

가우징 높이에 따른 구조물의 열영향 평가

하준옥* · 양병일* · 박성진* · 이기학**

Evaluation of the heat affection according to the gouging height for low alloy steel structures

Joon Wook Ha, Byong Il Yang, Seong Jin Park, Ki Hak Lee

Key Words : Temporary Attachment(임시부착물), Arc Air Gouging(아크 에어 가우징), Low Alloy Steel(저합금강), Pressure Vessel(압력용기), Crack(균열), Heat Affected Zone(열영향부)

Abstract

A study was performed to determine the optimum height for an arc air gouging of temporary attachments, which were attached at the pressure vessel made of low alloy steel. Frequently, the crack occurred in the base metal by the excessive heat input during an arc air gouging process to remove the temporary attachments. A numerical analysis by 2-dimensional finite element method was performed to calculate the temperature distribution in the base metal during the removal of temporary attachments. And then the mock-up test was performed to verify the numerical results. Numerical values showed good agreement with the experimental results. These results indicated that the defects due to the excessive heat input during an arc air gouging were dependent on the height of temporary attachments remained above the main products.

1. 서론

고강도의 저합금강으로 제작되는 대형 압력용기들은 다양한 형태의 대구경 노즐 및 부속품들이 용접되어 전체구조물을 이루고 있다. 이러한 대구경 노즐 등은 그 무게가 100kg 이상이므로 정확한 위치에 최적의 조건으로 용접되기 위해서는 대부분 “L”자형, 또는 “C”자형의 임시부착물로 주 용접부 인근에 가접(Temporary Welding)하여 고정시킨 후 본 제품을 용접하게 된다.⁽¹⁾ 이들 임시부착물은 1회 사용 후 아크 에어 가우징(Arc Air Gouging) 및 사상(Grinding) 작업을 통해 제거되고, 최종 제품에는 남지 않는 소모품이기 때문에 작업자들이 향후 제거될 부분이라는 생각으로 그 중요성을 소홀히 할 우려가 크다. 그러나, 이러한 임시부착물이 붙어있던 모재부에 균열이 잔존하고, 향후 이들이 진전하여 사고의 위험을 내포할 수 있다는 사실을 인지한다면 결코 쉽게 취급되어서는 안될 중요한 제작요소 중 하나이다.

임시부착물을 제거하기 위한 가우징 높이를 너

무 높게 하면 사상할 양이 많아져 비생산적인 작업이 되며, 너무 낮게 하면 고온의 가우징 열에 의해 모재부가 손상을 받게 된다. 특히 제품이 완성되어 현지에 설치되는 시점에 임시부착물을 제거한 위치에서 결함들이 발견될 경우 보수용접 및 재열처리 등의 추가비용 증가와 납기 지연의 원인이 되므로 적절한 가우징 높이의 결정은 경제적인 압력용기 제작을 위해서 그 중요성이 더욱 크다고 할 수 있다.

본 연구에서는 아래에 언급한 바와 같이 아크 에어 가우징 공정에 대한 온도해석 결과를 도출하고, 수치해석으로 제안된 결과를 Mock-up 시험을 통하여 검증함으로써 가우징 열에 의한 결함발생을 최소화할 수 있는 임시부착물 제거의 작업기준을 제시하였다.

- (1) 유한요소해석 상용프로그램인 ANSYS⁽²⁾를 사용하여 모재부와 임시부착물의 아크 에어 가우징 시 경계층에서의 온도분포를 해석하였으며, 모재와 임시부착물의 경계부에서 변태온도를 넘지 않는 가우징 높이를 계산하였다.
- (2) SA508 Gr.3 Cl.1 사각블록 시편에 아크 에어 가우징 절단의 Mock-up 시험을 수행하여 모재부에 가해지는 열원이 절단부에서 어디까지 영향

* 두산중공업(주) 기술연구원

** 두산중공업(주) 재관생산기술부

을 미치는지 확인하였으며, 이를 수치해석 결과와 비교하였다.

