

研究論文

압력용기용 SA508 class3강에 대한 underclad 균열의 감수성 평가

— 입열량의 최적화 —

김석원* · 양성호* · 김준구* · 이영호**

**Evaluation of Underclad Crack Susceptibility of the
SA508 Class 3 Steel for Pressure Vessels**
— Optimization of Heat Input —

S. W. Kim*, S. H. Yang*, J. K. Kim* and Y. H. Lee**

Key Words : Underclad Crack(UCC, 클래드 밑 균열), Pressure Vessel(압력용기), Submerged Arc Strip Cladding(SASC, 잠호 스트립클래드 용접), Heat Input(입열), Dilution Rate(희석률), Cr_{eq}(크롬당량), Ni_{eq}(니켈당량)

Abstract

Many pressure vessels for the power plants are fabricated from low alloy ferritic steels. The inner sides of the pressure vessels are commonly weld-cladded with austenitic stainless steels to minimize problems of corrosive attack.

The submerged-arc welding(SAW) process is now used in preference to other processes because of the possibilities open to automation to reduce the overall welding times.

The most reliable way to avoid underclad cracks(UCC) which are often detected at the overlap of the clad beads is to use nonsusceptible steels such as SA508 class 3. At present domestically developed forging steel of SA508 cl.3 is now being cladded with single layer by using 90 mm wide strip, which transfers higher heat input into the base metal compared to the conventional two layers strip cladding which has been in wide use with 30~60 mm wide strip.

But the current indices for the influence of heat input on crack susceptibility are not accurate enough to express the subtle difference in crack susceptibility of the steel.

Therefore, the purpose of this present study is : 1) To determine UCC susceptibility on domestic forging steel, SA508 cl.3 cladded with single layer by using submerged arc 90 mm strip and, 2) To optimize heat input range by which the crack susceptibility could be eliminated.

* 정희원, 한국원자력안전기술원

** 정희원, 충남대학교 기계공학과

1. 서 론

고온고압 및 부식환경하에서 가동되는 압력용기 내부벽의 클래드 용접방법으로는 박판이며 폭이 넓은 오스테나이트 스테인레스의 스트립을 이용한 잠호용접 방법이 채택되고 있으나 용접부위 겹침부위의 조대화된 열영향부(Heat affected zone : HAZ)에서 발생하는 클래드 밑 균열(Underclad crack : UCC)은 압력용기 제작시에 주요한 결함 중의 하나로 인식¹⁾되고 있다. 실제적으로 가동중인 외국 원자력발전소의 검사시 일부 원자로에서 이러한 UCC 발생이 확인된 바^{2, 3)} 있으며 실험적으로도 이의 재현이 보고⁴⁾되고 있다.

일반적으로 이러한 UCC 발생방지 방안으로서는 동감수성이 작은 모재를 선택하여 대입 열을 피하고 2층 클래드 용접으로 HAZ를 균질화하는 공정⁵⁾이 실용화되어 왔다. 최근 국내에서도 대형 압력용기 주 자재로서 UCC 감수성이 비교적 작은 것으로 알려진 SA508 cl.3 저합금강⁶⁾ 개발에 따라 UCC가 발생되지 않는 클래드 용접기법과 UCC 탐상기법 개발에 관한 연구^{7, 8, 9)}가 진행되고 있다. 그러나 이와 관련된 국내연구는 활발하지 못한 상황에서 일부 압력용기 제작시에 외국에서 수입된 SA 508 cl.3 강에 대한 기존의 2층 클래드 용접하는 시공기법이 시도되고 있다.

이에 따라 국산 SA508 cl.3 강을 단층으로 클래드 용접할 때 UCC가 발생하지 않는 최적 입열량 도출에 관한 연구는 절실히 판단된다.

본 연구에서는 시험 조건으로서 시험편 별로 100~250 KJ/cm의 광범위한 입열량으로 클래드 용접을 수행한 후 모재와 클래드 용접부 계면부위를 중심으로 한 야금학적 현상을 규명하고 경도시험, 굽힘시험 및 살피브이웃치(CVN) 충격시험에 의한 과면을 전자현미경(SEM)으로 관찰하여 UCC 및

용융부족 등의 용접결함이 발생하지 않는 효율적인 최적 입열량을 규명하였다.

2. 실험방법 및 절차

2.1 재료

시험에 사용된 재료는 원자로 주재재인 SA508 Cl. 3 및 309L 계열 오스테나이트 스테인레스 스트립과 플러스로서 그 화학조성은 Table 1과 같다. 모재의 크기는 Fig. 1과 같이 1000×250×250 mm이며 시험편의 두께부분을 모재의 단조방향과 일치시켜 500×250×75 mm 크기의 시험편 6개를 제작하였다.

2.2 스트립 클래드 용접

각 시험편의 공통 용접조건 및 변수는 Table 2와 같이 선정하였고 플러스는 용접시작 전 200°C에서 48시간 유지시킴으로서 용접시 수소유기에 의한 균열을 예방하도록 하였다. 스트립은 시험편 표면 상단에 Fig. 1과 같이 수직으로 유지하여 아크가 잘 발생하도록 조정하였다. 또한 최대입열에 따른 예비실험 결과 용접중 뒤틀림등의 문제점은 발생 되지 않아 시험편을 고정시킬 지그는 사용하지 않았다.

