

용접부의 기계적 성질 및 피로강도에 미치는 루트 간격의 영향

이 원 근* · 장 경 복** · 강 성 수**

*(주)유신코퍼레이션

**부산대학교 기계기술 연구소 미시소성 연구실

The Effects of Root Gap on Mechanical Properties and Fatigue Strength of Weldment

Won-Kun Lee*, Gyoung-Bok Jang** and Sung-Soo Kang**

* Yoo-Shin Engineering Corporation, Seoul 135-936, Korea

** Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

Abstract

Root gap out of standard by welding deformation is frequently produced at butt weld joints of steel bridge. For example, although standard root gap is below 6mm at butt weld joints of plates under 15mm thickness, maximum 35mm root opening is produced at the weld field. At this case, the part out of standard is generally built up and the rest part is welded by WPS. Direct welding without built-up welding is preferred in weld field because built-up welding process bring about the cost-up at manufacturing. To apply this direct weld to root gap out of standard, the investigation about mechanical properties and fatigue at weldment is required.

In this study, therefore, the verification for direct weld without built up is performed at weldment as root gap. It includes tension, bending, hardness, impact and fatigue test for each welding specimen of 6mm, 25mm, 35mm root gap. (Received January 5, 2000)

Key Words : Dimensional difference, Welding deformation, Built-up welding, Root gap, WPS(Welding Process Specification)

1. 서 론

구조물의 용접시 고입열을 접합부에 집중시키므로 국부적인 용융·응고되어짐으로 인해 국부적인 열팽창·수축에 의한 소성변형 등으로 용접변형이 필연적으로 발생한다¹⁻³⁾. 특히, 대형 구조물의 제작시 용접변형으로 인해 발생하는 치수 공차로 인해 실질적으로 많은 문제가 발생하고 있다. 더욱이 강교 제작의 경우 후판 피용접재가 사용되고 다층용접이 행해지며 용접부가 다양한 형태로 연결되기 때문에 이러한 용접 변형으로 인한 제작상 치수의 불일치가 빈번히 발생하고 있는 실정이다⁴⁻⁷⁾. 이처럼 강교 제작 중 용접변형으로 치수 불일치가 발생하여 규격 이상으로 루트 간격이 발생하는 경우가 빈번함에도 불구하고, 이러한 경우 현장에서 대응하는 방안이 각기 다르다. 즉, 용접변형

으로 인해 규격 이상으로 루트 갭이 발생할 경우 현장에서는 일반적으로 규격 이상의 부분을 육성(Build-up)하여 루트간격을 규격 이내로 만들어 놓고 본 용접하고 있다⁸⁾. 예를 들면, 두께 15mm 판재를 맞대기 용접할 때 규격상의 루트 간격은 6mm 이하이어야 하는데 교량 제작 중 용접변형으로 인한 치수상의 불일치가 발생하여 루트간격이 6mm 이상으로 생성되어 최대 35mm까지 발생되는 경우도 있다. 이러한 경우 현장에서는 6mm의 용접간 간격을 만들기 위해 여분의 간격(본 연구에서는 29mm)을 육성(built-up)한 후 연삭(grinding)가공 처리를 하고 난 다음 본 용접을 행하고 있다⁹⁾. 그러나, 현장에서는 실질적으로 육성하여 용접하는 것보다는 바로 용접하는 것이 시간적·비용적 측면에서 유리하기 때문에 후자를 더 선호한다. 그럼에도 불구하고 육성 용접을 하게되는 이유는 루트간격이 규격을 초과하는 경우에 대해 체계적인 검토가

이루어지지 않았기 때문이다. 그러므로, 규격의 루트 간격 초과시 육성하지 않고 바로 용접하는 경우에 대하여 기계적인 성질 및 피로 강도에 대한 체계적인 검토가 요구되고 있는 실정이다.

