

# 스테인리스강 용접부의 응고 및 미세조직 특성에 미치는 질소 및 용접속도의 영향

## Effects of Nitrogen and Travel Speed on Solidification Behavior and Microstructural Evolution of Weld Fusion Zone in Nitrogen-Bearing Austenitic Stainless Steels

이종섭\*, 김숙환\*, 민성기\*\*

\*포항산업과학연구원 접합가공연구팀, \*\*포항종합제철 STS부 열연팀

### 1. 서론

강재에 첨가되는 질소의 영향에 관해서는 확실하지는 않지만 1926년 Adcock의 연구<sup>1)</sup>가 그 효시로 알려져 있다. 질소는 오스테나이트 안정화 원소이기 때문에 고온에서는 델타 페라이트의 형성을 억제시키고 저온에서는 마르텐사이트 변태를 억제시키는 효과를 나타낸다. 또 질소는 탄소나 다른 고용 강화원소보다 flow strength 증가에 미치는 영향이 더 크고 중, 고온에서 탄소보다 고용도가 크기 때문에 석출물의 생성을 감소시키게 되며 따라서 탄화물의 생성과 성장을 지연시켜 예민화 현상을 억제하는 효과도 나타내게 된다<sup>2)</sup>.

용접성 측면에서 질소는 용접부의 초정 응고양식, 미세조직에 영향을 미치며 따라서 용접부의 고온균열 감수성에도 영향을 미치게 된다. 한편, 용접부의 초정 응고양식, 미세조직은 모재와 용접재료의 합금성분뿐만 아니라 용접부의 냉각속도에 의해서도 영향을 받게 된다<sup>3)</sup>. 용접부의 초정 응고양식은 냉각속도가 증가함에 따라 초정 페라이트에서 초정 오스테나이트로 천이하며 델타 페라이트의 함량, 형상도 영향을 받는다고 알려져 있다.

그러나 질소와 냉각속도가 용접부의 제 특성에 미치는 영향은 아직도 충분히 이해되어 있지 못하며 합금의 성분계에 따라서도 다르게 나타난다. 본 연구에서는 304계 스테인리스강 용접부의 응고특성 및 조직특성에 미치는 질소의 영향을 조사하고 용접속도를 변화시킴으로써 냉각속도의 영향도 함께 규명하고자 하였다.

### 2. 실험방법

본 연구에 사용된 소재는 304 성분계에 질소함량을 0.007%에서 0.23%까지 변화시킨 진공 용해강 10강종으로서 Table 1에 화학성분을 나타내었다. 강 N11 - N13는 304N1 성분계, N21 - N27은 304N2 성분계로서 304N1은 저 Mn계, 304N2는 고 Mn계이며 304N1, N2는 POSCO의 고질소강 규격이다. 시험편의 용접은 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding), EBW(Electron Beam Welding)을 이용하였으며 GTAW의 경우는 용접조건이 변화가 용접부 특성에 크게 영향을 미치지 않았기 때문에 전압 18.5V, 전류 120A, 용접속도 4mm/s로 용접조건을 고정하였으며 EBW에서는 가속전압, 전류를 각각 150kV, 3mA로 고정시켰으나 용접속도를 5mm/s에서 25mm/s까지 변화시켜 냉각속도를 변화시켰다. 이처럼 용접속도를 변화시킴에 따라 용접 입열량은 약 10 J/mm에서 90J/mm까지 변화하였다. 용접부의 조직은 광학 현미경, 전자 현미경을 이용하여 조사하였으며 시험편의 에칭은 질산을 이용한 전해 에칭과 mixed acid(1/3 질산 + 1/3 염산 + 1/3 초산) 에칭을 병행하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 304N2계 진공 용해강의 GTA 용접부 조직을 질산으로 전해에칭하여 관찰한 사진으로서 질소 함량이 낮은 경우에는 용접부는 오스테나이트 기지에 vermicular, lathy 페라이트가 혼재하는 초정 페라이트로 응고한 이상조직(duplex structure)을 나타내고 있으며 질소 함량 0.20% 이상에서는 초정 오스테나이트 단상으로 응고한 완전 오스테나이트 조직을 나타내고 있음을 알 수 있다. 304N1계에서도 304N2계와 마찬가지로 질소 함량 0.20% 이상에서는 초정 오스테나이트 응고를 나타내었다. 질소 함량이 0.10 - 0.20%인 경우에는 Fig. 1에서 알 수 있듯이 용접부 조직은 초정 페라이트로 응고한 조직과 매우 유사한 조직을 나타내고 있으나 용접부를 mixed acid로 에칭하여 조직을 관찰해 보면(Fig. 2) 대부분의 페라이트가 응고결정립계 또는 아결정립계에 위치하고 있어 용접부는 초정 오스테나이트로 응고했음을 알 수 있으며 용접부 중심부에서는 국부적으로 초정 페라이트로 응고한 영역도 관찰되었다. 이같은 결과에서 볼 때 질소 함량이 0.10%이하에서는 초정 페라이트 응고, 0.20% 이상에서는 초정 오스테나이트로 응고가 일어나며 0.10 - 0.20%에서는 두가지 양식이 혼재해 일어나나 질소함량이 증가할수록 초정 오스테나이트 응고가 증가할 것으로 판단된다.

