

스테인리스강의 용접

최근 한국철강협회 스테인리스스틸클럽(용접가공 및 부식분과위원회)은 스테인리스강의 용접기술 향상을 위해 「스테인리스강의 용접」을 펴냈다.

「스테인리스강의 용접」은 스테인리스강 일반에서부터 금속조직에 의한 분류별, 구체적인 용접성 및 시공방법, 이종금속의 용접에 이르기까지 일목요연하게 수록하여 스테인리스강의 용접시공을 담당하는 사람들의 필요지식을 중점적으로 해설하고 있어 관계자의 기술향상에 기여함과 동시에 향후 스테인리스강 용접사의 자격 인증시 필독서가 될 것으로 보여진다.

이에 본지는 설비건설인들의 도움이 되고자 「스테인리스강의 용접」을 지난 1월호부터 연재하고 있다. 「편집자註」

글 실는 순서

- 제1장 스테인리스강 일반
- 제2장 용접방법 및 적용
- 제3장 오스테나이트계 스테인리스강의 용접
- 제4장 페라이트계 및 마르텐사이트계 스테인리스강의 용접
- 제5장 이종 스테인리스강의 용접
- 제6장 스테인리스강의 부식



제3장 오스테나이트계 스테인리스강의 용접

소재의 용접성이란 소재를 임의의 용접방법으로 용접할 경우, 용접결합이 발생하지 않고 여하히 용접이 잘 되는가와 용접된 부위가 사용목적에 맞게끔 충분한 기계적 성질, 내식성 등의 성능을 나타내는가의 척도 또는 정도를 의미한다. 이 장에서는 용접부의 분류 및 일반적인 특성을 기술하고 오스테나이트계 스테인리스강의 용접성, 각종 용접결합의 발생원인 및 방지대책과 적절한 용접시공에 관하여 설명하고자 하였다.

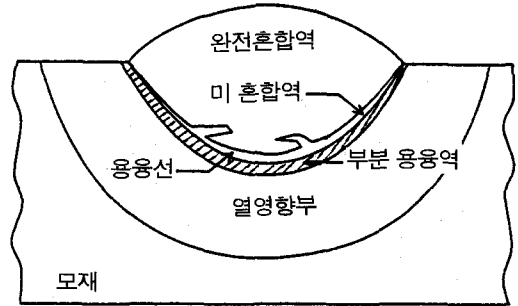


그림 3.1 용접금속의 분류

3.1 용접부의 특성

3.1.1 용접부의 영역분류 및 영역별 특성

용접부에서는 극히 짧은 시간에 금속의 용해, 응고과정이 일어나며 이같은 급열, 급냉은 용접부에 모재와 조직이 크게 다른 비평형 조직들을 생성시키게 된다. 대부분의 경우, 용접부의 조직은 금속 조직적으로 모재와 뚜렷이 구분된다. 그림 3.1은 용접부를 단순화하여 그린 그림으로 그림에서와 같이 위치에 따라 용접부는 몇 개의 영역으로 나누어지며 각 영역별 특성은 다음과 같다.

가. 완전 혼합역 (Composite region)

이 영역은 모재와 용접재료가 용융하여 완전히 혼합된 영역으로서 용접열에 의해서 금속이 용해되었다가 재응고한 영역의 대부분이 이에 속한다. 용접시 모재는 주조시의 몰드(Mold)와 같은 역할을 하게 되는데 용융역에서는 국부적인 금속 용융, 금속 응고가 모재에 의해 구속된 상태에서 일어나기 때문에 모재와는 다른 형상의 조직이 형성된다. 이 영역의 조직은 용융역의 화학 조성과 응고조건에 의해 결정되는데 응고조건은 어떤 용접방법과 용접조건을 사용하느냐에 따라서 달라지게 된다. 오스테나이트계 스테

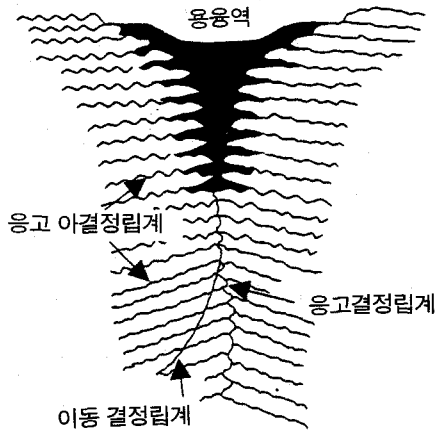


그림 3.2 용융역에 존재하는 3가지 결정립계

인리스강에서는 응고가 용접부의 성능을 결정할 정도로 대단히 중요한데 이는 응고후 상온까지 냉각될 때 여러 번의 상변태가 일어나는 탄소강과는 달리 스테인리스강에서는 응고 조직이 상온까지 그대로 유지되기 때문이다. 완전 혼합역에서는 금속 조직학적으로 구별이 가능한 몇가지의 결정립계가 관찰되는데 대부분의 경우, 응고 아결정립계, 응고결정립계 및 이동 결정립계의 세 가지 입계가 관찰된다. 그림 3.2에 이들을 모식적으로 나타내었다. 그림 3.2에서 알 수 있듯이 응고 아결정립계는 하나하나의 수지상(Dendrite)들이 마주치는 경계를 말하며 응고결정립계

