

## 스테인리스강의 용접 특성에 미치는 합금원소의 영향

정 호 신\* · 배 동 수\*\* · 엄 동 석\*\*\*  
(96년 11월 15일 접수)

The Effect of Alloying Elements on Welding Characteristics of Stainless Steel

Ho-Shin Jeong\* · Dong-Su Bae\* · Dong-Suk Um\*\*\*

**Key Words** : Stainless Steel(스테인리스강), Solidification Crack Sensitivity(응고균열 감수성), Cryogenic Toughness(극저온 인성), Corrosion Resistance(내식성), Primary Solidification Phase(응고 초정상)

### Abstract

Stainless steels are widely applicable in various engineering fields for its excellent corrosion and impact resistance. Austenitic weld metal has some ferrite for preventing solidification cracking by ASME specification. Several family of austenitic stainless steel contains varying ferrite contents. But ferrite in austenitic stainless steels is adversely affect weld metal toughness and since fully austenitic grades are known to have good toughness.

Austenitic stainless steel has various alloying addition for improving corrosion resistance, impact toughness and solidification crack resistance. The effect of various alloying elements are not found to be clear in present.

From this view of point, this study tried to establish the criteria of alloy design for austenitic stainless steels by controlling primary solidification mode and clarifying the effect of several alloying elements.

### 1. 서 론

스테인리스강은 내식, 내후성 및 강도 재료로서의 이용뿐만 아니라 고온재료, 저온용 재료 및 원자력재료로서 중요한 위치를 점하고 있다. 이러한

측면에서 스테인리스강은 복합적인 사용환경에 적합한 재료이다. 최근에는 과학 기술의 고도화와 생활 수준의 향상에 따라 스테인리스강의 수요가 급증하고 있을 뿐 아니라 사용환경이 더욱 가혹하게 변화되고 있기 때문에 스테인리스강에 요구되

\* 부경대학교 공과대학

\*\* 동의대학교 공과대학

\*\*\* 부산대학교 공과대학

는 각종의 특성과 용접성이 매우 엄격하게 변화되고 있다.

또 향후에는 해양 및 극지 개발, 심해 및 우주 공간의 이용과 내구 소비재로서의 수요 증가에 따라 스테인리스강의 사용 분야는 급격하게 확대될 것이다.

특히 장치 및 구조재료로 스테인리스강을 사용할 경우에는 모재의 기계적, 물리적 특성이 우수하더라도 용접성이 나쁠 경우에는 실용성이 없게 된다.

ASME 규격에는 용접시의 응고 균열 발생을 방지하기 위하여 상온에서 델타 페라이트가 5% 이상 존재하여야 한다<sup>1)</sup>고 규정하고 있으나 델타 페라이트가 존재할 경우, 고온에서 장시간 사용하면 이 델타 페라이트가 시그마상으로 변태되기 때문에 재료가 취약하게 된다. 또한 델타 페라이트가 존재하면 연성이 낮아질 뿐 아니라 저온에서의 충격 특성이 현저하게 낮아지는 등의 문제점이 존재하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 저자중의 일인과 Masumoto 등은 오스테나이트계 스테인리스강 합금설계시에는 초정 응고 형식을 제어하여 초정 델타 페라이트 응고하여 상온에서는 거의 델타 페라이트가 존재하지 않도록 합금설계하면 용접시의 응고균열 방지는 물론 델타 페라이트가 존재하지 않기 때문에 내식성과 인성이 우수한 스테인리스강을 얻을 수 있다는 사실을 보고한 바 있다<sup>2),3)</sup>. 본 연구에서는 상기한 바와 같은 관점에서 초정 응고 형식 제어 개념을 도입하여 합금 설계하므로써 스테인리스강의 성능 향상은 물론 용접성 향상과 사용환경에 대한 적합성이 우수한 강종의 개발과 용접성 향상, 생산 원가 절감 및 품질 제고를 위하여 연구를 수행하였다.

