

# JCO 밴딩과 SA 용접으로 제조된 API-X70급 강관의 HIC/SSCC 저항성 평가

유 회 수<sup>\*,†</sup> · 김 희 진<sup>\*</sup> · 이 동 언<sup>\*\*</sup>

\*한국생산기술연구원 용접접합연구실용화그룹

\*\*세아제강 품질경영팀 소재개발파트

## Evaluation of HIC/SSCC Resistance for API-X70 Pipe Manufactured by JCO Bending Process and SA Welding

Hoi-Soo Ryoo<sup>\*,†</sup>, Hee Jin Kim<sup>\*</sup> and Dong-Eon Lee<sup>\*\*</sup>

\*Korea Institute of Industrial Technology, Advanced Welding & Joining R&D Group,  
Incheon 406-640, Korea

\*\*SeAH Steel Corp., Quality Management Team New Material Research Part, Pohang 790-240, Korea

†Corresponding author : hsrwoo@kitech.re.kr

(Received June 24, 2014 ; Revised August 19, 2014 ; Accepted August 29, 2014)

### Abstract

This study aims at manufacturing SA welded API-X70 line-pipe with sour gas resistance. A pipe was manufactured by JCO bending process and SA welding using the API-X70 plate guaranteed HIC resistance. SA welded pipe was expanded in order to reduce the residual stress. The evaluation of a pipe for resistance to HIC and SSCC were performed by the RS D 0004 and RS D 0005 standards. For verification that a pipe has acceptable resistance to HIC, fullscale test was carried out. Results showed no cracking for the HIC and SSCC.

Key Words : API-X70, JCO(J-ring, C-ring, O-ring) bending, SAW(submerged arc welding), HIC(hydrogen induced cracking), SSCC(sulfide stress corrosion cracking), Fullscale HIC test

### 1. 서 론

원유 매장량의 고갈로 유전 깊이가 점차 깊어지고, 원거리의 자원개발이 많아지고 있다. 따라서 운송 효율을 높이기 위하여 대구경 파이프와 고강도 파이프의 요구가 증가하고 있다. 또한 원유의 품질이 낮아짐에 따라 원유 및 천연가스 속에 불순물 함량 특히, 산성 유화수소(sour gas H<sub>2</sub>S)가 많이 함유되어 있어 이를 수송하는 라인 파이프는 수소유기균열(hydrogen induced cracking, HIC)의 발생 위험성이 높아지며, 이를 위해서 더 높은 기계적 특성과 더 높은 HIC 및 SSCC(sulfide stress corrosion cracking)의 저항성이 요구되고 있다<sup>1-3)</sup>.

라인 파이프에서 발생하는 HIC 균열기구는 이미 보고된 바와 같이 일정 농도이상의 황화수소(H<sub>2</sub>S)가스를 함유한 사우어가스(sour gas)가 수소이온(H<sup>+</sup>)을 발생시키고, 이러한 분위기에 강재가 노출되면 수소원자는 강재표면에 흡착되고, 흡착된 수소원자는 확산에 의하여 강재 내부로 유입된다. 강재내부로 확산된 수소원자는 계면 에너지가 높은 연신된 비금속개재물(주로 MnS) 표면에 집적되어 수소분자로 결합하여 계단식 균열균으로 발생한다<sup>3-4)</sup>. 특히 강재 중심부에 연신된 MnS 개재물이나 비구형 Al 산화물 개재물 등이 균열의 개시점으로 작용하며, 경한 조직을 따라 균열이 진전되어 직선형태로 나타낸다<sup>5)</sup>.

원유/천연가스 수송용 강관에서 HIC 및 SSCC가 발생하면 대형 사고를 유발할 수 있기 때문에 강관용 소

재 및 강관 용접부의 내수소유기균열의 신뢰성 확보는 라인 파이프용 용접강관 제조의 핵심 기술이다.

