

CLAD강의 DEBONDING 현상에 대한 연구(1)

—열처리에 의한 clad강 계면의 강도 약화—

윤 중 근* · 김 희 진*

A Study on the Debonding Phenomena of Clad Steel(1)

—Deterioration of Interfacial Strength in Clad Steel by Thermal Treatment—

J. G. Youn, H. J. Kim

Key words: Debonding, Clad Steel, Deterioration of Interfacial Strength(계면강도 약화), Thermal Treatment(열처리)

Abstract

To clarify the debonding phenomena of clad steel, the effect of thermal treatment(temperature, holding time) on the interfacial strength of clad steel was preliminarily investigated. From this study, it was confirmed that the interfacial strength of clad steel was deteriorated by thermal treatment and the amount of strength deteriorated, depending on the condition of thermal treatment, could be evaluated by the following equation.

$$\sigma_{HT}/\sigma_t = A_0 - A \exp(-Q/RT) \log(t/t_0)$$

This equation implies that temperature has a far strong effect on strength deterioration than time. The deterioration of interfacial strength of clad steel after thermal treatment may be derived from the thermal stress caused by the difference in thermal expansion coefficient between component materials and microstructural change along the interface.

1. 서 론

최근 석유정제 등의 화학산업에 많이 이용되는 압력용기의 제작용 강재는 더욱 두꺼워지고 있으며, 특히 화학산업에 사용되는 경우 압력용기 내부에는 내부식성이 강한 재질의 선택이 요구되고 있다. 이 같은 요구를 경제적으로 만족시키고자 압력용기용 강재로는 일반적으로 고장력강 내부에 내부식성이 강

한 stainless강(3-4mm 두께)을 cladding한 이중금속 접합 강재(이하 clad강 이라 함)나 stainless강 용접 재료를 이용하여 overlaying한 것 등이 사용되고 있다. 이들 강재는 두께가 100mm이상의 두꺼운 강판 이어서 압력용기를 제작할 때 용접을 위한 예열시간이 5~10일의 상당히 긴 시간이 소요될 뿐 아니라 용접후에도 수소 제거처리 및 용집잔류응력 제거를 위한 여러 후열처리들이 장시간 반복되고 있다. 1)~2)

* 현대중공업(주) 용접기술연구소, 정희원

따라서 이 같은 공정을 통하여 제작된 압력용기의 clad강 용접부에는 열처리시 발생하는 stainless강과 기지(matrix)간의 접합계면으로의 탄소의 이동 및 stainless강의 예민화현상 등으로 인하여 원래 기대했던 기계적 성질을 확보할 수 없게 된다. Overlaying 된 이종금속재의 경우 후열처리를 받게 되거나 실제 고온 조업시 이종금속간의 계면에 탄소가 이동되어 탄화물이 형성됨에 따라 계면부가 경화되며, 또한 수소분위기에서 사용되면 수소유기균열이 발생된다는 연구결과들이 많이 보고되고 있어 stainless강 용접재료가 사용된 overlaying부의 계면에 대한 기계적 성질 약화현상은 어느정도 정립되어져 있다³⁾⁻⁶⁾.

그러나 압력용기 제작시 많이 사용되는 clad강을 용접함에 있어서는 용접중 혹은 용접 완료 후에 cladding된 이종금속의 접합계면이 debonding 되는 현상을 가끔 경험하고 있음에도 불구하고 clad강 자체에 대한 debonding 현상에 대한 검토는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 clad강 계면의 debonding현상의 원인을 조사하기 위하여, 먼저 실제 clad강의 용접시 debonding이 발생된 한 project를 시공조건 및 조업조건 측면에서 분석하므로써 clad강 접합계면의 기계적 성질을 약화시킬 수 있는 인자들을 검토하여 보았다. 그 결과 clad강 접합계면의 기계적 성질을 약화 시킴으로써 debonding을 야기할 수 있는 인자로서는,

1. 열처리 온도 (1) 예열 (2) 후열(잔류응력 제거 열처리 포함)
2. 열처리 시간
3. 용접열 cycle,
4. 수소
5. 구속도

등이 있음이 조사되었다.

본 연구에서는 이들 인자중 예열, 잔류응력 제거 처리 등의 열처리조건 즉, 시간 및 온도, 용접열 cycle, 수소 등을 실험인자로 선택하여, 이들이 clad강 계면의 debonding 혹은 clad강 계면의 기계적 성질에 미치는 영향을 평가함으로써 clad강 접합계면에서의 debonding현상의 원인 및 형성기구를 규명하고자 하였다. 본보에서는 1차적으로 열처리에 의한 clad강 접합계면의 강도 변화에 대하여 보고하고자 한다.

