

研 究 論 文

大韓熔接學會  
第5卷第3號, 1987年 9月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol.5, No. 3, Sep., 1987.

## 오스테나이트계 및 이상계스테인레스강 용착부의 산소가 충격인성에 미치는 영향

문영훈\* · 김환태\*\* · 허성도\*

### Effect of Oxygen Content on Impact Toughness of Austenitic-and Duplex Stainless Steel Weld Metal

Y. H. Moon, H. T. Kim, S. D. Hur

**KEY WORDS :** Duplex Stainless Steel(이상계스테인레스강), Austenitic Stainless Steel(오스테나이트계 스테인레스강), Impact Toughness(충격인성), Austenite(오스테나이트), Delta-Ferrite(델타페라이트)

#### Abstract

An investigation was conducted to find out the factors influencing on the impact toughness of austenitic-and duplex stainless steel weld metal.

Various welding process with commercially available consumables was adopted to get weld deposited metal.

The oxygen content of each weld metal was very sensitive to welding process, involving flux composition, shielding gas and structural features.

The results of this study show that the content of oxygen as an oxide inclusion significantly affects impact toughness, and  $\delta$ -ferrite distribution is also correlated with resultant toughness value.

#### 1. 서 론

아크용접에서 용착부의 산소혼입은 근본적으로 피할 수 없다. 이와 더불어 강에서의 산소고용도는 극히 작으므로, 용착부에 혼입된 산소는 주로 산화개재물형태로 존재하는데,<sup>1,2)</sup> 이러한 용착부 산화개재물은 용접부의 기계적 성질에 많은 영향을 미치게 되므로, 용착부 산소(산화개재물) 함량 제어를 위한 많은 연구가 행해지고 있다.<sup>3~9)</sup> 해양설비 및 화학설비 등과 같이, 우수한 기계적 성질과 내부식성이 등

시에 요구되는 제품에 널리 적용되고 있는 오스테나이트계 스테인레스강(Austenitic stainless steel)과 이상계스테인레스강(Duplex stainless steel)의 경우, 양호한 모재의 물성에 비해, 혼입산소에 의한 용착부의 충격인성 저하가 문제시되고 있으며, 이러한 산소혼입 정도는 용접 process별로 많은 차이를 보인다.

일반적으로, 용착금속내의 산소는 다음 세가지 경로를 통해 혼입될 수 있다.

1) 아크분위기 및 불완전한 차폐로 인해 혼입된 산소가, 산화반응을 일으킨 후 용착금속내에 잔류하

\* 한국중공업(주) 용접기술부(KHIC), 정희원

\*\* 한국기계연구소 용접연구실(KIMM), 정희원

계 되는 경우

2) 용융지(pool)표면층(Slag층 포함)에 존재하는 산화물이 용융지내의 더욱 산소친화력이 큰 원소와 반응하여 잔류하게 되는 경우

3) 모재에 존재하던 산소 및 산화개재물이 용착금속으로 용융되어 산소친화력이 큰 원소와 반응하여 산화물을 형성한 후 용착금속내에 잔류하게 되는 경우

위 세가지 산소혼입경로중, 플럭스(flux)를 사용하는 용접 process에서는 2)항에 의한 혼입이 크며, 차폐가스(shielding gas)를 사용하는 용접 process에서는 1)항에 의한 혼입이 크다.<sup>6-8)</sup> 특히 FCAW의 경우는 1)항과 2)항이 동시에 일어날 수 있으므로, 산소혼입의 가능성이 다른 용접 process에 비해 크다고 할 수 있다. 본 연구에서는 여러가지 용접process를 이용하여, 오스테나이트계 스테인레스강 및 이상계 스테인레스강을 용접하여 용접시험편을 제작한 후, 재질별, 용접process별로 산소함량을 비교·검토하였으며, 특히 이러한 산소가 용착부의 충격인성에 미치는 영향을 중점적으로 고찰하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 시험재료

본 시험을 위해 오스테나이트계는 AISI304L을, 이상계는 UNS S-31803 모재를 사용하였다. 각 용접 process별 용가재는, 오스테나이트계의 경우 LowC-19Cr-9Ni(AWS 308L), 이상계의 경우는 22Cr-9Ni-3Mo의 기본조성을 갖는다.

Table 1. Chemical composition of base metal.

