

## 원자력발전소용 316 스테인리스강 배관의 부식특성에 미치는 유도가열벤딩공정의 영향

신민철<sup>1,3</sup> · 김영식<sup>1,\*</sup> · 김경수<sup>2</sup> · 장현영<sup>2</sup> · 박흥배<sup>2</sup> · 성기호<sup>3</sup>

<sup>1</sup>경북 안동시 경동로 1375, 안동대학교 신소재공학부 청정에너지소재기술연구센터

<sup>2</sup>경기도 성남시 분당구 구미로 8, 한국전력기술주식회사

<sup>3</sup>부산광역시 강서구 송정동 1587-4, 성일SIM(주)

(2014년 3월 29일 접수, 2014년 6월 20일 수정, 2014년 6월 23일 채택)

## Effect of Induction Heat Bending Process on the Corrosion Properties of 316 Stainless Steel Pipes for Nuclear Power Plant

Mincheol Shin<sup>1</sup>, Young Sik Kim<sup>1,\*</sup>, Kyungsu Kim<sup>2</sup>, Hyunyoung Chang<sup>2</sup>, Heungbae Park<sup>2</sup>, and Giho Sung<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Materials Research Center for Clean and Energy Technology, School of Materials Science and Engineering Materials, Andong National University, 1375 Gyeongdongro, Andong, Gyeongbuk, 760-749, Korea

<sup>2</sup>KEPCO E&C, M-Tower bld. 8 Gumi-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 463-870, Korea

<sup>3</sup>Sungil SIM Co. Ltd, 1587-4, Songjeong-dong, Gangseo-gu, Busan, Korea

(Received May 29, 2014; Revised June 20, 2014; Accepted June 23, 2014)

Recently, the application of bending products has been increased since the industries such as automobile, aerospace, ships, and plants greatly need the usage of pipes. For facility fabrication, bending process is one of key technologies for pipings. Induction heat bending process is composed of bending deformation by repeated local heat and cooling. Because of local heating and compressive strain, detrimental phases may be precipitated and microstructural change can be induced. This work focused on the effect of induction heat bending process on the properties of ASME SA312 TP316 stainless steel. Evaluation was done on the base metal and the bended areas before and after heat treatment. Microstructure analysis, intergranular corrosion test including Huey test, double loop electrochemical reactivation test, oxalic acid etch test, and anodic polarization test were performed. On the base of microstructural analysis, grain boundaries in bended extrados area were zagged by bending process, but there were no precipitates in grain and grain boundary and the intergranular corrosion rate was similar to that of base metal. However, pitting potentials of bended area were lower than that of the base metal and zagged boundaries was one of the pitting initiation sites. By re-annealing treatment, grain boundary was recovered and pitting potential was similar to that of the base metal.

**Keywords :** corrosion, 316 stainless steel, induction heat bending, nuclear power plant

### 1. 서 론

최근 발전소, 자동차, 항공기, 선박, 플랜트 및 건설 산업의 급격한 발전에 따라 배관의 수요가 급격하게 증대되고 있다. 또한 이에 요구되는 배관 제품은 냉매, 윤활유, 연료의 공급장치 그리고 전기전자 장치의 배선 보호장치 등에 널리 사용되고 있다.<sup>1)~3)</sup>

배관 제품은 전통적으로 엘보 등 피팅류를 이용하여 구성해 왔다. 엘보 등 피팅류 사용량이 증가할수록 용접부의 개수가 증가하게 된다. 용접공법은 수초 정도의 짧은 시간에 재료의 국부적 용융과 응고를 수반하는 야금학적 접합방법이기 때문에 성공적인 용접부를 얻기 위해서는 재료의 야금학적 지식이 전체가 되어야하며 동시에 용접 설계, 용접부의 검사 등의 광범위한 지식이 필요하다. 따라서 품질 검사가 곤란하며 열에 의해 조직이나 함유량에 변화가 생기기므로 변형, 파괴의 원인이 된다. 또한 용접사의 기술에 의해 이음

\* Corresponding author: yikim@anu.ac.kr

**Table 1. Chemical composition of ASME SA312 TP316 stainless steel (wt%)**

UNS No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Fe	Remarks
S31600	0.02	1.27	0.012	0.001	0.33	16.1	11.1	2.05	bal.	austenitic

**Table 2. Identification symbols for test areas of ASME SA312 TP316 stainless steel bended pipe**

Areas	Transition (start)	Bend	Bend	Transition (End)	Remarks
Intrados	I1	I2	I3	I4	▶ B(Base metal)
Extrados	E1	E2	E3	E4	
Crown Up	CU1	CU2	CU3	CU4	
Crown Down	CD1	CD2	CD3	CD4	

부의 강도가 좌우되며 저온취성파괴의 가능성, 유해광선 폭발의 위험성 등이 따른다.

원자력발전소 등의 산업설비에서 배관 구조의 티(Tee)나 엘보(Elbow) 같은 연결부에서의 용접부를 감소시키기 위하여 도입되는 굽힘 작업은 신뢰성 향상과 비용절감 때문에 필요성이 더 커지고 있다. 특히 플랜트, 발전소, 조선 및 중장비 분야에서는 배관 내를 이동하는 유체의 온도와 압력이 매우 높으므로 유동 시 발생하는 열적 팽창 및 충격을 완화시킬 목적으로 배관 벤딩 제품의 사용이 지속적으로 증가하고 있다.