2. 실험

본 연구에 사용된 강재는 압력용기에 많이 사용되는 clad강으로써, 기지는 50kg/mm²급 고장력강인 A516-70 Gr.50이며 clad는 3mm두께의 304L stainless강이었다. 이 clad강의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 알 수 있듯이 304L stainless강은 intergranular 부식을 방지하기 위하여 탄소량이 0.03%이하로 되어 있는 것이 특징이다.

clad강 계면의 debonding에 대한 열처리 효과를 평가하기 위하여 예열과 후열처리를 실시하였다. 예열온도는 실제 예열온도(약 200°C) 보다 더 높은 300°C로 하였고, 후열처리 온도도 잔류응력제거 열처리 온도보다 다소 높은 650°C로 하였다. 또한 각 열처리 온도에서의 열처리 시간을 변화시켜 열처리 유지시간에 따른 clad강 계면의 강도 변화 거동도 동시에 조사하였다. Fig. 1에 열처리조건을 도식적으로 나타내었으며, 열처리 유지시간은 일정한 시간간격으로 증가시켰다. 특히 650°C의 열처리 경우, 실제 후열처리는 6~7시간 정도 실시하고 있으나 열처리시간에 따른 clad강 계면의 강도 변화를 명확히 규명하고자 열처리 유지시간을 90시간까지도 실시하였다. 열처리된 clad강을 ASTM A263규정에 따라 clad강 계면의 전단 강도 측정용 시편으로 기계 가공하였다. Fig. 2의 (a)는 기계가공에 의한 시편 제작 과정이며, (b)는 제작완료된 후의 최종치수를 보여주고 있다. 열처리된 시편에 대하여 일정한 범위 속도로 상온에서 전단 강도 측정시험을 행하였다.

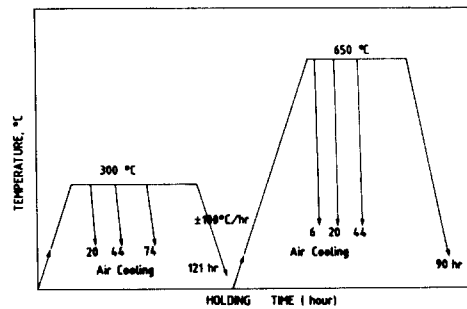


Fig. 1. Schematic diagram of thermal treatment for clad steel.

Table 1. Chemical compositions of clad steel plate

(wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
304L (clad)	0.024	0.37	1.77	0.034	—	10.1	18.24
A516 (matrix)	0.19	0.22	1.06	0.008	0.009	—	—

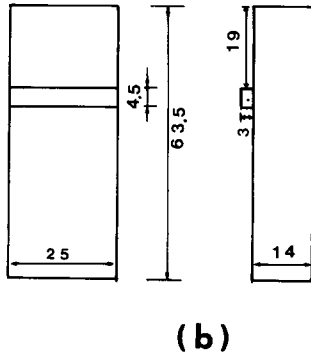
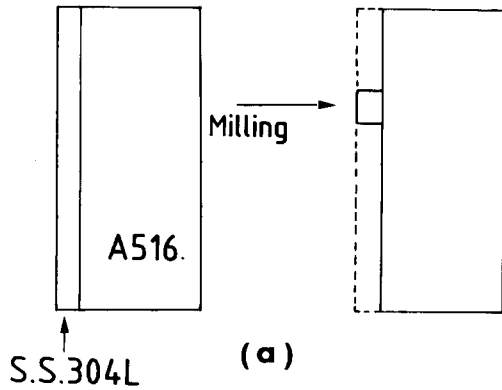


Fig. 2. Shear test specimen from clad steel: a) shaping, b) dimension.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. Clad강의 Debonding

압력용기를 제작하는 과정에서 clad강 접합면이 debonding된 한 실례를 Photo 1에 나타내었다. Photo 1의 사진 (a)는 clad강 용접부의 macro 사진이며, 사진 (b)는 사진 (a)와 같이 용접된 부위에서 debonding된 것이 비파괴점사에서 검출되어(화살표 위치), 실 용접부에서 채취된 304L stainless강판이다.

3.2. Clad강의 미세조직

Photo 2는 etching 전후의 clad강의 미세조직을 보여주고 있는데 (a)는 etching전이고 (b)는 etching (3% nital) 후의 조직이다. Photo 2에서 보여주듯이 3% nital 용액으로는 탄소강인 A516강의 미세조직만을 관찰할 수 있었다. A516강은 탄소강의 전형적인 ferrite와 pearlite의 band구조를 나타내고 있다. 또한 etching전의 사진에서 clad강 계면은 약간 검은 선으로 관찰되고 있는데, 이는 본 연구에 사용된 clad강 계면의 접합상태가 기계적 결합 형태인 것을 입증하고 있다. 304L stainless강을 전해 etching 하여 얻어진 미세조직과 기지인 A516강의 미세조직을 동시에 Photo.3에 나타내었다. 304L stainless