따라서, 위와 같은 교량의 제작 과정 중에 용접 변형으로 인해 규격 이상의 루트간격이 발생한 경우 규격 이상 부분을 육성하여 용접하지 않고 제작 공정상 유리한 바로 용접하는 방법에 대한 타당성 검토가 요구된다. 이에 본 연구에서는 규격에 따르는 루트간격 6mm 시험편 및 규격을 벗어나는 25mm, 35mm에 대한 시험편을 제작하여 인장시험, 충격 시험, 경도 측정 및 굽힘 시험과 같은 기본적인 기계적 성질 시험을 통하여 정적 강도 측면을 고찰하고 또한 피로 시험을 통하여 동적 강도 측면^(10,11)을 고찰하여 루트 간격이 용접부의 기계적 성질 및 피로 강도에 미치는 영향을 검토하여 규격 이상의 루트 간격에 대하여 본 용접을 바로 실시하는 방법에 대한 타당성을 검토하고자 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 구조용 압연 강재인 SM520C(두께 15mm)를 사용하였다. 규격상 피용접재의 기계적 물성치와 화학 성분을 Table 1과 Table 2에 각각 정리하여 나타내었다. 용접 공정은 FCAW(Flux Cored Arc Welding)이며 실딩 가스는 CO₂ 가스를 사용하였으며 가스의 유량은 20-25 l/min로 공급 하였다.

용접시험편의 크기는 3,200*500*15mm(2W * L * h)의 치수로 V형 groove를 40°로 루트간격이 6mm, 25mm, 35mm인 맞대기 다층 용접으로 제작하였다. 각 시험편에 대한 용접 조건은 Table 3~5 와 같으며, Fig. 1 은 용접 시험편에 대한 용접순서 및 용접부 단면의 형상을 나타낸다. 용접시 주위온도는 20℃이며 후열처리는 적용하지 않았다.

Table 1 Mechanical properties of used metal

Material	Mechanical properties		
	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)
SM520C	365↓	520-640	15-18

Table 2 Chemical composition of used metal

Material	Chemical composition (wt. %)				
	C	Si	Mn	P	S
SM520C	0.2↓	0.55↓	1.6↓	0.035↓	0.035↓

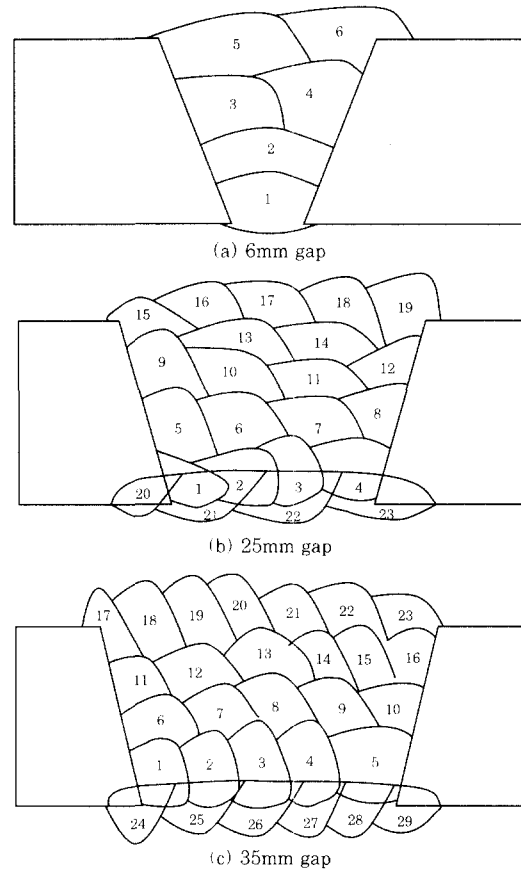


Fig. 1 Shapes of crosssections and welding process in weld specimen

Table 3 Welding condition for 6mm gap

Pass No.	Ampare (A)	Volt (V)	Speed (cm/min)	Heat Input (KJ/min)	Pass
1	200	30	14.5	2.48	-
2	260	33	20.1	1.56	76
3	260	33	34.6	1.49	114
4	260	33	37.4	1.38	162
5	230	32	30.4	1.45	96
6	230	32	31.0	1.47	148

