

고체입자 충돌침식으로 인한 배관 재질의 손상에 관한 연구

김 경 훈¹ · 최 덕 현¹ · 김 형 준¹경희대학교 공과대학 기계공학과, 서울대학교 기계항공공학부
(2014년 10월 12일 접수, 2014년 4월 7일 수정, 2014년 8월 21일 채택)

A Study of Damage on the Pipe Flow Materials Caused by Solid Particle Erosion

¹Kyung-Hoon Kim, ¹Duk-Hyun Choi, and Hyung-Joon Kim¹Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, 1732, Deogyong daero, Giheung-gu, Yongin, South Korea, 446-701

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul, South Korea, 151-744

(Received October 12, 2012; Revised April 7, 2014; Accepted August 21, 2014)

Wall thinning can be classified into three types: flow-accelerated corrosion, cavitation erosion and solid particle erosion. This article presents a study of solid particle erosion, which frequently causes damages to power plants' pipe system. Unlike previous studies, this study uses a mechanism to make solid particles in a fluid flow collide with pipe materials in underwater condition. Experiment is conducted in three cases of velocity according to solid-water ratio using the three types of the materials of A106B, SS400, and A6061. The experiments were performed for 30 days, and the surface morphology and hardness of the materials were examined for every 7 days. Based on the velocity change of the solid particles in a fluid flow, the surface changes, the change in the amount of erosion, the erosion rate and the variation in the hardness of carbon steel and aluminum family pipe materials can all be determined. In addition, factor-based erosion rates are verified and a wall-thinning relation function is suggested for the pipe materials

Keywords : solid particle erosion, loss of pipe material, wall thinning, solid-water ratio, particle content, erosion rate, least squared method

1. 서 론

원자력, 화력발전소 및 일반 플랜트의 배관계통에서는 시간 경과에 따라 배관의 두께가 감소하는 배관 감육 현상이 발생하는 경우가 있다. 배관 감육의 진행에 따라서 파공에 의한 내부유체의 누출이나 배관파손 등이 일어날 가능성이 있으며, 이로 인해 배관파손 발생 시에는 플랜트의 정지에 따른 경제적 손실이 클 것으로 예상되며, 이는 경제적인 영향만이 아닌 사회적 손실과 안전성의 저하로 인한 영향도 크다고 할 수 있다.

발전플랜트에서 발생할 수 있는 배관 감육 현상은 크게 3가지로 나뉜다. 탄소강 및 저합금강에서의 표면산화피막의 부식 및 용해 작용이 흐름에 의해 촉진되는 현상인 유동 가속부식(FAC : Flow Accelerated Corrosion), 배관경

이 줄어드는 부분의 하류 등에서 발생하는 캐비테이션 기포가 붕괴될 때의 압력으로 배관이 손상을 입는 현상인 캐비테이션 침식(C/E : Cavitation Erosion), 유체에 섞인 입자나 불순물들이 배관표면에 충돌하는 것으로 발생하는 충격력에 의해 손상을 입는 현상인 고체입자 충돌침식(SPE : Solid Particle Erosion)이 있다.¹⁾

고체입자 충돌침식은 유체의 흐름에 포함된 입자(particle)나 불순물의 충격 때문에 금속배관이 손상되는 현상을 의미하며, 고체입자 충돌침식과 관련된 연구는 보일러 내부의 연료공급 배관이나 먼지가 많이 발생하는 시멘트 공장의 송풍기, 터빈 블레이드 및 연료 배관 등에서의 연구가 주로 이루어져 왔다.²⁾ 발전소의 배관계에서 발생하는 고체입자 충돌침식과 관련된 연구는 전 세계적으로 거의 수행된 바가 없으나,³⁾ 최근에는 발전소의 배관계에서도 가혹한 운전환경과 오랜 기간 동안의 가동 및 연장운전 등으로 배관내의 고체입자 충돌침식에 대한 연구가 이슈화되고 있다.

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

따라서 본 연구의 목적은 고체입자 충돌침식에서 수중분 위기에서의 실험에 대한 기본 개념을 설정하고, 고체입자 충돌침식에 의한 배관 감육 발생 형태를 정량적으로 예측하고, 실제 플랜트에 적용이 가능한 평가도구를 구축하는 데에 있다.

2. 실험

고체입자 충돌침식의 경우는 시편의 재질, 입자 농도, 유속 및 충돌각도와 관계한다. 따라서 각 변수들의 적용이 가능하도록 고체입자 충돌침식 장치를 설계 및 제작하였다. 실제 발전소 배관 라인을 상사 설계하여 모사하기에는 많은

제약 조건이 따른다. 이에 따라 본 연구에서는 노즐을 활용하여 고체입자 충돌침식의 메카니즘을 구성하고, 제작된 시편에 직접 분사하는 방식을 선택하였다. 장치의 기본설계는 본 연구의 독창성을 생각하여 특허 출원을 해 놓은 상태이다.⁴⁾

실험장치의 설계와 제작은 현재 널리 사용되고 있는 플랜트설비 배관의 재질과 내부에 흐르는 유체의 조건을 고려하여 이루어졌다. 이제까지 고체입자 충돌침식 실험은 빈번히 발생하는 대기상태(분위기)에서의 실험이 대부분이다. 하지만, 본 연구는 수중상태(분위기)에서의 실험에 직접 적용되는 것으로서 대부분의 실험장치가 대기상태(분위기)의 장치에서 보여지는 것과는 차이가 있다.