연구 수행에는 오스테나이트계 스테인리스강 합금 설계시에 초정 응고 mode 제어 개념<sup>4)</sup>을 적용하므로써 용접시의 응고 균열 감수성을 저하시킴과 동시에 내식성과 인성을 확보하고, 스테인리스강에 첨가되는 각종 합금원소가 스테인리스강의 응고균열 감수성과 내식성 및 충격 특성에 미치는 복합적인 영향을 종합적으로 평가할 수 있는 인자를 도출하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험재의 용해

실험에 사용한 재료는 전해 Cr과 전해 Ni 및 전해철을 주원료로 하고 각종의 합금원소를 첨가하여 진공유도 용해한 9종이다. 또한 용해 제조강의 각종의 특성을 수입시판재인 AISI 316, AISI 321과 비교, 평가하였다. 용해제조강과 수입시판재의 화학성분을 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Chemical composition of melt and imported stainless steels

No. of Specimen	Chemical Composition, wt.%											Creq/ Nieq
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	V	Nb	
M-1	0.088	0.93	1.78	0.0080	0.015	9.13	14.87	1.75	0.004	0.53	Tr	1.607
M-2	0.097	0.96	1.83	0.0080	0.015	9.25	15.17	2.31	0.004	0.014	Tr	1.656
M-3	0.097	0.92	1.84	0.0088	0.012	9.70	16.43	2.75	0.005	0.87	Tr	1.741
M-4	0.100	0.99	1.86	0.0065	0.010	9.24	17.01	0.049	0.009	0.57	0.86	1.690
M-5	0.096	0.99	1.88	0.0073	0.011	9.04	17.06	0.017	0.010	0.013	0.88	1.735
M-6	0.100	1.07	1.89	0.0078	0.010	8.90	16.81	0.016	0.009	0.96	0.90	1.734
M-7	0.090	0.99	1.94	0.0066	0.010	8.95	17.05	0.019	0.400	0.60	0.007	1.716
M-8	0.097	0.98	1.98	0.0068	0.010	8.91	17.04	0.017	0.490	0.034	Tr	1.716
M-9	0.094	0.98	1.96	0.0065	0.010	9.07	17.13	0.021	0.600	0.95	Tr	1.740
AISI 316	0.05	0.68	0.96	0.027	0.011	10.13	16.87	2.24	-	-	-	1.818
AISI 321	0.05	0.64	0.9	0.032	0.005	9.06	17.24	-	0.36	-	-	1.851

9종의 용해 제조강은 Si와 Mn의 함유량을 각각 1.0%, 2.0%로 합금설계하였고, Cr과 Ni 함유량은 Cr당량(Creq)과 Ni당량(Nieq)을 조절하기 위하여 단계적으로 변화시켰다.

또한 Mo는 1.75-2.75% 범위에서 3단계로, Ti 첨가량은 0.4-0.6% 범위에서 3단계로 변화시켰다.

또 Fe-Mn과 Fe-Si를 첨가하므로써 용해 작업 중의 탈산과 Mn과 Si의 양을 조정하였으며 Mo, Ti 및 V 첨가량은 Fe-Mo, Fe-Ti, Fe-V을 용탕에 첨가하므로써 조정하였다.

용해 작업에 사용된 각종 철합금 Fe-Mn, Fe-Si, Fe-Mo, Fe-Ti, Fe-V의 순도는 각각 85.98%, 77.24%, 62.32%, 72.25% 및 81.26%이었다.

용해작업에는 진공 용해로를 사용하였으며 1회의 용해량은 약 25kg이었다. 진공 용해후에 강괴를 열간 압연하여 두께 12mm의 강판으로 하였으며, 압연종료온도는 950°C, 고용화열처리 온도는 1050°C이었다.

## 2.2 응고균열시험

오스테나이트계 스테인리스강 용접시의 가장 큰 문제중의 하나는 응고 균열이 발생하기 쉽다는 점이다. 이러한 측면에서 비교재와 용해재의 용접시의 응고균열 감수성은 Trans-Varestraint 시험에 의해 평가하였다.

Trans-Varestraint 시험편은 기계가공하여 Fig. 1과 같은 형상과 크기로 하였다.

