

오스테나이트계 스테인리스강의 物性に 미치는 初晶凝固 形式의 影響

鄭 鎬 信

釜山水産大學校

(1990년 11월 20일 접수)

The Effect of Primary Solidification Mode on Physical Properties of Austenitic Stainless Steels

Ho Shin JEONG

National Fisheries University of Pusan

(Received November 20, 1990)

The effect of primary solidification phase on the solidification cracking sensitivity, corrosion resistance and toughness at cryogenic temperature was investigated for the austenitic stainless steel welds.

The conclusions were summarized as follows;

1. Solidification crack sensitivity of austenitic stainless steel welds depends on the primary solidification mode.
2. Austenitic stainless steels were very susceptible to solidification cracking in case of solidification as primary γ and immune when solidified as primary δ .
3. When the ratio of Creq/Nieq is in the range of 1.46 to 1.55, the most resistance against solidification cracking was obtained.

These results agreed well with the relationship between primary solidification mode, corrosion resistance and toughness at cryogenic temperature.

4. Optimum toughness, corrosion and solidification cracking resistance can be obtained when alloys having chemical compositions described above and solidifies as primary δ containing no ferrite at room temperature.

緒 論

오스테나이트계 스테인리스강은 高溫 특성뿐만 아니라 極低溫에서의 靱성이 풍부한 장점이 있으나 용접시의 凝固龜裂 感受성이 높고 염소 이온이 존재하는 환경하에서는 응력부식 균열이 발생되기 쉬운 치명적인 약점을 안고 있다.

종래의 오스테나이트계 스테인리스강으로는 熔接성과 耐蝕性 및 저온에서의 靱성을 동시에 만족시킬 수 없다. 왜냐하면 용접시의 凝固龜裂 발생을 방지하기 위해서는 용접부에 5% 이상의 페라이트가 함유되어야 한다는 종래의 이론에 따라 ASME¹⁾에서는 이것을 규격으로 정해두고 있다. 따라서 이렇게하여 생성된 페라이트는 靱성의 저하는 물론 耐蝕성을 손상시

키기 때문이다.

그러나 오스테나이트계 스테인리스鋼의 凝固龜裂 발생은 상온에서의 페라이트와는 관계가 없고 응고시의 初晶凝固相에 지배된다고 하는 益本²⁾과 鄭³⁾의 이론에 따라 현재 初晶凝固形式과 凝固龜裂 感受性과의 관계가 널리 연구되고 있다.

또 오스테나이트계 스테인리스강의 사용환경이 더욱더 가혹해짐에 따라 내식성과 極低溫에서의 靱性に 대해서도 연구^{4~7)}가 이루어지고 있으나 熔接性이 우수하면서 동시에 耐蝕性과 靱성이 우수한 스테인리스鋼은 개발되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 初晶凝固 形式制御 개념³⁾을 도입하여 初晶凝固 조직을 적절히 제어하므로써 熔接性, 耐蝕性 및 靱성이 모두 우수한 오스테나이트계 스테인리스鋼의 개발에 대한 유효 데이터의 정립을 목표로 하였다.

實驗方法

1. 溶解 材料

실험에 사용한 재료는 크롬 및 니켈의 함유량을 단계적으로 변화시켜 응고시의 初晶相을 오스테나이트 또는 페라이트로 하기 위하여 크롬 당량과 니켈 당량의 비(Creq/Nieq)가 1.19~2.48의 범위가 되도록 合金設計하였다.

용해 작업은 이러한 합금설계를 기초로 하여 합금 No. 1부터 합금 No. 6까지는 ferro-Cr 및 ferro-Ni

을 첨가하여 Si와 Mn의 함유량을 조절하였고, 합금 A-F는 주로 Fe, Ni, Cr만으로 용해작업을 실시하였다.

용해작업은 眞空溶解爐를 사용하였으며 1회의 용해량은 약 30kg으로 하였다. 眞空溶解 작업후 熱間壓延하여 두께 12mm의 스테인리스 鋼板을 만들었다. 壓延 마무리 온도는 950°C이었고, 熱間壓延 종료후 모든 강판을 1050°C에서 40분간 固溶化熱處理하여 불순물 및 탄화물 등을 再固溶시켜 강판을 균질화하였다.

용해제조한 12강종의 화학조성을 Table 1에 나타낸다.

