

액적충돌침식으로 인한 배관감육 예측체계 구축에 관한 연구

김 경 훈^{1,†} · 조 연 수¹ · 황 경 모²

¹경희대학교 기계공학과, 경희대학교 대학원 기계공학과, ²한국전력기술(주)
(2012년 04월 23일 접수, 2013년 06월 28일 수정, 2013년 06월 28일 채택)

A Study on the Development of Prediction System for Pipe Wall Thinning Caused by Liquid Droplet Impingement Erosion

Kyung-Hoon Kim^{1,†}, Yun-Su Cho¹, and Kyeong-Mo Hwang²

¹Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, 1732, Deogyeong daero, Giheung-gu, Yongin, South Korea, 446-701

²KEPCO E&C, 2354, Yonggu daero, Giheung-gu, Yongin, South Korea, 446-713

(Received April 23, 2012; Revised June 28, 2013; Accepted June 28, 2013)

The most common pipe wall thinning degradation mechanisms that can occur in the steam and feedwater systems are FAC (Flow Acceleration Corrosion), cavitation, flashing, and LDIE (Liquid Droplet Impingement Erosion). Among those degradation mechanisms, FAC has been investigated by many laboratories and industries. Cavitation and flashing are also protected on the piping design phase. LDIE has mainly investigated in aviation industry and turbine blade manufactures. On the other hand, LDIE has been little studied in NPP (Nuclear Power Plant) industry. This paper presents the development of prediction system for pipe wall thinning caused by LDIE in terms of erosion rate based on air-water ratio and material. Experiment is conducted in 3 cases of air-water ratio 0.79, 1.00, and 1.72 using the three types of the materials of A106B, SS400, and A6061. The main control parameter is the air-water ratio which is defined as the volumetric ratio of water to air (0.79, 1.00, 1.72). The experiments were performed for 15 days, and the surface morphology and hardness of the materials were examined for every 5 days. Since the spraying velocity (v) of liquid droplets and their contact area (A_c) on specimens are changed according to the air-water ratio, we analyzed the behavior of LDIE for the materials. Finally, the prediction equations(i.e. erosion rate) for LDIE of the materials were determined in the range of the air-water ratio from 0 to 2%.

Keywords : liquid droplet impingement erosion, two phase nozzle, air-water ratio, erosion rate

1. 서 론

원자력 및 화력플랜트의 배관계통에서는 시간경과에 따라 배관의 두께가 감소하는 배관감육 현상이 발생하는 경우가 있다. 배관감육의 진행에 따라서 과공에 의한 내부유체의 누출이나 배관파손 등이 일어날 가능성이 있으며, 이로 인해 배관파손 발생 시에는 플랜트의 정지에 따른 경제적 손실이 클 것으로 예상된다. 또한 대규모적인 배관파손의 경우에는 내부유체의 분출이나 파편 등으로 인한 인명피해가 발생할 수 있으며, 파손된 배관에 의한 2차적인 계통파손 등이 발생하는 경우도 우려된다. 따라서 배관 파손으로 인한 플랜트 정지는 경제적, 사회적 손실과 안전성의 저하로 인한 영향도

크다고 할 수 있다.

발전플랜트에서 발생할 수 있는 배관감육 현상은 크게 세 가지로 나뉜다.

첫 번째로는 탄소강 및 저합금강의 표면산화피막의 부식 및 용해작용이 흐름에 의해 촉진되는 현상인 유동 가속 부식(FAC : Flow Accelerated Corrosion)이다. 배관감육 현상 중에 유동 가속 부식(FAC)은 광범위에 걸친 전면적인 감육으로 발생하기 쉬워, 대구경 배관의 대형 파단에 이를 가능성이 있어서 많은 연구가 이루어지고 있다.

두 번째로는 배관경이 줄어드는 부분의 하류 등에서 발생하는 캐비테이션 기포가 붕괴될 때의 압력으로 배관이 손상을 입는 현상인 캐비테이션 침식(C/E : Cavitation Erosion)이 있다. 캐비테이션 침식(C/E)은 설계에 의한 대응으로 그 발생이 억제되고 있다.

