

GTAW-SMAW와 SAW를 이용한 고장력강관의 용접에 대한 연구

이 철 구* · 조 선 근**

A Study on the Welding Process of High Strength Steel Pipe in GTAW-SMAW and SAW

Lee. Chul Ku* and Cho. Seon Keun**

Key Words : TMCP, Fine grained(미세결정립), API(미국석유협회), SAW(서브머지드 아크용접), GTAW(가스텅스텐 아크용접), SMAW(피복 아크용접), HAZ(열영향부), High Strength Steelpipe(고장력 강관).

Abstract

This study is to compare the welding quality of API 5L-X65 Steel- pipe's for natural gas transmission piping applied by SAW at shop and by GTAW-SMAW at site.

The results can be summarized as follows; 1) Tensile strength of the welded zone by SAW(611.5 MPa) and by GTAW -SMAW(608.6 MPa) was maintained greater than that of the base metal(583.5 MPa).

2) Hardness of the welded zone and HAZ by SAW(Hv 194.8) & GTAW-SMAW (Hv 196.1) was slightly increased above that of the base metal (Hv 168.8), but less than the maximum allowable hardness(Hv 248).

3) Impact value of the welded zone by SAW(126.8 J) & GTAW-SMAW(88 J) became lower than that of the base metal(282.5 J), but was above the requirement of API 5L(68 J).

4) Microscopic structure of the welded zone and HAZ by both SAW & GTAW-SMAW became fine-grained.

* 정회원, 서울산업대학교 기계공학과

** 비회원, 한국가스공사 자재부

1. 서론

현대 산업분야에서 용접은 매우 중요한 비중을 차지하고 있으며, 특히 중화학공업 분야에 있어서는 빼놓을 수 없는 기술분야이다.

또한, 최근에는 금속 재질 및 용접기법에 따른 특수용접 분야의 기술이 날로 향상되어 보급되고 있다.

특수용접법중 서브머지드 아크용접 (SAW; Submerged Arc Welding) 및 가스텅스텐 아크용접 (GTAW; Gas Tungsten Arc Welding)은 품질면의 측면에서는 여타의 용접법보다 우수하나 비용측면에서는 다소 불리한 것이 현실이다. 작업조건 측면에서 보면 SAW는 용접자세에 제한이 있어서 고압 가스 배관의 경우 주로 시공현장에서 용접이 어려우므로 품질, 비용, 작업조건이 고려된 용접방법의 선택은 매우 중요하다¹⁾.

현재 국내에서 건설되고 있는 천연가스 수송용 배관재료는 미국 석유회회(API; American Petroleum Institute)규격에서 정한 고장력 강관(API 5L-X65)이 사용되고 있으며, 이 강관의 소재로는 1990년 국산화를 시작한 TMCP (Thermo Mechanical Control Process)법²⁻⁴⁾에 의해 제조되는 고장력 강관을 사용하고 있다. 이 강재는 제조시 가열, 압연 및 냉각공정의 복합적 제어에 의하여 강재의 미세조직을 변화 시킴으로써 인성이 풍부하고, 용접성의 측면에서 보면 기존의 불림(Normalizing)처리재에 비해 탄소당량(Ceq; Carbon equivalent)이 0.04~0.08% 정도 낮아 용접부의 저온균열 발생이 적고 용접 열영향부(HAZ; Heat Affected Zone)의 인성도 우수하다^{5,6)}.

또한, 제조상의 특징(가속냉각)에 기인하는 조직의 불안정 및 불균일 잔류응력의 존재로 대 입열 용접시 용접부의 연화와 절단가공시 변형의 단점이 있다.⁷⁻⁹⁾

이 강관의 용접조건에 있어서 파이프 제조공장파 시공현장 여건이 서로 상이하야 문제점이 대두됨으로써 품질, 비용 및 용접조건을 고려한 가장 적절한 용접방법의 선택은 매우 중요한 과제이다.