철강제조사들은 HIC와 SSCC의 저항성이 높고 기계적 특성이 우수한 라인 파이프용 강재를 개발하기 위하여 제강공정에서 불순물 감소, 개재물 및 편석 저감기술 그리고 가공열처리 기술이 개발되고 있다. 그 결과 항복강도 기준으로 년간 10ksi씩 고강도화 되고 있으며, 항복강도 120ksi급까지 개발되었다고 보고되고 있다<sup>6)</sup>.

강관용 소재 및 용접강관의 HIC 균열 저항성 보증은 NACE TM 0284 규격 시험으로 수행하여<sup>7)</sup> 강관용 원소재의 HIC 균열 저항성은 보증되었다고 하지만 용접강관으로 제조한 경우 용접부에서 HIC 균열이 발생하지 않고, 강관 원소재부에서 HIC 균열이 발생하는 경우가 있다. 이러한 원인은 강관을 강관으로 제조시 프레스 밴딩 또는 롤밴딩 등의 소성변형을 주는데, 이때 소성변형으로 인하여 원소재의 HIC 저항성이 저하된다고 보고한 바 있다<sup>8)</sup>.

그러나 미세조직이 우수한 경우 소성변형량이 증가하여도 HIC 저항성이 저하되지 않으며<sup>9)</sup>, 이를 소성변형에 따른 HIC 저항성 평가를 통하여 확인하였다<sup>10)</sup>. 그리고 중심편석이 있을 경우 소재상태에서는 HIC가 발생하지 않을 수 있으나 소성변형에 의하여 중심부에 균열이 발생할 수 있다고 하였다<sup>10)</sup>.

따라서 강관을 제조하기 전에 강관 소재의 중심편석 분석을 통하여 소재의 건전성 평가가 우선되어야 할 것이라 판단하여 소재의 중심편석을 분석하였다.

또한 HIC 시험은 총 9개의 시험편으로 실시하지만 채취 위치에 따라 균열이 다르게 발생한다. 심지어 바로 옆에서 채취한 시편에서도 균열 발생률이 다른 경우도 볼 수 있다<sup>10)</sup>.

따라서 본 연구에서는 원소재의 중심편석을 분석하고 HIC/SSCC 특성이 우수한 강관을 JCO 밴딩과 SA 용접을 통하여 제조하였으며, 시편 스케일의 HIC/SSCC 특성 및 풀 스케일의 HIC 저항성을 시험하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 강관제조

#### 2.1.1 강관 성형

소재상태에서 HIC 저항성이 보증되어 있는 25.4mm 두께의 API-X70 판재를 JCO(J-ring, C-ring, O-ring) 프레스 밴딩 장비(7,500톤)를 이용하여 지름이 762mm(30inch)인 파이프로 성형시켰다. JCO는 Fig. 1에 보인바와 같이 판재 양끝단 부분을 J자 모양으로 성형 후 다른 면을 C자 모양으로 성형하고, 최종 O자 모양

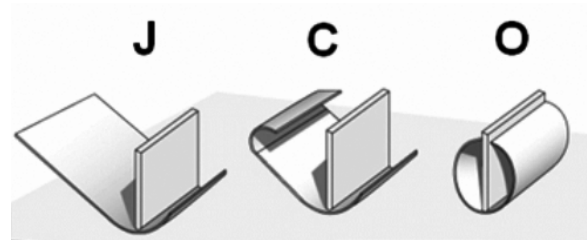


Fig. 1 JCO pipe forming process

이 되도록 성형하는 방법이다.

프레스 밴딩은 단순보 형태의 굽힘으로 판재를 성형하기 때문에 판재의 양끝단은 밴딩되지 않고 직선구간으로 남는 문제가 발생한다. 이로 인하여 다음 용접공정에 문제가 발생된다. 따라서 Fig. 2와 같이 양끝단 170mm 부분을 프리밴딩(pre-bending) 하였다.