2. 수치해석

2.1 임시부착물 부착 및 제거를 위한 공정

압력용기에 부착되는 노즐과 본체 및 용접부 형태를 Fig. 1에 도식적으로 나타내었다. “L”자형 임시부착물은 노즐과 본체의 실제 용접 전에 중심 위치를 잡고, 용접과정 동안의 변형방지와 작업성을 좋게 할 목적으로 미리 용접이 이루어지므로 용접 구속응력과 노즐의 무게를 견디기에 충분한 강도를 가져야 한다.

모재와 임시부착물의 용접에는 피복 금속 아크 용접(Sub Merged Arc Welding, SMAW)이 실시되고, 아크 에어 가우징에 의해 일정한 높이 만큼 절단한 후 사상하여 완전히 제거하게 된다.

Fig. 2에는 임시부착물의 부착을 위해 진행되는 주요 작업공정을 나타냈다.

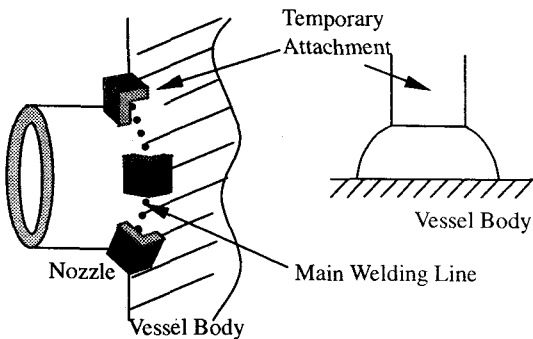


Fig. 1 Schematic drawing of weldment of L-type temporary attachments around nozzle

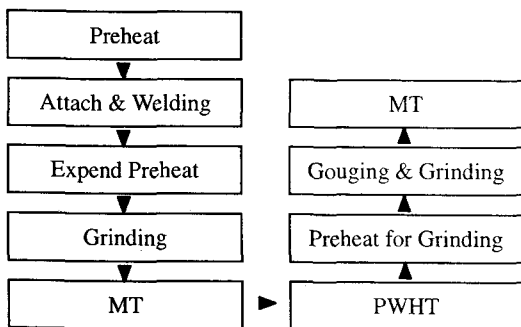


Fig. 2 The procedure of welding and discarding for temporary attachments

2.2 온도해석

유한요소해석 상용프로그램인 ANSYS를 사용하여 140°C로 예열된 상태의 모재와 임시부착물에 대해 모재 표면으로부터 1.5mm, 3.5mm 및 5.5mm 떨어진 높이에서 약 2,000°C의 아크 열원을 사용한 가우징 절단을 수행하였을 경우 모재부의 온도분포 및 두 재료 접촉부인 “CP” 지점의 온도이력을 계산하였다. 가우징 절단 시 재료 표면에서의 공냉이 이루어지므로 입열 영역 이외에는 대류 열전달을 고려하였고, 두 재료 모두 온도에 따른 물성치를 적용하였으며, 계산시간 및 저장용량 등 해석의 편의를 위해서 열원의 이동과 상변화는 고려하지 않은 것이 온도해석(Transient Temperature Analysis)을 수행하였다.

다음의 Fig. 3에는 해석에 사용된 모재와 임시부착물의 대략적인 형상, 치수 및 두 재료 경계부(CP)의 위치를 나타냈다.

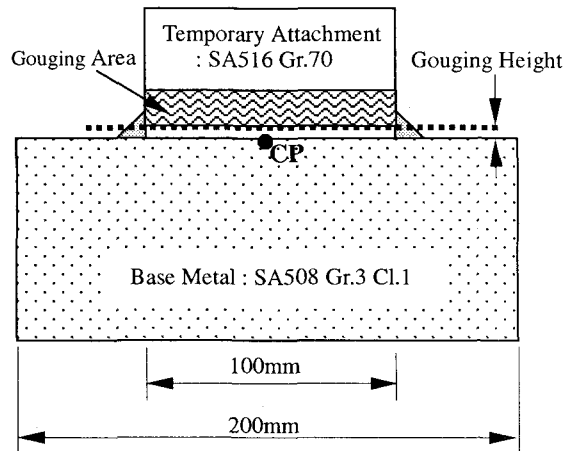


Fig. 3 Schematic drawing of the shape and check point (CP) for the temperature analysis

