

**研究論文**

## 일렉트로가스 용접부의 조직 및 인성에 관한 연구

이 해 우\* · 장 태 원\* · 이 윤 수\* · 석 한 길\* · 강 성 원\*\*

### A Study on Microstructure and Toughness of Electrogas Weldments

H. W. Lee\*, T. W. Jang\*, Y. S. Lee\*, H. G. Suk\* and S. W. Kang\*\*

**Key Words :** Heat Input (용접입열), Grain Boundary Ferrite (결정입계 페라이트), Widmanstatten Ferrite Side Plate (위드만 스테틴 페라이트 사이드 플레이트), Acicular Ferrite (침상페라이트), Grain-refining (결정립 미세화), Coarse-grain Zone (결정립 조대화부)

#### Abstract

The microstructure of HAZ and the mechanical properties in weldments such as hardness and toughness were studied for mild steel and AH36 grade TMCP steel, as increasing heat input with electrogas welding process.

The results of this study can be summarized as follow:

- 1) In the HAZ of mild steel, the width of coarse grained zone was larger than that of the normalised zone, however in the case of TMCP steel, the normalised zone was wider than the coarse grained zone.
- 2) The grain size of HAZ become coarse with increasing heat input. And at the same heat input, the grain size of TMCP steel was more coarser than that of mild steel.
- 3) According to the change of heat input, the deviation of hardness values was not significant, and the maximum values of hardness was not in HAZ but in the weld metal. And the hardness values in root part was higher than in face part.
- 4) Even though the HAZ grain size of mild steel was larger than that of TMCP steel, the impact values for mild steel was higher than those for TMCP steel, and the impact values in face part was higher than those in root part.

---

\* 정희원, 삼성중공업조선 플랜트 연구소 용접연구팀

\*\* 정희원, 부산대학교 조선해양공학과

### 1. 서론

산업의 발전과 더불어 구조물 및 설비가 복잡화 및 대형화되고 있으며 용접효율 및 생산성 향상 측면에서 대입열 용접이 적극 활용되고 있다.

대입열 용접법은 크게 서브머지드 아아크 용접 (S. A. W), 일렉트로 슬래그 용접 (E. S. W) 및 일렉트로 개스용접 (E. G. W) 등이 있으며, 이들 용접 process를 선급용 고장력강에 적용하면 열영향부 인성이 저하하여 용접시 입열량을 제한하고 있다. 열영향부 인성에 영향을 미치는 요소는 여러가지가 있지만 모재의 탄소당량, 용접입열 및 (prior austenite) 결정립 크기 등에 영향을 받으며 대입열 용접에서는 결정립 조대화에 의한 영향이 가장 큰 요인으로 작용한다고 알려져 있다<sup>1-3)</sup>.

따라서 본 연구에서는 선박 외판 용접에 주로 사용되고 있는 일렉트로개스 용접에 있어 용접조건 변화에 따른 미세조직 경도특성 및 충격특성을 선급용 연강 A grade 및 고장력강인 AH36 TMCP강재에 대하여 비교 분석하였다.

### 2. 실험방법

#### 2.1 재료 및 시험편 형상

시험편의 종류는 선급용 연강 A grade 및 고장력강인 AH36-TMCP를 사용하였으며 시험편의 형상은 Fig. 1과 같다.

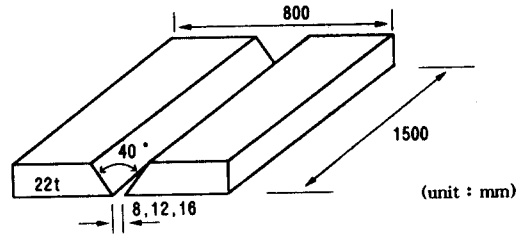


Fig. 1 Schematic drawing of weld joint

#### 2.2 모재/용접부 및 용접재료의 화학조성

모재/용접부 및 용접재료의 화학조성을 table 1에 나타내었으며 분석은 건식분석 방법인 스펙트로 분석기 (SPECTROVAC-2000, U. S. A)로 3회 분석하여 평균값을 기록하였다.