JCO 프레스는 상부에 상부틀, 하부에 두 개의 다이(die)로 구성되어 있다. 판재 성형에서 다이 간격과 성형 깊이가 공정변수이며, 최적화된 공정 변수를 산출하기 위해서 Fig. 3과 같이 CAD를 이용하여 성형 모델링하였고, 상부틀의 곡률은 300mm, 다이 간격은 290mm, 성형 깊이는 -38mm로 선정하였다. 짧은 길이의 강관을 성형할 수 있는 JCO 시뮬레이터를 통해서 성형 변수들을 이용하여 강관을 제조하고, 이들 변수를 다시 최적화하여 생산에 반영하였다. 상부틀 R300을 사용하

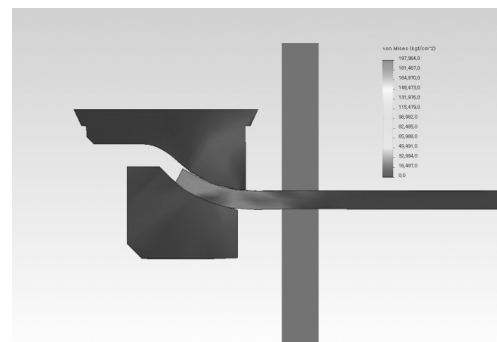


Fig. 2 Pre-bending process of edge area

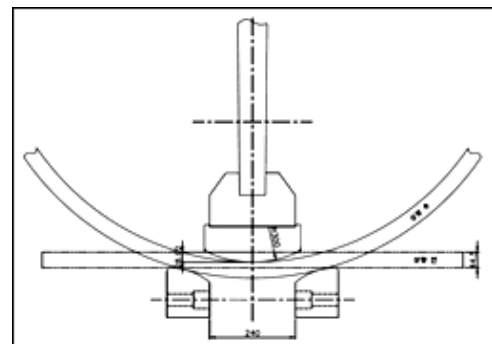


Fig. 3 CAD modeling for JCO bending

여 15회 성형하였으며, 기존의 프레스 밴딩시 국부적인 변형이 아닌 판재 전체 부위를 연속적으로 성형하였다.

강관의 JCO 프레스 성형 후 스프링백으로 인하여 진원도를 맞추기 어렵기 때문에, 용접 공정 실시 후 확관을 통하여 원하는 규격의 진원도와 진직도를 맞추었다.

2.1.2 SA(submerged arc) 용접

API-X70 용접부의 저온인성을 만족하기 위하여 PQ (procedure qualification) 시험을 실시하였다. 강재에 적합한 용접입열을 도출하기 위해 맞대기 용접을 실시하였다. 우선 내면을 3전극으로 54kJ/cm로 1패스 용접을 실시한 후 4전극으로 외면을 4가지 입열량으로 용접하였다<sup>11)</sup>.

저온인성 -20℃에서 70J을 만족하는 한계입열량을 도출하기 위하여 입열량에 따라 각각 용접금속, 용융선 및 용융선 +2mm 거리의 시편을 채취하여 -20℃에서 샤르피 V-노치 충격시험을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 용접금속의 충격값이 가장 낮았으며, 70J을 만족하는 한계입열량은 65kJ/cm 이었다. 따라서 입열량을 65kJ/cm로 하여 SA 용접을 실시하였다.

2.2 HIC 및 SSCC시험

HIC 시험은 RS D 0004<sup>12)</sup> 신뢰성 평가기준으로 수행하였다. 시편은 용접부, 모재부 90°, 모재부 180° 에서 20(w)×20.3(t)×100(L) 크기로 각각 3개씩 채취하였다. 시험에 사용된 용액은 용액 A(강산성)으로 5%NaCl 용액에 초산을 첨가하여 pH를 2.6~2.8의 범위로 하였으며, 96시간 동안 황화수소 가스를 지속적으로 주입시켜 포화상태를 유지하였다. 시험온도는 24±2℃로 일정하게 유지하였다.

HIC 시험 후 균열 관찰을 위하여 RS D 0004 규격에 따라 초음파 탐상하여 균열 위치를 확인하고 균열이 가장 크게 관찰되는 곳 3부위를 절단하여 균열발생률을 측정하였다(균열이 없을 경우 절단하지 않음).