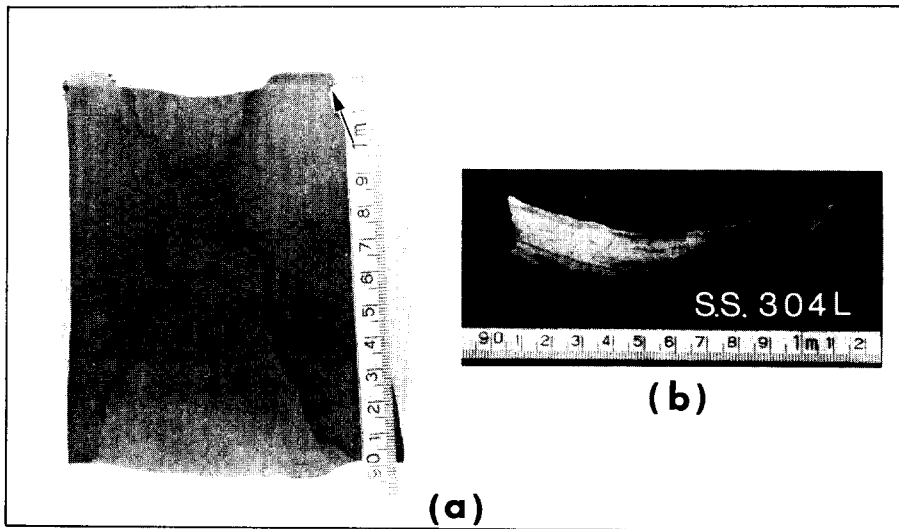


Photo.1. Debonding of clad steel: (a) welded joint, (b) 304L stainless steel separated from clad steel.

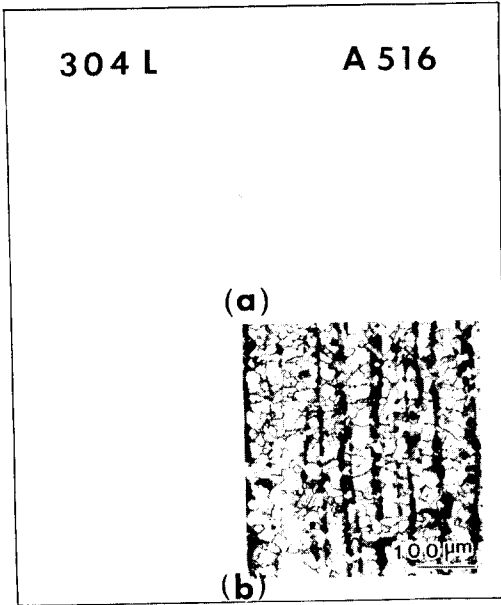


Photo.2. Microstructure of clad steel: (a) before etching, (b) after etching with 3% Nital

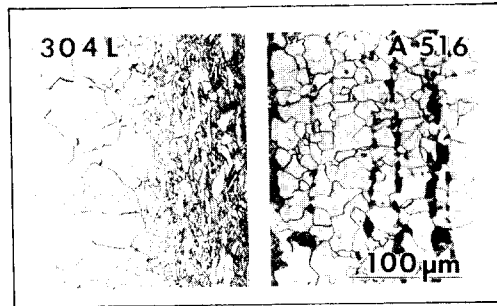


Photo.3. Composite Microstructure of clad steel.

강은 많은 다각형의 austenite 결정립들로 구성되어 있고, clad강 접합계면 주위에는 아주 미세한 austenite 결정립이 많이 존재하고 있는 미세조직적 특성을 가지고 있다. 그리고 clad강의 접합계면에는 하얀 band가 형성되어 있으며, 이 하얀 band에서는 전혀 결정립이 관찰되지 않고 있다. 이 하얀 band의 실체를 규명하고자 EDX를 이용한 성분분석을 실시하여 Photo.4에 그 결과를 도시하였다. Photo.4의

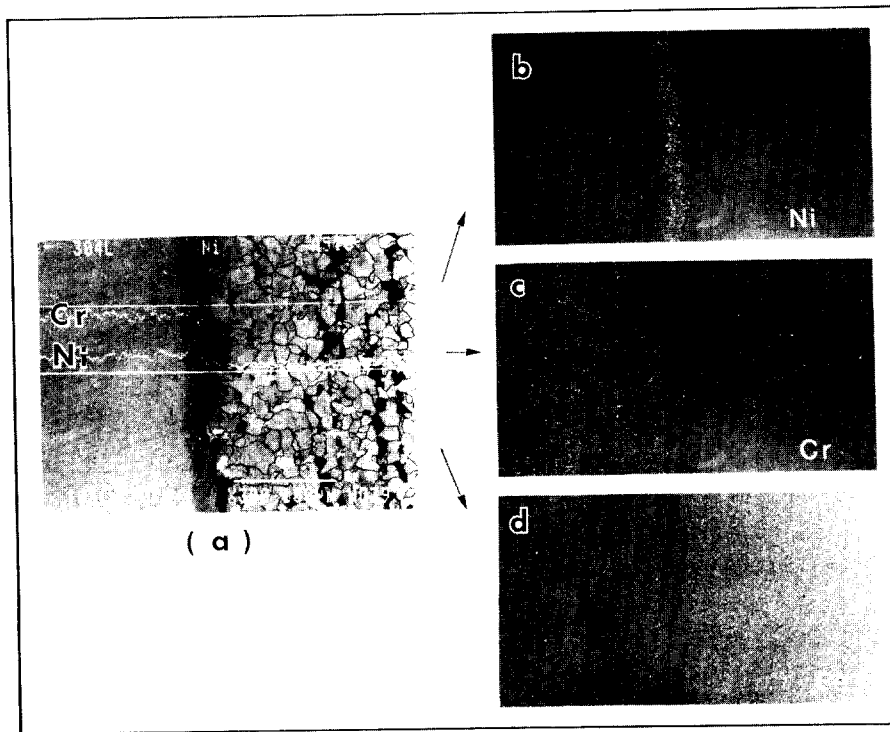


Photo.4. Alloy distribution in clad steel: (a) line analysis of Cr & Ni, (b) dot mapping of Ni (c) dot mapping of Cr and (d) dot mapping of Fe.