2.3 해석결과

Fig. 4, 5, 6에는 임시부착물과 모재부의 경계층으로부터 각각 1.5mm, 3.5mm 및 5.5mm 높이로 아크 지름 12mm를 고려하여 임시부착물을 절단한 경우 최대온도분포를 나타내었으며, Fig. 7, 8, 9에는 오스테나이트화 온도(약 900°C)까지 올라가는 영역, 즉, 고온의 아크 열로 인해 조직이 변화될 가능성이 높은 영역을 나타내었다. 먼저 경계층으로부터 1.5mm 높이로 절단한 경우에는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 경계층 아래에 위치한 모재부분까지 오스테나이트화 온도 이상으로 가열됨으로써 조직이 취약해질 가능성이 높아짐을 알 수 있으나, 경계층으로부터 3.5mm와 5.5mm 높이로 절단한 경우는 Fig. 8, 9와 같이 모재부가 오스테나이트화 온도 이상으로

로 가열되지 않기 때문에 고온의 아크 열에 의한 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

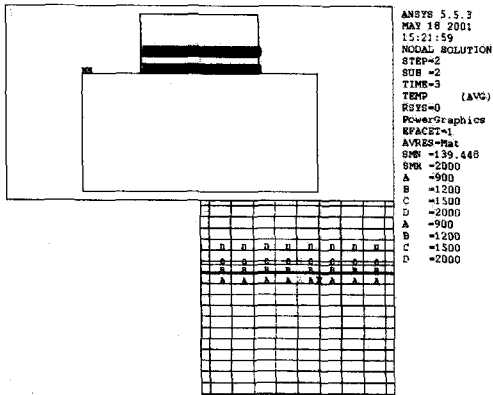


Fig. 4 Maximum temperature distribution for 1.5mm gouging height

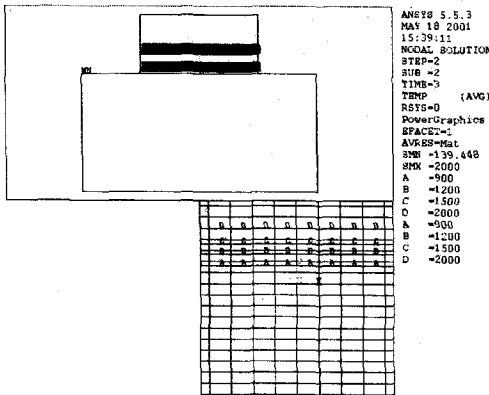


Fig. 5 Maximum temperature distribution for 3.5mm gouging height

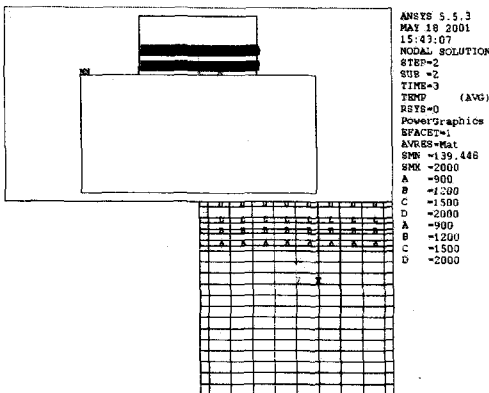


Fig. 6 Maximum temperature distribution for 5.5mm gouging height

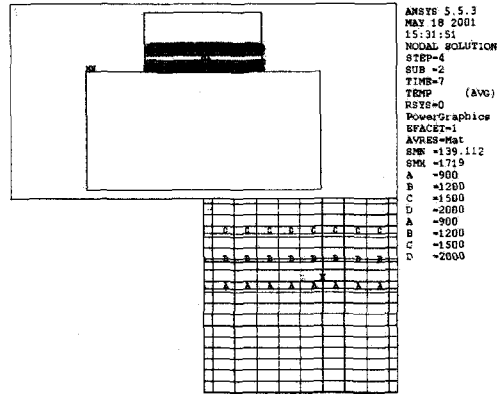


Fig. 7 Maximum austenitizing temperature distribution for 1.5mm gouging height