(Wt %)

Element	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Remarks
Austenitic	0.019	1.3	0.6	0.023	0.002	10.5	18.5	—	AISI 304L
Duplex	0.012	1.03	0.46	0.024	0.002	5.6	22.05	3.05	UNS S-31803

Table 2. Welding condition

Process	Filler Diameter	Polarity	Amp. (A)	Vol. (V)	Speed (Cm/Min.)	Shielding Gas
SMAW	φ3.2	DCRP	110-130	24-25	16	—
FCAW	φ1.2	DCRP	190-200	30-31	30-33	CO <sub>2</sub>
GTAW	φ2.4	DCSP	150-160	14-15	12	99.9% Ar.
GMAW	φ1.2	(Pulse) DCRP	(300 Peak) 160-210	24-25	30-32	Ar. + 2% O <sub>2</sub>

### 2.2. 시험용접

Fig. 1의 개선형상을 갖는 모재를 Table 2의 용접 조건으로 시험용접하였으며, 용접결합에 의한 영향을 배제하기 위하여, 용접이 끝난 시험편은 방사선 투과시험으로 건전성을 확인한 후 시험을 진행하였다.

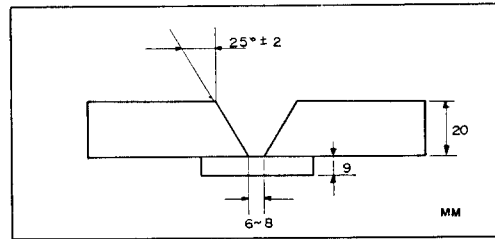


Fig. 1. Groove configuration.

용접이 끝난 시험편 용착부의 성분분석 결과를 Table 3에 나타내었다.

### 2.3. 미세조직분석

미세조직은 시험용접부를 0.5μm로 연마한 후 10% 옥살산(H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)으로 전해부식시킨 후 광학 현미경으로 관찰하였다. 용착부 δ-페라이트 함량은 Ferritescope(Fisher. Co)로 측정하였고, 산소함량은 Thermal conductivity를 이용한 LECO Analyzer로 측정하였다.

용착부에 존재하는 비금속개재물 함량은 as-polished 상태에서 Image Analyzer(Magiscan. 2)로 측정하였고, 개재물 성분은 EDX(Energy Dispersive X-ray spectrometer)를 이용하여 분석하였다.

Table 3. Chemical composition of as-welded deposits.

Specimen		Element									
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	O*
AUSTENITIC	SMAW	0.024	0.97	0.91	0.027	0.007	21.05	10.05	0.06	0.02	0.081
	FCAW	0.028	1.67	0.69	0.025	0.010	20.03	10.21	0.07	0.02	0.157
	GTAW	0.016	1.83	0.29	0.023	0.011	19.98	10.28	0.08	0.01	0.017
	GMAW	0.021	1.76	0.32	0.027	0.007	20.30	10.09	0.09	0.01	0.045
DUPLEX	SMAW	0.032	0.82	0.84	0.028	0.007	21.61	8.66	3.07	0.015	0.072
	FCAW	0.035	0.95	0.76	0.026	0.009	21.66	9.63	3.31	0.13	0.129
	GTAW	0.013	1.5	0.42	0.017	0.005	21.67	9.53	3.15	0.13	0.019
	GMAW	0.014	1.4	0.37	0.015	0.007	21.77	9.17	3.31	0.12	0.058

\* Measured by Thermal Conductivity Fusion Method (LECO Analyzer)

#### 2.4. 충격시험

충격시험은 Fig. 2의 위치에서 Charpy V-notch 시험편을 가공하였으며, ASTM 규정에 따라 0°C ~ -180°C의 저온에서 충격시험을 실시하였다. 충격시험이 끝난 파단면은 주사전자현미경(Scanning Electronic Microscope)으로 파면분석을 행하였다.

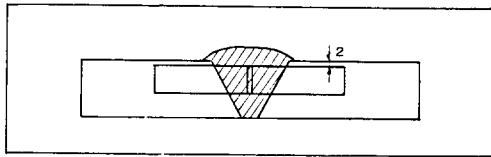


Fig. 2. Location of charpy-V notch specimen.

