

스테인레스강 (Stainless Steel)

자료제공 : LG 건설 이진희 기술사

1. Stainless Steel의 종류

Stainless Steel 이라고 하면 흔히 304, 316등을 연상하게 되고, 실제로 이러한 재질들이 현업에서 가장 많이 사용되는 재질 들이다. 그러나, 이러한 표기는 사실은 정확한 공식적인 재료명의 표기법은 아니다. 각 규격의 명명법에 따라 정확하게 표기한다고 하면, AISIS 304 혹은 UNS S30400 등으로 표기해야 한다.

하지만 여기에서는 자세한 재료의 표기법과 구분을 장황하게 설명하기 보다는 이해를 돕기 위해 그저 많은 사람들이 알고 있는 그대로 304, 316이라고 재료명을 구분하여 설명을 전개하고자 한다.

Stainless Steel은 그 재료의 성분과 조직에 따라 다섯 가지로 크게 구분된다. 각 강종의 조직 구분은 주로 Chromium의 함량과 Nickel 의 유무 및 기타 원소의 함량에 따라 결정이 된다.

각 강종이 보여 주는 물리적, 기계적, 화학적 특성은 조직에 따라 구분이 되며, 이들 조직을 기준으로 다음과 같이 Stainless Steel을 구분 한다.

Table 1 Stainless Steel의 일반적인 구분과 특성

조직 분류	대표 강종	기본 조성	일반적인 주요 특성
Martensite	410 SS	13 Cr	자성이 있고, 녹이 발생 할 수 있다. 충격에 약하고 연신률이 작다. 뛰어난 강도와 내 마모성이 있다. 열처리에 의해 경화된다.
Ferrite	430 SS	18 Cr	자성이 있다. 충격에 약하고 연신률이 작다. 용접구조물로 사용이 제한된다. 열처리에 의해 경화되지 않는다.
Austenite	304 SS 316 SS	18 Cr - 8 Ni	자성이 없고, 뛰어난 내식성이 있다. 충격에 강하고, 연신률이 크다. 열처리에 의해 경화되지 않는다. Cr탄화물이 형성되는 예민화에 의해 고온 사용이 제한된다.
Precipitation Hardening	631 SS	16 Cr - 7 Ni - 1 Al	자성이 없고, 양호한 내식성을 가진다. 열처리후 높은 강도와 경도를 가진다.
Dulpex	SAF 2205 SAF 2507	18 ~ 30 Cr - 4 ~ 6 Ni - 2 ~ 3 Mo	Austenite Stainless Steel 의 단점을 보완한 강종, Ferrite기지위에 Austenite가 50 %정도 공존하는 조직이다. Ferrite보다 양호한 인성, Austenite보다 월등한 기계적 강도가 있다. 열팽창계수가 작고, 열전도도가 높다.

2. Stainless 강의 특성

2.1 STAINLESS강의 종류별 특성

Stainless Steel은 그 합금 성분과 조직의 특성에 따라서 다양한 성질을 나타낸다. 보다 자세한 사항은 각 강종 별 특성편에서 정리하기로 하고, 개략적인 사용상의 특성을 다음 표에 정리한다.

Table 2 Stainless Steel의 종류별 특성

[illegible]

Austenite계	304	18Cr-8Ni	무	⊙	⊙	⊙	⊙	무	⊙	
Precipitation Hardening	631	16 Cr - 7 Ni - 1 Al	무	○	⊙	△		유	△	
Duplex 계	2205 2507	18 ~ 30 Cr -4 ~ 6 Ni -2 ~ 3 Mo	유	⊙	⊙	△	⊙	무	△	

⊙ : 우수, ⊕ : 양호, ○ : 보통, △ : 저하

2.2 STAINLESS강의 성질

2.2.1 물리적 성질

일반적으로 사용되는 Austenite Stainless Steel 을 기준으로 한 대략적인 탄소강과의 비교 하면 다음과 같다.

1. 우선 Stainless Steel 은 높은 전기 비저항으로 용접시 발열이 심하고(탄소강의 약 3배)
2. 저항이 큰 만큼 열전도율도 떨어지고 따라서 냉각속도가 느려진다(탄소강의 1/3정도)
3. 또한, 열팽창계수가 커서 변형이 심하게 된다. 변형을 최소화 하기 위해서는 가급적 낮은 전류를 사용하는 것이 좋다. 통상적으로 일반 연강 용접시 보다 10% 전류를 낮추어 용접하는 것을 추천한다.

Table 3 대표적인 Stainless Steel의 물리적 성질

강종 구분		물리적 성질					
Type	UNS No.	비중 (mg/cm ³)	열전도도(W/m-K)		비열 (J/Kg-K) at 0 ~ 100℃	전기비저항 (μΩ-cm)	용점 (℃)
			100℃	500℃			
201	S20100	7.8	16.2	21.5	500	69	1400 ~ 1450
202	S20200	7.8	16.2	21.5	500	69	1400 ~ 1450
205	S20500	7.8			500		
301	S30100	8.0	16.3	21.5	503	72	1400 ~ 1420
302	S30200	8.0	16.2	21.5	500	72	1400 ~ 1420
302B	S30215	8.0	15.9	21.6	500	72	1375 ~ 1400
303	S30300	8.0	16.2	21.5	500	72	1400 ~ 1420
304	S30400	8.0	16.3	21.5	502	72	1400 ~ 1450
304L	S30403	8.0			500	72	1400 ~ 1450
S30430	S30430	8.0	11.2	21.5	500	72	1400 ~ 1450
304N	S30451	8.0			500	72	1400 ~ 1450
305	S30500	8.0	16.2	21.5	503	72	1400 ~ 1450
308	S30800	8.0	15.2	21.6	500	72	1400 ~ 1420
309	S30900	8.0	15.6	18.7	500	78	1400 ~ 1450
310	S31000	8.0	14.2	18.7	500	78	1400 ~ 1450
314	S31400	7.8	17.5	20.9	500	77	
316	S31600	8.0	16.2	21.6	502	74	1375 ~ 1400
316L	S31603	8.0					1375 ~ 1400
316N	S31651	8.0			500	74	1375 ~ 1400
317	S31700	8.0	16.2	21.5	500	74	1375 ~ 1400

[illegible]

[illegible]

S44700		80	550	60	415	20.0	223	20 ^A	180
S44735		80	550	60	415	18.0	255	25 ^A	180
S44800		80	550	60	415	20.0	223	20 ^A	180
S46800		60	415	30	205	22		90	180

Note A : Rockwell C Scale의 측정값.

2.2.3 고온 특성

(1) Martensite계

- 가공성 용이
- 일반 탄소강과 비슷한 양상의 기계적 특성을 나타내므로 고온 가공이 용이하다.
- 소입 경화 : 급냉에 의해 경화될 수 있으므로 용접과 열처리시에 주의를 요한다.

(2) Ferrite 계

- C, N, Ni의 양을 낮추고, Al, Ti 첨가하면, 약간의 Cr 양으로도 Ferrite계가 될 수 있음.
- Martensite계보다 내식성 우수
- 500~600℃ 이상에서 기계적 성질이 급격히 저하(σ상 석출 취하)
- 900℃ 이상 장기간 가열하면 결정립 조대화로 인성, 연성이 떨어짐
- 고 Cr Ferrite계 Stainless강은 고온으로 가열하면 475℃ 취화, σ상취화, 고온 취화등의 현상이 나타남.

(3) Austenite계

- 600℃ 이상 고온에서 Stainless강중 가장 우수한 강도를 가진다.
- 그러나, 고온에서 탄화물 형성에 의한 예민화 현상으로 사용에 주의를 요한다.
- SUS 304L, SUS 316L등의 탄소 함량 0.03% 이하의 저 탄소강재는 고온에서 허용 강도의 저하로 인하여 420℃ 이상의 고온 사용이 제한된다. (ASME Sec. II Part D, ASME Sec. VIII Div. 1)
- SUS 304에 Mo, Nb, Ti을 첨가시킨 SUS 316, SUS 321등은 SUS 304보다 고온 인장 강도를 가짐.

(4) Duplex 계

- Austenite와 Ferrite의 특징을 모두 가지고 있다.
- Austenite에 비해 두배 이상의 강도를 가지고 있다.
- 300℃ 이상에서는 Ferrite조직의 분해가 일어나서 취성이 발생한다.
- 통상적으로 200℃ 미만의 온도에서 사용한다.

2.2.4 저온 특성

(1) Martensitic & Ferritic 계

Martensite Stainless과 Ferritic Stainless Steel은 저온 취성을 일으키므로 저온 재료에 사용되지 않는다.

(2) Austenite 계

Austenite계는 저온 취성을 일으키지 않으며, 저온 인성이 좋아 저온용 용접 구조물용 재료로 널리 사용된다.