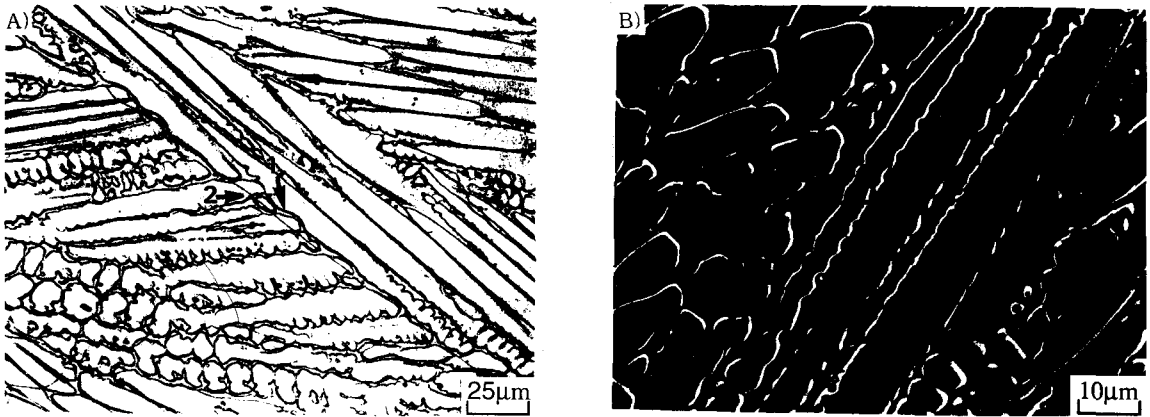


그림 3.3 오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 결정립계

는 이 수지상 균들이 마주치는 경계이다. 이러한 입계들은 금속조직학적으로 분명하게 식별이 가능한데 이는 인접한 양 결정립의 방위차와 응고에 의해 일어나는 합금원소와 불순물 원소의 편석 때문이다. 특히, 응고 결정립계에서는 합금원소와 불순물 원소의 편석이 심하게 일어나기 때문에 응고균열이 발생하기 쉽다. 응고 직후에 형성된 응고 결정립계는 수지상(Dendrite)들이 마주치는 경계를 따라 형성되기 때문에 매우 꼬불꼬불하다. 이처럼 굴곡이 심한 입계는 응고가 끝난 후 고체상태에서 냉각시 그림 3.2에서 보듯 주듯이 표면 에너지를 낮추기 위해서 이동하며 직선화된다. 이 직선화된 입계가 이동 결정립계이다. 그림 3.3은 오스테나이트계 스테인리스강 티그(GTAW, Gas Tungsten Arc Welding) 용접부를 보여주는 사진으로서 용접부에서 관찰된 응고 아결정립계, 응고 결정립계 및 이동 결정립계가 관찰되고 있으며 응고결정립계와 이동 결정립계는 각각 화살표 1, 2로 표시되어 있다.

나. 미혼합역(Unmixed zone)

미혼합역은 용접시 모재가 용해하였다가 용착 금속과 전혀 섞이지 않고 재 응고한 영역이다. 따라서 미혼합역의 조성은 근본적으로 모재와

동일하다. 그림 3.1에서 알 수 있듯이 이 영역은 용융선(본드)을 따라 존재하며 매우 좁다. 이같은 영역이 생기는 이유는 용접열에 의하여 용융된 액체중 용융선을 따라서 존재하는 얇은 층, 즉 용융되지 않은 고체와 닿아있는 얇은 층의 액체는 중심부의 액체와는 달리 거의 이동하지 못하고 정체하고 있어 용융역의 액체들과 전혀 섞이지 않기 때문이다. 이 얇은 층의 액체가 응고 후 미혼합역을 형성하는데 탄소강의 경우 이 영역은 잘 관찰되지 않으며 스테인리스강에서도 용접부 조직이 완전 오스테나이트인 강종에서 비교적 용이하게 관찰된다. 또 이 영역은 용접재료와 모재의 화학조성이 크게 다른 경우에 잘 나타나는데 그림 3.4는 9% Ni강을 Ni기 용접재료로 용접한 용접부에서 관찰된 미혼합역을 보여주고 있다. 미혼합역의 넓이는 용접 공정, 조건 및 용접재료의 화학 조성에 따라 크게 변한다.

다. 부분 용해역(Partially melted zone)

부분 용해역은 용접부에서 용접열에 의해서 용융이 일어난 부분과 고온으로 가열은 되었으나 용융이 일어나지 않고 고체로 남아있던 영역 사이에 존재하는 영역이다. 즉, 이 영역에서는 액체와 고체가 함께 존재하며 통상 이 영역의 온도

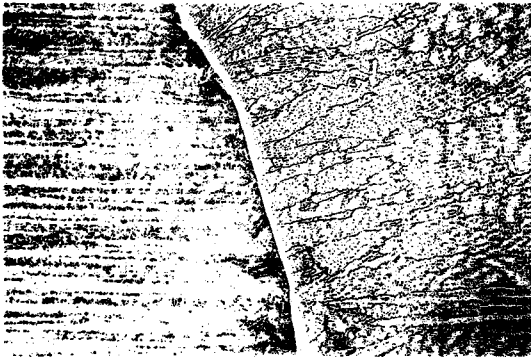


그림 3.4 9%Ni강을 Ni기 용접재료로 용접한 이종 금속 용접부에서 관찰된 미혼합역(계면의 흰 부분)

범위는 매우 좁고 이 온도 범위는 응고온도 범위로 불린다. 그러나 그림 3.5에서와 같이 실제 상업화된 합금계에서는 합금 원소/ 불순물 원소의 편석 때문에 실제의 응고온도 범위는 증가하게 된다.

라. 용접열영향부(Heat-Affected Zone, HAZ)

용접열영향부는 부분 용해역과 모재사이의 영역으로서 용접시 가열은 되었으나 용융은 전혀 일어나지 않은 영역으로 금속학적으로 조직 및 기계적 성질에 큰 변화가 일어난 영역이다. 이 영역은 변태점 이상으로 가열된 영역으로서 철강재에서는 통상 A1 온도 이상으로 가열된 영역을 말한다. 이 영역에서 일어나는 주요한 금속학적 변화는 결정립 성장, 제2상 또는 입자(Particle)의 고용/석출과 잔류응력의 발생이다.

3.1.2 용접부의 분류

용융에 의한 접합(용접)은 결합하는 재료들이 국부적으로 용해, 혼합된 후 재 응고함으로써 결합되는 금속학적 접합이 일어나는 것으로 정의된다. 용접부의 조직과 성능은 모재와 용접재료의 화학성분, 용접방법, 용접조건 등에 의해서 결정되는데 용접부는 크게 다음의 3가지 유형으로 분류된다.

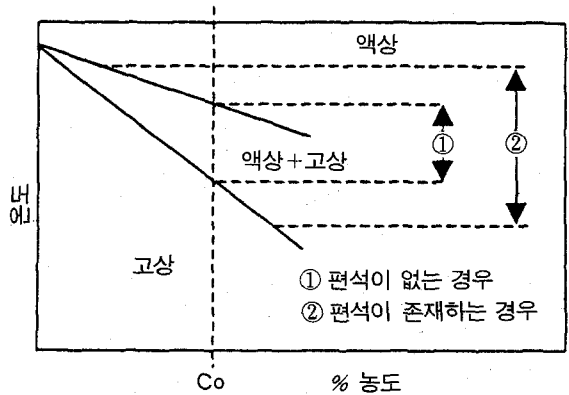


그림 3.5 응고온도 범위와 부분용해역의 상관관계

가. 제살 용접부 (Autogenous weld)

용접재료를 사용하지 않고 모재를 용융시켜 접합한 용접부를 말하며 용융역의 조성은 용접시 불순물 가스, 합금원소의 증발 등에 의해 다소 변할 수는 있으나 근본적으로 모재와 동일하다. 대부분의 전기저항용접 (Electrical Resistance Welding, ERW)과 용접재료를 사용하지 않는 가스 텅스텐 아크 용접 (Gas Tungsten Arc welding, GTAW(티그로 불리고 있음), 레이저 빔 용접 (Laser Beam Welding, LBW), 전자빔 용접 (Electron Beam Welding, EBW)에 의해 생성된 용접부가 이 유형에 속한다.

나. 동종금속 용접부 (Homogenous weld)

모재의 조성과 동일하거나 유사한 조성의 용접재료를 이용해 접합한 용접부를 말하며 용접부의 조성은 모재와 거의 동일하며 대부분의 용접부가 이 유형에 속한다.