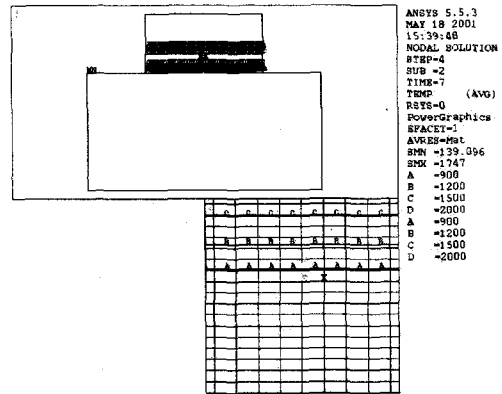


Fig. 8 Maximum austenitizing temperature distribution for 3.5mm gouging height

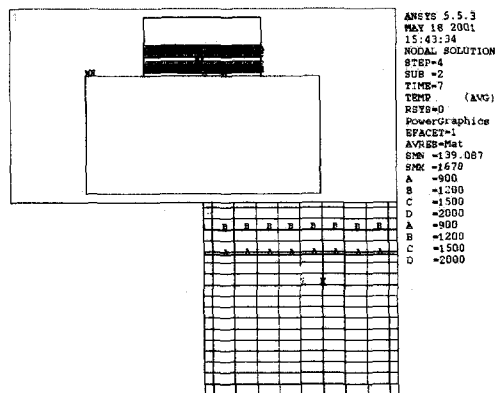


Fig. 9 Maximum austenitizing temperature distribution for 5.5mm gouging height

한편 Fig. 10 에 각각의 가우징 높이에 대하여 모재부와 임시부착물의 경계층 내 “CP”점에서의 열이력을 나타내었다.

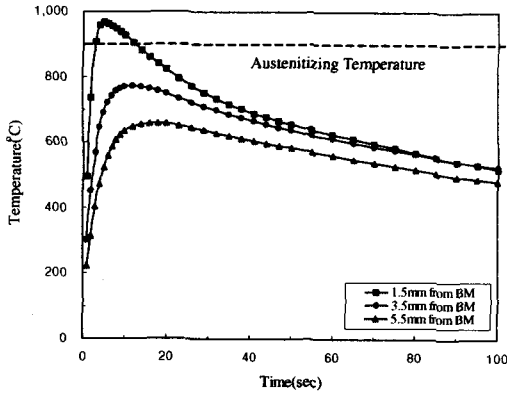


Fig. 10 Comparison of temperature profile at point "CP" in the interface for each cases

모재 표면에서 1.5mm 높이로 절단한 경우는 "CP"에서 약 960°C 까지 가열되는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 오스테나이트화 온도 이상으로 가열되어 모재의 조직이 변화되는 것을 의미하며, 3.5mm와 5.5mm 높이로 절단한 경우 "CP"점의 온도는 약 780°C와 660°C 까지 상승하지만, 모재 내의 조직변화는 발생하지 않는다. 이와 같이 오스테나이트화 온도 이상까지 가열되어 급냉되는 경우 모재부는 경하고 취약한 조직이 될 가능성이 크다.

3. 검증시험

3.1 재료 및 시편

시험에 사용된 모재는 ASME⁽⁴⁾ 등급의 SA508 Gr.3, Cl.1 저합금강이며, 임시부착물은 SA516 Gr.70 탄소강이다. 사용된 모재와 임시부착물은 시편 제조를 위한 용접 시 질량효과에 따른 냉각속도 차이를 최소화 하기 위하여 동일한 크기의 것을 사용하였으며, 다음의 Table 1에 소재의 크기와 화학성분을 나타내었다.