(3) Duplex 계

-60℃ 이하에서는 충격치가 급소하게 감소한다. 통상 사용온도는 -50 ~ 200℃ 정도로 제한된다.

2.2.5 야금학적 성질

Table 5 Stainless Steel 야금학적 성질

강 종	AISI	475℃ 취화 (400~500℃)	입계 탄화물 석출 (500~800℃)	σ상석출 (600~1,000℃)	결정립 조대화 (1,150℃ 이상)
Ferrite계	430	○	-	-	○
Austenite계	304	-	○	○	-
	316	-	○	○	-
	321	-	- *	○	-
	347	-	- *	○	-

○ : 취화함, - : 취화하지 않음, * : 열처리조건에 따라 취화함.

(1) 475℃ 취화

Cr 16% 이상의 고 Cr강인 Ferrite계 Stainless Steel을 400~600℃ 범위에서 장기간 가열하던가 이 온도 구역 내에서 서냉할 경우 나타나는 현상이다. Cr 함량이 높을수록 이런 현상이 잘 발생한다.

475℃ 취화가 발생하면, 인장강도와 경도는 높아지고 연성과 인성은 낮아지며 내식성은 떨어진다. 한번 취화된 것을 600℃ 이상 단기간 재가열하여 공냉 시키면 일종의 소둔 처리로 인성이 회복된다. 단, Ti, Nb의 첨가는 475℃ 취화를 촉진시킨다.

(2) 입계 탄화물 석출

Austenite계 Stainless강은 500~800℃로 장기간 가열하던가 이 온도 범위내에서 서냉하면 결정입계에 Cr탄화물 (Cr₂₃C₆)이 석출하여 이 부근의 Cr의 농도가 낮아져 Stainless의 특성을 잃게 되어 300계열의 강종에서 흔히 언급되는 입계 부식되기 쉽다. 이를 방지하기 위해 C함량을 0.03이하로 낮추던가 Nb나 Ti을 첨가시켜 Cr 탄화물 대신 Nb 탄화물이나 Ti 탄화물을 석출시켜 C를 안정화시킨다.

(3) σ상석출

고 Cr (20%이상) Ferrite계 Stainless강은 540~900℃, Austenite계 Stainless강은 600~800℃ 장기간 가열하면 σ상인 Fe-Cr 화합물이

석출하게 되는데 이 조직은 극히 단단하고 취성을 나타낸다.
Si, Al, Nb, Ti 혹은 Mo의 첨가로 σ 상 석출을 촉진시킨다.
한번 형성된 σ 상은 930~980℃로 가열한 후 급냉하면 소실된다.

(4) 고온 취성 (결정립 조대화)

고 Ferrite계 Stainless강을 1,150℃ 이상으로 가열시켜 급냉될 때 생기는 취성이다. 즉 고온에서 결정립의 조대화가 일어나기 때문에 상온에서 극히 취화하게 된다.
800℃ 전후에서 소둔(Annealing)하면 얼마간 회복된다.

3. Stainless Steel의 강종별 특성

이하에서는 위에 열거한 Stainless Steel의 강종 구분에 따른 개략적인 특성과 용접봉의 선택 및 용접시 주의점에 대해 정리한다

3.1 Ferritic Stainless Steel

Ferritic Stainless Steel은 Ni을 함유하지 않은 저탄소 고Cr 강으로서 고온에서도 상온 때와 같이 Ferrite가 안정상이며, 고온에서 급냉하여도 소입경화등이 없고 단지 냉간가공에 의해서 약간 경화되고 자성을 띤다. Stainless Steel로 구분되기는 하지만, 실외에서는 약간의 녹이 발생하는 문제점이 있다.
탄소량이 많아지면, 고온에서 Austenite 상이 형성되고, 급냉에 의해 Martensite로 변태하는 경우도 있다, 따라서, 탄소함량이 커지면 소입경화능이 생기므로 탄소의 함량을 0.12%이하로 제한하고 있다.
일반부식에 강하고, 고온에서의 산화가 적으며, S부식과 H₂S및 Chloride분위기에서의 저항성이 크고, 열처리에 의해 경화되지 않는 특성이 있다.
Column의 Strip Lining등으로 일부 이용되기도 하며, 용접시에 경화성이 없으므로 예열 및 후열 처리가 불 필요하다.
최대 사용온도는 475℃(885°F)에서의 Embrittlement로 인해 343℃(650°F)정도로 제한된다.

Table 6 Ferrite계 Stainless Steel 의 화학성분

AISI 명	화학 성분 (Max. Wt. %)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	기타
405	0.08	1.0	1.0	0.04	0.03	11.5 ~ 14.5		Al : 0.1 ~ 0.3
429	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03	14.0 ~ 16.0		
430	0.12	0.75	1.0	0.04	0.03	16.0 ~ 18.0		
430F	0.12	1.0	1.25	0.06	0.15	16.0 ~ 18.0	0.6	
430FSe	0.12	1.0	1.25	0.06	0.06	16.0 ~ 18.0		Se : 0.15% 이상
434	0.12	1.0	1.0	0.04	0.03	16.0 ~ 18.0	0.75 ~ 1.25	
442	0.2	1.0	1.0	0.04	0.03	18.0 ~ 23.0		
446	0.2	1.0	1.5	0.04	0.03	23.0 ~ 27.0		N : 0.25

Note : KS와 JIS에서는 최대 0.6% 까지의 Ni 함유를 허용한다.

Table 7 Ferrite계 Stainless Steel의 특징과 용도

AISI 명	주요 특징과 용도
405	Al이 함유되어 용접후 자경성이 감소한다. Turbine Blade, 용접용 재료로 사용된다. 냉동 공업, 의학, 화학공업등에 사용된다.
429	430의 용접성을 개량한 강종이다. 그외는 430과 동일하다.
430	대표적인 Ferrite계 Stainless Steel이다. 압연이 용이하고, 가격이 저렴하다. 방열기, 자동차 부품, 화학설비등에 사용된다.
430F	430의 절삭성을 개량한 강종이다. 단조성이 좋고, 자동 선반용 재료로 사용된다.
430FSe	
434	430의 개량 강종으로 염분에 강하다 자동차 외장용으로 사용된다.
442	내식성은 430과 동일한 수준이다. 고온용 재료로 사용된다.

446	내산화성이 가장 우수하다. S가 함유된 분위기에 사용된다. N은 결정립 성장을 방지한다. 고온용, 화학 공업용, 입욕 전극봉의 재료로 사용된다.
-----	---

용접시 HAZ(열영향부)부의 조직이 조대화되고, 인성이 급격히 저하하며, 550 ~ 850℃ 사이에서 Fe-Cr의 금속간 화합물이 생겨 취성이 발생하므로 용접 구조물로는 사용이 제한된다. 주로 사용되는 용접봉은 E309계열의 용접봉이 사용되고 열처리가 요구될 때는 E430 or Ni-Cr-Fe계의 용접봉을 사용한다. E309로 용접한 구조물은 260℃(500°F)이상에서 사용하면 모재와의 thermal Expansion 차이로 인해 높은 Stress가 발생하므로 E309의 최대 사용온도는 이보다 하향으로 제한된다.

현업에서 자주 사용되는 410S SS는 Martensitic Stainless Steel인 410 SS에서 Carbon이 0.08%이하로 규제되고, Ni이 최대 0.60%로 제한된 강종이다. Carbon 함량이 작아서 양호한 용접성을 가지고 있다.
ASME Code에서는 410S SS를 Ferritic Stainless Steel로 구분하여 P No.7으로 관리하지만, 실제로는 P No. 6번인 Martensitic Steel로 구분하는 것이 타당한 재료이다.

3.2 Martensitic Stainless Steel

Martensitic Stainless Steel은 Ferritic Stainless Steel과 매우 유사한 특성을 보이지만 가장 큰 차이점은 열처리에 의해 경화된다는 점이다. Martensite계 Stainless Steel은 소입(Quenching)에 의해 고온에서 안정한 Austenite가 Martensite로 변태하여 경화되며, Ferrite와 마찬가지로 자성을 가진다.
Stainless강종중에 유일하게 열에 의해 경화되는 특징이 있다.