다. 이종금속 용접부 (Heterogenous weld)

모재와 다른 조성의 용접재료를 이용해 접합한 용접부를 말하며 용접부의 내식성, 기계적 성질을 개선하기 위하여 모재보다 성능이 우수한 용접재료를 사용한 용접부, 이종금속 용접을 위하여 특수 용접재료를 사용한 용접부등이 이 유

형에 속하며 용융역의 조성은 용접재료와 모재의 희석율에 의해 결정된다.

3.2 오스테나이트계 스테인리스강의 용접성

3.2.1 용접부의 응고

오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 응고는 용접부의 고온균열 감수성, 용접부 조직 및 기계적 성질에 결정적인 영향을 미치게 된다. 용접부의 금속조직, 화학성분의 분포(편석) 등을 이해하기 위해서는 응고의 기본 개념을 이해할 필요가 있기 때문에 이 절에서는 용접부의 불균질한 성분분포에 의해 야기되는 과냉(조성적 과냉), 용접부가 응고할 때의 고체/액체 계면의 형

상, 응고의 결과로서 형성되는 미세조직 및 편석에 대하여 간략히 설명하고자 한다.

순금속이 응고할 때는 용접부는 평활계면상으로 그림 3.6과 같이 응고한다. 즉, 몰드로부터 생성된 고체는 평면상으로 액체를 잠식하며 성장해 간다. 그러나 산업용 합금의 경우에는 용접조건, 합금의 종류에 따라서 평활계면 응고, 셀상 응고, 수지상 응고 등이 일어날 수 있다. 그림 3.6에서 알 수 있듯이 셀상 응고가 일어난 경우에는 응고된 고체의 단면이 벌집모양의 형상을 나타내며 수지상 응고에서는 나뭇가지 모양으로 고체가 성장하게 된다. 그림 3.7은 오스테나이트계 스테인리스강에서 관찰된 평활계면 응고, 셀상 응고, 수지상 및 등축 수지상 응고 양식을 보여주고 있다.

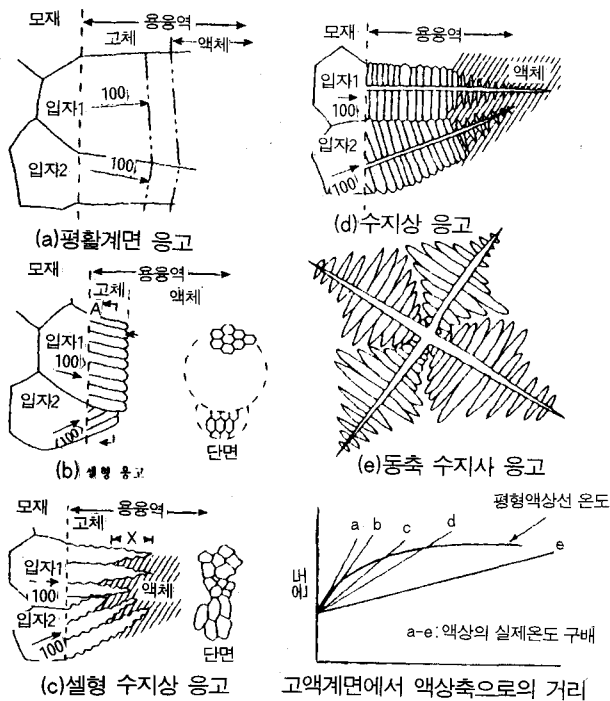


그림 3.6 5가지 형태의 응고이결정립과 이결정립 형성에 미치는 조성적 과냉의 영향

합금계에서 액체가 고체로 응고하기 시작할 때 즉, 응고 초기에 형성되는 고체의 합금농도는 전체 합금의 평균농도보다 낮다.

이 현상을 단순화하여 설명하기 위해서 2원계 (2종류의 원소로 이루어진 합금, 예 : Al-Mg합금) 상태도를 고려해보면 그림 3.8에서와 같이 금속의 용점 이상인 고온의 액체가 냉각되기 시작해 응고가 시작되는 온도인 T1에 도달해 처음으로 형성되는 고체의 농도는 C1으로 금속의 평균 농도 Co보다 농도가 낮다. 이처럼 응고 초기에 형성되는 고체의 농도가 액체의 평균농도보다 낮기 때문에 응고가 진행되면서 합금성분은 고체로부터 남아있는 액체로 밀려나서 액체의 합금성분 농도가 점점 더 커지게 된다. 그림 3.8에 나타난 상태도에서 알 수 있듯이 합금의 농도가 증가하게 되면 응고온도는 역으로 감소하게 되기 때문에 이같은 성분원자의 불균질한 분포에 의해서 과냉이 일어나며 이같은 과냉이 어느 정도 일어나느냐에 따라서 고체/액체계면의 형상이 바뀌게 된다. 과냉이 거의 없는 경우에는

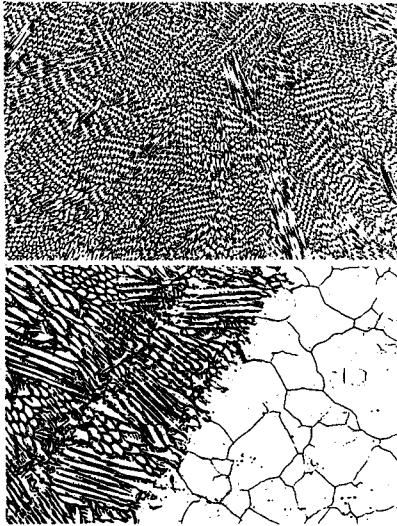


그림 3.7 오스테나이트계 스테인리스강 용접부 응고조직

평활계면 응고가 일어나며 과냉이 커지게 됨에 따라 셀상, 수지상, 등축 수지상으로 변하게 된다.

3.2.2 용접부의 페라이트 양

용접부에 존재하는 페라이트의 양은 용접부의 고온균열 감수성과 용접부의 기계적 성질 및 내식성에 큰 영향을 미치게 된다. 앞서서도 기술하였듯이 오스테나이트계 스테인리스강의 경우, 주된 조직이 오스테나이트이며 제 2상으로서 수 %의 페라이트가 존재하게 되는데 용접부에 페라이트가 전혀 없이 100% 오스테나이트 조직을 나타내는 경우는 용접부의 조직이 조대해 지고 입계에 편석이 심해져 응고균열을 포함한 고온균열의 감수성이 높아지게 된다. 또 모재에 제 2상인 페라이트가 거의 없는 경우에는 그림 3.9에서 알 수 있듯이 용접시 고온으로 가열되는 HAZ의 입자가 조대해 진다. 이같은 HAZ 입자 조대화는 등축성장을 하는 용융부의 입자 조대화를 야기시키게 된다. 그러나 용접부에 페라이트의 양이 지나치게 많아지면 용접부의 기계적

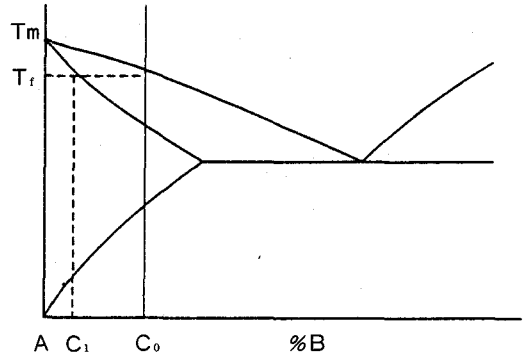


그림 3.8 이원계 상태도



그림 3.9 모재에 페라이트 함량이 작은 강종에서 관찰되는 HAZ입자 조대화

성질을 악화시키며 내식성도 저하시키기 때문에 용접부가 적정한 양의 페라이트를 함유할 수 있도록 조절하는 것이 매우 중요하다. 용접부의 페라이트 양은 모재 및 용접재료의 선택, 용접조건 조절에 의해서 가능하며 이를 위해서는 용접부의 페라이트 양을 정확히 측정하는 것이 매우 중요하다. 용접부의 페라이트 양을 측정하는 방법 으로서는 다음과 같은 방법들이 이용되고 있다.