[†] Corresponding author: kimkh@khu.ac.kr

세 번째로는 고속 증기류 속에 섞인 액적이 배관표면에 충돌하는 것으로 발생하는 충격력에 의해 손상을 입는 현상인 액적충돌침식(LDIE: Liquid Droplet Impingement Erosion)이다.¹⁾

액적충돌침식은 고속의 유체흐름에 포함된 액적(droplet)이나 체트 유체의 충격 때문에 금속이 손상되는 현상을 의미하며, 액적충돌침식의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 액적충돌침식과 관련된 연구는 터빈 블레이드나 빗방울과 관련되어 항공기에 대하여 주로 진행되어 왔고, 발전소의 배관계에서 발생하는 액적충돌침식과 관련된 연구는 세계적으로 거의 수행된 바가 없다. 따라서 본 연구의 최종적인 목적은 액적충돌침식에 의한 배관에서의 감속 발생 형태를 정량적으로 예측하고, 실제 플랜트에 적용이 가능한 평가도구를 구축하는 것에 있다.

2. 실험 장치

2.1 전체 장치 구성

실험 장치설계와 제작은 현재 가장 널리 사용되고 있는 플랜트설비 배관의 재질과 내부에 흐르는 유체의 조건을 고려하여 이루어졌다.

현재 세계적으로 사용되는 침식장치의 종류에는 Whirl arm type(미국, Bell aerospace company)과 Disk rotary type(영국, Cambridge University)이 있다. 두 실험 장치는 300 m/s이상의 물방울 입사속도를 얻을 수 없으며, 물방울만을 실험의 조건으로 사용하기 때문에 각 기액비에 따른 이유체의 실험이 어렵다.²⁾ 따라서 본 연구에서는 여러 가지 기액비에 따른 실험수행을 위하여 이유체 노즐을 이용하여 실험 장치를 구성하였고, 장치의 기본설계는 본 연구의 독창성을 고려하여 특허 출원을 하였다.³⁾

실험 장치는 물과 공기의 유량 및 압력의 조절이 용이하도록 설계하였으며, 시편과 노즐의 거리를 조절할 수 있도록 설계하여 여러 가지 조건의 실험을 구현할 수 있도록 제작하였다. 시편의 경우, 일반적으로 사용되는 배관의 일부를 절단하여 이용함으로써 현장의 조건과 유사하도록 설계 및 제작이 진행되었다.

실험 장치는 크게 압축기, 압축공기 저장 탱크, 드라이어, 실험부로 구성되었다. 실험 장치 전체 구성도를 Fig. 2에 나타내었다.

본 연구는 고속의 유체흐름에 액적을 포함시키며 연속적인 실험이 가능하도록 설계되어야 하므로 이유체 노즐을 이용한 실험부가 구성되어야 했다. 따라서 압축기는 실험에 필요한 입구 유량을 고려하여 두 개를 병렬 연결하여 동시에 가동되고 정지하도록 설치하였다. 입구 유량을 고려하여 6.5 bar~8.5 bar 에서 가동되도록 하였다.

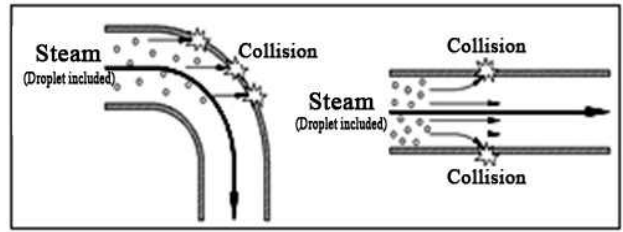


Fig. 1. Mimetic diagram of LDIE.

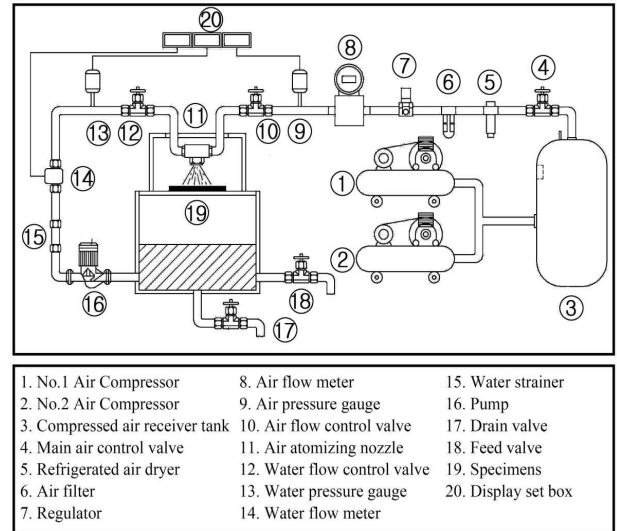


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

압축기를 통해 생성된 공기는 1차적으로 압축공기 저장탱크에 저장되고 드라이어를 통과하여 냉각 및 건조된 후 실험부에 공급된다. 드라이어는 필터 내장형으로써 공기를 15℃로 냉각하고 건조시키며, 이물질 제거하는 역할을 수행한다. 건조 및 냉각된 공기는 게이지압력 5.5 bar로 실험부에 공급하게 된다.