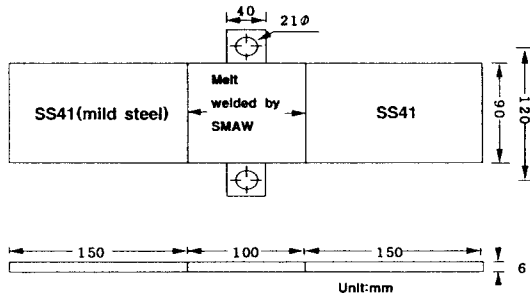


Fig. 1 Shape and dimension of Trans-Varestraint crack test specimen

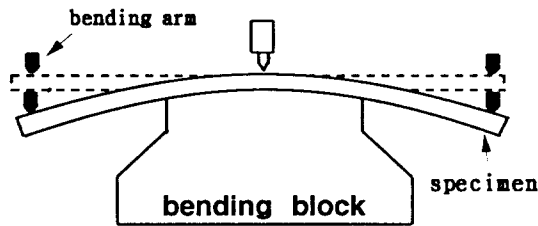


Fig. 2 Schematic representation of Trans-Varestraint test for evaluating solidification crack sensitivity

Trans-Varestraint 시험은 Fig. 2와 같이 굽힘 블록위에 시험편을 고정된 후 시험편의 중앙부를 TIG용접하여 시험편 폭 중앙부에 용접 토치가 도달하였을 때 순간적으로 굽힘 모멘트를 부가하므로써 용접부에 스트레인을 가하는 방식이다. 이 때 시험편에 부가되는 스트레인은 근사적으로  $\epsilon = t/2R$  ( $\epsilon$ : 시험편에 부가되는 스트레인,  $t$ : 시험편의 두께,  $R$ : 굽힘 블록의 반경)로 주어진다.

균열시험시의 용접 조건은 예비 실험을 통하여 건전한 용접 비드가 얻어지는 조건을 설정하므로써 실제의 균열 시험시의 용접조건으로 하였으며 용접전류 200A, 용접전압 25V, 용접속도 20cm/min 및 부가 스트레인은 2%로 하였다.

## 2.3 충격시험 및 내식성 시험

용해제조강 9종과 수입 시판재인 AISI 316 및 AISI 321을 Charpy 표준 시험편으로 충격 시험하여  $-196^{\circ}\text{C}$ 와  $20^{\circ}\text{C}$ 에서의 흡수 에너지를 조사하였다.

또한 모재 및 용접재를 KS D 0224에 의거하여 10% $\text{HNO}_3$ -3% $\text{HF}$  용액중에서의 입계부식 감수성을 조사하였다. 시험편의 두께는 12mm로서 2.2의 용접조건과 동일한 조건으로 TIG 용접한 후 기계가공하였으며, 시험편의 표면 거칠기를 통일하기 위하여 사포 320#까지 연마하여 가능한 한 시험편의 표면 조건을 통일하여 부식 시험하였다.

부식용액은 순도 65%의 질산과 순도 47%의 불화수소 및 이온 교환수를 써서 10% $\text{HNO}_3$ -3% $\text{HF}$ 로 조제하였다. 부식용액의 양은 시험편 표면적  $1\text{cm}^2$  당 50ml 이상으로 하여  $70^{\circ}\text{C}$ 에서의 부식 감량을 0.001g 단위까지 측정하여 단위시간당의 부식도를 구하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

용해재료는 초정응고 mode를 제어하여 초정 응고상이 델타 페라이트상이며 응고 종료후 델타 페라이트상이 존재하지 않거나 최소화되도록 하기 위하여 Suutala의 당량식<sup>5)</sup>을 사용하여  $C_{req}/N_{req}$ 의 값이 1.607~1.741의 범위가 되도록 합금설계하였다.

탄소의 함유량은 0.06%를 목표로 하였으나 용해 재료로서 합금철을 다량 사용한 관계로 설계치보다 약간 높은 0.088~0.100% 사이의 값을 나타내었다.

한편 규소와 망간의 함유량은 각각 1.0%, 2.0%를 목표로 하였으며 규소 함유량은 0.973~1.11%로, 망간의 함유량은 1.77~1.93%로서 목표치와 거

의 유사하였다. 인과 유황의 함유량은 각각 0.010~0.012%, 0.010~0.015%의 범위에 있었고 이들 불순물 원소의 함유량은 통상의 시판강과 거의 비슷한 수준이다.