2. 引張試驗

용해 제조한 12강종의 기계적 특성을 알기 위하여 인장시험을 실시하였다. 인장시험은 Fig. 1과 같은 형상과 치수를 갖는 JIS 10호 시험편을 사용하였다. 인장시험시의 표점거리는 50mm, 변형속도는 1분당 5mm로 하였다.

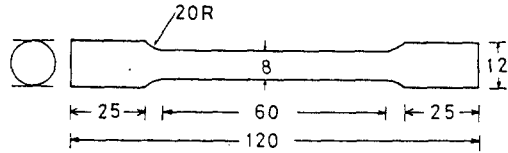


Fig.1. Tension test specimen.

Table 1. Chemical compositions of test materials

| Melts | Chemical composition(wt. %) | | | | | | | | | | |
|-------|-----------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|------------------|-----------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | V | N ₂ * | O ₂ * | Creq/Nieq |
| 1 | 0.041 | 0.14 | 0.15 | 0.010 | 0.008 | 17.16 | 14.36 | 0.030 | 320 | 260 | 1.19 |
| 2 | 0.036 | 0.14 | 0.19 | 0.010 | 0.007 | 18.32 | 13.28 | 0.034 | 292 | 230 | 1.38 |
| 3 | 0.036 | 0.25 | 0.16 | 0.009 | 0.007 | 17.84 | 12.56 | 0.050 | 96 | 240 | 1.42 |
| 4 | 0.035 | 0.23 | 0.15 | 0.008 | 0.008 | 18.28 | 11.92 | 0.069 | 205 | 290 | 1.53 |
| 5 | 0.054 | 0.26 | 0.13 | 0.009 | 0.011 | 19.32 | 9.24 | 0.38 | 287 | 330 | 2.09 |
| 6 | 0.053 | 0.27 | 0.17 | 0.014 | 0.009 | 20.16 | 8.12 | 0.25 | 196 | 218 | 2.48 |
| A | 0.073 | — | 0.03 | 0.004 | 0.007 | 16.10 | 13.32 | — | 43 | 143 | 1.21 |
| B | 0.055 | — | 0.009 | 0.004 | 0.007 | 17.07 | 12.48 | — | 43 | 270 | 1.36 |
| C | 0.061 | — | 0.007 | 0.004 | 0.007 | 17.34 | 11.82 | — | 45 | 293 | 1.46 |
| D | 0.057 | — | 0.005 | 0.004 | 0.007 | 17.71 | 11.38 | — | 49 | 300 | 1.55 |
| E | 0.052 | — | 0.005 | 0.004 | 0.007 | 18.13 | 10.66 | — | 53 | 425 | 1.70 |
| F | 0.066 | — | 0.008 | 0.004 | 0.007 | 19.32 | 8.78 | — | 56 | 319 | 2.20 |

* : ppm

3. Vastrestraint 凝固龜裂 試驗

용해제조한 12강종의 용접시의 凝固龜裂 感受性を 평가하기 위하여 Vastrestraint 시험을 실시하였다. 시험편의 형상 및 치수를 Fig. 2에 나타낸다.

시험편은 기계가공하기 전에 시험편 양단을 SS41로 용접하여 시험편의 길이를 확보한 후 기계가공하였다.

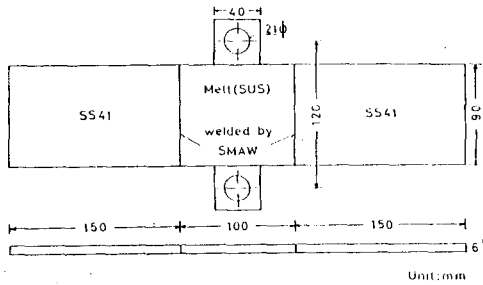


Fig. 2. Shape and dimensions of Vastrestraint test specimens.