그러므로, 본 연구에서는 천연가스 수송용 배관으로 사용되는 강관 (API 5L-X65)의 용접방법중 제조공장에서 이용되는 SAW와 시공 현장에서 적용되는 GTAW 및 피복 아크용접 (SMAW; Shielded Metal Arc Welding)을 동시에 실시하여 용접방법에 따른 기계적 성질과 용접성을 비교 검토하고자 한다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 시험재료

본 연구에 사용된 시험재료는 관경 762 mm, 두께 11.1 mm와 17.5 mm인 천연가스 수송 배관용 고장력강관(API 5L-X65)이며, 시험재료의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같으며, 시험재료의 용접이음부 형상은 Fig.1과 같다.

| Description | Wall thickness (mm) | Bevel angle (°) | Root face (mm) | Root gap (mm) |
|------------------------|---------------------|-----------------|----------------|---------------|
| SAW welded joint | 11.1 | 30 | 6.0 | 0.8 |
| | 17.5 | 30 | 12.5 | 0.8 |
| GTAW-SMAW welded joint | 11.1 | 30 | 1.2 | 2.5 |
| | 17.5 | 30 | 1.2 | 2.5 |

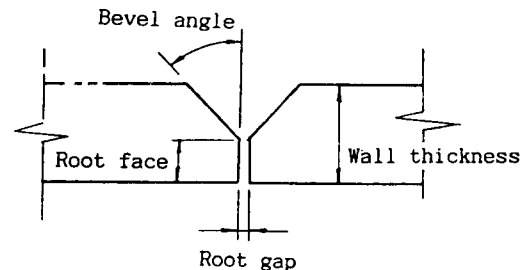


Fig. 1 Joint configuration of specimen for base metals

Table 1 Chemical compositions of base metals

(wt,%)

| Materials | Compositions | | | | | | |
|------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | C | Mn | P | S | V | Ti | Si |
| API 5L-X65 | 0.090 | 1.450 | 0.018 | 0.002 | 0.027 | 0.011 | 0.211 |

Table 2 Mechanical properties of base metals

| Properties Materials | Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Impact value (J) | Hardness (Hv) |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------|------------------|
| API 5L-X65 | 495.8 | 583.5 | 282.5 | 168.8 |

Table 3 Specifications of welding consumables

| Welding process | Welding consumable | AWS class | Size (mm) | Manufacturer |
|-----------------|--------------------|-----------|-------------|--|
| SAW | Welding wire | EA3KA4 | φ 4.8 | Lincoln electrode (LA-90) |
| | Welding flux | F8A4 | Bonded flux | Lincoln electrode (L-880) |
| GTAW | Welding rod | ER70S-G | φ 2.4 | Korea welding electrode OO, LTD. (TGS-50G) |
| SMAW | Welding rod | E-9016G | φ 4.0 | Chosun steel wire CO, LTD. (LC-600) |

Table 4 Chemical compositions of filler metals

a. Electrode (wt, %)

| Compositions Electrode | C | Si | Mn | P | S | Cu | Ni |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| LA-90 | 0.077 | 0.610 | 1.790 | 0.012 | 0.007 | 0.059 | - |
| TGS-50G | 0.090 | 0.700 | 1.500 | 0.010 | 0.010 | - | - |
| LC-600 | 0.080 | 0.520 | 1.100 | 0.014 | 0.006 | - | 0.560 |

b. Welding flux/Electrode(Deposited metal) (wt, %)

| Compositions Flux/Electrode | C | Mn | Si | S | P | Mo | Cu |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| LA-880/ LA-90 | 0.073 | 1.270 | 0.530 | 0.005 | 0.012 | 0.420 | 0.078 |

Table 5 Mechanical properties of deposited weld metal

| Properties Electrode | Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation (%) | Impact value (J) |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------|---------------------|
| LA-90/L880 | 550.7 | 635.0 | 29.0 | 108 (233K) |
| TGS-50G | 499.8 | 578.2 | 32.0 | 160 (253K) |
| LC-600 | 568.4 | 666.4 | 28.0 | 150 (263K) |

2.2 용가재

3과 같으며, 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 4 및 Table 5와 같다.