또 용해제 M-1~M-3는 Mo 첨가량이 각각 1.75, 2.31, 2.75%이며, M-4~M-6의 경우에는 Nb의 첨가량이 0.9% 정도이다. 또 M-7~M-9의 Ti 첨가량은 각각 0.4, 0.49, 0.6%이다.

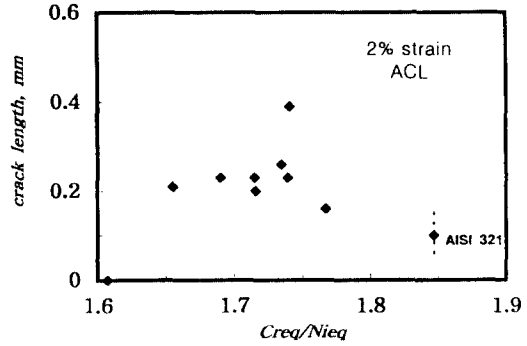
용해재료의 초정 응고상은 절단 상태로로부터 추정된 결과 M-1은 초정  $\delta$  응고하여 L+ $\gamma$ + $\delta$ 의 3원 공정 영역과  $\gamma$ + $\delta$  고상영역을 거쳐 응고되므로 최종적인 현미경 조직은  $\gamma$  주체의 조직과 소량의  $\delta$  델타 페라이트가 함유되는 경우이다.  $Creq/Nieq$ 의 값이 1.607보다 큰 M-2~M-9는 초정  $\delta$  응고하여  $\delta$  단상으로 응고가 종료된다. 현미경 관찰에 의하여 용접부의 델타 페라이트 양을 구한 결과, M-2~M-9의 경우에는 2~5% 정도의 델타 페라이트를 함유하였다.

### 3.1 응고 균열 시험

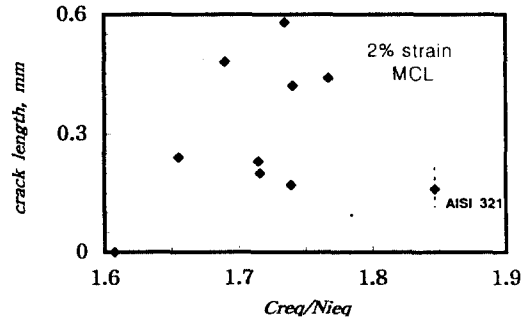
Trans-Varestraint 시험에 의한 응고 균열 시험 결과를 Fig. 3에 나타낸다.

부가 스트레인 2%인 경우의 균열의 평균 길이(ACL), 최대 균열 길이(MCL) 및 균열길이의 총합(TCL)과  $Creq/Nieq$ 값과의 관계를 각각 Fig. 3(a), Fig. 3(b), Fig. 3(c)에 나타내었다. 어느 경우에도  $Creq/Nieq$ 의 값이 1.607인 경우에는 균열이 전혀 발생되지 않음에 반하여  $Creq/Nieq$ 의 값이 이보다 커지면 균열 감수성이 커짐을 알 수 있다. 이것은 益本과 鄭<sup>(2)</sup>의 연구 결과인 초정  $\delta$  응고하여 3원 공정 영역을 거쳐 응고가 종료될 경우에는 응고 조직의 계면에 저융점의 불순물 원소가 농축되기 어렵기 때문에 균열이 발생되기 어렵다는 사실과 일치하는 것이다.

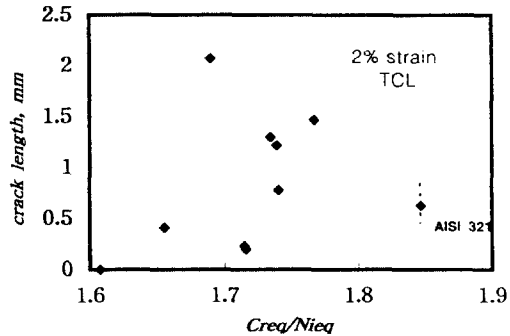
또  $Creq/Nieq$ 의 값이 1.607보다 큰 경우에는 초정  $\delta$ 로 응고하여  $\delta$ 로 응고가 종료되는  $\delta$  단상 응고이기 때문에 균열 감수성이 높아짐을 알 수 있다. 또한 초정  $\delta$  응고하여  $\delta$  단상으로 응고가 끝나는 범위에서는  $Creq/Nieq$ 값의 변화에 따른 균열 감수성에는 큰 차이가 존재하지 않았다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Change of solidification crack sensitivity at 2% augmented strain

Fig. 3(b)의 최대 균열의 경우, M-3~M-6의 균열 감수성이 M-2, M-7~M-9 및 AISI 321에 비하여 약간 높은 경향을 나타내었으나 AISI 321 상당재인 M-7~M-9와 AISI 321사이의 응고 균열 감수성에는 그다지 차이가 없었다.