Suutala는 다양한  $Cr_{eq}$ ,  $Ni_{eq}$ 식을 이용하여 고질소 스테인리스강의 용접부 응고 형태를 예측하는 diagram을 검토한 결과<sup>4)</sup>, 질소 첨가 스테인리스강의 응고예측에는 Hammar & Svensson의 식을 이용하는 것이 가장 잘 맞으며 고 Mn강 (>6% Mn)은 Hull의 식을 이용하는 것이 응고양식을 가장 잘 예측할 수 있다고 보고하였다. 그러나 본 연구에 이용된 소재의 경우에는 Hammar & Svensson의 식을 이용하면 초정 오스테나이트 응고가 일어난 N13도 초정 페라이트 응고 영역에 위치해 이 소재들의 응고형태 예측에는 적절하지 않은 것으로 판단되었으며 Fig. 3과 같이 Hull의 식을 이용한 경우가 응고 mode를 가장 잘 예측하고 있었다.

EB 용접부의 경우 저 질소강은 GTA 용접부와 조직이 유사하였으며 질소 함량 0.15% 전후인 소재에서는(Fig. 4) 초정 오스테나이트 응고와 초정 페라이트 응고가 혼재해 일어났으며 용접속도가 빨라짐에 따라 초정 오스테나이트로 응고한 영역이 증가하였다. 질소 함량이 0.20% 이상인 강종에서는 가장 느린 용접속도인 5mm/s에서는 오스테나이트 단상응고 즉, mode A응고가 일어난 영역이 약 20%이었으며 8.3mm/s에서는 70%, 8.3mm/s보다 빠른 속도에서는 100% mode A 응고가 일어났다. Fig. 5는 용접속도 8.3mm/s로 용접한 EB 용접부 사진으로서 Fig. 5-A)에서 밝은 부분이 mode A로 응고한 영역이며 어두운 부분이 다른 응고양식으로 응고한 부분인데 이 부분은 외견상 초정 페라이트로 응고한 조직으로 보인다. 그러나 Fig. 5-B), C)에 나타낸 mixed acid로 에칭한 조직을 보면 B)는 A)에서 밝은 부분으로 초정 오스테나이트 응고가 일어났음을 쉽게 확인할 수 있으며 C)는 어두운 부분인데 이 영역에서도 페라이트가 응고결정립계 또는 아결정립계에 위치하고 있어 초정 오스테나이트로 응고했음을 알 수 있다.

Fig. 6은 EB 용접부의 질소함량을 모재의 질소함량과 비교한 그래프인데 GTA 용접부에서는 모재와 용접부의 질소함량에는 거의 차이가 없었으나 EB 용접부에서는 용접부의 질소 함량이 모재에 비해 상당히 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이처럼 EB 용접부의 질소 함량이 떨어짐에도 불구하고 초정 오스테나이트로 응고한 완전 오스테나이트 조직이 나타나는 것은 용접속도가 증가함에 따라 초정 오스테나이트 응고에 필요한 임계 질소량이 작아지고 있다는 것을 나타내고 있다. 이 현상을 Fig. 3에 나타낸 응고 mode 예측 그래프

로 설명하면 응고 mode간 경계선이 냉각속도가 증가함에 따라 아래 쪽으로 이동한다는 것을 의미한다.

#### 4. 결론

- 1) GTA 용접부의 질소함량은 모재와 유사하였으나 EB 용접부는 질소함량이 상당히 감소하였다.
- 2) 질소 첨가강의 용접부 응고양식은 Hull's equation에 의해 가장 잘 예측할 수 있었다.
- 3) 질소함량의 증가는 용접부의 초정 오스테나이트 응고를 촉진시켰다.
- 4) 용접부의 초정 응고양식은 용접속도에 의해서도 영향을 받았으며 용접속도가 증가함에 따라 초정 오스테나이트 응고에 필요한 임계 질소량이 감소하였다.