2.2 실험부 장치 구성

실험부는 이유체 노즐을 활용하여 액적충돌침식 장치를 구성하였으며, 실제모습을 Fig. 3에 나타내었다. 이유체 노즐의 형태는 내부 혼합형이며, 중앙부에 공기가 공급되고 주변으로 물이 공급되는 방식의 노즐을 사용하였다. 압축기로부터 생성되어 공급되는 공기의 일정한 유량을 유지하기 위하여 입구 밸브 후단에 레귤레이터를 장착하였고, 펌프로부터 공급되는 물의 유량은 밸브를 통해서 조절할 수 있도록 제작하였다. 공기와 물의 입구유량을 확인하기 위하여 각각의 유량계와 디스플레이 셋트를 구성하여 장착하였다. 실험 장치는 실험 중 무화(automization)되어 손실되는 물을 고려하여 수급 및 배수 밸브를 장착하여 탱크 내 물의 양을 조절하기 용이하도록 설계하였다.

3. 실험방법 및 실험

실험은 속도별 침식량과 액적 함량별 침식량을 알아보는 과정으로 이루어진다. 고속의 증기유동 속에 섞여 있는 액적이 배관표면에 충돌하는 것으로 발생하는 충격력에 의해 손상을 입는 과정을 살펴보고자 시편의 재질에 따른 속도별 침식량과 공기와 물의 부피비로 정의되는 기액비에 따른 변화량들을 검토하는 것이다.

3.1 실험 조건

재질별 세 가지 경우에 대하여 세 가지 기액비로 실험을 진행하였다. 각 실험은 360 hours동안 실험이 진행되었으며, 120 hours마다 표면촬영과 무게 측정 그리고 경도 측정을 실시하였다.

표면 촬영은 Camcorder와 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 이루어졌다. 액적 충돌침식에 있어서 노즐로부터 분사되는 액적이 집중되는 시편중앙을 중심으로 주변의 표면 변화를 관찰하여 부식과 침식에 있어서의 차이점을 확인할 필요가 있다. 따라서 SEM을 이용한 표면 촬영의 경우에는 위치를 선정하여 위치표기(positioning)를 실시하였으며, 위치표기는 Fig. 4와 같다.

무게 측정은 침식량이 미소하다는 것을 고려하여, 측정범위가 10^{-4} 급인 디지털 저울(digital scale)을 이용하여 실시하였다. 마지막으로 경도 측정은 비커스 경도계(Vickers hardness tester)를 이용하여 이루어졌으며, 침식이 크게 발생한 구역을 기준으로 주변 16개 위치의 경도를 측정하여 평균값을 사용하였다.

본 실험에서 실험 초기에는 물과 공기의 중량비로서 계산된 액적함량을 사용하였으나, 노즐로부터 대기중으로 분사된 분무가 시편에 영향을 미치는 것을 고려하여 내부 압력에 따른 밀도와외의 상관관계가 적다고 판단되어 기액비를 실험의 기준으로 변경하였다.



Fig. 3. Experimental apparatus.

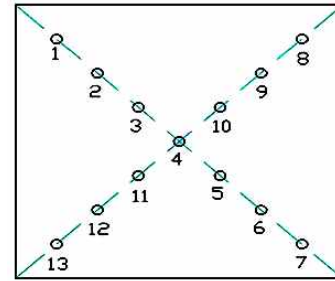


Fig. 4. Specimen positioning for SEM.

Table 1. Flux ratio of air and water

Air-water ratio [%]	Air flux [m^3/s]	Water flux [m^3/s]
0.79	2.90×10^{-3}	2.28×10^{-5}
1.00	2.90×10^{-3}	2.90×10^{-5}
1.72	2.90×10^{-3}	5.00×10^{-5}

시편의 재질은 현재 발전 플랜트 배관계에서 일반적으로 사용되는 탄소강 계열인 A106B와 SS400 그리고 알루미늄 계열인 A6061을 선정하였고, 재질별 세 가지의 경우로 실험이 진행되었다.

