

CLAD강의 DEBONDING 현상에 대한 연구(2)

—용접열 cycle, 수소 및 복합적인 환경에 의한 clad강 계면의 강도 약화—

윤 중 근* · 김 희 진*

A Study on the Debonding Phenomena of Clad Steel (2)

—Deterioration of Interfacial Strength in Clad Steel
 by Welding cycle, Hydrogen and/or Thermal Treatment—

J. G. Youn, H. J. Kim

KEY WORDS : Debonding, Clad Steel(클래드강), Deterioration of Interfacial Strength
 (계면강도 약화), Welding Cycle(용접 싸이클), Hydrogen(수소), Thermal
 Treatment(열처리)

ABSTRACT

The debonding of clad steel was often occurred at interface between stainless steel and carbon steel during the fabrication of pressure vessel. In order to clarify the causes of debonding phenomena, the fabrication sequences were fully analyzed. As a result, possible factors were noticed for causing the debonding of clad steel, that is, thermal treatment on weldment and welding. Moreover the existence of hydrogen diffused from surroundings also expedites the debonding of clad steel. In this study, the effect of welding thermal cycle, hydrogen and mixed condition under thermal treatment on the interfacial strength of clad steel were investigated to understand the debonding mechanism of clad steel. From this study, it has been confirmed that the interfacial strength of clad steel was remarkably deteriorated due to welding and/or existence of hydrogen under thermal treatment. In the case of welding thermal cycle effect, the higher temperature at interface experienced by welding, the more reduction in interfacial strength of clad steel resulted in. And the existence of diffusible hydrogen also reduced the interfacial strength. It is also found that the interfacial strength of clad steel became much lower value than that of the as-received plate under coexistence of above mentioned factors.

* 현대 중공업(주) 용접기술연구소, 정회원

1. 서 론

화학산업에 많이 이용되는 대형 압력용기를 보다 경제적으로 제작하기 위하여 clad강이 널리 사용되고 있다.¹⁾ 그런데 압력용기를 제작함에 있어 clad강의 접합계면이 debonding되는 현상이 종종 관찰되고 있다.²⁾ 또한 조업도중 clad강의 접합계면이 내외적 환경요인에 의해 debonding되면 계속적인 조업조건에서 먼저 발생된 debonding현상이 전 clad강의 접합계면으로 전파될 수 있다. 이런 경우에는 압력용기용으로 사용된 clad강 원래의 목적인 내부식성이 없어질 뿐만아니라, 조업압력을 견딜수 있는 단면적이 감소되어 압력용기의 대형사고를 유발할 수 있게 된다. 따라서 clad강 접합계면의 debonding 현상은 대형압력용기의 안전성을 위하여 충분히 검토되어야만 하겠다. 이를 위해 본 저자들은 먼저 압력용기의 시공 및 조업조건에 측면에서 clad강 접합계면의 debonding현상을 야기할 수 있는 인자들을 검토하였다. 그 결과, 전보에서 보고하였듯이²⁾, 예열, 후열처리, 용접열 cycle, 수소 및 구속도 등이 clad강 접합계면의 debonding현상을 야기할 수 있는 인자들로 평가되었다. 이에 따라 본 저자들은 예열, 후열처리에 의한 clad강 접합계면의 강도약화, debonding 가능성 및 이에 대한 근본 mechanism을 이미 1차적으로 보고하였다²⁾. 따라서 본보에서는 clad강 계면의 강도에 미치는 용접열 cycle, 수소 및 각 인자들의 공존시의 영향들을 조사하여, clad강 접합계면에서의 debonding 현상을 보다 포괄적으로 규명하고 이를 방지할 수 있는 대책을 모색하고자 하였다.

