

# 루트간격이 용접부의 기계적 성질과 미세조직에 미치는 영향에 관한 연구

이원근\*, 장경복\*\*, 강성수\*\*\*

## A Study on the Effects of Root Gap on Mechanical Properties and Microstructure of Weldment

Won Kun Lee\*, Gyoung Boc Jang\*\*, and Sung Soo Kang\*\*\*

### ABSTRACT

Dimensional difference by welding deformation is usually occurred at steel bridge manufacturing for multi-pass welding used at joining of thick plates. By this, root gap out of standard is frequently developed at butt weld joints. For example, although standard root gap below 6mm at butt weld joints of plates under 15mm thickness, maximum 30mm root opening is developed at the weld field. At this case, 24mm parts out of standard is generally built up. But, there are no accumulated data and restriction about this built up welding parts.

In this study, therefore, the accumulation of data for built up parts and the verification of the mechanical properties of weld part as root gap is performed. It is included that tensile, bending, impact, hardness test and microstructural review for each welding specimen of 0mm, 6mm, 30mm root opening.

**Key Words** : Dimensional Difference(치수공차), Welding Deformation(용접변형), Multi-pass Welding(다층용접), Root Gap(루트 간격), Built-up Welding(육성용접)

### 1. 서론

구조물의 용접시에는 접합부의 용접아크에 의한 고입열로 국부적인 용융이 발생하고 열전도 과정에 따른 불균일한 온도 분포가 발생하게 된다. 이에 따라 열변형의 불균일이 발생하게 되고, 열응력이 유발되며, 소성변형이 잔류하여 용접부의 냉각 후에는 비선형 소성변형과 잔류응력이 존재하게 된다<sup>(1-4)</sup>. 대형 구조물의 용접 시에는 제작 과정에서 이러한 용접변형의 생성으로 인해 제작과정의 치수 공차를 유발하므로 실제적으로 많은 문제가

발생한다.

특히, 후판 피용접재가 사용되는 교량의 경우 다층용접이 행해지며 용접부가 다양한 형태로 연결 되기 때문에 이러한 용접변형으로 인한 제작상 치수의 불일치가 빈번히 발생하고 있는 실정이다<sup>(5-8)</sup>. 이렇듯 교량 제작중에 용접변형으로 인해 치수의 불일치가 발생하여 규격 이상으로 루트 간격(root gap)이 발생할 경우 현장에서는 규격 이상의 부분은 육성(built-up)하여 용접하는 것이 일반적인 방법이다.<sup>(9)</sup> 그런데, 이러한 육성후에 본 용접을 행하는 방법에 대해 체계적인 검토가 이루어지지 않은 상

\* 유신 엔지니어링 코퍼레이션

\*\* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

\*\*\* 부산대학교 기계기술연구소

대에서 관례적으로 행하여지고 있는 실정이다.

실질적으로 두께 15mm 철판의 경우 일반적으로 규격에 따르면 루트 간격이 6mm이하이어야 하는데 교량 제작중 용접에 의한 국부적인 용융과 급랭에 따른 용접변형으로 인한 치수상의 불일치가 발생하여 루트간격이 6mm 이상으로 생성되어 최대 30mm 까지 발생하는 경우도 있다. 이러한 경우 현장에서는 6mm의 용접간 간격을 만들기 위해 여분의 간격(본 연구에서는 24mm)을 육성(Built-up)한 후 연삭(grinding)가공 처리를 한 다음 본 용접을 행하고 있다.<sup>(10)</sup> 그런데, 이러한 육성과정을 거침으로 인해 실질적으로 용접부에 어떠한 문제를 발생시키는지에 대해서는 충분한 데이터가 축적되지 않은 상태이며, 규격상으로도 아무런 규제가 없는 실정이다.

결과적으로 용접변형에 따른 용접부재간의 간격이 넓어짐에 따라 치수공차를 보완하기 위한 방편으로 본 용접이 이루어지기 전에 육성이라는 전처리과정을 거침으로 인해 공정상의 저해 요인이 발생할 뿐만 아니라 구조물의 강도 저하를 가져올 수도 있어 안정성에 있어 문제가 발생할 수 있다.