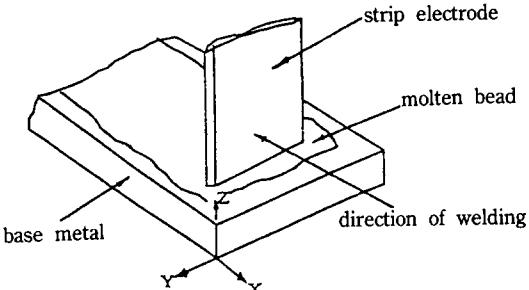


Fig. 1 Schematic representation of submerged arc cladding using strip electrode

Table 1. Chemical compositions of materials used

Materials	Chemical composition (wt %)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
SA508 cl3	0.180	0.08	1.42	0.008	0.003	0.79	0.07	0.53	0.008
Strip	0.012	0.37	1.64	0.013	0.001	13.12	23.86	0.15	0.061
Flux	SiO ₂ : 20%, CaO + MaO + BaO + K ₂ O + Na ₂ O : 48%, F : 6% Al ₂ O ₃ + TiO ₂ : 20%, FeO + MnO : 3%, Cr : 3%								

Table 2. Welding variables

Welding process	SAW	Interpass Temp.	175°C
Current	DC	Preheat Temp.	148°C
Polarity	RP	PWHT	620°C
Weaving	Stringer	Holding time	40.5hr
Overlap	8mm	bead layer	1

Specimen's No.	Current (A)	Welding speed (cm/min)	Voltage (V)
W1 (252)	1400	10	30
W2 (219)	1400	11.5	30
W3 (193)	1250	10.5	27
Ref(168)	1250	12.5	28
W4 (162)	1250	12.5	27
W5 (132)	1100	12	24
W6 (102)	1100	15.5	24

2.3 후열처리 및 시편제작

클래드 용접시험편을 620°C로 48시간동안 후열처리한 후 면굽힘, 측면굽힘, 마크로 및 충격시험편을 각각 제작하였다. 특히 CVN 충격 시험편은 비드 겹침부위의 클래드, 경계부, HAZ 2mm 및 HAZ 4mm에 높치 위치가 오도록 하여 55×10×10mm의 표준 충격시험편을 제작하였다.

2.4 용접부 평가

면굽힘 시험편의 클래드 표면하부 1.5mm 깊이에서 밀링으로 절삭한 chip을 화학분석하여 Schaeffler³의 (1) 및(2)식에 따라 Cr_{eq} 및 Ni_{eq}를 계산하였다.

$$\text{Cr}_{\text{eq}} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1.5 \times \% \text{Si} + 0.5 \times \% \text{Nb} \quad \dots \quad (1)$$

$$\text{Ni}_{\text{eq}} = \% \text{Ni} + 30 \times \% \text{C} + 0.5 + \% \text{Mn} \quad \dots \quad (2)$$

마크로 시험편의 클래드와 모재를 10% Cr 산용액과 2% nital로 부식시킨후 입열에 따른 비드 형상을 직접 측정하고(3)식을 적용하여 회석률 변화를 조사하였다.

$$\text{Dilution rate}(\%) = \frac{\text{penetration} \times 100}{\text{penetration} + \text{bead height}} \quad \dots \quad (3)$$

또한 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 클래

드 0.5 mm, 경계부, HAZ 0.3 mm, HAZ 0.6 mm, HAZ 1.6 mm 등 5부위에서 200g 하중으로 마이크로 경도를 측정하였으며 경계부를 중심으로 한 미세조직을 SEM으로 관찰하였다.

UCC 발생유무는 일차로 면굽힘시험편의 클래드 층을 밀링으로 제거한 후 HAZ를 0.3 mm씩 밀링으로 절삭제거하면서 5회 액체침투시험을 수행하였다. 측면굽힘 시험편과 클래드가 제거된 면굽힘 시험편의 비드 겹침부위는 시편두께 4배의 직경을 갖는 맨드렐을 이용하여 굽힘시험을 수행한후 U부위를 육안 및 액체침투시험하였다.

CVN 충격시험편은 액화질소가스로 -10°C^{10, 11)}로 냉각한후 흡수에너지, 전단파면률 및 측면팽창치를 측정하였으며 3개의 시험편을 1조로 하여 평균치를 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접입열에 따른 시험편의 임계두께 결정

최대두께 약 250mm인 압력용기를 클래드 용접시 아크에 의한 열은 용접표면과 두께 방향으로 발산되어 벽두께가 800°C에서 500°C까지의 냉각시간 T₈₅에 영향을 미치지 않는 3차원 열유동 현상을 보인다. 냉각시간 T₈₅에 관한 3차원 열유동¹²⁾은 (4)식으로 정의되고 있다.

$$T_{85} = (0.67 - 5 \times 10^{-4} T_0) \eta EF \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \quad \dots \quad (4)$$