2. 실험

본 연구에 사용된 clad강재는 전보와 동일하였다²⁾. 먼저 용접열 cycle에 의한 clad강 계면의 강도 변화를 검토하고자 용접부 시편을 제작하였다. clad강의 기지인 A516강을 기계 가공한 후, 이면(가공면)에 2~3KJ/mm의 입열로 첫번째 용착금속 layer 선단이 clad강 계면에서 1, 3, 5mm 떨어질 수 있도록 육성 용접(GMAW)을 하였다. 육성용접후 이들중 몇개를 취하여 전보와 동일한 조건으로 열처리를 실시하였다. 이상의 실험인자(변수)를 부여받은 clad강을 ASTM A263 규정에 따라 clad강 계면의 전단강도 측정용 시편으로 기계 가공하였다. 용접부 시편의 제작과정 및 제작완료된 시편형상을 Fig.1에

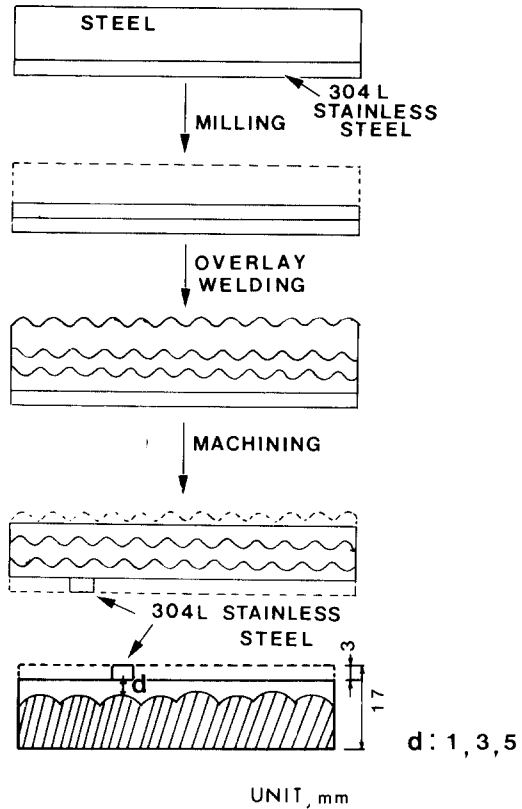


Fig. 1. Shear test specimen from clad steel

도시하였다. 또한 열처리후 clad강 계면의 강도에 미치는 수소의 영향을 조사하고자 potentiostat를 이용하여 24시간 동안 clad강 및 이의 육성용접부에 수소장입을 실시하였다. 최종시편에 대하여 일정한 변위 속도로 상온에서 전단강도 측정시험을 실시하였다. 또한 전단 시험후 파단 계면의 위치를 평가하고자 EDX를 이용하여 성분분석을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Clad강 계면의 debonding

전보에서 논한 바와 같이²⁾ clad강은 기계적 결합 형태인 계면의 결합상태를 가지며, 304L stainless강과 기지인 A516강 그리고 약 20 μ m두께의 Ni층으로 구성되어 있다. 중간에 존재하는 Ni층은 austenite와 ferrite의 양상간의 탄소 활량 차이로 인하여 계면 주위의 stainless강에 Cr탄화물이 생성되는 것을 방지하고, 이종금속간에 발생하는 열응력을 완충시키는 중요한 역할을 한다. 이와 같이 clad

강에는 stainless강/Ni층과 Ni층/A516강 사이의 미세한 두 계면이 존재하게 되는데, 실제 clad강의 debonding현상은 이 중 어느 계면을 따라 발생될 것인가도 중요하다. 이를 규명하고자 실제 clad강의 접합부에서 debonding된 stainless강(전보의 Photo 1^a)의 표면을 EDX로 성분 분석하여 그 결과를 Fig.2에 나타내었다. debonding된 표면에 Cr의 흔적이 거의 없는 결과로써 debonding은 Ni층/A516강 계면에서 발생된 것임을 확인할 수 있었다. 또 다른 자료를 Fig.3에 나타내었는데, 이는 clad강의 전단 시험 후 분리된 양쪽면을 EDX로 성분 분석한 것으로 (a)는 stainless강 층의 파단면에서 분석된 성분들이고,