그러므로, 본 연구에서는 위와 같은 구조물의 용접과정 중에 용접변형에 따라 규격이상의 루트간격이 발생할 경우 현재 일반적으로 작업현장에서 행하여지고 있는 육성 후에 용접하는 방법에 대한 데이터의 확보 및 타당성을 검증하기 위해 규격에 따른 루트간격이 0 및 6mm인 용접 시험편과 실제 구조물 제작 중에 발생하는 30mm의 용접 시험편을 각각 제작하여 인장시험, 충격시험, 경도측정 및 미세조직의 검토를 통하여 육성과정으로 인한 용접부의 기계적 성질의 변화 상태를 규명하여 육성 연결부 및 용접부의 광역화가 강 구조물에 미치는 영향을 연구하고자 하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험재료 및 용접조건

본 연구에서 사용된 피용접재는 교량, 선박, 차량, 석유 저장조 용기 그 밖의 구조물에 사용되는 열간 압연 강재로 특히 용접성이 뛰어난 SM 490A (두께 15mm)를 사용하였다. 피용접재의 화학 성분과 기계적 물성치를 Table 1과 Table 2에 각각 정리하여 나타내었다.

용접공정은 FCAW(Flux Cored Arc Welding)로 하였으며 용접 와이어(wire)는 SF-71을 사용하였다. 그리고, 실딩가스는 CO<sub>2</sub>가스를 사용하였으며 가스의 유동율은 20 - 30ℓ /min로 공급하였다.

Table 1 Chemical composition of used metal

Material	Chemical composition (wt.%)				
	C	Si	Mn	P	S
SM 490A	0.15	0.43	1.45	0.03	0.03

Table 2 Mechanical properties of base metal

Material	Mechanical properties		
	Yield strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
SM 490A	310	490 - 610	17

용접시험편의 크기는 300×500×15mm(2W×L×h)의 치수로 V형 groove를 60°의 각도로 형성하여 규격상의 루트간격 0 및 6mm와 제작 과정상 발생하는 30mm인 경우에 대해 맞대기 다층 용접으로 제작하여, 인장시험편, 굽힘시험편, 충격시험편 및 조직시험편을 채취하여 각종 기계적 성능 실험을 실시하였다. 각 시험편에 대한 용접 조건은 Table 3~5와 같으며, Fig.1은 각 용접 시험편에 대한 각각의 패스의 용접순서 및 용접부 단면의 형상을 나타낸다. 용접시 주위온도는 20℃이며 후열처리는 적용하지 않았다.

### 2.2 실험 방법

맞대기 용접이음의 인장 시험편의 형상은 KS B 0801 1호 시험편이며 용접선 직각 방향으로 채취하였다. 인장 시험방법은 KS B 0833을 기준으로 하였다. 형틀 굽힘 시험편의 형상은 KS B 0803 3호 시험편으로 굽힘 시험방법은 KS B 0832 3호에 준하였고, 충격 시험편의 형상은 KS B 0809 4호 시험편으로 용접선 직각방향으로 채취하였으며 충격 시험방법은 KS B 0810로 금속재료의 샤르피 충격 시험방법에 준하였다. 경도 측정은 로크웰 경도기를 이용하여 시험편의 윗 표면에서 2.5mm 떨어진 위치, 7.5mm 위치 및 12.5mm 위치에서 측정하였다.

Table 3 Welding condition for 0mm gap

Pass No.	Elec. Pol	Dia of Elec'	Ampare	Volt	Inter' Temp'	Welding Length(mm)	Time		Speed (cm/min)	Heat Input (KJ/mm)
							min	sec		
1	DCRP	1.4	220	26	Amb.	580	4	7	14.1	2.4
2	DCRP	1.4	230	27	94	610	3	30	17.4	2.1
3	DCRP	1.4	210	27	66	610	4	6	14.9	2.3
Backgouging										
4	DCRP	1.4	190	26	45	560	3	15	17.2	1.7

