

研究論文

STS 강의 O₂ 및 Al함량이 용접용입량에 미치는 영향

김희봉* · 김정호** · 이창희***

Effect of O₂ and Al Content on the Weld Penetration

H. B. Kim*, J. H. Kim** and C. H. Lee***

Key Word : GTAW(가스 텅스텐 아크용접), Weld Penetration(용접 용입량), Surface Tension Gradient(표면장력구배), Surface Active Element(표면활성원소), Welding Parameters(용접변수), Stationary Heat Source(정적열원), Computer Simulation(컴퓨터 모의실험)

Abstract

The effect of O₂ and Al contents and the variation of welding parameters such as arc currents, welding speed on the weld penetration was investigated.

Examination of weld penetration using GTAW was accomplished in the ferritic STS410L and austenitic STS304. Good penetration could be controlled by the variation of O₂ and Al contents in STS304. However, influences of O₂ and Al contents on the ferritic STS410L are far less than those on the austenitic STS304. Welding parameters should be considered first before controlling O₂ and Al contents for a good penetration in ferritic STS410L.

In the simulation study under the stationary heat sources, the results of simulation and experiment have a similar tendency.

1. 서 론

스테인리스강은 내식성을 주요 특성으로 하는 고합금강으로서 화학성분에 따라 Fe-Cr-Ni

(30계)와 Fe-Cr(40계)로 대별된다. 고가의 30계 스테인리스강의 대체 강종인 40계 스테인리스강은 내식성, 내열성을 갖고 있어 일반 구조용 재료로서 많이 사용된다. 하지만 40계 스테인리스강의 나쁜 용접성과 낮은 연성으로 인해 사용범

* 정회원, 한양대학교 금속공학과(철강공정 및 응용 연구소)

** 비회원, 한양대학교 금속공학과(철강공정 및 응용 연구소)

*** 정회원, 한양대학교 금속공학과(철강공정 및 응용 연구소)

위가 제한되며 특히 가공중의 SiO₂ inclusion에 의한 공간 가공성의 불량이 문제점으로 대두되어 탈산제를 Si 대신 Al을 사용하여 가공성 향상에 큰 효과를 보았다. 그렇지만 Al사용에 따라 알루미늄(Al₂O₃)가 300계의 내부에 존재할 때 용접 용입량이 기존재에 비하여 열악해지는 경우가 있는데¹⁻⁴⁾, 이에 대해 400계 스테인리스강에서 이론적, 실험적으로 고찰한 연구가 전혀 이루어지고 있지 못하고 있는 실정이다.

용입성을 연구하는데 있어서 용융지 내의 유체유동의 mechanism 이해는 매우 중요하다. 용융지 내의 유체유동은 표면장력구배에 의한 표면유동을 유발하는 Marangoni forces, 전자기적 힘에 의해 용융지 내부로의 유동을 일으키는 Lorentz forces, 용융부의 밀도차에 의한 Buoyancy forces, 그리고 arc plasma에 의해 유도된 aerodynamic drag forces가 있으며 이러한 유체유동의 구동력에 영향을 주는 용접조건과 관련된 인자로는 표면장력계수 dy/dT 의 부호와 크기, arc length, 용접봉의 크기와 tip angle의 영향을 받고 전류밀도를 결정짓는 anode spot의 면적, 용융지 표면의 aerodynamic drag force의 강도를 결정하는 아크 압력 등이 있다⁵⁾.

한편, 이들 구동력 중에서도 Marangoni force가 가장 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있으며, 표면장력계수 dy/dT 의 부호는 미량의 합금화 원소에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다.^{2-4, 6-9)}

표면활성원소인 S, O, Se, Te등이 존재할때 용융지 가장자리로 편석되어 그 지역의 표면장력을 낮춰 상대적으로 표면장력이 큰 용융 중심부로 유체유동이 형성되어 좁고 깊은 용입을 얻게 된다. 반면에 용융지 표면에 Al, Ca, Ce 등의 반응성 원소가 존재할 때 표면활성원소와 반응하여 안정한 화합물을 형성하므로써 표면장력에 아무런 영향을 끼치지 못하게 된다. 따라서 용융금속의 거동은 순 금속과 유사하여 표면장력이 큰 용융지 가장자

리로 뜨거운 용융금속이 이동하여 그 지역을 용융시킴으로서 넓고 낮은 용입성을 보이게된다⁶⁾. 이에 본 연구에서는 스테인리스강에 있어서 Al 및 O₂가 용접 용입량에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하고, 이에 따라 용접부의 형상에 미치는 영향을 실험하여 그 실험 결과에 따른 용입량 변화의 mechanism을 규명하였다.

이론적으로는 정적열원하에서 모재내 산소함량에 따른 용입량 변화를 computer simulation을 통해 분석하여 그 결과가 실제 용접실험과의 비교분석을 통하여 실제 용접에서도 적용이 가능한지를 조사해 보았고 동적열원하에서의 simulation 가능성을 살펴 보았다.

2. 실험방법

2.1 시험재

본 연구에서 사용한 강종은 페라이트계 스테인리스강인 STS410L 이고 용입특성을 비교하기 위하여 기존에 널리 연구대상이 되어 왔던 오스테나이트계 스테인리스강 (STS304)을 본 연구의 비교실험 강종으로 선택했다. 시험재의 성분을 Table 1에 나타내었다.

2.2 Element Implant Techniques

410L 및 304 스테인리스강의 용입성에 미치는 Al의 영향을 조사 및 비교할 목적으로 모재의 다른 원소의 성분은 변화시키지 않고 용착금속의 Al 함량만을 변화시키기 위하여 Element implant technique⁷⁾을 이용하였다.

본 technique은 Fig. 1에서 보여 주듯이 모재에 흠을 가공하여 폭과 두께가 서로 다른 순수 Al

Table. 1 Chemical composition of test specimens used

	Composition (wt%)										
	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	S	O
STS410L	0.018	0.26	0.74	0.025	11.49	0.40	0.03	-	0.003	0.002	0.005
STS304	0.047	0.48	1.04	0.022	18.19	8.22	0.01	0.014	0.003	0.001	0.004

strip ①:2×200×0.1, ②:4×200×0.1, ③:4×200×0.2, ④:4×200×0.4, mm)을 넣고 모재로 만든 덮개를 덮은 후에 전류 180A, 용접속도 30cm/min, 10 l/min의 flow rate로 Ar 보호가스를 사용하여 GTA로 용융을 시켰다. 이 경우 용접조건이 일정하고 투입된 Al strip의 크기만 변화시켰기 때문에 용착금속의 Al 성분을 변화시킬 수 있었다. Al이 implant된 지역의 Al함량은 spectro-VAC을 이용하여 측정하였다.

