

研究論文

大韓熔接學會誌
第9卷第4號 1991年 12月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol.9, No.4, Dec., 1991

FCAW 용접부의 인성에 미치는 Root Gap의 영향

한종만* · 이은배* · 안성철* · 한용섭*

Effect of Root Gaps on Toughness of FCAW Weld Metal

J.M. Han*, E.B. Lee*, S.C. Ahn*, Y.S. Han*

Key Words : FCAW(CO₂ 반자동 용접), Flat Position(1G, 아래보기 자세), Vertical-up Position(3G, 수직상향 자세), Root Gap(개선간격), CTOD(균열선단 개구변위), Limited Weaving Layer(1회 다층 쌓기), Full Weaving Layer(1회 1층 쌓기)

Abstract

Both impact and fracture toughnesses were investigated with root gaps in FCAW weld metals at room temperature and 0°C. The maximum impact value was obtained at the root gap of 16mm for 1G position weld metal, and the impact value of 3G position weld metals also showed the maximum impact value at the root gap of 12mm. However, the fracture toughnesses (CTOD) values tend to decrease with increasing root gaps at both temperatures in 1G weld metal. Bending test also showed satisfactory results with all of root gaps investigated. Based on this result, it becomes possible to apply wide root gaps in real projects in both aspects of toughness and bending resistance.

1. 서 론

CO₂ 반자동용접(Flux Cored Arc Welding)이 조선공업에 도입된 이래로 시공상의 많은 발전과 개선이 이루어졌고, 현재 사용되고 있는 용접재료의 비율을 보더라도 FCAW wire가 사용되고 있는 비율이 50%

* 정회원, 대우조선공업(주) 기술연구소

이상이다. 따라서 FCAW 용접법을 이용한 용접부의 품질에 대한 중요성은 증가하고 있으며 실제 시공시 발생하는 변수로는 용접자세, 용접입열, 용접봉과 root gap등이 있으며, 특히 root gap은 용접자세와 용접입열등에 따라 크게 영향을 받으며 시공시의 중요한 변수로서 작용하고 있다. butt 용접이나 fillet 용

접에서 발생하는 root gap은 AWS¹⁾에 의하면 수동용접의 경우에는 용접봉 직경의 3-4배를 넘지 않는 root gap을 허용하고 있으나, FCAW시에는 특별한 제한 규정은 없으나 용접자세에 따라서 운봉폭을 제한하고 있다²⁾.

용접부는 용접입열, 용접재료와 용접시의 주위환경 등의 여건에 의해 매우 복잡하고 다양한 용접조직이 생성되어 경도와 인성등 기계적 성질이 복잡하게 변화되고 있다. 용접입열이 증가할 경우에는 결정립의 조대화등의 영향으로 용접부의 인성이 감소하는 경향도 보이고 있으며 Ti 등의 합금원소가 첨가된 용접재료로 용접된 용접부는 후열처리시 인성이 저하하는 문제점을 나타내고 있다. 또한 용착금속내의 Mn과 Si과 같은 합금원소의 변화와 용접자세에 따른 기계적 성질의 변화도 중요한 관심사항의 하나이다.

본 연구에서는 시공시에 발생하는 FCAW 용접부의 root gap이 용접부의 인성에 미치는 영향을 조사하여 butt용접의 root gap의 허용한도를 검토하여 보았으며, 또한 용접 자세(아래보기/수직상향자세)에 따른 root gap의 영향도 고찰하였다.

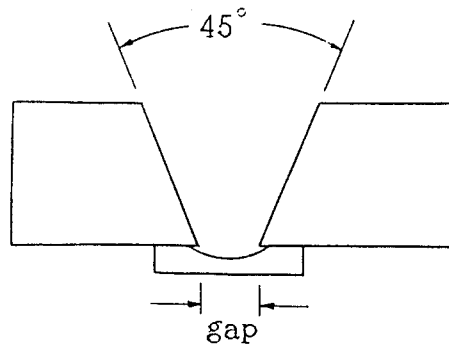
2. 시험편 및 실험방법

본 실험에 사용된 시험재는 판두께 24mm의 선급강재인 AH36으로 그 화학성분및 기계적 성질은 Table 1과 같다. 시험재는 압연 방향으로 600×150mm로 절단하여 45° 개선을 하였으며 받침재료로는 ceramic 을 부착하여 butt 용접을 실시하였다. 아래보기 자세

(1G)의 용접시에 root gap은 8, 12, 16, 20, 24mm로, 수직상향 자세 (3G)의 용접시에는 root gap은 8, 12, 16mm로 하여 자동용접용 carriage를 이용하여 다층용접을 하였으며 이때 사용된 용접재료는 AWS E71T-1 Type의 CO₂ 반자동 용접용 Flux Cored Wire로 국내에서 개발된 재료이었다.