2.2 실험방법

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 0810 으로 금속재료의 샤르피 충격 시험방법에 준하였고, 테스트 위치는 용접금속 중심(W), 용접선(F), 용접선에서 2mm 떨어진 지점(F2), 5mm 떨어진 위치(F5)에서 실시하였다. 경도 측정은 비커스 경도기를 이용하여 로크웰 경도 시험 방법 (KS B 0806)에

근거하여 10kgf의 하중을 사용하여 용접부의 위 표면에서 2mm 떨어진 위치, 아래 표면에서 2mm 떨어진 위치에서 측정하였다. 각 시험편에서 용접금속, 열영향부 그리고 모재 영역에서 각각 세 지점씩 측정하였다. Fig. 2는 이러한 경도측정 위치를 나타낸다. 피로시험편의 형상 및 방법은 KS 0825에 따라 제작 및 수행하였고 피로시험기 Instron model No. 8501을 사용하여 응력비 $R = -1$ 인 완전역전하중(Completely eversed type)으로 하였다. 변동 하중의 반복수는 10Hz의 사인파로 실시하였다.

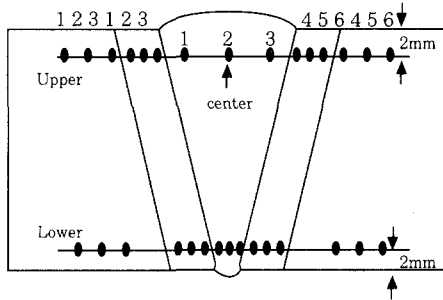


Fig. 2 Position of hardness test

Table 4 Welding condition for 25mm gap

Pass No.	Ampare (A)	Volt (V)	Speed (cm/min)	Heat Input (KJ/min)	Pass
1	250	32	36.1	1.32	-
2	250	32	40.6	1.18	82
3	250	32	26.6	1.80	24
4	250	32	38.8	1.24	73
5	250	32	41.2	1.17	106
6	260	32	40.1	1.24	41
7	260	32	42.2	1.18	88
8	260	32	34.1	1.46	90
9	260	32	37.9	1.32	68
10	260	32	36.7	1.36	51
11	250	33	36.5	1.36	97
12	250	33	36.5	1.36	62
13	240	32	41.9	1.10	86
14	240	32	42.0	1.10	98
15	220	30	40.0	1.00	65
16	220	30	40.0	1.00	104
17	220	30	40.1	1.00	98
18	220	30	43.9	1.00	86
19	220	30	43.5	1.00	53
20	220	27	38.2	0.93	43
21	220	26	38.6	0.89	92
22	220	26	34.8	0.99	121
23	230	26	32.3	1.11	93

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장시험 및 굽힘시험 결과

인장시험은 3종류의 시험편에 대하여 각각 3번씩 실

Table 5 Welding condition for 35mm gap

Pass No.	Ampare (A)	Volt (V)	Speed (cm/min)	Heat Input (KJ/min)	Pass
1	260	33	2.9	1.80	-
2	260	33	29.7	1.73	102
3	260	33	19.6	2.63	125
4	250	32	29.3	1.64	76
5	250	32	32.7	1.47	109
6	250	32	37.0	1.30	127
7	250	32	37.8	1.27	27
8	250	32	33.3	1.44	83
9	260	32	32.6	1.53	102
10	260	32	41.5	1.20	79
11	260	32	36.6	1.36	98
12	260	32	37.6	1.33	72
13	250	33	29.8	1.66	53
14	250	33	41.9	1.18	89
15	250	33	39.0	1.27	67
16	240	32	41.4	1.11	80
17	240	32	41.7	1.11	111
18	220	30	40.9	0.97	83
19	220	30	40.4	0.98	88
20	220	30	36.2	1.09	55
21	220	30	34.2	1.16	98
22	220	30	38.8	1.02	72
23	220	30	39.9	0.99	109
24	220	26	34.7	0.99	39
25	220	26	37.0	0.93	83
26	230	26	34.5	1.04	133
27	220	26	39.7	0.86	105
28	230	26	38.8	0.92	150
29	240	26	34.6	1.08	100