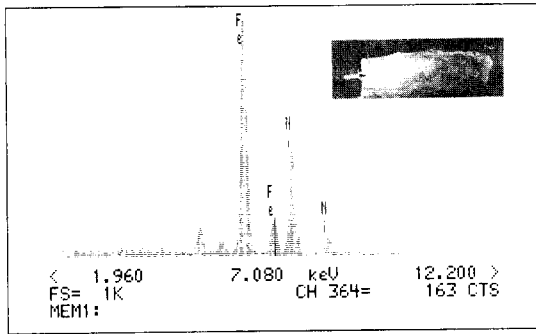


Fig. 2. EDX analysis for debonded surface of clad steel

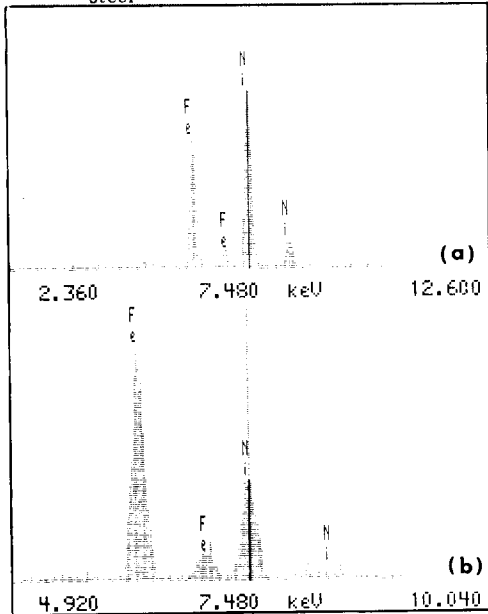


Fig. 3. EDX analysis for separated surface of clad steel after shear test: (a) separated stainless steel, (b) steel matrix.

(b)는 기지인 A516강 층의 성분들에 대한 결과이다. Fig.2와 동일한 결과로 분리된 양쪽면 모두 Cr의 흔적이 관찰되지 않았으므로 Ni층/A516강 계면에서 파단(debonding)된 것을 알 수 있다.

따라서 clad강의 debonding은 항상 Ni층/A516강 계면에서 발생하게 된다.

3.2. 열처리에 의한 clad강 계면의 강도 약화

clad강이 열처리를 받게 되면 열처리 온도에 의한 열응력 발생, 열처리 시간에 따른 clad강 계면 주위의 조직 변화 및 탄소의 이동 등의 원인으로 clad강 계면의 강도 약화가 유발된다²⁾. clad강 계면의 강도가 저하하게 되면 clad강 계면의 debonding 현상이 발생될 확률이 증가된다. 따라서 열처리에 의해 clad강 계면의 강도가 약화되게 되면 clad강에서는 외부의 힘이 없더라도 스스로 계면에서 debonding되거나 자발적인 debonding이 발생되지 않더라도 외부에서 약간의 힘이 가해지면 clad강의 계면에서는 debonding이 발생하게 된다. clad강 계면의 강도 약화에 따른 debonding 현상을 보다 명확히 보기 위하여 굽힘에 의한 기계적 응력을 clad강 계면에 가하였다. Photo 1에서 보여 주듯이 열처리전의 시편은 굽힘후에도 clad강 계면에서의 debonding 발생이 없었으나, 열처리 후 즉, 650°C에서 90시간동안 열처리된 시편에서는 아주 선명하게 clad강 계면을 따라 debonding현상이 발생되었다.

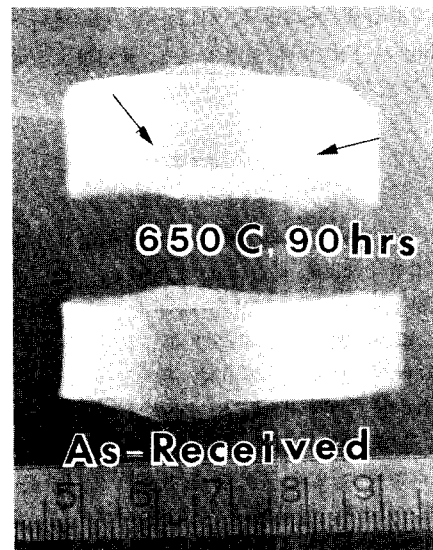


Photo. 1. Post bending specimens

이는 열처리에 의한 clad강 계면의 강도 약화를 단적으로 보여 주는 좋은 예이다.