용접을 이용한 배관 작업의 경우에는 용접부의 결합발생 가능성이 높고 많은 작업공수에 의해 생산성 저하 및 단가 상승을 초래하는 단점이 있다. 특히 원자력발전소에서 용접부 물량이 과다하게 증가하게 되면 그에 따른 가동 중 검사(In-Service Inspection : ISI) 비용이 증가하게 되며 현재까지도 용접부의 신뢰성, 건전성 등의 확보를 위한 많은 노력들이 수행되고 있다.

용접부의 신뢰성을 향상시키기 위한 노력과 동시에 용접부의 개수를 줄이기 위한 새로운 공정의 도입이 시도되었다. 대표적인 공정이 벤딩배관의 도입이다. 벤딩배관이란 직관으로 제작된 재료를 이용하여 저온 또는 고온 등의 환경에서 곡관형태로 가공하여 배관계통을 제작하는 방법이다. 전통적으로 벤딩 공법은 공정온도 특성에 따라 열간벤딩 및 냉간벤딩으로 구분된다. 북미 배관제작자협회 표준 PFI ES-24에서는 벤딩 공법을 열간벤딩(① 로 벤딩 ② 증분 벤딩 ③ 유도가열 벤딩)과 냉간벤딩(① 회전인발 벤딩 ② 램 벤딩 ③ 롤 벤딩)으로 분류하여 제시하였다.<sup>4)</sup>

일반적으로 전통적인 배관 벤딩 기법을 적용할 경우, 벤딩 곡률반경을 감소시킴에 따라 배관 외호부의 두께가 지나치게 감소하여 벤딩배관의 제작이 제한적이다. 반면, 유도 가열 벤딩 방법은 벤딩 과정에서 굽힘 변형 발생부위에 대하

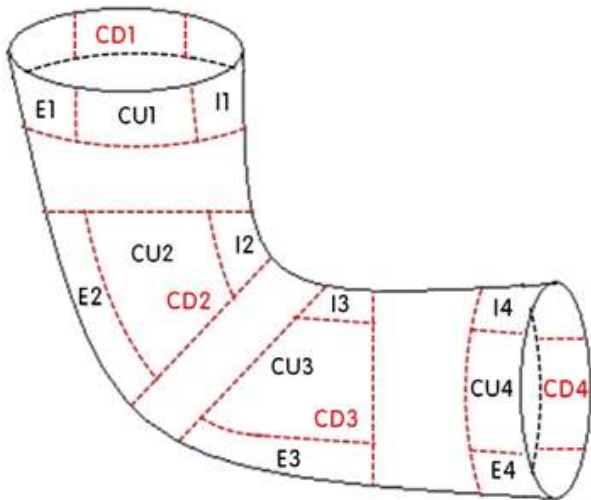
여 평균적인 압축응력을 인가할 수 있으며 이는 전통적인 타 벤딩 기법에서는 용이하지 않은 유도가열 벤딩배관이 가질 수 있는 큰 장점이다. 평균적인 압축응력 인가는 일반적으로 벤딩배관에서 나타나는 벤딩 외호부 두께감소를 최소화시킬 수 있으며 유도가열 벤딩 장비를 이용하여 공정전체가 자동 제어되는 일관된 품질의 벤딩배관을 생산할 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>5),6)</sup>

스테인리스강의 유도가열 벤딩 시, 1,000~1,200℃ 범위에서 열역학적으로 안정하게 존재하는 상은 페라이트 또는 오스테나이트이다. 그런데 300~1,000℃ 범위에 속하게 되는 항온시효 또는 서냉 시에는 페라이트와 오스테나이트 중에서 불안정한 상들이 석출하게 된다. 이러한 2차 석출상들은 주로 페라이트/오스테나이트 또는 결정입계에서 생성되며, 스테인리스강의 기계적 성질(특히 인성과 연성) 및 부식저항성(특히 공식)을 저하시킴으로써, 합금의 사용 상한 온도를 250℃로 제한시키는 주요인이다. 또한 스테인리스강을 시효 열처리하면, 생성되는 석출상은 시그마, 카이, M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, 등이다. 이러한 석출상들은 매우 경하고 취약하며 인성과 연성을 저하시키며, 스테인리스강의 중요한 성질인 내식성을 크게 저하시킨다.<sup>7)-12)</sup>

본 연구에서는 고주파 유도 가열법을 이용한 열간 배관 벤딩 후 제조된 배관에 대하여 가열과 냉각, 소성변형을 거친 밴드 부위와 모재의 부식특성변화에 대해 평가하고 열화 원인에 대하여 분석하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

본 연구에서 사용한 실험 소재는 ASME 규격<sup>13)</sup>에 따라 제작된 SA312 TP316 재질의 원자력발전소용 배관(직경 323.85mm, 두께 33.325mm)이다. Table 1은 실험에 사용된 316 스테인리스강의 화학적 성분이며, 항복강도는