Table 4 Welding condition for 6mm gap

Pass No.	Elec. Pol	Dia of Elec'	Ampare	Volt	Inter' Temp'	Welding Length(mm)	Time		Speed (cm/min)	Heat Input (KJ/mm)
							min	sec		
1	DCRP	1.4	210	26	Amb.	620	5	51	10.6	3.1
2	DCRP	1.4	230	27	114	640	3	35	17.9	2.1
3	DCRP	1.4	230	29	111	660	4	41	14.1	2.8
4	DCRP	1.4	210	30	42	570	5	43	10.0	3.8

Table 5 Welding condition for 30mm gap

Pass No.	Elec. Pol	Dia of Elec.	Ampare	Volt	Inter' Temp'	Welding Length(mm)	Time		Speed (cm/min)	Heat Input (KJ/mm)
							min	sec		
1	DCRP	1.4	180	26	Amb.	620	4	6	15.1	1.9
2	DCRP	1.4	180	27	123	620	3	54	15.9	1.8
3	DCRP	1.4	200	27	72	620	3	7	19.9	1.6
4	DCRP	1.4	200	27	89	620	3	48	16.3	2.0
5	DCRP	1.4	200	27	120	620	3	6	20.0	1.6
6	DCRP	1.4	200	27	128	620	3	54	15.9	2.0
7	DCRP	1.4	200	26	133	620	2	50	21.9	1.4
8	DCRP	1.4	200	26	87	620	3	17	18.9	1.7
Welding after grinding										
9	DCRP	1.4	180	26	62	620	7	12	8.6	3.3
10	DCRP	1.4	210	28	162	620	1	45	35.4	1.0
11	DCRP	1.4	220	28	135	620	2	0	31.0	1.2
12	DCRP	1.4	220	28	75	620	3	29	17.8	2.1
13	DCRP	1.4	210	28	63	620	4	30	13.8	2.6
14	DCRP	1.4	210	28	110	620	3	20	19.8.6	1.9
15	DCRP	1.4	210	28	120	620	3	38	17.1	2.1
16	DCRP	1.4	210	28	60	620	3	59	15.6	2.3
17	DCRP	1.4	210	28	103	620	4	9	14.9	2.4

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 인장시험 및 굽힘시험 결과

각각의 인장 시험편에 대하여 인장시험을 수행한 결과를 Fig. 2에 나타내었는데 부트 간격에 따른 인장강도의 분포를 보여주고 있다. 전반적으로 인장강도는 528Mpa~547Mpa 정도를 나타내었는데, 간격이 없는 경우가 534Mpa~540Mpa, 6mm 간격인 경우가 528Mpa~537Mpa, 30mm 간격인 경우가

536Mpa~547Mpa 정도로 나타나 전체적으로 큰 차이를 보이지는 않았다. 그리고, 세 종류 모두 인장 시험시 용접부에서가 아니라 모재에서 파단이 발생하였으며 인장강도가 모재의 규격치 이상의 강도를 나타내어 규격을 만족하였다. 이는 모재에서 파단이 일어났기 때문에 당연한 결과이기도 하나, 용접 영역이 넓어질수록 데이터의 흠어짐 현상이 심하였다. 그러므로, 교량의 제작 과정에서 규격이상의 간격이 발생할 경우 규격이상의 부위는 육성을 한 후

용접을 하더라도 정적강도에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 그러나, 육성 후 용접을 실시한 30mm 간격의 경우가 용접부 및 용착부가 넓음으로 인해 인장강도의 데이터 산포가 다소 높게 나타나는 것으로 보아 충격치 및 피로강도 등의 동적강도에는 다

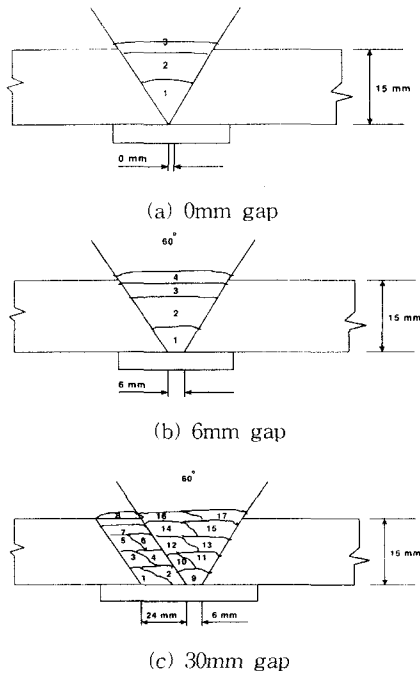


Fig. 1 Shape of cross section and welding process in weld specimen

소의 문제점이 발생되리라 판단된다.