임시부착물과 모재에 대해 수동 피복 금속 아크용접을 실시하였으며, 적용 용가재는 직경 4mm의 수동 용접봉인 AWS E8016-G를 사용하였고, 모든 부위에서 용접조건의 변수에 따른 영향을 최소화 하기 위해 동일한 조건으로 1인의 용접사가 용접하여 시편을 제작하였다. 제작된 시편의 개략도를 Fig. 11에 나타냈다.

가우징 높이에 따른 모재의 손상정도를 조사하기 위하여 동일한 조건으로 용접되고, 140°C로 예열된 시편들을 임시부착물의 잉여높이가 1~2mm, 3~4mm 및 5~6mm가 되도록 각각 높이를 변화시켜 제거하였다. 상기 시험조건으로 제작된 시편들에 대해 모재의 표면과 그 높이가 동일하도록 표면을 사상한 후 자분탐상법(Magnetic Particle Test, MT)을 실시하여 결함의 유무 및 크기를 확인하였다.

Table 1. Chemical compositions and size of specimens

	SA508 Gr.3	SA516 Gr.70	Unit : mm
C	0.2	0.26	SA508 Gr.3 : '100x'410x'450
Mn	1.37	0.92	
P	0.008	0.027	
S	0.002	0.02	
Si	0.26	0.25	
Ni	0.91		SA516 Gr.70 : '50x'50x'100
Cr	0.2		
Mo	0.48		
Al	0.22		

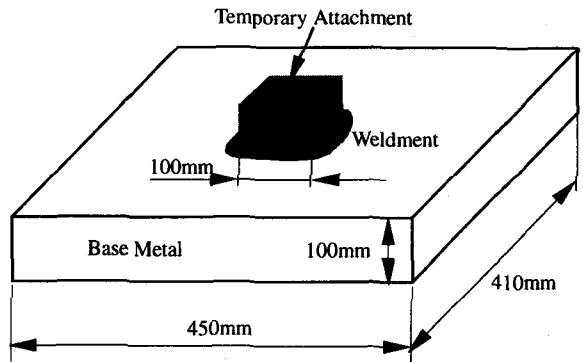


Fig. 11 Schematic drawing of specimen for gouging mock-up test.

3.2 시험결과

Table 2에는 임시부착물을 모재에 용접한 후 1차 자분탐상법에서 건전한 양상을 보였던 시편들을 후열처리하여 최종 가우징 높이에 따라 균열의 발생 유무를 조사한 결과를 나타내었다. 가우징 후 경계층으로부터 떨어진 최종 잉여부의 높이가 1~2mm인 시편 1은 고온의 가우징 열에 의해 급가열, 급냉각 됨에 따라 균열이 발생하였으며, 시편 1에 비해 상대적으로 높은 위치에서 가우징을 실시한 잉여부 높이 3~4mm인 시편 2와 5~6mm인 시편 3은 비교적 열영향이 작아 균열이 발생하지 않았다. 이러한 결과에 의해 가우징 높이, 즉, 최종 잉여부 높이의 차이가 단 몇 mm정도라 할지라도 이에 따른 열영향은 크게 증가함을 알 수 있으며, 따라서 가우징 후의 최종 잉여높이를 반드시 확보해야 함을 알 수 있었다. 한편 Fig. 12에는 균열이 발생된 시편 1의 결함위치 및 크기를 표시하고 있는데, 이들 균열들은 모두 용접부 안쪽 임시부착물이 직접 접촉되었던 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ)에 위치하고 있음을 알 수 있었다.

