

원전 2차계통수 모사 환경에서 용접배관 감육 특성에 미치는 재료 및 유속의 영향

김 경 모[†] · 정 용 무 · 이 은 희 · 이 종 연 · 오 세 범 · 김 동 진

한국원자력연구원 원자력재료안전연구부

(2016년 10월 18일 접수, 2016년 10월 27일 수정, 2016년 10월 28일 채택)

Effects of Alloys and Flow Velocity on Welded Pipeline wall Thinning in Simulated Secondary Environment for Nuclear Power Plants

Kyung Mo Kim[†], Yong-Moo Choeng, Eun Hee Lee, Jong Yeon Lee, Se-Beom Oh and Dong-Jin Kim

Nuclear Materials Safety Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Korea

(Received October 18, 2016; Revised October 27, 2016; Accepted October 28, 2016)

The pipelines and equipments are degraded by flow-accelerated corrosion (FAC), and a large-scale test facility was constructed for simulating the FAC phenomena in secondary coolant environment for PWR type nuclear power plants. Using this facility, the FAC test was performed on a weld pipe (carbon steel and low alloy steel) under the high velocity flow conditions (> 10 m/s). Wall thickness was measured by high temperature ultrasonic monitoring systems (four-channel buffer rod type and waveguide type) during the test period and the room temperature manual ultrasonic method before and after the test period. This work deals with the complex effects of flow velocity on wall thinning of a weld pipe, and the test results showed that higher flow velocity induced different increments in the wall thinning rate for the carbon steel and low alloy steel pipe.

Keywords : FAC, wall thinning, ultrasonic measurement, carbon steel, low alloy steel

1. 서 론

가압경수로 (PWR) 원전에서 2차계통은 증기발생기의 증기압으로 터빈을 돌리고 복수기를 거쳐 다시 증기발생기로 순환되는 배관으로 연결되어 있다. 원자로를 냉각시키는 1차계통이 주로 스테인리스강 합금인 반면 2차계통은 탄소강 또는 저합금강 배관으로 구성되어 있다. 배관내로 흐르는 냉각수는 금속표면에 금속이온 농도 구배를 발생시키고 유속가속부식 (Flow Accelerated Corrosion, FAC)을 초래하여 배관감육 (wall thinning) 손상이 일어날 수 있다¹⁻⁴⁾.

1986년 미국 Surry 2호기, 2004년 일본 Mihama 3호기에서 일어난 배관 파단사고로 각각 4명과 5명의 인명사상이 발생된 바 있다. 이러한 대형사고를 기점으로 전세계적으로 배관감육에 대한 연구가 활발히 수행되었고 이를 위해 프랑스 등 여러 나라에서 배관 감육을 연구할 수 있는 실증시험

설비 (프랑스 EDF-CIROCO, 독일 AREVA-BENSON, 캐나다 B&W FAC Loop, 일본 CRIEPI-PRINTEMPS 등)를 설치하여 배관감육에 영향을 주는 여러 가지 인자들을 실증시험 평가하였고, 이러한 실험결과를 바탕으로 배관감육을 예측하고 관리할 수 있는 코드들 (미국 CHECWORKS, 프랑스 CICERO, 독일 COMSY, 러시아 RAMEK, 일본 FALSET 등)을 개발하여 원전 배관 관리에 활용하고 있다^{5,6)}. 국내 원전에서는 배관 검사 및 교체 관리를 위해 미국 EPRI에서 도입한 배관감육 해석코드인 CHECWORKS를 사용하고 있다⁷⁾.

원전 배관의 FAC는 배관재질 뿐만 아니라 배관내 유체의 화학적 특성, 산소농도, 온도 등에 의해 많은 영향을 받는다⁸⁾. 특히 원전 2차계통 배관의 방대함과 가동 환경의 복잡성 등 많은 요인에 의해 FAC로 인한 배관손상을 관리하기에 한계가 있다. 배관관리를 위한 FAC 예측 프로그램의 정확성을 높이고, 감육 저항성을 높이기 위해 배관의 FAC 평가를 위해 원전 가동환경을 모사할 수 있는 FAC 실증시험설비의 구축과 운용이 필요하다. 이에 실제 원전 대형 배관까

[†] Corresponding author: kmkim@kaeri.re.kr



Fig. 1. FAC simulation test facility designed to operate in conditions of 6.0 MPa pressure and 270 °C temperature with maximum flow velocity of 20 m/s for pipe diameter of 2 inch: (a) photo Picture of operating test facility and (b) 3 dimensional layout.