(a)는 clad강 계면의 양쪽을 선 분석한 것이며, (b), (c), (d)는 Ni, Cr, Fe에 대한 점 분석 결과이다. EDX분석 결과에서 보여주듯이 Photo 3에서 나타난 하얀 band는 약 20 μ m 두께의 Ni층인 것으로 판명되었다. clad강 제조시 계면에 Ni층을 인위적으로 삽입하는 것은 austenite와 ferrite간의 탄소 활량 차이로 인하여 계면 주위의 stainless강에 Cr 탄화물이 생성되는 것을 방지하기 위한 즉, Ni층이 탄소 이동에 대한 방어벽 역할을 하기 때문이다. 또한 후술하는 이종금속간에 발생하는 열응력을 완충시키는 매우 중요한 역할도 하게 된다.

3.3. 열처리에 의한 clad강 계면의 강도 약화

압력용기의 제작에 사용되는 후판 clad강의 용접을 위한 예열시간은 실제 5~10일 정도의 장시간이 소요되고 있다. 이에 따른 clad강 계면의 강도 변화가 예상되므로 이를 조사하고자 300°C의 온도에서 유지시간을 달리하여 열처리(예열)를 실시하였다. 300°C의 예열시 예열시간에 따른 clad강 계면의 전단강도 변화를 Fig.3에 도시하였다. Fig. 3에 도시된 바와 같이 예열시간이 증가할수록 전반적으로 clad강 계면의 전단강도는 감소하고 있으나, 전단강도의 감소폭은 열처리시간이 증가하면서 점차 적어지고 있다. 한편 as-received상태에서의 공시재인 clad강계면의 전단강도는 35.35kg/mm²으로 ASTM A263에 규정된 최소값 14kg/mm²보다 훨씬 높게 평가되었다.

Clad강 계면의 강도 약화에 미치는 잔류응력 제거 열처리(후열)효과를 조사하고자 650°C에서도 열처리를 실시하였다. Fig.4는 650°C에서의 열처리 시간에 따른 clad강 계면의 강도변화 거동을 보여주고 있다. 300°C에서의 열처리 경우와 유사하게 열처리 유지시간이 증가함에 따라 clad강 계면의 강도는 전반적으로 감소하고 있다.

그런데 650°C의 경우에는 초기 열처리 유지시간에서 clad강 계면의 강도가 심하게 감소하고 있으나, 열처리 시간이 40시간을 초과하면서는 더 이상의 현저한 강도감소는 일어나지 않고 있다. 이같은 결과는 300°C 열처리의 결과와 유사하다. 또한 650°C에서 열처리된 clad강 계면의 강도는 전반적으로 300°C의 열처리된 경우보다 현저히 낮은 값을 가진다. 이상의 실험 결과는 clad강 계면의 강도 변화가 열처리온도 및 유지시간의 함수임을 암시하고 있으며, 열처리온도의 증가가 열처리 유지시간의 증가보다 현저하게 clad강 계면의 강도를 감소시킴을 의미하

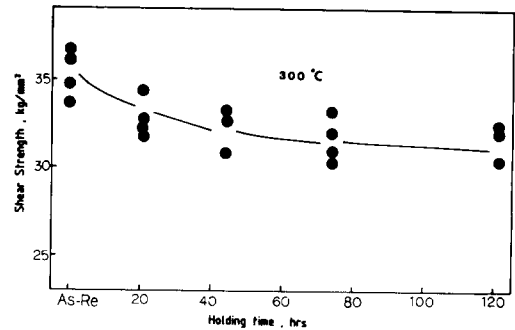


Fig. 3. The variation of interfacial strength with holding time at 300°C.

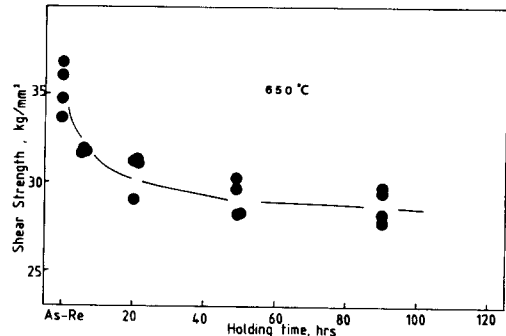


Fig. 4. The variation of interfacial strength with holding time at 650°C.

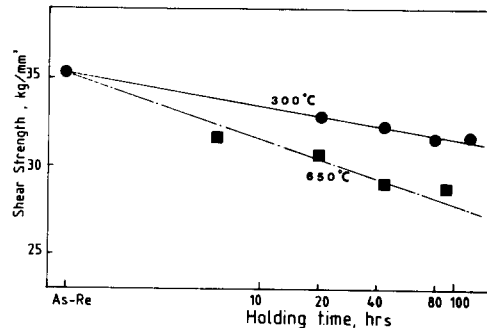


Fig. 5. The dependance of the interfacial strength of clad steel on the condition (temperature & holding time) of thermal treatment.