풀 스케일 HIC 시험은 70×70×90(가로×세로×높이) 크기의 시험조를 제작하였다. 500mm 길이의 강관 전

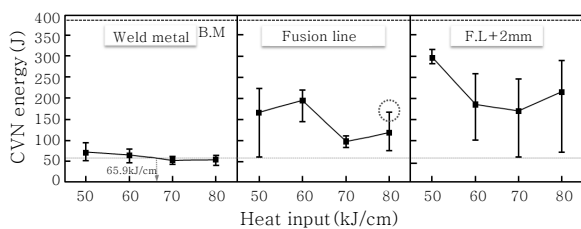


Fig. 4 Charpy impact energy of SA weldments with heat input

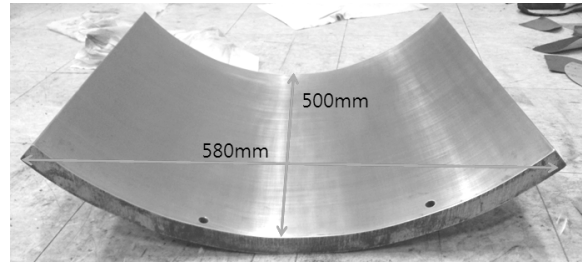


Fig. 5 Specimen for full scale HIC test

체를 시험할 경우 강관 무게를 시험조가 지탱하기 어려울 것으로 판단되어, 강관을 4등분하고, 이중 용접부를 포함하여 3개만 시험하였다. 시험편은 표면을 320번의 연마지로 최종 연마하였다. Fig. 5는 풀 스케일 HIC 시험을 위하여 준비된 시편을 나타내었다. 시편 이송을 위하여 상부에 2개 홈을 내었다. HIC 시험전에 초음파 탐상기로(Sonatest Powerscan 450P)로 시편 내부의 결함을 검사하였다.

SSCC 시험은 RS D 0005<sup>13)</sup> 에 의거하여 실시하였으며, 용접부 내면, 용접부 외면, 모재부 90°, 모재부 180°에서 4점굽힘시험편을 채취하였다. 시험하중은 규정된 최저항복강도(SMYS)의 72%, 80% 및 90%의 응력하에서 용액 A(강산성) 환경에서 720시간 시험을 실시하였다.

3. 시험결과

3.1 강관 제조 후 물성평가 결과

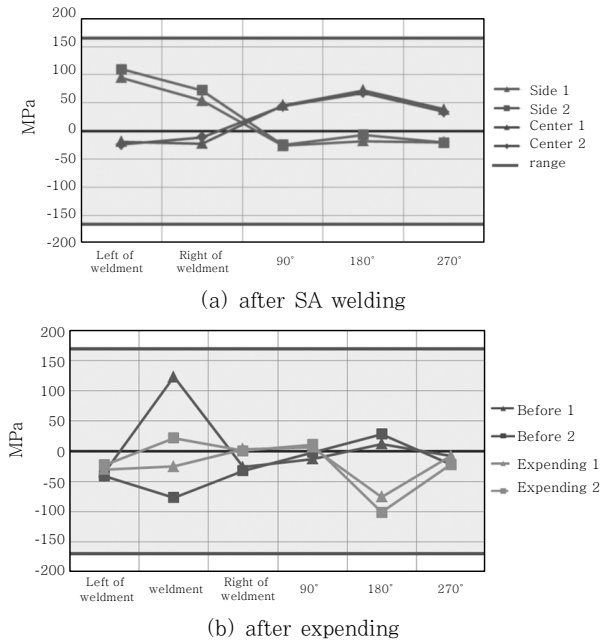
제조된 강관에 대하여 기계적 물성 평가 결과를 Table 1에 나타내었다. 항복강도는 X70급 이상이였으며, 충격에너지 값도 80J 이상으로 규격에 만족하였다.