기액비는 0.79, 1.00, 1.72로 선정하여 세 가지의 경우를 진행하였다. 실험에 앞서 기액비에 따른 공기와 물의 유량비를 결정하였으며, 유량비는 부피비를 이용하여 계산하였다. 공기유량은 압축기의 공기공급 성능을 고려하여 $2.90 \times 10^{-3} m^3/s$ 로 유지하여 계산하였으며, 실험 결과로부터 기액비에 따른 물의 유량을 Table 1에 나타내었다.

3.2 속도 측정

속도 측정은 Fig. 5에 나타난 피토관(pitot-tube)과 양방향 유동 튜브(bi-directional flow tube)를 이용하여 취득한 데이터의 산술평균값을 유속으로 판단했다. 여기서 양방향 유동 튜브는 유동방향이 복잡한 국소적 화염속도를 측정하기 위하여 고안된 튜브이다. McCarrery에 의해 고안된 것으로 공기 유동에 적용하여 국소적 유동속도를 측정하는데 적합하다.⁴⁾ 속도 측정방법은 분무 액적과 시편의 접촉부위를 기준으로 우측과 좌측 그리고 중앙부를 측정하여 산술평균값을 이용하였다. 속도 측정 구역을 Fig. 6에 나타내었다. 속도 측정은 기액비 0.5에서 2.0구간에서 수행되었으며, 각 기액비 당 3회에 걸쳐 측정 후 평균값을 이용하였다. 피토관과 양방향 유동튜브를 통해 얻어진 차압을 아래의 식에 대입하여 속도를 계산하였다.

$$V = k \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

식 (1)에서 ΔP 는 피토크관을 통해 측정된 차압이며, ρ 는 공기의 밀도로 입구압력 5.5 bar에 해당하는 8.48 kg/m^3 을 적용하였고, k 는 보정계수로 0.73을 적용하였다.

속도 변화는 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 기액비가 증가할수록 감소하였고, 각각의 속도를 확인해 보면, 165 m/s에서 231 m/s까지로 높은 유속으로 분사가 되는 것을 확인할 수 있다. 문헌에서 살펴보면, 이상류(Two-phase flow)에 의한 액적의 충돌에 의한 침식이 발생하려면 임계충돌유속을 넘을 필요가 있고, 습한 증기 중의 탄소강에서는 약 90 m/s, 일반 철강에서는 30 m/s임을 보고하고 있다.⁵⁾ 따라서 측정된 유속은 침식 발생이 가능한 임계유속보다 훨씬 높은 수치로서 액적충돌침식의 발생을 확인하기에 적합하다고 판단된다.

3.3 충돌 면적 확인

액적충돌침식으로 인한 시편두께의 변화를 살펴보기 위하여 실질적으로 침식이 발생하는 면적을 확인하고, 침식량의 근사를 위해 노즐로부터 분사되는 분무가 시편에 직접 접촉하는 면적을 확인할 필요성이 있다. 면적 확인은 실험의 케이스별에 해당하는 기액비에서 노즐로부터 분사되는 분무액적을 캠코더를 이용하여 촬영한 뒤, 실제 노즐과 시편 사이의 거리, 그리고 이미지(image)상에 나타난 노즐과 시편 사이의 거리의 축적을 적용하여 계산하였다. 계산결과 기

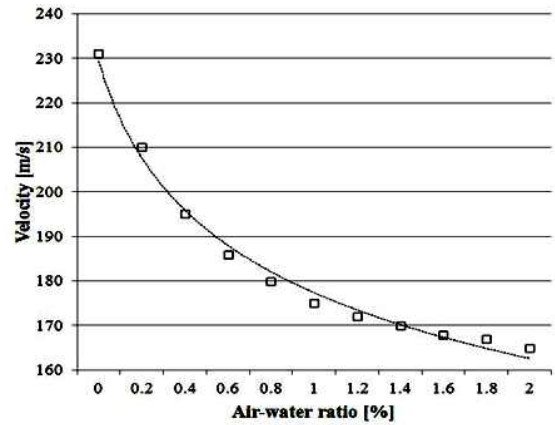


Fig. 7. Graph of velocity measurement(D=45mm).

Table 2. Contact area of liquid droplet

Air-water ratio [%]	Spray angle [°]	Contact area [mm ²]
0.79	16.26	452.16
1.00	16.87	486.95
1.72	17.72	538.31

액비가 증가할수록 액적이 시편에 접촉하는 면적은 증가하였으며, 계산된 결과를 Table 2에 나타내었다.