#### 2.3 용접장치 및 용접조건

본 실험은 600A DCRP power source, 용접와이어는 AWS EG 70T-2에 해당하는 재료를 사용하였으며 용접조건은 Table 2에 기록하였다.

Table 2. Welding Conditions

항목 ROOT GAP	전류 (A)	전압 (V)	용접속도 (cm/min)	입열 (KJ/cm)	보호 가스
8mm	380~400	36~37	5.7~6.1	145~146	CO <sub>2</sub> (25l/min)
12mm	410~420	36~37	4.9~5.1	181~187	
16mm	410~420	36~37	4.0~4.4	211~216	

Table 1. Chemical Composition and Mechanical Properties of Base and Weld Metal

종류	성분	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Nb	인장강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	항복강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	연신률 (%)
		A	모재	0.19	0.26	0.69	0.015	0.005	0.02	0.02	0.01	0.02	0.00	0.001	45
	용접부	0.08	0.54	1.55	0.018	0.015	0.02	0.02	0.16	0.02	0.001	0.005	.	.	.
AH 36	모재	0.16	0.26	1.06	0.022	0.009	0.02	0.02	0.01	0.02	0.002	0.003	54	39	29
TMCP	용접부	0.07	0.53	1.57	0.02	0.16	0.02	0.02	0.16	0.02	0.002	0.005	.	.	.
	용접 와이어	0.08	0.35	1.63	0.014	0.010	-	-	0.17	-	-	-	61	48	27

## 2.4 경도시험

경도시험은 macro vickers hardness를 사용하였으며 하중 5kg, loading time을 10초로 하였다.

## 2.5 충격시험

Charpy V-notch 충격시험을 0℃에서 실시하였으며 3개의 시험편에 대한 평균값으로 충격특성 곡선을 구하였다. 시험편의 채취위치는 Fig. 2와 같다.

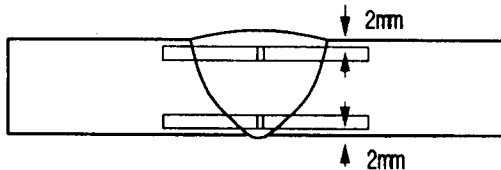


Fig. 2 The position of Charpy V-notch impact test specimens

## 2.6 미세조직시험

용접부의 미세조직을 조사하기 위하여 그라인딩 및 폴리싱 후 3% nital에서 10초간 부식한 후 광학현미경으로 관찰하였다.

# 3. 결과 및 고찰

## 3.1 모재의 micro 조직

Photo 1은 ABS 선급 규격으로 연강 A grade 및 AH36-TMCP의 현미경 조직사진이다. (A)는 연강 A급 강재로서 Ferrite와 Pearlite로 구성되어 있음을 알 수 있으며 결정립이 TMCP 강재 보다 상당히 조대해져 있었으며 (B)는 제어압연 및 가속냉각의 프로세스로 제조된 TMCP의 강재로서 Ferrite, Pearlite 및 Bainite의 혼합조직으로 구성되어 있었다.

TMCP강재는  $A_{c3}$  이상의 온도로 가열한 후 재결

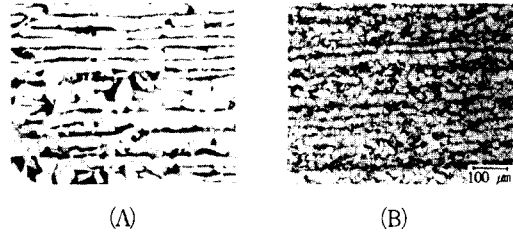


Photo. 1 Microstructure of Base Metal

정 영역 (recrystallized region) 온도 이하에서 제어압연 (controlled rolling)을 하고 가속냉각 (accelerated cooling)을 함으로써 고강도 및 미세한 조직을 얻을 수 있다. 일반적으로 가속냉각형 TMCP강은 normalized 강재나 제어압연 강재 보다 첨가 합금원소량이 적어 용접성이 우수할 뿐만 아니라 용접 열영향부에서의 인성이 우수하다고 알려져 있다<sup>3-6)</sup>.