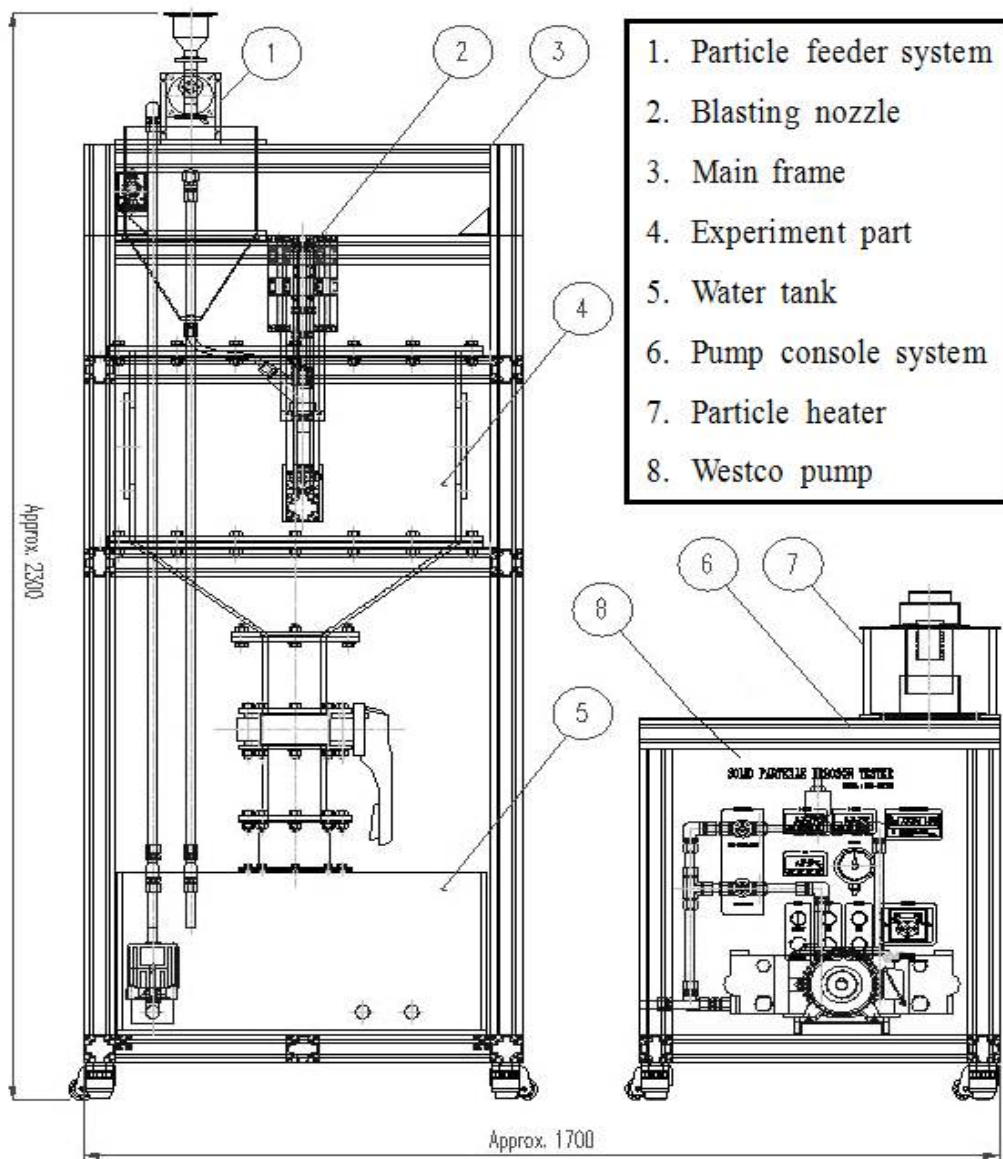


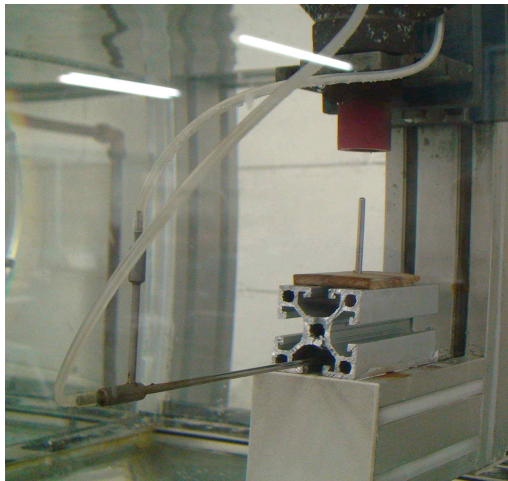
Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

또한, 고체입자 충돌침식은 발전 플랜트의 배관계에서 유체흐름에 포함된 입자나 불순물의 충격으로 인해 금속배관이 손상되는 현상이므로, 실험에 사용되는 시편으로는 대표적인 배관의 금속재료에 해당하는 탄소강과 알루미늄 재질을 택하여 실험을 수행하였다.