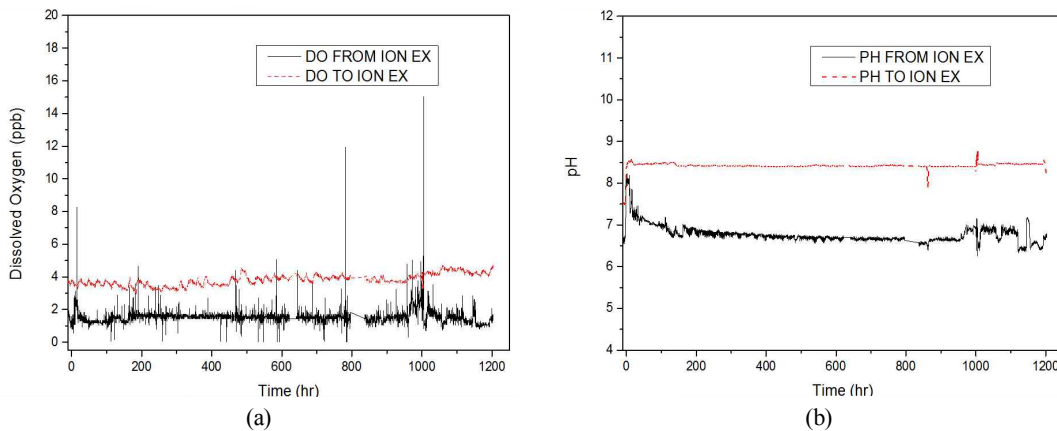


Fig. 2. Water chemistry monitoring data for (a) pH and (b) DO during FAC test with flow rate of 12 m/s.

지 시험할 수 있는 FAC 실증 시험설비를 설계, 제작 완료하여 시운전을 통해 설비 가동조건을 만족함을 확인하였다. 본 연구에서는 FAC 실증시험설비를 이용하여 10 m/s 이상의 고속 유속 조건에서 탄소강과 저합금강이 용접되어 있는 배관의 감육 특성을 시험하였다. 상용 초음파 검사 (UT, Ultrasonic Testing)와 함께 자체 개발한 고온 UT 검사 방법을 적용하여 on/off-line 감시를 통해 배관 감육 두께 변화를 정밀하게 측정하여 각각의 기술들을 비교 평가하였다.

2. 실험방법

원전 2차계통 수화학 환경과 재질에 따른 배관의 감육 현상을 시험, 평가할 수 있도록 원자력발전소 2차측 배관의 FAC 현상을 실증, 모사할 수 있는 시험설비를 구축하였다 (Fig. 1). 이 설비는 원전 2차측 환경에서 유속, 용존산소, pH, 온도, 배관형상 등 인자들의 FAC 영향을 실증할 수 있도록 설계되었다. FAC 실증시험설비는 배관 감육현상을

실증하기 위해 고온고압의 유체를 고속으로 순환시키는 주 순환 루프에 시험배관을 연결하여 고온 FAC 시험을 수행할 수 있도록 제작하였다. 또한 취출수 라인에 정화계통인 이온교환수지를 설치하고, 주입수 라인에 수화학 제어계통을 구성하여 시험용액의 DO와 전도도, pH 등 수화학 조건을 조절할 수 있도록 제작하였다. FAC 실증시험설비는 고유속을 시험할 수 있도록 2인치 배관을 기준으로 최대 20 m/s 유속이 가능하도록 설계하였다. 구축된 FAC 실증 시험 장치를 이용하여 외경 2인치 배관(내경 49.2 mm)에서 1차 실험에서는 10 m/s 유속으로 그리고 2차 실험에서는 12 m/s 유속으로 실험하여 유속 변화에 따른 배관감육 영향을 평가하였다. 부식 감육 시험은 시험 배관 내부 유체 온도를 150도, 압력 10기압을 유지하면서 50일간 (1200시간) 시험을 진행하였고 시험 기간 중 용존산소 (DO)는 5 ppb 이하가 되도록 질소를 이용한 탈기를 지속하였다 (Fig 2(a)). 배관에 공급되는 급수는 pH 7이 되도록 이온교환수지를 통해 시험기간 동안 연속으로 정화시키면서 공급하였다 (Fig. 2(b)). 시험 기간 중 취출수 전도도는 약 1.0 μ S/cm