## 3.2 용접부의 미세조직

Photo 2의 (A)는 루트갭이 8mm인 TMCP강재의 매크로조직사진이다. 용접조건은 전류 380~400A 전압 36~37V, 용접속도는 5.7~6.1 cm/min. 이다.

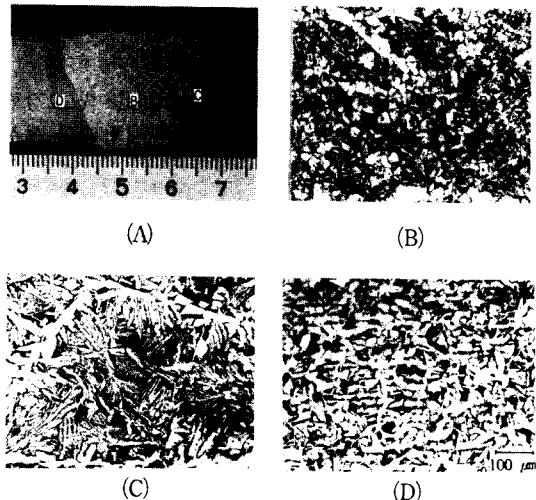


Photo. 2 Macro and microstructures of weldments

(B)는 용접금속부의 미세조직으로 회계 보이는 부분이 결정입계 페라이트이며 입열량이 증가하면 폭이 넓고 다각형화 및 조대화되는 양상을 나타낸다. 결정입계 페라이트 주위에 검게 보이는 부분이 침상 페라이트(acicular ferrite)로서 저탄소 합금강 용접부의 기계적 성질은 냉각중 변태를 통하여 생성된 페라이트 형상(ferrite morphology)에 영향을 받으며 이 용접부의 인성 및 강도는 침상 페라이트량과 관계가 있음은 잘 알려져 있다.

즉 인성 및 강도는 용접부 미세조직에 침상페라이트가 고분률로 생성되어야 하고, 동시에 결정입계 페라이트나 위드만 스테이트 페라이트 사이드 플레이트(Widmanstätten ferrite side plate) 및 상부 베이나이트의 생성을 최소화 하여야 한다. Mn과 Mo의 합금원소는 변태온도를 떨어 뜨리고 침상 페라이트의 생성을 촉진한다고 보고되고 있다<sup>7,8)</sup>.

열영향부의 (C)는 입계 페라이트들이 프라이어 오스테나이트 결정입계에 뚜렷하게 나타나고 있으며 입계 페라이트에 둘러싸여진 부분은 용착금속에서와 동일한 침상페라이트 및 마르텐사이트 조직이 공존하고 있음을 보여주고 있다.

결정립이 조대화된 부분, 즉 약 1200℃ 이상의 온도 범위에서 냉각된 조직에 비해 (D)는 900~1200℃ 정도의 온도에서 냉각된 영역이므로 미세조직은 normalizing 조직이다. (C)의 조대화된 조직보다 상대적으로 인성 및 기계적 특성이 우수하다고 할 수 있다.

### 3.3 열영향부의 미세조직

Photo 3은 용접조건에 따른 용접금속과 인접한 열영향부 결정립 조대화 영역의 광학현미경 조직 사진이다. mild 및 TMCP의 경우 입열량이 증가할수록 결정립이 조대화되는 경향을 나타내고 있으며 동일한 용접입열 조건에서는 mild steel인 경우가 TMCP steel보다 결정립이 더 조대화하였다. mild steel 인 경우 모재 자체의 초기 결정립이 TMCP 강재보다 조대화해 있었으며 또한 TMCP 제조시 첨가되는 미량 합금원소량이 상대적으로 더 작아 질화물 및 탄화물로 인한 결정립계 성장억제가 약화되었다고 생각된다. 특히 대입열용접시