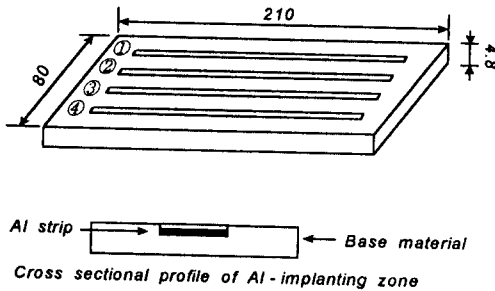


Fig. 1 Schematic presentation of Al-implanting techniques

2.3 용접실험

2.3.1 용접변수의 영향실험

시험재의 GTA 용접 용입성에 대한 Al 및 O₂ 첨가로 인한 영향을 파악하기 위해 시험재를 80×210mm의 같은 크기로 절단하고 용접에 의한 변형을 방지하고, 동일한 용접조건을 적용하기 위해 시험재를 JIG에 고정시킨 후 실시하였고 용접조건은 Table. 2에 나타난 조건으로 Fig. 2에서처럼 Al implanting된 지역에 수직방향으로 용접을 실시하였다.

비교 실험 대상강종인 STS304의 용접도 Al 과 O₂ 함량 변화는 동일하게 설정하고 용접전류와 용접속도는 STS410L 시험재와의 비교검토를 용이하게 하기 위해 전류는 210A, 240A, 용접속도는 20cm/min, 40cm/min으로 실시하였다.

2.3.2 보호가스내의 산소 첨가 영향 실험

STS410L 과 STS304의 용입특성에 미치는 산소

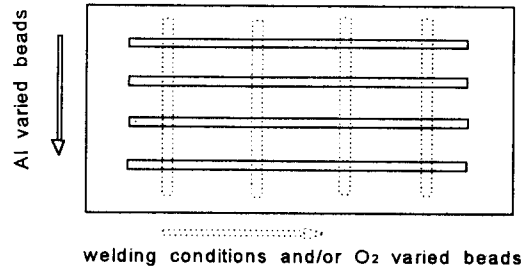


Fig. 2 Schematic diagram of welding sequences

Table 2. Welding conditions

Method	GTAW
Electrode	W+2%Th
Filler metal	none
Welding position	flat
Polarity	DCSP (negative electrode)
Current	180A, 210A, 240A
Arc length	2mm
Shielding gas	pure Ar, 2%O ₂ , 5%O ₂ , 8%O ₂
Gas flow rate	10 l/min
Welding speed	20, 30, 40, 50cm/min

의 영향을 알아보기 위해 Ar gas와 O₂ gas 혼합기 (gas mixer)를 사용하여 보호가스를 100% Ar, Ar+2%O₂, Ar+5%O₂, Ar+8%O₂ 로 변화시켜 실험을 실시 하였고 이때 가스유량은 10 l/min으로 일정하게 유지하였다. 용접실험 후 시험재 내에 함유된 산소함량은 습식분석을 통하여 보호가스 내의 동일한 산소첨가량마다 3회씩 습식분석을 하여 평균치를 구하였다.

2.4 용접부 관찰

2.4.1 용입성 측정

용접실험 후 시험재에 대한 용입특성 분석은 용접 진행방향과 수직으로 절단하여 각 용접조건마다 4개씩의 시편을 얻은 후 그 단면을 1μm Al₂O₃

suspension 까지 연마하여 STS 410L은 Vilella s reagent , STS 304는 Dilute Aqua-Regia(왕수)로 etching 을 실시하여 저배율 현미경으로 용접부 단면을 촬영하였다. 용접부 사진을 Image Analyser를 통해 용융부의 깊이(Depth), 폭(Width)과 용융부 단면적을 구하여 평균을 취한 다음 각각의 용접조건에 따른 용입특성을 파악하였다. 용융부의 깊이, 폭 및 단면적의 정의는 Fig. 3에 나타내었다.

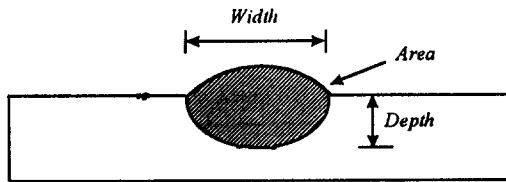


Fig. 3 Schematic diagram of weld

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용입성에 미치는 용접변수의 영향

3.1.1 용접전류의 영향

용입량의 영향을 고찰하기 위하여 arc length를 고정시키고, 용접전류를 180, 210, 240A로 변화시켜 O₂ 및 Al을 첨가하지 않은 모재의 용접부 형상을 관찰하였다.

Table 3, Fig. 4는 보호가스를 순수Ar, 용접속도를 20cm/min로 용접하였을 경우, 용접전류에 따른

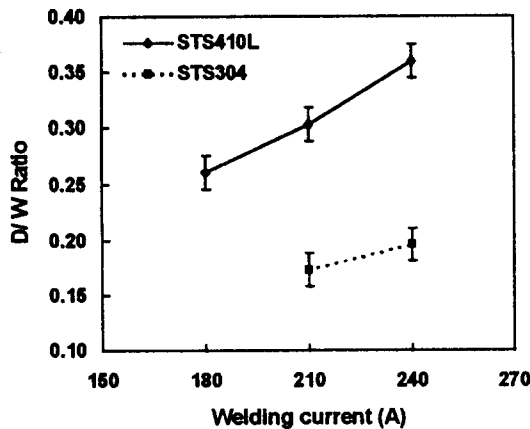


Table 3. Variations of depth and width of welds with welding current

	STS 410L		STS 304	
	Depth (mm)	Width (mm)	Depth (mm)	Width (mm)
180A	2.3	8.8	-	-
210A	3.0	10.1	1.6	9.3
240A	4.2	11.6	2.1	10.7

용입비(D/W)와 용융부 단면적의 변화를 나타낸 것이다. 용접전류가 증가할수록 용입깊이와 폭이 전체적으로 증가하였고, 용입깊이가 bead폭에 비해 크게 증가하여 용입비도 0.26에서 0.36으로 증가하였으며, 용융부 단면적도 증가함을 알 수 있다. 이것은 용접전류가 용접부의 크기 및 형상을 결정하는 중요한 인자로서 전류가 증가하면 용입 열량이 증가하여 용접부의 단면적을 크게 하고, 아크 열원의 밀도를 증가시켜 보다 깊은 용입깊이와 단면적을 얻은 것으로 사료된다.