용접방법별 용가재(Filler metal)의 규격은 Table

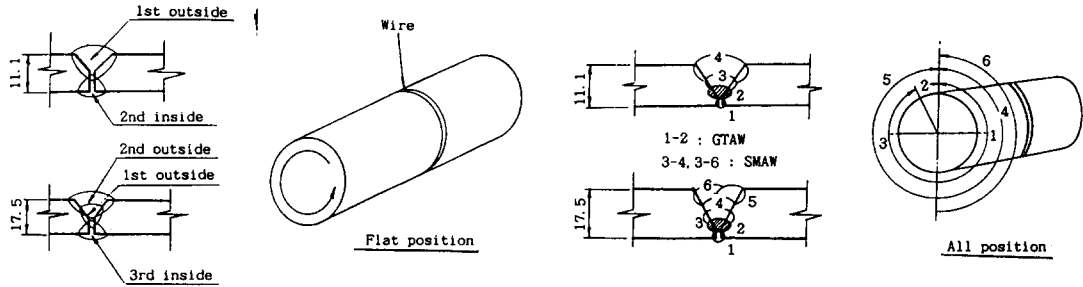
2.3 용접방법 및 용접조건

서브머지드 아크용접기, 가스팅스텐 아크용접기, 피복아크 용접기를 사용하여 SAW, GTAW-SMAW 공히 V형 맞대기이음으로 SAW이음은 아래보기자세(Flat-position), GTAW-SMAW이음은 전자세(All Position)

로 용접하였으며, 강관의 제조공장 및 시공현장에서의 용접방법, 용접 패스수는 Fig.2, 용접조건은 table 6과 같다.

용접작업시 주위온도는 289K 였고, 용접플럭스(Welding flux)는 533K 에서 1시간 건조후 사용 하였으며, 용접봉은 633 K 에서 1시간 건조후 Dry oven 에서 473 K 로 유지하며 사용하였다.

용접전류, 용접전압, 용접속도는 예비실험을 통하여



a. Welding sequence for circumferential welding (SAW) in manufacturer's plant

b. Welding sequence for circumferential welding (GTAW-SMAW) in construction site.

Fig. 2 Welding sequence for welding work

Table 6 Welding conditions

| Welding process | Wall thick. (mm) | Weld pass | Filler metal | | Current | | Arc voltage (V) | Welding speed (mm/min) |
|-----------------|------------------|-------------|---------------|-----------|----------|----------|-----------------|------------------------|
| | | | Class (AWS) | Dia. (mm) | Polarity | Amp. (A) | | |
| SAW | 11.1 | 1st Outside | F8A4, EA3K-A4 | φ4.8 | DCRP | 800 | 33 | 1,190 |
| | | 2nd Inside | " | " | " | 980 | 37 | 1,160 |
| | 17.5 | 1st Outside | " | " | " | 870 | 36 | 1,400 |
| | | 2nd Outside | " | " | " | 900 | 37 | 860 |
| | | 3rd Outside | " | " | " | 970 | 38 | 835 |
| GTAW | 11.1 | 1 | ER70SG | φ2.4 | DCSP | 150 | 15 | 80 |
| | | 2 | " | " | " | " | " | 150 |
| | 17.5 | 1 | " | " | " | " | " | 80 |
| | | 2 | " | " | " | " | " | 150 |
| SMAW | 11.1 | 3-4 | E9016G | φ4.0 | AC | 140 | 25 | 120 |
| | 17.5 | 3-6 | " | " | " | 150 | " | 80 |

적절한 조건을 얻은후 본 실험에 적용하였다.

2.4 비파괴시험

방사선투과 시험장비를 사용하여 Table 6 의 조건에 따라 용접작업 완료후 완전 냉각한 상태에서 KS B 0845 에 의거 방사선투과 시험(Radiographic testing) 을 하였으며, 장비제원 및 촬영조건은 Table 7 과 같다.