Table 8 Martensite계 Stainless Steel의 화학성분

AISI 명	화학 성분 (Max. Wt. %)								
403	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	기타
403	0.15	0.5	1.0	0.04	0.03		11.5 ~ 13		
410	0.15	1.0	1.0	0.04	0.03		11.5 ~ 13		
414	0.15	1.0	1.0	0.04	0.03	1.25 ~ 2.5	11.5 ~ 13.5		
416	0.15	1.0	1.25	0.06	0.15		12 ~ 14	0.6	
416Se	0.15	1.0	1.25	0.06	0.06		12 ~ 14		Se : 0.15 이상
420	0.15 이상	1.0	1.0	0.04	0.03		12 ~ 14		
420F	0.15 이상	1.0	1.25	0.06	0.15	0.6	12 ~ 14	0.06	
431	0.2	1.0	1.0	0.04	0.03	1.25 ~ 2.5	15 ~ 17		
440A	0.6 ~ 0.75	1.0	1.0	0.04	0.03		16 ~ 18	0.75	
440B	0.75 ~ 0.95	1.0	1.0	0.04	0.03		16 ~ 18	0.75	
440C	0.95 ~ 1.2	1.0	1.0	0.04	0.03		16 ~ 18	0.75	

410 / 410S로 대표되는 이 재질은 Ferritic Stainless Steel과 마찬가지로 고온에서의 산화가 적으며, S부식과 H₂S및 Chloride분위기에서의 저항성이 커서 VCM, PVC등의 Process에 많이 사용된다.
Solid상태 보다는 Column의 Strip Lining or Cladding재료로 주로 사용되며, Low Carbon Grade로 용접성이 좋은 410S SS가 주로 사용된다. 높은 강도와 내 마모성을 가지고 있어서, Valve의 Disk나 Seat Ring의 본 재료 혹은 Weld Overlay용으로 사용되기도 한다.
인성이 작고, 강한 인장 응력이 있으나, Elongation이 작아서 충격에 쉽게 파단된다. 이러한 이유로 ‘95년도 ASME Code에서는 Stainless Steel중 유일하게 Impact Test 를 요구하였으나, 이후 Addenda에서는 이 규정이 삭제 되었다. 440 ~ 450℃에서는 탄화물이 석출하여 충격 치가 급격히 감소하므로 사용이 제한된다. 통상 상용 온도는 -29 ~ 440℃정도 이다.
내식성은 소입 상태가 가장 좋고, 소입후 Tempering시는 저온에서 하는 것이 좋다. 500 ~ 650℃에서 가열하면 미립의 탄화물이 석출하여 기지의 고용 Cr량이 감소되어 내식성이 떨어진다. 650℃ 이상에서는 Cr의 재고용으로 내식성이 다시 향상된다.
저 탄소강인 13% 및 16%Cr강과 2%의 Ni이 함유된 431강종은 내식 구조용으로 사용되고, 고탄소계의 440등은 내 마모용으로 사용된다.

Table 9 Martensite계 Stainless Steel 의 특징과 용도

AISI 명	주요 특징과 용도
403	자경성이 있다. Turbine Blade, Valve, Jet Engine 등의 높은 응력이 요구되는 곳에 사용된다.
410	높은 경도를 나타낸다. 내식성이 우수하다.

	Valve Seat, Shaft등의 일반 기계 부품으로 사용된다.
414	410 보다 고강도 용으로 사용된다. 410의 성형성, 내식성을 향상시킨 강이다. Ni의 첨가로 인성이 좋고 내식성도 우수한다. Shaft, Knife, Spring등으로 사용된다.
416	Stainless Steel중에 기계 가공성이 가장 우수하다. 괘삭강으로 Valve, Shaft, Bolt, Nut등으로 사용된다.
416Se	416의 절삭성을 더욱 향상 시킨 강이다. 절삭성은 좋지만, 기계 가공성은 떨어진다.
420	열처리에 의해 높은 경도를 얻을 수 있다. 내식성 양호하다. Knife, 외과용 기구 등에 사용된다.
420F	급냉시 420 보다 더 높은 경도를 얻을 수 있다. Bolt, Nut, Valve 의 재료로 사용된다.
431	Ni의 첨가로 인성이 개량된 강종이다. Martensite Stainless Steel중에 최고의 내식성을 가진다. 선박용 Shaft, 제지 기계, Spring, Bearing등으로 사용된다.
440A	Stainless Steel 중에 최고의 경도를 나타낸다. A, B, C 순으로 내 마모성이 증가하지만, 내식성과 인성은 감소한다. Valve Seat, Knife, 외과용 기구, 절단기, Bearing등에 사용된다.
440B	
440C	

가장 많이 사용되는 410S는 용접조건이 부적절하면 경화가 극심하고, HAZ부(열영향부)가 조대화되며, 조직과 내부응력의 불균일화(잔류응력)로 인해 Operation중에 Stress Corrosion Cracking이나 Delayed Hydrogen Cracking이 발생하기 쉽다. 용접은 주로 E309 or Ni-Cr-Fe계와 E410의 용접봉으로 실시한다.

E309 or Ni-Cr-Fe로 용접하면 ASME Sec.VIII UHA-32에 따라 열처리를 면제 받을 수 있는 방법이 있으나, E410으로 용접하면 두께에 무관하게 용접 후 열처리를 실시해야 한다.

Martensitic Stainless Steel은 Chloride분위기에 강하지만 Austenitic Stainless Steel용접봉으로 용접할 경우에는 Chloride에 약한 Austenitic Stainless Steel의 특성으로 인해 강한 Chloride분위기에 적용될 경우에는 E410용접봉의 사용이 요구된다. 용접시에는 예열이 반드시 필요하고, 후열은 모재의 두께와 사용되는 용접봉의 종류 및 예열조건에 따라 결정된다. 자세한 사항은 ASME Sec.VIII UHA-32에 따라 시행한다.

사용되는 용접재료 마다 예열, 후열조건과 적용되는 특성이 다소 다르다. 일본 Kobe용접봉을 기준으로 분류한 개략적인 Chemical Composition과 용접 적용 방법은 다음의 Table 10과 같다.

표기에 나타난 용접봉 종류의 309 SS, 410 SS, Ni-Cr-Fe는 편의상 재료의 분류를 한 것으로, 정확한 표기는 ASME Sec II Part C에 따라 SFA No.와 함께 E/ ER 309등으로 표기하여야 하지만 여러분의 이해를 돕기 위해 편의상 용접봉의 호칭으로 구분하였다.

위에서 제기한 용접부의 Stress Corrosion Cracking이나 Delayed Hydrogen Cracking의 위험성을 방지하기 위해 Carbon을 0.1%이하로 줄이고, Nickel 4%와 Molybdenum 0.5%를 추가한 F6NM, CA6NM등의 대체 사용도 추천된다.

다음의 내용은 410 / 410S SS를 기준으로 적용되는 용접봉의 종류와 사용기준을 제시한 것이다.

적용되는 용접 조건은 용접봉 Maker마다 조금씩 다를 수 있으나, 큰 차이는 없으므로 Kobe 용접봉을 기준으로 한 다음의 분류를 그대로 수용해도 무방하다.

Table 10 용접봉의 Chemical Composition (Kobe용접봉 기준)

용접봉 종류		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	others	AWS No.
309 SS	NC-39	0.08	0.45	1.61	0.021	0.003	12.51	23.87	-	-	A5.4 E309-16
	NCA-309	0.06	0.23	1.45	0.023	0.004	13.09	24.01	-	-	
	HIMELT-309	0.07	0.26	1.09	0.018	0.004	12.41	23.91	-	-	
410 SS	CR-40	0.08	0.37	0.29	0.020	0.003	-	13.37	-	-	A5.4 E410-16
	CR-40Cb	0.08	0.37	0.43	0.018	0.003	-	13.37	0.77	Al,Ti	
Ni-Cr-Fe	Nic-70A	0.05	0.25	3.14	0.006	0.005	70.66	14.46	2.17	Fe:9.24 Co: 0.03	A5.11 ENiCrFe-1 * 1
	NIC-703D	0.06	0.34	6.55	0.004	0.003	69.40	13.90	1.80	Fe:7.90 Ti:0.01	A5.11 ENiCrFe-3