그리고, 형틀 굽힘시험은 3종류의 시험편에 대하여 각각 3번씩 실시하였는데 그 결과 모두 균열이 생겨서는 안된다는 판정기준을 만족하였다. Table 6은 형틀 굽힘시험결과를 나타낸다.

Table 6 Result of bending test

Welding specimen	Test times	Crack occurrence	Creterion
0 mm gap	3	No	satisfaction
6 mm gap	3	No	satisfaction
30 mm gap	3	No	satisfaction

### 3.2 충격실험 결과

Fig. 3은 각 용접시험편에 대한 충격실험 결과를 나타낸 것이다. 규격 내에 드는 6mm 간격 시험

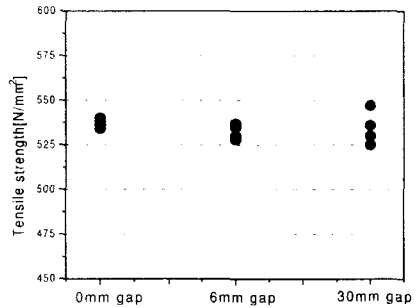


Fig. 2 Tensile strength of each specimen

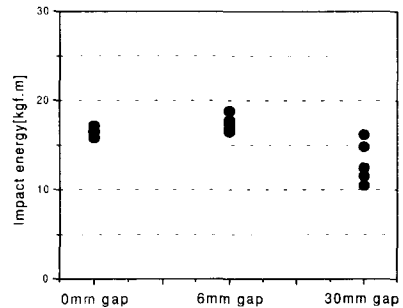


Fig. 3 Impact energy of each specimen

편의 충격치와 간격이 없는 시험편의 충격치와는 그다지 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나, 규격에서 벗어나는 육성 후 용접을 실시한 30mm 간격 시험편의 경우 충격치 데이터의 흩어짐이 컸고 그 값이 상당히 떨어지는 경우도 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 육성할 때와 용접시행시 많은 입열량에 의해 넓어진 열영향부의 영향때문인 것으로 판단된다. 그러므로, 육성 후 용접의 경우 인장강도, 굽힘강도와 같은 정적 강도의 크기에는 큰 문제가 없으나 인장강도의 값이 일정하지 않은 것과 동일하게 충격치 또한 일정하지 않고 상당히 낮은 값을 나타내는 경우도 있어 파괴인성에는 문제점을 지닐 것으로 판단된다.

3.3 경도측정 및 조직측정 결과

Fig. 4~6은 각 용접시험편의 경도 측정 결과를 나타낸다. 다층용접을 실시한 용접시험편의 경도분

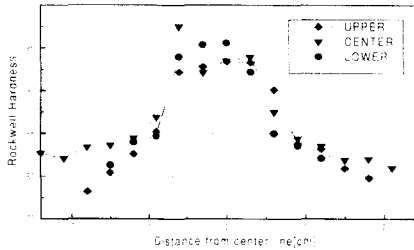


Fig. 4 Position and result of hardness test in 0mm gap weld specimen

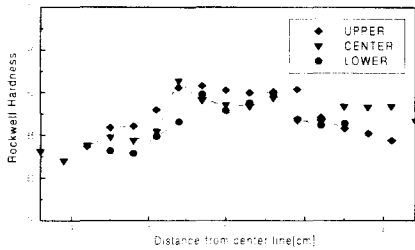


Fig. 5 Position and result of hardness test in 6mm gap specimen

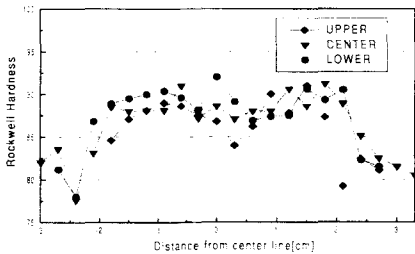


Fig. 6 Position and result of hardness test in 30mm gap specimen

포는 0mm 시험편과 6mm간격 시험편의 경우는 그다지 큰 차이를 보이지 않고 있으며 경화역의 폭도 17mm로 그다지 큰 차이를 보이지 않고 있다. 그러나, 육성한 후 용접을 실시한 30mm간격 시험편의