단, t₀ : 예열온도, η : 상대적 열효율, F : 용접팩터, E : 입열량

여기서 T₀는 148°C(예열온도)로 일정하며 평판 잠호용접법의 경우 상대적 열효율 η 및 용접팩터 F는 각 1 이므로 (4)식을 입열 E에 비례하는 식으로 정리하면 (5)식과 같다.

$$T_{85} = 7.79 \times 10^{-4} E \quad \dots \quad (5)$$

한편 용접모재의 두께에 의해 적용하는 용접입열이 훨씬 클때는 냉각시간 T₈₅는 (6)식의 2차원

열유동식¹²⁾이 된다

$$T_{ss} = (0.043 - 4.3 \times 10^{-5} T_0) \eta \frac{E^2}{d^2}$$

$$F \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

단, d : 용접모재 두께

마찬가지 시험 용접조건을 (6)식에 대입하여 정리하면 (7)식과 같다.

$$T_{ss} = 2.1 \times 10^{-7} \frac{E^2}{d^2} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

(5)식 및 (7)식에서 2차원 및 3차원 열유동의 임계두께 d_c 은 (8)식과 같이 계산될 수 있다.

$$d_c = 1.64 \times 10^{-2} \sqrt{E} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

각 시험편의 임계두께는 시험과정에서 용접입열량의 영향 외에 시험편의 두께영향이 배제된 최소시험편 두께로서 계산결과는 Fig. 2 와 같다. 시험편 두께(75t)가 임계두께 이하인 최대입열 252 KJ/cm의 W1 시험편은 용접중 과열 발생과 심한 클래드 용접부 용융부족 결함이 관찰

되었다. 용접입열 193 ~ 219 KJ/cm의 W2 및 W3 임계두께는 시험편 두께와 거의 유사하나 굽힘시험 결과 클래드용접부에 용융부족 결함이 발견되었다. 이는 시험편 제작조건인 용접시험편 두께와 적용하는 입열량이 절대적으로 의존하고 있음을 나타내는 것으로 판단된다.

3.2 비드 형상과 회석율에 미치는 입열량의 영향

마크로 시편의 단면을 부식처리하여 Photo 1 과

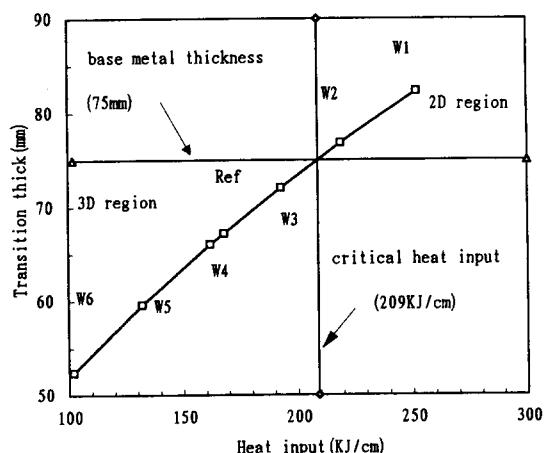


Fig. 2 Determination of transition thickness for 2D and 3D heat flow as a function of heat input



Photo 1. Macro bead configuration(x 0.75)

같은 비드 형상을 조사하였다. 8mm로 겹친 비드의 폭과 높이, 용입깊이는 Fig. 3 과 같다. 비드의 폭은 입열량에 관계 없이 평균 178 mm로 일정하였으나 비드 높이는 입열의 증가에 따라 급격히 증가하여 W1 시험편(252 KJ/cm)의 비드 높이는 최소입열 102 KJ/cm의 W6 시험편 보다 2배 이상의 증가를 나타내었다.

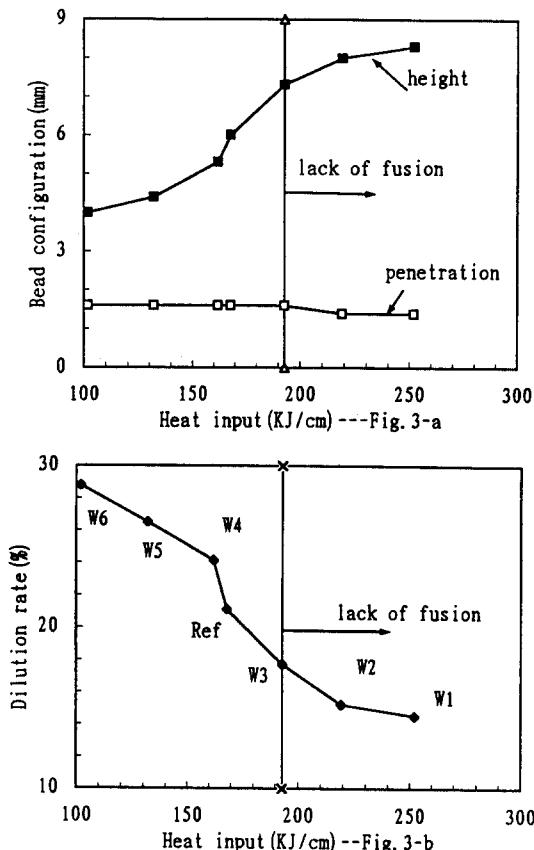


Fig. 3 Bead configuration (a) and dilution (b) with heat input

그러나 고입열의 경우 용접중 파열이 발생하여 용입깊이는 미소하게 감소하였으며 클래드와 모재 경계부의 일부에 육안으로 확인할 수 있는 용융부족 결함이 관찰되었다.