SAW : Inconel Filler Metal 82

용접봉 종류		적용 용도 및 특성
309 SS	NC-39 NCA-309	22%Cr-12%Ni의 309S SS의 용접에 적용되며, carbon steel이나 low alloy 등의 이종 금속의 용접에 주로 사용된다.
	HIMELT-309	Lime-titania계 용접봉으로 고(高)전류에서 고(高)능률의 용접을 시행할 수 있다. Ferrite를 포함한 Austenitic structure의 용접금속으로 좋은 용접성과 내 부식성, 고온 특성을 나타낸다. 합금원소의 양이 많고 안정된 Austenitic structure를 만들기 때문에, 이종 용접시 Carbon steel이나 low alloy steel의 dilution이 우려되는 용접 조건에 적용하기 알맞다. 다른 Stainless Steel과 마찬가지로 Chloride에 약한 단점을 보이므로 Chloride분위기에서 내식성이 요구되는 곳에는 사용이 제한 된다. 38t 미만의 410SS 모재에서 232℃ 이상으로 예열하고 용접중 이 온도의 예열 상태로 총간 온도를 (Interpass Temperature) 유지하면 용접시 후열처리(PWHT) 조항이 면제된다. (ASME SEC VIII UHA -32.)
410 SS	CR-40	403, 410, 420J1/J2 SS의 용접과 부식 분위기에서의 Hard surfacing용으로 사용된다. Self-hardening 특성을 가진 Ferrite를 포함한 Martensitic structure로 Cavitation에 좋은 특성을 보인다. 후열처리 (PWHT) 가 반드시 요구된다. (ASME SEC VIII UHA -32.)
	CR-40Cb	403, 405, 410 SS와 405 SS Clad 용접에 적용된다. Al,Ti, Nb를 적당히 포함하고 있어서 Ferrite structure를 Fine Grain으로 만든다. 비교적 양호한 Ductility, Notch toughness와 뛰어난 용접성을 나타낸다. Self-hardening특성이 없고 내마모성은 작다. 후열처리가(PWHT) 반드시 요구된다. (ASME SEC VIII UHA -32.)
Ni-Cr-Fe	Nic-70A	Lime계의 교류 용접봉으로, Inconel용접과 Inconel to low alloy, stainless steel to low alloy의 이종 금속간의 용접에 사용된다. 용접성이 좋고, 우수한 기계적 특성, 내 부식성 및 고온 특성을 나타낸다. 38t 미만의 410SS 모재에서 232℃ 이상으로 예열 하고 용접중 이 온도의 예열 상태로 총간 온도를 (Interpass Temperature) 유지하면 용접시 후열처리(PWHT) 조항이 면제된다. (ASME SEC VIII UHA -32.)
	NIC-703D	Lime계의 직류 용접봉으로 Inconel용접과 Inconel to low alloy, stainless steel to low alloy의 이종 금속간의 용접에 사용된다. 용접성이 좋고, 우수한 기계적 특성, 내 부식성 및 고온 특성을 나타낸다. 38t 미만의 410SS 모재에서 232℃ 이상으로 예열 하고 용접중 이 온도의 예열 상태로 총간 온도를 (Interpass Temperature) 유지하면 용접시 후열처리(PWHT) 조항이 면제된다. (ASME SEC VIII

3.3 Austenitic Stainless Steel

Austenitic Stainless Steel은 가장 널리 사용되는 Stainless Steel 재료로 304 / 316 SS가 대표적인 강종이다.

고온 산화성이 적고, 뛰어난 내식성으로 인해 산, 알칼리등의 광범위한 부식환경에 적절하게 사용이 가능하다. 전반적으로 양호한 내식성을 보이지만 Chloride성분이 있는 곳에서의 사용은 Chloride Stress Corrosion Cracking의 위험성으로 인해 제한된다. 적절한 강도를 가지면서도 연신이 크고, 충격에 강하며 성형성이 좋아 가공하기 쉽다. 아래 표에 Austenite계 Stainless Steel의 강종별 개략적인 특징과 용도를 제시한다.

대부분의 경우에 저온 충격시험(Impact Test)은 요구되지 않는다.

425 ~ 870℃ 영역에서 장시간 유지시에는 입계에 Cr탄화물이 형성되어 내식성이 저하되고 기계적 강도도 감소한다. 따라서 이 온도 영역에서의 사용은 극히 제한된다. Cr탄화물에 의한 예민화 현상을 억제하기 위해 Carbon의 함량을 0.03%이하로 줄인 304L / 316L등의 Low Grade를 사용하거나, Chromium보다 Carbon과의 친화력이 좋은 Ti이나 Nb(Cb)를 첨가하여 Cr탄화물의 생성을 억제한 321 SS, 347 SS를 사용한다.

Table 13 Austenite계 Stainless Steel의 화학 성분

AISI명	화학 성분 (Max. Wt. %)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	기타
301	0.15	1.0	2.0	0.04	0.03	6 ~ 8	16 ~ 18		
302	0.15	1.0	2.0	0.04	0.03	8 ~ 10	17 ~ 19		
302B	0.15	2 ~ 3	2.0	0.045	0.03	8 ~ 10	17 ~ 19		
303	0.15	1.0	2.0	0.2	0.15	8 ~ 10	17 ~ 19	(1)	
303Se	0.15	1.0	2.0	0.2	0.03	8 ~ 10	17 ~ 19		
304	0.08	1.0	2.0	0.04	0.03	8 ~ 10.5	18 ~ 20		
304L	0.03	1.0	2.0	0.04	0.03	9 ~ 13	18 ~ 20		
305	0.12	1.0	2.0	0.04	0.03	10.5 ~ 13	17 ~ 19		
308	0.08	1.0	2.0	0.04	0.03	10 ~ 12	19 ~ 21		
309	0.2	1.0	2.0	0.045	0.03	12 ~ 15	22 ~ 24		
309S	0.08	1.0	2.0	0.04	0.03	12 ~ 15	22 ~ 24		
310	0.25	1.5	2.0	0.045	0.03	19 ~ 22	24 ~ 26		
310S	0.08	1.5	2.0	0.04	0.03	19 ~ 22	24 ~ 26		
314	0.25	1.5 ~ 3.0	2.0	0.04	0.03	19 ~ 22	23 ~ 26		
316	0.08	1.0	2.0	0.04	0.03	10 ~ 14	16 ~ 18	2 ~ 3	
316L	0.03	1.0	2.0	0.045	0.03	10 ~ 14	16 ~ 18	2 ~ 3	
317	0.08	1.0	2.0	0.04	0.03	11 ~ 15	18 ~ 20	3 ~ 4	
321	0.08	1.0	2.0	0.04	0.03	9 ~ 13	17 ~ 19		Ti ≥ 5XC%
347	0.08	1.0	2.0	0.045	0.03	9 ~ 13	17 ~ 19		Nb + Ta ≥ 10XC%
348	0.08	1.0	2.0	0.045	0.03	9 ~ 13	17 ~ 19		Co : 0.2 Nb + Ta ≥ 10XC% 단, Ta ≤ 0.1
384	0.08	1.0	2.0	0.04	0.03	17 ~ 19	15 ~ 17		
385	0.08	1.0	2.0	0.04	0.03	14 ~ 16	11.5 ~ 13.5		
201	0.15	1.0	5.5 ~ 7.5	0.06	0.03	3.5 ~ 5.5	16 ~ 18		N ≤ 0.25
202	0.15	1.0	7.5 ~ 10	0.06	0.03	4 ~ 6	17 ~ 19		N ≤ 0.25

Note : (1) Mo는 0.6% 까지 함유할 수 있다.

Table 14. Austenite계 Stainless Steel의 강종별 개략적인 특징과 용도

AISI명	주요 특징 및 용도
301	304에 비해 Ni과 Cr함량이 적고, N 성분이 많다 조질압연에 의해 불안정한 Austenite가 Martensite로 바뀌어 강도가 향상된다. 탄소강이나 Aluminum에 비해 뛰어난 고온 강도, 피로 강도를 가진다. 우수한 내식성이 있다. 가격이 경제적이다. 302보다 가공 경화성이 크고 경량이다. 내식성은 302보다 저하한다. 철도 차량, 항공기 구조재, 운수설비 등에 사용된다.
302	가공이 용이하다 입계 부식이 일어나므로 용접용은 부적합 건축자재, 주방용품 및 식품 제조 설비에 사용된다.
302B	302에 Si를 첨가하여 가열시 침탄 및 산화 방지효과가 있다. 다른 특징은 302와 동일하다.
303	S, P를 함유하여 302의 절삭성을 개선한 강이다. S의 적열 취성은 막기 위해 Mo를 첨가한 강이다. Bolt, Nut, Valve등의 재료로 사용된다.
303Se	302에 Se를 첨가한 강으로 쾌삭강이다.
304	Austenite Stainless Steel의 대표적인 강이다. 용접성이 우수하고, 내식성이 우수하다. 내열성이 우수하고, 저온 강도가 좋다. 우수한 기계적 성질을 나타내고 비자성이다. 열처리에 의해 경화하지 않는다. 열교환기, 수송용기, 식품 용기 등에 사용된다.
304L	304의 탄소를 0.03%이하로 제한한 강종이다. 탄소가 적어서 입계부식을 방지한다. 원자력 기기등에 사용된다.
305	304에 Ni양을 증가하여 가공 경화성이 적다. 냉간 성형이 쉽다. 성형, Spring재료, 식품 용기로 사용된다.
308	Cr과 Ni의 함량이 증가하여 내식성, 내산화성이 좋다. 용접봉 및 전극용으로 사용된다.
309	고온 내산화성이 우수하다. 304 보다 내식성 양호 탄소강등 이종 금속의 용접에 적용된다. 용접봉 및 열처리 설비에 사용된다.
309S	309의 저 탄소강으로 용접성이 우수하다. 높은 내산화성이 요구되는 곳에 사용된다. 열처리 설비, 노 부품등에 사용된다.
310	309보다 내인성이 양호하다. 내열성이 우수한 고온용 강종이다.
310S	내산화성이 310보다 더 우수한 강종이다. 1030℃ 까지 사용가능하다. 열처리용 부품에 사용된다.
314	310에 Si를 첨가하여 내산화성을 증대한 강이다. 내인성이 가장 좋다. 내침탄성이 있다. 열처리용 부품에 사용된다.
316	304에 Mo 성분이 추가되어 Pitting저항성이 좋다. 우수한 내식성이 있다. 고온의 Creep강도가 우수하다. 해수, 제지공업 및 화학공업 장치용으로 사용된다.
316L	316의 탄소를 0.03%이하로 제한한 강종이다. 탄소가 적어서 입계부식을 방지한다.