가. 자기측정에 의한 방법

이 방법은 오스테나이트는 비자성이나 페라이트는 자성을 띠는 특성을 이용해 재료의 자성을

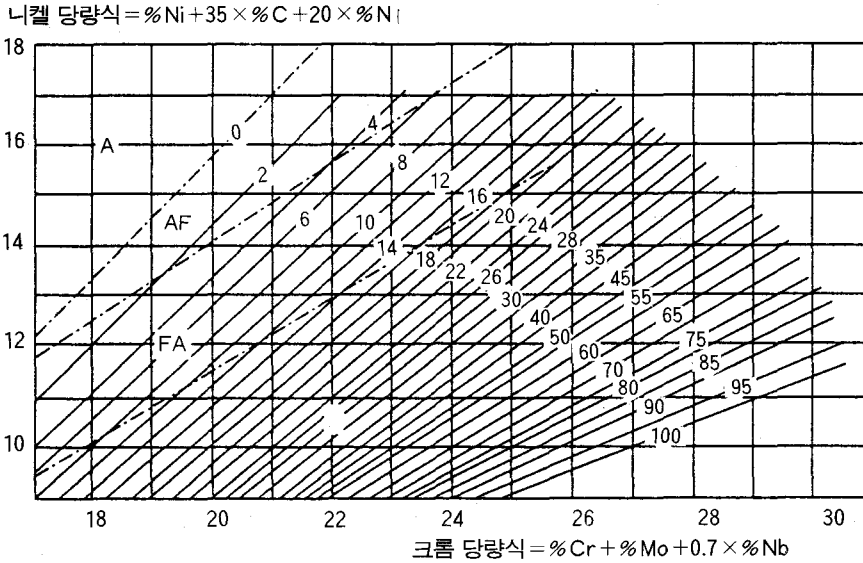


그림 3.10 WRC 조직도

측정함으로써 페라이트 양을 측정하는 방법이다. 이같은 원리를 이용해 페라이트 양을 측정하는 장치로서 시중에서 판매되고 있는 것은 페라이트 인디케이터(Ferrite indicator), 마그네-게이지(Magne-gauge), 페라이트 스코프(Ferrite scope) 등이 있다.

나. 현미경 조직에 의한 방법

현미경 조직상에 나타나는 오스테나이트와 페라이트 조직의 면적율로부터 페라이트 양을 측정하는 방법으로서 현미경 조직으로부터 정확하고 공신력있는 측정을 위해서는 ASTM(미국재료시험협회) 또는 AWS(미국용접협회)에서 규정된 방법으로 측정하여야 하며 통상 현미경과 영상분석장치(Image analyzer)가 필요하다. 또 이 방법을 이용하는 경우에는 용접부의 상들을 잘 구분할 수 있는 부식시약(Etchant)을 선택하여 가능한 한 측정 오차를 줄일수 있도록 하여야 한다.

다. 조직도에 의한 방법

용접금속의 Cr당량과 Ni당량을 모재의 조성,

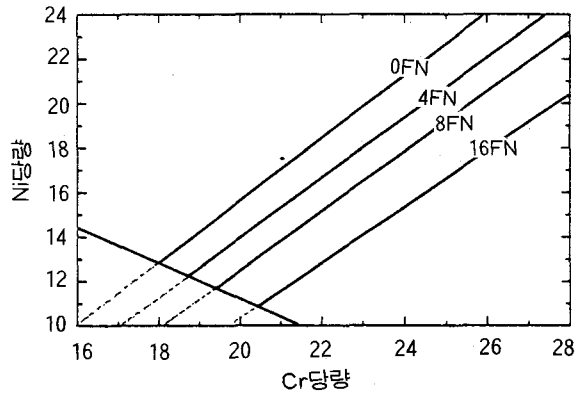


그림 3.11 드롱(DeLong) 조직도

용접재료의 조성, 희석율 등을 이용하여 계산한 후 페라이트 양을 산정할 수 있는 조직도로 부터 페라이트 양을 추정하는 방법으로서 조직도로서는 그림 3.10, 3.11에 나타난 WRC(Welding Research Council, 용접연구회)의 조직도, 드롱(DeLong) 등의 조직도가 주로 이용되고 있으며 그 외에도 Hammar & Svensson, Hull 조직도,

schaeffler 조직도도 이용되고 있는데 모재의 조성에 따라 적절한 조직도를 선택하여 이용하여야 한다.

페라이트 양의 측정에는 이처럼 여러 가지 방법이 이용되고 있는데 방법별로 측정된 페라이트 양에는 상당한 차이가 나고 있어 IIW(International Institute of welding), AWS 등의 기관에서는 이 같은 문제를 해결하기 위해서 많은 연구를 지금도 진행하고 있다. 따라서 페라이트 양을 측정하는 경우에는 측정방법을 정확히 이해하여 목적에 가장 적합한 방법을 선택하는 것이 매우 중요하다. 지금까지 알려진 바로는 정확한 표준 샘플을 이용한 경우에는 자성에 의한 페라이트 양의 측정이 가장 정확한 것으로 알려져 있다. 페라이트의 양을 나타내는 방법으로서는 면적 백분율에 의한 페라이트 %와 어떤 기준을 두고 상대적인 값을 표시한 페라이트 번호(Ferrite number, FN)가 주로 이용되고 있는데 FN값은 자기측정에 의한 방법, 조직도를 이용해 측정하는 방법 등의 결과로 나타난다(페라이트 함량이 10% 이하인 경우는 페라이트 %와 FN가 거의 일치함). 단, 페라이트 스코프를 이용하는 경우에는 페라이트 %값을 얻는 것도 가능하며 조직도도 종류에 따라서는 페라이트 %로 값을 나타내고 있다. 별도의 시험없이 성분계 만

으로 페라이트 함량을 예측할 수 있는 방법이 그림 3.10, 3.11에 나타난 조직도를 이용하는 방법인데 이들 조직도는 서로 다른 Cr, Ni 당량식을 이용하고 있으며 결과도 다소 상이하게 나타나기 때문에 원하는 합금계에 잘 맞는 조직도를 선택하여야 한다. 또한 스테인리스강에 잘 이용되지 않는 성분원소를 첨가하거나 특정 합금원소가 통상의 범위보다 많이 첨가되는 경우에도 조직도 선정에 주의하여야만 한다.