3.3. 용접열 cycle에 의한 clad강 계면의 강도 약화

전보에서 언급한 바와 같이 clad강 계면이 받는 열 cycle 특히 최고 온도는 clad강 계면의 강도 약화에 상당히 중요한 영향 인자가 된다. 용접시 용접부의 온도 분포는 정확히 예측하기 힘들기 때문에 clad강 계면과 최인접 용착 layer의 선단간의 간격을 변화시켜 용접 열 cycle에 의한 clad강 계면의 강도 변화를 조사하였으며, 그 결과를 Fig.4에 후열처리로 인한 강도감소와 함께 도시하였다. Fig.4에서 보여주듯이 clad강 계면과 첫번째 용착 layer의 선단과의 간격이 좁아질수록 즉, clad강 계면이 높은 온도를 부여 받을수록 clad강 계면의 강도는 저하되고 있다. 더욱이 용접완료후에 열처리를 다시 받게 되면 clad강 계면의 강도는 더욱 저하될 뿐 아니라, 열처리 유지시간이 증가됨에 따라 clad강 계면의 강도는 현저히 약화되어 as-received상태 보다 약 10kg/mm² 정도의 강도 감소를 초래하고 있다. 이는 전보에서와 동일한 이유인 열응력과 계면 주위의 미세조직변화로 설명될 수 있다. 또한 용접부의 정확한 온도 분

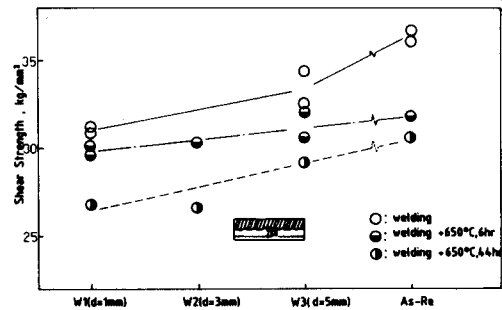


Fig. 4. The deterioration of interfacial strength of clad steel by welding and thermal treatment.

포 및 유지시간을 측정할 수 있다면 앞서 얻은 전보의 실험식을 약간 변조하여 용접열을 받은 clad강 계면의 강도 약화도 예측할 수 있다.

한편 Photo 2에 clad강 계면에서 첫번째 용착 layer까지의 거리가 1mm, 3mm 떨어진 경우, 용접열에 의한 clad강 계면 주위의 미세조직 변화를 보여주고 있다. 1mm 떨어진 경우 clad강 계면 주위의 미세조직은 작은 침상형 ferrite으로 변태되었고, 3mm 경우의 미세조직은 as-received상태의 조직보다 미세화되어 있음을 알 수 있다. 그러나 5mm