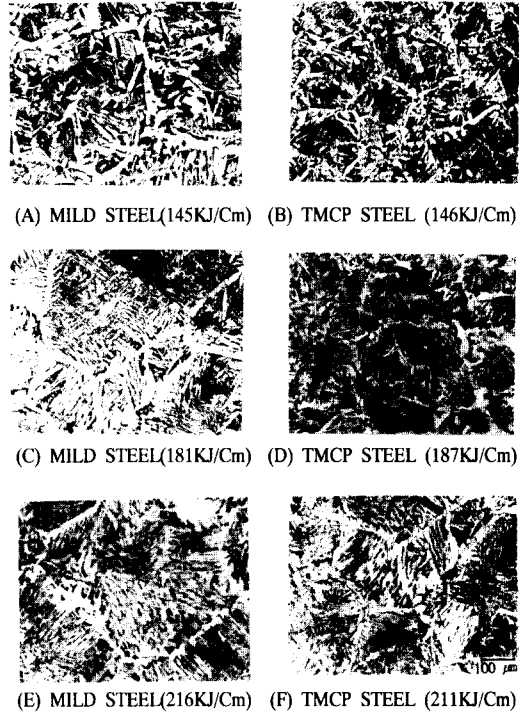


Photo. 3 Microstructure of heat affected zone

입열량의 증가로 결정립이 조대해지고 그 결과 인성을 저하시킨다고 알려져 있다. Photo 3의 조직에 나타난 바와같이 페라이트가 프라이어 오스테나이트 결정입계에 뚜렷이 나타나 결정립 조대화 구역을 알 수 있다. 연강인 경우 열영향부는 partial grain-refining, grain-refining 및 grain-coarsening 영역으로 구분할 수 있다.

partial grain-refining 영역은  $A_{c1}$ 과  $A_{c3}$  사이의 온도에서 prior pearlite colony들이 오스테나이트( $\gamma$ )로 변태하고 냉각시 미세한 Pearlite 및 Ferrite로 분해한다. 그레인 리파이닝은  $A_{c3}$ 온도인 900~1200℃의 온도로 가열되었다 냉각된 조직으로 이때 생성된 Pearlite 및 Ferrite는 균일하지 않는데, 그 이유는 용접동안 빠른 heating rate로 탄소 원자가 충분히 확산하지 못했기 때문이다<sup>3,9)</sup>.

Grain coarsening영역은 1200℃이상의 온도로 가열되었다가 냉각된 조직으로 냉각속도가 빠른 경우 마르텐사이트 변태 및 결정립 조대화에 따라 인성저하를 초래한다.

**Table 3.** Variation of HAZ regions with the heat input

강재종류	GAP(mm)	결정립 조대화 영역(mm)	노말라이징 영역(mm)	입열 (KJ/cm)
Λ GRADE	8	8	4	145
	12	8	6	181
	16	10	6	216
AH 36 TMCP	8	3	8	146
	12	4	9	187
	16	5	9	211

Table 3은 입열량과 열영향부의 관계를 나타낸 도표이다. 연강인 Λ grade 경우 입열에 관계없이 결정립 조대화 영역이 노말라이징 영역보다 넓게 나타났으나, TMCP인 경우에는 이와 반대로 노말라이징 영역이 넓게 나타났다.

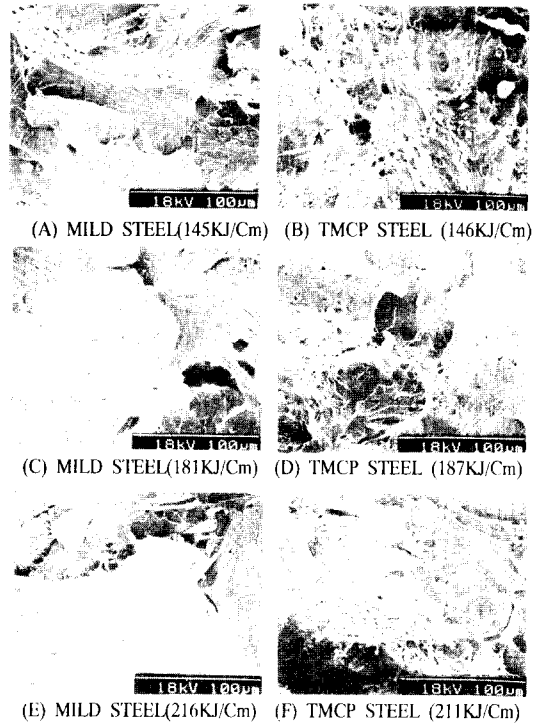
이와같은 현상은 연강인 경우 열간상태의 압연 후 결정립이 계속 성장하여 초기 결정립이 이미 조대해져 있었고 결정립 성장을 방해하는 Nb, Ti, V 같은 합금이 거의 첨가되지 않아 용접입열의 증가에 따라 결정립 조대화 영역이 넓게 형성되었다고 생각된다.