	Pitting저항성이 316 보다 우수하다.
317	Pitting저항성이 316 보다 우수하다. 입계부식에 대한 저항성이 좋다. 염색설비재 등에 사용된다.
321	Ti을 첨가하여 입계 부식의 원인인 Cr 탄화물의 형성을 방지한 강이다. 입계 부식에 의한 피해가 예상되는 용접부에 사용된다.
347	Nb(Cb)를 첨가하여 입계 부식의 원인인 Cr 탄화물의 형성을 방지한 강이다. 입계 부식에 의한 피해가 예상되는 용접부에 사용된다.
348	대부분 347과 동일하다. 중성자 흡수계수가 작아 원자력용 기기에 사용된다.
384	305보다 가공 경화성이 낮다. 냉간 압연, 성형용으로 사용된다.
385	305와 384의 중간 정도의 냉간 가공성을 가진다.
201	301, 302의 Ni 함량을 낮게 제어한 강이다. 기계적 성질은 301, 302와 유사하다. 냉간 가공에 의해 항복점이 300계 보다 40% 정도 높아진다. 650℃ 까지는 고온성질도 더욱 좋으나 800℃ 이상에선 산화에 의해 나빠진다. 용도는 300계와 동일하다.
202	

Austenite계 Stainless Steel 은 용접성이 매우 양호한 재료로서, 용접으로 인해 경화되지 않으므로 예열과 후열의 필요성이 없다. 다만, 열팽창이 크고, 용접시에 변형이 크며, 입계예민화에 의해 입계부식이 우려될 수 있으므로 주의를 요한다. 사용되는 용접봉은 모재와 동일 강종인 Austenite계열의 용접봉과 함께 흔히 Ni-Cr-Fe / Ni-Cr-Mo계열의 용접봉이 사용될 수 있다. Ni계 용접봉이 사용되는 경우는 주로 이종 금속과의 용접이나 특별히 용접부의 부식성이 우려될 경우 및 고온용으로 사용할 경우에 사용되며, 용접성은 매우 좋지만 가격이 비싸기 때문에 널리 사용되기 에는 무리가 따른다. 용접시에 특별히 주의할 조건은 거의 없지만, 용접중 발생할 수 있는 예민화 현상을 방지 하기 위해서 층간 온도를 Max. 180 ~ 200℃ 정도로 제한하는 것이 좋다.

3.3.1 Ferrite의 의미

Austenite Stainless Steel의 용접과정에서 가장 많이 언급되는 항목 두가지를 고른다면, 입계 부식과 Ferrite이다. 용접 금속내 Ferrite의 의미와 중요성에 대해 논하기 전에 먼저 Stainless Steel 용접금속의 응고 과정의 조직 변화를 알아 본다. Stainless Steel용접부는 응고 과정에서 Austenite, Austenite-Ferrite, Ferrite-Austenite, Ferrite의 조직 변화를 겪게 된다. Austenite : 응고 초기부터 Austenite 조직이 형성되고 발달하여 상온 까지 완전한 Austenite 조직만이 유지 된다. 이후 다시 고온으로 가열하여도 조직의 변화가 없게 된다. Austenite-Ferrite : 응고 초기에 Austenite 조직이 형성되고, Austenite의 Dendrite 조직사이에 Austenite로 포함되지 않은 용탕에서 Ferrite 조직이 형성된다. Ferrite-Austenite : 응고 초기에 Ferrite 조직이 형성되고, 응고가 진행되면서 Ferrite Dendrite 사이에 Austenite가 형성되고 발달하여 극히 소량의 Ferrite 조직만이 남고 전체적으로 상온에서 Austenite조직이 된다. Ferrite : 응고 초기에 형성된 Ferrite 조직이 상온까지 내려오면서 발달한다. 다음 표는 Austenite 조직과 Ferrite 조직이 용접과정에서 Slag를 형성하게 되는 합금 원소들의 고용도를 표시한다.

Table 15 금속 조직에 따른 합금원소의 고용도

합금원소	합금 원소의 고용도(Solubility, %)	
	Ferrite조직의 고용도	Austenite 조직의 고용도
Ca	0.024	0.016
Si	10.9	1.9
Al	30	0.95
Ti	8.7	Max. 1
Zr	11.7	Max. 1

위 표에 제시된 바와 같이 각종 합금 원소의 고용도는 Austenite에 비해 Ferrite 조직이 훨씬 크다. Austenite 조직과 Ferrite 조직의 형성은 Stainless Steel의 주요 원소인 Cr과 Ni의 함량에 따라 결정된다. Cr 및 Cr계열의 원소들은 Ferrite 조직을 활성화 시키는 원소로서 Ferrite Former로 구분되며, Ni 및 Ni 계열의 원소들은 Austenite조직을 활성화 시키는 원소로서 Austenite Former로 구분된다. 이러한 경향은 금속 조직의 합금 성분에 의한 조직 판별을 위해 많이 사용되며, 이를 공식화한 사람이 Hammer and Svensson으로 각각 다음과 같은 식에 Cr 당량(Equivalent)과 Ni 당량(Equivalent)으로 계산한다.

$$Cr_{eq} = Cr + 1.37 Mo + 1.5 Si + 2 Nb + 3 Ti$$

$$Ni_{eq} = Ni + 0.31 Mn + 22 C + 14.2 N + Cu$$

위 계산식에서 각 원소의 함량은 중량비(Weight percent)로 계산한다. 위 계산식에 의해 구해진 Cr eq / Ni eq의 비율에 의해 응고후 금속 조직을 대략적으로 구분할 수 있다.

Cr eq / Ni eq < 1.5 → Austenite-Ferrite 응고 조직
 1.5 ≤ Cr eq / Ni eq ≤ 2.0 → Ferrite-Austenite 응고 조직
 Cr eq / Ni eq > 2.0 → Ferrite 응고 조직

Cr eq / Ni eq의 비가 클수록 Ferrite의 형성이 촉진된다. 응고 초기에 형성된 미량의 δ-ferrite는 Austenite Stainless Steel의 용접시에 고온 균열을 예방하는 장점이 있다. 이러한 특성은 금속간에 저융점 개재물을 만드는 Sulfur, Phosphorous 등의 저융점 원소의 고용도가 높아서 고온에서 균열을 예방하는 것이다. Austenite Stainless Steel의 용접부는 Hot Crack을 방지하기 위해 3 ~ 11 Ferrite Number를 함유해야 한다.

그러나, Ferrite조직은 금속의 내식성을 저하하는 단점이 있다. 특히 Pitting에 저항성을 저하하고 Ferrite조직이 우선적으로 Pitting의 피해를 입게 된다.

이러한 이유로 내식성 분위기에 사용되는 Austenite Stainless Steel의 경우에는 δ-ferrite의 최대 함량을 규정하여 최소한의 δ-ferrite만이 용접부에 포함되도록 하고 있다. 이렇게 δ-ferrite가 포함된 용접조직은 Ferrite의 특성으로 인해 미미한 정도의 자성을 띄게 되고, Slag 형성 원소가 Ferrite조직에 많이 고용되어 상대적으로 적은량의 Slag가 형성된다.

Stainless Steel에 포함된 δ-ferrite의 양에 따른 Stainless Steel의 Pitting 저항성은 ASTM G150에 규정된 실험 방법에 의해 Critical Pitting Temperature(CPT, 임계공식온도)으로 평가된다. CPT온도가 낮을수록 Pitting에 취약하게 된다.

다음의 표는 21개의 316L 시편 용접부를 대상으로 평가한 δ-ferrite의 양과 CPT의 관계이다.