시하였으며, 그 결과를 평균내어 Table 6에 나타내었다. 전반적으로 인장강도는 527 ~ 554 MPa 정도를 나타내었는데, 6mm 간격인 경우가 533 MPa, 25mm 간격이 527 MPa, 35mm 간격이 554 MPa로 나타나 전체적으로 큰 차이를 보이지는 않았다. 그리고, 세 종류 모두 인장 시험시 용접부에서가 아니라 열영향부에서 파단이 발생하였으며, 인장강도 값이 모재의 규격치 이상의 강도를 나타내어 규격을 만족하였다. 그러므로, 교량의 제작 과정에서 규격이상의 간격이 발생할 경우 규격이상의 부위를 육성하여 본 용접을 하지 않고 바로 용접하여도 정적강도에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

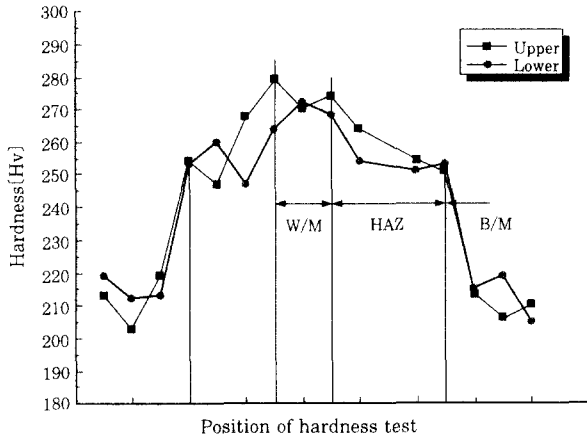
그리고, 형틀 굽힘시험은 3종류의 시험편에 대하여 각각 4번씩 실시하였는데 그 결과 모두 균열이생겨서는 안 된다는 판정기준을 만족하였다. Table 7은 형틀 굽힘시험 결과를 나타낸다.