Fig. 3(c)는 부가 Strain이 2%일 경우의 응고 균

열 시험 결과로서 각 시험재 균열 길이의 총합의 변화를 나타낸다. 이 경우 용해재 M-1의 경우, 전혀 균열이 발생되지 않았으나 M-2~M-9 및 수입재 AISI 321에서는 균열이 다수 발생되었다.

특히 M-7~M-9는 AISI 321상당재로 제조한 것으로 M-7과 M-8의 경우, AISI 321에 비해 상당히 응고 균열 감수성이 낮음을 알 수 있다. 특히 M-7~M-9에 있어서는 V 첨가의 영향으로 V첨가량 0.6%까지는 응고 균열 감수성이 낮지만, V를 0.95% 함유하는 M-9의 경우 균열감수성이 상당히 커짐을 알 수 있었다. 또한 본 연구에서 용해제조한 강재가 모두 초정 델타 응고하기 때문에 응고균열 감수성에는 큰 차이가 존재하지 않는 것으로 사료된다.

전반적으로 비교재와 용해재 사이에는 응고 균열 감수성에 큰 차가 존재하지 않기 때문에 본 연구의 목표인 기존 시판재보다 크롬과 니켈의 첨가량을 감소시킬 수 있다는 가능성을 충분히 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서 용해 제조한 시험재 M-1~M-9는 탄소함유량 0.06%를 목표로 하였으나, 실제의 탄소함유량은 대체로 0.09% 정도로서 탄소 함유량이 높음에도 불구하고 응고 균열 감수성은 비교재인 수입 시판재와 뚜렷한 차가 없었다. 이것은 탄소 함유량이 높음에도 불구하고 Ti, Mo, V 등 미량 원소의 첨가로 용접성이 개선될 수 있음을 증명하는 것이다. 다만 V의 경우, 0.9% 이상 첨가되면, 응고 균열 감수성이 커지기 때문에 미량 원소의 첨가량의 결정에는 많은 주의가 필요하다.

Masumoto와 Jeong<sup>21)</sup> 및 Thier<sup>7)</sup>에 의하면 스테인리스강 용접부의 초정 응고상이 응고 균열 방지 측면에서 실제적이고 중요한 역할을 한다. 즉 초정 응고상이 오스테나이트이면 응고 균열 감수성이 크며 초정 응고상이 델타일 경우에는 응고균열 감수성이 낮아진다.

Fig. 4a)는 Trans Vareststraint 시험후의 균열을 나타낸 것으로 응고 균열은 용접부의 ripple선에 거의 수직 방향으로 발생되어 있다. 따라서 용접금속의 용융 경계부 근처에서 부가 스트레인이 가해진 순간 용융선에 직각 방향으로 균열이 발생, 진전함을 알 수 있다.

Fig. 4b)는 이 균열부를 전자현미경으로 관찰한

것으로 주상정이 발달되어 있고 전형적인 응고균열임을 알 수 있다. 따라서 용접중 스트레인이 부가된 순간에 균열이 발생된 것임을 알 수 있다.

또 용해 제조강 M-1~M-9의 응고 조직은 델타 페라이트가 vermicular형태 또는 lacy상으로 존재하였다.