### 3. 실험결과

#### 3.1. 미세조직

photo. 1의 시험모재의 미세조직을 보면, 오스테나

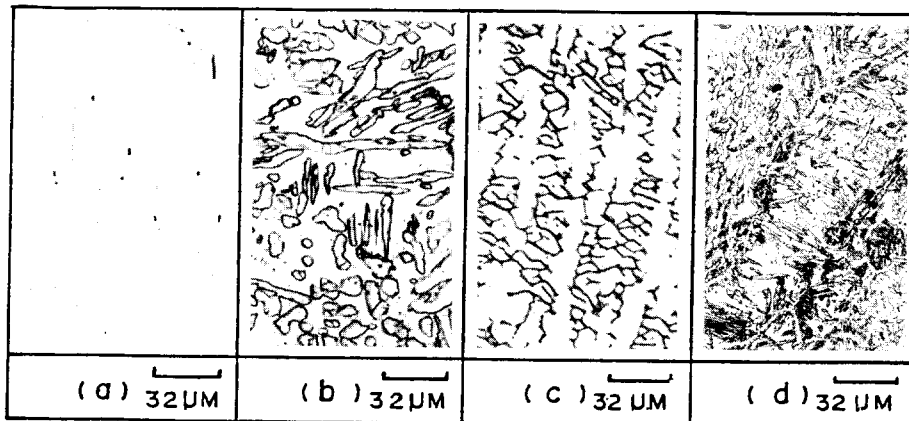


Photo 1. Microstructure for (a) Austenitic S.S. base metal, (b) Duplex S.S. base metal, (c) Austenitic S.S. weld metal, (d) Duplex S.S. weld metal.

이트계 스테인레스강은 전체가 오스테나이트( $\gamma$ )로 이루어져있는 반면, 이상계 스테인레스강은 페라이트( $\delta$ )와  $\gamma$ 가 약 1:1의 비율로 분포하고 있다.

용착부의 경우, 오스테나이트계에서는 모재와 달리, 용접시 석출한  $\delta$ 가 소량(5~10%) 관찰되고 있으며, 이상계에서는  $\gamma$ 가 페라이트기내에 acicular 형상으로 분포하고 있다.

각 용접 process별 용착부의  $\delta$ -페라이트 함량은 Ferritescope로 cm<sup>2</sup>당 16point를 측정하여, 그 평균치를 Table 4에 나타내었다.

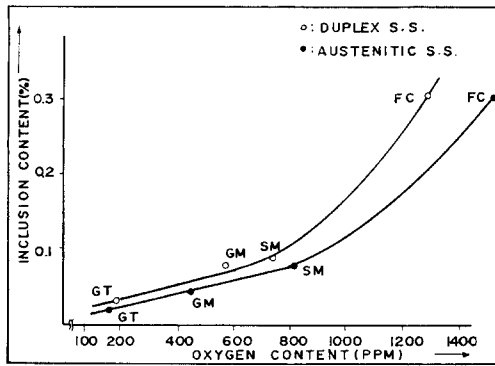
연속적인  $\gamma$ 기내 소량의(5~10%)  $\delta$ 가 분산분포하는 오스테나이트계 스테인레스강 용착부와, 연속적인  $\delta$ 기내 다량의  $\gamma$ 가 분산분포하는 이상계 스테인레스강 용착부는  $\gamma$ 와  $\delta$ 의 서로 다른 구조상의 특성으로 인해 기계적 성질에 많은 차이를 보이게 된다.

**Table 4. Ferrite content of austenitic and duplex stainless steel weld metal.**

Austenitic Specimen	Ferrite %			Duplex Specimen	Ferrite %		
	Aver.	Max.	Min.		Aver.	Max.	Min.
SMAW	6.2	7.0	5.8	SMAW	30	32	26
FCAW	6.5	7.2	5.8	FCAW	32	38	31
GTAW	5.5	6.0	5.1	GTAW	34	37	28
GMAW	7.0	6.0	8.0	GMAW	39	45	33

**3.2. 산화개재물**

각 용접 process별 용착부의 산소함량과 Image Analyzer로 측정한 비금속개재물 함량을 Fig.3에 나타내었다.



**Fig. 3. Relationship between oxygen content and non-metallic inclusion content.**

산소함량이 증가함에 따라, 비금속개재물의 함량이 증가하는 것은, 용착부 비금속개재물이 주로 산화물로 이루어져 있음을 의미하며, 용접 process별로 비교해 볼 때 GTAW가 산소함량이 가장 낮은 반면, FCAW가 가장 높은 산소함량을 갖는다.