2.1 실험 장치

실험장치는 블라스팅 노즐(blasting nozzle)과 웨스코 펌프(wesco pump)를 활용하여 구성되었다. 실험 장치의 설계도를 Fig. 1에 나타내었다. 장치를 크게 나누면 노즐부,

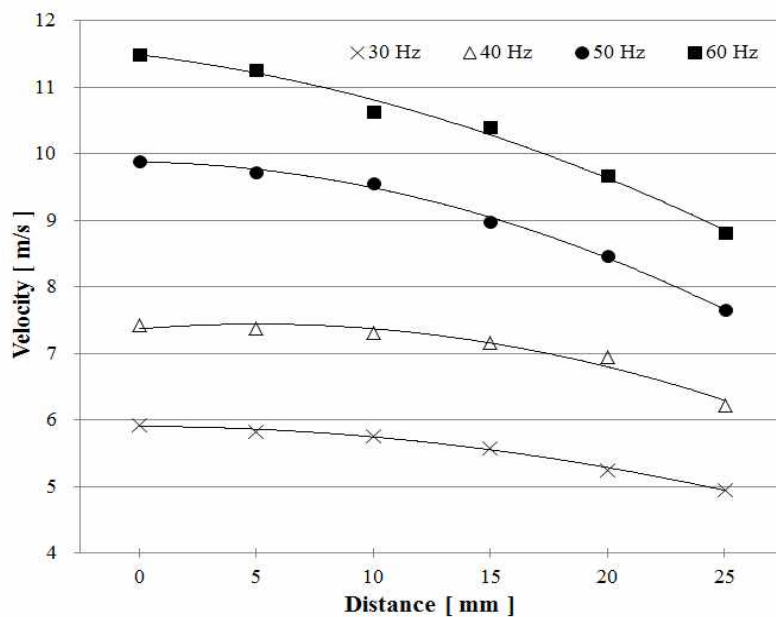
시편 제어부 그리고 고체 입자 투입부(solid particle feeder)이다. 우선, 노즐부를 살펴보면, 노즐은 블라스팅 노즐로써 입자투입기로부터 제공되는 고체입자와 펌프로부터 공급되는 물을 혼합하여 분사시키는 형태이다. 실험에 필요한 유속과 유량을 고려하여 노즐 직경은 4.8 mm를 선택하였다. 또한, 시편 제어부는 다양한 경우의 실험을 수행하기 위하여 높낮이와 충돌각도를 조절할 수 있도록 설계 및 제작되었으며, 충돌각도는 90°에서 45°까지 조절 가능하다. 마지막으로 입자 투입부의 경우에는 다양한 입자의 농도에 대한 실험이 가능하도록 제작하였으며, 스크류(screw)의



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Velocity measurement: (a) View of measuring velocity by pitot-tube (b) Flow visualization through blasting nozzle under water condition (c) Velocity measuring graph.

회전으로 고체입자가 투입되며, 스크류의 회전 속도를 제어함으로써 입자 투입의 양을 조절한다.

한편, 전체 실험장치를 제어할 수 있는 제어상자(control box)를 구성하여 안정적인 실험이 가능하도록 하였다. 유속과 유량을 조절하기 위하여 웨스코 펌프의 회전수를 조절할 수 있도록 인디케이터(indicator)를 장착하였으며, 입구 유량을 조절할 수 있도록 밸브를 설치하였다. 또한, 연속적인 실험이 진행되면 펌프의 특성상 실험 유체의 온도가 증가하기 때문에 이를 감시하기 위한 실험유체의 온도표시기를 장착하였고, 실험에 이용된 입자의 건조를 위한 입자 건조기(particle heater) 및 건조기의 온도 조절기와 잠금장치(on/off switch) 등을 설치하였다.

2.2 실험 조건

본 절에서는 실험 시에 적용된 조건을 제시한다. 재질은 A106B(High carbon steel), SS400(Low carbon steel), A6061(Aluminum)을 선택하여 세 가지 경우로 실험이 진행되며, 유속은 8.89 m/s, 9.72 m/s, 11.26 m/s를 선택하여 세 가지 경우로 실험을 진행하였다.

고체입자의 농도는 일반적으로 발전 설비에서 유체 유동 속에 함께 존재하는 고체입자의 농도가 100 ppm 이하인 점을 감안하여 70 ppm으로 고정하였으며, 고체입자의 농도는 물의 유량과 고체입자의 중량비로 계산하였다. 고체입자의 투입량은 입자투입기 스크류(screw)의 회전속도를 제어함으로써 조절하였으며, 유속은 펌프의 주파수 제어 및 시편과의 거리에 따라 조절하여 측정하였다.

2.3 속도 측정

블라스팅 노즐로부터 분사되는 유체의 속도는 피토크관(pitot-tube)을 이용하여 측정하였다. 유체의 속도는 펌프의 작동 주파수를 50 Hz와 60 Hz로 변동시키면서 측정하였으며, 노즐과 시편간의 거리는 노즐입구에서의 거리 0 ~ 25 mm를 5 mm 간격으로 변화시키면서 측정하였다.

Fig. 2(a)는 피토크관을 이용한 유속측정의 모습이며, Fig. 2(b)는 물속에서 블라스팅 노즐을 통해 분사되는 유체 유동 가시화의 모습이다. 속도측정의 결과를 살펴보면, Fig. 2(c)와 같이 50 Hz의 경우는 7.5 ~ 10 m/s의 속도가 측정되었으며, 60 Hz의 경우에는 9 ~ 11.5 m/s의 속도가 측정된 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서의 실험은 현장에서의 배관내에서의 감속에 영향을 미치는 속도가 8 m/s 이상인 점을 고려하여, 50 Hz에서 8.89 m/s와 9.72 m/s, 60 Hz에서 11.26 m/s의 속도로 실험이 진행되었다.