STS 410L은 비교 시험재인 STS304에 비해 용입비와 용융부 단면적의 증가폭이 훨씬 크게 나타나고 있다. STS410은 STS304에 비하여 점성도가 보다 작고 열전도도가 크므로 열전도 및 유동의 영향을 더욱 크게 받음으로써 용접 단면적의 크기가 보다 크게 나타나는 것으로 사료된다.

3.1.2 용접속도의 영향

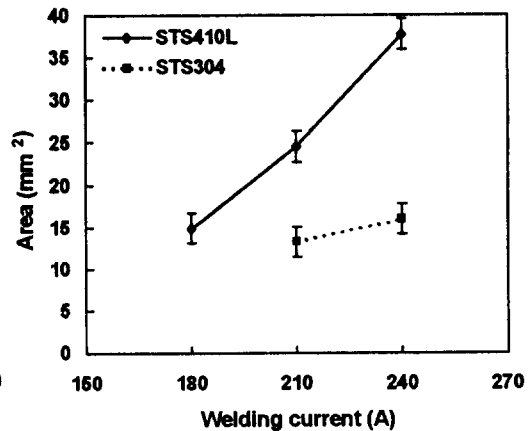


Fig. 4 Effects of welding current on D/W ratio and cross-sectional area of welds (pure Ar, welding speed=20cm/min)

일반적으로 용접속도가 용입성에 미치는 영향은 용접속도가 용접비드에 대한 열에너지의 분포형상에 크게 영향을 미치지 않기 때문에 용접전류 또는 arc length보다 그 기여도는 작다. 용접속도의 증가는 일반적으로 용입열량 및 용접 비드폭의 감소를 초래한다.

Fig 5는 보호가스로 Ar을 사용하고 용접전류를 210A로 고정시켰을 때의 용접속도의 변화에 따른 D/W비의 변화와 용융부 단면적의 변화를 나타낸 것이다. 또한, 용접속도에 따른 용입깊이와 비드폭의 변화는 Table 4에 나타내었다.

동일한 용접조건에서 용접속도가 증가할수록 용입깊이와 비드폭이 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 이에 비하여 용입깊이의 감소폭이 보다 크게 나타나고 있다. Fig. 5에서 보듯이 용접속도가 증가할수록 D/W비도 조금씩 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 용접속도에 따른 용융부의 단면적은 용접속도가 증가할수록 감소하고 있다. 비교시 험재인 STS304와 비교하면, 용접속도의 증가에 따라 비슷한 경향을 나타내고 있지만, STS 410L의 경우에 있어서 그 감소폭이 크게 나타나고 있다. 이것은 앞 절의 용접전류의 영향과 같은 결과라고 생각된다.

3.2 용입성에 미치는 첨가원소의 영향

3.2.1 산소(O₂)의 영향

Fig. 6은 아르곤 보호가스에 산소를 첨가하였을

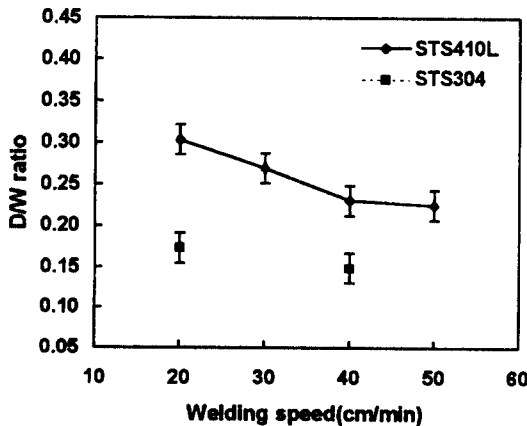


Table 4. Variation of depth and width with welding speed.

Speed (cm/min)	STS 410L		STS 304	
	Depth (mm)	Width (mm)	Depth (mm)	Width (mm)
20	3.0	9.91	1.6	9.25
30	2.38	8.83	-	-
40	1.9	8.25	1.1	7.40
50	1.47	6.55	-	-

경우 용착금속내 실제 용입되어 잔존하는 산소량을 측정된 그래프이다. 산소를 첨가하기 전 원재료에 초기에 함유되어 있는 산소량은 50ppm이었으며, 보호가스 내의 산소 첨가량이 증가함에 따라 용착금속 내에 잔존하는 산소량도 거의 직선적으로 증가하여 보호가스 내의 산소함량이 8%일 때 용착금속에서는 약 400ppm을 함유하고 있다.

Fig. 7은 용접부에 미치는 산소의 영향을 알아보기 위해 보호가스 내에 산소를 첨가하여 실험한 결과를 나타내고 있다. 용접전류 210A, 용접속도 20cm/min로 실험하였을 때 보호가스 내의 산소첨가량에 따른 용입비를 측정된 결과와 용융부의 단면적을 나타낸 그래프이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 STS410L과 304 모두 용융부 단면적의 변화는 크지 않으나 용입비에 있어서 2vol. %까지는 용입비가 향상되나 그 이후의 산소첨가에는 감소하는 경향을 보여줬다.

이것은 STS410과 STS304 각각의 경우에 있어서

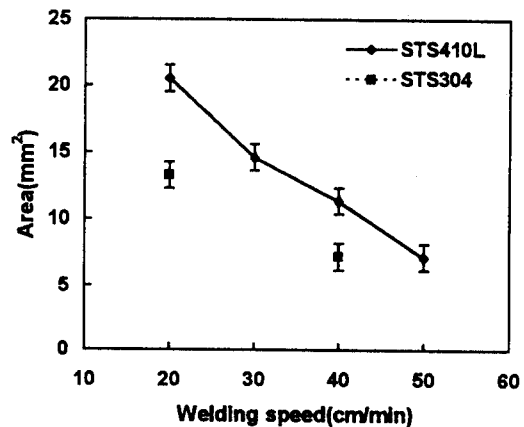


Fig. 5 Effects of welding speed on D/W ratio and cross-sectional area of welds (pure Ar, welding current = 210A)

표면 활성화 원소인 산소의 영향으로 용융시 온도 변화에 따른 표면장력 및 그 구배의 영향으로 용융 지에서의 유동의 양상을 변화시키기 때문이며, 용착금속내 200ppm이상의 산소가 잔류 할때는 산소의 과포화로 용입성에 아무런 영향을 끼치지 못하는 것으로 사료되며 기존의 연구 결과와 같은 경향을 보여준다⁹⁾.