3.2 잔류응력 측정

JCO성형 후 소성가공으로 인한 소재의 잔류응력으로 안정성을 크게 저하시킬 수 있다. 그러므로 JCO 프레스 성형 후와 확관 공정 후의 잔류응력을 측정하여 안정성을 판단하였다. 잔류응력은 강관의 판단, 중앙부의 용접부 좌/우측 90°, 180°, 270° 각 방향을 측정하였

Table 1 Mechanical properties of API-X70 pipe

TS		YS		Hardness			CVN energy	
MPa		MPa		Hv (10kg)			(J/-20℃)	
Weld	Base	Base	Weld	HAZ	Base	Weld	Base	
624~628	623~655	552~616	217~223	186~196	200~228	84~121	428~437	



**Fig. 6** Residual stress of after SA welding and after expending

다. Fig. 6(a)와 같이 확관전의 잔류응력은 -162MPa ~ +162MPa 범위였다. 확관시 Fig. 6(b)와 같이 용접부 잔류응력이 123.3MPa 에서 45.3MPa로 감소하였으며, 모든 잔류응력 값이 안정한 범위에 포함되는 결과를 보였다.

### 3.3 HIC 시험결과

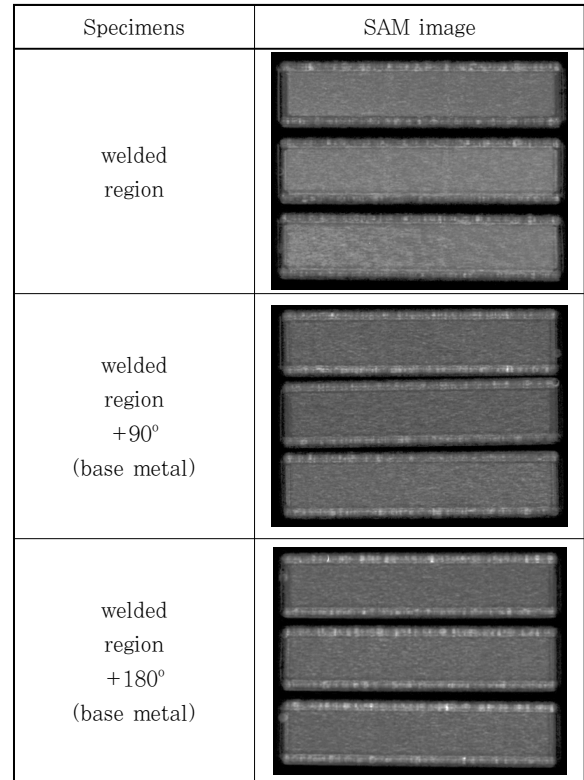
RS D 0004 규격의 시편에 대하여 HIC 시험 전 · 후에 결함을 관찰하기 위하여 초음파 탐상을 실시하였으며, SAM(scanning acoustic microscope)을 이용하여 2차원으로 탐상하였다. Fig. 7은 HIC 시험전 SAM 이미지 이고, Fig. 8은 HIC 시험후 SAM 이미지를 나타내었다. HIC 시험후 표면에 결함신호가 관찰되었지만, HIC 시험전 시험편에 크랙이 관찰되지 않았다.

Fig. 9는 풀 스케일 HIC 시험후 초음파 탐상을 수행하는 사진을 나타내었다. 초음파 탐상과정에서 3개의 모든 시편에서 크랙이 검출되지 않았다. 즉 강관 위치에 따라 HIC 특성차이 없음이 검증되었다.