회석률을 결정하기 위하여 예비적으로 식(3)과 같이 비드 단면적을 직접 측정하여 일반적인 경향을 파악한 후, (9) 식^[13]을 이용하여 클래드의 화학 성분 분석결과인 Table 5를 이용하여 모재 및 스트립, 클래드에서의 Ni 함유량에 따라 정확히 회석률을 계산하였다.

$$\text{Dilution rate}(\%) = \frac{(N_i - N_{i_0}) \times 100}{N_i + N_{i_0}} \quad \dots \dots \quad (9)$$

단, N_i , N_{i_0} , N_{i_0} 는 각각 스트립, 클래드 및 모재에서의 Ni 함유량(%)이다.

용접입열의 증가에 따라 Fig. 3에서와 같이 고입열 시험편에서는 회석률이 급격히 감소하였다. 용접입열 193 KJ/cm 이상인 W1, W2, W3 시험편은 육안 및 액체침투탐상 결과 용융부족 결함이 확인되었고 비드 면도 평활하지 않음으로 폭 90 mm의 스트립을 이용한 본 용접방법에서 비드 형상에 관한 클래드 용접부의 신뢰할 수 있는 최대 용접입열은 190 KJ/cm 미만이며 이때의 비드높이 및 회석률은 각각 7.3 mm 및 17.7% 미만이 적당한 것으로 판단된다.

3.3 용접조건과 클래드의 화학 조성

입열증가에 따른 클래드의 화학분석 결과는 Table 3에 나타난 바와 같이 순수클래드를 스트립조성과 비교할 때 Ni은 0.02~0.029% 증가에 그쳤으나 입열증가에 따라 플럭스에 높은 Cr 함유량이 클래드에 이동하여 Cr의 경우는 3.08~5.26 % 증가하였고 delta ferrite는 13~33 %의 증가치를 나타내었다.

Table 3. Results of chemical analysis

Specimen's No. (KJ/cm)	Chemical composition (wt %)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
W1 (252)	0.047	0.84	1.46	0.021	0.005	11.33	22.87	0.23	0.03
W2 (219)	0.050	0.77	1.41	0.022	0.009	11.24	22.16	0.24	0.02
W3 (193)	0.053	0.85	1.49	0.021	0.008	10.94	22.63	0.23	0.04
Ref(168)	0.065	0.75	1.31	0.020	0.006	9.95	20.58	0.23	0.04
W4 (162)	0.058	0.73	1.51	0.023	0.009	10.15	21.51	0.22	0.03
W5 (132)	0.061	0.69	1.51	0.022	0.008	9.85	19.49	0.23	0.02
W6 (102)	0.068	0.61	1.47	0.022	0.008	9.57	18.90	0.22	0.02

산화성이 큰 Cr 원소는 용접중 크게 손실되어지고 또한 용접후 클래드의 미세조직에 따른 고온균열 및 마르텐사이트 균열감수성이 높아지기 때문에¹⁴⁾ Cr 함유량이 높은 플렉스를 사용하여 일차적으로 스트립과 플렉스만이 용융된 이론상의 순수 클래드의 C_{req} 을 크게 하였다. 실험조건에 따른 순수 클래드의 미세조직은 Fig.4 의 Schaeffler diagram 상에서 austenite+ferrite 영역에 모두 들어 있음을 확인할 수 있었다.

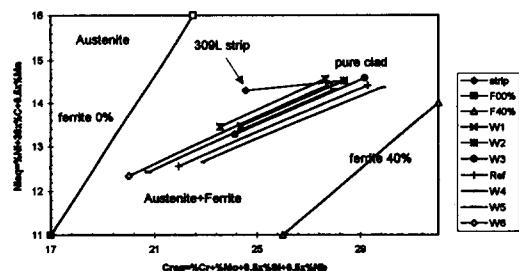


Fig. 4 Pure clad and diluted clad on the Schaeffler diagram

클래드 용접부의 Cr_{eq} , Ni_{eq} , Cr_{eq}/Ni_{eq} , 및 delta ferrite를 계산한 결과는 Table 4 와 같다. 취화균열 감수성이 큰 영역에는 고입열의 W1~W3의 클래드 용접부가 포함되었다. 식(1) 및 (2)에 따른 delta ferrite는 클래드 용접부에서 5~14%의 범위이나 Delong diagram¹⁵⁾ 상의(10)식과 같은 수정 Nieq 식으로 계산한 delta ferrite는 5~18 ferrite number 였다.