한편 410L의 경우 304에 비해 산소의 함량에 크게 영향을 받지 않는 것으로 생각되며, Fig. 4, Fig. 5와 비교했을 때 용접조건 변화에 더욱 민감한 것으로 생각된다.

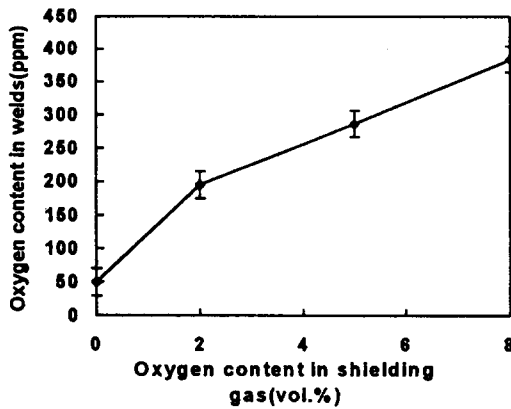


Fig. 6 Oxygen contents in welds with various O₂ content in shielding gas.

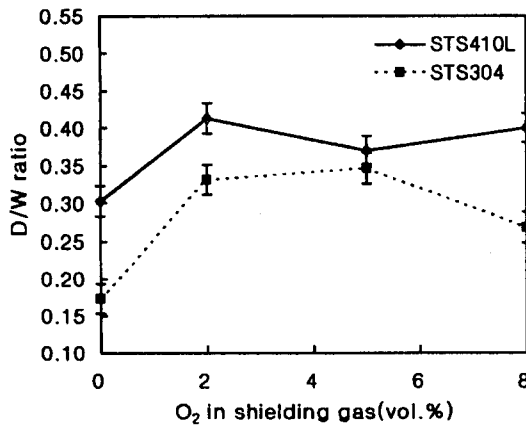


Fig. 7 Effect of oxygen contents in shielding gas on D/W ratio and cross-sectional area of welds (welding current = 210A, welding speed = 20cm/min)

3.2.2 Al의 영향

Fig. 8은 size가 서로 다른 Al strip을 모재에 implanting했을 때 모재내의 Al변화량을 나타낸 것이다. Fig. 9는 용접전류 240A, 용접속도 40cm/min으로 실험한 결과로서, 각각 알루미늄 함량에 따른 D/W비와 용융부의 단면적을 나타낸 그래프이다.

실험결과에서 알 수 있듯이 용융부의 단면적은 알루미늄 함량에 따라 큰 차이를 나타내지 않고 있으나, 용입비는 초기 모재의 Al 함량 30ppm에서 800ppm 범위에서 큰 폭으로 감소하고 있으며

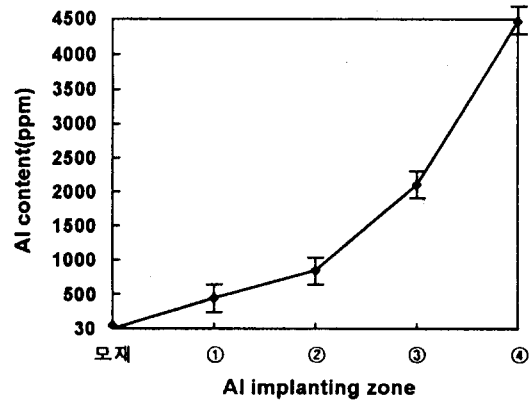
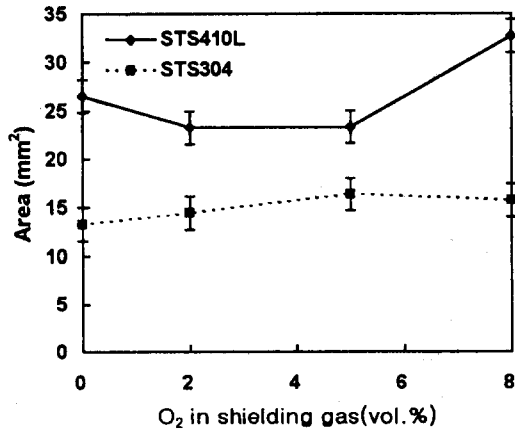


Fig. 8 Al contents in welds with variation of Al strip implanted.



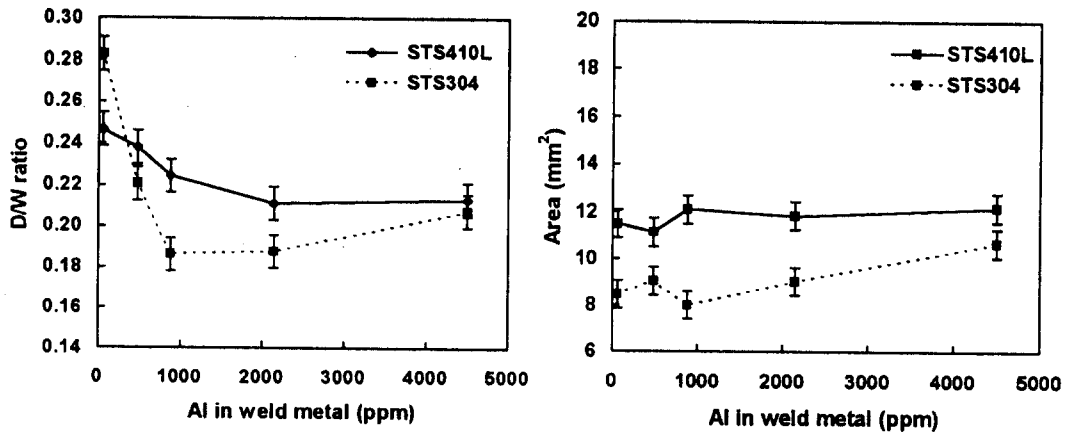


Fig. 9 Effect of Al content on D/W ratio and cross-sectional area of welds (Welding current=240A, welding speed = 40cm/min)

304의 경우가 Al함량 변화에 더욱 민감함을 알 수 있다.