경도분포는 경도 절대값이 대체로 10 정도 낮게 나타나고 있으며 경화부의 데이터의 흠이질 현상도 심함을 알 수 있다. 또한 경화부의 넓이가 50mm 가까이 나타나고 있으며 이러한 용접부와 용착부가 넓음으로 인하여 충격치의 흠이질 현상이 심하게 나타나는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 확대된 변질부분 가진 30mm간격 시험편의 용접부의 신뢰성을 떨어뜨리는 원인이 될 것으로 판단된다.

Fig. 7~9는 각 용접 시험편에 대한 조직 측정의 위치와 각 단면의 조직을 나타낸 것으로 Fig. 7은 0mm 루트 간격 용접 시험편의 단면 조직을 Fig. 8은 6mm 루트 간격 시험편의 조직과 모재조직을 Fig. 9는 30mm 루트간격의 시험편의 조직을 나타낸다.

Fig. 7의 경우, 용착부의 조직은 다층용접의 영향을 받아 미세조직이 균일하지 못함을 알 수 있다. 용접부 특유의 편석조직이 나타나는 부분(position 1, 3, 5)과 후속용접에 의해 미세하게 확산된 부분(position 2, 4)이 나타나고 있다. 열영향부(position 6, 7)는 열의 영향을 받아 압연조직이 없어진 미세한 조직으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 처음 용접한 부분과 마지막으로 용접한 부분에서는 조대화와 편석의 정도가 심한데 이는 처음 시작부는 백업부로 열전달이 잘되어 열의 영향을 작게 받고 있고 마지막부는 용탕이 채워진 이후 열의 영향을 받지 않아 응고조직이 그대로 남아 있는 것으로 판단 된다.

Fig. 8의 경우 6mm 간격을 두고 용접한 시험편의 미세조직 사진인데 6mm의 gap을 두고 있기 때문에 간격이 없는 경우와는 다소 다르게 나타나고 있다. 즉, 6mm 간격을 뚫음으로 인해 상층부에서 용접 필러금속(filler metal)이 채워야 할 단면적의 폭이 21mm로 상당히 증가하기 때문에 그 결과 입열량이 비교적 많아 하층부의 응고조직은 없어졌으나 상층부의 응고조직은 상당히 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 5에서 나타나듯이 상층 응고조직의 경도가 다소 높게 나타나고 있는 것과 일치한다. 즉, 조직은 조대하지만 급냉조직에 의한 마르텐사이트조직의 존재로 경도는 비교적 높게 분포하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9의 경우에는 용접부는 응고조직과 열에 의해 미세화된 부분이 교대로 나타나는 불균일 조직이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 응고조직들은 용접열에 의해서도 분해되지 않고 잔류하고

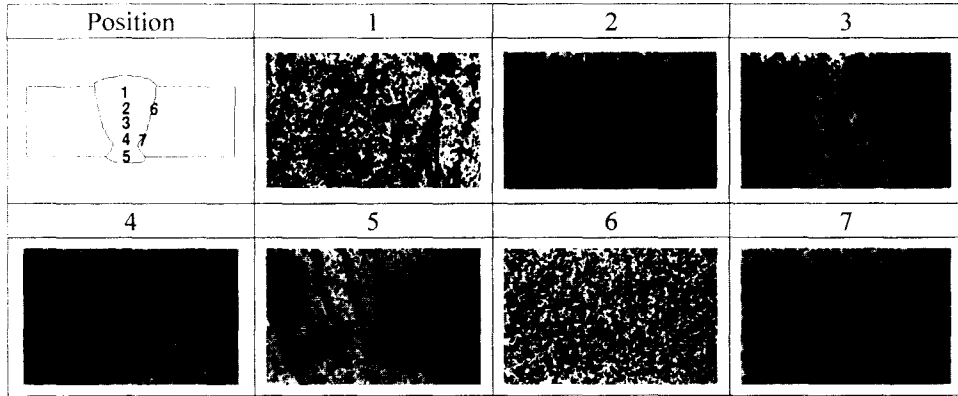


Fig. 7 Position and result of microstructure test in 0mm gap weld specimen(×200)