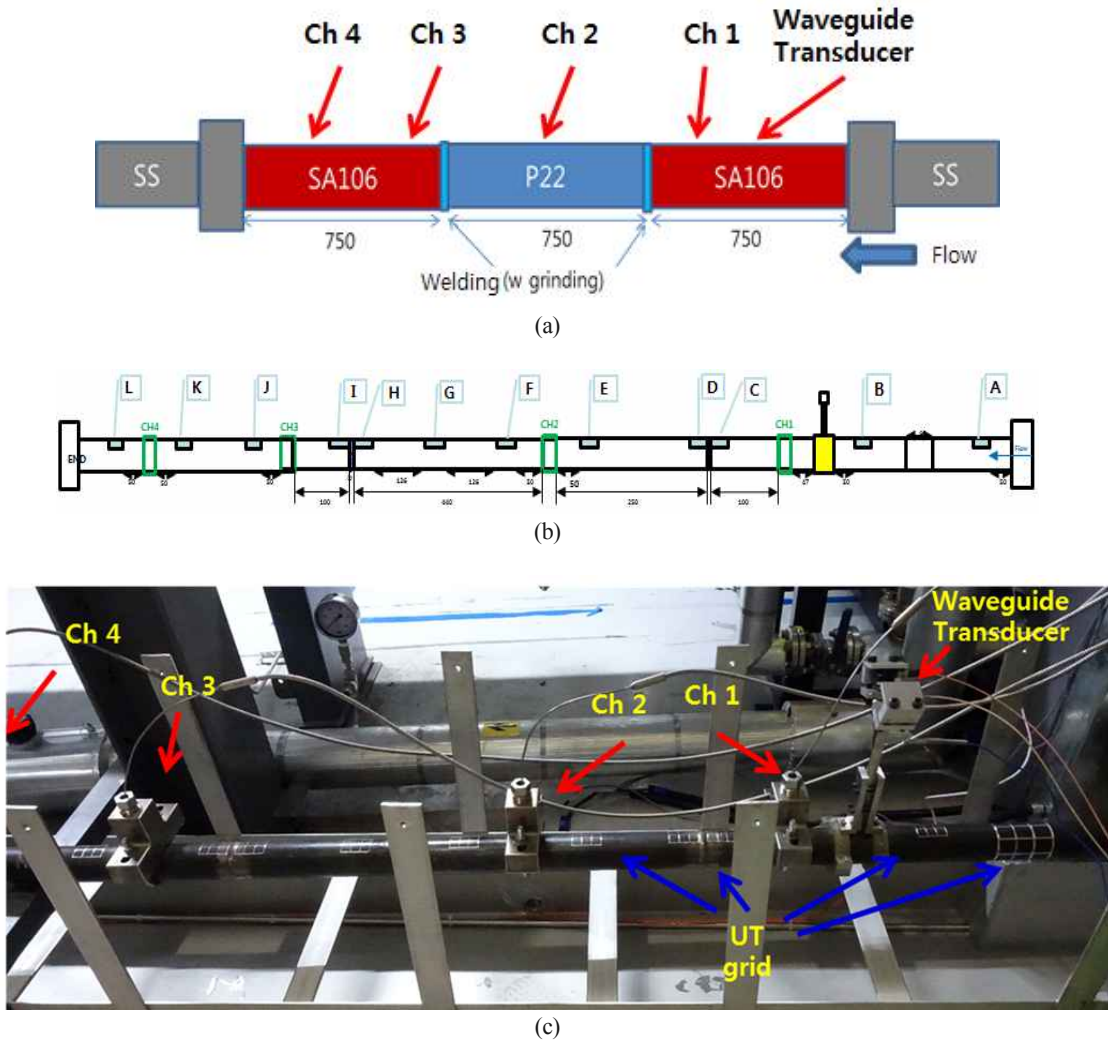


Fig. 3. Schematic drawings showing (a) a test section pipeline welded with low alloy steel (P22) between carbon steel (SA106) pipe, (b) the details of grid positions A~L for room temperature UT measurement, each positions have 6 grid points, (c) the four-channel buffer rod type ultrasonic transducers (BR-UT) and a shear horizontal waveguide type ultrasonic transducer (SH-UT) installed to a test section pipe in the FAC test facility.

를 초과하지 않도록 하였다.

FAC 실증시험을 위하여 직관 형태의 2인치 직경의 시험 배관을 Fig. 3(a)와 같이 제작하였다. 시험배관은 동일한 직경의 탄소강 (SA106 Gr. B)과 저합금강 (SA-335 P22)를 용접한 이중금속 용접부의 감속 영향을 시험하였다. 각 배관 재료의 크롬 농도는 0.04와 2.1 %로 일본 신일

철주금(Nippon steel & Sumitomo metal Co.)에서 제작한 상용배관 재질을 사용하였고 화학적 조성은 Table 1과 같다. SA106 탄소강과 P22 저합금강은 국내 발전소의 배관 재질로 가장 널리 사용되고 있다. 각 용접부위 간의 거리는 배관 내경의 15배가 되도록 설계하였고, 용접 후 배관 내부 비드를 기계가공으로 제거하여 모재를 손상시키지 않

Table 1. Chemical composition of pipe materials (wt.%)

Alloy	C	Si	Mn	Cu	Cr	Ni	Mo
SA106 Gr.B	0.19	0.24	0.98	0.02	0.04	0.02	0.01
SA335 P22	0.1	0.22	0.42		2.08		0.94