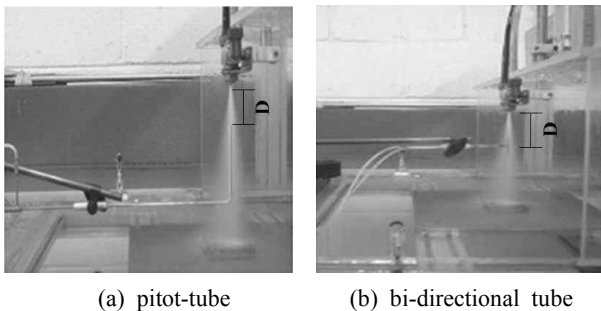


Fig. 5. Velocity measurement.

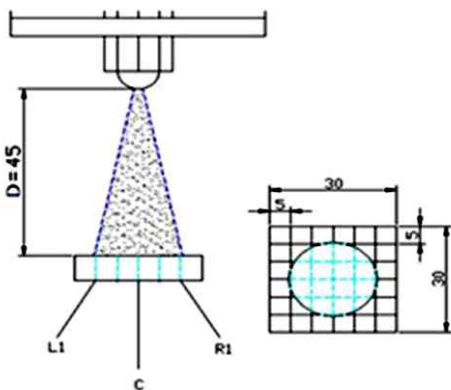


Fig. 6. Position of velocity measurement.

4. 실험 결과

4.1 표면 변화

액적충돌침식의 경우에는 침식으로 인한 표면의 변화를 관찰함으로써 침식의 진행에 따른 표면변화의 과정을 확인할 필요성이 있다. 시편의 표면촬영은 캠코더와 SEM을 이용하여 실시하였다.

캠코더를 이용하여 표면을 촬영한 결과는 시편의 변색은 관찰 되었으나, 육안으로 침식의 깊이를 확인할 정도의 침식은 발생하지 않은 것으로 확인되었다. 캠코더를 이용하여 촬영된 시편의 표면 변화 모습을 Fig. 8에 나타내었다. 캠코더를 통해 촬영된 시편의 표면을 살펴보면, 중앙부를 중심으로 침식의 결과로 보이는 변색이 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

SEM을 통한 시편촬영은 2000배의 배율을 선정하여 촬영되었으며, Fig. 9에 나타내었다. SEM 촬영 결과, 노즐로부터 분사된 액적과 직접적인 접촉이 있는 부분에서 침식이 심하게 일어나는 것을 확인하였다. SEM 촬영을 통한 결과를 살펴보면, 액적으로 인한 침식의 과정을 확인할 수 있다. A106B, SS400, A6061 모두 기액비가 증가할 수록 표면 침식이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 탄소강 계열의 A106B와 SS400의 경우, 침식 과정은 크게 두 단계로

나눌 수 있었다. 초기단계에는 가로방향의 균열(crack)이 생성되었고, 두 번째 단계로는 층이 분리되어 박리되는 과정을 거치면서 본격적인 침식이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 알루미늄 계열의 A6061은 초기단계에는 침식의 흔적으로 기공이 형성되고, 기공들의 크기가 점점 발달하면서 층이 분리되는 과정을 거치는 것을 확인하였다.

4.2 무게 변화

침식실험에 있어서 시편무게의 감소량은 침식량과 직접적으로 연관된다. 이런 이유로 실험 후 침식량의 변화를 확

인하기 위하여 무게를 측정하였다. 시편 A106B, SS400, A6061 재질 각각의 무게가 감소되는 경향을 Fig. 10, 11, 12에 나타내었다.

재질에 따른 무게가 감소되는 경향을 관찰해 본 결과, A6061이 가장 큰 무게의 감소량을 보였으며, A106B가 가장 적은 무게의 감소량을 나타냈다.

한편, 기액비에 따른 시편무게의 감소량을 관찰한 결과, 기액비와 침식량의 변화는 비례하는 것으로 나타났다. 무게가 감소되는 경향을 살펴보면, 실험이 시작된 직후 침식으로 인해 급격한 무게의 감소량을 보이며, 실험시간이 진행될수록 감소의 기울기가 둔화되는 것으로 나타났다.