유체의 속도는 피토크관을 통해 얻어진 차압(differential pressure)을 다음 식에 적용하여 계산하였다. 여기서, k 값은 일반적으로 피토크관에 적용되는 0.73을 적용하였다.^{5,6)}

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

피토크관을 이용한 속도 측정결과의 신뢰성 확보를 위해 동일한 조건에서의 수치해석을 통해서 얻은 데이터와 비교 과정을 거쳤고, 비교 결과 유사한 속도분포를 보였으며, 노즐과 시편간의 거리가 멀어질수록 급격하게 속도가 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 사항은 충돌면적의 확인과정에서 충격량과 속도관계의 최적화 수치해석을 통해 검증하는 과정에서도 알 수 있었다.

2.4 충돌면적 확인

고체입자 충돌침식으로 인한 시편두께의 침식변화를 살펴보기 위하여 실질적으로 침식이 발생하는 면적을 확인하고, 침식량의 계측을 위해 노즐로부터 시편에 직접적으로 영향을 미치는 분사면적을 확인할 필요성이 있다.

본 연구에서의 실험은 펌프 주파수 50 Hz와 60 Hz에서 실험이 진행되었다. 실험에서의 물의 유량과 고체입자의 투입량, 고액비, 유속 및 충격량 등을 Table 1에 나타내었다. 보고된 문헌에 따르면, 고체입자의 크기가 100 μm 이하로 내려갈 때, 침식률은 급격히 저하된다고 알려져 있다.⁷⁾ 따라서 투입되는 고체입자의 크기는 250 μm 를 선택하였다. 실험에 사용된 고체입자를 광학현미경(optical microscope)을 이용하여 촬영한 모습은 Fig. 3(a)에 나타내었다.

고체입자가 포함되어 분사되는 유체의 흐름에 의해 시편이 침식을 일으키는 유동의 속도 측정 구역을 Fig. 3(b)에 나타내었으며, 충돌면적 확인은 실험의 케이스별에 해당하는 고액비에서 노즐로부터 분사되는 유동을 캠코더를 이용하여 촬영한 뒤, 실제 노즐과 시편 사이의 거리, 그리고 이미지(image)상에 나타난 노즐과 시편사이의 거리 측적을 적용하여 계산하였다. 계산결과로는 고액비가 증가할수록 유동이 시편에 접촉하는 면적은 증가하였고, 충격량이 커지는 것을 알 수 있지만, 충격량 수치의 비교로부터 알 수 있듯이 그 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 그 이유로는 수중상태에서의 고체입자 투입량이 물의 비중량에 비해 고액비에 따른 고체입자가 포함된 충돌유체의 중량이 그다지 크지 않기

Table 1. Experimental conditions according to the velocity of water and particle flux

Water flux, Q_w [kg/s]	Particle flux, Q_s [kg/s]	$Q_s / Q_w \alpha$ [$\times 10^5$]	Velocity, v [m/s]	Impulse [$\times 10^6, \text{kg}\cdot\text{m/s}^2$]
0.179	0.0000119	6.65	8.89	105
0.179	0.0000119	6.65	9.72	115
0.208	0.0000147	7.07	11.26	165