**Fig. 1.** Schematic diagram of ASME SA312 TP316 stainless steel bended pipe and identification symbols.

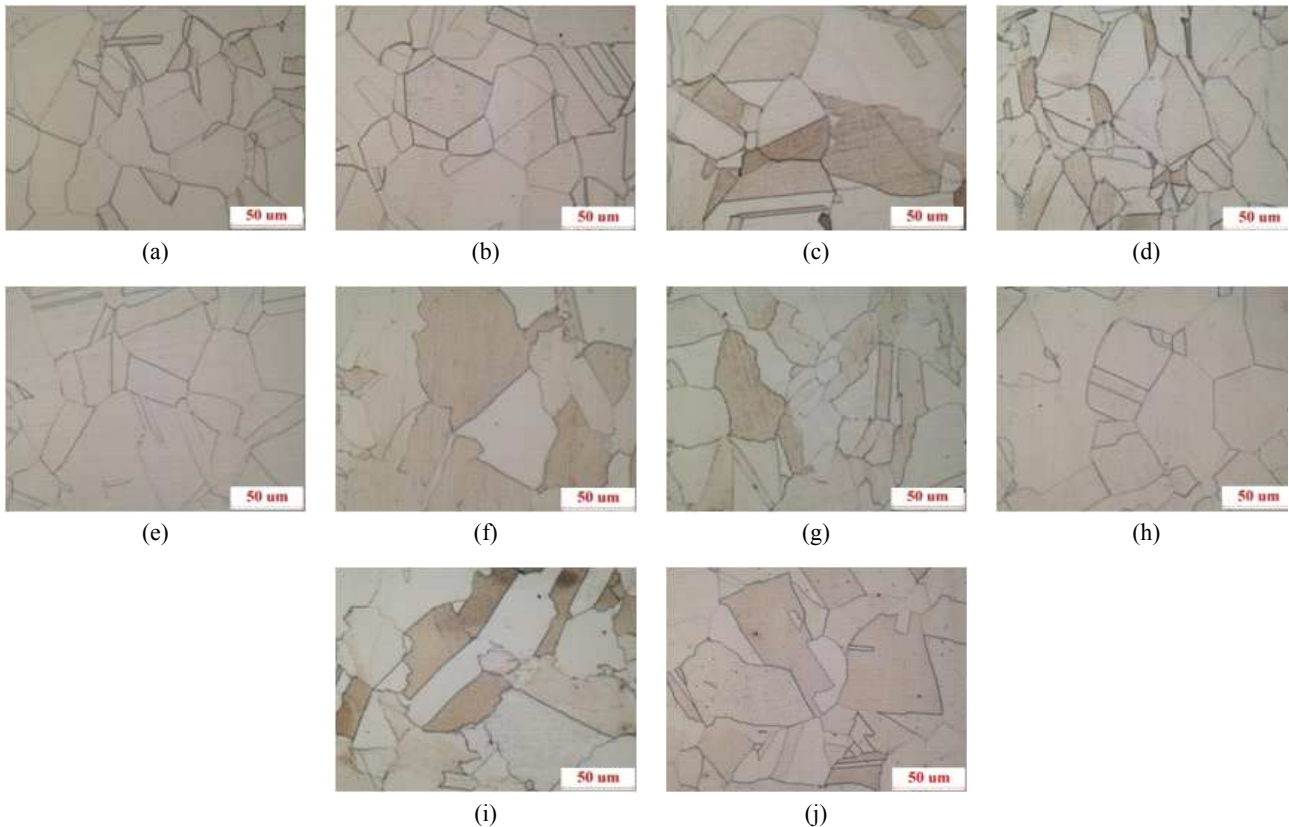
291 MPa, 인장강도는 575 MPa, 연신율은 62%를 보인 재료이다.

배관 벤딩에 사용된 기기는 고주파유도벤딩기(HFB-7)이며, 벤딩공정 시 내호부(Intrados), 외호부(Extrados),

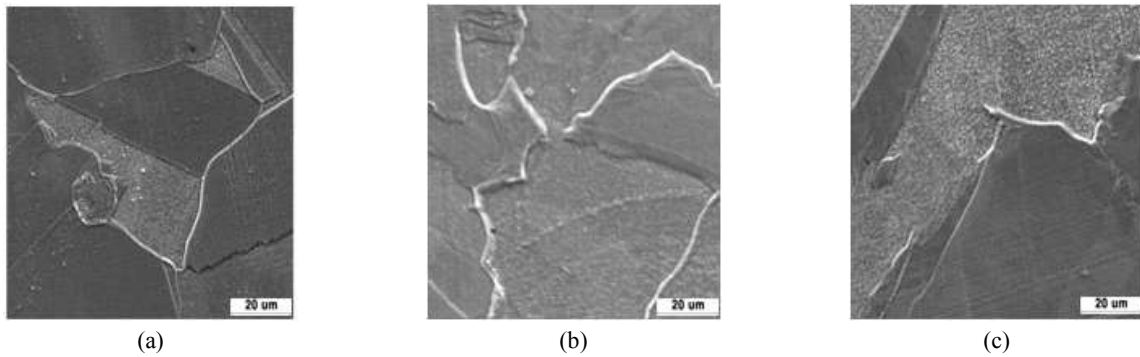
측면부(Crown) 3부위에 온도계를 장착하여 벤딩 시 각 부위의 실제 온도를 측정하였다. 각 부위별 최고 가열 온도는 측면부 1,040°C, 내호부 1,255°C, 외호부 1,320°C로 측정되었으며 벤딩 각도는 45°이었다. 벤딩 중에 heating coil에서 국부적으로 가열 후 내부 및 외부를 모두 수냉하였다. Fig. 1은 스테인리스강 벤딩배관의 절단 구역별 식별 기호를 보여주는 입체도이며 Table 2에 벤딩배관의 구역별 명칭 및 식별기호를 나타내었다.

미세조직을 관찰하기 위해서 모재와 벤딩 시편을 SiC 연마지를 사용하여 #2000번 까지 조연마를 한 뒤, 다이아몬드 페이스트(3 $\mu$ m, 1 $\mu$ m)를 이용하여 최종 연마하였다. 현미경 관찰을 위하여 Acetic Glyceregia(15ml HCL + 10ml HNO<sub>3</sub> + 10ml Acetic Acid + 2~3 Drops Glycerine) 용액으로 에칭한 후 광학현미경(ZEISS AXIOTECH 100HD)으로 미세조직을 관찰하였다. 주사전자현미경 및 EDS 분석용 시편은 광학현미경 시편과 동일하게 준비하였다. 분석에 이용된 주사전자현미경 및 EDS는 각각 TESCAN사 VEGA II LMU과 OXFORD사 ISIS-300이었다.