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30x + 30x\%N + 0.5 + \%Mn \quad \dots \dots \quad (10)$$

이는 Schaeffler diagram상의 상기 ferrite 범위와 거의 일치하며 ASME code와 미국 규제지침서¹⁶⁾에서 권고하고 있는 5~20%의 범위내에 있음을 확인하였다. 또한 오스테나이트용접부의 Cr_{eq}/Ni_{eq} 값이 1.5 이상일때 고온균열 감수성이 작게 되는데¹⁷⁾ 계산 결과는 1.6~1.8의 범위로서 고온균열 감수성은 비교적 작은 것으로 판단된다.

따라서 클래드용접부의 delta ferrite 기준 관점에서 적용 가능한 최소입열은 W6 시험편의 102 KJ/cm인 것으로 판단된다.

3.4 비드 경계부위의 조직 및 기계적 특성

3.4.1 용접경계부의 금속조직 및 경도분포

Photo 2는 비드계면의 용접경계부위의 조직으로서 계면부위에는 후열처리 결과 20~70 μm 폭으로 석출된 탄화물층이 나타나 있고 이폭은 입열이 증가함에 따라 증대되었다. 이는 모재측의 탄소가 후열처리 결과 클래드 용접부쪽으로 이동한 결과로서 계면부위에는 침탄지역이 형성되었다.

고입열의 경우 클래드 용접부에는 회석을과 탄소함유량이 적고 냉각시간 T_{as} 가 큼으로 클래드 부위와 모재와의 사이에 큰 탄소농도 구배가 형성되어 침탄층의 폭이 커진 것으로서 이러한 결과는 ferrite와 austenite 공존상태에서의 탄소의 확산연구 결과¹⁸⁾와도 잘 일치하고 있다.

Micro 경도치를 측정한 결과는 Fig. 5 에서와 같이 탄화물층의 계면부위에서는 경도 최대치가 나타나 조대화 및 연화탈탄층 영역인 HAZ 0.3 mm

Table 4. Variables of Cr_{eq} and Ni_{eq} with heat input

Clad		Welding coupons						
		W1	W2	W3	Ref	W4	W5	W6
Pure clad	Cr_{eq}	28.37	27.65	29.17	29.28	29.83	27.99	27.80
	Ni_{eq}	14.53	14.57	14.59	14.42	14.37	14.32	14.44
	Cr_{eq}/Ni_{eq}	2.0	1.9	2.0	2.0	2.1	2.0	1.9
	delta ferrite	22	18	23	25	29	20	18
Diluted clad	Cr_{eq}	24.37	23.56	24.14	21.94	22.83	20.76	20.00
	Ni_{eq}	13.47	13.45	13.28	12.56	12.65	12.44	12.35
	Cr_{eq}/Ni_{eq}	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.7	1.6
	delta ferrite	14	12	13	12	12	6	5
Strip 309L		$Cr_{eq} : 24.57$			$Ni_{eq} : 14.3$		delta ferrite : 12	



Photo 2. Microstructures on the fusion line with heat input

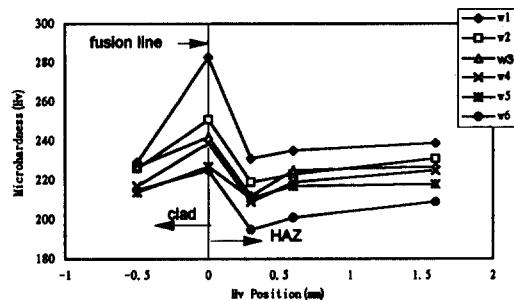


Fig. 5 Microhardness profile

까지 급격히 감소 하였다가 다시 증가되는 경향을 나타내고 있어 계면부위가 가장 취약함을 보여주고 있다.

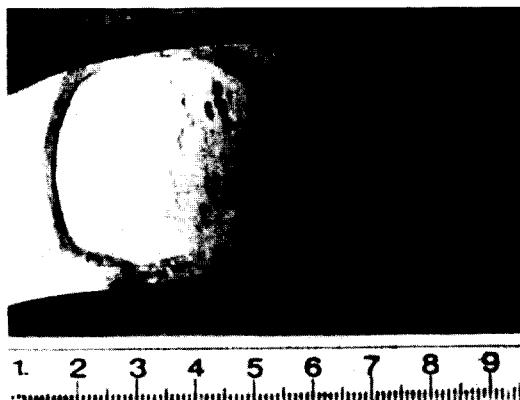
3.4.2 급험시험에 따른 클래드 균열

급험시험전 클래드가 제거된 면급험 시험편의 HAZ를 5회에 걸쳐 총 2.1 mm를 밀링으로 절삭하면서 액체침투시험을 수행하였으나 결함은 발견되지 않았다.

또한 면급험 시험편을 180 °급험시험을 수행한 결과 임계입열량 부근 및 이를 초과하는 W1~W3 시험편에서는 다수의 선형균열이 발생 하였으나 임계입열량 이하의 시험편에서는 어떠한 결함도 발생하지 않았다.