용착금속의 적층방법으로는 초층과 2층의 용접시에는 root bead를 만들기 위해 full weaving layer(1회

Joint Configuration



Weld-metal Depositing Sequence

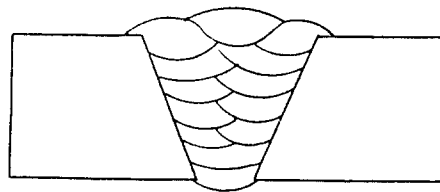


Fig. 1 Weld joint design and weld metal deposit

Table 1 Chemical compositions(wt %) and mechanical properties of base and filler metals by Spectrometer

	C	Si	Mn	P	S	항복 강도	인장 강도	연신율
Base Metal	0.16	0.41	1.41	0.018	0.007	39.0kg/mm ²	54.1kg/mm ²	28.0%
Filler Metal	0.06	0.50	1.21	0.014	0.010	54.4kg/mm ²	59.3kg/mm ²	30.0%

Table 2 Welding conditions

Position	Root Gap(mm)	Amp. (A)	Volt (V)	Speed(cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
1G	8	280	32	33.6	16.0
	12	290	32	30.6	18.2
	16	210	28	18.9	18.6
	20	210	17	9.6	22.2
	24	210	28	15.1	23.4
	8	160	24	8.7	26.5
3G	12	165	25	7.4	33.4
	16	190	27	10.4	29.6

1층 쌓기)방식을 이용하였고 그 다음에는 limited weaving layer (1회 다층쌓기)방식으로 적층을 하였다. Fig. 1에는 용접부위의 접합부 형상과 용착금속의 적층방법이 도시되어 있으며, Table 2에는 root gap에 따른 용접조건과 용접 입열량의 변화를 보여주고 있으며 입열량의 계산시 1, 2층과 마지막 층의 입열량은 제외하였다.

용착금속의 파괴인성의 영향을 관찰하기 위해 상온 (RT)과 0°C에서 충격시험과 BS 5762-1979³⁾에 의거한 CTOD 시험을 하였다. 충격시험은 용접부의 중앙에서 채취하였으며 이 때의 notch는 두께방향과 평행하였다. 또한 용착금속의 root부에 대한 충격인성의 영향을 보기 위해 중앙부외에도 root부에도 시험을 채취하였다.

용착금속의 굽힘저항성을 보기 위해 동일한 용접조건으로 두께 24mm의 강판에 root gap을 8mm, 16mm와 24mm로 하여 용접된 용접부에 대해 굽힘시험을 하였고 이때 사용한 굽힘시험의 크기는 24×38×400mm로 하였다. 굽힘시험을 위해 용접부의 여성부위는 연삭가공하여 제거하였다.

CTOD 시험은 표면과 이면부를 2mm씩 제거하여 두께 20mm로 하였고 notch는 angle cutter를 이용하여 용접방향과 수직하게 용착금속의 중앙에 위치하

도록 하였고 notch의 깊이는 14mm가 되도록 가공하였다. Fig. 2에는 본 실험에서 사용한 충격시험과 CTOD 시험의 형상과 치수가 나와 있으며, 0°C에서의 CTOD 시험은 저온용 chamber를 이용하여 실험을 하였다. Fatigue crack은 4-8mm 범위내에서 되도록 조정하였으며 이때의 fatigue force ratio는 0.06이고 소요된 fatigue cycle은 대략 60,000-80,000회 정도 이었다. 또한 용착금속의 수직방향의 경도시험도 하였으며, 아울러 SEM과 광학현미경을 이용하여 파단면과 미세조직을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 용착금속의 화학성분 및 조직의 변화

Fig. 3은 FCWA 용착금속중 Mn과 Si의 양을 Spectrometer를 이용하여 분석한 것이다. Mn과 Si의 양은 시험의 중앙부위 위치에서 분석을 한 것으로, 용착금속내의 Mn과 Si의 양의 root gap의 변화에 따른 변화를 보면 root gap이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여 주고 있으나 그 차이는 별로 크지 않다. Mn과 Si의 용착금속내의 함량이 약간 감소하는 것은 root gap 증가에 따른 입열증가로 Mn과 Si의 산화 손실에 기인한 것으로 판단된다. Mn의 양이 감소하거