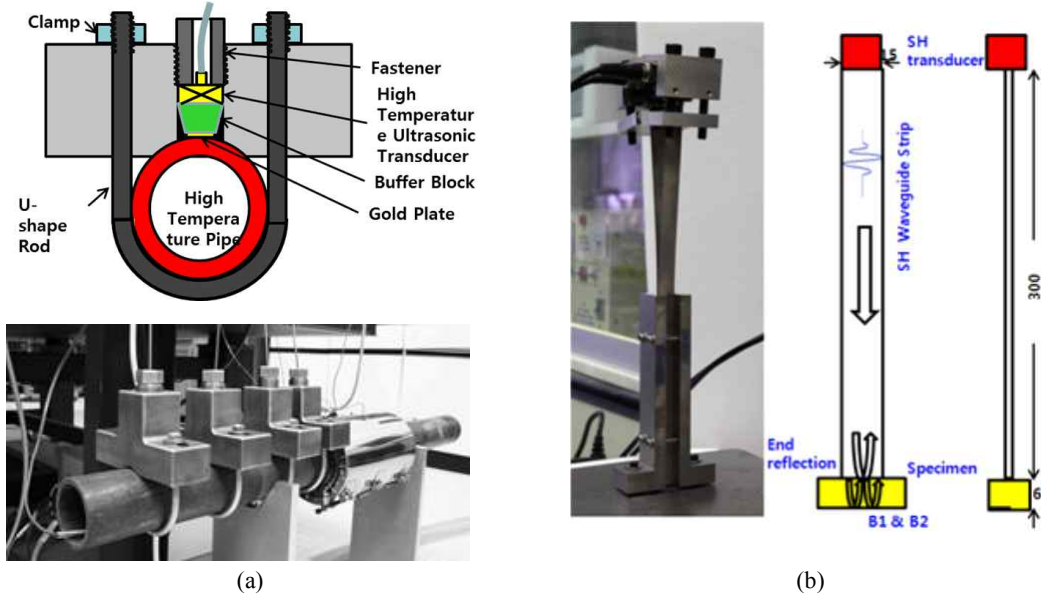


Fig. 4 Thickness monitoring transducer for a high temperature pipe: (a) four-channel ultrasonic transducers assembled with a high temperature ultrasonic transducer, a buffer rod, clamping device and a gold plate for coupling medium, and (b) a pair of waveguides and an assembly of a pitch-catch type ultrasonic transducers.

으면서 back bead를 선택적으로 제거하고 용접부위 단면이 최대한 원형이 되도록 가공 하였다. 탄소강과 저합금강 용접은 ER70S-6 (Cr 0.15 wt%) 재질로 그루브 (groove) 용접을 하였고 최소 150 °C로 예열을 하여 용접중 예열온도를 유지하였다. 용접 중간 온도는 최대 245 °C 이하가 되도록 하였고 용접 후 700 °C에서 1시간동안 후열처리를 실시하였다. 탄소강의 한쪽 끝에는 각각 type 304 재질의 플랜지 연결을 위해 ER309L (Cr 23.2 wt%) 용접재료 Fillet 용접을 하였고 중간온도가 최대 177도이고 후열처리는 하지 않았다. 시험배관의 입구와 출구의 플랜지와 시험 루프 전체 배관을 감육이 거의 일어나지 않는 type 304 재질을 사용하였고, 이격거리 영향을 살펴보고자 탄소강 배관 내경 크기의 15배 길이로 배관을 절단하여 저합금강을 중앙으로 양쪽에 탄소강 배관들을 용접 연결하여 이중금속간의 배관 감육 영향을 시험하였다.

감육에 의한 배관 두께 변화는 고온 초음파 측정 장치로 시험기간 동안 상시 측정을 실시하였고, 시험 전후에 그리드 방식으로 상온 UT로 측정하여 배관 두께 변화를 관찰하였다 (Fig. 3(b, c)). 고온 초음파 두께 측정장치는 Fig. 3과 같이 배치하였는데 버퍼로드 (buffer rod) type (GE Rightrax model) 4개 채널과 자체 제작한 웨이브가이드 (waveguide) type을 설치하여 시험기간 중 상시측정 하였다. Fig. 4는 두 가지 형태의 고온 UT 측정장치를 나타낸 그림이다. 웨이브가이드형의 초음파 탐촉자는 직경 12.5 mm의 수평형파 (shear horizontal, SH) Panametrics/Olympus NDT, Model V154를 사용하였다. 초음파 탐촉자를 strip waveguide 한

쪽 끝에 부착하여 SH파를 가진하였다. 웨이브가이드와 시편 사이에 초음파 에너지의 진행을 위해 접촉매질(couplant)이 필요한데 측정 대상이 고온 배관이므로 금 박판(gold plate)을 접촉매질로 사용하여 건조클램핑(dry clamping) 방식으로 충분한 압력을 가하여 음향적인 접합이 원활하도록 하였다. 초음파 펄서/리시버는 다채널 송수신이 가능한 OPMUX v12.0 (8 channel, OPTEL Sp.)를 사용하여 2-cycle, 2.25 MHz의 조건으로 가진하였고, 수평형파의 변위방향이 웨이브가이드의 표면과 평행하도록 수평형파 탐촉자의 polarization 방향과 변위방향을 웨이브가이드 평면과 평행하도록 배치하였다. 가진 탐촉자와 수신 탐촉자를 별도로 사용하는 pitch/catch 방식을 적용하기 위해서 두 개의 웨이브가이드를 검사 배관 표면에 1 mm 간격으로 평행하게 부착하고 각각의 끝에 가진용 초음파 탐촉자와 수신용 탐촉자를 연결하였다.

3. 결과 및 고찰

원전 배관에서 발생하는 FAC는 탄소강이나 저합금강 표면의 산화보호 피막이 배관내에 흐르는 유체에 의해 용해되면서 산화막이 얇아지고 부식 억제 능력이 감소되어 금속의 부식률이 유체가 정지되어 있을 때 보다 증가하게 되는 현상으로 유체의 화학적 특성, 산소농도, 온도에 많은 영향을 받는다. FAC에 의한 배관감육률은 유속이 증가할수록, 그리고 오리피스 등과 같은 국부적인 난류에 의해 증가하게 된다. FAC 실증시험설비를 이용한 시험은 두 가지 유속 조