W1-W3 시험편에 발생한 균열이 모재까지 침투해 있는지 또는 밀링후 남아있는 island phase의 클래드 용접부인지를 확인하기 위하여 Photo 3-b 와 같이 SEM을 이용 하여 균열부위를 관찰한후, 균열선단 위치를 확인하기 위하여 폴리싱으로 균열을 거의 제거한 부위를 Photo 3-c와 같이 관찰하였다. 또한 Photo 3-b 및 Photo 3-c 부위를 각각 region 1 및 region 2로 지정하고 EDAX로 성분분석을 수행하여 Table 5에 이의 결과를 나타내었다.(단, region 3는 균열이 완전 제거된 부위). 균열은 Table 5 에서와 같이 모재가 아닌 309L 계열 클래드에서만 발생 하였음을 확인할 수 있었다.

한편 면급험 시험 결과 균열이 발생하지 않은 클래드 및 모재의 Mn/S 비는 평균치 90^o보다 훨씬 높았으나 균열이 발생된 부위의 Mn/S비는 10 이하이며 MnS 게재물이 광학 현미경상의 저배율로 관찰되고 있는 점으로 보아 면급험시험 결과 클래드에 발생한 균열은 MnS 게재물의 액화기구²⁾



(a) Indication with PT



(b) Crack appearance(x100) in the region 1



(c) Residual cracks (x2000) in the region 2

Photo 3. Multiple cracks in the clad of island phase

가 미친 영향인 것으로 사료된다.

측면굽힘 시험편에 대한 굽힘시험 결과는 Photo 4 와 같이 최대입열 252 KJ/cm(W1) 에서는 약 30° 굽힘중에 그리고 193~219 KJ/cm(W2~W3) 에서는 180° 완전 굽힘시 비드 결합부위와 계면의 용융부족 결합부위가 파단되었으나 타 시험편에서는 균열이 발생하지 않았다. 따라서 굽힘시험 결과 모재에는 UCC가 발생하지 않았으며 대입열의 경우 굽힘시험으로 발생한 균열도 모재에는 침투하지 못한 점으로 보아 모재는 균열발생에 대한 저항성이 큰것으로 판단된다.

3.4.3 CVN 시험편 시험결과 및 파면관찰

입열 252 KJ/cm의 시험편은 용융부족 결합으로 CVN 시험편 제작이 가능하지 않았으나 타 시험편에 대해서는 계면부위를 중심으로한 내충격성을 조사하기 위한 시험이 수행 되었다. 계면 부위에서의 흡수에너지 측정결과는 Fig. 6 과 같이 모재에 대한 규정치 $12 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{10}$ 보다 낮은 최소치를 나타내었다. 102 KJ/cm의 계면부위를 중심으로한 클래드 2 mm, 계면부위, HAZ, 모재등의 notch 위치에서의 시험편 파단면을 SEM으로 관찰한 결과 계면부위 근방에서는 cleavage 형태의 파단면이 뚜렷히 나타나 있으나 HAZ 방향으로 갈수록 ductile 한 양상으로 변화되고 있음을 보여 주었다.

이러한 특성은 경도 및 굽힘 시험 결과와도 일치하는 것으로서 탄화물이 집적되는 계면 부위에 가까울수록 조직은 취약해지거나 HAZ 방향으로 갈수록 조직은 조대화되고 탈탄층 영역으로 연화되어 있기 때문에 파면형상이 위치에 따라 상이하게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 전단파면을 및 측면팽창치 역시 계면부위에서 최소치를 보이고 있어 클래드 용접부 계면은 입열의 증감에 관계 없이 취화감수성이 가장 큰 곳임을 알 수 있었다.

Table 5. Analytical results of Cr, Ni, Mn and S at the regions showing crack indications

Element	Region 1	Region 2	Region 3	Base metal	Diluted clad
Cr	10.623	2.242	0.389	0.072	22.871
Ni	5.041	1.409	0.417	0.791	11.332
Mn	1.657	1.593	1.499	1.423	1.461
S	0.453	0.290	0.193	0.003	0.005