고 있다.

열처리온도 및 유지시간에 따른 clad강 계면의 강도 변화 거동을 보다 정량적으로 평가하기 위하여 열처리 유지시간을 log축으로 하여 이들 결과를 재도시한 것이 Fig.5이다.

Fig.5에서 얻을 수 있는 의미를 요약하면, clad강

계면의 강도는 열처리 온도(T) 및 열처리 시간(t)이 증가함에 따라 감소하며, $\log t$ 에 대하여 직선적으로 감소한다는 것이다. 그런데 열처리온도에 따라 clad 강계면의 강도와 $\log(\text{열처리 유지시간})$ 간의 직선관계의 기울기는 바뀌고 있다. 따라서 clad강 계면의 강도와 $\log(\text{열처리 유지시간})$ 간의 직선관계의 기울기는 열처리온도의 함수로 표시할 수 있다. 이상의 물리적 의미를 토대로 다음과 같은 실험식을 유추할 수 있다.

$$\sigma_{HT} = \sigma_i - f(T)f(t) \quad (1)$$

여기서 σ_{HT} : 열처리후의 clad강 계면의 전단 강도

σ_i : as-received상태의 clad강 계면의 전단 강도

$f(T)$: 온도의 함수

$f(t)$: 열처리시간의 log 함수

(1)식에서 $f(T)$ 는 온도의 함수이므로 Arrhenius식 형태 즉, $f(T) = A \exp(-Q/RT)$ 로 표시할 수 있다. 그리고 열처리온도 및 시간에 의존하는 clad강 계면의 강도변화를 정량화하기 위해서는 각 함수들의 무차원화가 필요하다.

따라서 (1)식은 무차원화로 정량화된 아래의 (2)식으로 표현될 수 있다.

$$\sigma_{HT}/\sigma_i = A_0 - A \exp(-Q/RT) \log(t/t_0) \quad (2)$$

여기서 A : 상수

Q : 강도 활성화 에너지

R : 기체 상수(1.987)

T : 절대온도

A_0 : $t=1$ 일때 강도 감소비

t_0 : 무차원화를 위한 시간항, $t_0=1$

t : 열처리 시간

실험에서 얻어진 결과에서 $A=0.3347$, $Q=2081.52$ 으로 평가되었다. (2)식을 이용하여 여러 종류의 열처리에서의 clad강 계면의 강도 변화를 예측할 수 있다.

3.4. 열처리에 의한 clad강 계면의 강도약화 원인

열처리온도 및 열처리시간에 따라 clad강 계면의 강도가 저하되는 근본적인 원인을 다음과 같이 고찰해 보았다.

1) 열처리 온도

clad강이 열을 받게 되면 clad강은 열팽창하게 되는데, clad강의 구성금속인 stainless강과 기지인 A516강의 열팽창계수가 서로 다르므로 양 금속에서의 열팽창량은 상이해 진다. 이로 인하여 clad강의 접합계면에는 열응력($\sigma_T = E\Delta\alpha\Delta T$)이 발생하게 된다. 이 열응력을 정확하게 산출하기 위해서는 본 연구에서 사용된 clad강의 구성합금들의 열팽창계수와 고온에서의 탄성계수를 알아야 하나, 여기서는 대략적인 열응력을 산출하기 위하여 기존의 공시재와 유사한 합금의 data를 사용하였다. 각 온도에서의 304 stainless강과 AISI 1010강에 대한 열팽창계수와 탄성계수⁸⁻⁹⁾ 및 계면에서 발생하는 열응력을 계산하여 Table 2에 나타내었다.

Table 2에 계산된 바와 같이 온도에 따른 stainless강과 A516강의 열팽창량차이 및 탄성계수 변화로 인하여 300°C의 열을 받으면 clad강계면에서는 21.2kg/mm²의 열응력이 형성되며, 특히 650°C에서는 54.6kg/mm²의 열응력이 발생된다. 이 열응력은 상온에서의 clad강 계면의 전단강도 35.35kg/mm²보다 훨씬 크기 때문에 clad강 계면의 debonding 현상의 요인이 된다. 그리하여 열응력에 의한 clad강 계면의 debonding현상을 방지하고자 clad강 계면에 열팽창계수가 stainless강과 기지인 A516강의 열팽창 계수의 중간값을 가지는 Ni층을 도입하는 것이다. Table 2에 나타낸 바와 같이, Ni층을 함유한 clad강이 300°C로 열을 받으면 기지인 A516강과 Ni계면에 발생하는 열응력은 3.8kg/mm², 650°C의 경우 이 계면은 29.8kg/mm²정도의 열응력을 받는다. 따라서 Ni층의 존재로 인하여 clad강 계면에 형성되는 열응력을 Ni층이 없을 때보다 300°C에서는 17.4kg/mm², 650°C에서는 24.8kg/mm²만큼 완화시켜 clad강 계면의 debonding을 방지하게 된다. 그러나 비록 Ni층의