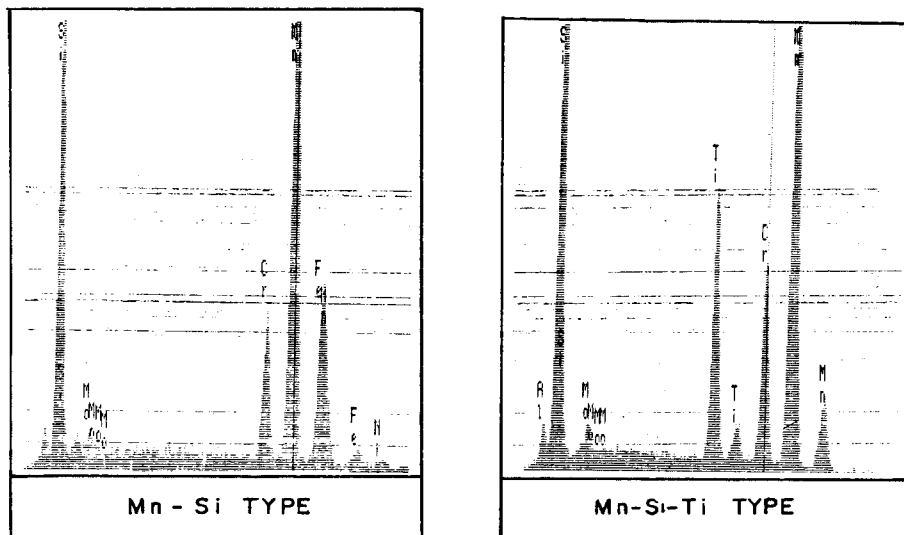
EDX 분석결과, 본 시험편의 산화개재물은 주로 Mn-Si TYPE이었으며(Fig. 4), 이상계 스테인레스강의 경우는 Mn-Si-Ti TYPE도 관찰되었다.

따라서 용착부내의 산소는 아크분위기 및 용가재로부터 혼입된 산소가 산소친화력이 큰 탈산제(Mn, Si, Ti...)와 반응하여 개재물 형태로 존재하고 있음을 알 수 있다.

**3.3. 충격인성치**

0°C ~ -180°C에서의 충격시험 결과를 Fig.5에 나타내었다.

Fig.5에서 이상계 스테인레스강 모재는 -100°C 부근에서 연성-취성전이온도(DBTT)를 갖는 반면 오스테나이트계 스테인레스강은 천이저동을 보이지



**Fig. 4. EDX spectra of oxide inclusion.**

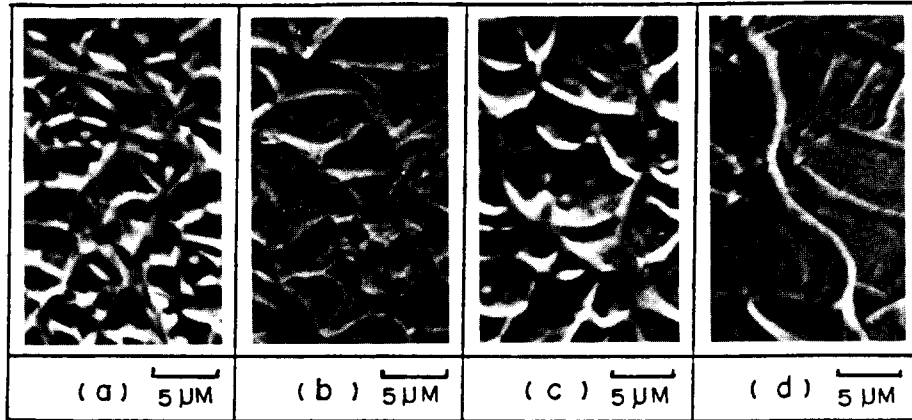


Photo 2. SEM fractography of base metal (a) Austenitic S.S. at  $-30^{\circ}\text{C}$  (b) Duplex S.S. at  $-30^{\circ}\text{C}$ , (c) Austenitic S.S. at  $-180^{\circ}\text{C}$ , (d) Duplex S.S. at  $-180^{\circ}\text{C}$

않는다.

photo. 2의 SEM파면조직을 볼 때, 뚜렷한 DBTT를 갖지 않는 오스테나이트계의 경우는 전체적으로 dimple파면을 보이는 반면, 취성역에 놓인 이상계 스테인레스강에서는 cleavage파면이 관찰된다.