이는 초기 모재에 잔류하고 있던 약 20ppm의 유황(S)과 50ppm의 산소가 reactive 원소인 알루미늄의 첨가로 표면장력의 구배에 미치는 유황 및 산소의 영향을 감소시키는 것으로 사료되며, 알루미늄의 함량이 어느 정도(실험에서는 약 800ppm) 이상으로 증가하였을 경우에는 D/W비에는 차이를 나타내지 않고 있다.

단면적의 결과에서도 마찬가지로 알루미늄의 함량에 따라 용융지의 단면적에는 큰 차이를 나타내지 않음을 알 수 있다. 이것은 모재에 잔존하는 유황 및 산소의 영향을 감소시키는데 쓰인 알루미늄의 첨가 알루미늄은 용융지의 제 현상에 큰 영향이 없다고 생각할 수 있다. 즉, 알루미늄은 용융지에 잔존해 있는 산소와 반응하여 Al₂O₃를 생성하므로써 산소에 의해 표면장력의 구배가 positive값을 가지는 것을 방해하는 역할을 하고, 산소가 다 반응하였을 경우에는 영향을 미치지 않는다고 사료된다.

3.2.3 Al과 O₂를 동시 첨가하였을 때 용입성에 미치는 영향

알루미늄의 함량을 여러가지 경우로 첨가하면서 산소의 함량변화에 따른 용입성 실험에 대한 결과

를 Fig. 10, 11에 나타내었다.

Fig. 10은 STS410L을 모재로 하여 알루미늄과 산소의 함량을 변화시켜 실험한 결과로서 D/W비를 나타냈다. STS410L에 있어서 알루미늄의 함량에 따라 산소함량이 5vol. %까지는 D/W비가 조금씩 감소하는 경향을 나타내었으며, 산소함량이 8vol. %일 경우는 알루미늄 함량의 증가에 따른 D/W비에는 크게 변화가 없는 것으로 관찰된다. 이러한 결과로 볼 때 410L의 경우 산소의 함량에 의해 그 용입성이 변화하지만 Al의 함량에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 사료된다.

Fig. 11은 비교 시험재인 STS304에 대하여 D/W비를 측정된 결과이다. STS304의 경우에 있어서 D/W비는 보호가스내에 산소를 2% 첨가 했을 때(용착금속내 200ppm) 용입비가 크게 증가 하였으며, 산소가 0~8vol. % 함유되었을 경우 모두 알루미늄의 함량이 증가할수록 D/W의 비가 조금 감소하다 일정하게 유지되는 경향을 나타내었다.

Fig. 10과 Fig. 11을 비교하면 STS410L보다는 STS304의 경우가 Al과 O₂변화에 따라 용입성이 민감하게 변한다는 것을 알 수 있다.

4. 이론적 모델링

정적열원하에서 산소가 용접부 형상에 미치는

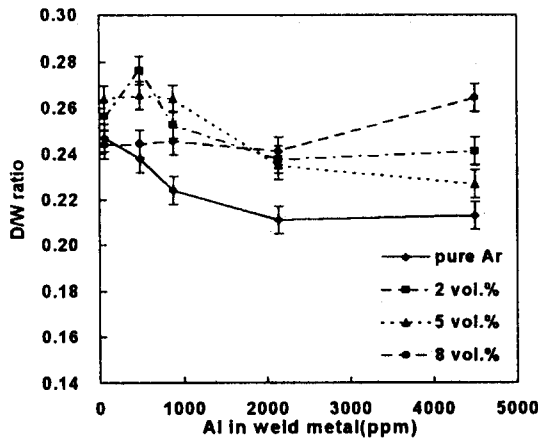


Fig. 10 D/W ratio with oxygen contents in the conditions of various Al additions to STS 410L (240A, 40cm/min)

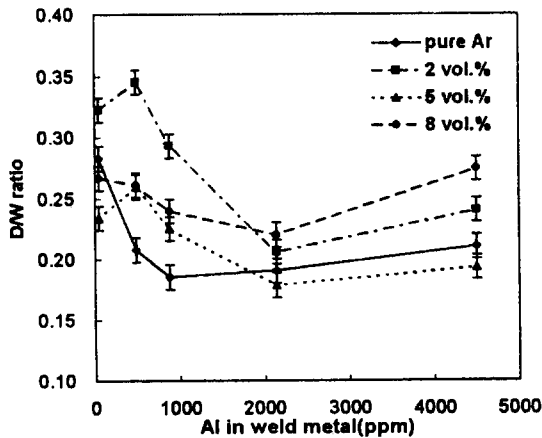


Fig. 11 D/W ratio with oxygen contents in the conditions of various Al additions to STS 304. (240A, 40cm/min)

영향을 고찰해서 분석된 결과가 실제 용접조건에서도 적용이 가능한지를 알아보기 위하여 STS 304를 이용하여 computer simulation을 실시하였다. 용융지에서 온도분포와 그 형상은 용접성을 결정짓는 중요한 요소이다. 또한, 용융지 내에서의 대류(convection) 현상도 용접성에 큰 영향을 미친다고 보고되고 있다. 이러한 대류현상은 용접부의 형상, 조성 및 응고조직에 영향을 미치게 되는

데 대류현상을 일으키는 구동력으로 밀도 및 온도 차에 의한 buoyancy force, 용접전류와 자체 전자장에 의한 electromagnetic force, 표면장력 차이에 의한 Marangoni force 등이 있으나, 본 해석에서는 전자기력의 영향은 무시하였다.

4.1 Buoyancy force의 계산¹⁰⁾

용접전류에 의한 heat flux는 국부적으로 용융금속 속 밀도차를 발생시킨다. 이러한 밀도차에 의해 용융금속의 열적평형은 더 이상 이루어지지 못하여 용융부에서의 열적유동을 일으키게 된다. 이 구동력은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$f_{den} = \rho_0 g(1 + \beta) \quad (1)$$

여기서, f_{den} 은 buoyancy force, ρ_0 는 상온에서의 밀도, g 는 중력가속도, β 는 압축률을 각각 나타낸다.