3.2 경도시험 결과

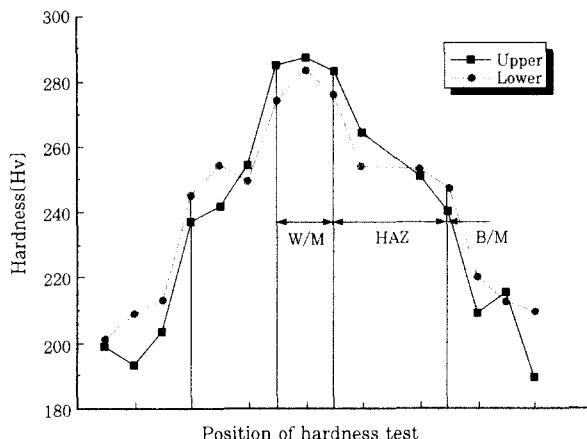
각 용접시험편의 경도 측정 결과를 Fig. 3에 나타내

Table 6 Result of tension test

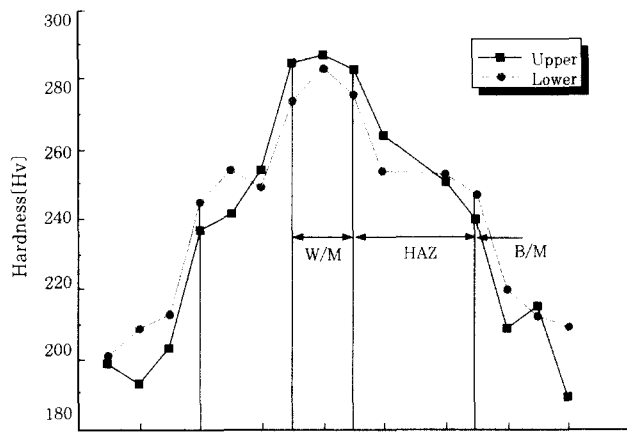
welding specimen	Tensile strength [N/mm ²]	Limit [N/mm ²]	Criterion
6mm gap	533	520~640	satisfaction
25mm gap	527		satisfaction
35mm gap	554		satisfaction



(a) 6mm gap



(b) 25mm gap



(c) 35mm gap

Fig. 3 Result of hardness test in each specimen

었다. 규격 이상의 루트 간격(25, 35mm)을 나타내는 시험편의 경도 최고치가 규격 이내(6mm)의 시험편 보다 약 10정도 높게 나타났다.

그러나, 경도 최고치를 제외하고는 각 시험편 모두 전체적으로 비슷한 경도 분포를 나타내었다.

그리고, KS D 3515를 기준으로 하여 결과를 정리하였을 때 3 종류 시험편 모두 두께 12mm를 초과하는 강판에 대해 용접부 최대 경도가 Hv(10) 350이하이어야 한다는 판정 기준을 만족하였다.

Table 7 Result of bending test

welding specimen	Test times	Crack occurrence	Creterion
6mm gap	4	No	satisfaction
25mm gap	4	No	satisfaction
35mm gap	4	No	satisfaction

3.3 충격 시험 결과

Fig. 4는 각 용접시험편에 대한 충격 시험 결과를 나타낸 것이다. 전체적으로 용접선(Fusion line)에서 가장 낮은 충격치를 보여주고 있다. 각 시험편을 비교해보면, 루트 간격이 규격 이내(6mm) 시험편의 경우 충격치 값의 흠어짐의 정도가 적으나 규격을 벗어났을수록 특히 루트 간격이 35mm인 경우는 용접금속 영역을 제외하고 충격치 값의 흠어짐의 정도가 상당히 심함을 확인할 수 있다. 이렇듯 충격치의 흠어짐 정도가 심하면 일반적으로 정적강도에는 문제가 없으나 피로강도와 같은 동적 강도에는 문제점이 나타날 수도 있다. 그러나, 5번 시험한 충격치의 각 위치에서의 평균값을 나타낸 Table 8에서 보면 루트 간격 35mm의 용융라인에서의 충격치 값이 루트 간격 25mm보다는 크고 6mm인 경우에 상당하는 값을 나타내고 있다.

나머지 위치에서도 35mm의 경우가 6mm의 경우에 상당하는 값을 보여주고 있으며, 오히려 25mm의 경우가 용접 금속과 용융라인 영역에서는 가장 낮게 나타나고 있다.

Table 8 Average of impact energy in each specimen

Root gap	6mm	25mm	35mm
Position of specimen	Average of impact energy [kgf · m]		
Weld Meta	14.5	11.8	15.0
Fusion Line	14.4	8.2	13.7
2mm from Fusion Line	16.8	13.3	14.8
5mm from Fusion Line	13.4	13.4	14.4