이상계 스테인레스강 용착부는 모재와 마찬가지로 DBTT부근에서 다소의 취성을 보이지만 모재처럼 현저하지 않으며, 오스테나이트계 스테인레스강 용착부는 DBTT를 보이지 않는다. 용접 process별로는 GTAW 용착부의 충격치가 가장 높고, FCAW 용착부의 충격치가 가장 낮게 나타났다.

#### 4. 고찰

Fig.5에서 이상계 스테인레스강 모재는 뚜렷한 DBTT를 보이는데 이러한 현상은 온도저하에 따라 DBTT를 갖는 BCC 구조의 특성이 다량 함유된  $\delta$ -페

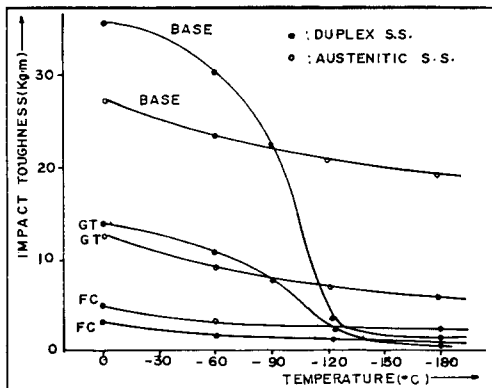


Fig. 5. Impact toughness value at various temperatures.

라이트를 통해 나타났기 때문으로 생각되며,  $\delta$ -페라이트를 함유하지 않는 오스테나이트계에서 DBTT가 관찰되지 않는 시험결과가 이를 뒷받침한다. 따라서  $\delta$ -페라이트가 DBTT에 직접 관련되며, cleavage는  $\delta$ -페라이트의 취화에 기인한 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 6은 이상계 스테인레스강 용착부의 용접 process별로  $\delta$ -페라이트 함량에 따른 충격치 변화상태를 나타낸 것으로서 용착부의 충격치와  $\delta$ -페라이트 함량사이에 뚜렷한 상관관계가 성립하지 않음을 보여주고 있다. 이것은  $\delta$ -페라이트함량 보다 충격치에 더욱 큰 영향을 미치는 인자가 있다는 것을 의미하며, 오스테나이트계 용착부의 경우는  $\delta$ -페라이트 함량이 낮고, 용접 process별로 함량차이가 크지 않으므로, process별 충격치에  $\delta$ -페라이트가 미치는 효과는 크지 않을 것으로 생각된다.

용착부 산소(산화재물)가 충격치에 미치는 영향

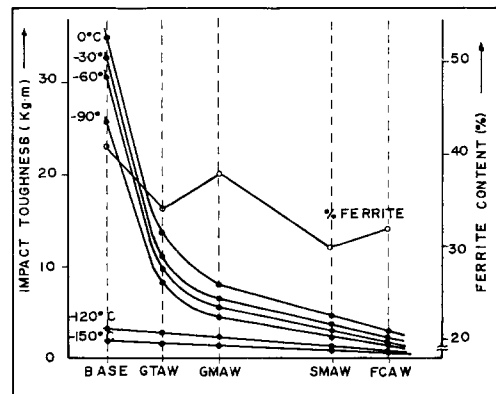


Fig. 6. Effect of  $\delta$ -ferrite content on toughness of duplex stainless steel.

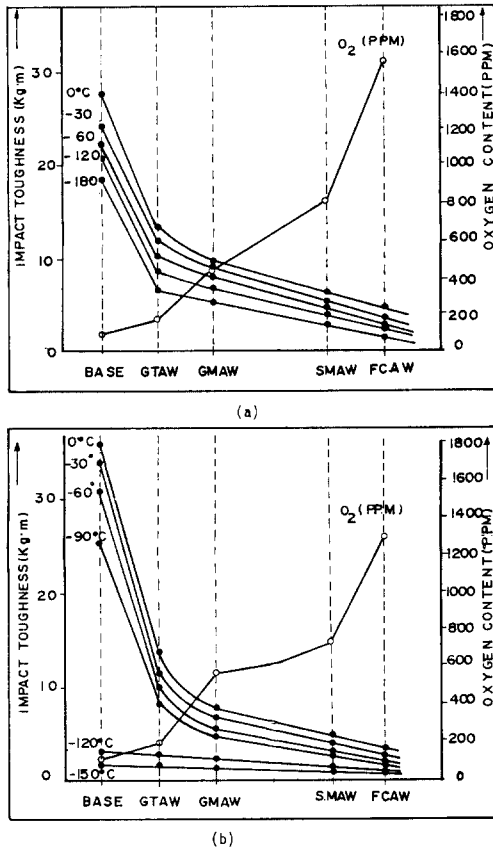


Fig. 7. Effect of oxygen content on toughness of weld metal

(a) austenitic S.S. (b) duplex S.S.