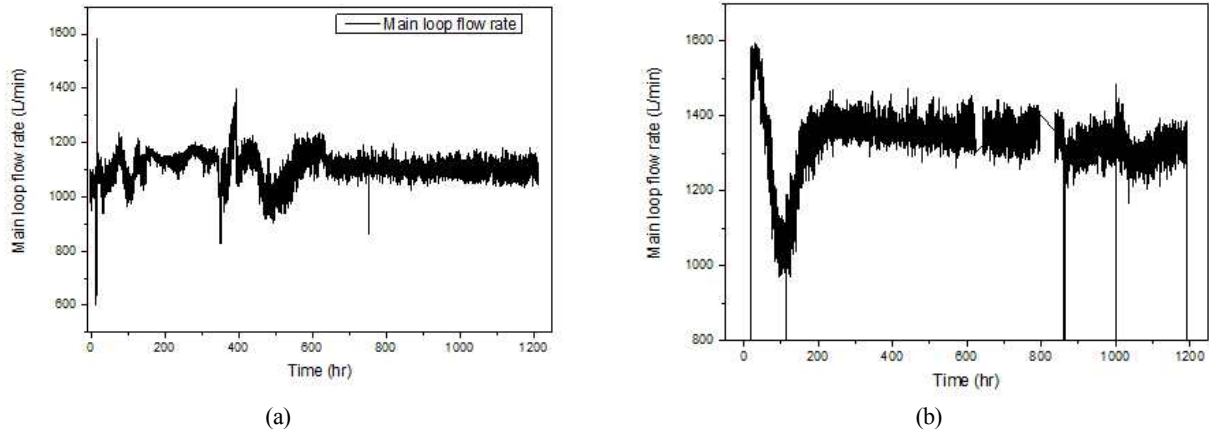


Fig. 5 Main loop flow rate during FAC tests in condition of (a) 10 m/s (1st test), (b) 12 m/s (2nd test).

건으로 시험하여 그 영향을 비교 분석하였는데 Fig. 5(a)와 같이 첫 번째 시험에서는 가동 초반 주순환펌프 유량이 100 l/min 범위로 유동성을 보였으나 시험 중반 이후로는 2인치 배관 (내경 49.2 mm) 기준에서 10 m/sec 유속 (약 1100 l/min)으로 안정되었다. Fig. 5(b)와 같이 두 번째 시험에서는 가동 초반 유량이 1600 l/min에서 약 1000 l/min으로 저하되었다가 다시 1300 ~ 1400 l/min 범위에서 안정적인 유속으로 유지되었다.

배관 감속 측정은 상온 수동측정과 고온 자동감시 방법을 사용하였다. 현재 대부분의 원전 배관 감속 측정은 계획예방정비 기간 동안 상온에서 간이형 수동 초음파 측정법을 적용하고 있으나 이 방법에는 여러 가지 단점을 가지고 있다. 원전 가동 중에는 감속을 측정을 할 수 없어서 측정기간의 단절이 생기고, 계획예방정비 기간 동안 주변 온도 변화 등의 환경적 오차와 작업자, 초음파 측정 장비, 측정 절차와 체계 등의 변동에 따른 인적 오차가 발생할 가능성이 크다. 또한 배관 감속 측정을 위해서 단열재를 제거해야하기 때문에 접근성이 떨어지고, 이에 따른 시간과 비용이 증가한다. 이러한 수동 UT 측정의 단점을 보완하기 위해 Fig. 4와 같이 고온에서 상시 감시할 수 있는 UT 측정 장치를 개발하여 배관감속 측정에 사용하였다^{9,10}. 고온 초음파 측정 시에는 초음파 탐촉자 재료인 압전소자가 Curie 온도를 초과할 경우 압전 성능이 상실되거나 저하되고, 초음파 탐촉자와 측정 매질 간에 열팽창 계수 차이로 인한 박리, 또는 음향적인 decoupling으로 인하여 UT 측정 자체가 곤란한 경우가 발생한다. 이러한 고온측정 문제점들을 해결하기 위한 방법으로 Fig. 4(a)와 같이 초음파 탐촉자와 측정 대상 사이에 온도 완충재(buffer rod)를 넣는 방법과 수평형과 웨이브 가이드 방식(Fig. 4(b))을 사용하였다. 버퍼로드 방식에서 버퍼재질은 초음파를 안정적으로 전달하면서 단열 효과가 높아야 한다. 버퍼방식의 고온UT 장치의 중요한 부분은 이

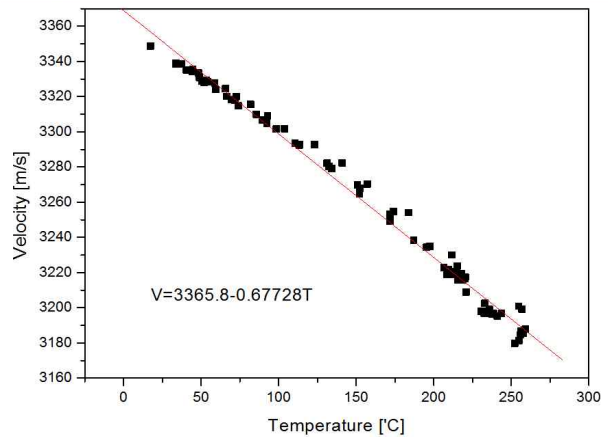


Fig. 6. Calibration curve of shear wave velocity with temperature of the carbon steel SA 106. The wall thickness calculation using UT signal should be calibrated for change of wave velocity by temperature.