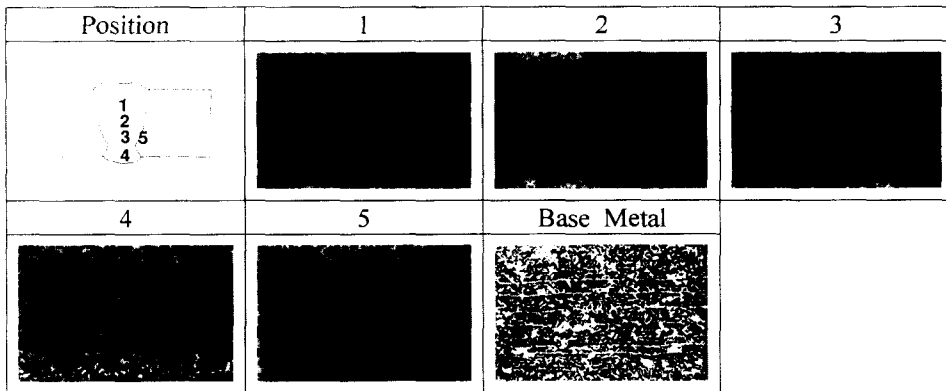


Fig. 8 Position and result of microstructure test in 6mm gap weld specimen(×200)

있으므로 사용시에 문제가 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고, Fig. 6에 나타난 30mm간격 시험편의 경도분포를 보면 육성부에서는 조대화된 윗부분의 경도가 가장 낮게 나타났으나 용접부에서는 그다지 큰 차이가 없게 되어 경도 불균일장을 형성하고 있음을 알 수 있다.

이러한 조직상의 불균일과 경도상의 불균일성은 내구성에 문제를 일으킬 수 있을 것으로 판단되며, 이는 용접부의 가장 큰 문제점인 충격치의 불균일성과 연결될 수 있다.

#### 4. 결론

구조물의 용접과정 중에 용접변형에 따라 규격 이상의 루트간격이 발생할 경우 현재 일반적으로 작업현장에서 행하여지고 있는 육성 후에 용접하는 방법에 대한 데이터의 확보 및 타당성을 검증하기

위해 규격에 따르는 루트간격이 0 및 6mm인 용접 시험편과 실제 구조물 제작중에 발생하는 30mm의 용접 시험편을 각각 제작하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1.인장시험 결과 전체적으로 큰 차이를 보이지는 않았으나, 육성 후 용접을 실시한 경우가 용접부 및 용착부가 넓음으로 인해 인장강도의 데이터 산포가 다소 높게 나타났으며, 형틀 굽힘시험에서는 각 용접시험편 모두가 균열이 발생하지 않았다.

2.충격시험 결과 규격내에 드는 시험편들의 충격치는 그다지 큰 차이가 없었으나, 규격에서 벗어난 육성 후 용접을 실시한 시험편의 경우 충격치 데이터의 흩어짐이 컸고 그 값이 상당히 떨어지는 경우도 나타나고 있어 용접부의 인성 확보에 문제점이 있는 것으로 판단된다.

