을 정리하였다. 앞으로 배기계 부품의 품질을 더욱 더 높이기 위해서는 철강사, 부품사, 용접재료사 등의 유기적인 협력이 더욱 더 절실히 요구 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. E. Sato, T. Tanoue: Nippon Steel Technical Report No. 64 January (1995) 13
2. A. Miyazaki, K. Ishii, S. Satoh: 가와사키제철 기보 30-2 (1998) 99
3. N. Fujita, K. Ohmura, E. Sato, A. Yamamoto: 신일본제철 기보 제361호 (1996) 20
4. Y. Kato, A. Miyazaki, T. Ujiro: JFE 기보 No. 20 (2008년 6월) 28
5. N. Fujita, K. Ohmura, A. Yamamoto: Materials Science & Engineering A (2003) 272

6. S. G. Hong, M. H. Cho and J. K. Kim: Proceedings of the IIW International Conference on Advances in welding and allied technologies (2009) 517
7. M. Miyahara: 스테인리스강 고온특성과 이용기술 심포지엄 (2003)
8. K. Inui, M. Nagata: 전기제강 제72권 3호 (2001) 155
9. K. Yamashita: Kobe Steel Engineering Reports, **47-2** (1997) 58
10. T.Ujiro, M.Kitazawa, F.Togashi, Materials Performance, **33(12)** (1994) 49
11. M. Takeda, K. Yoshioka, Y. Ono, N. Ohashi, 철과 강, **63-5**(1977) 622
12. A. A. Hermas, K. Ogura, S. Takagi, T. Adashi, Corrosion, **Vol. 51** (1995) 3
13. J. D. Fritz, I. A. Franson, Materials Performance, **36-8** (1997) 57
14. T. Utsunomiya, H. Furuki, T. Adachi, 일신제강기보, **Vol. 71** (1995) 53
15. 조미자, 최병진, 김대룡, 대한금속학회지, **33-7** (1995) 844
16. 조미자, 박상수, 김대룡, 한국부식학회지, **26-2** (1997) 75
17. 포스코연구보고서 (2008)
18. W. Gordon, A.V.Bennekom: Material Science Technology, **Vol. 12** (1996)12
19. N. J. Petch : Philosophical Magazine (Ser.8), **Vol. 3** (1958) 1089
20. Transaction of the ASM, **43** (1951) 211
21. 포스코연구보고서 (2008)
22. 日新製鋼技報, **No. 80** (2000)



- 홍승갑(洪承甲)
- 1972년생
- POSCO 기술연구원
- 레이저용접, 하이브리드용접
- e-mail : sgab@posco.com



- 엄상호(嚴祥鎬)
- 1973년생
- POSCO 기술연구원
- 용접야금, STS제품 용접
- e-mail : xnihilo@posco.com



- 이원배(李元培)
- 1973년생
- POSCO 기술연구원
- 마찰교반접합, STS 400계 조관용접
- e-mail : wonbaelee@posco.com