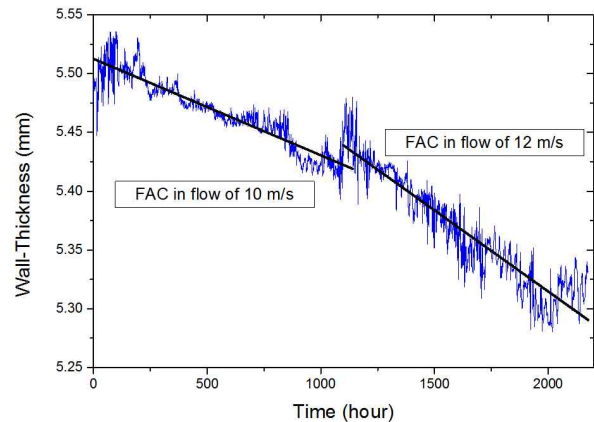


Fig. 7. pipe wall-thickness monitoring data acquired from a long term operation of the FAC proof test facility: the pipe wall thickness reduction determined by a shear horizontal ultrasonic waveguide type method (SH-UT) for carbon steel pipe(section I).

Table 2. Average wall thinning rate for each pipe sections measured by manual ultrasonic method as shown in Fig. 9

Flow velocity	(unit : μm)		
	section I (carbon steel)	section II (low alloy steel)	section III (carbon steel)
10 m/s	85	11	61
12 m/s	131	45	123

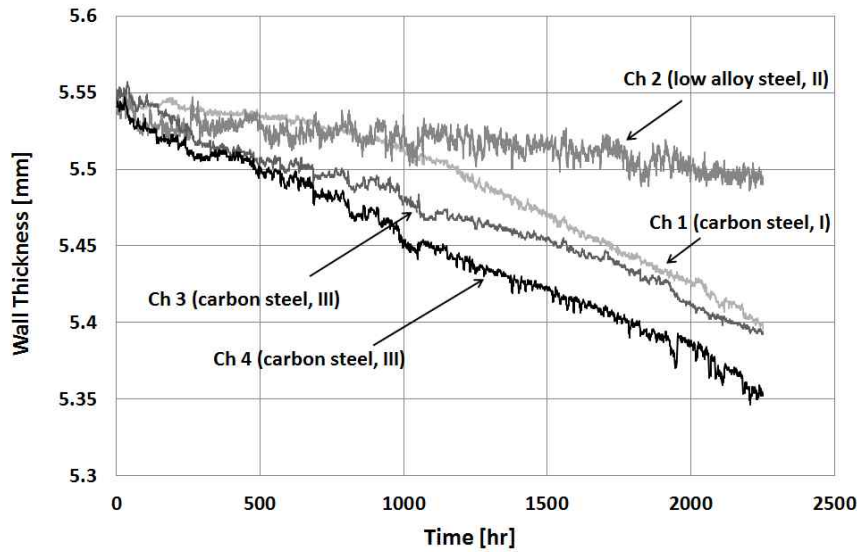


Fig. 8. A pipe thickness monitoring data acquired from a long term operation of the FAC proof test facility: the pipe wall thickness reduction determined by a buffer rod ultrasonic technique (BR-UT).

러한 버퍼 재질이 장시간의 가열과 냉각이 교차하는 열 피로 조건에서 초음파 에너지 전달특성이 감소하지 않아야 한다. 버퍼로드와 시편간에 초음파 전파가 용이하도록 gold plate 와 같은 고체 접촉매질을 사용하고 dry clamping 방식으로 압력을 가하여 접촉면을 단단하게 고정하는데 장시간 동안 사용하게 되면 버퍼재질과 시편 간에 접촉면이 깨지거나 균열이 발생하여 초음파 송수신 성능 저하가 발생하기 쉽다. 이에 반해서 웨이브가이드 방식은 상대적으로 두께가 얇고 긴 판을 사용하므로 고온 시편과의 접촉면에서의 음향적인 전달 특성이 우수하며 일반금속으로 간단하게 제작하여 사용할 수 있다. 또한 SH 진동 모드는 위상속도 분산선도나 군속도 분산선도에서 주파수가 변화하더라도 속도의 변화가 없다. 즉 분산성이 없기 때문에 초음파 신호 파형이 매우 선명하여 정밀 측정에 유리하다. 초음파 탐촉자에서 발생한 음파는 웨이브가이드를 통해서 전달되어 배관 외면과 내면에서의 각각 반사 신호가 측정되고, 두 신호의 시간 차이를 계산하여 이를 배관 두께로 환산한다. 초음파 속도는 매질의 온도 변화에 따라 변화하므로 두께 계산시 이에 대한 보정이 필요하다. Fi. 6은 SA 106 탄소강의 온도 변화에 따른 음파 속도 변화를 측정된 결과이다. 이 그래프 결과를 이용하여 실제 측정 온도에서 음파 속도를 보정한 후 수신된

신호를 두께 길이로 환산하였다.