TMCP인 경우 제어압연 및 가속냉각의 프로세스로 제조되므로 초기 제품 상태의 결정립이 미세하고 Nb, Ti, V과 합금원소 등이 탄화물과 질화물을 형성하여 결정립 성장을 억제했다고 생각된다.

Photo 4는 충격시험(charpy V-notch, at 0°C)한 시험편의 주사전자 현미경 사진으로 연강인 (A), (C) 및 (E)와 TMCP steel인 (B), (D,) 및 (F) 모두 연성파괴인 dimple 및 벽개파괴의 혼합 양상을 보여주고 있다. Normalized 고장력강의 일렉트로 개스 용접시 충격특성 특히 열영향부 인성이 큰 문제점으로 지적되는데 충격시험후 파단면에 대한 주사전자 현미경 결과는 주로 Cleavage fracture인 취성파괴로 연강 및 TMCP강재와는 다른 양상을 나타내고 있다.

### 3.4 경도 특성

Fig. 3은 경도특성 곡선이다. 용접재료에 많은 영향을 받는 용착금속 부위에는 연강 및 TMCP steel에서 비슷한 경도값을 나타내고 있지만 열영향부를 지나 모재로 갈수록 TMCP steel에서 높은



**Photo. 4** Fracturegraphy of HAZ charpy specimens

경도값을 나타내고 있다. 특히 열영향부에서는 입열량 변화에 관계없이 face 보다 root 부에서 높은 경도값을 나타내고 있는데 이는 root 부에서 face 보다 냉각속도가 상대적으로 더 빨라 경화조직 변화가 용이한 것으로 판단된다. 또한 열영향부 보다 용착금속의 경도치가 더 높게 나타나는 것은 용착금속 내부의 Mn, Mo, Si등의 합금원소 성분이 더 많고 대입열 용접으로 열영향부가 서냉하였기 때문으로 생각된다.

### 3.5 충격 특성

Fig. 4는 0°C에서 충격시험한 결과를 나타낸 그래프이다. 용접재료에 많은 영향을 받는 용착금속의 충격특성은 입열량이 증가하더라도 충격특성은 큰 차이를 보이지 않지만 fusion line+2mm에서 가장 낮은 충격특성을 보이고 있다. 이 부분에서는 약 1200°C 이상의 높은 온도에서 일정시간이 유지 후 냉각된 조직으로 결정립이 가장 조대화된 영역이며 대입열용접시 문제시되는 결정립성장이 인성