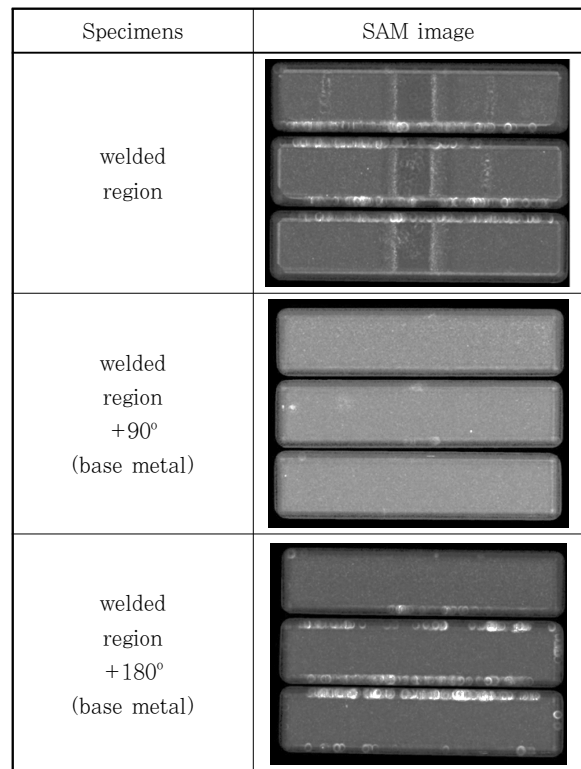
따라서 JCO 프레스와 SA 용접으로 제조된 API-X70급 강관은 HIC 저항성을 보증할 수 있었다.

### 3.4 SSCC 시험 결과

SSCC 시험후 육안검사결과 SMYS 90%까지 Fig. 10에 보인바와 같이 파단이나 크랙이 발견되지 않았다. 따라서 JCO 프레스와 SA 용접으로 제조된 API-X70



**Fig. 7** SAM images of specimens before HIC test



**Fig. 8** SAM images of specimens after HIC test

급 강관은 HIC 저항성 보증 뿐만아니라 SMYS 90% 까지 SSCC 보증이 가능하였다.



Fig. 9 Ultrasonic test of specimens after full-scale HIC test

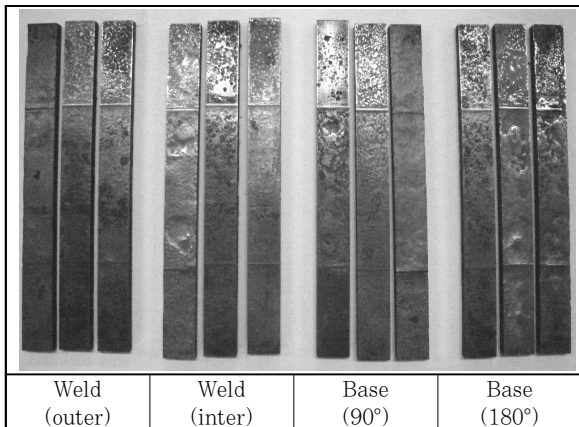


Fig. 10 SSCC tested specimens(from the left of SMYS 72%, 80% and 90%, respectively)

### 3.5 강관의 중심부 편석 분석

중심편석이 존재할 경우 소성변형에 의하여 판재 중심부에 HIC가 발생할 수 있으므로 원소재의 중심부 편석을 분석하였다. 소재의 중심부에 대하여 C, Mn, Si, Ni, Al, Ti, P 그리고 S 성분에 대하여 EPMA(Electron

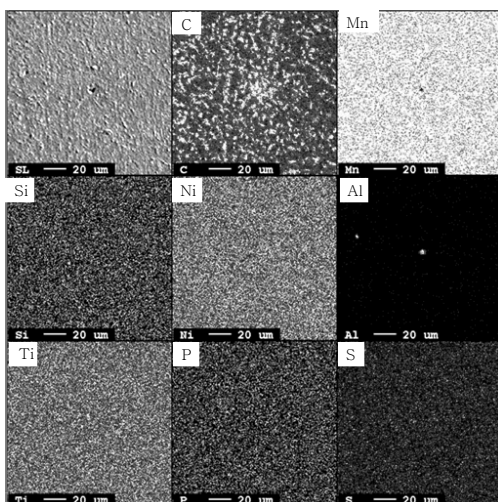


Fig. 11 EPMA image at centerline of API-X70 plate

probe micro-analyzer)분석하였으며, 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 분석결과에서 보는 바와 같이 중심부 편석이 관찰되지 않았다.