#### 참고문헌

- 1) F. Adcock: "The Effect of Nitrogen on Chromium and some Iron-Chromium Alloys", J. Iron Steel Inst., 114, 1926, pp. 119-126
- 2) R.P. Reed: "Nitrogen in Austenitic Stainless Steels", JOM, 3, 1989, pp. 16-21
- 3) S.A. David, J.M. Vitek and T.L. Hebble: "Effect of Rapid Solidification on Stainless Steel Weld Metal Microstructures and Its Implications on the Schaeffler Diagram", Weld. J., (10), 1987, pp. 289s-300s
- 4) N. Suutala: "Effect of Manganese and Nitrogen on the Solidification Mode in Austenitic Stainless Steel Welds", Metall. Trans., vol. 13A, 12, 1982, p. 2121-2130

Table 1. Chemical compositions of the experimental heats

Heat	Alloying Element											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Nb	N
N11	0.060	0.659	0.393	0.021	0.003	19.35	8.44	0.496	0.398	0.017	<0.01	0.048
N12	0.061	0.633	0.346	0.029	0.003	19.32	8.38	0.496	0.399	0.020	<0.01	0.16
N13	0.057	0.650	0.345	0.023	0.003	19.32	8.51	0.480	0.400	0.009	<0.01	0.23
N21	0.057	0.743	1.66	0.023	0.005	18.83	7.93	-	-	0.039	0.08	0.007
N22	0.050	0.770	1.66	0.021	0.004	18.60	8.01	-	-	0.032	0.11	0.035
N23	0.050	0.761	1.67	0.024	0.005	18.54	8.02	-	-	0.032	0.10	0.07
N24	0.050	0.766	1.64	0.020	0.004	18.41	7.96	-	-	0.011	0.11	0.15-
N25	0.050	0.763	1.66	0.021	0.004	18.51	7.98	-	-	0.020	0.012	0.16
N26	0.050	0.769	1.66	0.029	0.004	18.42	7.97	-	-	0.019	0.10	0.17
N27	0.049	0.762	1.65	0.020	0.003	18.35	7.86	-	-	0.013	0.08	0.22

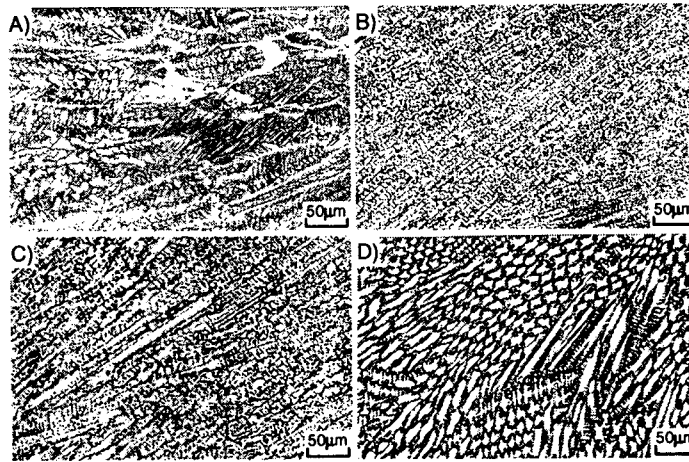


Fig. 1 Microstructures of GTA weld fusion zone: A) N21(0.007% N); B) N23(0.07% N)  
C) N25(0.16% N); D) N27(0.22% N)

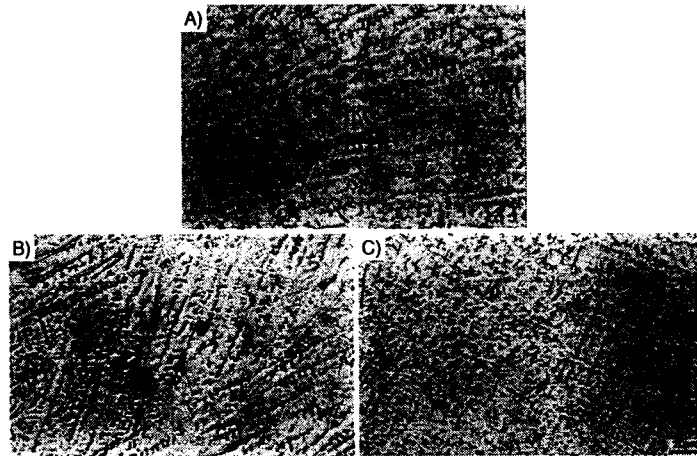


Fig. 2 Microstructures of GTA weld fusion zone(mixed acid): A) N23(0.07% N);  
B) & C) N25 (0.16% N)