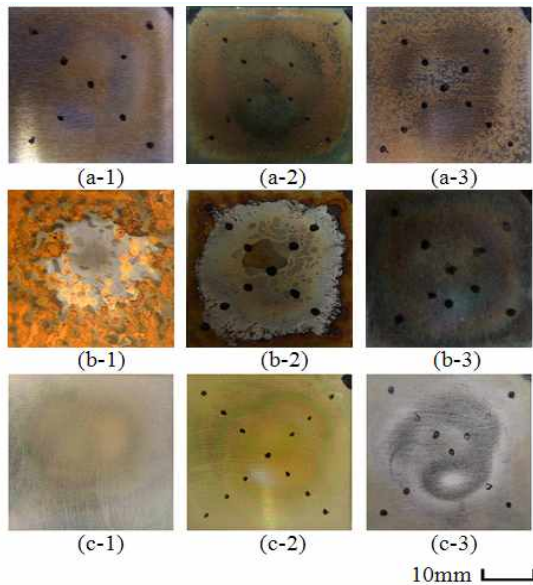


Fig. 8. Photograph images for change of surface of specimen (a : A106B, b : SS400, c : A6061, 1 : 0.79%, 2 : 1.00%, 3 : 1.72%).

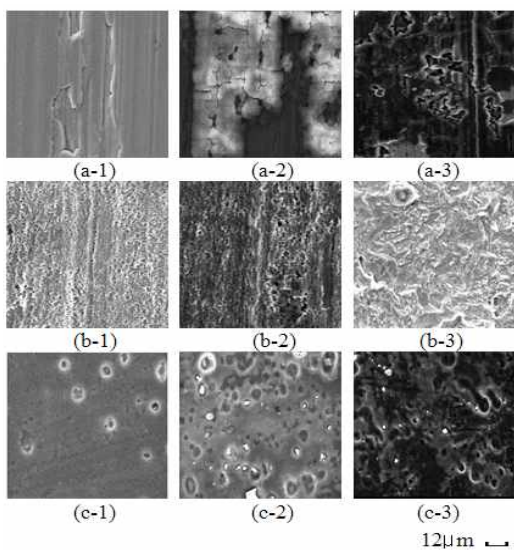


Fig. 9. SEM images for change of surface of specimen (a : A106B, b : SS400, c : A6061, 1 : 0.79%, 2 : 1.00%, 3 : 1.72%).

4.3 경도 변화

침식의 결과로 표면의 변화를 예상하여 표면변화를 관찰하였다. 이와 동시에 표면변화로 인한 시편의 경도의 변화를 살펴봄으로써 침식의 영향을 파악하고자 재질의 표면경도의 변화를 관찰하였다. 경도 측정은 비커스 경도계를 사용하였으며, 측정 방법은 침식이 많이 발생한 구역을 기준으로 주변 16개 위치의 경도를 측정하여 평균값을 사용하였다. 재질별 경도의 변화 데이터 중에서 대표적으로 기액비 1.72 일 때, 재질별 경도의 감소 추이를 Fig. 13에 나타내었다. 기액비에 따른 경도의 변화를 관찰한 결과, 침식이 진행될수록 경도는 감소하였으나 기액비가 증가함에 따라 경도의 감소 기울기가 증가하는 경향은 나타나지 않았다. 보고된 문헌에 따르면, 경도 변화의 지배적인 인자는 입자의 형상 및 경도, 시편 재질의 취성 또는 연성인 것으로 알려지고 있다.⁶⁾ 본 연구에서도 역시 침식에 따른 경도의 감소는 관찰되었으나, 기액비의 증가에 따른 경도 감소 기울기의 증가는 나타나지 않았다. 탄소강 계열인 A106B와 SS400의 경우에는 경도의 변화가 큰 반면, 알루미늄 계열인 A6061의 경우에는 경도 변화가 미소한 것을 확인하였다. 이러한 현상은 표면의 변화를 관찰할 때 나타난 재질간의 침식 경향의 차이가 원인으로 판단되며, 기공의 형성과 발달의 과정을 거치는 알루미늄 계열과는 달리 균열이 형성되어 분리되는 과정을 거치는 탄소강 계열이 침식으로 인한 경도의 변화에 민감한 것으로 관찰되었다. 이는 연성의 성질을 갖는 알루미늄의 특성으로 판단된다.

즉, 탄소강의 경우는 고체입자가 재료에 부딪치므로 인해 침식의 현상이 탄소강의 표면을 다수의 기공을 형성하여 모재에서 분리되는 것으로 나타나지만, 알루미늄의 경우에는 재료 자체의 무른 성질로 인해 침식현상이 기공이 아닌 두께 감소로 나타남을 알 수 있다.