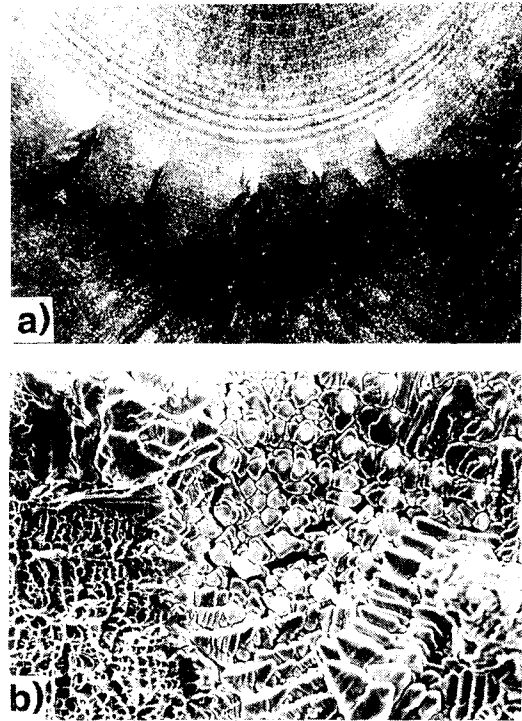


Fig. 4 Weld solidification crack morphology and its SEM fractography

### 3.2 충격시험

오스테나이트계 스테인리스강은 특히 저온 및 극저온에서의 충격 특성이 우수한 재료이다. 스테인리스강의 경우에는 내식성이나 내열성의 향상을 위하여 다양한 합금원소가 첨가되고 있고 이에 따라 각종의 탄화물이 존재하게 된다. 그러나 이러한 탄화물은 인성에 영향을 미치게 되지만 이와 같은 탄화물 형성원소의 영향을 종합적으로 검토한 예는 찾아 보기 어렵다. 본 연구에서는 각종 합금원

소의 탄화물 형성능과 이들 원소의 원자량비를 종합적으로 고려하여 각종 원소의 영향을 정량적으로 검토할 수 있는 식을 만들어 이의 유효성을 검토하기로 하였다.

Fig. 5에는 크롬 탄화물 이외의 탄화물을 형성하는 원소인 Ti, Nb, Mo 및 V을 탄소와의 원자량비를 고려하여 정의한 탄화물 당량식  $CFE(\%) = \frac{Ti}{4} + \frac{Nb}{7.7} + \frac{Mo}{8} + \frac{V}{4.25}$ 와 흡수 에너지와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림중의 두 선 사이의 영역 내에서  $Ceq$  값이 증가할수록 흡수 에너지 값이 증가함을 알 수 있다. 즉 크롬 이외의 탄화물 형성원소 첨가량이 늘어날수록 흡수 에너지에 유해한 크롬 탄화물이 생성되기 어렵기 때문에 흡수 에너지가 증가됨을 알 수 있다.

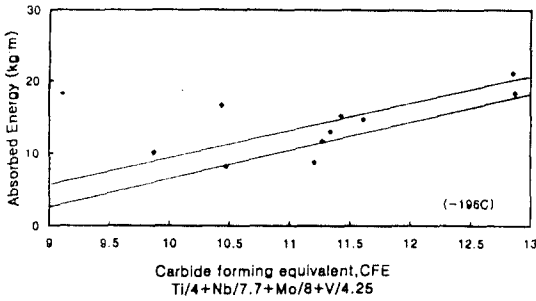


Fig. 5 The relation between carbide forming equivalent, CFE and cryogenic toughness of austenitic stainless steel

철강재료의 충격 흡수 에너지는 Ni 함유량이 많아질수록 증가하는 경향을 나타낸다는 것은 널리 알려져 있는 바이다. 그러나 스테인리스강의 경우에는 이 밖에도 각종의 원소가 첨가되어 있다. 본 연구에서도 Ni 함유량과 충격 흡수 에너지와의 상관관계를 조사하였으나 상관관계는 존재하지 않았다. 이와 같은 측면에서 흡수 에너지에 미치는 각종 원소의 복합적인 영향을 평가하기 위하여 Ni과 Mn 뿐만 아니라 Ti, V, Mo, Nb과 같이 스테인리스강 제조시에 주로 첨가되는 탄화물 형성원소를 고려하여 만든 식  $Eeq(\%) = Ni + \frac{1}{2}Mn + Ti + V + \frac{1}{2}Nb + \frac{1}{2}Mo$ 에 의하여 흡수 에너지를 평가하였다.