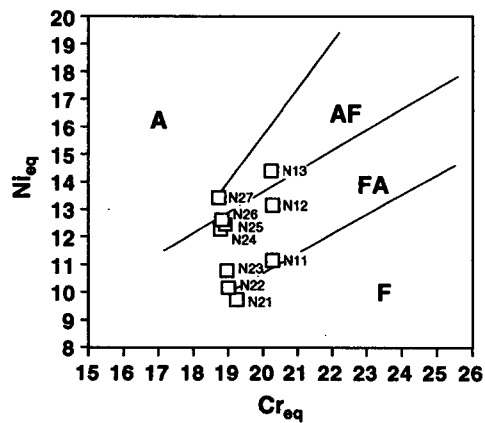


Fig. 3 Relationship between composition and solidification modes

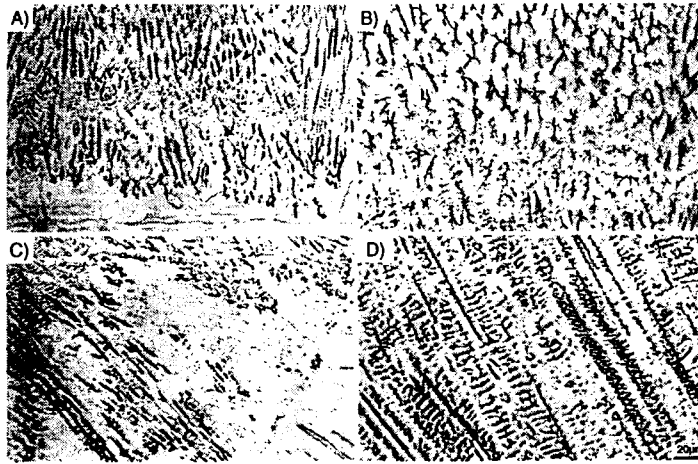


Fig. 4 Microstructures of EB weld fusion zone in heat N25(0.16% N), mixed acid  
 A) & B) 8.3mm/s(54J/mm); C) & D) 20mm/s(22.5J/mm)

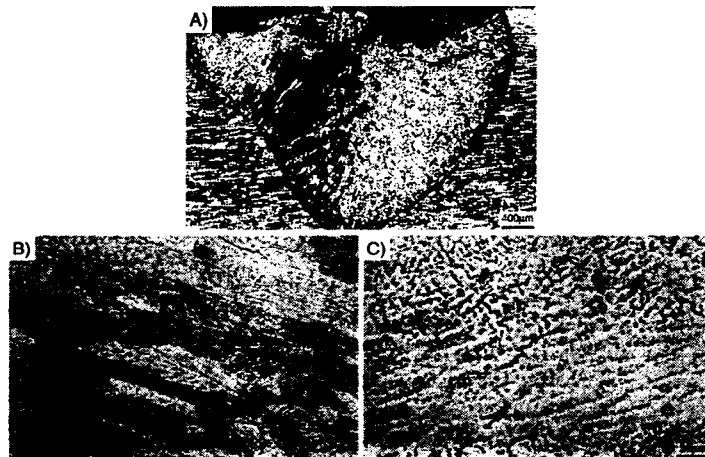


Fig. 5 Microstructures of EB weld fusion zone in heat N27(0.22% N): 8.3mm/s

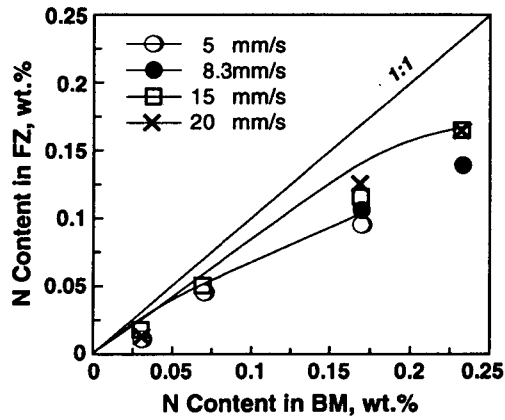


Fig. 6 Nitrogen loss in EB weld fusion zones