3.경도측정 및 조직검사 결과 규격내에 드는 시험편의 경우에는 큰 차이가 없었으나, 육성한 후

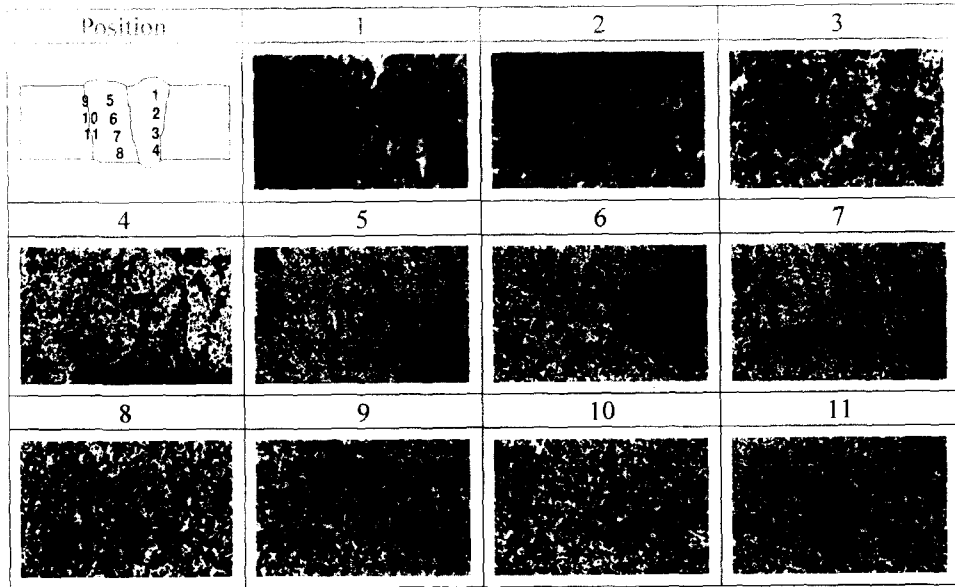


Fig. 9 Position and result of microstructure test in 30mm gap weld specimen(×200)

용접을 실시한 시험편의 경우 경화부의 넓이가 넓게 나타나고 데이터의 흠어짐 현상이 심하여 정도 불균일상이 존재하였고, 조직상으로도 용접열에 의해서도 분해되지 않고 잔류하는 응고조직과 용접열에 의해 미세화된 조직이 교대로 나타나는 불균일한 조직분포를 나타내었다.

4.이상의 결론에서 루트간격이 커짐으로 인해 육성 후 용접을 실시하는 경우 용접부의 불균일한 변질부로 인해 용접부의 인성이 떨어져 용접부의 신뢰성에 문제가 있으므로, 변질부의 제거를 위한 후열처리등의 적절한 조치가 필요하며 규격상으로도 육성부에 대한 처리규정이 요구된다.

참고문헌

1. Koichi Masubuchi, "Analysis of Welded Structures," Pergamon Press, 1980.
2. Koichi Masubuchi, "Research Activities Examine Residual Stresses and Distortion in Welded Structures," AWS, Dec., pp. 41-47, 1991.
3. 서승일, 장창두, "용접 구조물의 변형 예측에 관한 연구," 대한용접학회지, 제15권, 제5호, pp.64-73, 1997.
4. R.E. Nickell, and H.D. Hibbit, "Thermo-mechanical Analysis of Welded Structures," Nuclear Eng. and Design, pp.110-120, 1975.
5. 이기고, 김주학, "육성 용접부의 기계적 성질에 미치는 후열처리의 영향," 대한용접학회지, 제7권, 제4호, pp. 30-37, 1989.
6. Kunihiko Satoh, Toshio Terasaki, "Effect of Welding Conditions on Residual Stresses Distributions and Welding Deformation in Welded Structure Materials," JWS, Vol.45, No.1, pp. 150-156, 1976.
7. Kunihiko Satoh, Toshio Terasaki, "Effect of Welding Conditions on Welding Deformations in Multipass Welded Butt Joint," JWS, Vol.45, No.6, pp. 464-470, 1976.
8. Mitsuhiro Natume, "Weld Distortion Control on Steel Bridge and Steel Structures," JWS, Vol.52, No.8, p.30-40, 1983.
9. Nobuyoshi Shibata, "Prevention and Estimation of Welding Deformation-Thick Plates Steel Structure(Steel Bridge)," JWS, Vol.60, No.6, p.20-25, 1991.
10. 삼성중공업 용접시공서(WPS).