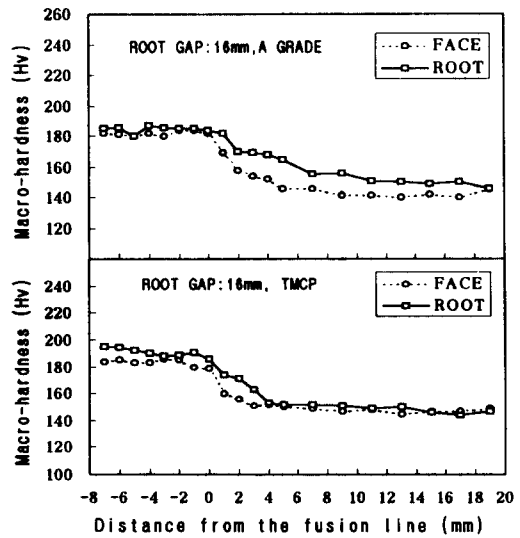
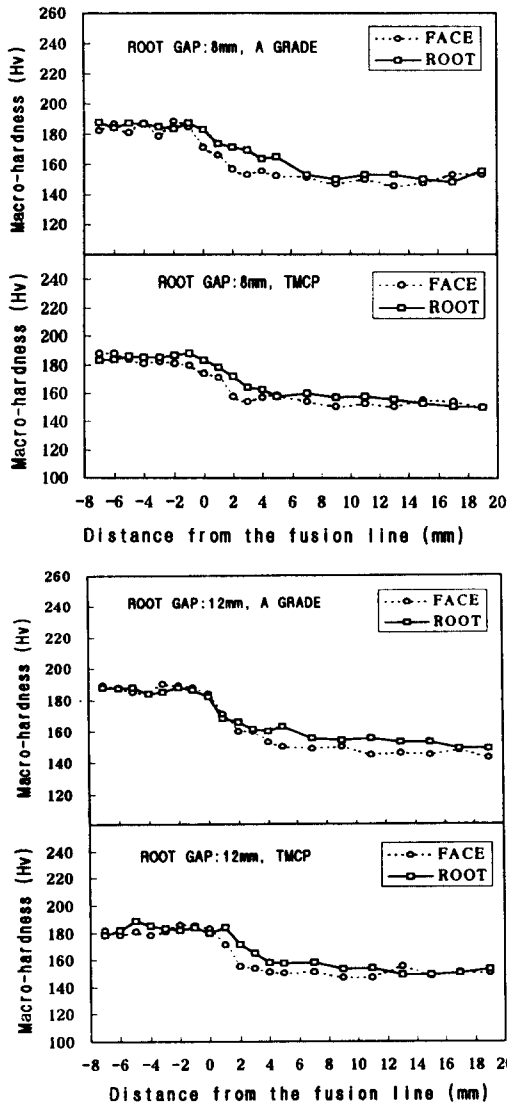


Fig. 3 Hardness profiles of welded joints

저하의 주 원인으로 생각된다. 열영향부의 모든 영역에서 연강이 TMCP steel보다 높은 충격특성을 보이고 있다. 특히 fusion line+5mm의 경우 mild steel은 결정립 조대화 영역이고 TMCP steel은 결정립 미세화영역으로 TMCP steel에서 높은 충격특성을 기대하였으나 결과는 결정립이 조대화 된 연강에서 더 높게 나타났다. 이는 연강의 인장강도가 46 kg/mm<sup>2</sup>, TMCP steel은 54 kg/mm<sup>2</sup>으로 강도에 의한 차이가 결정립 조대화에 의한 영향보다 충격특성에 더 크게 작용한 것으로 생각된

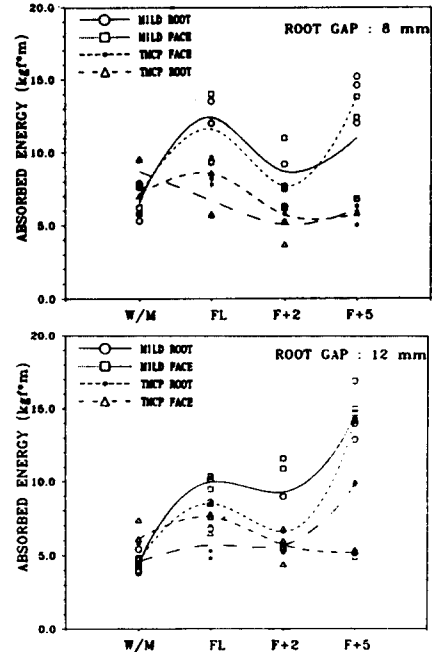


Fig. 4 Results of Charpy v-notch impact tests

다. 본 실험은 Hiroshi Yajima<sup>10)</sup> 등의 실험결과와도 비슷한 경향을 보였다. 동일한 인장강도의 경우에는 결정립이 미세할수록 더 우수한 충격특성을 나타낸다. Fig.4의 루트갭이 16mm인 충격특성에서