Table 16 시편용접부의 δ-ferrite의 양과 CPT의 관계

시편No.	Ni eq	Cr eq	Cr eq / Ni eq	%Ferrite Max.	CPT °C, avg
1	14.03	21.63	1.54	2.24	22.6
2	12.71	21.12	1.66	3.58	16.3
3	13.62	20.28	1.49	2.23	13.1
4	16.02	21.78	1.36	0.23	23.1
5	13.59	20.90	1.54	1.73	16.4
6	13.97	21.45	1.54	2.39	23.9
7	13.57	20.51	1.51	1.62	22.3
8	13.26	21.24	1.60	3.87	20.4
9	13.92	21.00	1.51	1.81	12.4
10	13.59	20.09	1.48	0.70	10.2
11	12.26	20.27	1.65	4.53	4.1
12	12.71	21.05	1.66	5.15	15.5
13	14.05	20.99	1.49	1.36	13.9
14	16.11	21.78	1.35	0.21	20.6
15	15.93	21.81	1.37	0.29	20.1
16	15.68	21.91	1.40	0.30	18.2
17	12.23	20.72	1.69	6.40	7.0
18	13.63	20.67	1.52	2.38	12.3
19	13.85	20.51	1.48	1.21	10.6
20	13.16	20.37	1.55	3.23	13.2
21	13.61	21.14	1.55	3.93	15.9

이 표에 나타난 바와 같이 Ferrite의 함량이 클수록 CPT(임계공식온도) 값이 작은 것을 알 수 있다.

Ferrite Number는 Ferrite함량을 지수화 한 것으로 용접부의 건전성을 Chemical Component로 예측해 볼 수 있는 손쉬운 방법이다. Ferrite 함량 측정에는 여러가지 방법이 있으나, 가장 널리 사용되는 세가지 방법에 대해 다음과 같이 설명한다.

(1) Shaeffler Diagram에 의한 방법

Shaeffler의 Cr & Ni당량 공식에 따라 용접부의 성분 분석치를 기준으로 계산하여 다음의 그림1의 Diagram에서 Ferrite Content를 구하는 방법이다. Ferrite의 함량을 %로 측정하는 Shaeffler Diagram의 불편함을 해소하여 기준 값을 제시하고, 단일화된 수치로 표시한 것이 Dillong Diagram이다. 성분 분석을 위한 Chip Sampling은 용접 과정에서 합금 원소의 Dillution에 의한 문제점을 해결하기 위해 용접부 표면으로부터 통상 1.6mm이하의 금속을 Drill등을 이용하여 채취하여 분석한다.

(2) Ferrite Detector로 측정하는 방법

Ferrite Detector에는 Magnetic Type과 Eddy-Current Type의 두 종류가 있으며, 두가지 모두 자성을 가지는 Ferrite의 특성을 이용하여 측정하는 방법이다. 측정이 손쉽고 장비가 간단해 가장 널리 쓰인다. 최근에는 Digital 화면으로 Ferrite 함량이 표시되는

순쉬운 측정 장비가 많이 나와있다.

(3) 현미경에 의한 조직 분석법

조직 시편을 만들어 광학 현미경을 통해 Ferrite와 Austenite의 조직분률(Area %)을 직접 측정하는 방법이다.

Ti이 함유된 321 SS의 용접시에는 용접봉의 Ti성분이 Welding Arc에 의해서 용접부로 Transfer되지 않으므로 Nb(Cb)가 함유된 347 SS용 접봉을 사용한다. ASME Sec. II Part C의 용접봉 구분에도 SFA 5.9의 ER 321 SS가 321 SS의 용접봉으로는 유일하게 규정되어 있을 뿐이다.

347 SS는 321 SS보다 용접성이 좋으며, 예민화 현상에 대한 저항성이 더 크다.

그림 1 Schaeffler Diagram 과 Cr & Ni당량 계산식

3.4 Duplex Stainless Steel

Duplex Stainless Steel은 가장 최근에 개발된 강종으로 점차 그 사용 영역이 확대되어 가고 있는 강종이다. 이 강종은 기존의 Austenitic Stainless Steel에 Cr의 함량을 더 높이고 약간의 Mo를 추가한 강종으로 보통 25%정도의 Cr에 2~3% Mo를 포함하는 강종이다.

대표적인 재질로는 SAF 2205 (UNS No. : S31083), SAF 2507 (UNS No. : S32750)이 있다.

Table 17 Duplex Stainless Steel의 화학성분

UNS No.	화학 성분 (Max. Wt.%)										
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu	기타
S31200	0.03	2.0	0.045	0.03	1.0	24.0 ~ 26.0	5.5 ~ 6.5	1.2 ~ 2.0	0.14 ~ 0.20		
S31260	0.03	1.0	0.03	0.03	0.75	24.0 ~ 26.0	5.5 ~ 7.5	2.5 ~ 3.5	0.1 ~ 0.3	0.2 ~ 0.8	W : 0.1 ~ 0.5
S31803	0.03	2.0	0.03	0.02	1.0	21.0 ~ 23.0	4.5 ~ 6.5	2.5 ~ 3.5	0.08 ~ 0.20		
S32304	0.03	2.50	0.04	0.03	1.0	21.5 ~ 24.5	3.0 ~ 5.5	0.05 ~ 0.60	0.05 ~ 0.20	0.05 ~ 0.60	
S32550	0.04	1.5	0.04	0.03	1.0	24.0 ~ 27.0	4.5 ~ 6.5	2.9 ~ 3.9	0.1 ~ 0.25	1.5 ~ 2.5	
S32750	0.03	1.20	0.035	0.02	0.80	24.0 ~ 26.0	6.0 ~ 8.0	3.0 ~ 5.0	0.24 ~ 0.32	0.5	
S32760	0.03	1.0	0.03	0.01	1.0	24.0 ~ 26.0	6.0 ~ 8.0	3.0 ~ 4.0	0.2 ~ 0.3	0.5 ~ 1.0	W : 0.5 ~ 1.0 Cr + 3.3 Mo + 16N = 40 Min.
S32900	0.08	1.0	0.04	0.03	0.75	23.0 ~ 28.0	2.5 ~ 5.0	1.0 ~ 2.0			
S32950	0.03	2.0	0.035	0.01	0.60	26.0 ~ 29.0	3.5 ~ 5.20	1.0 ~ 2.5	0.15 ~ 0.35		

이 강종의 특징은 기존 Austenitic Stainless Steel이 입계부식(Intergranular Corrosion) 및 응력 부식 균열(Stress Corrosion Cracking)에 민감한 단점을 보완하기 위해 개발된 강종으로 Ferrite기지위에 50%정도의 Austenite조직이 공존하는 Dual Phase의 조직이다.

Austenite조직이 존재 함으로 인해 Ferrite Stainless Steel보다 양호한 인성을 가지고 있다. 또한, Ferrite조직이 존재 함으로 인해 Austenite Stainless Steel보다 약 2배 이상의 강도를 가지고 있어서 기계 가공 및 성형이 어렵다. Austenitic Stainless Steel보다 열팽창 계수가 낮고, 열전도도는 높아서 열 교환기 등의 tube재질로 적합하다.

Chloride등에 대한 저항성이 커서 VCM Project등의 열 교환기용 재료로 사용되고 있다.

Ni함량이 적어서 경제적이고 열처리에 의해 경화될 수 있다.

-60℃이하에서는 충격치가 급속히 감소하며, 300℃ 이상에서는 Ferrite조직의 분해가 일어나서 취성이 발생하므로 통상적인 사용온도는 -50 ~ 250℃ 정도로 제한된다.

Duplex Stainless Steel은 Austenite조직과 Ferrite조직의 상분률(狀分率)이 매우 중요하다. 상분률이 깨지면 원하는 특성을 얻을 수 없고 취성이 발생하여 적절하게 사용할 수 없다.

전반적으로 용접성은 매우 양호한 재질로 평가되지만, 입열조절이 무척 중요하다. 따라서 다층 용접시 각 Pass사이의 Interpass Temperature와 Travel Speed의 조절이 매우 중요한 조절인자로 작용한다.

용접시 입열이 부적절하면 Dual Phase의 상분률(狀分率)이 깨어지므로 통상 0.5 ~ 1.5KJ/mm 정도로 엄격히 제한한다. Interpass Temperature는 Max. 150℃ 정도로 규제한다.

용접봉은 모재보다 2~3% 정도 Ni함량이 많은 재료를 선정하고, 지나친 급냉이나 서냉이 되지 않도록 한다. 용접시 800 ~ 1000℃ 범위에서 장시간 유지되면 해로운 Secondary Phase가 생겨서 기계적 성질 및 내식성의 저하를 가져오므로 피해야 한다. 대개 용접후 열처리(PWHT)는 실시 하지 않으나, 해로운 Secondary Phase를 피하기 위해 1100℃ 정도의 온도에서 5 ~ 30분간 후열처리를 한후 급냉 하도록 한다. 서냉하게 되면, 탄화물의 석출에 의해 내식성이 저하하고, 인성이 떨어진다.

Code상 규정은 없지만 용접부에 대한 충격시험(Impact Test)을 요구하는 경우가 많으며, 별도의 비파괴 검사(NDT)를 실시 하지 않고 용접부의 건전성을 평가하는 가장 손쉬운 방법은 경도(Hardness) 측정과 Ferrite량 측정이다. Ferrite량을 측정하고 Hardness측정하면 대략

적인 용접부의 건전성을 평가 할 수 있다. 경도 측정은 Code상 반드시 적용해야 하는 규정은 아니다.
Ferrite함량은 Austenitic Stainless Steel의 용접부 검사에 적용한 것과 동일한 방법을 적용하면 된다.
Ferrite함량 37 ~ 52%정도에서 통상적인 Hardness는 Brinell경도로 238 ~ 265정도가 나오면 적정선이다. 이 경도 값에 관해서는 사전에 기준치를 정하는 협의가 필요하다.