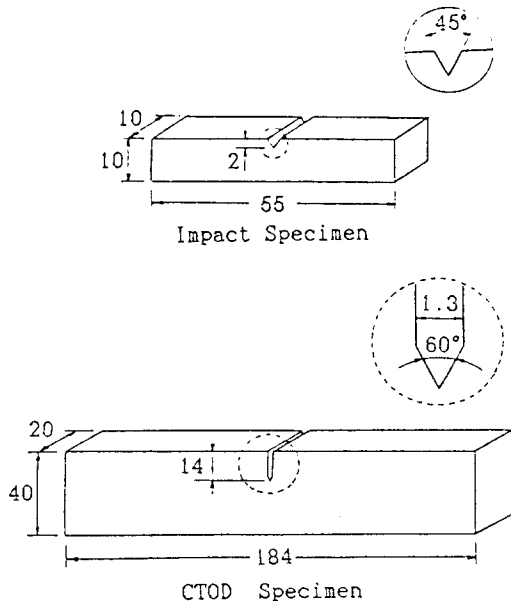


Fig. 2 Configuration of CTOD and impact test specimens

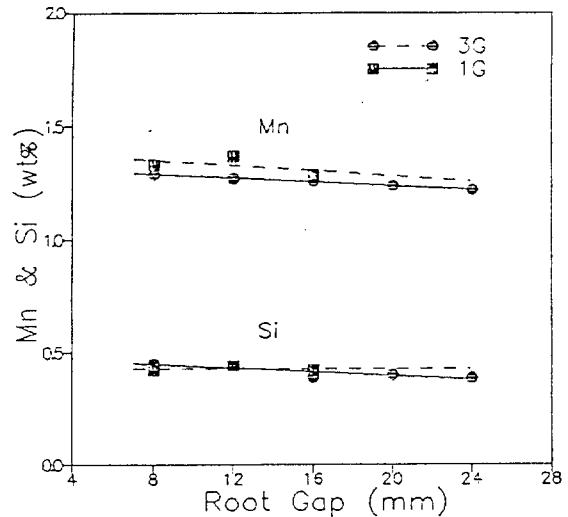


Fig. 3 Mn & Si contents in weld metal with root gaps

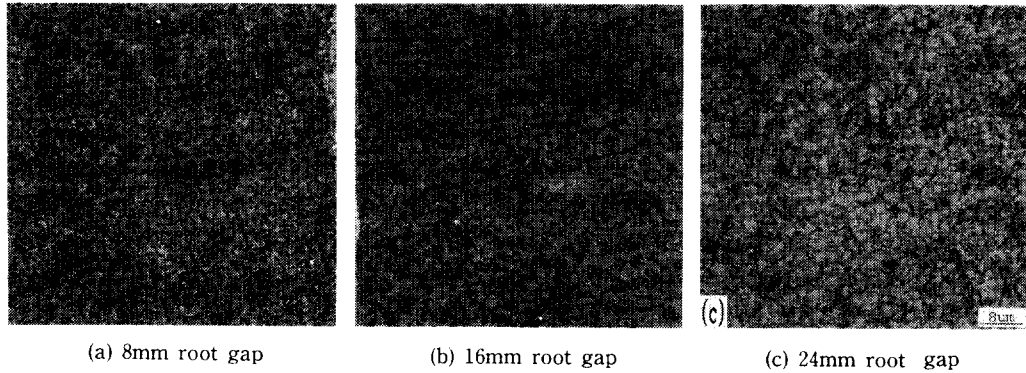


Fig. 4 Microstructures of fine grained zone in centered weld metals

나 Si의 양이 증가하면 충격인성은 감소하며, 충격치에 미치는 인성은 Si이 Mn보다 더 크다고 보고 되어 있으며⁴⁾, 또한 Mn의 함량이 1.4%일 경우 가장 좋은 충격인성을 보인다는 보고⁵⁾와 Si의 양이 증가할수록 오히려 충격인성, 특히 천이온도를 고온측으로 이동시키는 결과⁶⁾처럼 용착금속내의 Mn과 Si의 함량은 충격인성에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 그러나 본 실험에서는 Mn과 Si의 함량이 동시에 약간씩 감소하므로 충격인성에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 생각된다.

Fig. 4는 용착금속의 중앙부위, 즉 충격시편이나 CTOD 시편의 notch부근의 미세조직중 fine grained zone의 조직을 보여 주고 있다. root gap이 증가함에 따라 결정립의 크기가 증가하는 양상을 보여 주고 있

다. 이러한 결정립의 변화는 용접조건중 입열량의 증가와 비례한다고 할 수 있다.

3.2. 용착금속의 경도분포

Fig. 5와 6은 용착금속의 표면으로부터 root bead 쪽의 수직방향의 경도분포를 보여주고 있다. 충격 시편을 채취한 표면으로부터 8-24mm 부근의 경도를 보면 root gap이 16mm와 24mm의 경우 약간씩의 차이를 보이지는 대체로 170 Hv5 정도의 경도분포를 나타내고 있다. root gap이 8mm인 경우는 약간 높은 경도 분포를 보여주고 있어 충격인성이 상대적으로 낮아질 것으로 예상된다. Fig. 6의 3G 자세에서의 경도분포를 1G의 경우와 비교하여 보면 다소 높은 경향을 보여주고 있다.