Table 2. Arc air gouging conditions and its results

Specimen No.	Preheat	Height after gouging	Crack by MT	Location of crack
1	140 °C	1~2mm	3 Points	Inner HAZ
2	140 °C	3~4mm	No	
3	140 °C	5~6mm	No	

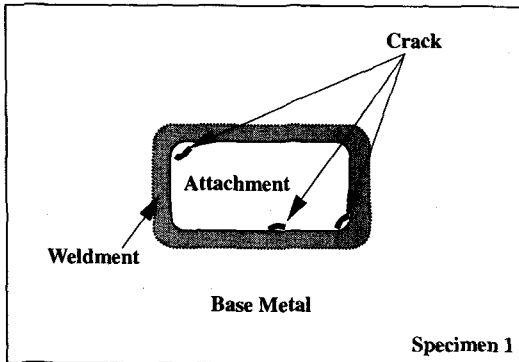


Fig. 12 Crack locations in the heat affected zone of the mock-up specimens

이상의 시험으로 용접이나 가우징 시 적절한 열이 필요하며, 가우징 시에는 최소 3~4mm 정도의 잉여부를 남기고, 사상을 실시해야 고온의 열에 의한 균열발생을 최소화할 수 있음을 알 수 있었다.

상기 가우징 절단공정에 의한 균열의 특징은 외부로부터 고온의 국부적인 열이 전달됨에 따라 모재가 급가열, 급냉각 됨으로써 용접부에 인접한 열영향부에서 균열이 발생되었으며, 조대한 경화조직 내에 수소확산이 일어난 것으로 판단되어진다.⁽⁴⁾

Fig. 13에서 알 수 있듯이 균열은 거의 용융경계부(Fusion Line) 부근의 열영향부 내 결정립 조대영역에서 발생되며, 결합의 양상은 결정립계를 따라 입계파괴(Inter Granular Cracking)가 일어난 것을 관찰할 수 있다. 그러나, 대부분은 입내파괴가 동시에 관찰되고, 결합 주변의 조직은 조대한 마르텐사이트(Martensite) 내지는 베이나이트(Bainite) 조직을 가지고 있으며, 이는 재료가 급가열, 급냉각 됨에 따라 열영향부의 결정립 조대영역에 높은 전위밀도의 경화조직이 구속응력으로 인해 균열을 가속시킨 것으로 판단된다.

Fig. 14에는 시편 1, 2 및 3에 대한 단면 경도분포를 나타낸 것이다. 시편 1의 경우는 모재(Hv 180)에 비해 1.5 배 이상의 높은 경도(Hv 282)분포를 보이고 있는 것을 관찰할 수 있으며, 이는 급냉각에 의한 경화로 균열발생에 더 취약해졌음을 알 수 있다.

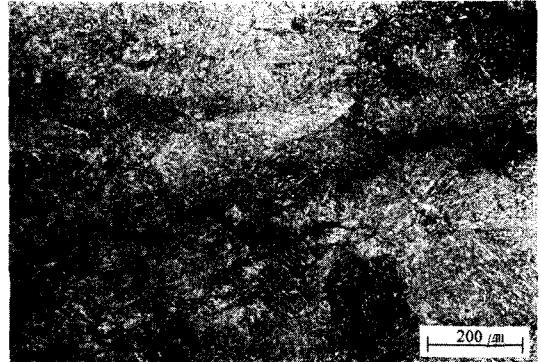


Fig. 13 Transverse section of crack after etching

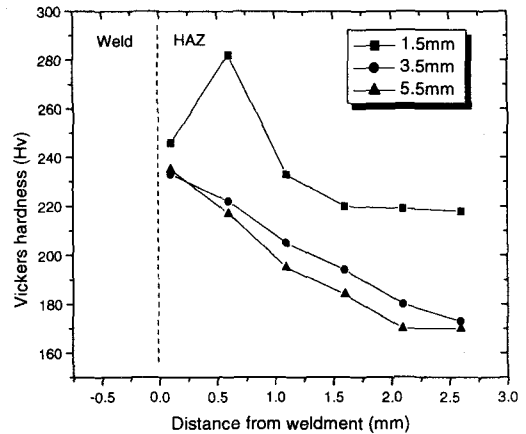


Fig. 14 Results of the micro hardness test near the fusion boundary

4. 고찰

임시부착물의 아크 에어 가우징 동안 모재에 미치는 가우징 높이의 영향을 조사함으로써 최적의 가우징 높이를 결정하기 위하여 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 사용한 수치해석과 Mock-up 용접부를 이용한 가우징 시험을 실시하였다. 두 경우 모두 유사한 결과를 보였으며, 최소 3~4mm 이상의 잉여높이를 확보하여야만 모재부에 열영향을 주지 않고, 균열의 발생위험도 최소화시킬 수 있음을 알 수 있었다.