Table 7 Conditions of radiographic testing

| | | |
|------------------------|---|--|
| Equipment & Maker | Television screen, SEIFORT | |
| Object | Material : API 5L-X65 Thickness : 17.5mm, 11.1mm | |
| Technique | Single wall exposure, Single wall view | |
| Selection of Radiation | X-ray | Voltage : 160kvp(17.5mm) 125kvp(11.1mm) Current : 4mA(17.5mm) 5mA(11.1mm) |
| Examination Condition | Exposure time : 3min Distance(SFD) : 600mm | |
| Penetrameter | ISO 6-12 | |
| Applied Code | KSB 0845 | |

2.5 기계적 성질 시험

용접부의 기계적 성질을 시험하기 위하여 Fig. 3과 같이 시편을 채취하였으며, 특히 ① SAW공정(길이방향)과 GTAW - SMAW공정(원주방향), ② SAW공정(길이방향)과 SAW공정(원주방향)의 겹침 부분(T-cross portion) 을 주요 관찰 대상으로 하였다.

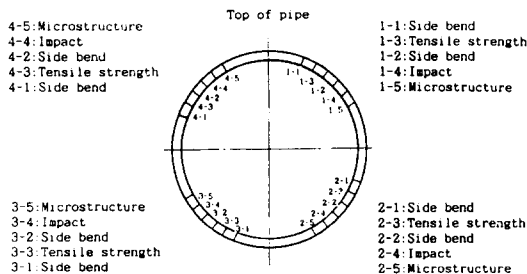


Fig. 3 Location for the extraction of test specimen

2.5.1 인장시험

KS B 0833 1호에 따라 인장 시험편을 제작하였고 KS B 0802에 의거하여 만능인장시험기를 사용하여 상온에서 50TON의 하중 및 10 mm/min의 Cross-head-speed로 시험하여 인장강도를 측정하였다.

2.5.2 굽힘시험

KS B 0832 3호에 따라 굽힘시험편을 제작하였고, 용착금속부(Deposited metal zone) 의 표면 및 이면 굽힘시험을 상온에서 A₂형 지그를 사용하여 편치를 50 TON의 하중으로 50 mm/min의 이송속도를 주어 실시하였다.

2.5.3 경도시험

경도시험은 용접방법별로 모재부, 열영향부, 용착 금속부에 대해서 비커스 경도시험기를 사용하여 KS B 0806에 따라 실시하였으며, 특히 T₁, T₂부위는 ① SAW 공정(길이방향)과 GTAW-SMAW 공정 (원주방향), ② SAW 공정(길이방향)과 SAW 공정(원주방향)의 겹침부분 (T-cross portion)이므로 이를 주요 시험대상으로 하였으며, 경도의 측정지점은 Fig. 4 와 같다.

2.5.4 충격시험

KS B 0809 2호에 의거 충격시험편을 제작하였고, 용착금속부에 V-notch를 주어 KS B 0810에 따라 샤르피 충격시험기로 273 K 에서 충격시험을 하였다.

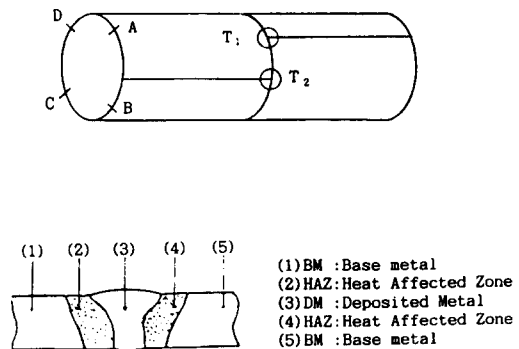


Fig. 4 Check point for hardness

2.5.5 금속조직시험

금속조직시험은 20 mm × 20 mm의 시편을 사포지 (#320~#1,000)로 연마후 연마제 (Cr₂O₃)와 물을 사용하여 시편을 폴리싱 한후 금속 현미경을 사용하여 모재와 용접부의 조직사진을 100배로 촬영 하였으며, 특히 SAW, GTAW - SMAW 가 교차되는 부분의 조직변화를 주요 관찰 대상으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비파괴시험 결과

방사선투과시험 결과 SAW공정 및 GTAW-SMAW 공정 공히 KS B 0845 1급의 기준에 만족하였고, 용접방법별로 결함 증가등의 문제점은 없는 것으로 판명되었다.