을 분석하기 위하여 산소함량에 따른 충격치 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이, 산소함량이 증가함에 따라 충격치의 감소가 현저하며, 이상계 스테인레스강의 경우가 오스테나이트계 스테인레스강

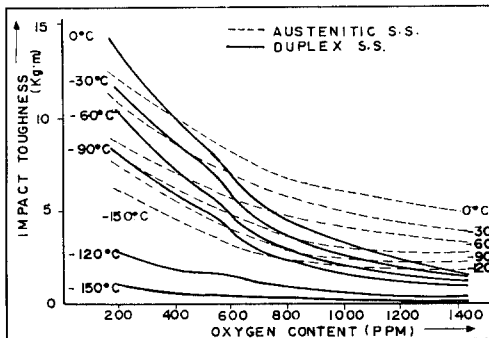


Fig. 8. Relationship between oxygen content and impact toughness

에 비해 산소함량에 따른 충격치 변화가 더 민감함을 알 수 있다(Fig. 8).

용착부내에 산화개재물이 존재하게 되면 산화개재물 인접부위의 금속간 결합력이 약화되므로 microvoid의 생성이 용이해짐으로써 충격치가 저하되는 것으로 생각되며, photo. 3의 용착부 SEM 파면사진에서 산화개재물 부근의 dimple이 불연속적으로 나타난 것이 이를 뒷받침한다.

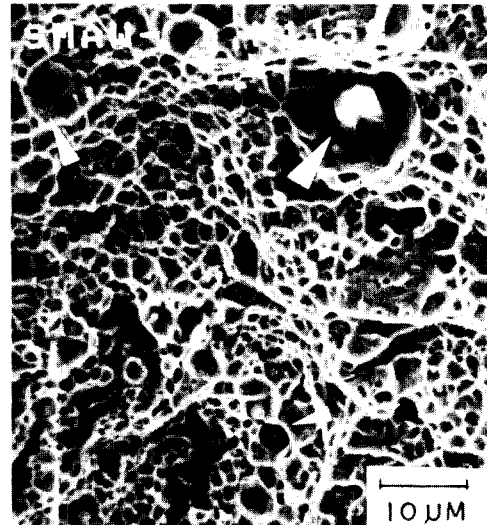


Photo. 3. SEM fractography of SMA welded duplex S.S. Arrows indicate oxide inclusion

이상계 스테인레스강 용착부가 오스테나이트계 스테인레스강 용착부에 비해 충격치의 산소민감도가 큰 것은, 이상계 스테인레스강 용착부에 다량 존재하는  $\delta$ -페라이트에 기인한 것으로 생각된다. 이러한 사실을 규명하기 위해 각 용접 process별 산화개재물의 분포양상을 관찰하였다. photo. 4에 표기된 바와 같이 산화개재물을 7내에 존재하는 산화물(A)과  $\delta$ -페라이트내에 존재하는 산화물(B),  $\delta/\gamma$ 의 상경계에 존재하는 산화물(C)로 분류하여 개재물의 분포분율을 측정하였다.

Table 5에서 이상계 스테인레스강은  $\delta$ -페라이트를 다량함유하므로  $\delta$ -페라이트에 존재하는 산화개재물의 분율이 크고,  $\delta/\gamma$ 의 상경계에도 다량의 산화개재물이 분포하고 있는 반면, 오스테나이트계 스테인레스강의 경우는  $\gamma$ 에 다량의 산화물이 분포하고 있다. 따라서  $\delta$  및  $\delta/\gamma$  상경계가  $\gamma$ 에 비해 산화개재물에 의한 취화가 큼을 알 수 있으며, 이것은  $\delta$ 와  $\gamma$ 의 구조상의 차이에 기인한다.