Vastrestraint 응고균열 시험방법은 Fig. 3과 같이 굽힘 블록 위에 시험편을 고정한 후 TIG 용접에 의하여 시험편 중앙부를 용접하여 용접중에 순간적으로 굽힘 모멘트를 부가하므로써 용접부에 변형률 (strain)을 부가하는 형식이다. 이 때 시험편에 부가되는 변형률은 보 (beam)이론에 따라 근사적으로 다음 식으로 주어진다.

$$\epsilon = t/2R \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

여기서 ϵ : 시험편에 부가되는 변형률
 t : 시험편의 두께
 R : 굽힘 블록의 반경

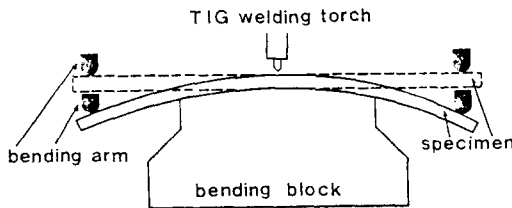


Fig. 3. Schematic representation of Vastrestraint test for evaluating solidification crack sensitivity.

시험시의 용접조건은 예비 실험을 통하여 건전한 비드 외관이 얻어지는 용접 조건을 설정하여 용접전류 200A, 전압 25V, 용접속도 20cm/min로 하였다.

시험시 굽힘 모멘트를 가하는 시점은 TIG 토치가 시험편 중앙부로 이동하여 왔을 때 즉 용접개시후 14초로 하였고, 크레이터 균열 발생을 방지하기 위하여 굽힘 모멘트 부가후에도 용접을 계속하였다.

굽힘 블록의 직경은 400mm, 시험편의 두께는 6mm로 부가되는 변형률은 1.5%로 통일하여 시험재의 初晶凝固相의 변화에 따른 凝固龜裂 感受성의 변화를 조사하였다.

4. 衝擊試驗

용해제조한 12강종의 衝擊 吸收 에너지의 변화를 조사하기 위하여 시험온도를 0, -50, -100, -150, -196°C로 하여 각 온도에 따른 충격 흡수 에너지의 변화와 極低溫 (-196°C)에서의 인성을 평가하였다.

5. 耐蝕性 試驗

오스테나이트계 스테인리스鋼은 酸化性酸과 非酸化性酸에 대한 부식거동에 현저한 차가 있으므로 모재 및 용접재에 대하여 5% H₂SO₄ 용액에 의한 全面腐蝕 실험과 10% HNO₃-3% HF에 의한 입계부식 시험을 실시하였다.

全面腐蝕 실험시에는 5% 황산 용액 중에 시험편을 침적하여 연속 6시간의 비등 시험을 실시하였다. 粒界腐蝕 시험은 시험온도 70°C의 부식용액중에서 연속 2시간 유지한 후 중량 변화량을 측정하였다.

또 腐蝕度는 2회의 시험에 의한 중량 변화량의 평균값을 g/m²·hr로 환산하였다. 시험편의 크기는 약 49.5×10.5×6.0mm로 하였고 시험편의 표면적은 17.6~18.6cm²이었다. 시험편의 表面粗度를 통일하기 위하여 濕式으로 사포 #240까지 연마한 후 시험을 실시하였다.

6. 顯微鏡 組織 및 電子顯微鏡 觀察

용해 제조한 12강종의 初晶凝固形式을 명확히 하기 위하여 시험편을 칼라에칭하여 初晶凝固形式을 관찰하였다.

칼라에칭液으로는 LBI(K₂S₂O₈ 0.5g+NH₄F-HF 20g+증류수 100g)을 사용하였다. 또 응고균열

시험편 및 충격 시험편의 파면과 부식시험후의 시험편 표면상태를 走査式 電子顯微鏡으로 관찰하였다.

實驗結果 및 考察

1. 顯微鏡 組織 觀察

용해제조강의 응고형식이 初晶 오스테나이트(γ)인 경우와 初晶 페라이트(δ)인 경우의 현미경 사진을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타낸다.

Fig. 4는 크롬과 니켈의 함유량이 각각 18.32%, 13.28%이며 Creq/Nieq의 값이 1.38인 합금 No. 2의 응고조직이다. 이 합금의 경우 응고조직은 오스테나이트 單相으로 되어 있고 페라이트 상은 전혀 관찰되지 않으므로 초정 페라이트 응고한 것을 알 수 있다.