3.2 인장시험 결과

Fig. 5, 6 에서 볼 수 있듯이 용접방법, 용접위치, 시험재료 두께에 따른 인장강도의 차이는 거의 없었으며, 용접부의 인장강도가 모재(Base metal)보다 25 - 28 MPa 정도 높게 나타남을 알 수 있는데 이는 용착금속부의 기계적 성질이 모재부에 비해서 우수하고 열영향에 기인한 것으로 판단된다.

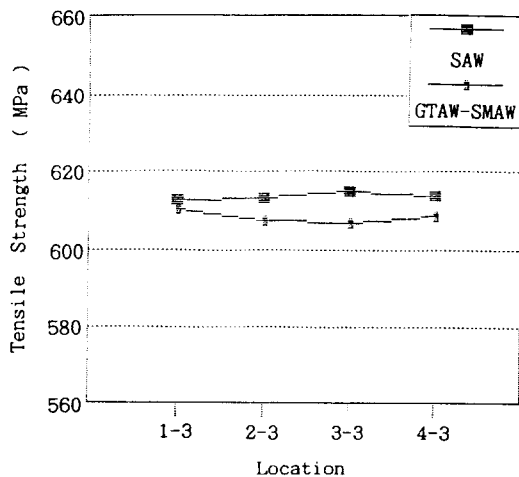


Fig. 5 Tensile strength distribution of welded zone in wall thickness of 11.1mm

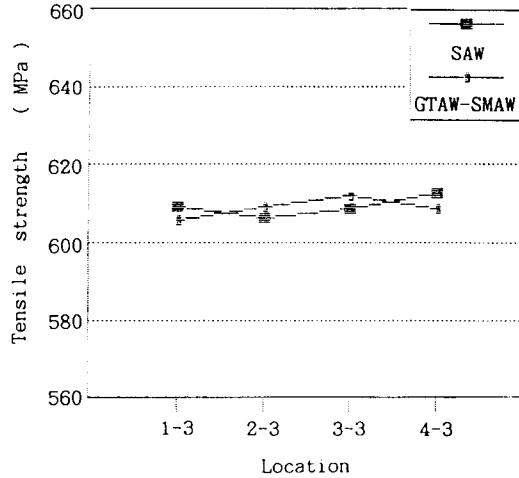


Fig. 6 Tensile strength distribution of welded zone in wall thickness of 17.5mm

3.3 굽힘시험 결과

용접방법별 표면 및 이면 굽힘시험 결과 용접부의 균열 및 터짐 현상이 나타나지 않아 모두 합격 판정을 받았다.

3.4 경도시험 결과

외부응력에 의해 일어나는 균열 SSCC(Sulphide Stress Corrosion Cracking)은 주로 용접부에 많이 생기며, 용접부 최고경도를 Hv<248로 관리하는 것이 중요한데^{16,17)}, 이는 용접부 최고경도가 Hv 248을 초과할 시 모재부의 충격치가 높아 한냉지에서 강재의 용접성능에 영향을 미치기 때문이다.

Fig. 7, 8에 나타난 바와 같이 용접방법 및 두께별로 모재부, 열영향부, 용착금속부에 대한 경도차이는 크지 않음을 알 수 있었으며, 특히 겹침부(SAW-SAW, SAW-GTAW-SMAW)에도 경도차이는 크지 않음을 알 수 있다.

이는 모재가 탄소당량을 낮추면서 동시에 강도를 올리는 TMCP강이며, 적절한 용접 설계조건에 의한 용접입열 및 용접재료를 선택 사용하였기 때문이라 판단된다.

3.5 충격시험 결과

Fig. 9,10에 나타난 바와 같이 모재부에 비해서 용접부의 충격 값은 작으나 API 5L Section 4. SR.5에 의거 최소 에너지는 273 K 에서 시험한 결과 기준치 (All heat average 68 J, One heat 27 J) 보다 높았다. 여기서 알수 있는 것은 SAW용접부가 GTAW-SMAW 용접부 보다 비교적 충격값이 높고, SAW용접부에서도 두께가 얇은 11.1 mm가 높고, GTAW-SMAW

용접부에서는 두께가 두꺼운 17.5 mm가 충격 값이 높음을 알수 있었다.