표 3.1은 오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 델타 페라이트의 함량을 각종 조직도로부터 예측한 값과 실측치를 비교한 결과이다. 이 결과에 의하면 대체로 조직도에 의한 예측치가 실측치보다 약간씩 높게 나타남을 알 수 있다. 한편, 표 3.2는 델타 페라이트 양에 미치는 냉각속도의 영향을 조사한 결과로서 용접부의 델타 페라이트 양은 냉각속도가 증가함에 따라 증가하고 있다.

3.2.3 용접부 응고양식/페라이트양/고온균열 감수성의 상관관계

오스테나이트계 스테인리스강의 초정응고양식은 용착금속의 페라이트양을 결정하게 되며 고온균열 감수성과도 큰 상관관계가 있다. 지금까지 알려진 바로는 오스테나이트계 스테인리스강의 초정응고양식은 다음과 같이 4가지로 구분

표 3.1 각종 오스테나이트 스테인리스강 용접부의 델타 페라이트 양

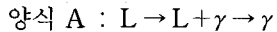
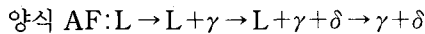
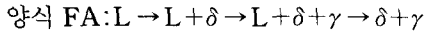
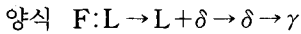
용착금속	화학조성(wt.%)								페라이트양(%)		
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	N	S	D	실측치
316L	0.023	0.81	0.094	18.07	12.77	2.4	-	0.064	5.5	5	3.8
347	0.042	0.54	1.25	19.57	10.54	0.16	0.36	0.05	6.3	6	4.13
308	0.036	0.51	1.41	16.86	10.53	0.055	-	0.06	6.4	6.2	6.32
309	0.041	0.94	1.24	23.5	12.85	0.05	-	0.054	11.4	13.3	9.3
309MoL	0.022	0.87	1.19	22.6	13.8	2.46	-	0.059	13	15	14.57
용접조건	SMAW(3.2φ)80-120A, 21-24V, 190-210mm/min.,DCRP										

S : 세폴러 조직도, D : 드롬 조직도

표 3.2 델타 페라이트 함량에 미치는 냉각속도의 영향

종 류	방 법	평균 페라이트 양(%)	
		308L	316L
급 냉	용접후, 1000℃ 부근에서 수냉	7.0	4.5
공 냉	일반용접	6.1	4.1
서 냉	600℃ 예열, 400℃ 후열	4.3	4.0
용접조건	GTAW(1.2φ) 180-250A, 12-16V, 280-375mm/min., DCSP		

된다.



먼저 양식 F에서는 액체에서 처음 응고되기 시작하는 고체가 델타 페라이트로서 응고가 종료할 때까지 델타 페라이트만 생성되며 응고가 종료된 후 고체상태에서 델타 페라이트로부터 오스테나이트상이 석출하여 최종 조직이 오스테나이트와 페라이트로 이루어지게 된다. 한편 양식 FA에서는 액체로부터 델타 페라이트가 생성되기 시작하며 어느 정도 응고가 진행되게 되면 잔여 액체의 합금원소 농도는 증가하게 되며(주로 오스테나이트 안정화 원소의 농도가 높아짐) 이 액체로부터 포정/공정 반응에 의하여 페라이트와 오스테나이트가 정출하게 되며 계속되는 냉각공정에서 페라이트가 오스테나이트로 변태해 오스테나이트 기지에 소량의 페라이트가 존재하는 조직으로 된다. 양식 F와 FA가 초정 페라이트 응고로 분류된다.

양식 AF에서는 양식 FA와는 반대로 초기에 오스테나이트 수지상이 생성되며 어느 정도 응고가 진행된 후에는 오스테나이트와 페라이트가 잔여 액체로부터 정출되는데 이 때 페라이트는 주로 오스테나이트 수지상 입계에 위치하게 된다. 응고 초기에부터 오스테나이트가 정출하여

응고완료시까지 오스테나이트상만이 형성되는 경우가 양식 A이며 양식 AF, A가 초정 오스테나이트 응고이다.

초정 오스테나이트 응고와 초정 페라이트 응고의 경계는 아래와 같은 Hammar & Svensson식을 이용하여 Cr, Ni당량을 계산한 경우, Cr당량/Ni당량비로 약 1.52정도인 것으로 알려져 있다. 즉, 당량비가 1.52보다 작으면 초정 오스테나이트 응고, 1.52보다 크면 초정 페라이트 응고가 일어난다.

$$Cr_{eq} = Cr + 1.37Mo + 1.5Si + 2Nb + 3Ti \quad (3.1)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 0.31Mn + 22C + 14.2N + Cu \quad (3.2)$$

※ 모든 성분원소의 값은 중량 %임.

참고로 그림 3.12는 상기 식을 이용하여 계산한 값으로 용접부의 초정 응고양식을 예측하는 조직도로서 용착금속의 성분이 양식 A, A+F에 속하면 초정 오스테나이트 응고, F+A, F영역에 속하면 초정 페라이트 응고가 일어나는 것으로 추정할 수 있다.

그림 3.13은 Cr-Ni-Fe 상태도로서 Fe가 약 70%로 고정되었을 때 Cr, Ni 함량과 상평형의 관계를 모식적으로 나타낸 그래프이다. 이 그래프에서 알 수 있듯이 오스테나이트 스테인리스강 용접부의 초정 응고양식은 Cr, Ni의 상대적인 양에 따라 초정 오스테나이트와 초정 페라이트 응고 모두가 일어날 수 있고 용접부에 존재하는 델타 페라이트의 형상도 이들의 상대적인 양

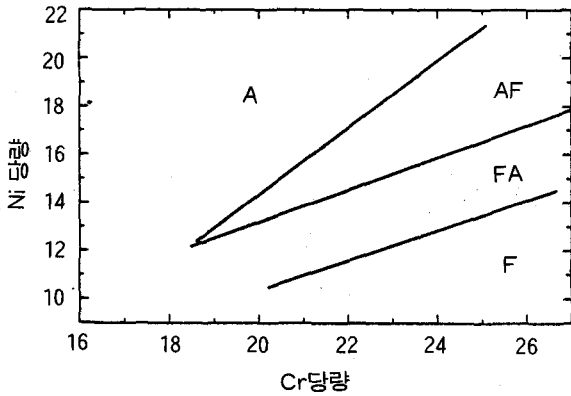


그림 3.12 용접부 초정응고 양식 예측도

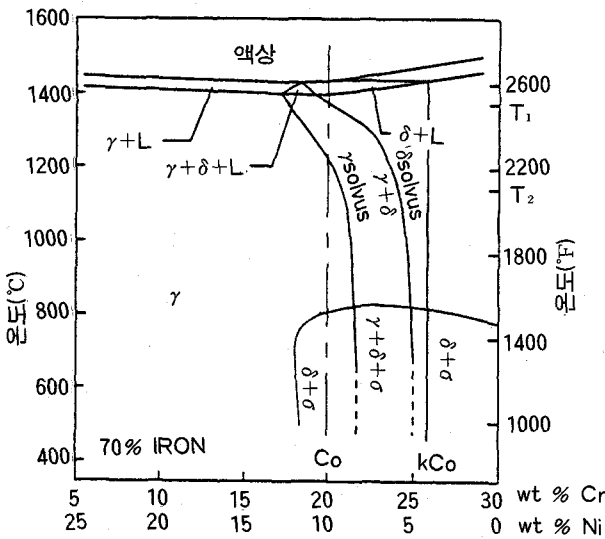


그림 3.13 Cr-Ni-Fe 상태도(Fe : 70%)