## 4. 결 론

JCO 프레스를 이용하여 강관으로 성형한후 SA 용접으로 제조된 API-X70급 강관에 대하여 HIC 및 SSCC 저항성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) JCO 프레스를 이용하여 강관 제조시 강관 전범위에 균일한 변형과 안정범위의 잔류응력을 얻을 수 있는 최적의 공정변수를 확립하였다.
- 2) 풀 스케일 HIC 평가를 통하여 소재의 광범위한 위치에 대하여 HIC 저항성을 평가할 수 있었다.
- 3) 중심부 편석이 존재하지 않고 HIC 저항성이 보증된 판재의 경우 강관제조과정의 소성변형에 의해서도 HIC 특성이 저하되지 않았다.
- 4) HIC 저항성뿐만 아니라 SMYS 90%까지 SSCC 저항성이 우수한 내사위 강관을 제조하였다.

## Reference

1. NACE Standard MR0117-93: Sulfide stress cracking resistant metallic materials for oilfield environment, NACE, Houston, TX, USA(1993)
2. E.M. Moore and D.A. Hansen: Specifying linepipe suitable for safe operation in sour, Wet service, J. Energy Resources Technology, **104-6**(1982), 134
3. R.D. Kane and M.S. Cahard: Role of H<sub>2</sub>S in the behavior of engineering alloys: a review of literature and experience, Corrosion/98, Paper No. 274, NACE international(1998), 274/1
4. H.J. Kim, Y.R. Park and B.Y. Kang: Mechanism and characteristics of hydrogen induced cracking of welded pipe, Journal of KWS, **22-1**(2004), 14-17 (in Korean)
5. H.K. Jung: Hydrogen embrittlement at ferrous materials, Journal of KSME, **51-11**(2011), 42-44 (in Korean)
6. J.Y. Koo, M.J. Luton, N.V. Bangaru and R.A. Petkovic: Metallurgical design of Ultra-High Strength steels for Gas Pipelines, Proc. of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference (2003), 10-18
7. NACE TM 0284-2003: Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking
8. J.S. Seo, H.J. Kim and H.S. Ryoo: Evaluation of HIC resistance for thick-wall welded pipe, Journal of KWS, **23-3**(2005) 246-251 (in Korean)
9. I. Cerny, D. Mikulova and M. Cipera: Contribution to hydrogen induced cracking of high-pressure pipeline materials after plastic deformation, 20th Interna-

- tional Metallurgical & Materials Conference ,METAL-2011,Brno Czech Republic(2011)
10. H.S. Ryoo, J.S. Seo, H.J. Kim and D.E. Lee: Evaluation HIC Crack Resistance for Plastic Deformation of API-X65 Plate, Journal of KWJS, **30-6** (2012), 492-495 (in Korean)
  11. H.J. An, H.K. Lee, Y.G. Park, S.S. Eun and C.Y. Kang: Effect of Heat Input of Outside Weld on Low

- Temperature Toughness of Inside Weld for Multiple Electrode SA Welded API 5L X70 with Sour Gas Resistance, Journal of Welding and Joining, **32-1** (2014), 93-101 (in Korean)
12. RS D 0004: Welded steel pipe for resistance to hydrogen induced cracking(in Korean)
  13. RS D 0005: Welded steel pipe for resistance to sulfide stress corrosion cracking (in Korean)



- 유희수
- 1965년생
- 한국생산기술연구원, 용접접합연구실용화그룹
- 디지털용접전원개발, 자동제어, 집합조직
- e-mail : hsryoo@kitech.re.kr



- 이동언
- 1969년생
- 세아제강 품질경영팀 소재개발파트
- 내sour 강관 연구
- e-mail : delee@seahsteel.co.kr



- 김희진
- 1953년생
- 한국생산기술연구원, 용접접합연구실용화그룹
- 용접전원파형제어, 용접재료개발
- e-mail : kimhj@kitech.re.kr