SAW의 충격치가 높은 이유는 용접 패스수가 GTAW-SMAW보다 적고, 또 GTAW에서 충격치가 낮기 때문이다. SAW에서 두께가 얇은 11.1mm의 충격치가 높은 이유는 용접입열량이 적기 때문이고, GTAW-SMAW에서 두께가 두꺼운 17.5 mm의 충격치가 높은 이유는 용접부 Groove가 커서, 모재의 혼합비가 작기 때문이다.

또한, GTAW-SMAW 에서는 용접시작부보다 용접 끝단부가 평균적으로 충격치가 근소하나마 낮아짐을

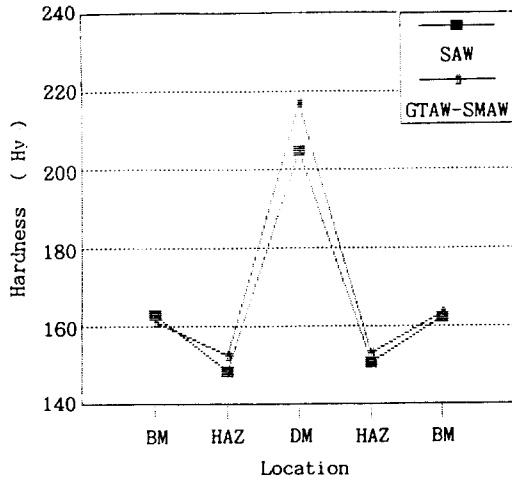


Fig. 7 Hardness distribution of welded zone in wall thickness of 11.1mm

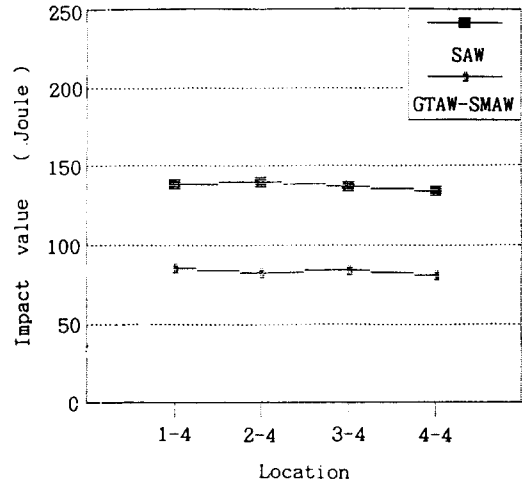


Fig. 9 Impact value distribution of welded zone in wall thickness of 11.1mm

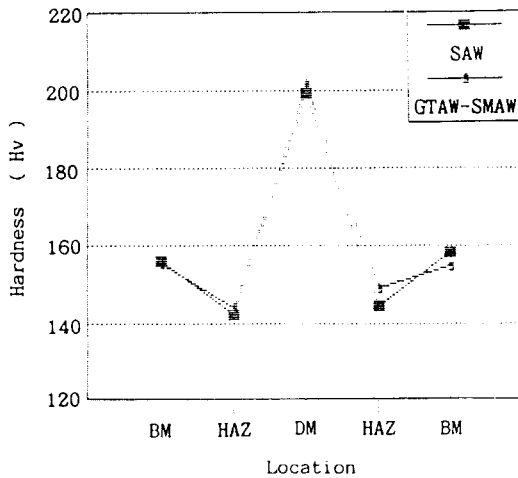


Fig. 8 Hardness distribution of welded zone in wall thickness of 17.5mm

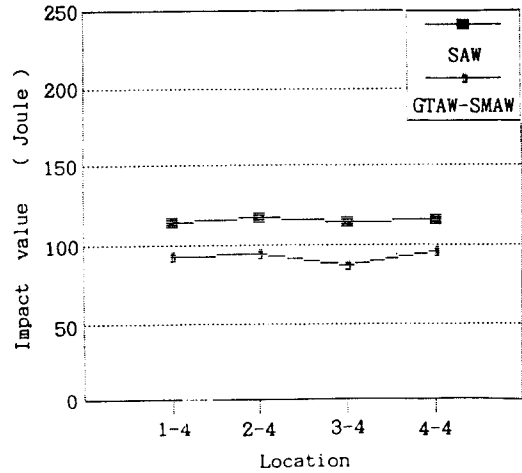


Fig. 10 Impact value distribution of welded zone in wall thickness of 17.5mm

알수 있으며, 이는 입열량에 기인한 것으로 보인다.

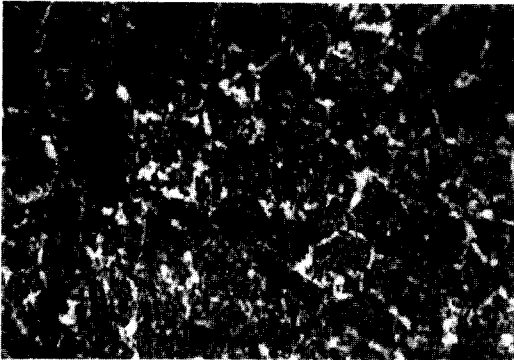