에 따라 달라지게 된다. 즉, Cr 함량이 낮고 Ni 함량이 상대적으로 높아 Cr/Ni비가 작은 경우, 양식 A로 초정 응고가 일어나며 용접부는 델타 페라이트가 전혀 존재하지 않는 완전 오스테나이트 조직을 나타내게 된다. Cr/Ni비가 이보다 증가하게 되면 응고양식이 양식 AF로 바뀌며 오스테나이트 조직에 델타 페라이트가 입계를 따라서 존재하는 조직을 나타내게 된다. Cr/

Ni비가 더 높아져 응고양식이 초정 페라이트 응고인 FA, F양식을 나타내게 되면 그림 3.14에서와 같이 델타 페라이트 형상이 입계 페라이트에서 애벌레 모양의 버미큘라(Vermicular) 페라이트, 침상의 페라이트로 형상이 바뀌게 된다. 용접부가 초정 오스테나이트로 응고해 입계 페라이트가 형성되는 경우에는 글자 그대로 페라이트가 수지상들의 경계에 위치하지만 초정 페라이트로 응고해 델타 페라이트의 형상이 버미큘라인 경우에는 페라이트가 수지상의 중심부에 위치하게 된다. 이같은 현상이 일어나는 이유는 응고가 초정 페라이트로 일어나기 때문에 응고 초기에 형성된 페라이트는 페라이트 안정화 원소를 다량 함유하고 있어 응고 종료후 페라이트가 오스테나이트로 변태할 때에도 페라이트 안정화 원소의 함량이 높은 수지상 중심부는 페라이트로 잔존하기 때문이다.

그림 3.15는 용접부 응고균열 감수성에 미치는 초정 응고양식의 영향을 나타낸 그래프로서 x축은 바레스트레인트 시험 (Varestraint test, 응고균열 시험법의 일종, 시험법 참조)시 시편에 가해지는 변형량이며 y축은 시험편에 발생한 모든 균열의 길이를 합한 값으로 균열 감수성 지수로 사용되고 있는 값이다. 그림 3.15에서 알 수 있듯이 용접부의 응고균열 감수성은 응고 양식이 초정 페라이트에서 초정 오스테나이트로 바뀌게 되면 현저하게 증가함을 알 수 있다. 또 응고가 초정 오스테나이트로 일어나더라도 용접부에 소량의 페라이트가 함유되어 있으면 응고균열 감수성을 상당히 저하시키게 된다. 이같은 현상을 응용하면 용접부의 균열 감수성을 낮게 제어할 수 있는데 뒤의 절에서 다시 언급되었지만 용접부에 소량의 페라이트를 함유하도록 용접재료를 선정한다든지 용접조건을 적절히 조절하는 방법을 생각할 수 있다. 초정 응고양식에 따라 균

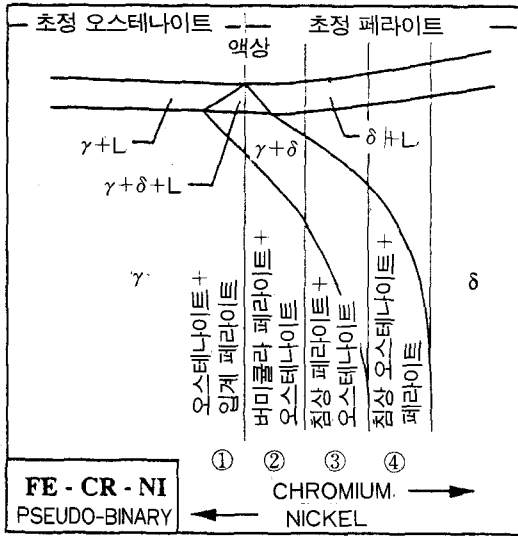


그림 3.14 Cr/Ni함량비에 따른 델타페라이트 형상 변화

열 감수성이 달라지는 원인에 대해서는 여러가지 이론이 제시되어 있지만 가장 일반적으로 인용되고 있는 이론은 다음과 같다.

먼저, 가장 자주 인용되고 있는 이론중의 하나가 입계에 편석하여 용접부 응고균열을 유발시키는 불순물 원소의 고용도 차이이다. 즉, 고온에서 P, S와 같은 불순물 원소의 고용도가 페라이트가 오스테나이트보다 크기 때문에 초정 페라이트로 응고가 일어나는 경우에는 페라이트내에 상대적으로 많은 양의 불순물 원소들이 함유되어 있기 때문에 입계에 편석할 수 있는 불순물 원소의 양이 작아져 응고균열 감수성이 낮아진다는 가설이다. 이와 함께 보다 설득력있는 이론으로서 계면의 젖음특성, 입계의 형상 등이 제시되어 있다. 입계의 젖음특성은 응고가 초정 오스테나이트로 일어나 최종 조직이 완전오스테나이트인 경우에는 입계는 오스테나이트 상끼리의 경계이며 초정 페라이트로 응고가 일어나는 경우에는 입계는 많은 부분이 오스테나이트, 페라

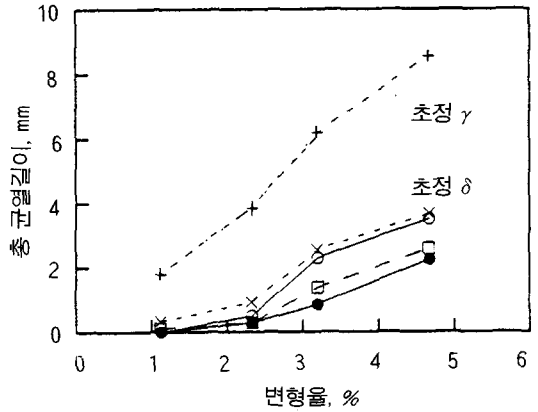


그림 3.15 초정응고 양식에 따른 응고균열 감수성 변화

이트상의 경계로 이루어지게 되는데 서로 다른 상의 계면이 같은 상끼리의 계면보다 쉽게 찢어지기 때문에 균열 감수성이 낮아진다는 이론이다. 입계 형상 측면에서는 초정 오스테나이트 단상 응고가 일어난 경우에는 입자가 조대하고 균열의 잠재경로인 입계가 비교적 굴곡이 없는데 비해 초정 페라이트 응고가 일어나 용접부 조직이 오스테나이트+페라이트 조직인 경우에는 입계가 매우 꼬불꼬불해 균열 발생이 어려워진다는 설명이다.