SH모드 웨이브가이드형 고온 초음파 측정 장치 (SH-UT) 로 전체 시험 기간 동안 배관 두께 변화를 측정된 결과 Fig. 7과 같이 지속적인 감육 현상을 보여주고 있다. 전체 감육 두께는 약 210 μm 정도로 측정되었다. FAC 시험은 1차와 2차로 나누어서 각각 1200 시간씩 진행되었는데 1차 실험에서는 유속을 10 m/s로 실험하였고, 2차 실험은 이보다 약 2 m/s 정도 높은 12 m/s 유속 조건에서 FAC 실험을 수행하였다. SH-UT 측정 결과 1차 FAC 시험에서는 약 80 μm 정도 감육 되었고, 2차 FAC 시험에서는 약 130 μm 정도 감육된 것으로 측정되었다. 유속의 영향을 정량적으로 분석해보면 유속이 약 20 % 증가했을 때 SA106 탄소강의 감육은 60 % 증가했다는 것을 알 수 있다. 버퍼로드형 고온 초음파 측정 장치 (BR-UT)를 4개 채널로 측정된 결과는 Fig. 8과 같다. 여기서 채널1과 채널3, 4는 탄소강 (SA 106) 배관의 감육을 감시하였고, 채널2는 저합금강(P22)에 부착하여 두께 변화를 측정하였다. 유체 흐름 방향은 채널 1부터 채널 4까지 순차적으로 흐르게 된다. BR-UT 측정 결과 탄소강 배관의 전체 감육 두께는 측정 위치에 따라 150 ~ 200 μm 내외로 측정되었고, 저합금강 배관의 경우 약 30 μm 정도 감육된 것으로 측정되었다. 탄소강과 저합금

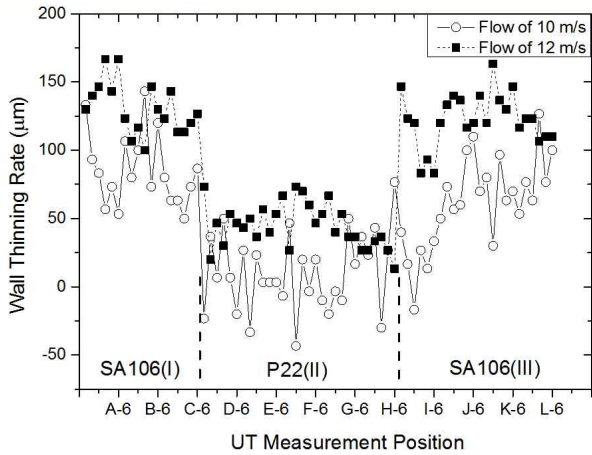


Fig. 9. Pipe wall thinning rate measured by manual ultrasonic transducer at room temperature before and after FAC tests.

강의 감육률의 차이는 재료 내부의 크롬 성분 차이로 인한 영향이 크며 탄소강에 비해 5배 정도 크롬 함량이 높은 저합금강에서는 최대 1/7 정도로 감육이 감소되었다.

FAC 시험 시작하기 전과 시험 후에 상온에서 UT로 배관 두께를 측정하였고 Fig. 9는 그 측정결과를 보여주고 있다. 용접배관은 시험용액이 A 측정위치로 유입되어 L 측정위치에서 배출되는 구조로 되어 있다. 각 UT 측정위치는 격자 형태로 미리 표시를 해 놓아 같은 위치에서 측정이 이루어질 수 있도록 하였다. 상온UT 측정 위치는 A~C 탄소강 (구간 I), D~H 저합금강 (구간 II), I~L 탄소강 (구간 III)으로 구분된다. Table 2는 각 구간별로 상온 UT 측정 결과를 평균한 결과이다. 구간 I에서 탄소강 배관의 두께 감육은 1차 FAC 시험 후 평균 85 µm로 측정 되었고, 2차 시험에서는 131 µm 측정되었다. 이 감육값은 고온 온라인 측정값인 SH-UT 측정 결과 (각각 80, 130 µm)와 상당히 근접한 값이다.

구간 III에서 동일한 탄소강의 상온 UT 측정값 평균은 1차 65 µm, 2차 123 µm로 구간 I에 비해서 1차, 2차 실험결과와 각각 20 µm, 8 µm 정도 감육이 덜 된 것으로 평가되었다. 이러한 결과를 고찰해 보면 같은 유속이라도 저합금강 전과 후에 용접되어 있는 탄소강 배관의 감육량에 차이가 있어서 최초 유량이 들어가는 위치에 있는 구역 I의 탄소강 배관에서 감육이 심하게 발생한다는 것을 알 수 있다. 그러나 유속이 증가하면서 그 효과는 감소하는 것으로 나타났다. 배관감육에 영향을 주는 인자로는 크롬 함량, 유속, 상(phase), 온도, pH, 형태 등 매우 다양한 요소들이 복합적으로 작용하며, 현재까지 실험과 경험 자료를 바탕으로 대부분의 인자들의 독립적인 영향들은 상당부분 파악되고 있으나 여러 인자들이 복합된 경우 그 영향을 정량적으로 평가하기 위해서는 연구가 더 필요하다. 그 중의 하나로 이중용

접부와 같이 배관이나 구조물이 연결되어 있는 경우 유체 상태 (Reynold number)와 이중금속 간의 간격이 배관 감육에 어느 정도 영향을 주는지 연구할 필요가 있다. 이중금속 용접부에 대해서 감육이 일어나지 않는 배관에서 형성된 유체의 흐름이 발달되어 진행하다가 감육이 일어나는 배관에 도달하면 경계면에서 배관표면에 존재하지 않는 철이온과 동일 배관의 평형 용해도 간에 차이가 발생하여 농도 구배에 따른 철이온 용해가 용이하게 되는 경향이 생긴다. 그러나 동일 배관을 따라 유체가 진행되는 경우 철이온 농도 분포가 이미 발달하여 농도차이에 의한 용해 가속 현상은 일어나지 않으며 이중금속 연결에 의한 경계면에서 많은 양의 부식이 생기는 진입효과 (entrance effect)가 발생할 수 있다.¹¹⁾ 이러한 복합적인 영향들을 파악하기 위해 향후 배관 두께 단면과 산화막 구조에 대한 미세 분석을 할 예정이다.