상기 결과를 고찰해 볼때 충격치가 API 기준 보다 우수함은 적절한 용접설계와 용접조건에 의한 용접 입열 및 용접재료를 선택사용 하였기 때문인 것으로 판단된다.

3.6 금속조직시험 결과

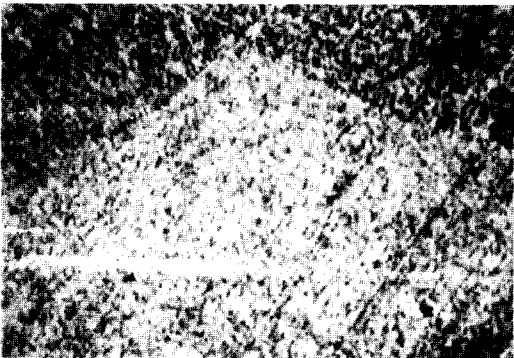
금속조직시험 결과 각 용접방법별 각부의 조직은 미세결정립(Fine grained)으로 형성되어 용접부는 건전하였으며, 금속조직시험 결과는 Photo. 1 과 같다.



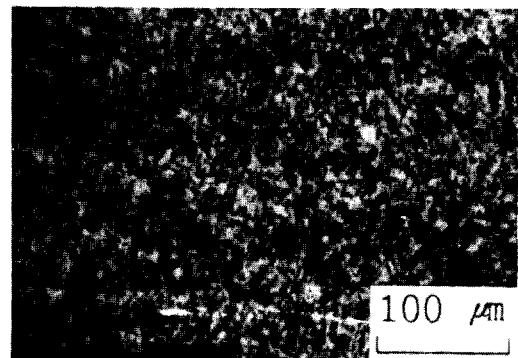
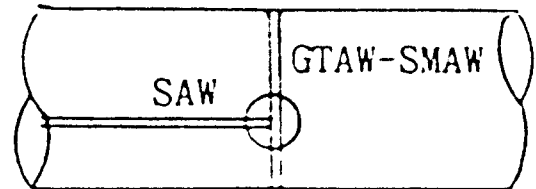
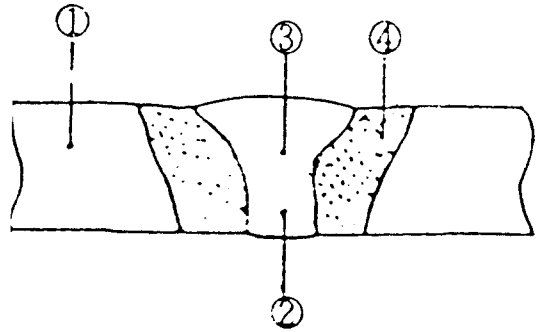
① Base metal



② Deposited metal (1-2 pass)



③ Deposited metal(3-4 pass)



④ Heat affected zone

Photo. 1 Results of optical microscopic observations in GTAW-SMAW process

4. 결 론

본 연구에서는 천연가스 수송배관용 고장력강관 (API 5L-X65)의 제조공장에서 용접방법(SAW)과 시공현장에서 용접방법(GTAW-SMAW)에 대해서 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접부의 인장강도는 SAW 611.5 MPa, GTAW-SMAW 608.6 MPa로 모재부의 583.5 MPa보다 높게 유지되었다.