3.2.4 용접부 성능

오스테나이트계 스테인리스강은 저온에서 고온까지 폭넓은 온도구역에서 사용되고 있다. 용접부는 용접열영향을 받지 않은 모재에 비해 조직, 열이력이 다르기 때문에 기계적 성질도 가열된 온도에 따라서 다르게 나타날 수 있다. 이 절에서는 오스테나이트계 스테인리스강의 용도별로 온도에 따른 기계적 성질을 비교 검토하였다.

먼저 상온의 경우, 이 강종은 통상 고온에서 상온까지 상변태가 없는 오스테나이트 조직을 나타내기 때문에 급냉을 하더라도 경화되지 않고 용접부의 경도도 모재와 유사하다. 상온에서

표 3.3 오스테나이트계 스테인리스강의 기계적 특성(상온)

구 분	기계적 성질			
	Y.S. N/mm ² (kg/mm ²)	T.S. N/mm ² (kg/mm ²)	연신율, %	충격치(20℃) J(kg-m)
용착금속 (D 308)	402 (41)	578 (59)	47	74 (7.5)
모 재 (STS 304)	245 (25)	588 (60)	60	118 (12)

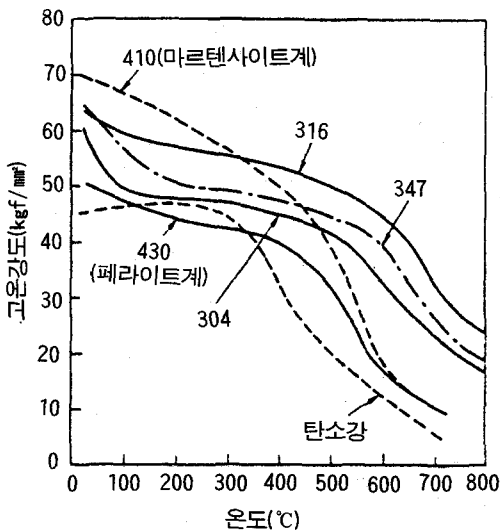


그림 3.16 온도에 따른 오스테나이트계 스테인리스강의 고온강도

의 용접부 기계적 성질도 연성, 인성이 매우 우수하다. 표 3.3은 모재와 용접부의 상온 인장 특성을 비교한 표로서 모재에 비해서 용접부는 항복강도가 높고 인장강도는 거의 유사하며 연신율과 충격치는 약간 낮게 나타남을 알 수 있고 이같은 경향은 거의 모든 종류의 오스테나이트계 스테인리스강에서 유사하게 나타난다.

3.16은 온도에 따른 오스테나이트계 스테인리스강의 인장강도 변화를 탄소강, 페라이트계 및 마르텐사이트계 스테인리스강과 비교한 그래프로서 강종에 관계없이 온도가 증가하면 인장강

도는 떨어지지만 500℃ 이상에서는 오스테나이트계 스테인리스강의 강도가 다른 강종에 비해 훨씬 우수함을 알 수 있다. 그림 3.17은 온도에 따른 STS 304 모재와 용착금속의 인장 특성을 조사한 결과로서 상온에서와 유사하게 인장강도는 거의 동등하나 항복강도는 용착금속이 높고 연신율은 용착금속이 낮게 나타남을 알 수 있다. 크릴 강도의 경우, 그림 3.18에서 알 수 있듯이 크릴 강도에 미치는 용접의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 또 앞 절에서 기술한 바와 같이 오스테나이트계 스테인리스강 용접시에는 용접부의 고온균열 감수성을 낮추기 위하여 용접금속에 수 % 정도의 페라이트가 함유되도록 용접조건을 조절하는데 이 페라이트는 650~900℃ 정도의 고온에서 장시간 유지하면 시그마 상(σ phase)이란 비자성인 Fe, Cr 금속간화합물을 생성해 연신율과 인성을 저하시키기 때문에 주의하여야만 한다. 시그마상은 용접한 그대로도 용접금속에서 생성되는 경우가 있고 또 페라이트를 전혀 함유하지 않는 완전 오스테나이트 조직을 갖는 STS310과 같은 강종이라도 고온에서 오랜 시간 가열되면 오스테나이트 상으로부터 직접 석출되기도 한다. C, Ni와 같은 원소는 시그마상 생성을 억제하고, Cr, Si, Mo, Nb와 같은 원소들은 시그마상 생성을 조장하는 것으로 알려져 있다. 시그마상 취화가 일어난 용접금속은 용체화 처리(1050℃ 부근으로 가열 후 수냉처리)를 해주면

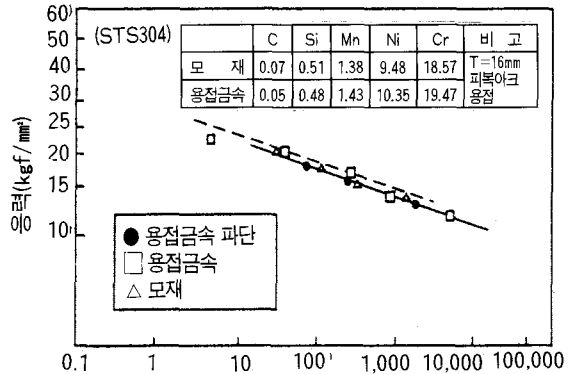
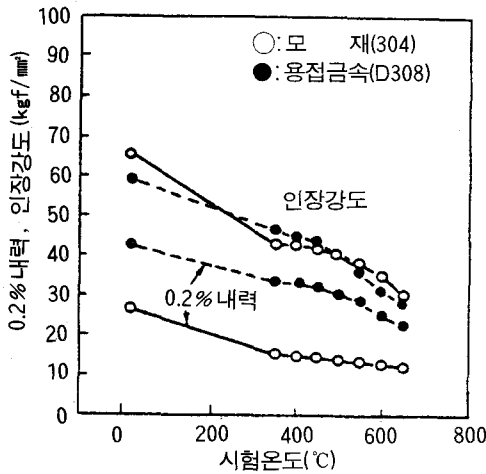


그림 3.18 오스테나이트계 스테인리스강의 크리프 파단강도(용접된 그대로, 용접온도 650°C)