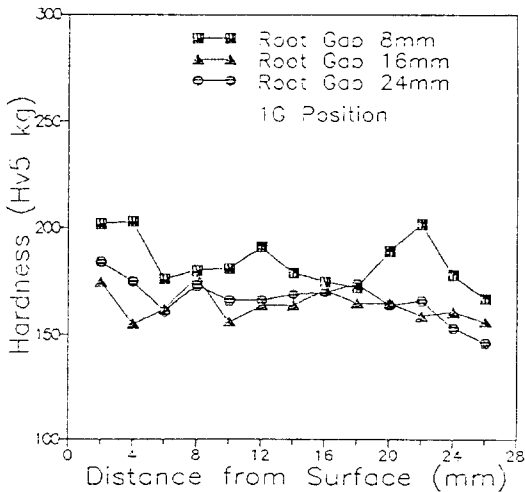


Fig. 5 Hardness distribution of vertical line in 1G weld metals

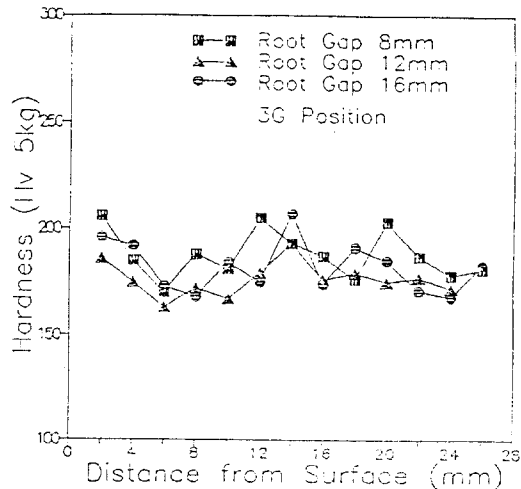


Fig. 6 Hardness distribution of vertical line in 3G weld metals

3.3. 충격인성의 변화

Root gap의 변화에 따른 충격인성의 변화가 Fig. 7과 8에 나타나 있다. 이때의 충격시편은 용착금속의 중앙부위에서 채취한 것이다. 1G 자세로 용접한 경우 상온이나 0°C경우 모두 root gap이 16mm에서 최대값을 보여주고 있다. 즉, root gap이 16mm가 될 때까지는 충격 인성이 증가하나 root gap이 16mm 이상으로 되면 오히려 충격인성이 감소하는 양상을 보여주고 있다. 또한 1G의 경우 Fig. 5의 경도분포에서 16mm의 root gap에서 가장 낮은 경도분포를 보이는 것과 일치하고 있다. 그러나 3G로 용접한 경우는 root gap이 12mm인 경우에서 최대값을 보여주고 있으며, 특히 0°C에서 그 경향이 뚜렷한 것을 알 수 있다. 이러한 충격인성의 값이 특정한 root gap에서 최대값을 보이는 것은 시공상의 측면에서 용접입열이나 용접자세에 따른 최적의 용접조건이 존재한다는 것을 의미한다.

Fig. 9에서는 용접입열에 따른 충격인성의 변화를 보여주고 있다. 1G 용접의 경우 상온과 0°C에서 모두 용접입열이 약 18.6 kJ/cm에서 최적의 충격인성값을 보이고 있으며 이것은 용접입열에 따른 충격인성의 연구에서 약 20 kJ/cm에서 최적의 값을 보였던 G.M. Evans⁷⁾의 결과와도 일치하고 있다. 3G 용접의 경우는 용접입열이 증가함에 따라 충격인성도 계속 증가하는 양상을 보이고 있다. 3G의 경우는 root gap의 증가와 용접입열은 비례하지 않고 있으나 실험한 용접입

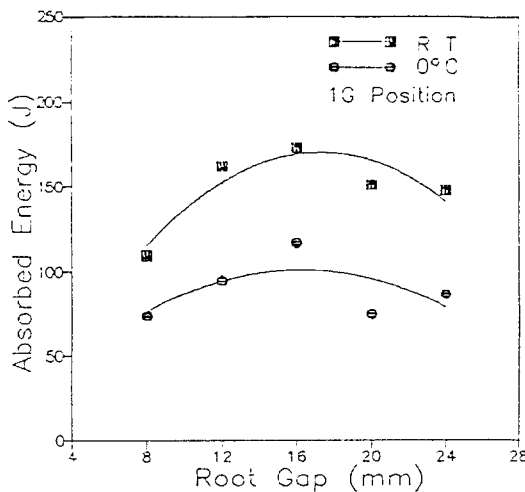


Fig. 7 Effect of root gaps on absorbed energy in 1G weld metals at RT and 0°C

열의 범위내에서는 약 32.4 kJ/cm에서 최적의 충격인성을 보였으며 이는 1G의 약 2배에 해당하는 용접입열이다. 용접입열의 최적조건이 생성되는 것은 다층 용접시에 형성되는 columnar grained zone, coarse grained zone과 fine grained zone의 상대적인 비와 밀접한 관련이 있다. 즉, fine grained zone의 면적이 상대적으로 다른 조직보다 많이 생성된다는 것을 의미하며, Evans의 실험 결과에서도 20 kJ/cm의 입열에서 미세조직을 보면 다른 조직에 비해 fine

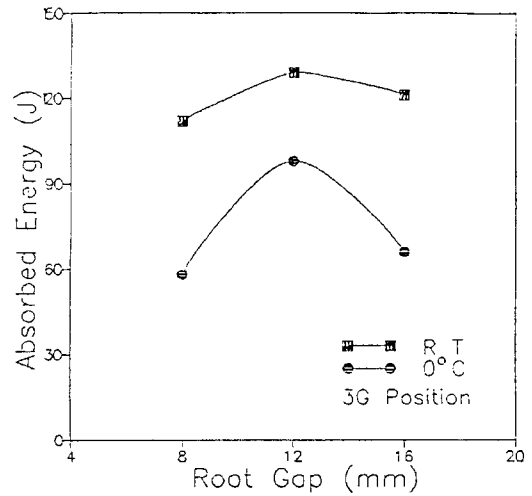


Fig. 8 Effect of root gaps on absorbed energy in 3G weld metals at RT and 0°C

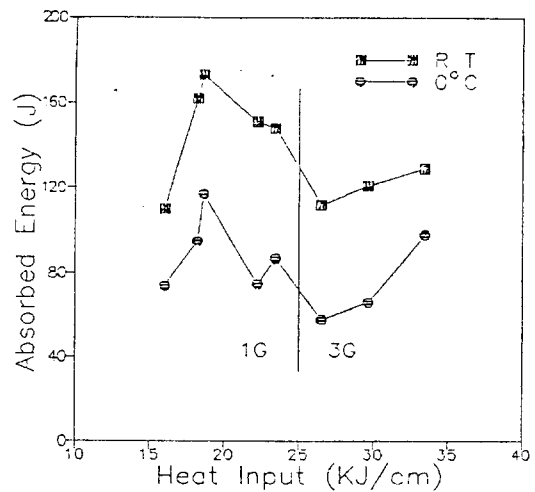


Fig. 9 Variation of absorbed energy with heat inputs

grained zone의 band폭이 넓다는 것을 알 수 있다.