2) 용접부 및 열영향부의 경도는 SAW Hv 194.8, GTAW-SMAW Hv 196.1로 모재부의 Hv 168.8보다 증가하였으나, 관리요구되는 Hv 248보다 낮게 유지되었다.

3) 용접부의 충격치는 273 K에서 SAW 126.8 J, GTAW-SMAW 88 J로 모재부의 282.5 J보다 감소하였으나, API 5L에서 요구하는 68 J 이상 유지되었다.

4) 용접부 및 열영향부의 금속조직은 SAW, GTAW-SMAW 공히 미세결정립(Fine grained)으로 형성되었다.

參 考 文 獻

- 1) 李翔演 : 現場熔接實務, 圖書出版 巨木, 1987, P. 20~25, P.52~53, P68~69.
- 2) 신민태외 2인 : TMCP 鋼의 용접 熱影響部 靱性に 관한 연구, 大韓熔接學會誌, Vol. 4, No. 3, 1986, P.43~49.
- 3) 임채범 : TMCP 高張力鋼 용접부의 疲勞 特性에 관한 研究, 大韓熔接學會誌, Vol.8, No.2, 1990, P.41~52.
- 4) API (American Petroleum Institute) : Spec 5L : Line pipe, 1992, P.15~23.
- 5) 방국수 : 새로운 용접용 鋼의 開發動向, 熔接工學 夏季大學教材, 1993, P281~284.
- 6) 김희진 : 構造用鋼材(高張力TMCP鋼)의 용접성, 熔接技術 講習會 教材, 1986, P186~189.
- 7) 김희진 : TMCP鋼의 開發 및 適用, 大韓熔接學會誌, Vol.4, No 2, 1986, P1~5.
- 8) 장웅성의 3인 : 용접構造用 高張力鋼의 용접部 靱性に 미치는 微細 組織과 용접 入熱量의 影響, 大韓熔接學會誌, Vol. 7, No. 3, 1989, P45~48.
- 9) 임채범의 3인 : TMCP 高張力鋼 용접부의 疲勞 特性에 관한 研究, 大韓熔接學會誌, Vol.8, No.2, 1990, P41~42, P52.
- 10) D.J.ABSON : Microstructure and Mechanical Properties of Gas-Shielded Welding of C-Mn-Ni Steel, Welding research Supplement, May, 1993, P173~177, P184~186.
- 11) 森川博文, 森山康, 伊藤 龜太郎 : 鐵鋼新素材, TMCP鋼 の 冶金的 特徵 と 母材特性, 日本溶接學會誌, 第55卷 第2號, 1986, P83~89.
- 12) 渡邊之 : 鐵鋼新素材, TMCP鋼 の 適用分野, 日本溶接學會誌, 第55卷 第1號, 1986, P49~55.
- 13) 日本溶接學會 : 溶接便覽, 丸善(株), 1985, P. 351~363.
- 14) Welding hand book : Seventh edition, vol.1, fundamentals of welding, AWS, 1971, P. 16~35.
- 15) 김태영 : 溶接材料의 選擇法과 使用法 시리즈, Vol.1, 機電研究社, 1988. P.13~79.
- 16) 韓國鐵鋼協會 : 鐵鋼技術情報, 通卷 第13卷, 1993, P2~20.
- 17) 韓國鐵鋼協會(鐵鋼 21世紀 運動 推進本部) : 第 28 回 鐵鋼 21 世紀 運動 鋼管業種 워크숍, 1993, P71~7/86.