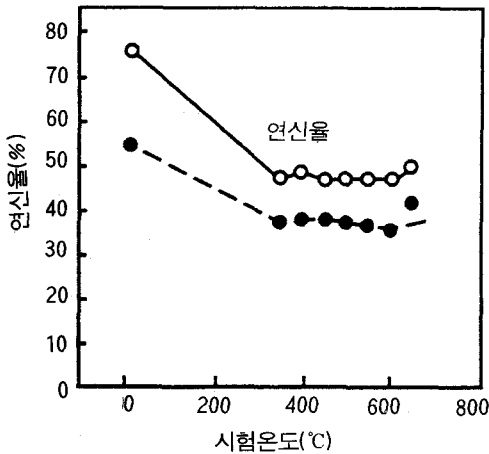


그림 3.17 오스테나이트계 스테인리스강 용접금속 및 모재의 인장특성

인성이 회복된다. 그림 3.19는 충격치에 미치는 페라이트 함량의 영향을 조사한 결과로서 그림에서 x축은 열처리 조건을 나타내는 지수로서 이 지수는 그래프에 나타낸 식과 같이 열처리 온도와 시간의 함수이며 y축은 충격치를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 페라이트 함량이 많을수록 열처리에 의한 충격치 저하가 크게 나타남을 알 수 있다. 또 STS308 보다는

STS316에서 충격치의 저하가 더 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 용접부를 고온에서 장시간 사용하는 경우에는 용착금속 중의 페라이트 양을 작게 억제할 필요가 있으며 시그마상 취화가 문제시되는 STS316, 347과 같은 스테인리스강의 용접에 시그마상 취화 현상이 잘 발생하지 않는 16Cr-8Ni-2Mo계 용접재료가 사용되기도 한다. 충격치의 경우에는 저온에서는 문제가 될 수 있어도 고온에서는 전혀 문제가 없다.

그림 3.20은 시험온도에 따른 각종 스테인리스강의 충격치 변화를 시험한 결과로서 연강, 페라이트계 및 마르텐사이트계(13Cr)는 시험온도가 낮아짐에 따라 충격치가 현저히 떨어지고 있으나 오스테나이트계는 시험온도에 상관없이 우수한 충격치를 나타내고 있음을 알 수 있다. 저온에서의 용접부 인장특성은 모재와 유사하며 저온으로 갈수록 강도는 증가하고 연신율은 약간 저하한다.

그림 3.21은 액체질소 저장온도인 -196°C에서의 모재 및 용접부 충격치를 비교한 그래프로서

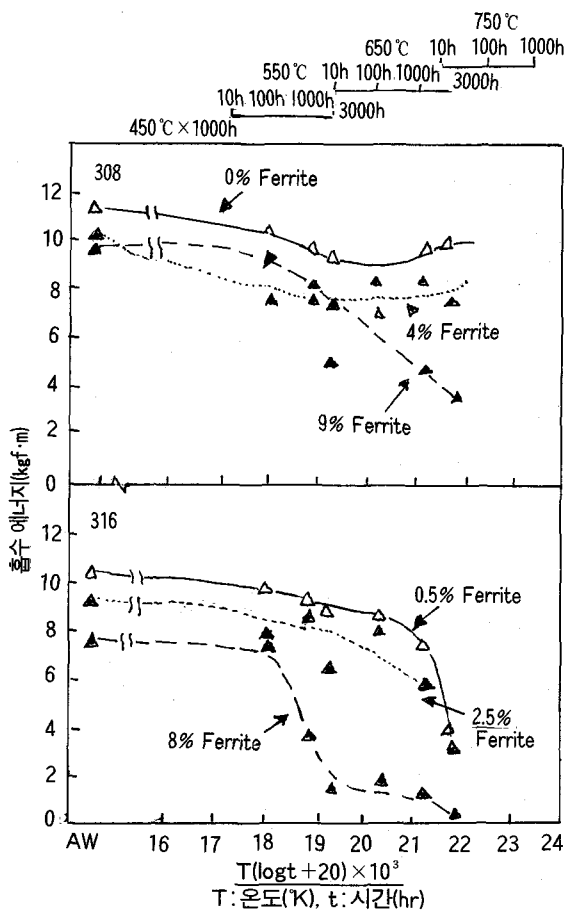


그림 3.19 오스테나이트계 스테인리스강 용접금속의 노치 충격특성에 미치는 장시간 가열의 영향

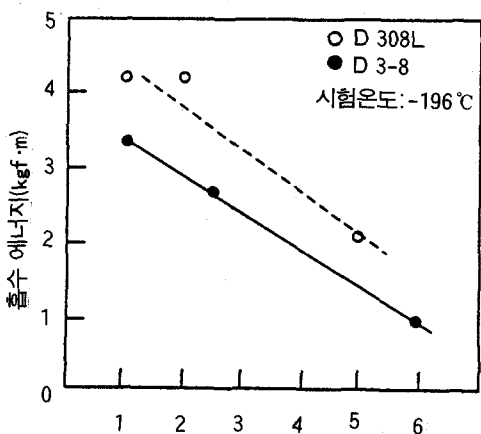


그림 3.22 저온충격특성에 미치는 페라이트양의 영향

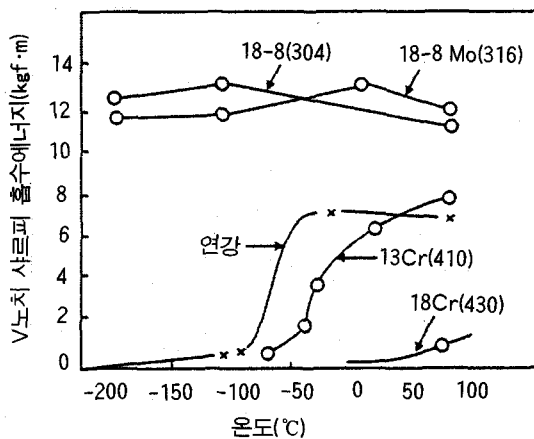
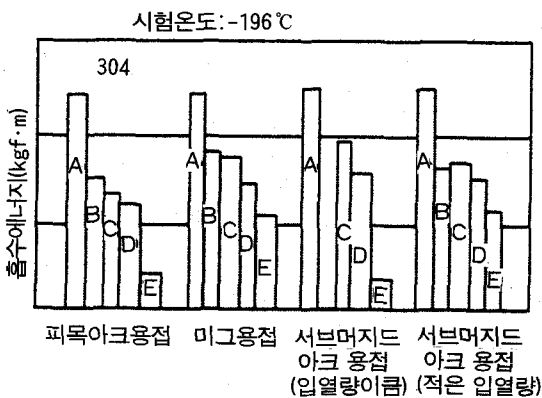


그림 3.20 각종 스테인리스강의 흡수에너지



- A 모재
- B 용접열영향부(용접선으로부터 12.7mm)
- C 용접열영향부(용접선으로부터 3.2mm)
- D 용접열영향부(용접선으로부터 1.6mm)
- E 용접금속

그림 3.21 오스테나이트계 스테인리스강 용접부의 충격 특성

모재에 비해 용접금속의 충격치가 낮으며 용접 열영향부의 충격치도 모재에 비해 다소 떨어짐을 알 수 있다. 이같은 용접부의 저온 충격인성은 페라이트 양에도 영향을 받는데 그림 3.22에 나타난 바와 같이 저온 충격인성은 페라이트 양이 증가함에 따라 떨어지게 된다.