Table 2. Comparisons of physical properties

	Thermal coefficient ⁸⁾⁻⁹⁾ (X 10 ⁻⁶ /°C)		Young's modulus ⁹⁾ (kg/mm ²)		Thermal stress at interface(kg/mm ²)	
	300°C	650°C	300°C	650°C	300°C	650°C
Carbon Steel(AISI 1012)	13.3	14.8	17,500	1,2600	21.2	54.6
304 Stainless Steel	17.8	18.4	170,50	1,4700		
Ni	14.4	15.8			3.8	29.8

존재로 인하여 열응력을 상당량 완화시켰을지라도 발생된 열응력은 다시 냉각됨에 따라 냉각시 발생된 열응력 차이로 인한 잔류응력이 상온에서

의 clad강 계면의 강도를 저하시키게 된다고 사료된다. 그러므로 높은 온도에서 열처리된 clad강은 열처리시 계면에 발생된 열응력이 낮은 온도에서 열처

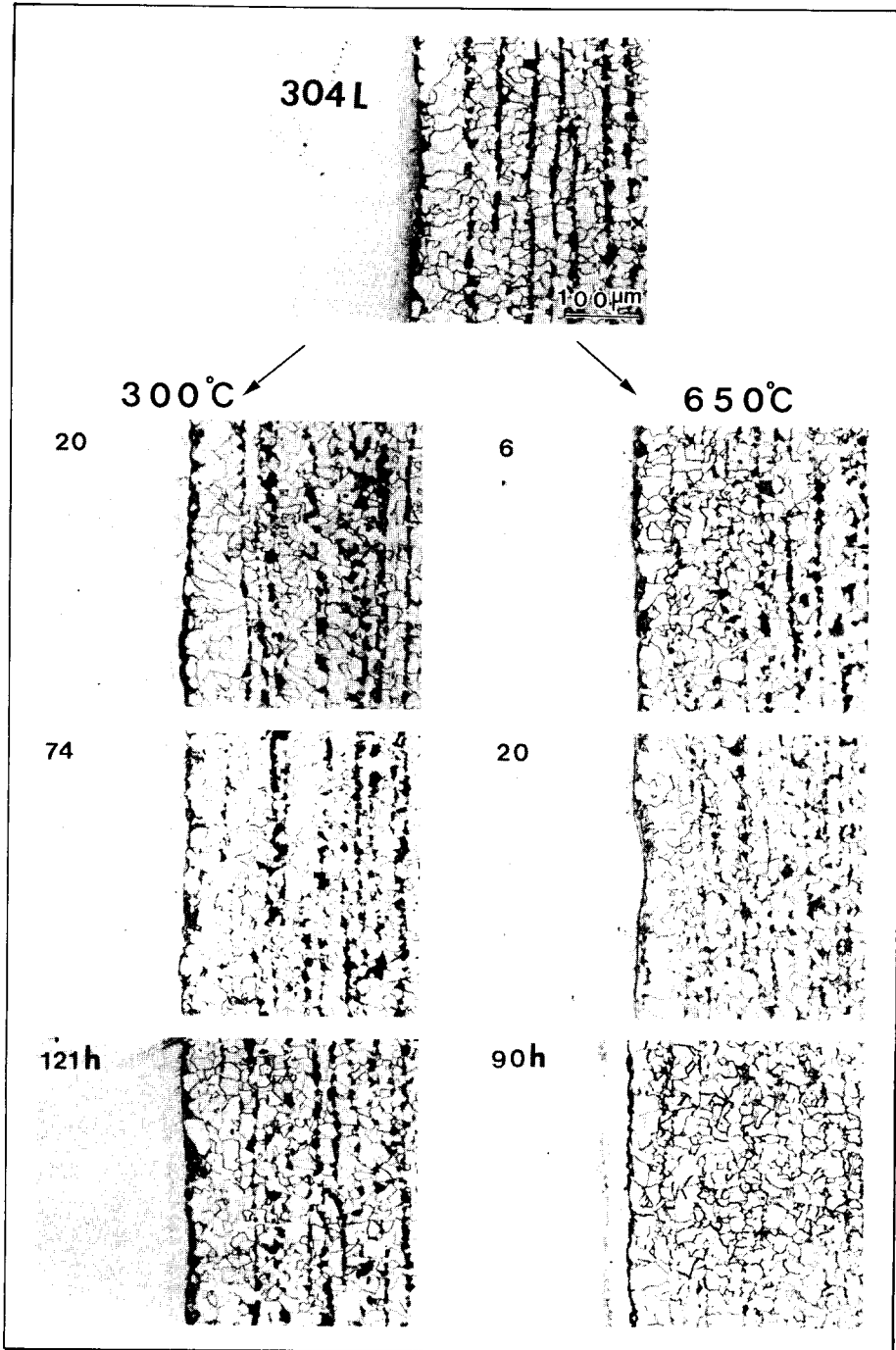


Photo. 5. Microstructural change along the interface of clad steel after thermal treatment.