용접입열이 증가할수록 columnar grained zone과 coarse grained zone의 band폭이 증가하는 것을 광학현미경을 통한 미세조직의 관찰에서 알 수 있다. 적어도 용접입열이 26kJ/cm 이하에서는 약 18kJ/cm의 용접입열이 최적조건이라고 할 수 있다. 그러나 용접입열이 26kJ/cm 이상이되는 3G 용접의 경우는 다층 용접시에 1G와는 다른 양상을 보임을 알 수 있다. 또한 적층방식의 차이도 충격인성의 값에 영향을 주며 limited weaving layer 방식이 아닌 full weaving layer의 경우 충격인성은 1G 용접자세에서 limited weaving layer 방식의 적층에 비해 천이온도가 고온으로 이동하는 등 다른 양상을 보여 줄 수도 있다.

본 실험의 결과에서는 충격인성에 영향을 주는 합금원소 Mn과 Si의 변화는 용접입열에 따라 큰 변화를 보이고 있지않아, 용접입열에 따른 충격인성의 변화는 미세조직의 분포가 가장 중요한 역할을 할 것으로 생각된다. 적어도 1G 자세의 용접에서 입열이 18 kJ/cm 정도까지는 용착금속의 미세조직이 충격인성을 지배하며, 더 큰 입열에서는 미세조직외의 다른 요인이 중요한 변수로 작용한다고 할 수 있다. 우선적으로 변수로 고려되어야 할 사항은 용접재료내에 함유되어 있는 미량합금원소인 Ti 등이 다층용접으로 인한 후열처리 효과로 입계에 석출하여 오히려 충격인성이 감소하는 경우도 발생할 가능성이 있다.

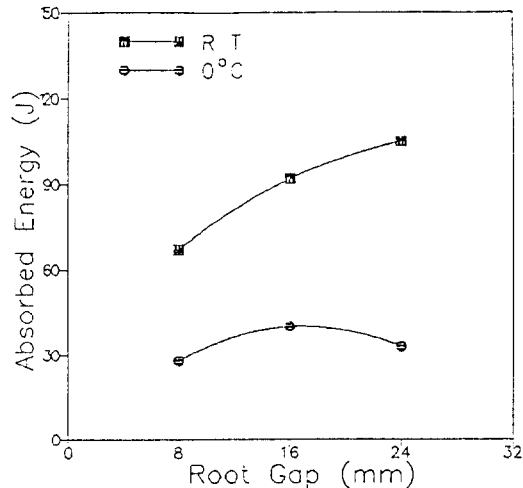


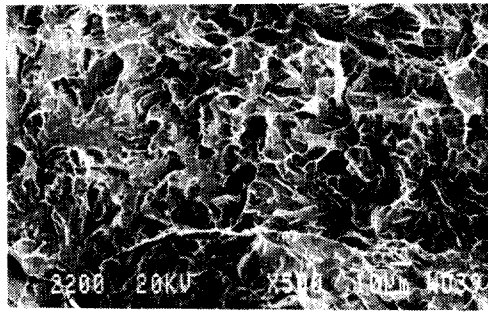
Fig. 10 Effect of root gaps on absorbed energy in 1G weld metals of root site at RT and 0°C

또한 Fig. 10에는 1G 자세의 용착금속의 중앙부가 아닌 root부의 충격인성의 root gap에 따른 변화를 보여 주고 있다. 상온에서는 root gap이 증가할수록 충격인성이 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 반면에 0°C에서의 결과를 보면 root gap이 16mm인 경우에서 가장 좋은 충격인성을 보여 주고 있으며, 이는 용착금속의 중앙부의 결과와 동일한 경향을 보여 주고 있다. 따라서 용착금속내의 위치에 따라 충격인성의 절대값은 다르지만 root gap에 따른 경향은 동일하다고 할 수 있다.

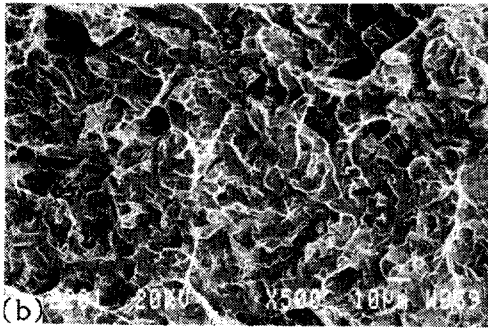
Fig. 11에는 상온과 0°C에서 충격시험후 파단면을 SEM으로 관찰한 것이다. root gap이 8mm에서 24 mm로 증가함에 따라 파단면의 facet size가 증가하고 있는 것을 알 수가 있다. 그러나 이러한 정도의 facet size 증가는 충격인성에 별 영향을 가져오지 않았다.

현장 시공상의 측면에서 보면 선급강재의 FCAW 용접기법의 적용시 1G 자세의 용접의 경우에는 root gap이 적어도 24mm가 되더라도 충격인성의 측면에서는 문제가 없음을 보여주고 있고, 3G 자세의 용접시에도 root gap이 12mm가 되더라도 현장 적용이 가능함을 알 수 있다. 또한 실제 시공에서 중요한 열영향부의 충격인성의 변화나 굽힘시험시의 저항성을 보더라도 실제 시공시에 큰 문제는 없을 것으로 생각된다.