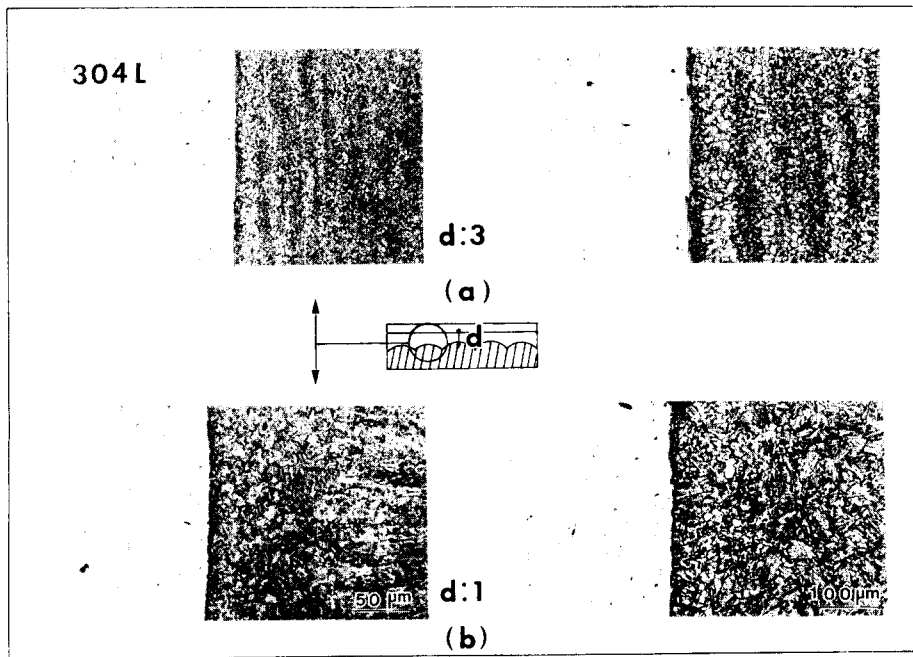


Photo. 2. Microstructure change by welding thermal cycles: (a) 3mm distance. (b) 1mm distance between interface and first welding layer tip.

떨어진 경우의 미세조직은 as-received상태와 동일하게 나타났다.

3.4. 수소에 의한 clad강 계면의 강도 약화

압력용기 내에 수소화합물이 상당량 존재하게 되면 조업중 수소가 clad강 계면으로 확산하여 clad강 계면의 강도를 저하시킬 수 있다³⁾. 이를 검토하고자 원 clad강과 열처리된 clad강에 수소를 장입하고 수소가 장입된 clad강 계면의 강도를 평가하여 그 결과를 Fig.5에 도시하였다. Fig.5에서 보여주듯이 clad강에 수소가 침투하면 clad강 계면의 강도는 전반적으로 감소하고 있으며, 더우기 열처리된 clad강의 계면에 수소가 존재하면 그 강도는 300°C 열처리의 경우 약 10kg/mm²까지 현저히 감소하고 있다. 열처리 온도 및 시간을 고려한 전보의 실험식을 수소가 존재할 때로 수정하면, 수소의 영향은 clad강 계면의 강도를 절대값으로 감소시키고 있으므로, 다음의 (1)식으로 고쳐 쓸 수 있다.

$$\sigma_{HT}/\sigma_i = A_0 - A \exp(-Q/RT) \log(t/t_0) - f(H) \quad (1)$$

f(H) : 장입된 수소의 함수

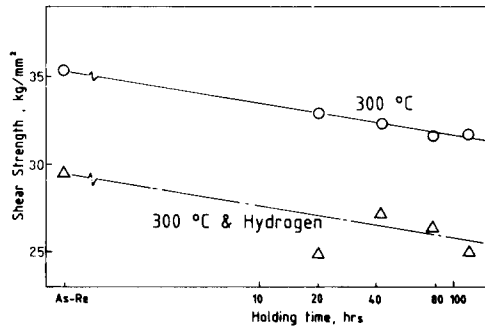


Fig. 5. The effect of hydrogen treatment on the interfacial strength of clad steel

3.5. 복합적인 효과

clad강을 사용하여 압력용기를 제작시 용접하고, 후열처리(650°C, 6시간)를 실시한 후 수소화합물이 존재하는 분위기에 압력용기를 설치해서 조업을 행하는 도중 압력용기내의 수소가 clad강 계면으로 확산하였을 경우의 clad강 계면의 강도 약화를 예측하기 위하여 열처리, 용접, 수소 등의 인자를 동시에 고려하여 실험을 실시하였다. 여러 인자가 복합적으로 공존할 때 clad강 계면의 강도 변화를 Fig.6에 나타내었다. Fig.6의 결과가 주는 의미를 요약하면, clad강 계면의 강도는 계면이 용접열을 받음에 따라

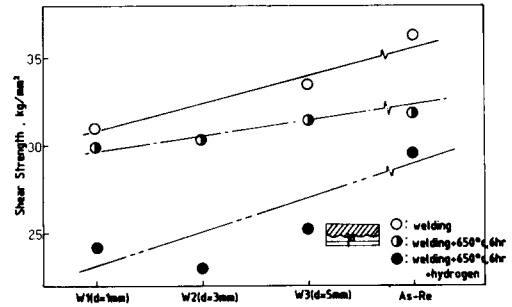


Fig. 6. The deterioration of the interfacial strength of clad steel by welding, thermal treatment and hydrogen treatment successively.