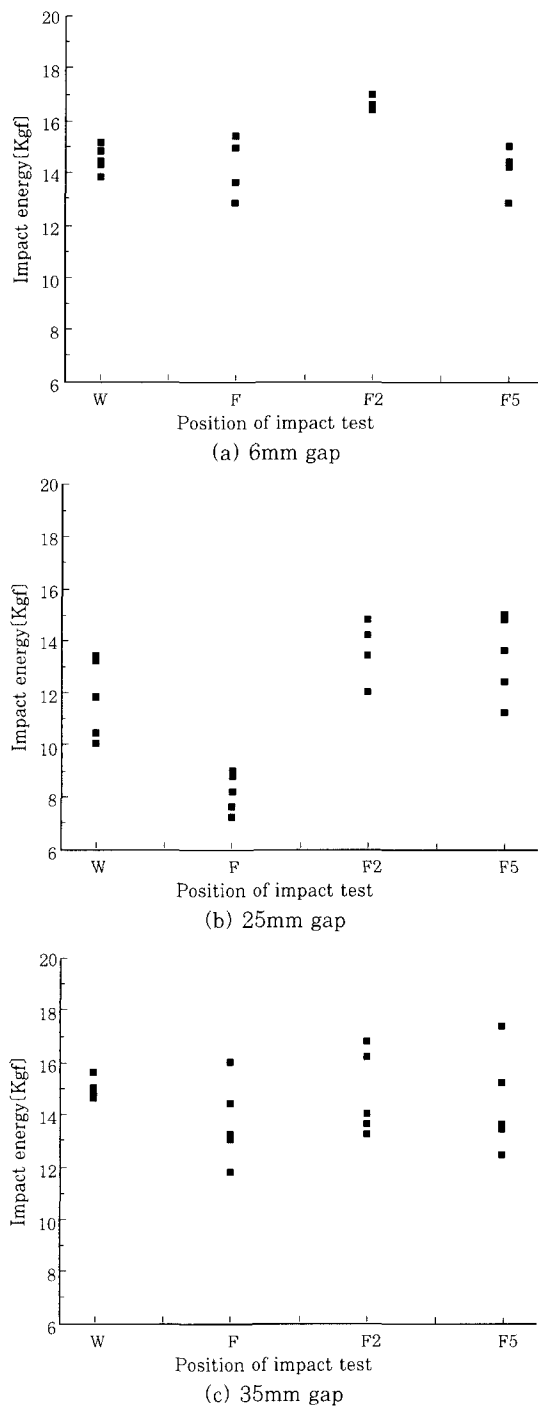


Fig. 4 Result of impact test in each specimen

그리고, 모든 시험편에서 KS D 3515에서 명시한 샤르피 충격에너지가 4.8kgf·m 이상을 만족하고 있다. 그러므로, 규격 이상의 루트 간격이 발생하는 경우 육성하지 않고 바로 용접할 경우 파괴 인성 부분에서도 규격 이내의 경우에 상당하는 값을 나타내리라 판단된다.

3.4 인장 피로 시험 결과

각 용접시험편의 피로 시험 결과 구해진 피로선도를 Fig. 5 나타내었다. 루트 간격 25mm와 30mm 시험편의 경우 전체적으로 피로 곡선의 경향이 비슷하나 루트 간격 6mm의 경우는 다소 차이가 남을 알 수 있다. 그러나, 고하중 단수명 영역에서의 이러한 차이는 다소 크게 나타나고 있는 반면 저하중 장수명 영역으로 갈수록 이러한 차이가 줄어들고 있음을 알 수 있다. 피로 시험시 용융라인에서 다소 떨어진 열영향부에서 영역에서 대부분 파괴가 일어나는데, 충격 시험 결과에서 열영향부에서의 충격값이 루트 간격 25mm와 35mm는 비슷하고 6mm의 충격값은 이 보다 다소 크게 나타난 결과와 유사한 결과라고 판단되어진다.

강교의 사용 특성상 장수명 영역의 피로 특성을 고려해야하는데 피로 시험 결과 장수명 영역에서는 각 시험편의 피로 하중이 유사하게 나타나고 있으므로 강교 제작시 규격 이상의 루트 간격이 발생하였을 경우 육성 용접하지 않고 바로 용접하여도 동적 강도를 규격 이내의 루트 간격의 경우와 유사하게 만족할 것으로 판단된다.