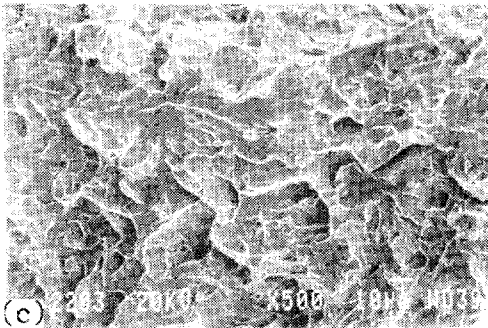
Fig. 12^{b)}에는 아래보기 용접자세의 용접부의 위치별 충격인성을 0°C에서 시험한 결과를 보여주고 있다. 이 결과에서 보더라도 용착금속, 용융선 (fusion line)과 열영향부가 실제 선급에서 요구하는 0°C에서의 최저 충격에너지 24 Joule을 모두 만족하고 있으며 root gap이 16mm에서 충격인성이 가장 좋은 결과를 보여 주고 있으며 이는 본 실험의 결과와 일치하고 있다. 또한 시공시의 중요한 사항중의 하나인 초층부의 균열의 가능성이 root gap이 증가함에 따라 높아지는 것이 사실이나 적절한 용접조건 선택과 용접재료의 개선으로 충분히 극복할 수 있는 점이라고 판단된다. 실제로 동일한 조건으로 용접된 root gap이 8mm, 16mm와 24mm인 24mm 두께의 시편으로 root부 굽힘시험을 한 결과 양호한 시험 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 13에는 root gap이 24mm 인 시험편의 굽힘시험 후 굽혀진 면의 사진으로 root face나 측면 모두에서 전혀 균열이 발생하지 않은 상태를 보여 주고 있다.



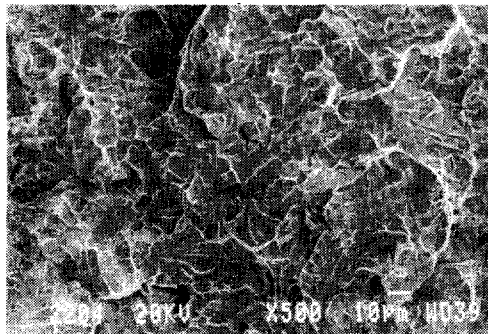
(a) 8mm root gap at RT



(b) 8mm root gap at 0°C



(c) 24mm root gap at RT



(d) 24mm root gap at 0°C

Fig. 11 S.E.M observation of fractured surfaces after impact test at RT and 0°C

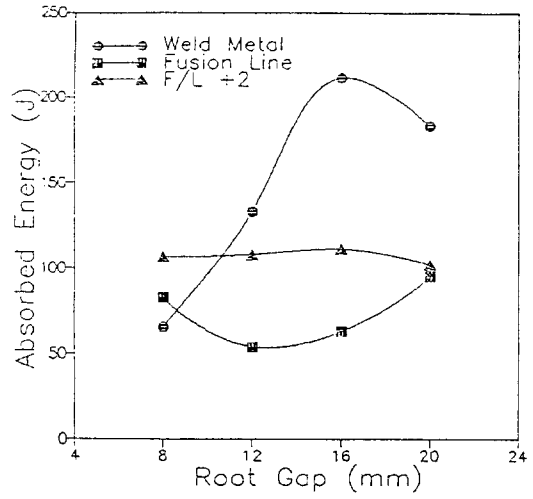
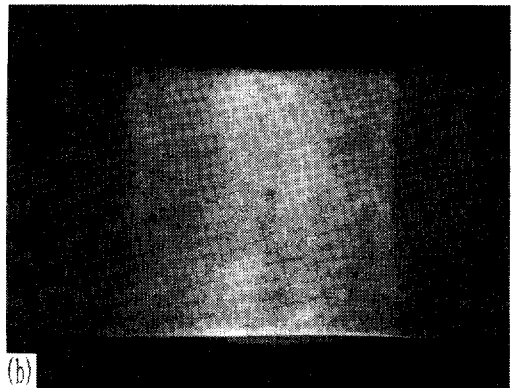


Fig. 12 Variation of absorbed energy with positions of weldments 0°C (Ref. 8)



(a) side view of bent specimen



(b) bent root face

Fig. 13 Photographs of bent specimens of 24mm root gap after bending test

3. 4. CTOD 파괴인성의 변화

FCAW 용접부의 파괴인성을 평가하기 위해 BS 5762-1979의 방법으로 용착금속의 CTOD 실험을 한 결과가 Fig. 14에 나와 있다. 이것은 1G 자세로 용접한 용착금속의 CTOD값의 root gap의 변화에 대한 것으로 root gap이 증가함에 따라 상온과 0°C 모두 감소하는 경향을 보여주고 있다. 0°C의 경우에는 root gap이 16mm 이상이 되면 CTOD값은 약 0.15mm로 일정하게 되는 경향을 보여주고 있다. 충격인성이 root gap 16mm에서 최대값을 보이는 것과는 달리 파괴인성의 경우에는 root gap이 8mm일 때 가장 높은 값을 보이며 계속 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 용착금속의 root부에서 채취한 시편의 충격인성의 변화도 용착금속의 중앙부에서의 시험결과와 거의 동일하므로 시편의 위치에 따른 영향은 CTOD시험에 거의 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

일반적으로 충격인성과 파괴인성은 상당한 상관관계를 갖는 것으로 알려져 있으나 본 실험의 결과에서는 다른 경향을 보여 주고 있다. 본 실험의 결과에서 보면 충격인성의 값이 CTOD값과 비례하지 않은 것은 미세조직의 분포와 밀접한 관련이 있을 것으로 생각된다. 충격시편을 채취한 위치는 용착금속의 중앙부이므로 이때의 미세조직은 fine grained zone이 다른 조직에 비해 상대적으로 분율이 높은 반면, 용착금속의 대