初晶 凝固相이 페라이트인 경우의 응고조직을 Fig. 5에 나타낸다. 이 합금은 크롬 및 니켈의 함유량이 각각 19.32%, 9.24%이며 Creq/Nieq의 값이 2.09인 합금 No. 5이다. 이 경우 오스테나이트의 코어

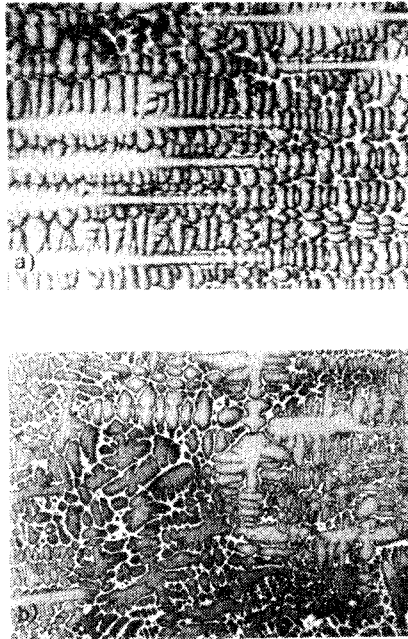


Fig. 4. Microstructure of 18.32Cr-13.28Ni(Creq/Nieq=1.38, alloy No. 2).

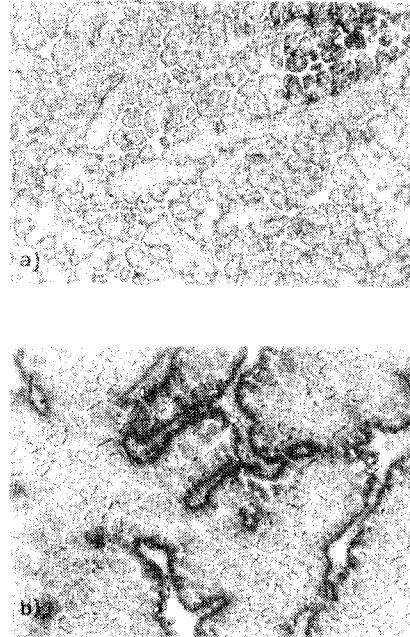


Fig. 5. Microstructure of 19.32Cr-9.24Ni(Creq/Nieq=2.09, alloy No. 5).

(core) 내부에 미세한 페라이트가 관찰됨을 알 수 있다. 이와 같이 페라이트相은 모두 오스테나이트 코어 내부에 존재하므로 初晶 페라이트相으로 응고가 시작되었음을 알 수 있다. 즉 初晶 페라이트相으로 응고가 시작되어 냉각과 더불어 페라이트가 오스테나이트로 고상변태되며, 변태되지 않은 初晶 페라이트가 상온에서 잔류하게 된 것이다.

이상과 같이 현미경 관찰 및 절단상태도 작성에 의하여 初晶凝固相을 결정한 결과, 합금 No. 1-3, A, B는 初晶 오스테나이트 응고, No. 4, C, D는 初晶 페라이트 응고하여 3相共晶 영역을 거쳐 응고가 완료되며 No. 5, 6, E, F는 初晶 페라이트 응고함을 알 수 있었다.

2. 引張試驗

12강종에 대한 인장시험 결과를 Table 2에 나타낸다. 이 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 0.2% offset 응력은 20.43~32.43kg/mm²로서 합금조성의 변화 즉 初晶凝固形式의 변화에 따른 차이는 명확하지 않다.

인장강도는 합금 No. 1~6 및 No. A~F에 있어

Table 2. Mechanical properties of test materials

| Melt | Yield st. (kg/mm ²)* | Tensile st. (kg/mm ²) | Elongation (%) |
|------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| 1 | 23.76 | 52.67 | 50.07 |
| 2 | 24.0 | 52.83 | 62.63 |
| 3 | 22.57 | 52.73 | 64.63 |
| 4 | 22.43 | 53.63 | 65.07 |
| 5 | 25.50 | 60.87 | 65.87 |
| 6 | 32.43 | 64.50 | 57.13 |
| A | 21.97 | 52.23 | 60.33 |
| B | 22.06 | 53.13 | 63.83 |
| C | 20.43 | 53.10 | 66.13 |
| D | 20.83 | 55.0 | 65.07 |
| E | 20.53 | 57.03 | 65.40 |
| F | 27.47 | 63.97 | 58.63 |

* : 0.2% offset stress

서 각각 52.67~64.50, 52.23~63.97kg/mm²으로 대체로 52~55 kg/mm²의 범위에 있지만 상온에서 델타 페라이트를 함유하는 鋼種인 합금 No.5,6 및 E, F의 경우 이보다 약간 높아서 57~64kg/mm²의 범위에 있다. 즉 初晶 페라이트相만으로 응고된 강종의 경우, 初晶 오스테나이트 또는 3相共晶영역을 거쳐 응고하는 경우보다 인장강도가 약간 높음을 알 수 있다.