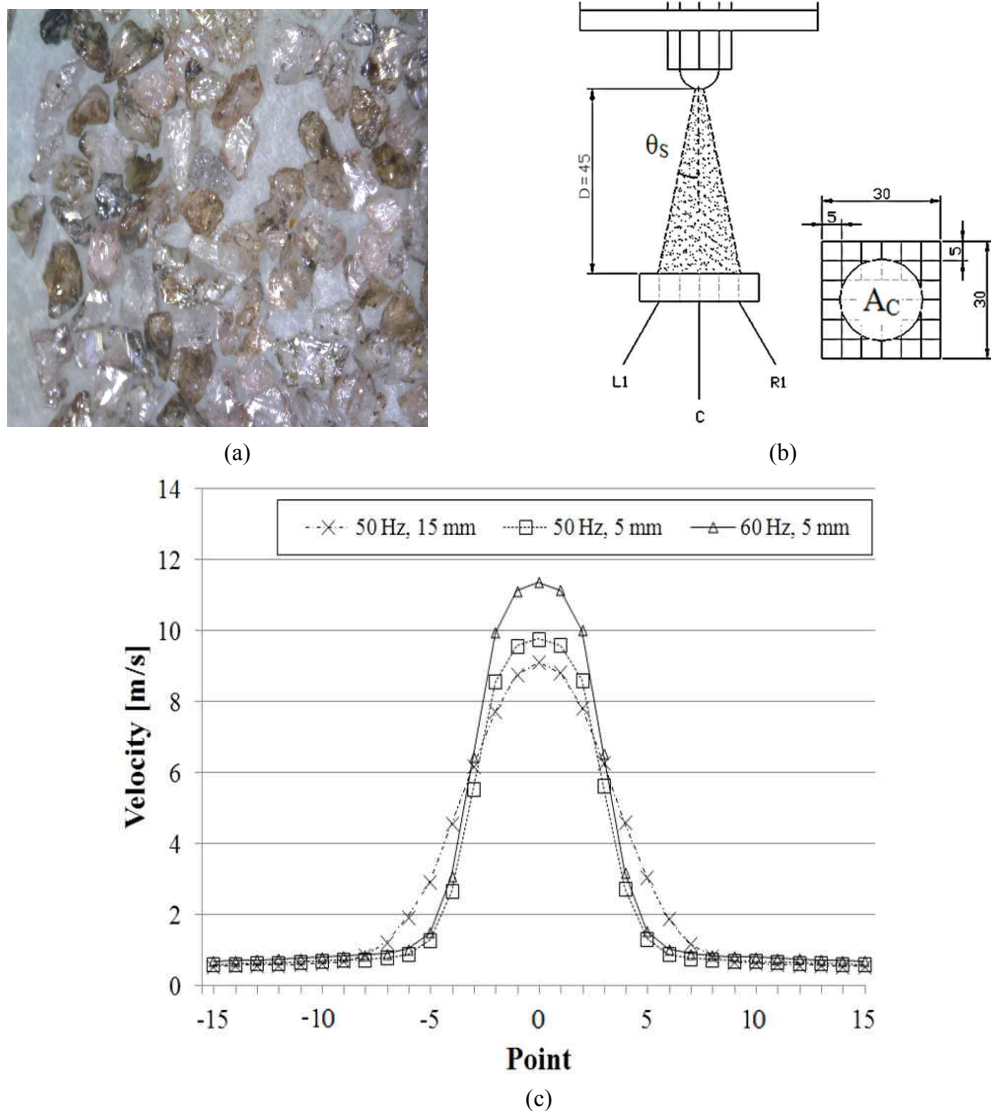


Fig. 3. Erosion effects of metal surface by solid particle impingement: (a) Optical microscope image of solid particle (b) Position of velocity measurement (c) Numerical analysis for optimal contact area.

때문이다. 따라서 시편 재료의 변화에 있어서는 충격량 보다는 고체입자 충돌속도의 변화에 따른 결과로 침식률을 살펴보기로 하였다.

충돌 면적은 노즐로부터 고체입자가 포함된 유체가 분사되어 시편에 충격이 가해지는 최적의 유동속도에 대한 최적화 과정을 해석을 통하여 검증이 이루어졌으며, 수치해석의 결과를 Fig. 3(c)에 나타내었다.⁸⁾ 예비실험을 통한 결과로 5 m/s이하에서는 침식률이 현저히 적은 점을 확인하였으며, 수치해석을 통한 속도분포 확인 결과로서 침식에 영향을 미치는 범위의 유속이 나타나는 지점은 중심을 기준으로 생각할 때, $-7 \sim 7$ mm의 범위를 침식 유효 접촉면적으로 판단된다.⁹⁾

3. 결과 및 검토

실험은 시간 경과에 따른 시편의 표면 변화와 무게 변화 그리고 경도 변화에 주목하여 진행되었다. 예비실험을 거쳐 본 실험에서는 시편과 실험변수에 따라 30일(720 hours)에 걸쳐 실험이 진행되었으며, 7일(168 hours)을 주기로 표면 촬영 및 무게 변화 그리고 경도 변화를 관찰하였다. 실험에 따른 시편 표면의 변화를 육안으로 확인하기 위한 방법으로 캠코더(camcorder) 촬영을 수행하였고, 시편 표면의 조직적 변화를 관찰하기 위하여 광학현미경(optical microscope) 및 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 시편의 표면을 촬영하였으며, 비커스경도계(vickers

hardness tester)를 이용하여 실험 후 시편의 경도를 측정하였다.

3.1 표면 변화

유속에 따른 시편의 변화 모습을 살펴보면, 유속의 증가와 함께 침식량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 노즐로부터 분사되는 유체와 직접적으로 충돌하는 시편의 중심부에서 가장 많은 침식이 발생하였으며, 중심부 주위에 고체입자 충돌침식의 결과로 보이는 기공이 관찰되었다.

광학현미경(optical microscope)을 이용한 촬영시의 배율은 1, 50, 100, 400, 1200배를 선택하여 시편 중앙 및 중심을 기준으로 촬영하였으며, 50배와 100배의 촬영 결과에서 고체입자 충돌침식의 결과를 가장 잘 관찰할 수 있었다. 광학현미경을 이용하여 촬영된 시편들의 표면모습을 Fig. 4에 나타내었다. 광학현미경을 이용하여 표면을 촬영한 결과는 시편의 변색정도로 관찰되었으나, 육안으로 침식의 깊이를 확인할 정도의 침식은 발생하지 않은 것으로 확인되었다. 따라서 시편조직의 변화를 살펴보기 위하여 2000배의 배율을 선택한 SEM촬영을 실시하였고, Fig. 5에 나타내었다. SEM촬영 결과, 노즐로부터 분사되는 고체입자에 의한 충돌침식이 다소 진행되는 것을 확인할 수가 있다.

시편의 재질별 표면 변화를 비교해 보면, 탄소강 계열인 A106B와 SS400은 다수의 기공을 형성하며, 침식이 중앙 부위에 집중되어 있는 것을 확인할 수 있다. 반면, 알루미늄

계열인 A6061의 경우에는 다수의 기공이 관찰되지 않는다. 이는 연성의 성질을 갖는 알루미늄의 특성으로 판단된다. 즉, 탄소강의 경우는 고체입자가 재료에 부딪치므로 인해 침식의 현상이 탄소강의 표면을 다수의 기공으로 형성하여 나타나지만, 알루미늄의 경우에는 재료 자체의 무른 성질로 인해 침식현상이 기공이 아닌 두께 감소로 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 다음 절에서 확인할 수 있다.

3.2 무게 변화

재질에 따른 무게 감소 경향의 관찰 결과로서 알루미늄 계열인 A6061이 가장 큰 무게 감소량을 보였으며, 탄소강 계열인 A106B가 가장 적은 무게 감소량을 나타냈다. 유속에 따른 무게 변화의 관찰 결과에서는 유속과 침식량의 변화가 비례하는 것으로 나타났다. A106B, SS400, A6061의 무게 변화량을 통해서 시편의 두께변화를 계산했다.