4.2 표면장력의 계산

온도에 의존하는 표면장력구배는 용접부 표면에서 전단응력을 발생시켜 표면으로의 운동량 및 열의 이동을 증가시키는 역할을 한다. 스테인리스강에서 표면장력은 S, O, Al과 같은 용질원자에 의해 영향을 받는데 용접부 표면에서 수치를 측정한다는 것이 불가능하므로 많은 이론적 계산이 행하여졌다.^{11,12)}

P. Sahoo등¹²⁾은 합금에서 온도와 용질원자의 활동도에 의존하는 표면장력의 함수를 계산하여 아래식으로 나타내었다.

$$\gamma = \gamma_0^m - A(T - T_m) - RT \Gamma_s \ln [1 + k_1 a_i \exp [-(\Delta H^0/RT)]] \quad (2)$$

A : 순금속의 표면장력구배 (dy/dT)

T_m : 금속의 용점, ΔH^0 : 표준흡열량

R : 기체상수, k_1 : 엔트로피 관련 상수,

a_i : 용질원자의 활동도

γ_0^m = 용점에서의 표면장력,

Γ_s = surface excess at saturation

Fig. 12는 STS304에서 식 2)의 계산에 의해서 온도에 따른 표면장력값을 산소가 없을 경우, 200ppm, 400ppm 함유되었을 경우에 대해서 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 산소의 첨가로 재료의 용점이상 2400K 이하에서 산소가 존재하지 않을때와는 달리 표면장력구배가 positive로 바뀐 것을 관찰 할 수 있다.

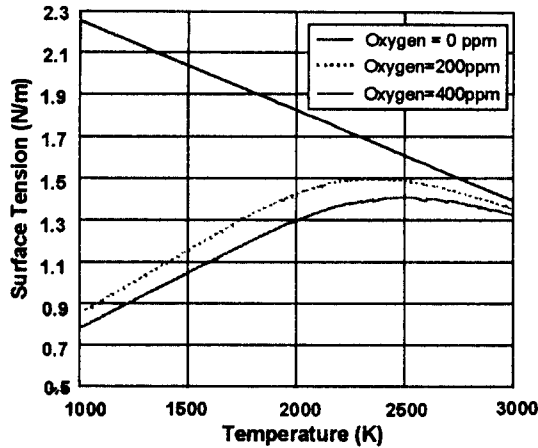


Fig. 12 Variations of surface tension with temperature of STS304

4.3 용입열유속(Heat flux)의 계산

용접부에 입열되는 열량은 Gaussian profile로 입열된다고 가정하였다. 용접비드 반경내 위치별로 입열되는 열유속을 계산하기 위해서는 용접비드 전체에 걸쳐 받는 열량을 먼저 계산하여야 한다. 용접부의 입열량은 다음과 같다.

$$Q = \eta VI \quad (3)$$

여기서 η 는 아크효율(%), V 는 인가전압(volts), I 는 인가전류(Ampheres)이다. Table 5에 각 실험 조건에 따른 η, V, I 값을 나타내었다.

열유속을 Gaussian profile로 가정하여 용접비드 내 위치별로 받는 열유속은 다음과 같다.

$$q = \frac{3Q}{\pi r_b^2} \exp\left[-3 \frac{r^2}{r_b^2}\right] \quad (4)$$

여기서, r 은 아크 중심으로부터의 거리, r_b 는 아

크비의 반경이다. 위 식에 의해 Table 5의 각 조건에서 구한 열유속 profile은 Fig. 13과 같다.

Table 5. Welding conditions applied in experiment and simulation

Oxygen contents (ppm)	Efficiency (η)	Current (A)	Voltages (V)	Stationary Heat Apply Time (sec)
0	0.5	240	13.6	2.0
200	0.5	240	13.6	2.0
400	0.5	240	14.8	2.0

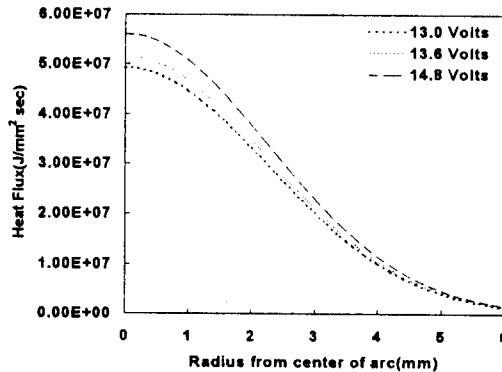


Fig. 13 Heat flux at the region of arc

4.4 해석영역의 설정과 가정

GTA용접시의 정적열원조건에서 해석을 수행하였고 본 해석에서 설정한 가정은 다음과 같다.

- ▶ 2차원 비정상(transient) 상태, axisymmetry
- ▶ 열적 물리적 성질과 표면장력은 온도의 함수로 설정하였다.
- ▶ 용접부내의 대류에 의한 유동은 Newtonian, Laminar flow로 설정하였다.
- ▶ 모재내의 열전달은 열전도(Conduction)에 의한다.

▶ 모재표면에서의 열방출은 대류열전달에 의존하며, radiation은 무시하였다.

그리고, 해석영역은 Fig. 14에서 보듯이 좌우측 대칭으로 하여 우측의 모재에 대해서만 해석을 수행하였다. 또한, 실제 용접실험과 비교하기 위하여 중심축에서 5.5mm까지를 입열부위(아크비의 반경 r_b)로 설정하였고, 모재의 두께는 7mm이다.

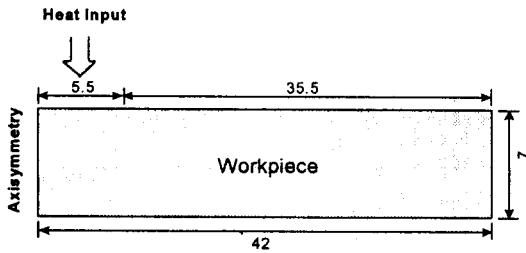


Fig. 14 Schematic representation of analysis region (unit:mm)

4.5 지배방정식

본 수치해석에서 이용한 지배방정식은 다음과 같다.

(1) 질량보존 (continuity equation)

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

(2) 운동량 보존 (momentum conservation equation)

① radial component momentum

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \\ - \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \\ - \frac{1}{\rho} (J_z B_\theta) - \frac{1}{\rho} Ku \end{aligned} \quad (6)$$

② axial component momentum

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \\ - \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \\ - \frac{1}{\rho} (J_z B_\theta) - \frac{1}{\rho} Ku + g\beta(T - T_r) \end{aligned} \quad (7)$$

(3) 열에너지 보존 (thermal energy conservation)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]$$

$$- \frac{\Delta H}{\rho C_p} \frac{\partial f_L}{\partial t} \quad (8)$$

4.6 초기조건 및 경계조건

초기조건으로서는 용입열량이 주어지지 않은 초기상태로 용접시편의 초기온도를 25℃ (298K)로 설정하였으며, 경계조건으로는 용접시편의 표면에서 대기에 의한 냉각효과는 대류 열전달에 의한 열방출에 의존하고, 용접시편 표면에서의 속도는 0으로 설정하였다. Fig. 15에 경계조건을 자세히 나타내었다.