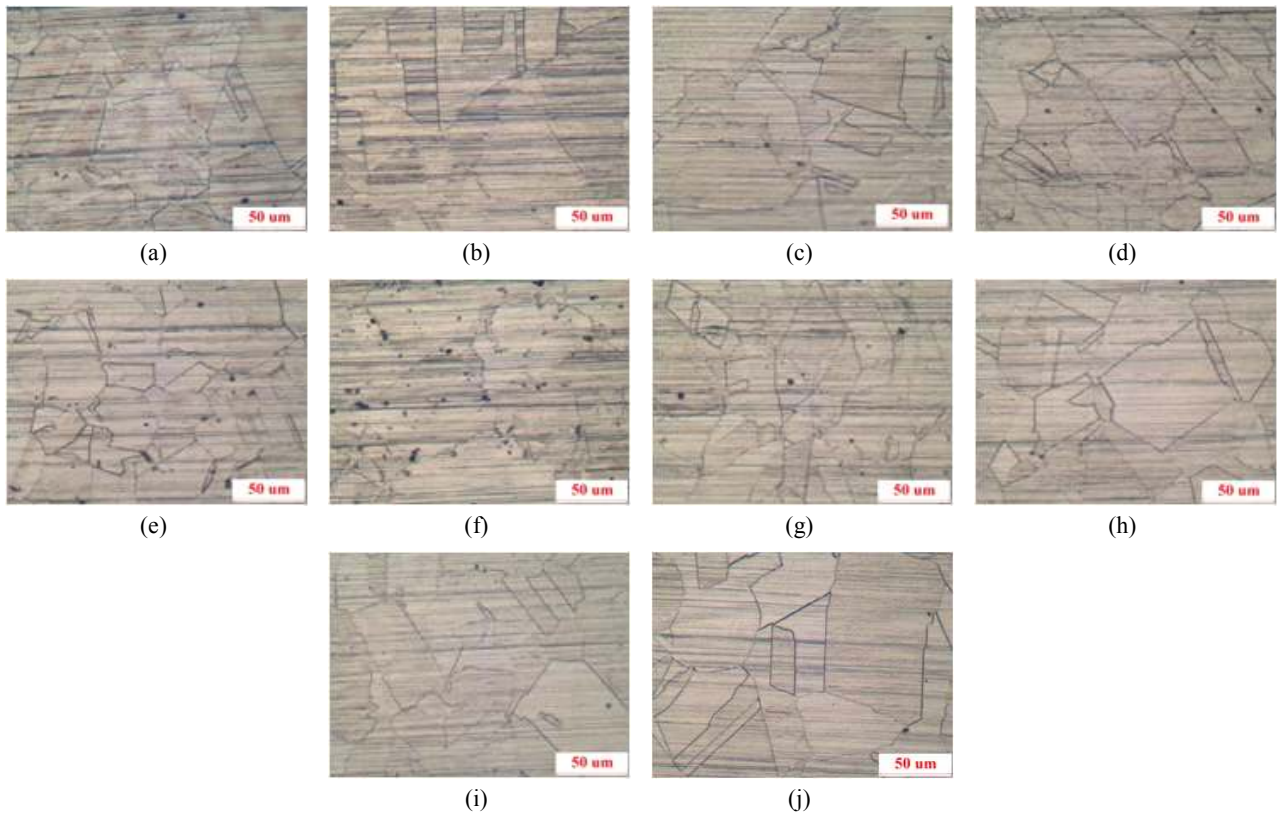
실험합금에 대한 예민화도 측정은 ASTM A 262 Practice A<sup>14</sup>, DL-EPR (Double-Loop Electropotentiokinetic



**Fig. 2.** Optical microstructures on base metal and bended areas of ASME SA312 TP316 stainless steel (Magnification : x200) ; (a) I1, (b) CU1, (c) E1, (d) I3, (e) CU3, (f) E3, (g) I4, (h) CU4, (i) E4, (j) Base metal.



**Fig. 3.** SEM images on extrados areas of bended pipe of ASME SA312 TP316 stainless steel (Magnification : x2000) ; (a) E1, (b) E3, (c) E4.



**Fig. 4.** Optical micrographs on the surface after ASTM A262 Practice A test of SA312 TP316 stainless steel (Magnification : x200) ; (a) I1, (b) CU1, (c) E1, (d) I3, (e) CU3, (f) E3, (g) I4, (h) CU4, (i) E4, (j) Base metal.

Reactivation)<sup>15)</sup>법 두 가지 방법으로 이루어졌다. 또한 입계부식특성을 분석하기 위해 ASTM A 262 Practice C(Huey test)<sup>14)</sup>에 의거하여 65% 비등 HNO<sub>3</sub> 연속 48시간 침지 시험을 5회 행하여 평균 입계부식속도를 구하였다. 또한 포텐시오스타트(Gamry DC 105)를 이용하여 분극특성을 평가하였는데, 기준전극으로는 포화감홍전극(SCE)을, 상대전극으로는 고밀도 흑연봉을 이용하였다. 실험용액은 30℃, 3.5% NaCl 용액을 사용하였고 시험 전 용액은

N<sub>2</sub> gas를 이용하여 200ml/min로 30분 동안 탈기 하였으며 0.33mV/sec의 속도로 주사하면서 실험을 행하였다.