3.5 석출 경화형(Precipitation Hardening) Stainless Steel

3.5.1 종류 및 용도

석출 경화형 Stainless Steel은 Austenite와 Martensite계의 결점을 없애고 이들의 장점을 겸비하게 한 강이다. 즉, Austenite계의 우수한 내열성 및 내식성을 가지고 있지만 강도가 부족하고, Martensite 계는 경화능을 있으나 내식성 및 가공성이 좋지 못하므로 양계의 부족한 점을 충족시키고, 좋은 특성을 살리기 위해 석출 경화현상을 이용한 것이 이 강종이다.
현재 규격화 된 것은 KS에 3종, AISI 규격에 7종, JIS 규격에 2종이 있다.
이중에 대표적인 것은 STS 630과 STS 631이 있다.
STS 630은 흔히 17-4 PH 강이라고 알려졌다으며, Austenite-Martensite 변태점이 상온 위에 있기 때문에 고용화 열처리를 하면 Martensite 가 되고 여기에서 석출 경화 열처리를 단 1회만 하면 충분하므로 단일 열처리 Martensite강(Single Treatment Martensite Steel)이라고 구분한다.
STS 631은 17-7 PH 강이라 알려졌다으며, 변태점이 상온 이하에 있으므로 중간 열처리로 변태점을 상온 이상으로 끌어 올려 Austenite-Martensite로 변태 시킨 다음에 석출 경화 열처리를 하므로 이중 처리 Martensite (Double Treatment Martensite Steel)이라고 한다. 여기에는 AISI 632 및 633이 있다.

Table 18 석출 경화형 Stainless Steel의 화학 성분

강종의 구분			화학 성분 (Max. wt. %)								
KS	AISI	JIS	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	기타
STS 630	SUS 630		0.07	1.0	1.0	0.04	0.03	3 ~ 5	15.5 ~ 17.5		Cu : 3 ~ 5 Nb + Ta : 0.15 ~ 0.4
630 (17-4 PH)			0.04	0.6	0.25	0.2	0.01	4.0	16		Cu : 3.2 Nb + Ta : 0.25
STS 631	SUS 631		0.09	1.0	1.0	0.04	0.03	6.5 ~ 7.75	16 ~ 18		Al : 0.75 ~ 1.5
STS 631J1	SUS 631		0.09	1.0	1.0	0.04	0.03	7 ~ 8.5	16 ~ 18		Al : 1.15
631 (17-7 PH)			0.07	0.4	0.6	0.02	0.01	7.0	17.0		Al : 1.15
632 (PH 15-7 Mo)			0.07	0.4	0.7	0.02	0.01	7.0	15	2.25	Al : 1.15
633 (AM-350)			0.1	0.25	0.8	0.02	0.01	4.3	16.5	2.75	N : 0.1
634 (AM-355)			0.13	0.6	0.95	0.25	0.01	4.3	15.5	2.75	N : 0.1
17-10 P			0.12	0.6	0.75	0.25	0.03	10	17		
17-14 Cu,Mo			0.12	0.5	0.75	0.02	0.01	14	16	2.5	Cu : 3.0 Nb : 0.5 Ti : 0.25

Table 19 석출 경화형 Stainless Steel의 특징과 주요 용도

강종의 구분			주요 용도
KS	AISI	JIS	
STS 630	630 (17-4 PH)	SUS 630	Martensite 기지를 가지고 내식, 내마모성이 우수하다. Valve, 항공기 Propeller, Piston Rod, Ball Bearing, Shaft 등에 사용된다.
STS 631	631 (17-7 PH)	SUS 631	반(Half) Austenite 기지위에 Al을 석출 시켜서 경도를 증가시킨 강이다. Spring, Washer, Valve 재료로 사용된다.
632 (PH 15-7 Mo)			631보다 고장력이 요구되는 부분에 사용된다. 성형성이 좋다.
633 (AM-350)			반(Half) Austenite 기지위에 Mo를 첨가하여 Ms 점을 강하 시킨 강이다. 용체화 처리시에는 완전

634 (AM-355)	Austenite가 되고, 시효처리시에는 Cr 탄화물과 Martensite 변태를 일으켜서 고강도와 내열성을 얻는 다.
17-10 P	Austenite계 Stainless Steel이다. P를 첨가하여 격자를 왜곡시켜 탄화물 석출 양상이 양호하다. K-Monel, Be-Bronze의 대용으로 선박부품에 사용된다.
17-14 Cu,Mo	Austenite계 Stainless Steel이다. 540℃ 이상에서도 우수한 강도를 가진다. 항공기, Gas Turbine, Steam Turbine, Super Heater, Reactor 등에 사용된다. 내식성도 우수하다.

* 631 J1은 631과 동일하며, 선재 혹은 선으로 제조된 경우의 분류 명명이다.

Table 20 석출 경화형 Stainless Steel의 열처리

강종의 구분			열처리		
KS	AISI	JIS	종류	기호	열처리 조건(℃)
STS 630 630 (17-4 PH) SUS 630			고용화 열처리	A	1020 ~ 1060℃ 급냉
			석출 경화 열처리	H900	A 처리 후 470 ~ 490℃ 공냉
				H1025	A 처리 후 540 ~ 560℃ 공냉
				H1075	A 처리 후 570 ~ 590℃ 공냉
				H1150	A 처리 후 610 ~ 630℃ 공냉
STS 631		SUS 631	고용화 열처리	A	1000 ~ 1100℃ 급냉
631 (17-7 PH)			석출 경화 열처리	TH1050	A 처리 후 760±15℃에서 90분 유지 1시간내에 15℃ 이하로 유지 565±10에서 90분 후 공냉
				RH950	A 처리 후 955±10℃에서 10분 후 공냉 24시간 내에 -73±6℃에 8시간 유지 510±10℃에 60분 유지 후 공냉
632 (PH 15-7 Mo)			고용화 열처리	A	1065±14℃ 공냉
			석출 경화 열처리	TH	760±14℃에 90분에서 16℃이하 공냉 566±6℃에 90분 유지 후 공냉
				RH	954±14에 10분 후 공냉 -70℃에서 8시간, 579±6℃에서 90분 후 공냉
633 (AM-350)			고용화 열처리	A	1065±14℃ 공냉
			석출 경화 열처리	DA	A 처리 후 732℃에서 1 ~ 2시간 후 공냉 455℃에서 1 ~ 2시간 후 공냉
				SCT	A 처리 후 932℃에서 10분 후 공냉 -73℃에서 3시간 후 455℃에서 3시간 후 공냉
634 (AM-355)			고용화 열처리	A	1024±10℃ 급냉
			석출 경화 열처리	DA	633과 동일
				SCT	633과 동일
17-10 P			고용화 열처리	A	1121에서 30분 후 수냉
			석출 경화 열처리	DA	704℃에서 24시간 후 공냉 649에서 24시간 후 704℃에서 12시간 후 공냉
17-14			고용화 열처리	A	1232℃에서 30분 후 수냉

Cu,Mo	석출 경화 열처리	732℃에서 5시간 후 공냉
-------	--------------	-----------------

Table 21 석출 경화형 Stainless Steel의 기계적 특성

강종의 구분				기계적 성질			
KS	AISI	JIS	기호	인장강도 (kg/mm2)	연신율(%)	경도 시험	
						Brinell (BHN)	Rockwell
STS 630 630 (17-4 PH) SUS 630			A			363	HRC38
			H900	134	10	375	HRC40
			H1025	109	12	331	HRC35
			H1075	102	13	302	HRC31
			H1150	95	16	277	HRB85
STS 631 631 (17-7 PH) SUS 631			A	105	20	363	HRC43
			TH1050	125	4		HRC48
			RH950	91	35		HRB88
632 (PH 15-7 Mo)			A	151	7		HRC44
			TH	165	6		HRC48
			RH	102	40		HRC20
633 (AM-350)			A	137	10.5		HRC41
			DA	140	15		HRC43
			SCT	112	26		HRB95
634 (AM-355)			A	137	10		HRC41
			DA	154	13		HRC45
			SCT	62	70		HRC10
17-10 P			A	96	25		HRC30
			DA	101	20		HRC32
17-14 Cu,Mo			A	60	45		

다음에 첨부하는 4장의 Table은 Stainless steel 의 종류 별로 개략적인 특징과 용접시의 주의점을 정리한 것으로 지금까지 언급된 내용과 중복되는 내용이 많지만 각 각종의 특징을 쉽게 파악하는데 도움이 될 것이다.