특히 이상계 스테인레스강의 경우는, Fig. 9에 나

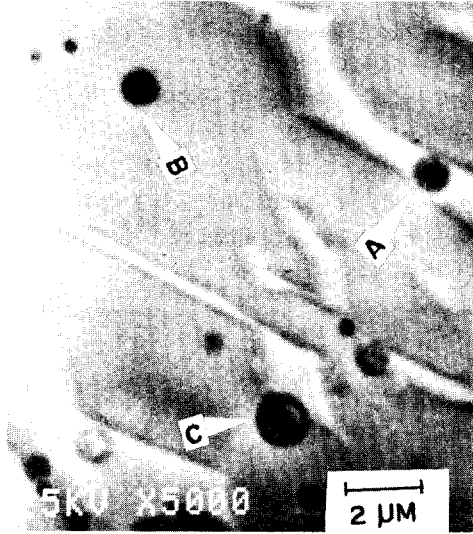


Photo. 4. Classification of oxide inclusion.

Table 5. Distributive Fraction of oxide inclusion (regardless of oxide inclusion content)

Specimen Fraction Process	Austenitic S.S.		Duplex S.S.		
	Fraction of oxide inclusion		Fraction of oxide inclusion		
	A	B + C	A	B	C
GTAW	85%	15%	30%	30%	40%
GMAW	92%	8%	34%	31%	35%
SMAW	89%	11%	28%	41%	31%
FCAW	88%	12%	36%	14%	50%

\*Calculated from oxide inclusions above 0.2μm size.

탄산 바와 같이 산화개재물이 증가함에 따라 DBTT가 소멸해감을 알 수 있는데, 이러한 결과는 산화개재물에 의한 취화가 점점 증가하여, BCC 구조특성에

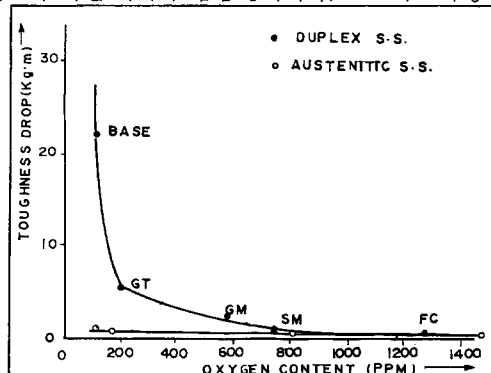


Fig. 9. Toughness drop between -90°C and -120°C above and below DBTT

의해 나타나는 δ-페라이트의 취성을 증가하기 때문으로 볼 수 있다.

### 5. 결 론

이상계 스테인레스강과 오스테나이트계 스테인레스강 용착부의 충격인성에 관한 연구로부터 다음의 결론을 얻었다.

1) 용착부의 개재물은 주로 산화개재물이었고, 이러한 산화개재물은 용착부의 충격인성을 크게 저하시킨다.

2) δ-페라이트는 이상계 스테인레스강의 연성-취성전이온도(DBTT)와 직접 관련되며 γ에 비해 산소에 의한 취성에 민감하다.

3) 이상계 스테인레스강이 오스테나이트계 스테인레스강에 비해 산소민감도가 큰 것은 산화개재물이 δ 및 δ/γ상경계에 많이 분포하기 때문이다.

### 후 기

EDX 분석에 도움을 주신 현대중공업(주) 김 회진 박사님과 백 광기 연구원에게 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. P.D. Blake, oxygen in steel weld metal, Met. con., March(1979), pp.118-120.
2. D.A. Wolstenholme, Reactions involving oxygen between gas, metal and slag during welding with basic electrodes, WI's International conference Nov.(1978), pp.123-134.
3. T.H. North, H.B. Bell, A. Koukabi and I. Craig, Notch toughness of low oxygen content submerged arc deposits, Welding Journal, Dec (1979), pp.343-S-354-S.
4. S.S. Tuliani, T. Bonizewski, N.F. Eaton, Notch toughness of commercial submerged arc weld metal, welding and met. fab., Aug.(1969), pp.327-339.
5. D.J. Widgery, Deoxidation practice for mild steel weld metal, Welding Journal, Mar. (1976), pp.57-S-68-S.
6. K.E. Dorschu, R.D. Stout, Some factors affecting the notch toughness of steel weld metal,

- Welding Journal, March(1961), pp.97-S-105S.
7. G. Thewlis, D.R. Milner, Inclusion formation in arc welding, Welding Journal, Sept.(1977), pp.281-S-288-S.
  8. C.S. Chai, T.W. Eager, Slag-metal equilibrium during submerged arc welding, Welding Journal, Sept.(1981), pp.539-547.
  9. T.H. North, H.B. Bell, A. Nowicki and I. Craig, Slag/metal interaction, oxygen and toughness in SAW, Welding Journal, Mar.(1978), pp.63-S-75-S.