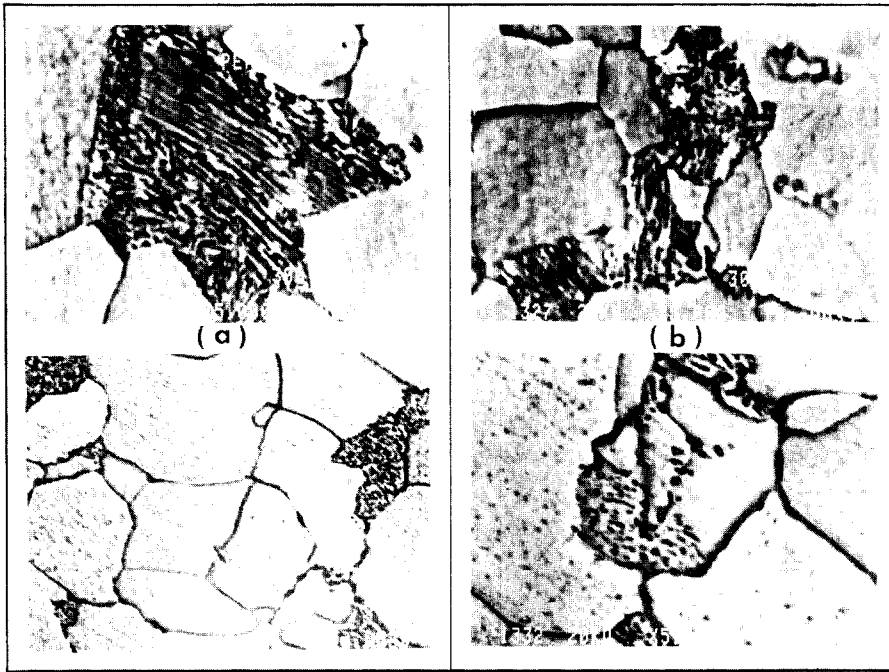


Photo. 6. Microstructural analysis by SEM: (a) microstructure near interface, (b) microstructure far from interface, after different thermal treatment at 300°C for 121 hrs (UPPER) and at 650°C for 6 hrs (LOWER).

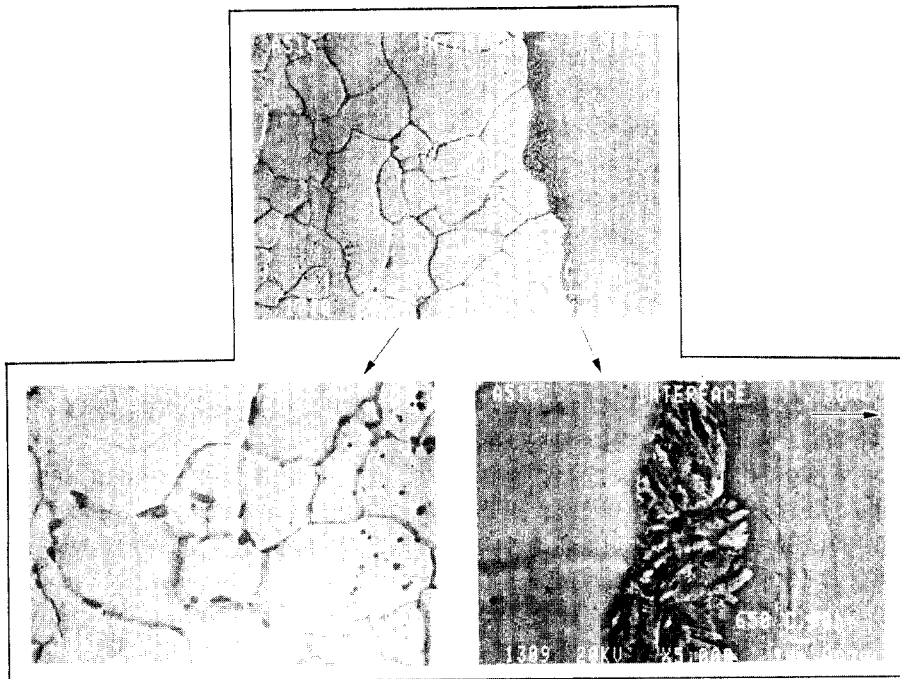


Photo. 7. Microstructural change along the interface of clad steel after thermal treatment at 650°C for 90 hrs.

리된 경우보다 크기 때문에 상온에서는 그 계면의 강도가 더욱 감소하게 된다. 따라서 650°C에서 열처리된 clad강 계면의 강도는 300°C에서 열처리된 clad강 계면의 강도보다 낮은 값을 갖게 된다.

2) 열처리 시간

만약 clad강 계면 강도 약화가 열처리온도 영향에만 의존한다면 Fig.5의 열처리후의 강도 감소는 각 열처리온도에서 열처리 유지시간에 관계없이 일정하여야만 한다. 그러나 열처리 시간의 증가에 의해서도 clad강 계면의 강도는 감소하고 있는데, 이는 열처리 유지시간 역시 clad강 계면의 강도에 영향을 주고 있음을 입증하고 있다.