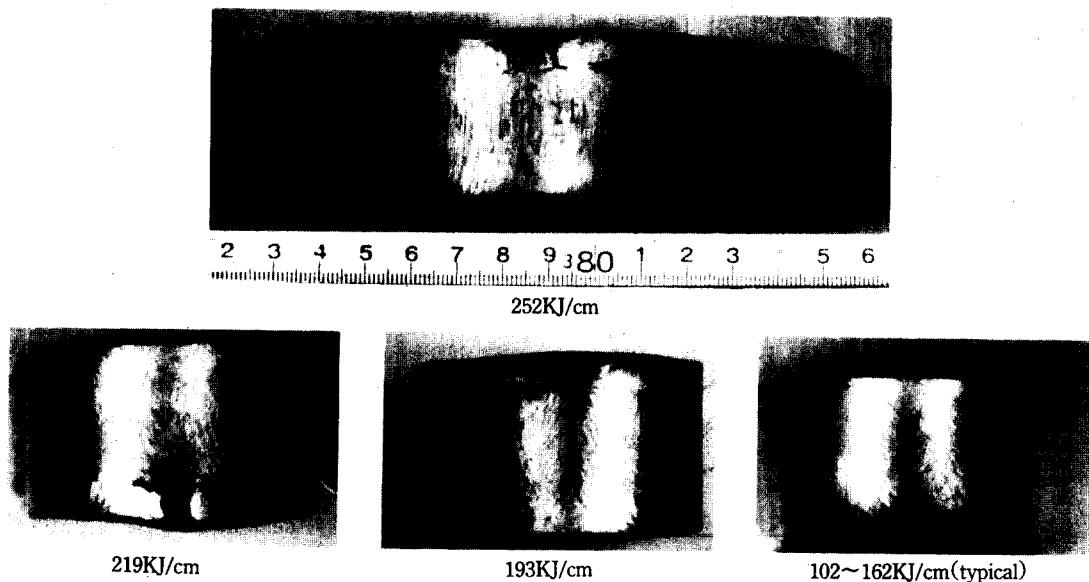


Photo 4. Test results of side bend specimens

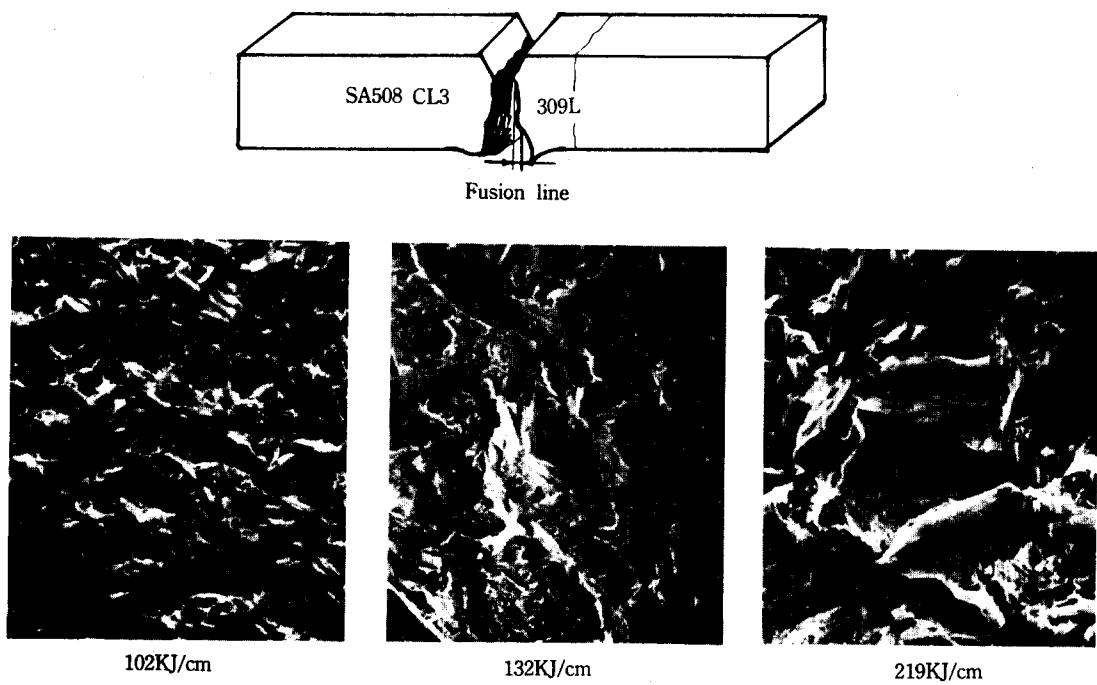


Photo 5. SEM photographs showing fracture mode on the fusion line of CVN impact specimens

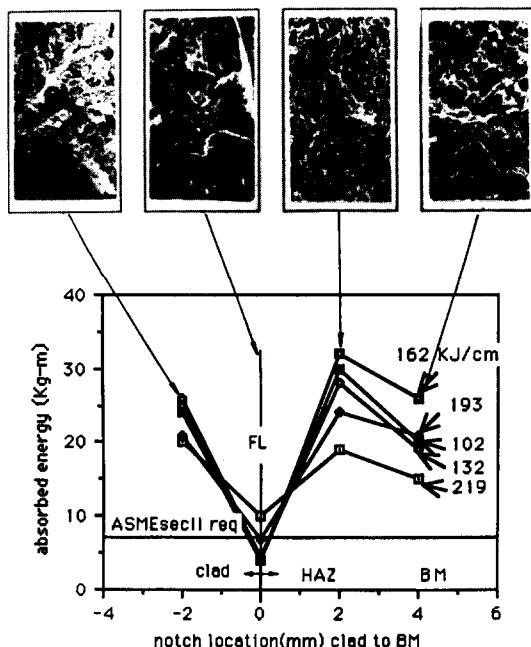


Fig. 6 Impact absorbed energy and fracture appearance with heat input for each notch location

4. 결 론

SA508 Cl. 3 저합금 탄소강에 90×0.5 mm의 309L 스트립을 이용하여 단층으로 잠호 클래드 용접을 수행한 후 입열에 따른 야금학적 현상 및 HAZ의 기계적 특성과 UCC 발생요인을 조사한 실험결과를 통하여 입열량에 따른 UCC 감수성에 관한 다음 결론을 도출하였다.