두께변화의 계산에 이용된 각 재질의 밀도는 A106B의 경우가 7800 kg/m^3 이고, SS400의 경우가 7850 kg/m^3 이며, A6061의 경우가 2700 kg/m^3 이다. 각 재질의 유속에 따른 실험 후 두께 감소의 변화를 Fig. 6 (a), (b), (c)에 나타내었다.

3.3 경도 변화

시편재질의 경도변화에 대한 관찰은 표면 관찰 및 무게

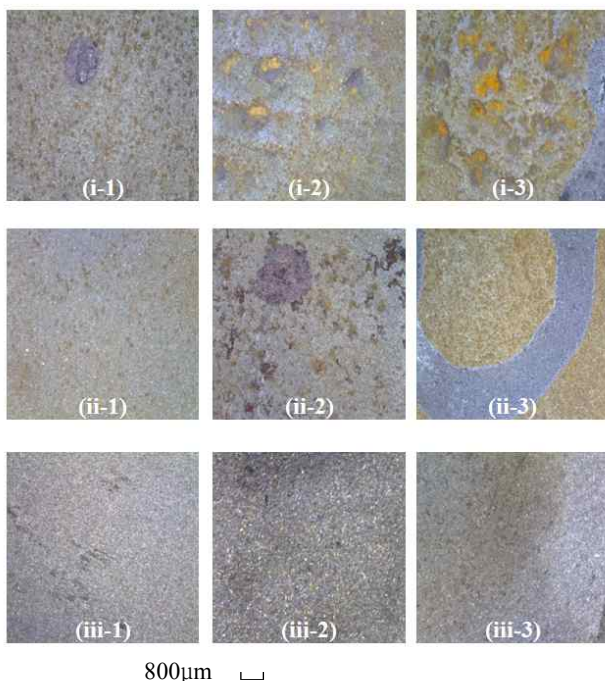


Fig. 4. Optical microscope images for change of specimen surface. (i: A106B, ii: SS400, iii: A6061, 1: 8.89 m/s, 2: 9.72 m/s, 3: 11.26 m/s)

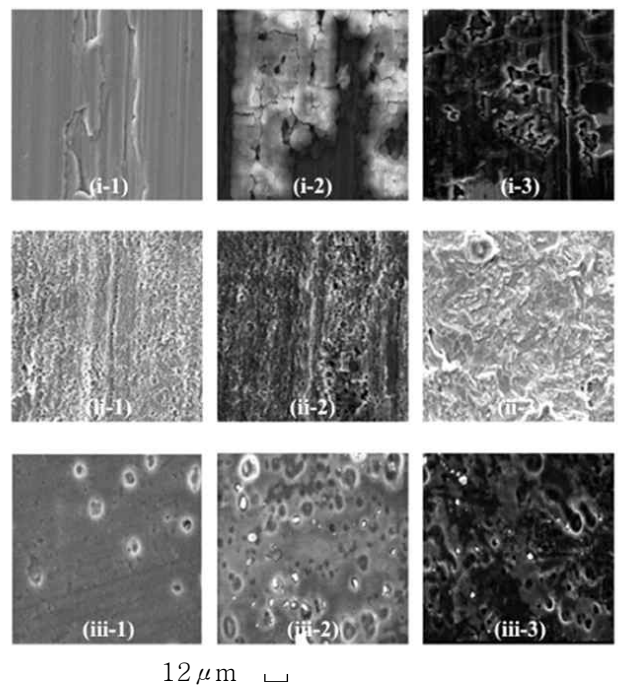


Fig. 5. Scanning Electron Micrometer images for change of specimen surface.

(i: A106B, ii: SS400, iii: A6061, 1: 8.89 m/s, 2: 9.72 m/s, 3: 11.26 m/s)