Fig. 6은 20°C에서의 흡수 에너지와  $Eeq$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와

같이 약간의 산포는 있지만 흡수 에너지와  $Eeq$  사이에는 직선적인 상관 관계가 존재한다.

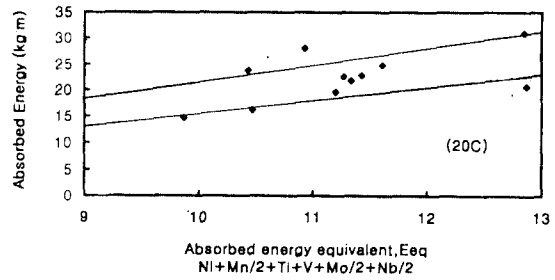


Fig. 6 The relation between absorbed energy equivalent and Charpy absorbed energy at 20C

Fig. 7에는 -196°C에서의 흡수 에너지와  $Eeq$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 이 경우에도 20°C의 경우와 같이 흡수 에너지와  $Eeq$  사이에는 대체적으로 직선적인 상관관계가 존재함을 알 수 있다. 따라서 오스테나이트계 스테인리스강을 합금설계할 경우에는 이와 같은 사항을 고려하여 합금설계하므로써 최적의 합금설계가 가능하리라고 사료된다.

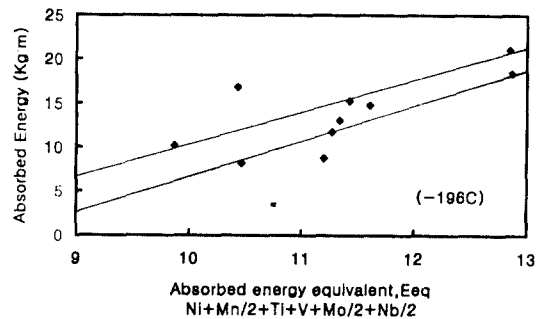


Fig 7 The relation between absorbed energy equivalent and Charpy absorbed energy at -196C

### 3.3 부식 시험

스테인리스강의 내식성에는 Cr첨가량이 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연

구의 결과, Cr함유량과 내식성에는 뚜렷한 상관관계가 존재하지 않았다. 이것은 Cr 이외에 각종의 합금원소가 첨가되기 때문에 내식성을 종합적으로 평가하기 위해서는 여러 원소의 영향을 복합적으로 고려하여야 한다는 것을 의미한다. 이러한 측면에서 탄화물 형성능이 큰 원소를 선정하여 정의한 탄화물 당량식  $Ceq(\%) = Ti/4 + Nb/7.7 + Mo/8 + V/4.25$ 와 부식도와와의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림에서도 두 직선으로 둘러 싸인 범위내에서는 Ceq값이 증가함에 따라 부식도가 커짐을 알 수 있다. 이 의미는 탄화물 형성원소 첨가량이 늘어남에 따라 탄화물의 양이 증가하며 이에 따라 오스테나이트 매트릭스와 탄화물 사이에 국부적인 전지 작용이 일어나기 쉽고 이에 따라 부식도가 커진다는 것을 의미한다. 따라서 탄화물 형성원소의 첨가에는 주의가 필요함을 알 수 있다. 즉 후술하는 바와 같이 탄화물 형성원소를 첨가할 경우에는 적정량의 Cr을 복합 첨가하여야 함을 알 수 있다.

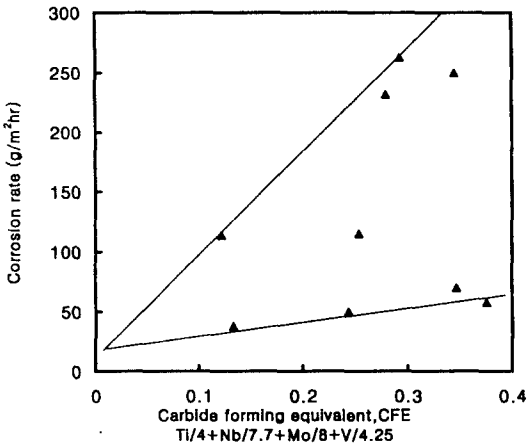


Fig. 8 The effect of carbide forming equivalent, CFE on intergranular corrosion rate

Fig. 9에는 상기한 탄화물 당량원소와 Cr 함유량을 고려한 값과 내식성과의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 이들 원소 첨가량이 많아질수록 내식성이 향상됨을 알 수 있다. 즉 각종의 원소가 복합 첨가되면 이들 원소의 상호 작용에 의해 내식성에 가장 유해한 원인이 되는

크롬 탄화물의 형성이 저지되기 때문에 내식성이 증가되는 것을 알 수 있다.