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1 유도가열 벤딩에 따른 미세조직 및 부식특성의 변화

유도가열 벤딩공정을 중심으로 316 스테인리스강의 벤딩공정 시 열에 의한 영향을 받아 미세조직의 변화에 의한

재료 물성의 저하가 올 수 있으므로 벤딩 전 후 미세조직에 대해 분석하였다. Fig. 2는 316 스테인리스강의 모재와 유도가열 벤딩 후 각 부위별 미세조직을 관찰한 사진이다. 모재와 벤드 부위 모두 쌍정이 많이 관찰되며 결정립의 모양이 다소 불균일하고 크기가 많은 편차를 보이고 있다. 특이한 사항은 외호부에서 입계가 일그러진 모습으로 변형된 것이 관찰되었다. 이는 높은 온도에서 많은 압축에너지와 인장장력이 복합적으로 가해지는 벤딩공정이 이루어지므로 결정립계가 변형된 것으로 판단된다. 이러한 외호부 입계 변형 부위에 대하여 주사전자현미경을 통하여 부위별 관찰을 하였으나 외호부 모든 부위에서 석출물은 발견되지 않았으며 Fig. 3에 그 결과를 나타내었다.

미세조직 변화 관찰 결과, 외호부에서 입계의 변형 부위가 발견되었고 그로 인하여 향후 부식의 개시처가 될 위험성 때문에 예민화도(Oxalic acid test, Double loop EPR test) 측정, 입계부식시험 및 양극분극시험을 행하였다. Fig. 4는 ASTM A 262 Practice A<sup>14)</sup>에 의거하여, 모재와 벤드 부위의 정성적인 예민화도를 측정하는 것이다. 시험 후 표면을 관찰 한 결과, 결정립이 에칭되는 정도로서 예민화 상태를 ASTM의 기준<sup>14)</sup>과 비교하여 보면 step structure 정도로 보이는 수준으로 평가되었다. Fig. 5는 ASTM G 108<sup>15)</sup>에 의거하여 모재와 벤드 부위의 정량적인 예민화도를 측정하는 DL-EPR 시험 결과이다. 시험 결과, active scan에서는 전류 피크가 관찰이 되나 reverse scan에서는 재활성화 전류 피크가 보이지 않고 있다. 예민화도(DOS, Degree of sensitization)를 구하면 0% 이다. 따라서 정성적인 예민화도와 정량적인 예민화도를 모두 측정해보았으나 예민화 현상이 나타나지 않은 것으로 판단된다. 또한, 입계부식 속도를 측정하기 위하여 ASTM A 262 Practice C(Huey test)<sup>14)</sup>에 의거하여 비등 질산 침지시험을 행하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 시험 주기별 부식속도가 비교적 일정한 값을 유지하고 있으며 최종 시험 후 모재의 평균 입계부식속도는 0.159mm/yr, I1은 0.161mm/yr, CU1은 0.168mm/yr, E1은 0.175mm/yr, I3은 0.167mm/yr, CU3은 0.165mm/yr, E3은 0.165mm/yr, I4는 0.157mm/yr, CU4는 0.160mm/yr, E4는 0.170mm/yr의 낮은 입계부식 속도로 나타났다. 즉, 고주파유도벤딩에 따른 예민화도 측정과 입계부식 속도 측정 결과, 모재와 벤드 부위 모두 만족할만한 입계부식특성을 보였다.

한편 양극분극시험 결과, 입계부식시험과는 조금 다른 결과가 나타났다. 모재와 입계의 변형이 심한 외호부 부위에 대하여 30°C, N<sub>2</sub> gas를 이용하여 250ml/min의 속도로 탈기된 1% NaCl 용액 중에서 Scan rate 0.33 mV/s의 조건에서 양극분극시험을 하였다. Fig. 7은 모재와 외호부 부위의 양극분극 거동 결과로서 모재의 경우 +430mV(SCE)로 공식전위가 가장 높게 측정되었고 E1(extrados start 부위)의 공식

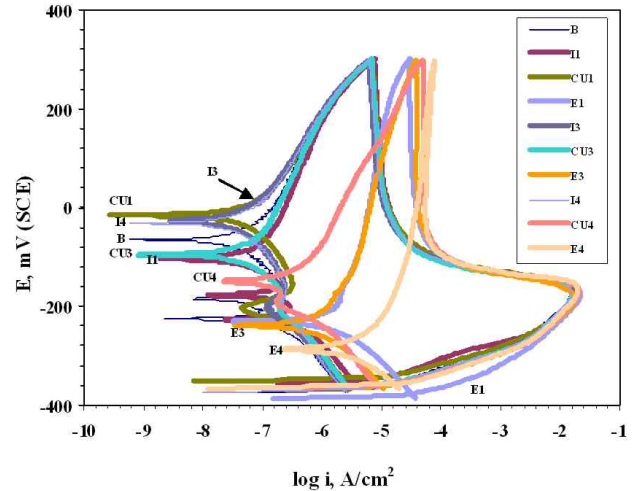


Fig. 5. Double loop EPR test result on base metal and bended areas of SA312 TP316 stainless steel(30°C, 0.5M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0.01M KSCN).