저합금강인 구간 II의 경우 상온 UT 측정값을 평균 했을 때 1차 실험에서는 약 11 µm 정도 감육 되었고, 2차 실험에서는 45 µm 정도 감육 된 것으로 측정되었다 (Table 2). 탄소강 배관 감육과 비교해 보면 절대적인 감육량은 탄소강에 비해 대략 1/3 이하로 감소하였지만 유속 증가에 의한 감육 증가량은 저유속 (10 m/s)일 때 보다 고유속 (12 m/s)에서 약 4배 이상 증가하였음을 보여준다. 이는 탄소강의 유속변화에 따른 2배 이하의 증가량과 비교했을 때 저합금강의 감육 특성이 유속에 매우 영향을 많이 받는다고 할 수 있다. 따라서 저합금강의 경우 유속 배관 두께를 평가할 때 이러한 유속 변화를 충분히 고려해야할 필요가 있다.

4. 결론

원전 2차계통 배관 감육현상을 실증하기 위한 고온 고압 유속시험장치를 제작 설치하여 탄소강 (SA106 Gr. B)과 저합금강 (SA335 P22)의 용접 배관에 대해 FAC 시험을 수행하였다. 시험온도 150도에서 10, 12 m/s 유속조건으로 각각 50일간 FAC 시험을 수행하여 각 부위별로 배관 두께 변화를 측정된 결과 유속 변화에 따른 탄소강과 저합금강의 감육율 변화에 차이를 보였다. 배관 두께변화는 고온 UT 측정 장치로 시험기간 중에 두께변화를 감시하였고 시험 전과 후에 상온에서 UT 방법으로 배관 두께를 측정하였다. 고온 UT 측정장치는 탐촉자 단열 방식에 따라 wave-guide type (SH-UT)과 buffer rod type (BR-UT)을 사용하였는데 SH-UT 방식이 상온 UT 측정 결과와 더 유사한 값을 보여주었다. 같은 탄소강 배관에서도 저합금강 전에 위치하여 유체가 최초로 접하는 부분의 감육량이 더 높게 나타났고, 저합금강은 탄소강에 비해 약 1/3 이하로 감육률이 낮았다. 그러나 유속이 10 m/s에서 12 m/s로 약 20 % 증가했을 때 탄소강 배관의 감육률은 상온UT 측정값

으로 약 50 % (구간 I)에서 100 % (구간III) 범위로 증가하였으나 저합금강(구간 II)에서는 11 μm 에서 45 μm 로 대략 4배 정도 감육량이 증가하여 저합금강 재질이 탄소강에 비해서 유속에 더 민감한 것으로 관찰되었다. 일반적으로 저합금강이 FAC 감육 저항성이 더 높은 것으로 알려져 있으나 탄소강과의 이중금속 용접 배관인 경우 유속 조건에 따라 예측한 감육률을 초과할 가능성이 있는 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 과제는 한국원자력연구원 주요사업과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

1. D. H. Lister, L. Liu, A. Feich, M. Khatibi, W. Cook, K. Fujiwara, E. Kadoi, T. Ohira, H. Takiguchi, and S. Uchida, ICPWS XV, Berlin, Germany (2008).
2. R. B. Dooley and V. K. Chexal, *Pressure Vessel and Piping*, 77, 85 (2000).
3. S. Uchida, M. Naitoh, Y. Uehara, H. Okada, N. Hiranuma, W. Sugino, S. Koshizuka, and D. H. Lister, *J. Nuclear Science and Technology*, **46**, 31 (2009).
4. T. Satoh, Y. Shao, W. G. Cook, D. H. Lister, and S. Uchida, *Corrosion*, **63**, 770 (2007).
5. H. Schmidt, W. Kohler and W. Kastner, *Framatome ANP GmbH*, France (2001).
6. E. M. Pavageau and R. Michel, *Int. Conf. on FAC*, Lyon, France (2008).
7. Y. S. Lee, S. H. Lee and K. M. Hwang, *Corros. Sci. Tech.*, **15** 182 (2016).
8. E. H. Lee, K. M. Kim and H. P. Kim, *Corros. Sci. Tech.*, **12** 280 (2013).
9. Y. M. Cheong, H. P. Kim and D. H. Lee, *Trans. of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Korea (2014)
10. Y. M. Cheong, H. N. Kim and H. P. Kim, *Trans. KSNT Spring Conf.*, Korea (2013).
11. L. Dejoux, M. Personz, S. Trevin and T. Knook, *Int. Conf. on FAC, Lion*, France (2010).