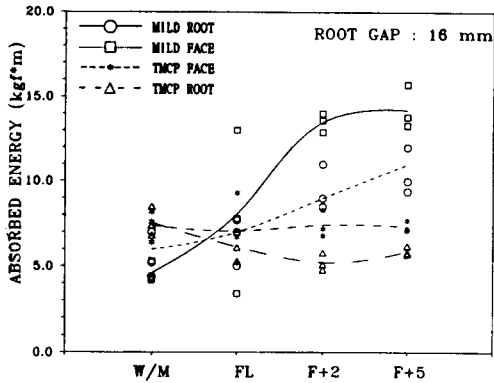


Fig. 4 Results of Charpy v-notch impact tests

예상과는 달리 fusion line+2mm의 연강에서 갑자기 높은 충격특성을 보이고 있다. 이때의 충격치는 입열량이 더 작은 루트갭 8mm 및 12mm에서 보다 오히려 더 크게 나타나고 있는데 이에대한 원인은 정확히 규명하지 못하였다. 연강 및 TMCP steel의 모든 부위에서의 충격특성은 선급에서 요구하는 3.5 kgf·m을 만족하였다.

#### 4. 결 론

연강인 A grade 및 AH36 TMCP steel에 대한 일렉트로가스 용접시 입열량에 따른 경도 특성, 열영향부 미세조직 및 충격특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연강인 경우 결정립 조대화 영역이 노말라이징 영역 보다 넓게 형성되었으나 TMCP steel인 경우 반대로 노말라이징 영역이 넓게 형성하는 경향을 보였다.
2. 열영향부의 결정립은 입열이 증가할 수록 조대해졌으며 동일한 입열에서는 TMCP steel보다 연강에서 더 조대화되는 경향을 나타내었다.
3. 입열량에 따른 경도분포곡선은 큰 차이를 보이지 않으나 열영향부가 아닌 용착금속에서 최고 경도를 나타내었으며 동일한 입열에서 face 보다 root에서 높은 경도 분포곡선을 나타내고 있었다.
4. 열영향부 충격특성은 연강이 TMCP steel 보다 결정립이 조대화 되었음에도 불구하고 TMCP

Steel 보다 높은 값을 나타내었고 동일한 입열에서 root 보다 face에서 높은 인성을 나타내었다.

#### 참 고 문 헌

1. Garland, J. G and Kirkwood, P. R : Microstructural and Toughness Control in Low Carbon Weld Metals. (1975), p. 320
2. Levine, E and Hill, D. C : Toughness in HSLA Steel Weldments, Metallurgical Transactions. (1977), p. 360
3. 佐藤邦彦 : 熔接 構造 要覽(1983), p. 37~40
4. I. Kozasu : Overview of Accelerated Cooling of Plate, Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., (1985)
5. H. Suzuki : Weldability of Modern Structural Steels in Japan, Transactions ISIJ, Vol. 23 (1983), p. 189~204
6. N. J. Kim : The Physical Metallurgy of HSLA Linepipe Steels, Journal of Metals Vol. 35 (1983), p. 21~27
7. Schuster, J. and Gentsch, O : The Welding of Fine Grained Structural Steels for Operating Temperatures Low As-60°C with Reference to MAG filler 6 NiMnSi 9.4, Welding International, No.9 (1989) p. 8.5~809
8. Committee of Weld, Metall. of JWS : Classification of Microstructures in Low C-Low Alloy Steel Weld Metal and Terminology, IX-1283-83
9. Sindo KOU : Welding Metallurgy, University of Wisconsin, (1987), p. 320~330
10. Hiroshi Yajima : A suggested Method of Ship Hull Planting Fracture Toughness Assesment, 西割造船會 第75回 (1987), p. 200~211
11. American Welding Society : Welding Handbook (8th), p. 93~102