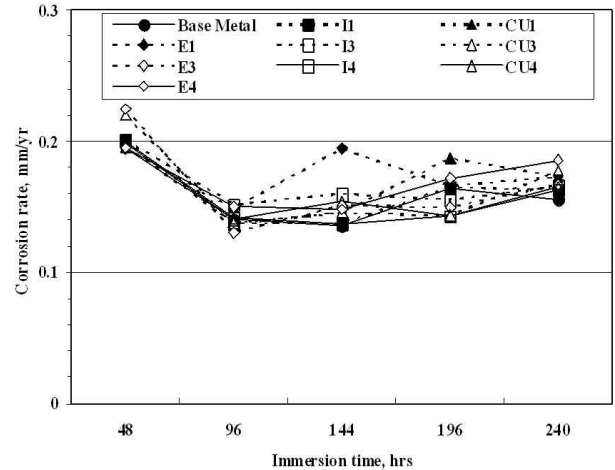


Fig. 6. Intergranular corrosion rates with each test periods by ASTM A262 Practice C test of SA312 TP316 stainless steel.

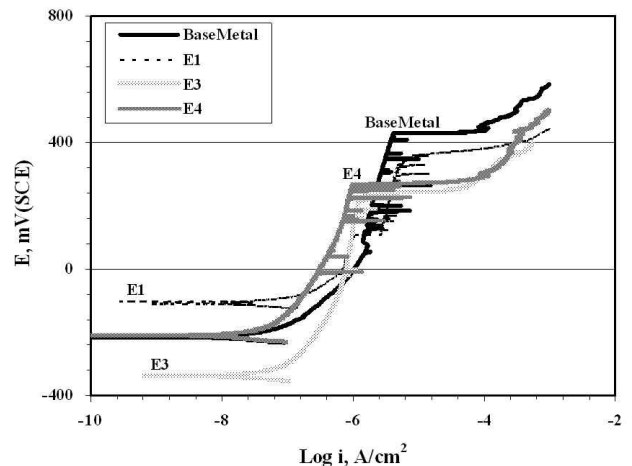
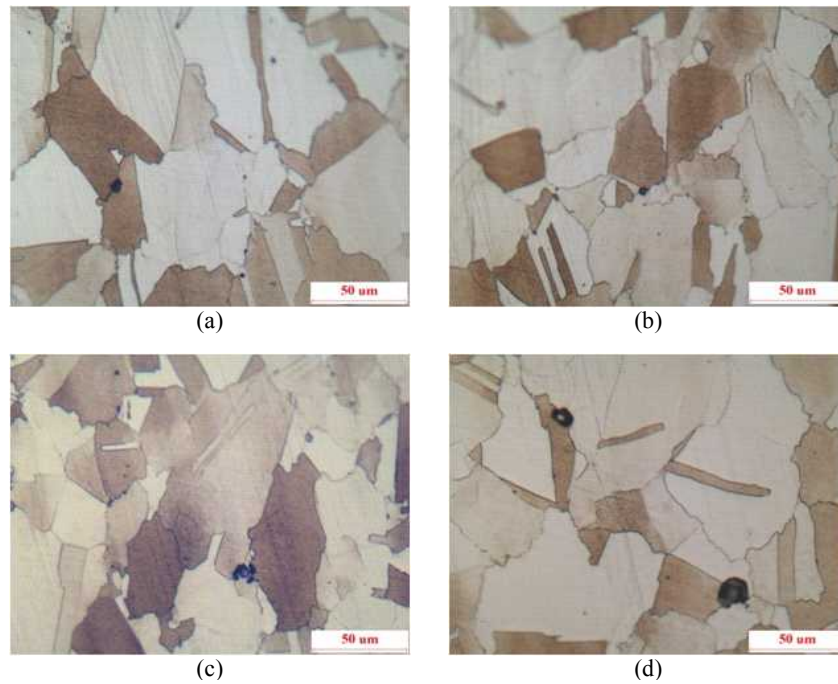
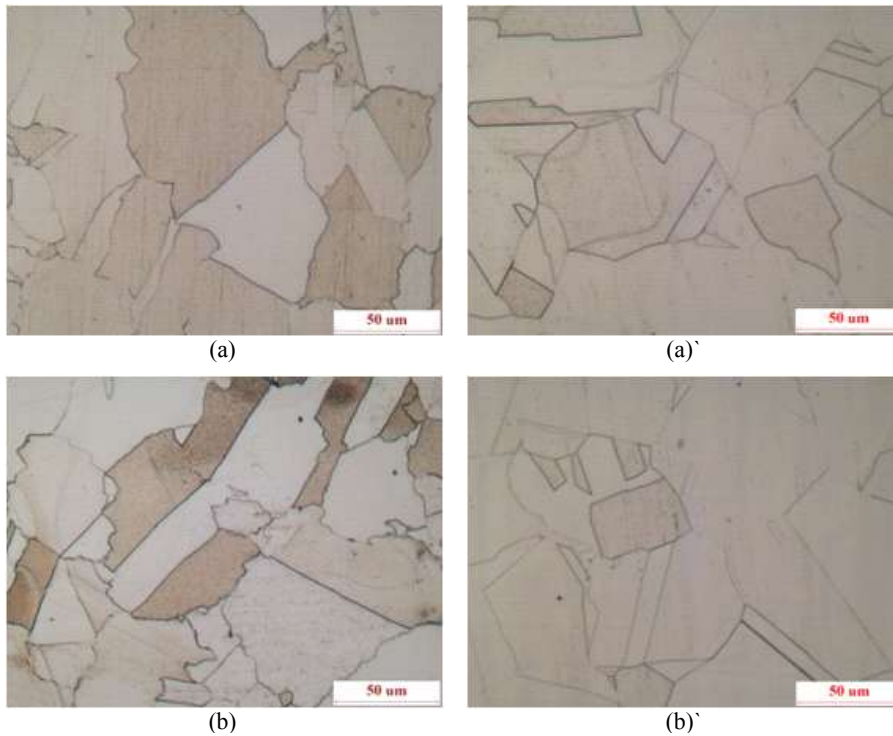


Fig. 7. Anodic polarization curves of base metal and extrados areas of SA312 TP316 stainless steel in deaerated 30°C 1% NaCl solution (scan rate : 0.33 mV/s).