4.4 결과 분석

액적충돌침식을 통한 각 재질별 기액비에 따른 무게 변화를 관찰하였고, 이들 데이터를 토대로 기액비에 따른 침식률

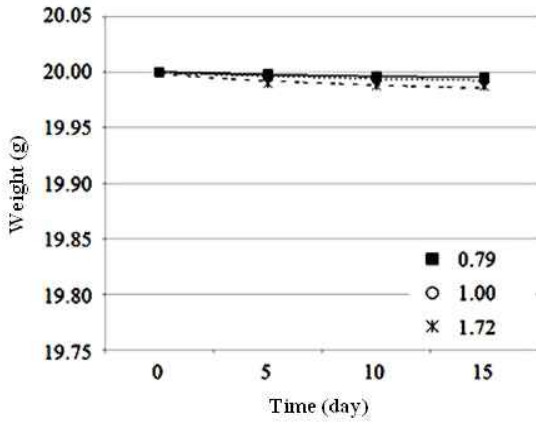


Fig. 10. Weight vs. time (A106B).

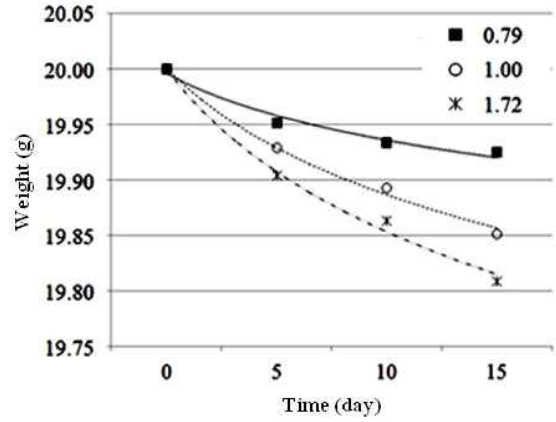


Fig. 12. Weight vs. time (A6061).

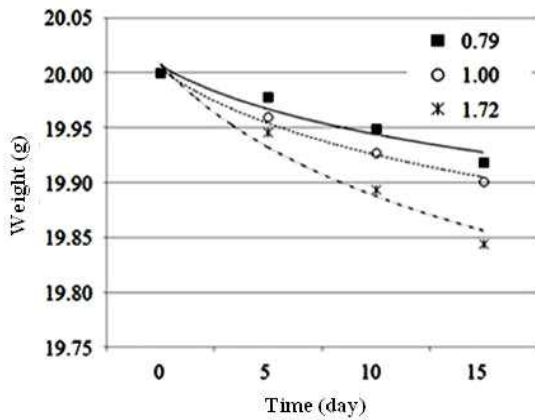


Fig. 11. Weight vs. time (SS400).

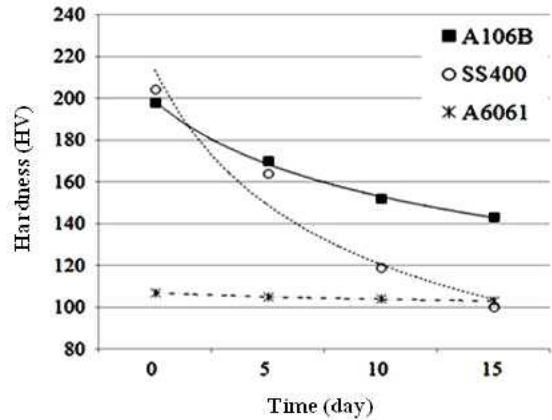


Fig. 13. Hardness vs. time (air-water ratio 1.72%).

을 계산하였다. 계산방법은 침식률의 계산에 있어서는 보편적으로 사용되는 시편 무게 감소량과 투입된 액적의 무게와의 관계를 통해 이루어진다. 침식률의 관계식은 아래와 같다.

$$ER = \frac{W_{specimen}}{W_{erodent}} \quad (2)$$

여기서, $W_{specimen}$ 은 시편의 무게 변화량을 의미하며, $W_{erodent}$ 은 투입된 액적의 전체 무게를 의미한다.

각각의 재질별 기액비에 따른 침식률을 Fig. 14에 나타내었다. 침식률을 살펴보면, 기액비에 따른 침식율은 A6061이 가장 크게 나타났고, A106B가 가장 작게 나타났다. 또한, SS400의 경우는 A106B 보다는 A6061과 유사한 기울기를 갖는 것으로 확인되었다.