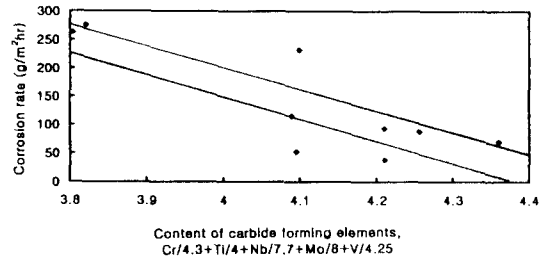


Fig. 9 The effect of Cr and other carbide forming elements on intergranular corrosion rate

따라서 스테인리스강의 내식성은 상기한 바와 같이 본 연구에서 제안한 당량식에 의해 평가될 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

오스테나이트계 스테인리스강 용해제와 시판제인 AISI 316, AISI321의 용접성, 내식성 및 극저온 인성에 미치는 각종 첨가 원소의 영향을 조사하기 위한 연구를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) Trans-Varestraint 시험에 의하여 용해 제조강과 시판제의 응고 균열 감수성을 비교 평가한 결과, 응고균열 감수성과 Suutala의 당량식 사이에는 뚜렷한 상관관계가 존재하지 않았다. 시판제인 AISI 316 및 321에 비해 용해제조강의 경우에는 탄소 함유량이 매우 높음에도 불구하고 응고 균열 저항력이 전반적으로 우수하거나 거의 동등하였다.
- (2) Charpy V notch 표준 시험편에 의한 극저온 및 상온에서의 인성을 조사한 결과, 스테인리스강의 흡수 에너지는 본 연구에서 제안한 식  $Ni + Mn/2 + Ti + V + Mo/2 + Nb/2$ 에 의하여 정량적으로 평가할 수 있었다.
- (3) 입계 부식 감수성을 낮추기 위해서는 Cr의 첨가와 이 밖에 Ti, V, Mo, Nb의 첨가가 매우 유효

하였다. 또한 본 연구에서 제안한 탄화물 형성능을 고려하여 만든 당량식( $Ti/4+Nb/7.7+Mo/8+V/4.25$ )에 의해 정량적으로 내식성을 평가할 수 있었다.

- (4) 이상의 응고 균열 감수성과 극저온 및 상온에서의 인성, 내식성을 종합적으로 검토한 결과, 초정 응고 형식 제어에 의하여 합금설계하므로써 스테인리스강의 각종 물성의 향상과 고가 첨가 원소인 크롬과 니켈의 첨가량을 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- 1) ASME, "Boiler and Pressure Vessel Code", NB-2433.2, 1983
- 2) 益本 功, 鄭鎬信, "오스테나이트계 스테인리스강의凝固割れに及ぼす初晶凝固過程の影響", 日本 溶接學會 全國大會 講演集, vol.43, pp.274-275, 1988
- 3) 益本 功, 鄭鎬信, "오스테나이트계 스테인리스강의耐食性及び極低溫靱性に及ぼす初晶凝固様式の影響", 日本溶接學會 全國大會 講演集, vol.39, pp.126-127, 1986
- 4) 정 호신, "초정 응고형식 제어에 의한 오스테나이트계 스테인리스강종의 개발", 한국어업 기술 학회지, vol.27-2, pp.132-140, 1991
- 5) Suutala N. et al, "Ferritic-Austenitic Solidification Mode in Austenitic Stainless Steel", Metal.Trans. A, vol.11A, pp.717-725, 1980
- 6) AWS, "Welding Handbook vol.4 Metals and their weldability", 7th ed., pp.105, 1982
- 7) Their H., "Delta-ferrit und heissrisse beim schweissen chemisch-bestandiger austenitischer stahle", DVS-Berichte, vol.41, pp.100-104, 1976