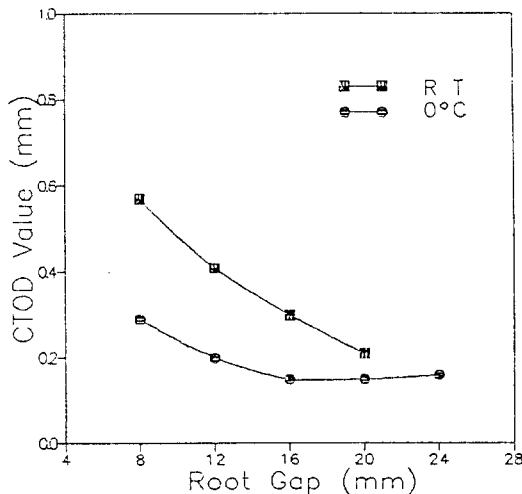


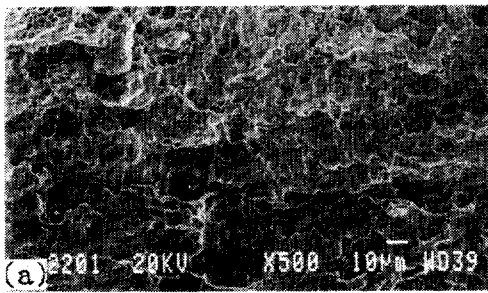
Fig. 14 Variation of CTOD value with root gaps at RT and 0°C

부분을 갖는 CTOD시편의 경우는 상대적으로 인성에 취약한 coarse grained zone과 columnar grained zone을 많이 함유하게 된다. 따라서 충격인성과 파괴인성을 직접비교하는 것은 큰 무리가 따를 것으로 판단된다. 미세조직외에도 다층용접으로 인한 잔류응력이나 시편의 두께 등이 CTOD값과 충격인성이 직접적인 비례관계를 나타내지 않는 것에 중요한 원인이 될 수도 있다. 또한 최근에는 용접부의 인성을 평가하는 방법이 과거의 충격인성과 더불어 CTOD 등의 파괴인성을 병행하여 평가하는 경향이 증가하고 있으며, 이는 충격인성과 CTOD와의 상관관계가 그다지 크지 않기 때문이라고 생각된다.

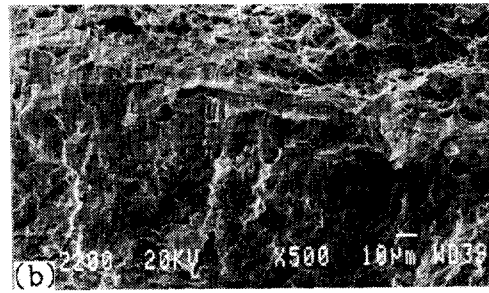
CTOD시편의 용착금속의 적층방법의 차이에 따른 연구결과를 비교하여 보면 full weaving layer 방식의 용착금속의 CTOD 값도 root gap이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있고 이 결과는 본 실험의 결과와 동일한 양상을 보여주고 있다. 따라서 적층방법이 다르더라도 용접입열이 증가하고 root gap이 증가함에 따라 파괴인성은 감소한다고 할 수 있다.

Fig. 15는 상온과 0°C에서 CTOD 시험후 파단면을 SEM으로 관찰한 것이다. (a)와 (c)는 상온에서 시험한 root gap이 8mm와 24mm인 경우로 사진의 하단부는 stretched zone의 영역이며 상단부는 파괴가 일어난 영역이다. root gap이 8mm인 경우에는 파괴가 일어난 영역에서 연성을 보이는 연성 파면이 보이고 있으나 root gap이 24mm인 경우에는 상대적으로 연성파괴가 일어난 영역이 작고 취성파괴 양상을 보이는 벽개파면이 잘 발달하고 있음을 관찰할 수 있다. 0°C에서 root gap이 24mm인 경우는 stretched zone을 지나서 연성 파면은 매우 작고 벽개파면이 대부분을 차지하고 있다. root gap이 24mm인 용착금속에서 연성파면이 작고 벽개파면이 상대적으로 많은 것은 균열의 전파가 빠르다는 것을 보여주고 있으며 이는 용접입열의 증가에 따른 결정립 조대화에 기인한다고 할 수 있다.

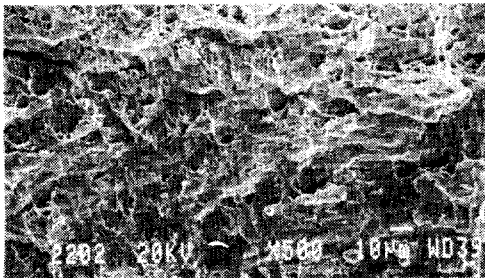
Fig. 16은 파단면의 측면의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 것으로 SEM의 관찰 결과와 동일한 양상을 보여 주고 있다. 상온에서 보면 stretched zone을 지나 파괴가 일어난 조직은 상당한 연신이 된 양상을 보이고 있으며, 반면에 0°C에서의 미세조직은 취성을 보이는 날카로운 단면을 보여주고 있다.