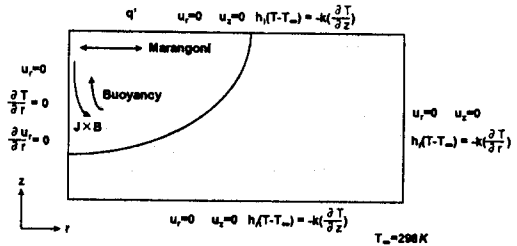


Fig. 15 Representation of the boundary conditions in this analysis

4.7 열적 물리적 성질의 입력

본 해석에서 사용한 STS304의 열적 물리적 성질은 Table 6에 나타내었다. 특히, 열전도도, 밀도, 비열, 점성은 온도의 함수로써 Fig. 16에 나타낸 값을 사용하였고 용접부에서의 표면장력은 P. Sahoo등¹²⁾이 구한 값을 이용하였다.

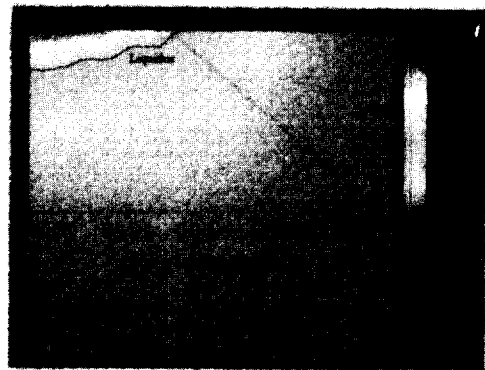
5. 해석결과

Fig. 17과 18은 STS304를 이용하여 11mm의 비드폭에 2초 동안 정적열원하에서 용접한 결과와 이론적으로 해석한 결과를 나타내었다. 산소의 함량은 0, 200, 400ppm일 경우에 대하여 해석하였으며, 산소함량에 따른 용접부의 형상과 용입성을 관찰하였다.

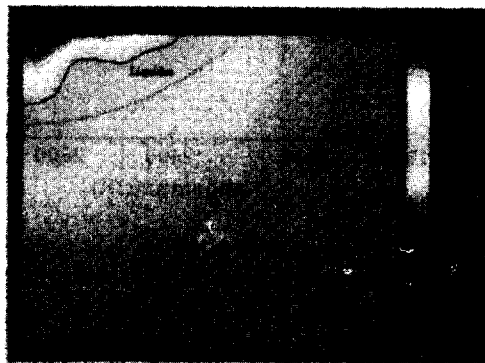
산소함량이 증가할수록 용입깊이와 D/W ratio가 증가하는데 이는 표면활성화 원소인 산소함량이 고온에서도 표면장력을 증가시켜 용융금속의 흐름

Table 6. Thermophysical properties of STS304

Properties (Symbols)	Units	STS304	Properties (Symbols)	Units	STS304
Gravity (g)	m/s ²	9.8	Density (ρ)	kg/m ³	7.8
Viscosity (μ)	pascal · s	Temp. dependent	Specific heat (C_p)	J/kg · K	Temp. dependent
Thermal conductivity (K)	J/m · s · K	Temp. dependent	Latent heat of fusion (L)	J/kg	2.47×10^5
Volume expansion coefficient (β)	1/K	1×10^{-4}	Convective heat transfer coefficient (h)	J/m ² · s · K	42
Liquidus temperature (T_L)	K	1723	Solidus temperature (T_s)	K	1523



Oxygen Content = 0 ppm



Oxygen Content = 400ppm

Fig. 17 Comparison of weld pool shape in both experiments and simulation in case of STS304

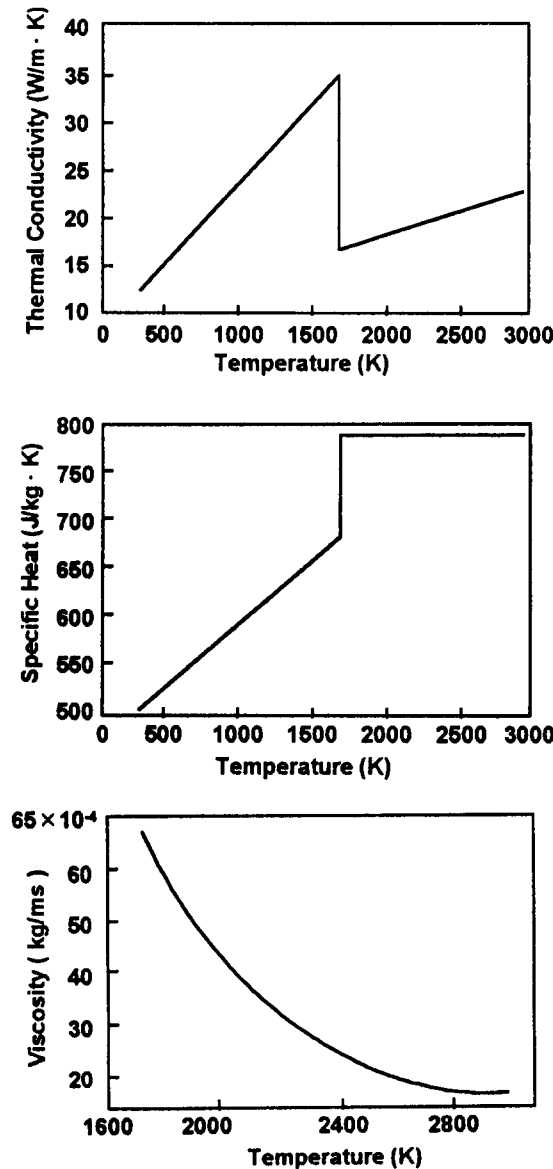


Fig. 16 Thermophysical properties as a function of temperature for STS304 used in this analysis³⁾

을 용융지의 중심부로 이동시켰기 때문이며, 실험과 해석결과가 유사한 경향을 보인다. 본 연구결과는 정적열원하에서의 용접에 대한 해석결과이며, 동적열원하의 해석을 위한 기초로서 수행되었