따라서 각 열처리 온도에서 열처리 유지시간에 따른 clad강 계면의 강도가 변화되는 것에 대해 고찰해 볼 필요가 있다. 이는 kinetics상의 문제이므로 열처리 시간이 증가에 따른 clad강 계면에서의 조직 변화를 고찰하여야 한다. Photo.5에 각 열처리 온도에서 열처리시간에 따른 clad강 계면 주위의 미세 조직 변화를 나타내었다. Photo.5에서 알 수 있듯이 300°C 열처리의 경우에는 clad강 계면에서 탈탄영역이 조금 관찰되고 있으나, 650°C의 경우 열처리 유지시간의 증가에 따라 탈탄층이 크게 증가됨을 보여주고 있다. 이를 보다 자세하게 관찰하기 위하여, 계면주위를 Scanning Electron Microscope(SEM)으로 조사하여 그 결과를 Photo.6과 7에 나타내었다. Photo.6의 (a)는 계면에서 다소 떨어진 영역에서의 조직이며, (b)는 clad강 계면에 인접한 조직을 보여주고 있다. 300°C에서 121시간 열처리된 clad강에서는 전반적으로 pearlite조직이 상당량 존재하고, 계면의 인접 영역에서는 약간의 탈탄으로 인하여 pearlite의 형상이 변화되었음을 보여주고 있다. 반면 650°C에서 6시간 열처리된 clad강에서는 계면 주위의 어느 영역에 있어서도 pearlite상은 관찰되지 않았다. Photo.7은 650°C에서는 90시간 열처리된 clad강의 경우, 계면주위의 pearlite는 완전히 소실되어 있으며, pearlite에 존재하던 탄소는 결정립 내부나 결정립계에 탄화물로 석출되고, 탄화물로 석출되지 못한 탄소는 clad강의 계면으로 이동되었음을 보여 주고 있다. 즉 열처리 시간이 증가됨에 따라 clad강 계면 주위에는 탈탄층이 형성되었을 뿐 아니라 탄소가 clad강 계면으로 이동되어 결과적으로 clad강 계면의 강도를 저하시키게 된다.

상기된 clad강 계면 강도의 저하에 대한 원인을 요약하면 i) 열처리 온도에 의한 열응력 발생, ii) 열처리시간에 따른 clad강 계면 주위의 조직 변화 및

탄소의 이동으로 평가할 수 있다.

5. 결 론

대형압력용기의 제작시 발생되는 clad강의 debonding현상을 규명하고자 실제 debonding이 발생된 공사의 시공조건을 분석하여 debonding을 야기할 수 있는 계반인자를 설정하였다. 분석결과 열처리조건(온도, 시간), 용접자체의 효과, 구속도 및 주위에서의 수소 확산등이 clad강의 debonding 현상을 야기할 수 있는 인자로 평가되었다. 따라서 본 연구에서는 A516-70강과 304L stainless강의 이중 금속접합재인 clad강에 대하여, 1차적으로 이 clad강 계면의 강도에 미치는 열처리(예열 및 후열)의 영향을 온도와 열처리유지시간의 관점에서 평가하였다.

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. clad강 계면의 강도는 열처리온도 및 시간이 증가할수록 약화되며, 열처리 온도의 변화가 열처리시간의 변화보다도 clad강 계면의 강도 약화를 크게 야기한다.
2. 열처리후 clad강 계면의 강도약화는 열처리시 구성합금간의 열팽창계수의 차이에 의하여 발생하는 열응력과 계면주위의 미세조직 변화에 즉 탄소의 이동으로 설명할 수 있다.
3. 여러 형태의 열처리시 발생하는 clad강 계면의 강도 저하를 예측할 수 있는 실험식을 유추할 수 있다.

$$\sigma_{HT}/\sigma_i = A_0 - A \exp(-Q/RT) \log(t/t_0)$$

Reference

- 1) ASME Boiler and Pressure Vessel CODE III
- 2) 中井, 河村, 大型 熔接構造物の熔接-後熱 處理 (PWHT)의 實際, Vol.28, 1980(12), 熔接技術 (日本), p.75
- 3) WRC bulletin 305, SUMMARY REPORTS PREPARED BY JPVR SUBCOMMITTEE ON HYDROGEN EMBRITTLEMENT, June, 1985
- 4) Kikuta, Araki, Yoneda, Shiono, Hydrogen-Induced Disbonding for Austenitic Stainless Overlay Weld Metal Exposed to Elevated Temperature under High Pressure Hydrogen Atmosphere, J. of J.W.S. Vol.2, No.3 (1984), p.103

- 5) Morishige, Kume, Okabayashi, Hydrogen-induced Disbonding of Cladding, J. of J.W.S, Vol. 3, No. 1(1984), p. 69
- 6) Y.H.Lee, E.P. Yoon, Study on the Disbonding of Stainless Steel Overlay Welded Metal, J. of K.W.S, Vol. 1 No. 2(1983) p. 45
- 7) Catalog of clad steel plate and pipe, The Japan Steel Works
- 8) Metals Handbook, 9th Edition, ASM, Vol. 1 & 3 (1978), p. 147 (Vol. 1) & p. 34, 132(Vol. 3)
- 9) Dieter, Mechanical Metallurgy, 2th Edition, McGrawhill, p. 335