**Fig. 8.** Optical micrographs on the surface after potentiostatic test ( $E_{app} = +250\text{mV(SCE)}$ ) of SA312 TP316 stainless steel in deaerated  $30^{\circ}\text{C}$  1% NaCl solution (Magnification : x200) ; (a) E3 Area1, (b) E3 Area2, (c) E4 Area1, (d) E4 Area2.



**Fig. 9.** Optical microstructures on extrados areas of ASME SA312 TP316 stainless steel (Magnification : x200) ; (a) before annealing - E3, (a') after annealing - E3, (b) before annealing - E4, (b') after annealing - E4.

전위는  $+380\text{mV(SCE)}$ 로 다소 낮게 나타났다. 그러나 입계의 변형이 심한 E3(extrados bend 부위)와 E4(extrados

end 부위)의 공식전위가 각각  $+250\text{mV(SCE)}$  및  $+260\text{mV(SCE)}$ 로 모재보다 크게 낮게 측정되었다.

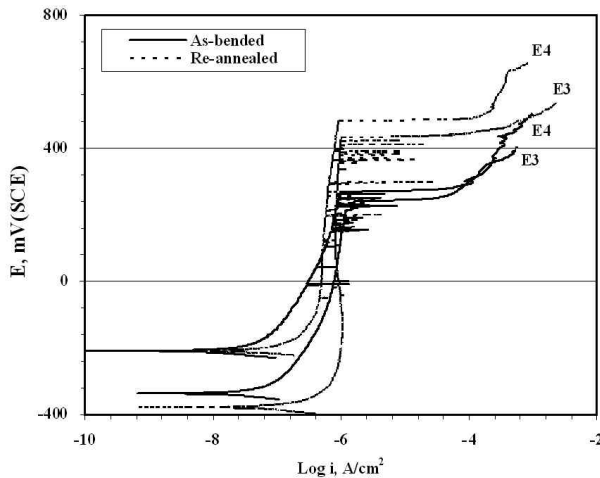


Fig. 10. Effect of re-annealing on the anodic polarization curves of E3 and E4 areas of SA312 TP316 stainless steel in deaerated 30°C 1% NaCl solution (scan rate : 0.33 mV/s).

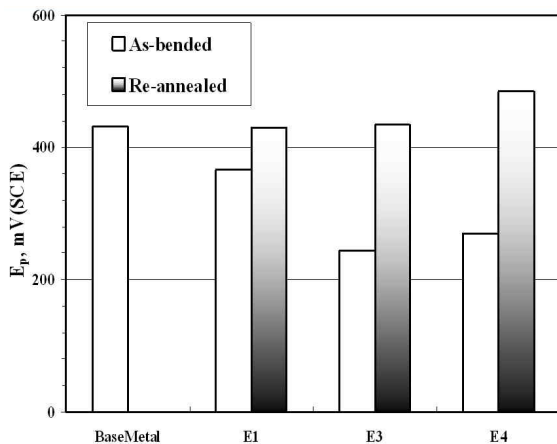


Fig. 11. Effect of re-annealing on the pitting potential of base metal and extrados areas of SA312 TP316 stainless steel in deaerated 30°C 1% NaCl solution (scan rate : 0.33 mV/s).

### 3.2 벤딩 스테인리스강관의 공식저항성 저하 원인 분석

예민화도(Oxalic acid test, Double loop EPR test) 측정과 입계부식특성 분석은 벤딩부위나 모재나 유사하게 평가되었으나, 양극분극시험에서는 입계의 변형이 심한 외호부 부위에서 공식전위가 모재에 비하여 많이 저하되는 현상이 나타났다. 앞에서 서술한 바와 같이, 외호부 미세조직 관찰 결과, 높은 온도에서 많은 압축에너지와 인장과정이 복합적으로 가해지는 벤딩공정이 이루어지므로 일부에서 입계가 일그러지는 현상이 관찰되었다. 이러한 불규칙한 모양의 입계는 향후 부식의 개시처가 될 위험성이 있다.

입계가 심하게 변형된 시편에서 분극특성이 저하되는 원인 분석을 위하여 변형이 심한 E3와 E4에 대하여 일정 전위를 가하여 전류의 변화를 관찰하는 정전위 시험을 하였다. 30°C, 1% NaCl 용액을 사용하여 공식전위 수준의 +250 mV(SCE)의 전위를 가하였으며 양극분극시험과 같은 조건

으로 행하였다. E3와 E4에 대한 정전위 시험 후 표면을 관찰한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 정전위 시험 결과, 입계가 많이 일그러진 변형 부위에서 먼저 공식이 개시되는 것을 확인할 수 있다.