1. 입열이 증가함에 따라 비드 높이가 증가하나 회석률은 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 시험편 두께 75 mm의 경우 두께에 의존하지 않는 용접 임계 입열량은 219 KJ/cm 미만이나 용접중 용융부족 결합 및 과열등이 발생하지 않는 입열량은 102~168 KJ/cm이며 이중 회석률이 가장 낮은 최적 입열량은 168 KJ/cm(Fig. 7) 이었다.

2. 대입열의 경우 면굽힘 시험 결과, MnS가 석출된 island phase 클래드 용접부에 서 균열이 발생되었으나 모재까지는 침투하지 못했으며 UCC 발생도 없어 모재는 균열발생 저항성이 큰 것으로

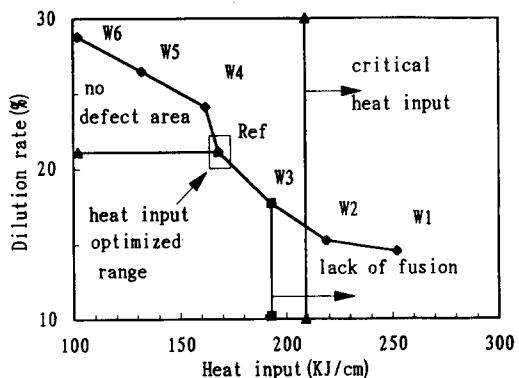


Fig. 7 Optimized heat input range

평가된다.

3. 클래드 용접부의 delta ferrite는 전 시험편에서 5~14%를 나타내어 ASME code 등에서 규정하고 있는 기준치를 만족하고 있다.

4. 클래드 용접부의 미세조직은 austenite+ferrite 영역에 속해 있으며 C_{req}/N_{eq} 치가 1.6~1.8로서 고온균열 감수성은 비교적 작은 것으로 나타났다.

5. CVN 충격시험 결과 클래드 용접계면부위의 파단면은 입열의 증가에 따라 cleavage가 발달하여 고입열에서의 파단면은 입계파면과 유사한 양상을 나타내었다. 흡수에너지 및 측면팽창치, 전단파면을 측정치 역시 클래드 용접계면 부위에서 최소치를 나타내므로 계면부위는 입열량의 크기에 상관없이 클래드 용접 부위에서 가장 취약하였다.

참 고 문 헌

- Lundin, D. C : Dissimilar metal welds-Transition joint literature review, welding J, Feb. 1982, pp 58s.
- Dolby, R. E., et al : Underclad cracking in nuclear vessel steels, metal const, Dec. 1977, pp562~566
- A. G. Vinckier and A.W.Pense : A review of underclad cracking in PV components, RWC bulletin 197, Aug. 1984, pp3.
- T. R. Mager : Reactor vessel weld cladding-base metal interaction, WST report WCAP-773, July 1981, pp2-1~10
- R. S. Chandel and R. F. Orr : Effect of process variables on bead geometry of the submerged

- arc strip overlay welds, Indian welding J., Jan. 1984, pp21~31
6. T. Hoiya et al : Study on underclad cracking in nuclear reactor vessel steels, transation of the ASME, Feb. 1985, pp353~358.
 7. S. W. Kim and Y. H. Lee : Evaluation of underclad crack susceptibility and process optimization of submerged arc 90 mm, ASM Int. conf. proceedings, June 1~5, 1992, pp825~830
 8. S. W. Kim and Y. H. Lee : Evaluation of Cr transfer according to new FN diagram for 309L cladding welds, KWS conf. proceedings, Apr.1991, pp85~87
 9. C. S. Park and H. S. Ann et al : Study of ultrasonic test for underclad crack of PV, KWS conf. proceedings, Apr.1991, pp22~24
 10. ASME : Specification for quenched and tempered vacuum treated carbon and alloy steel forgings for pressure vessel,ASME code section II, 1989, SA508
 11. ASME : material, ASME code section III(NB), 1989, Article II.
 12. J. Degenkolbe : Characterization of welding temperature cycles with respect to their influence on the mechanical properties of weldments by means of the cooling time T_{as} and its determination, IIW Doc. IX-1336-84, Dec. 1984, pp 687~704
 13. Keizo ohnishi et al : Study on the stainless steel overlay welding process of superior resistance to disbonding, JWS Vol 3, Oct.1983, pp85
 14. W. Kupez et al : The practical application of submerged arc strip welding, welding Int. J., No. 4, 1989, pp352~357
 15. ASME : Delta ferrite content, ASME code section III(NB),1989, Fig.NB-2433-1
 16. US NRC : Control of stainless steel weld cladding of low alloy steel components, Regulatory guide 1.43, May 1973, pp1.43
 17. T. Moisio : Effect of P and S on solidification cracking, Metal Trans., A, 1979, 10A-4, pp512
 18. Y. H. Lee : Study for disbonding of Stainless steel overlay welding, Ph.D. Thesis, Hanyang Univ., 1984