또 연신률은 대체로 60%이상으로 연신률이 양호함을 알 수 있으나 初晶凝固 形式에 따른 차이는 명확하지 않다.

3. Varestraint 凝固龜裂試驗

Fig. 6에는 합금조성의 변화, 즉 初晶凝固相의 변화에 따른 응고균열 감수성의 변화를 나타내고 있다. 균열길이의 총합 및 최대 균열의 길이와 합금조성과의 관계를 보면 初晶凝固相이 오스테나이트인 경우에는 응고균열 감수성이 높고, 初晶凝固相이 페라이트인 경우에는 낮음을 알 수 있다. 또한 페라이트 함유량이 많아지면 다시 응고균열 감수성이 커지는 경향을 나타낸다.

따라서 初晶 페라이트만으로 응고하는 경우, 응고균열 발생을 방지하기 위해서는 응고종료후에 잔류하는 페라이트의 함유량을 적게 하여야 한다.

Kujanpaa²⁾ 등의 연구 결과에 의하면 P, S 등 불순물 원소의 함량이 P+S=0.015%이하인 경우에는 응고균열 감수성이 낮지만 그 이상이 되면 응고균열 감수성이 커진다고 보고하고 있다. 그러나 본 실험에서

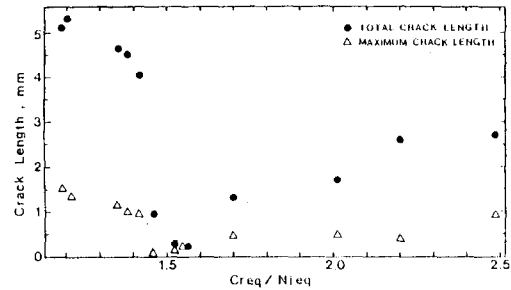


Fig.6. Results of Vareststraint solidification crack tests of melt stainless steel.

사용한 12강종은 P+S=0.015% 이하임에도 불구하고 初晶凝固相의 변화에 따른 응고균열 감수성에 명확한 차이가 있음을 알 수 있다.

따라서 용접시의 응고균열 감수성을 낮추기 위해서는 불순물 원소의 함량 규제는 물론 初晶凝固相의 제어에 매우 중요함을 알 수 있다.

응고후 잔류하는 페라이트相이 적어야 하는 것은 내식성과 저온에서의 인성을 고려하여도 당연한 것이다. 왜냐하면 페라이트가 존재하게 되면 내식성의 저하는 물론이고 충격특성이 급격히 저하되기 때문이다.

또 初晶凝固相의 변화에 따른 응고균열 감수성의 차이는 오스테나이트와 페라이트중에서의 P 및 S의 고용도도의 차이에 기인하는 것으로 P와 S가 오스테나이트와 페라이트중에 고용될 수 있는 한도는 각각 0.3%, 0.065%와 0.65%, 0.15%로서 페라이트중에 고용될 수 있는 불순물의 고용도도가 오스테나이트보다 훨씬 크기 때문에 初晶 페라이트로 응고되는 경우에는 응고과정중에 불순물의 偏析이 적어지고 따라서 凝固界面에 低融點의 薄膜 형성 가능성이 훨씬 작아지게 되기 때문이다.

4. 衝擊試驗

Fig. 7은 합금 No. 1~6의 충격시험결과를 나타낸 것으로 0°C에 있어서의 인성은 初晶 응고형식의 변화에 의한 차이가 뚜렷하지 않다. 그러나 初晶 페라이트 單相 凝固하여 상온에서 페라이트를 함유하는 합금 No. 5~6의 경우 시험온도가 -50°C, -100°C, -150°C 및 -196°C로 낮아짐에 따라 인성이 감소한다.