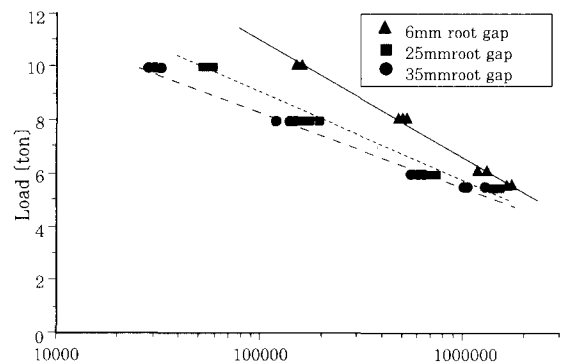


Fig. 5 Fatigue limit of each specimen

4. 결 론

구조물의 용접과정 중에 용접변형에 따라 규격 이상의 루트간격이 발생할 경우 일반적으로 육성후 본 용접하는 방법을 취하고 있는데, 공정상 유리한 육성하지 않고 본 용접할 경우의 타당성을 검토하기 위해 규격이내의 루트 간격(6mm) 시험편과 규격을 벗어나는 루트 간격(25, 30mm) 용접 시험편을 각각 제작하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인장시험과 결과 모든 시험편이 규격이상의 강도를 만족하였고, 형틀 굽힘시험 결과 모두 균열이 발생

하지 않고 규격을 만족하였다.

2. 경도시험 결과 규격 이상의 루트 간격(25, 30mm) 시험편의 용접 금속에서의 경도 최고치가 규격 이내의 시험편(6mm) 보다 약간 높게 나타났으나 규격상의 경도 최고치 이하로서 만족하였다. 그리고, 충격시험 결과 규격 이상의 시험편은 충격치의 흠어짐 정도가 다소 나타났으나 평균치는 규격 이내의 시험편의 충격치에 상당하는 값을 나타내었고 규격상의 충격치 이상으로 만족하였다.

3. 피로시험 결과 단수명 영역에서는 규격 이상의 시험편이 규격 이내의 시험편에 비해 파단수명이 다소 낮게 나타났으나 장수명 영역으로 갈수록 이러한 차이는 줄어들어 비슷한 수준으로 나타났다.

그러므로, 구조물 제작시 규격 이상의 루트 간격이 발생하였을 경우 규격을 초과하는 부분을 반드시 육성하여 용접하는 것보다는 용접 시공 기술상 유리한 본 용접하여도 타당할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

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., 41-47, 1991.

- 3) 서승일, 장창두, "용접 구조물의 변형 예측에 관한 연구", 대한용접학회지, 제15권, 제5호, 64-73, 1997.
- 4) 이기고, 김주학, "육성 용접부의 기계적 성질에 미치는 후열처리의 영향", 대한용접학회지, 제7 권, 제4호, 1989.
- 5) Kunihiko Satoh, Toshio Terasaki, "Effect of Welding Conditions on Residual Stresses Distributions and Welding Deformation in Welded Structure Materials", JWS, Vol.45, No.1, 1976.
- 6) Kunihiko Satoh, Toshio Terasaki, "Effect of Welding Conditions on Welding Deformations in Multipass Welded Butt Joint", JWS, Vol.45, No.6, 1976.
- 7) Mitsuhiro Natume, "Weld Distortion Control on Steel Bridge and Steel Structures", JWS, Vol.52, No.8, 30-40, 1983.
- 8) Nobuyoshi Shibata, "Prevention and Estimation of Welding Deformation-Thick Plates Steel Structure(Steel Bridge)", JWS, Vol.60, No.6, 20-25, 1991.
- 9) 용접시공서(WPS).
- 10) 임채범, 권영각, 장래용, 엄기원, "TMCP 고장력강 용접부의 피로 특성에 관한 연구", 대한용접학회지, 제 8권 제 2호, 40-52, 1990.
- 11) 백영남, 장영권, "강교량 맞대기 용접 결함부의 피로수명 평가", 대용접학회지, 제 18권 제 2호, 204-212, 2000.