1차적으로 감소하고, 열처리에 의해 강도는 더욱 감소되며, 수소의 확산으로 인하여 현저하게 감소된다는 것이다. 또한 용접열이 클수록, 열처리 시간이 길수록, 열처리 온도가 높을수록, 그리고 수소의 양이 많을수록 clad강 계면의 강도는 더욱 감소하게 된다. 그리고 여러인자가 동시에 작용하게 되면 Fig.6에서 보여주듯이 650°C에서의 열처리 시간이 6시간임에도 불구하고 clad강 계면은 약 14kg/mm²정도의 현저한 강도 감소가 야기되어 조업중에 clad강 계면이 debonding될 가능성이 커지게 된다.

4. Clad강 계면의 debonding현상에 대한 대책

전보와 본보의 실험 결과를 근거로 하여 clad강 계면의 debonding현상에 대한 방재대책을 선정할 수 있다.

- A) as-received상태의 clad강 계면의 강도를 향상시킨다; clad강이 비록 여러 인자에 의해 계면의 강도가 약화 될지라도 약화된 강도가 debonding 현상을 극복할 수 있도록 초기의 clad강 계면의 강도를 증가시킨다.
- B) clad강에는 반드시 Ni층과 같은 보호층이 존재하여야 한다; Ni층이 탄소이동의 방지벽 역할뿐만 아니라 열응력의 완충역할을 하기 때문이다.
- C) 열처리 온도를 가능한 한 낮추어야 한다; 열처리 규정의 최소 온도에 인접하도록 열처리를 실시하여 clad강 계면의 강도 약화를 최소화 하여야 한다.
- D) 열처리 시간을 최소화하여야 한다; 불필요하거나 지나친 열처리시간은 clad강 계면의 강도 약

화를 촉진한다. 예열의 경우 가능한 한 용접 속도를 증대시킴으로써 예열시간을 절약하여 clad강 계면의 강도 약화를 최소화할 수 있고, 또한 이는 생산성 향상도 동시에 얻을 수 있다.

- E) clad강 계면 주위의 용접은 최소 입열량으로 실시하여야 한다; clad강 계면으로의 직접적인 열 cycle(온도)을 가능한 한 낮추어서 clad강 계면의 강도 저하를 막아야 한다.
- F) clad강으로 제작된 압력용기의 조업환경이 저수소농도가 되도록 조업조건을 설정하여야 하며, 제작시에도 작업장 주위에서 유입될 수 있는 수소의 양을 최소화 하여야 한다.

5. 결 론

대형압력용기 제작시 발생하는 clad강의 debonding 현상을 규명하고자, 실제 debonding이 발생된 공사의 시공조건을 분석하여 debonding을 야기할 수 있는 제반인자를 설정하였다. 분석결과 열처리 조건(온도, 시간), 용접열 cycle 및 주위에서의 확산된 수소등이 clad강의 debonding현상을 야기할 수 있는 인자로 평가되었다. 따라서 본 연구에서는 A516-70강과 304L stainless강의 이중 금속 접합재인 clad강에 대하여,

이 clad강 계면의 강도에 미치는 열처리, 용접열 효과 및 수소등의 영향을 평가하여 clad강의 debonding 현상에 대한 원인규명 및 방지대책을 모색하고자 하였다.

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) clad강 계면의 강도는 열처리에 의해 약화된다.
- 2) clad강 계면에 높은 용접열 cycle를 받을수록 clad강 계면의 강도는 더욱 약화된다.
- 3) clad강 계면에 수소가 존재하면 clad강 계면의 강도는 현저히 저해된다.
- 4) clad강이 열처리, 용접 및 수소 등의 영향을 동시에 받게 되면 clad강 계면의 강도는 현저하게 약화되어 clad강 계면의 debonding을 유발할 수 있다.

Reference

- 1) ASME Boiler and Pressure Vessel CODE III
- 2) 윤종근·김희진, CLAD강의 DEBONDING현상에 관한 연구(1), 대한 용접학회지(투고중)
- 3) C.G. Interante, Basic Aspects of the Problems of Hydrogen in steels, Current solutions to Hydrogen Problems in steels, ASM (1982) p.3