또 初晶 페라이트 응고하여 상온에서 페라이트를 함유하지 않는 합금 No.4의 인성은 합금 No. 1~3에

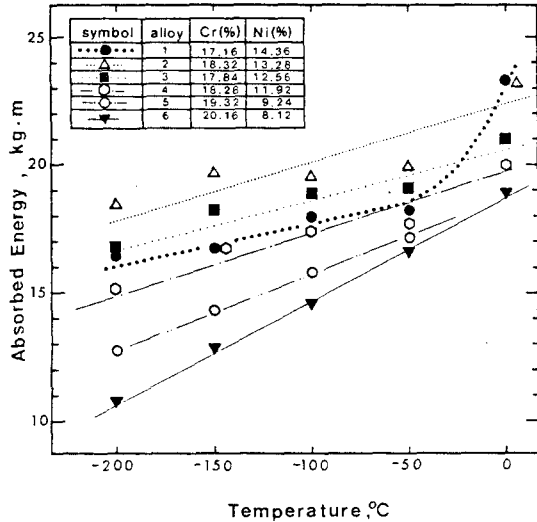


Fig. 7. Relationship between testing temp. and absorbed energy (alloy 1 to 6).

비하여 상대적으로 적은 Ni 함유량임에도 불구하고 극저온에서의 인성이 양호함을 알 수 있었고 합금 No. A~F로 합금 No. 1~6과 유사한 경향을 나타내었다.

최근에는 LNG 운반선 및 각종 저장용기를 비롯하여 저온환경하에서 오스테나이트계 스테인리스鋼이 널리 사용됨에 따라 ASME 규격⁴⁾에서는 샬피브이노치(Charpy V notch)충격 시험시의 橫膨出量은 15 mils(약 0.381mm) 이상을 요구하고 있다. 또 본 실험에서 용해 제조한 강종의 ASME 규격의 5배 이상으로 우수한 값을 나타내고 있었다.

이상과 같은 결과부터 오스테나이트계 스테인리스鋼의 極低溫에서의 인성을 확보하기 위해서는 初晶 응고형식을 제어하여 페라이트의 잔류를 방지하지 않으면 안된다.

5. 耐蝕性試驗

용해제조강 모재부의 全面腐蝕 시험 결과를 Fig. 8에 나타낸다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Creq/Nieq의 값, 즉 크롬 함유량이 많아지고 니켈 함유량이 적어질수록 내식성이 저하됨을 알 수 있다. 특히 상온에서 페라이트가 존재하는 합금 No. 5, E, F와 같이 페라이트가 존재하면 부식에 매우 민감해짐을 알 수 있다.

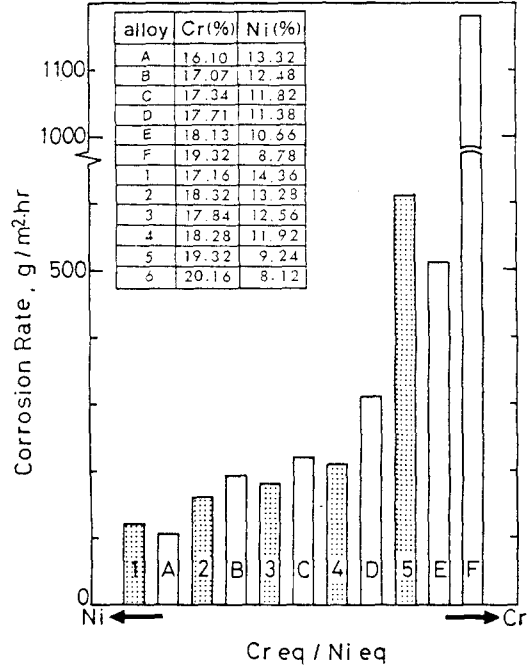


Fig. 8. Effect of Creq/Nieq on general corrosion sensitivity of base metal. (corrosion media: 5% H₂SO₄).

그러나 初晶凝固相이 페라이트이며 상온에서 페라이트를 함유하지 않는 합금 No. 4, C, D의 부식도는 합금 No. 1~3, A, B와의 거의 동등한 수준으로 내식성이 우수함을 알 수 있다. 또 용접재의 부식도도 모재부와 유사한 경향을 나타내었다.

이상과 같이 全面腐蝕 실험에서도 初晶凝固相이 페라이트이며 상온에서 페라이트를 함유하지 않는 합금의 내식성이 우수함을 알 수 있었다.