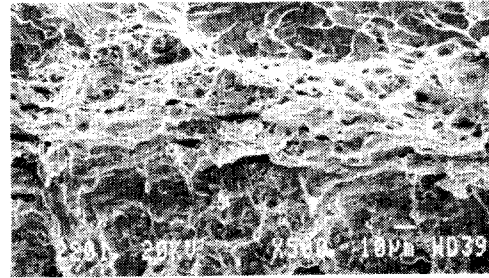
(a) 8mm root gap at RT



(b) 8mm root gap at 0°C

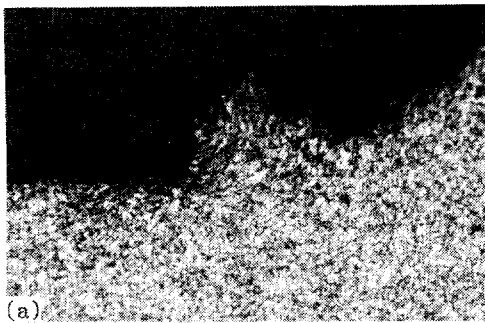


(c) 24mm root gap at RT

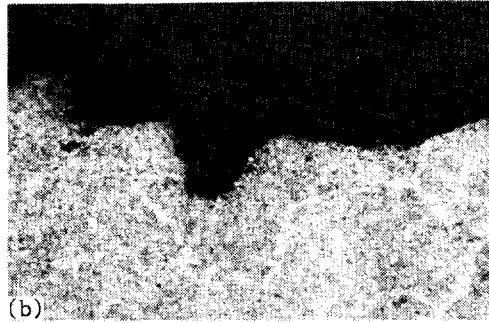


(d) 24mm root gap at 0°C

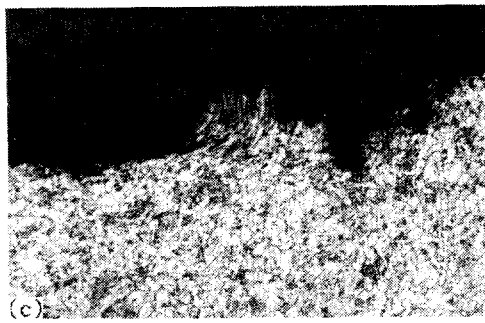
Fig. 15 S.E.M observation of fractured surfaces after CTOD test at RT and 0°C



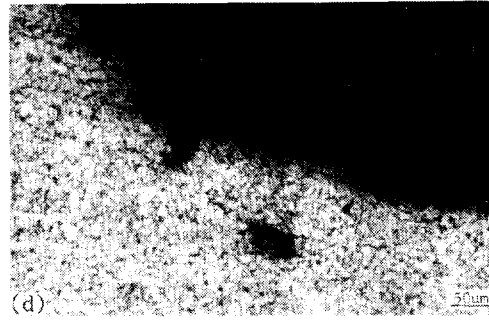
(a) 8mm root gap at RT



(b) 8mm root gap at 0°C



(c) 24mm root gap at RT



(d) 24mm root gap at 0°C

Fig. 16 Microstructures of lateral surfaces near cracked regions

4. 결 론

선급용 강재의 FCAW 용접법 작용에 따라 root gap의 변화와 용접자세의 변화에 따른 용착금속의 충격인성 및 파괴인성에 미치는 영향은 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 아래보기 용접자세 (1G)의 용착금속의 충격인성은 상온과 0°C에서 모두 root gap이 16mm인 경우 최대값을 보였고, 반면에 수직상향 자세 (3G) 용접부의 용착금속은 root gap이 12mm에서 최대값을 나타냈다.

(2) 파괴인성 (CTOD)값은 상온과 0°C에서 모두 root gap이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

(3) 용착금속내의 Mn과 Si의 양은 root gap의 증가와 용접입열의 증가에 따라 거의 변화하지 않았다.

(4) 현장 시공시에도 root gap이 1G 자세의 용접에서는 24mm, 3G 자세의 용접시에는 12mm가 되어도 충격인성의 측면에서 현장 적용이 가능하였다.

(5) Root gap이 24mm가 되더라도 굽힘시험시 전혀 균열이 발생하지 않았다.

참고문헌

- 1) AWS D1.1-88: Structural welding code-steel(1988)
- 2) DSQS 1989: Daewoo Shipbuilding Quality Standard
- 3) BS 5762-1979: Method for critical opening displacement(COD) test
- 4) B.Y. Lee: Beitrag zur Untersuchung der Schweissguteigenschaften beim Up-Mehrlagenschweissen hochfester Feinkornbaustaehe, Dissertation, Braunschweig, 1984
- 5) G.M. Evans: Effect of manganese on the microstructure and properties of C-Mn all-weld metal deposits, Oerlikon-Schweissmitt., vol.36, (1978), pp.4-19
- 6) 양 철웅, 강 춘식 외: Modelling FCW 용착금속의 기계적 성질에 미치는 Si, Mn의 영향, 대한용접학회지, Vol. 8, No. 2, (1990), pp. 27-39
- 7) G.M. Evans: The effect of heat-input on the microstructure and properties of C-Mn all-weld metal deposits, Welding Journal, Vol.61, No.9, (1982) pp. 125s-132s
- 8) 대우조선 기술보고서 WRIO-097-89
- 9) 안 병식, 오 동원 외: FCAW의 weaving폭이 용착금속의 기계적 성질에 미치는 영향, 대한용접학회, '88년도 추계학술발표대회, 서울 한국종합전시장, 1988년 11월 18일