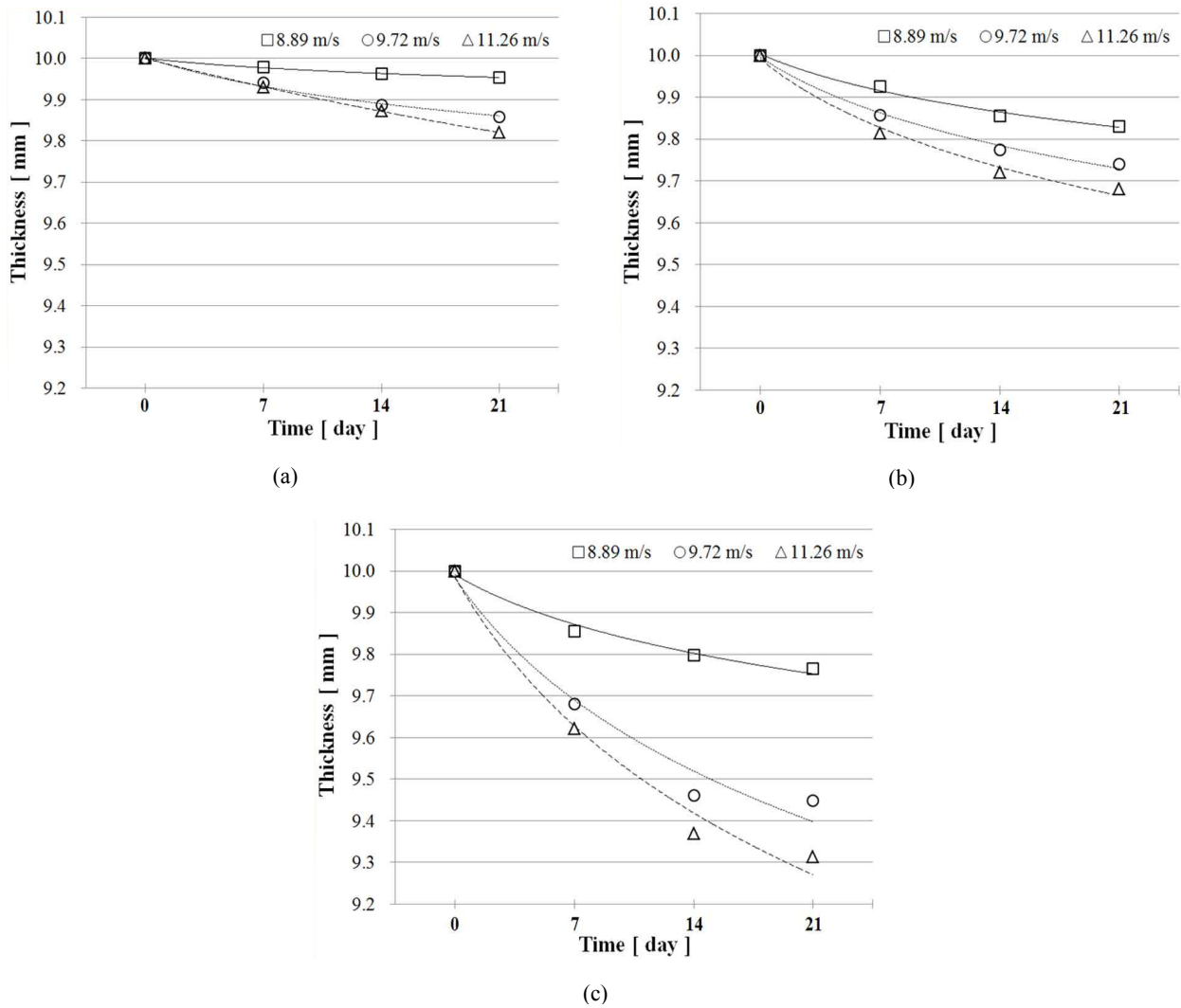


Fig. 6. Decrease of weight(thickness): (a) A106B (b) SS400 (c) A6061.

측정과 동일하게 7일(168 hours) 간격으로 이루어졌으며, 시편의 표면은 고체입자 충돌침식으로 인한 손상이 발생했기 때문에 경도 측정 방식의 특성상 반복적인 측정 후의 평균값을 이용하는 것이 타당성이 있다고 판단하여, 침식의 중심부 주위로 30개 위치의 경도 측정을 수행한 후 평균값을 적용하였다. 또한, 실험을 수행하는 동안 고체입자 충돌침식에 노출되지 않은 시편 후면의 경도도 측정하였다. 그 결과, 침식 발생이 없는 후면의 경도는 변화가 없었다. 따라서 경도의 변화는 고체입자 충돌침식의 결과라고 볼 수 있다.

재질에 따른 경도 변화를 살펴보면, 알루미늄 계열의 A6061은 경도 변화가 미미하였으며, 탄소강 계열의 A106B, SS400의 순서로 경도 변화가 심한 것으로 나타났다.¹⁰⁾

유속에 따른 경도 변화의 관찰 결과, 고체입자 충돌침식이 진행될수록 경도는 감소하였으나, 유속이 증가함에 따라

경도감소의 기울기가 증가하는 경향은 나타나지 않았다. 대표적으로 Fig. 7은 비커스경도계로 측정된 11.26 m/s에서의 경도 변화에 따른 각 재료의 경향을 나타낸 것이다.

3.4 결과 분석

각 재질별 유속에 따른 시편의 무게 변화를 관찰하였고, 이들 데이터를 토대로 유속에 따른 침식률을 계산하였다. 계산방법은 아래와 같이 침식률의 계산에 있어서 보편적으로 사용되는 시편의 무게 감소량과 투입된 입자의 무게와의 관계를 통해 계산되었다.

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

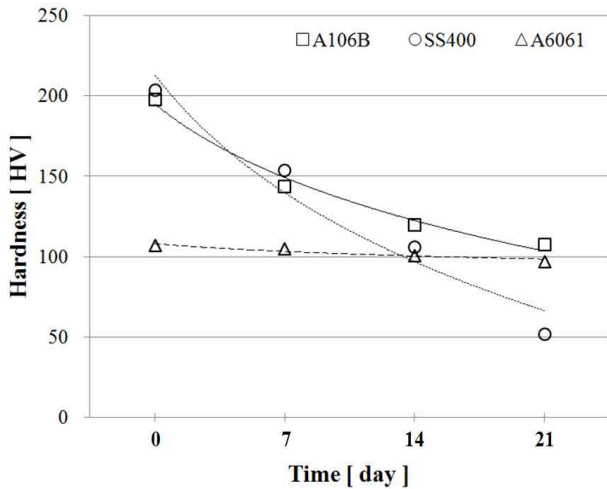


Fig. 7. Hardness change (11.26m/s).