Fig. 9에는 모재부의 粒界腐蝕 시험 결과를 나타낸다. 용접재의 부식 시험 결과도 이와 유사한 경향을 나타내었으나, 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Creq/Nieq의 값이 작아질수록 부식도가 커짐을 알 수 있다. 즉 크롬 함유량이 적어질수록 오스테나이트 結晶粒界가 부식되기 쉬우므로 내식성이 저하됨을 알 수 있다. 또 합금 No. 1~5에 비해 합금 A~F가 부식도가 전반적으로 높은 것은 합금 A~F가 주로 Fe-Cr-Ni의 3元系임에 반하여 합금 No. 1~5는 규소와 망간등 내식성을 향상시키는 합금 원소를 함유하고 있기 때문이다.

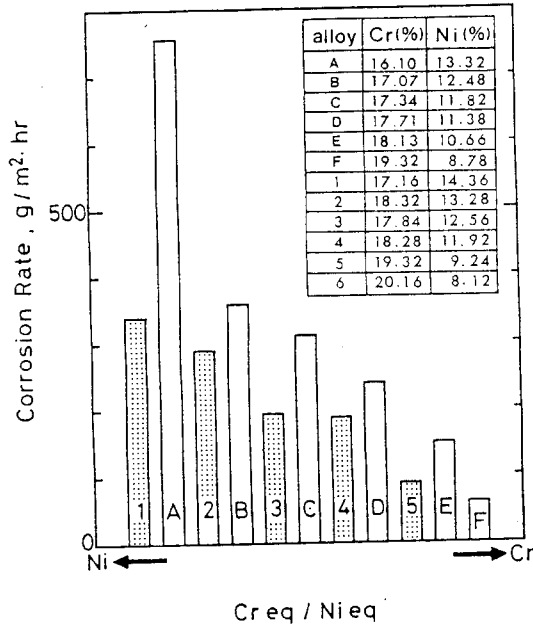


Fig.9. Effect of Creq/Nieq on intergranular corrosion sensitivity of base metal. (corrosion media : 10% HNO₃-3% HF).

이상의 全面腐蝕 및 粒界腐蝕 시험결과를 종합하면 初晶凝固相이 페라이트이며 상온에서 페라이트를 함유하지 않는 합금조성범위 Creq/Nieq이 1.46~1.55의 범위이면 全面腐蝕 및 粒界腐蝕 특성이 모두 양호함을 알 수 있다.

6. 電子顯微鏡 觀察

走査式 電子顯微鏡에 의한 응고균열의 파면을 Fig. 10에 나타낸다. 이 파면은 시험편의 표면 근방을 관찰한 것으로 응고균열 발생 초기 단계의 양상을 나타내고 있다. 즉 파면상에는 응고조직의 전형적인 예인 樹枝狀晶이 관찰되며 또 돌기가 많이 생성되어 있어 균열이 응고중에 발생한 응고균열임을 뒷받침하고 있다. 또 樹枝狀晶의 표면에는 고온에서 균열이 발생한 관계로 산화막이 남아 있을 뿐 아니라 가스의 방출에 의하여 미소한 氣孔이 많이 생성되어 있다.

충격시험편의 파면 관찰 결과, 시험온도 0, -50, -100, -150, -196°C의 어느 경우에도 파면은 延性破面の 대표적인 예인 딴플만 관찰되어 인성이 우수함을 뒷받침하고 있다.

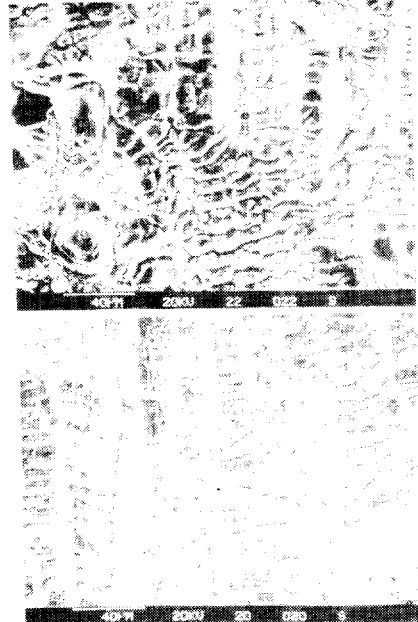


Fig.10. SEM fractographs of solidification cracked specimens.