또한 Mock-up 시편에서 발생된 결합은 열영향부의 조대 결정립 구역에서 높은 경도를 가지고 있고, 주로 루트(Root)부의 최대응력집중 부위에서 발생되었다는 점과 입계 및 입내파괴 양상을 주로 보이고 있는 점에서 용접부로부터의 수소확산, 구속응력 및 경화조직 등이 복합적으로 작용하여 균열을 발생시킨 것으로 판단되며, 가우징 높이가 낮을수록 입열량의 증대와 함께 균열발생의 가능성이 더

속 높게 나타났다. 특히 고압의 압력용기와 같이 두께가 두꺼운 경우 급냉 조직인 마르텐사이트 또는 베이나이트 조직에서는 소량의 수소로도 지체균열을 유발시키는데, 이는 빠른 냉각속도로 인해 용착금속으로부터 방출된 수소의 상당량이 열영향부에 집적되기 때문이다. 저탄소강에 비해 중, 고탄소강에서 균열 발생율이 높기 때문에 저수소계의 용접재료를 사용하거나, 적절한 예열 및 후열조건을 준수하여 수소확산에 의한 결함발생을 최소화할 필요가 있다. 예열은 용접부의 냉각속도가 늦어짐에 따라 경화조직의 발생 가능성이 작아지며, 또한 일정온도 이상으로 가열됨에 따라 확산성 수소의 이동에 의한 용접부 표면으로부터의 방출효과를 얻을 수 있다. 그리고, 응고와 냉각 후에 행하는 후열처리(PWHT)는 확산성 수소의 방출에 거의 효과가 없지만, 용접 종료 직후에 연속적으로 행해지는 후열은 수소의 방출에 많은 도움을 줄 수 있다.⁽⁵⁾

- and experiment”, PVP, Vol. 347, pp. 115~123
 (5) A. Dhooge, et al., 1978, “A review of work related to reheat cracking in nuclear reactor pressure vessel steels”, Int. J. Pres. Vessel. & Piping (6)

5. 결론

아크 에어 가우징의 높이가 모재에 미치는 열영향을 조사하기 위하여 수치해석과 검증시험을 수행하였으며, 이를 통해 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 임시부착물에 대한 가우징 절단높이가 낮을 경우는 모재의 표면이 오스테나이트화 온도 이상으로 가열되는 것을 알 수 있었다.
- (2) 수치해석을 통해 아크 에어 가우징 시 절단높이를 3.5mm 이상 확보한 경우는 모재 표면이 열영향을 받지 않음을 알 수 있었으며, Mock-up 시험으로부터 3~4mm 이상의 가우징 높이에서는 균열이 발생되지 않음을 확인하였다.
- (3) 아크 에어 가우징 시 모재의 열영향부 내 조대 결정립에서 발생하는 균열에 기여한 인자로는 용접부의 확산성 수소량, 구속응력 및 경화조직 등이 있음을 알 수 있었다.
- (4) 아크 에어 가우징을 이용한 임시부착물의 절단 공정 시 모재에 미치는 열영향을 최소화 하고, 결함의 발생을 억제하기 위해서는 예열, 후열 그리고, 적절한 가우징 높이 등의 작업기준을 반드시 준수해야 한다.

참고문헌

- (1) “Welding and brazing qualifications”, 1999, ASME Boiler & pressure vessel code, Section IX, ASME
- (2) “Theory Manual”, 1997, ANSYS, Ver. 5.6, SASI
- (3) “Properties”, 1999, Section II, Part D, ASME
- (4) C.S.Seok, 1997, “Investigation of welding residual stress of high tensile steel by finite element method