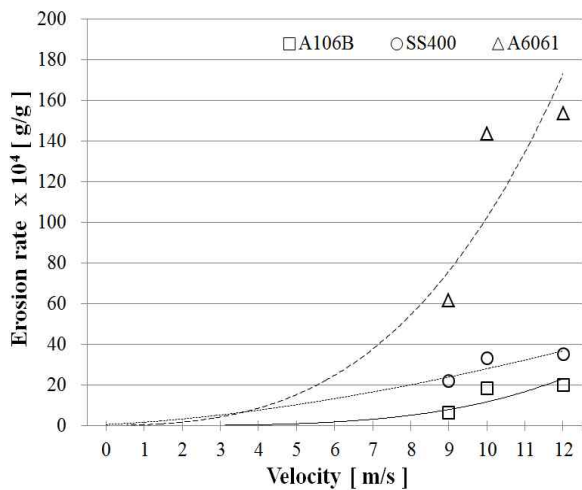


Fig. 8. Erosion rate according to velocity.

여기서, $W_{specimen}$ 은 시편의 무게 변화량을 의미하며, $W_{erodent}$ 은 투입된 고체입자를 포함한 전체 무게를 의미한다.¹¹⁾

각 재질별 충돌 속도에 따른 침식률을 Fig. 8에 나타내었다. 이를 살펴보면, 충돌 속도의 증가에 따른 침식률은 알루미늄 계열인 A6061이 가장 크게 나타났으며, 탄소강 계열인 A106B와 SS400의 경우가 유사한 기울기를 갖는 것으로 확인되었다.

실험을 통해 얻은 데이터를 근거로 하여 방정식을 근사적으로 구하는 방법인 최소제곱법(least squared method)을 사용하여 얻은 추세선을 통해서 계산된 침식률과 유속간의 관계는 아래의 식과 같다. 여기서 ER은 침식률, V는 충돌 속도를 나타낸다.

$$A106B : ER = 0.0055V^{3.1389} \quad (3)$$

$$SS400 : ER = 0.0327V^{1.8187} \quad (4)$$

$$A6061 : ER = 0.00004V^{4.2746} \quad (5)$$

4. 결론

본 연구에서는 고체입자 충돌침식으로 인한 배관 손상현상에 대한 대책을 마련하기 위하여 예측이론을 개발하고, 이에 따른 예측관리 기술을 확보하는 것에 목적이 있으며 배관재질, 고체입자의 농도 그리고 유속에 따른 침식량 변화를 살펴보고자 하였다.

A106B, SS400, A6061 등 재질에 따른 세 가지 경우와 8.89 m/s, 9.72 m/s, 11.26 m/s의 속도 세 경우에 대한 실험을 통해서 재질에 따른 침식량 변화와 침식률 및 경도변화 등을 확인할 수 있었다. 실험결과를 살펴보면, A6061의 침식이 가장 심했으며, A106B의 침식이 가장 적게 나타났다. 실험은 현재 계속 진행되고 있으며, 계속되는 연구에서는 입자 농도 및 충돌 각도에 따른 고체입자 충돌침식의 상관관계를 통해서 침식률을 도식화할 예정이다. 이를 기반으로 각 충돌속도에 따른 침식률을 확인하고, 이를 통해서 배관 감육의 예측식을 제안하였다.

예측식의 확보는 원자력 및 화력플랜트의 배관계통에서 최근 나타나고 있는 고체입자 충돌침식으로 인한 손상에 대비할 수 있는 배관의 점검 또는 교체의 시기를 예측할 수 있는 근거가 될 것으로 예상된다. 따라서 본 연구의 결과를 통해서 배관 예측 관리시스템의 구축에 많은 도움이 될 것으로 기대한다.

후 기

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

References

1. I. Kelis, P. Kulu, Solid Particle Erosion; Occurrence, Prediction and Control, p.14, Springer (2007).
2. KEPCO, Monitoring Corrosion in Nuclear Piping System, Topical Report TR.96 NW 01. J1999. 346 (1998).
3. A. Palo, Recommendation for Controlling Cavitation, Flashing, Liquid Droplet Impingement, and Solid Particle Erosion in Nuclear Power Plant Piping System, EPRI, CA:2004. 1011231 (2004).
4. K. H. Kim, K. M. Hwang and W. Lee, Apparatus of testing SPE(Solid Particle Erosion) induced by water and solid particle mixture flow, Korean Patent 1020110002333 (2011).
5. K. H. Kim, Y. S. Cho and K. M. Hwang, A Study on the Development of Prediction System for Pipe Wall Thinning

- Caused by Liquid Droplet Impingement Erosion, *Corros. Sci. Tech.*, **12**, 125 (2013).
6. 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).
 7. S. M. Wiederhorn and B. R. Lawn, Strength Degradation of Glass Impacted with Shape Particles, *J. Am. Ceram. Soc.*, **62**, 66 (1979).
 8. S. K. Jeong, K. Shimoyama, Review of Data Mining for Multidisciplinary Design Optimization, *Proc. Inst. Mech. Eng. G: J. Aerospace Eng.*, **225**, 469 (2011).
 9. Y. K. Choi, J. B. Lee, Y. S. Seo and J. H. Lee, Numerical Study on the Particle Movement of a Particle-Laden Impingement Jet, *Transaction of K.S.M.E.(B)*, **25**, 1802 (2001).
 10. A. K. Cousins and I. M. Hutchings, *Proc. 6th Int. Cong. on Erosion by Liquid and Solid Impact*, Cavendish Laboratory (1983).
 11. Mars. G. Fontana, *Corrosion Engineering*, 3rd ed., p. 25, pp. 70~71, pp. 95~97, pp. 485~487, McGraw Hill (2008).