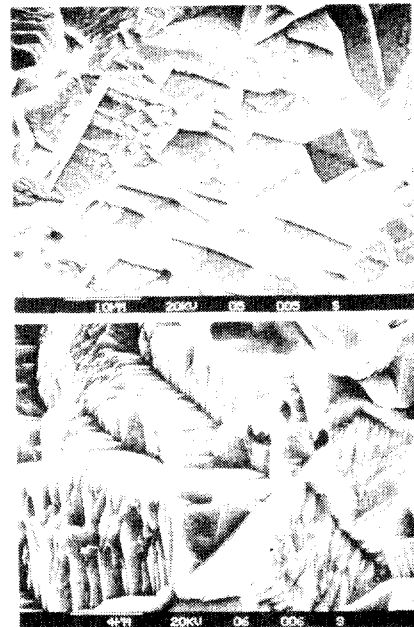


Fig.11. SEM micrographs of general corrosion tested specimens (corrosion media : 5% H₂SO₄).
c) alloy E(18.13Cr-10.66Ni)
d) alloy F(19.32Cr-8.78Ni).

Fig. 11에는 全面 腐蝕 시험후의 시험편 표면상황을 나타내고 있다. 시험후의 표면상황은 합금원소의 함량에 따른 차이는 없으며 계단상의 凹凸이 존재하고 있다. 즉 全面腐蝕 상황에서는 부식이 깊이, 폭, 두께의 세 방향으로 동시에 진행됨을 알 수 있고 結晶粒界가 우선 부식되지 않음을 알 수 있다.

이상과 같이 부식 시험후의 시험편 표면의 상황은 初晶 凝固 形式의 상이함에 따른 차이는 거의 없었으나 상온에서의 페라이트 함유량이 많아짐에 따른 부식 생성물의 양적인 차이가 존재할 뿐이었다.

結 論

1) 初晶凝固 조직이 오스테나이트인 경우에는 응고 균열 감수성이 크고, 初晶凝固조직이 페라이트이며 상온에서 페라이트를 함유하지 않는 Creq/Nieq의 값이 1.46~1.55일 경우에는 용접시의 응고 균열 감수성이 낮아, 오스테나이트계 스테인리스강의 응고균열은 初晶凝固 조직에 지배되었다.

2) Creq/Nieq의 값이 1.46~1.55의 범위에서는 오스테나이트 單相일 경우와 같이 저온에서의 인성이 우수하였다.

3) 全面腐蝕 및 粒界腐蝕 시험결과 Creq/Nieq의 값이 1.46~1.55의 범위에서는 내식성이 우수하였다.

謝 辭

본 研究를 수행함에 있어 材料의 溶解 및 기기분석과 가공, 전자현미경의 사용에 협조하여 주신 産業科學技術研究所 관계 제위께 깊은 감사를 드립니다.

參考文獻

- 1) ASME(1983): ASME boiler and pressure vessel code. sec. III div. I sub. NB para. ND-2433
- 2) 益本 et al(1972): 鋼의 熱間割れについて. 溶接學會誌 41(11), 1306-1314.
- 3) 鄭 鎬信(1987): 鋼의 溶接性改善에 關する 研究(博士學位論文), Ch. 4.
- 4) Szumachowski E.R.(1982): Cryogenic toughness of SMA austenitic stainless steel weld metal; Part I-Role of Ferrite, Weld. J. 57(11), 325s-333s.
- 5) Read, D. T., et al(1980): Metallurgical factors affecting the toughness of 316 SMA weldments at cryogenic temperature, Weld. J. 59(4), 104s-113s.
- 6) Siewert, T. A.(1986): Predicting the toughness of SMA austenitic stainless steel welds at 77K, Weld. J. 65(3), 23-28.
- 7) Manning, P. E. et al(1980): The effect of retained ferrite on localized corrosion in duplex 304 stainless steel, Weld. J. 59(9), 260s-262s.
- 8) Kujanpaa V. P.(1985): Effect of phosphorus and sulphur in solidification cracking of austenitic stainless steel welds, Metal Cons. 2, 40r-46r.
- 9) Kujanpaa V. P., et al(1985): Effect of steel type and impurities in solidification cracking of austenitic stainless steel welds, Metal Const., 17(2), 40r-46r.