Table 22 Ferritic Stainless Steel의 재료 특성 및 용접성

Type	대표 강종	재료 특성 및 용접성
Ferritic (12 ~ 30 %Cr)	405 SS (13 % Cr) 430 SS (17% Cr)	- 최대 사용온도는 475℃(885°F)에서의 Embrittlement로 인해 343℃(650°F)정도로 제한된다.
		- 용접시 HAZ(용접열영향부)의 인성이 급격하게 저하하여 용접 구조물로는 사용이 제한 된다.
		- 용접시 HAZ부의 Grain Growth가 급속하게 이루어 지고, 550 ~ 850℃ 사이에서 Fe-Cr의 급속 간 화합물이 생겨 취성이 발생하므로 용접 구조물로의 사용이 제한된다.
		- Column의 Strip Lining등으로 일부 이용되기도 하며, 용접시에 경화성이 없으므로, 예열 및 후 열처리가 필요없다.

		- 일반 부식에 강하고, 고온산화가 적으며, S부식과 H ₂ , H ₂ S및 Chloride분위기에서의 저항성이 강하다.
		- 주로 사용되는 용접봉은 E309가 사용되고, 열처리가 요구될 경우에는 E430 or Nickel-Chromium-Iron계 용접봉을 사용한다.
		- E309로 용접한 구조물은 260℃(500°F)이상에서 사용하면, 모재와의 Thermal Expansion의 차이로 인해 높은 Stress가 발생하므로 최대 사용온도가 이보다 하향으로 제한된다.
		- 410S SS는 Martensitic Stainless Steel인 410 SS에서 Carbon이 0.08% 이하로 규제되고, Nickel이 Max.0.60%로 미량의 차이가 나며, 양호한 용접성을 가진 재료이다.
		- 410S SS는 용접시에 410 SS와는 달리 P No. : 7의 Ferrite Stainless Steel 로 분류된다. (410 SS는 Carbon : 0.15%, Nickel 0.75%로 P No. : 6인 Martensitic Stainless Steel 이다.)

Table 23 Martensitic Stainless Steel의 재료 특성 및 용접성

Type	대표 강종	재료 특성 및 용접성
Martensitic (12 ~ 18% Cr)	410 SS (12 % Cr) 410S SS CA6NM F6NM	- 용접시에 쉽게 경화되며, 전반적으로 매우 취약한 용접성을 가지고 있다. Stainless Steel강종중에 유일하게 용접으로 인해 경화되는 재료이다.
		- 고온 S 부식과 H ₂ , H ₂ S및 Chloride분위기에서의 부식 저항성이 매우 강하다.
		- 440 ~ 450℃에서는 탄화물이 석출하여 충격치가 급격히 감소하므로 사용이 제한된다. 상용온도는 -29 ~ 440℃이다.
		- 주로 Column의 Strip Lining or Cladding 재료 사용되며, 용접성이 좋은 Low Carbon Grade인 410S SS를 널리 사용한다.
		- 인성이 작고, 강한 인장 응력이 있으나, Elongation이 작아서 충격에 쉽게 파단된다. 이러한 이유로 ‘95년도 ASME Code에서는 Stainless Steel중 유일하게 Impact Test를 요구하였으나, 이후 Addenda에서는 이 규정이 삭제되었다.
		- 용접조건이 부적절하면 경화가 극심하고, HAZ부가 조대화 되며, 조직과 내부 응력의 불균일화로 인해 Operation 중에 Stress Corrosion Cracking이 발생하기 쉽다.
		- 용접부의 경화로 인해, Delayed Hydrogen Cracking이 일어나기 쉽다.
		- 용접부의 Delayed Hydrogen Cracking위험성을 방지하기 위해 Carbon을 0.1 %이하로 줄이고, Nickel 4%와 Molybdenum 0.5%를 추가한 F6NM, CA6NM재질로의 대체 사용도 추천된다.
		- 용접은 주로 E309 or Nickel-Chromium-Iron계 용접봉으로 실시하며, Process의 특성에 따라 E410으로 용접을 요구할 경우도 있다. 열처리 조건은 ASME Sec.VIII UHA-32에 따른다.
		- Chloride분위기에서는 강하지만, Austenitic Stainless Steel용접봉으로 용접할 경우에는 Chloride에 약한 ASS의 특성으로 인해 E410용접봉의 사용이 요구된다.

Table 24 Duplex Stainless Steel의 재료 특성 및 용접성

Type	대표 강종	재료 특성 및 용접성
Duplex (18~30% Cr, 4~6% Ni, 2~3% Mo)	SAF 2204 (S32304) SAF 2205 (S31803) SAF 2507 (S32750)	- Austenitic Stainless Steel의 입계 부식 및 응력 부식균열에 민감한 단점을 보완하기 위해 개발된 강종으로 Ferrite 조직 기지위에 50%정도의 Austenite조직이 공존하는 Dual Phase의 조직이다.
		- Austenitic조직이 존재함으로 인해 Ferrite Stainless Steel보다 양호한 인성을 가지고 있다.
		- Ferritic조직이 존재함으로 인해 Austenitic Stainless Steel보다 우수한

		Mechanical Strength(약 2배)를 가지고 있으며, 기계 가공 및 성형이 어렵다.
		- Austenitic Stainless Steel보다 열팽창 계수가 낮고 열전도도는 높아서 열교환기의 Tube재질등으로 적합하다.
		- Ni함량이 작아서 가격이 경제적이다.
		- 충격치가 -60℃ 이하에서는 급속히 감소하며, 300℃ 이상에서는 Ferrite조직의 분해가 일어나서 취성이 발생하므로 통상적인 사용온도는 -50℃ ~ 250℃ 정도이다.
		- 300 ~ 550℃의 열처리에 의해 경화될 수 있다.
		- 용접시에 예열은 하지 않으며, 입열이 부적절하면 Dual Phase의 상분율(狀分率)이 깨어지므로, 0.5 ~ 1.5KJ/mm정도로 엄격하게 제한된다.
		- 용접봉은 모재보다 2 ~ 3%정도 Ni이 많은 재료를 선정하고, 지나친 급냉이나 서냉이 되지 않도록 한다.
		- 용접시 800 ~ 1000℃ 범위에서 장시간 유지되면, 해로운 Secondary Phase가 생겨서 기계적 성질 및 내식성의 저하를 가져온다.
		- 대개 용접후 열처리(PWHT)는 하지 않으나, 해로운 Secondary Phase를 피하기 위해 1100℃ 정도의 온도에서 5 ~ 30분간 후열처리를 한다.

Table 25 Austenitic Stainless Steel의 재료 특성 및 용접성

Type	대표 강종	재료 특성 및 용접성
Austenitic	304 SS 316 SS 321 SS 347 SS	- 용접성이 매우 양호한 재료로서, 용접으로 인해 경화되지 않으므로 예열과 후열의 필요성이 없다.
		- 열팽창이 크고, 용접시에 변형이 크므로 주의를 요한다.
		- 425 ~ 870℃ 용역에서 장시간 유지시에는 입계에 Cr탄화물이 발생해서 내식성이 저하되고, 기계적 강도도 감소한다.
		- Cr탄화물에 의한 예민화 현상을 방지하기 위해, Carbon함량을 0.03%이하로 줄인 Low Grade를 사용하거나, Carbon과 친화력이 좋은 Ti이나 Nb(Cb)를 첨가한 321 SS, 347 SS가 사용된다.
		- 321 SS, 347 SS, 348 SS 와 316Ti는 예민화 현상이 일어나지 않는 것으로 평가된다. “H” Grade는 내식성이 요구되지 않고 고온에서의 기계적 강도만 요구되는 경우에 사용된다.
		- 예민화가 일어날 수 있는 304 SS, 316 SS등은 용접하지 않고 사용할 경우의 최대 사용온도는 425℃이며, 냉간가공을 할 경우에는 370℃로 제한된다.
		- 용접 구조물에 사용되는 Low Carbon Grade인 304L, 316L의 경우에는 위의 경우와 같은 온도 제한을 받는다.
		- 316 Ti, 321 SS, 347 SS는 모두 용접이 가능하며, 최대 480℃까지 사용된다. 347 SS는 321 SS보다 용접성이 좋으며, 예민화 현상에 대한 저항성이 더 크다.
		- 용접중 발생할 수 있는 예민화 현상을 방지하기 위해 총간 온도(Interpass Temperature)는 Max. 180 ~ 200℃ 정도로 제한한다.
		- 용접부는 Hot Crack을 방지하기 위해 3 ~ 11 Ferrite Number정도의 Ferrite를 함유해야 한다.
		- Ti이 함유된 321 SS의 용접시에는 용접부의 Ti성분이 Welding Arc에 의해서 용접부로 Transfer되지 않으므로 Nb(Cb)이 함유된 347 SS용접봉을 사용한다.