A106B :

$$ER = -1.164AWR^2 + 3.176AWR + 0.0012 \quad (3)$$

SS400 :

$$ER = -9.209AWR^2 + 27.268AWR + 0.0423 \quad (4)$$

A6061 :

$$ER = -13.458AWR^2 + 40.923AWR + 0.2134 \quad (5)$$

실험을 통해 얻은 데이터를 근거로 하여 방정식을 근사적으로 구하는 방법인 최소제곱법을 사용하여 얻은 추세선을 통해서 계산된 침식률과 기액비간의 관계는 아래의 식과 같다. 여기서 ER은 침식률, AWR은 기액비를 나타낸다. 식의 범위는 실험이 수행된 0.00~2.00%의 기액비에 국한된다.

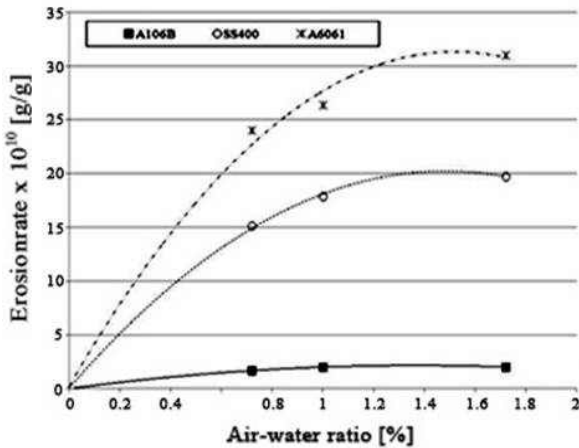


Fig. 14. Variation of erosion rate with air-water ratio.

5. 결 론

본 연구에서는 액적충돌침식으로 인한 배관손상 현상에 대하여 융통성이 있는 대책을 위하여 예측이론을 개발하고, 이에 따른 예측관리 기술을 확보하는 것에 목적이 있어서 속도에 따른 침식량과 속도와 기액비 및 시편 재질에 대한 침식량의 변화를 살펴보았다.

본 연구를 통해 알아본 액적충돌침식의 경향을 살펴보면, 세 단계로 구분할 수 있다. 첫 번째로 세로방향의 균열(crack)이 발생하고, 시간이 증가함에 따라 가로방향 균열(crack)이 생성되며, 마지막으로 본격적인 침식이 시작되는 것을 판단할 수 있었다. 무게변화를 확인한 결과, 120시간까지 급격한 무게 감소가 관찰되었고, 실험시간이 증가할수록 감소기울기는 둔화되는 것을 확인하였다. 액적과 시편의 접촉면적과 무게감소를 토대로 침식률을 계산하였으며, 기액비 0.00~2.00%범위에서의 예측식을 제안하였다.

본 연구는 현재 계속 진행 중이며, 앞으로 진행될 지속적인 연구에서는 속도에 따른 액적 충돌침식의 상관관계와 다양한 기액비에서의 실험을 통해 데이터의 신뢰성을 확보할 계획이다. 또한 노즐거리에 따른 침식량과 재질별 침식량을 살펴볼 예정이다. 이를 기반으로 각 인자에 따른 침식률을 확인하고, 이를 통해서 검증된 액적 충돌침식에 관련된 보다 근접한 예측식을 제안할 계획이다. 따라서 본 연구의 결과는 배관의 예측 관리시스템의 구축에 있어 기초연구 자료로써 가치가 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 2011년도 한국연구재단 일반연구자지원사업(20111793)의 연구비지원에 의하여 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. I. Kelis, P. Kulu, Solid Particle Erosion ; Occurrence, Prediction and Control, Springer, p.14 (2007).
2. E. C. French, New inhibitor reduces crude-unit corrosion problems at lower pH, Oil & Gas Journal, **91**, 45 (1993).
3. K. H. Kim, K. M. Hwang, H. Yoon, Apparatus of testing LDI(Liquid Droplet Impingement) Erosion induced by high speed 2 phase flow, Korean Patent No.1020110002332 (2011).
4. B. J. Yun, Development of an Average Bi-directional Flow Tube for the Measurement of Single and Two phase Flow Rate, KFMA, p. 172 (2004).
5. Mars. G. Fontana, Corrosion Engineering, 3rd ed., McGraw Hill, p.25, pp.70-71, pp.95-97, pp.485-487 (2008).
6. A. K. Cousins and I. M. Hutchings, Proc. 6th Int. Cong. on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cavendish Laboratory (1983).