따라서 이와 같이 변형된 입계를 보이는 벤딩부위 시편에 대하여 소둔열처리(1,050°C 30분 소둔 후 수냉)를 다시 행하여 미세조직을 관찰한 결과, Fig. 9와 같이 변형된 입계가 재결정에 의하여 벤딩되지 않은 모재의 미세조직과 동일하게 나타났다. 이는 소둔열처리에 의한 회복과 재결정 과정에 의해서 일그러진 부위가 소멸된 것으로 판단된다. 한편 입계 변형이 심했던 E3와 E4를 1,050°C에서 30분간 소둔한 뒤 소입하는 조건으로 재-소둔열처리를 행한 후 양극분극시험을 하였다. Fig. 10은 재열처리 전후 E3와 E4의 양극분극 거동을 나타내었다. E3와 E4 모두 재열처리 전(As-bended)의 분극거동보다 재열처리 후(Re-annealed)의 공식전위가 더 높게 평가된 것을 알 수 있다. Fig. 11은 재열처리 전후 외호부 부위의 공식전위 값을 비교한 그래프로 모재의 경우 +430mV(SCE)로 공식전위가 높으며 E1의 경우 열처리 전(As-bended) 공식전위가 +380mV(SCE)이었으나 재열처리 후 +430mV(SCE)으로 모재수준으로 증가하였다. 한편 입계의 변형이 심한 E3와 E4의 공식전위는 재열처리 전(As-bended) +250mV(SCE) 및 +260mV(SCE)로 모재보다 크게 낮았으나 재열처리 후 +430mV(SCE) 및 +480mV(SCE)로 공식전위가 크게 증가하였다.

즉, 고주파유도벤딩에 의해서 외호부 부위의 결정립이 심하게 변형되었으며, 변형된 입계가 공식개시처로 작용함으로써 공식저항성이 감소하였다. 이러한 특성을 보인 벤딩부에 대하여 재열처리를 행한 결과, 결정립계의 형상이 모재와 동일하게 회복되었으며 공식저항성도 증가함을 확인하였다.

한편 배관의 벤딩공정에 의해서 미세조직의 변화 외에도 잔류응력의 변화가 발생할 수 있다. 본 연구진의 관련연구에 따르면[16], ABAQUS 및 JMAG 등의 상업용 유한요소 프로그램을 이용하여 유도가열벤딩에 따른 잔류응력변화를 평가한 결과, 벤딩이 종료되는 부위 근처에서 잔류응력이 가장 높게 나타났으나, 내호부가 외호부, 측면부보다 잔류응력이 더 높게 나타났다. 따라서 앞에서 기술한 공식저항성이 벤딩에 의해서 저하된 원인이 잔류응력의 변화 현상과는 밀접한 관련이 크지 않은 것으로 판단된다.

## 4. 결론

- 1) 유도가열 벤딩 된 ASME SA312 TP316 배관의 경우, 유도가열 벤딩 시 소성변형으로 인하여 외호부 부위에서 입계가 심하게 변형되었으나, 변형부위에서 특별한 석

출물도 검출되지 않았으며, 예민화도 측정 및 입계부식 속도 측정결과 모재와 유사하게 평가되었다. 그러나 분극시험 결과, 입계가 심하게 변형된 부위의 공식전위가 낮게 평가되었으며, 변형된 입계가 공식개시처로 작용하였다.

- 2) 입계가 심하게 변형된 부위에 대하여 재-소둔열처리를 행한 결과, 결정립계가 변형이 없는 상태로 회복되었으며, 양극분극시험 결과, 소둔재의 공식전위로 향상되었다. 즉, 결정립의 형상 및 양극분극 특성의 회복은 재열처리에 의한 회복과 재결정 거동에 기인된 것으로 판단된다.

### 감사의 글

Research for this paper was supported by Sungil Co. Ltd. funded from the Korea Institute for the Advancement of Technology. Authors wish to thank both organizations.

### References

1. S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, *Metal forming and the finite element method*, Oxford University Press (1989).
2. F. W. Curtis, *High-frequency Induction Heating*, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York (1950).
3. P. G. Simpson, *Induction Heating Coil and System Design*, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York (1960).
4. PFI Standard ES-24, *Pipe Bending Methods, Tolerances, Process and Materials Requirements*, Pipe Fabrication Institute, September 2010.
5. T. Behne, A new bending technique for large diameter pipe, *International Association of Marine Investigators*, **1**, 34 (1983).
6. H. Blume, W. E. Speth, K. Bredenbruch, The production of pipe bends for power stations by the induction heating, *Energy Development Corporation*, **12**, 9 (1983).
7. J. O. Nilsson, *Mater. Sci. Tech.*, **8**, 685 (1992).
8. L. Karlsson, L. Ryen and S. Pak, *Precipitation of Intermetallic Phase in 22%Cr Duplex Stainless Weld Metals*, p.28, *Welding Journal, Research Supplement* (1995).
9. P. Marshall, *Austenitic Stainless Steel-Microstructure and Mechanical Properties*, p. 17, Elsevier Applied Science Publishers (1984).
10. J. O. Nilsson, and A. Wilson, *Mater. Sci. Tech.*, **9**, 545 (1993).
11. S. Atamert and J. E. King, *J. Mater. Sci. Letters*, **12**, 1144 (1993).
12. C. H. Shek, G. J. Shen, J. K. L. Lai and B. J. Duggan, *Mater. Sci. Tech.*, **10**, 306 (1994).
13. ASME, ASME Boiler & Pressure Vessel Section II-Part A, *Ferrous Materials Specifications(Beginning to SA- 450)* (2011).
14. ASTM A 262, *Standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels*, ASTM (2002).
15. ASTM G108, *Standard test method for electrochemical re-activation (EPR) for detecting sensitization of AISI type 30 and 304L stainless steels*, ASTM (1994).
16. Sung Il SIM Co. Ltd. *Development of Applicable Induction Heating Bend and Reliability Verification Technology for Safety Related Piping (Class 1, 2, 3)* (2013).