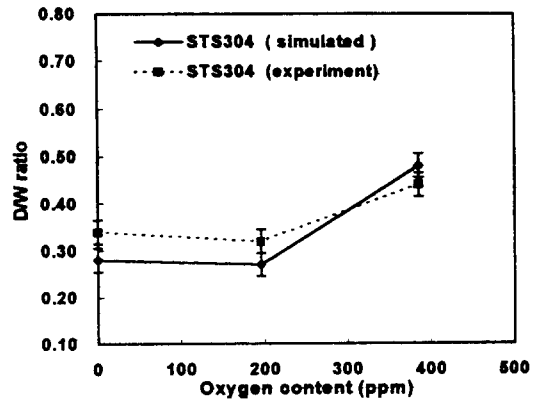


Fig. 18 Comparison of D/W ratio simulated with that of experiment

다. 동적열원하의 해석기술로 발전하기 위해서 동적열원시 용입열량의 처리, 용접속도의 처리, 비정상 상태의 처리 등 여러 수학적 모델링 기술과 알고리즘의 개발이 필요하다. 또한, 400계 스테인리스강의 정확한 물성치의 부족은 보다 정확한 해석결과를 얻기 어렵게 되는데 이러한 온도에 따른 물성치 변화에 대한 기초자료가 400계 스테인리스강의 해석, 동적열원하 해석에 필수적이므로 이에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

6. 결 론

이상과 같은 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 산소 및 알루미늄을 첨가하지 않았을 때 용접전류가 증가할수록, 용접속도가 느릴수록 용입 깊이와 폭이 전체적으로 증가하였고, 용접부의 단면적도 증가하는 경향을 나타내었으며, STS410L은 STS304에 비하여 그 증가폭이 크게 나타났다.

(2) 보호가스내에 산소를 첨가하였을 경우, STS410L과 STS304는 산소량의 증가에 따라 용접부 단면적의 변화량은 없지만 용입비는 산소첨가에 따라 증가하다가 산소의 과포화로 그 이상의 증가는 없었다.

(3) Si함량의 증가에 따라 용융부의 단면적은 일정하였으나, 용입비는 30~800ppm구간에서 두 재

료가 감소하였으며, STS304의 경우가 감소폭이 현저하였다.

(4) O₂ 및 Al의 영향은 304와 410L에 서로 다른 영향을 미치고 304의 경우 O₂ 및 Al 조절에 의해 용접 용입성을 조절 할 수 있으나, 410L의 경우 O₂, Al에 대하여 비교적 민감하지 않으며, 용입성 조절이 필요한 경우 용접조건 변화가 우선되어야 한다.

(5) Austenitic STS304에서 정적열원하의 computer simulation과 실제 용접실험의 결과는 유사한 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 1995년도 포항종합제철주식회사의 연구비 지원으로 수행되었으며 연구가 무사히 완료될 수 있도록 지원해 주신 포항종합제철주식회사의 관계자 여러분에게 깊은 감사를 드립니다.

Nomenclature

f_{den}	buoyancy force,
ρ	density (kg/m ³)
g	gravity (m/s ²)
β	volume expansion coefficient (1/K)
T	temperature (K)
ΔH^0	standard heat of adsorption (J/kg · mole)
R	gas constant
k_1	entropy of segregation
a_i	activity of i
γ_m^0	surface tension at melting point (N/m)
η	arc efficiency
r	radial distance from arc center (m)
r_b	radius of arc (m)
Q	heat input (J/m)
P	pressure (Pa)
ν	kinematic viscosity (m ² /s)
μ	dynamic viscosity (kg/m · s)
J_z	axial current density (A/m ²)
B_θ	azimuthal magnetic field (Wb/m ²)

K	drag coefficient (kg/m ³ s)
α	thermal diffusivity (m ² /s)
f_L	fraction of fluid
C_p	specific heat, J/kg K
A	constant in surface tension coefficient (N/m · K)
Γ_s	surface excess at saturation [1.38 × 10 ⁻⁸ J/(kg · mole) · m ²]

참 고 문 헌

1. W. S. Bennett, G. S. Mills: "GTA Weldability Studies on High Manganese Stainless Steel", *Welding J.*, Dec., 1974, pp. 548s~553s.
2. C. R. Heiple, P. Burgardt: "The Effect of Trace Elements on TIG Weld Penetration", TWI Conference proceeding, 1983, paper 36.
3. C. R. Heiple, J. R. Roper: "Mechanism for Minor Elements Effect on GTA Fusion Zone Geometry", *Welding J.*, Apr., 1982, 97s~102s.
4. J. R. Roper, D. L. Olson: "Capillarity Effects in the GTA Weld Penetration of 21-6-9 Stainless Steel: *Welding J.*, Apr., 1978, 103s~107s.
5. K. C. Mills, B. J. Keene: "Factors Affecting Variables Weld Penetration", *International Materials Reviews*, 1990, vol. 35, no. 4
6. Y. Takeuchi, R. Takagi and T. Shinoda: "Effect of Bismuth on Weld Joint Penetration in Austenitic Stainless Steel", *Welding J.*, Aug., 1992, pp. 283s~289s.
7. C. R. Heiple, J. R. Roper: "Effect of Selenium on GTAW Fusion Zone Geometry", *Welding J.*, Aug., 1981, 143s~145s.
8. R. E. Sundell, H. D. Solomon, S. M. Corrae: "Minor Element Effects on GTA Weld Penetration - Weld Pool Physics", *General Electric Tech*, 1986, 86SRD013.

9. B. Pollard; "The Effects of Minor Elements on the Welding Characteristics of Stainless Steel", *Welding J.*, Sep., 1988, 202s~213s.
10. T. Zacharia, A. H. Eraslan, D. K. Aidun and S. A. David ; "Three-Dimensional Transient Model for Arc Welding Process", *Met. Trans.*, vol. 20B, no. 10, 1989, pp. 645~659
11. P. Sahoo, T. Debroy and M. J. Mcnallan; "Surface Tension of Binary Metal Surface Active Solute Systems under Conditions Relevant to Welding Metallurgy", *Met. Trans.*, vol. 19B, no. 6, 1988, pp. 483~491
12. T. Zacharia, S. A. David, J. M. Vitek and T. Debroy; "Weld Pool Development during GTA and Laser Beam Welding of Type 304 Stainless Steel, Part I -Theoretical Analysis", *Welding J.*, Dec., 1989, pp. 499s~509s
13. T. Zacharia et. al.; "Computational Modeling of Stationary Gas Tungsten Arc Weld Pools and comparison to Stainless Steel 304 Experimental Results", *Met. Trans.*, vol. 22B, no. 4, 1991, pp. 243